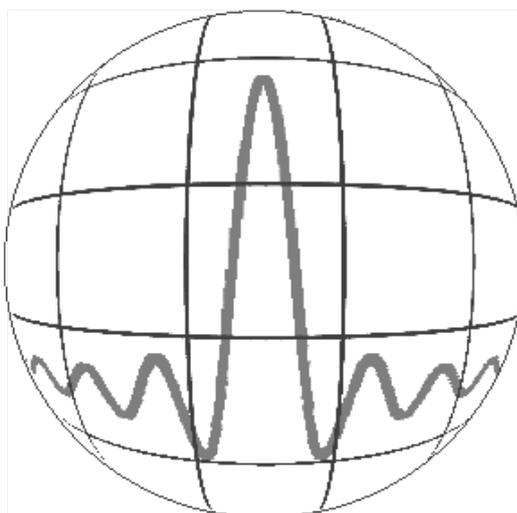


Н.А. Каратаева

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

**Дискретная обработка сигналов
и цифровая фильтрация**

**Методические указания
по выполнению курсовой работы**



ТОМСК-2012

Министерство образования и науки
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования

**Томский государственный университет систем
управления и радиотехники
(ТУСУР)**

Кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР)

Н.А. Каратаева

РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

**Дискретная обработка сигналов
и цифровая фильтрация**

**Методические указания
по выполнению курсовой работы**

Рецензент: профессор кафедры ТОР ТУСУР
д.т.н. **Пуговкин А.В.**

Каратаева Н.А.

Радиотехнические цепи и сигналы. Дискретная обработка сигналов и цифровая фильтрация: Методические указания по выполнению курсовой работы. – Томск: Томский межвузовский центр дистанционного образования,
2012.– 70 с.

Изложены цель, техническое задание, содержание, исходные данные, варианты заданий и пример выполнения курсовой работы по теме «Дискретная обработка сигналов и цифровая фильтрация». Работа предназначена для студентов всех форм обучения, изучающих дисциплины «Радиотехнические цепи и сигналы» и «Цифровая обработка сигналов».

Разработчики электронной версии:
Д.А. Макурин, П.С. Киселёв

© Каратаева Н.А., 2012

© Факультет дистанционного обучения, 2012

Содержание

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ЗАДАНИЕ.....	4
1.1. ЗАДАНИЕ НА ПЕРВУЮ ЧАСТЬ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	4
1.2. ЗАДАНИЕ НА ВТОРУЮ ЧАСТЬ КУРСОВОЙ РАБОТЫ. ВАРИАНТ I	5
1.3. ЗАДАНИЕ НА ВТОРУЮ ЧАСТЬ КУРСОВОЙ РАБОТЫ. ВАРИАНТ II.....	5
2 ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ К КУРСОВОЙ РАБОТЕ.....	6
2.1 ПЕРЕЧЕНЬ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ.....	6
2.2 РАСЧЁТ ШИФРОВ.....	6
2.3 ТАБЛИЧНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ И ШИФРОВ	6
2.4 ПРИМЕР ВЫБОРА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ПО ШИФРАМ	28
3 ПРИМЕРНОЕ СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	28
3.1 АНАЛОГОВАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛА	28
3.2 АНАЛИЗ АНАЛОГОВОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ	28
3.3 РАСЧЕТ И ПОСТРОЕНИЕ ОТКЛИКА НА ВЫХОДЕ АНАЛОГОВОЙ ЛЭЦ	29
3.4 ДИСКРЕТНАЯ ОБРАБОТКА АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА	29
3.5 СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ПО ЗАДАННОЙ АНАЛОГОВОЙ ЛЭЦ	29
3.6 СИНТЕЗ РЕКУРСИВНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ ПО КЛАССИЧЕСКОМУ НЧ-ПРОТОТИПУ	30
3.7 СИНТЕЗ ТРАНСВЕРСАЛЬНЫХ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ МЕТОДОМ ОКОННЫХ ФУНКЦИЙ	30
4 УКАЗАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	30
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	31
ПРИЛОЖЕНИЕ. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕННОЙ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	32
П1 ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ	33
П2 СОДЕРЖАНИЕ	34
П3 ВВЕДЕНИЕ.....	37
П4 СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА	39
П4 АНАЛИЗ АНАЛОГОВОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ.....	45
П5 ДИСКРЕТИЗАЦИЯ АНАЛОГОВОГО СИГНАЛА.....	49
П6 СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА МЕТОДОМ ИНВАРИАНТНОСТИ ИМПУЛЬСНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ.....	56
П7 СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО ФИЛЬТРА МЕТОДОМ БИЛИНЕЙНОГО Z- ПРЕОБРАЗОВАНИЯ	61
П8 СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА ЧЕБЫШЕВА.....	63
П9 ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТОВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЦИФРОВЫХ ФИЛЬТРОВ.....	68

Введение

Одним из новых и перспективных направлений современной обработки радиосигналов является цифровая фильтрация. В ее основе лежит преобразование аналоговых сигналов в последовательность чисел и обработка этой последовательности в цифровом вычислительном устройстве, роль которого может играть как универсальная ЭВМ, так и специализированный цифровой процессор.

Применение в радиоэлектронике цифровой фильтрации открывает дополнительные возможности при обработке сигналов. В частности, могут быть реализованы сложные алгоритмы фильтрации, которые аналоговыми методами в ряде случаев вообще не удастся осуществить. С другой стороны, возможен синтез в цифровой форме аналогов известных радиотехнических устройств различного функционального назначения, а именно: фильтров, преобразователей частоты, детекторов и т.п.

Настоящая курсовая работа ставит своей целью привить студентам практические навыки в области дискретной и цифровой обработки сигналов на примере решения конкретной задачи, включающей в себя элементы, как синтеза, так и анализа цифрового фильтра.

Задание на курсовую работу состоит из двух частей. Первая часть включает подготовку аналогового сигнала к цифровой обработке. Вторая часть содержит синтез и анализ цифрового фильтра в двух вариантах *по выбору студента*.

1 Задание

1.1. Задание на первую часть курсовой работы

1.1.1 Дискретизировать заданный шифром сигнал и восстановить аналоговый сигнал, используя ряд Котельникова. При определении наивысшей частоты спектра сигнала использовать пороговый критерий (для $f > f_{max}$ амплитуды спектральных составляющих не превышают уровня 0.1 от максимальной).

1.1.2 Рассчитать спектр дискретной последовательности, определенной в пункте 1.1. Построить график.

1.1.3 Найти Z-преобразования найденной в пункте 1.1.1 дискретной последовательности.

1.1.4 Определить дискретное преобразование Фурье (ДПФ) той же дискретной последовательности, Построить график. Восстановить аналоговый сигнал, используя тригонометрический ряд Фурье.

1.1.5 По результатам пункта 1.1.4 найти исходную дискретную последовательность. Построить график.

1.1.6 Произвести сравнение результатов вычислений:

1) сравнить форму спектра дискретизированной последовательности со спектром исходного аналогового сигнала;

- 2) установить связь между:
- а) результатом Z -преобразования и спектральной плотностью дискретной последовательности;
 - б) между спектром исходного периодического аналогового сигнала и дискретными отсчетами его спектральной плотности.

1.2. Задание на вторую часть курсовой работы. Вариант I

1.2.1 Для заданной аналоговой линейной электрической цепи найти операторное выражение передаточной функции $K(p)$ и импульсную характеристику $g(t)$.

1.2.2 Осуществить синтез цифровой цепи методом билинейного Z -преобразования по найденной в пункте 1.2.1 $K(p)$. Построить схему алгоритма цифрового фильтра (ЦФ).

1.2.3 Произвести синтез ЦФ с помощью метода инвариантности импульсной характеристики (ИИХ) по найденной в пункте 1.2.1 $g(t)$. Построить схему алгоритма ЦФ.

1.2.4 Найти отклик ЦФ в виде выходной дискретной последовательности на входную дискретную последовательность, полученную в пункте 1.1.1, на основе выполнения пунктов 1.2.2 или 1.2.3 с помощью обратного Z -преобразования (либо с помощью алгоритма свертки) по выбору студента.

1.2.5 Сделать выводы о сравнении методов синтеза по трудоемкости, сложности конечного результата, о физической достоверности полученной формы отклика в реальных условиях прохождения дискретного сигнала через синтезированную цепь.

1.3. Задание на вторую часть курсовой работы. Вариант II

1.3.1 Методом билинейного Z -преобразования синтезировать цифровой фильтр различного назначения: фильтр нижних частот (ФНЧ), фильтр верхних частот (ФВЧ), полосовой фильтр (ПФ) или режекторный фильтр (РФ) с заданными граничными частотами полос пропускания и заграждения. При этом в зависимости от варианта в качестве аналогового фильтра необходимо использовать классический низкочастотный (НЧ-) прототип одного из двух типов:

а) ФНЧ с максимально плоской амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) (фильтр Баттерворта), обеспечивающий затухание АЧХ в полосе пропускания не более α , дБ и затухание в полосе заграждения не менее β дБ;

б) ФНЧ с равноволновой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) (фильтр Чебышева), обеспечивающий затухание АЧХ в полосе пропускания не более α , дБ и затухание вне полосы не менее β дБ.

1.3.2 Рассчитать амплитудно-частотную и импульсную характеристики синтезированного цифрового фильтра.

1.3.3 Определить вид дискретного сигнала на выходе фильтра при воздействии на его вход последовательности отсчетов заданного входного сигнала $x(t)$.

2 Исходные данные к курсовой работе

2.1 Перечень исходных данных

Исходными данными являются:

- графическая модель аналогового сигнала (таблица 1);
- временная структура аналогового сигнала (таблица 2);
- модель линейной электрической цепи (таблица 3);
- вариант цифрового фильтра (таблица 4);
- параметры затухания и граничные частоты цифрового фильтра нижних частот (ФНЧ) (таблица 5);
 - параметры затухания и граничные частоты цифрового фильтра верхних частот (ФВЧ) (таблица 6);
 - параметры затухания и граничные частоты цифрового полосового фильтра (ПФ) (таблица 7);
 - параметры затухания и граничные частоты цифрового режекторного фильтра (РФ) (таблица 8).

2.2 Расчёт шифров

Пример расчёта шифров на основании последних двух цифр пароля (*****37).

$$N_1 N_2 = \frac{37 \cdot 66}{100} = 24,4. \quad N_1 N_2 = 24$$

$$N_3 N_4 = \frac{37 \cdot 39}{100} = 14,4. \quad N_3 N_4 = 14.$$

$$N_5 N_6 = \frac{37 \cdot 43}{100} = 15,9. \quad N_5 N_6 = 15.$$

$$N_7 N_8 = \frac{37 \cdot 32}{100} = 11,8. \quad N_7 N_8 = 11.$$

$$N_9 N_{10} = \frac{37 \cdot 100}{100} = 37. \quad N_9 N_{10} = 37.$$

2.3 Табличное представление исходных данных и шифров

Таблица 1 – Модели аналоговых сигналов

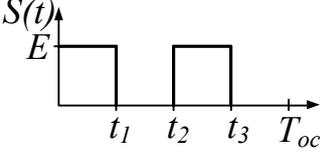
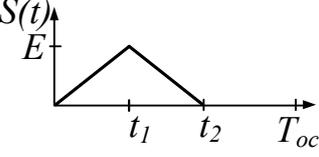
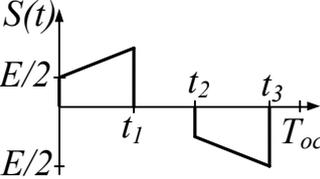
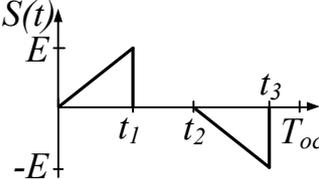
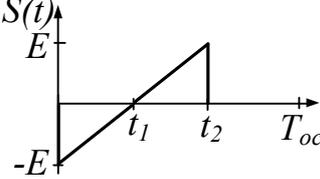
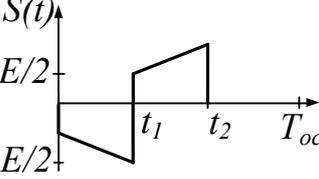
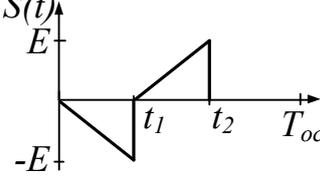
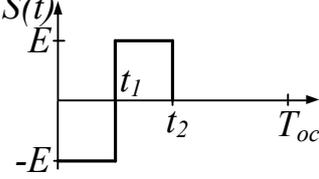
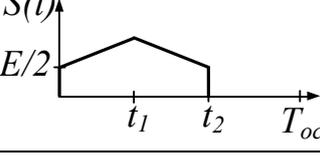
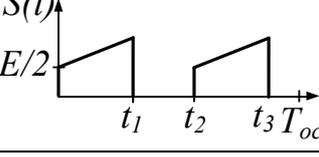
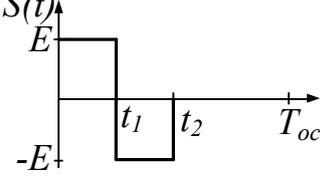
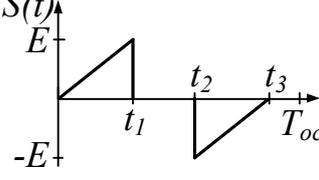
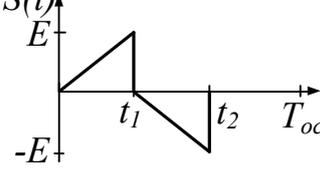
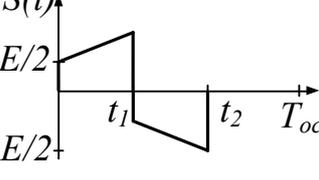
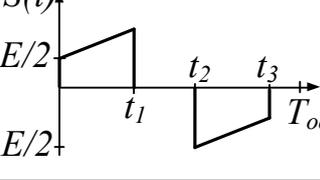
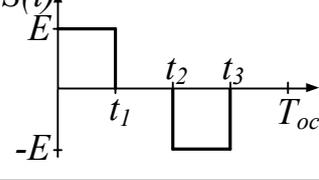
Шифр N_1N_2	График сигнала	Шифр N_1N_2	График сигнала
01		09	
02		10	
03		11	
04		12	
05		13	
06		14	
07		15	
08		16	

Таблица 1 (продолжение)

Шифр N_1N_2	График сигнала	Шифр N_1N_2	График сигнала
17		25	
18		26	
19		27	
20		28	
21		29	
22		30	
23		31	
24		32	

Таблица 1 (продолжение)

Шифр N_1N_2	График сигнала	Шифр N_1N_2	График сигнала
33		41	
34		42	
35		43	
36		44	
37		45	
38		46	
39		47	
40		48	

Таблица 1 (окончание)

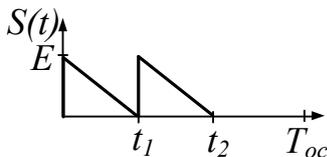
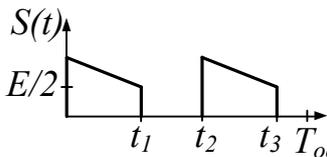
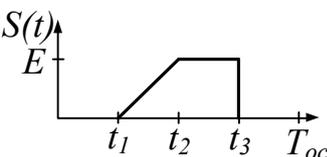
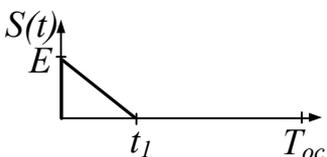
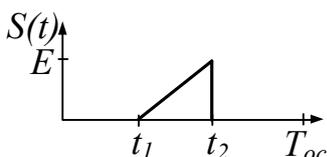
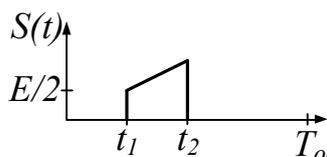
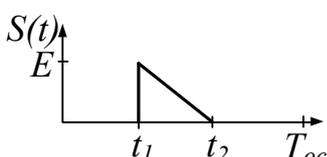
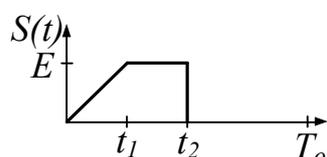
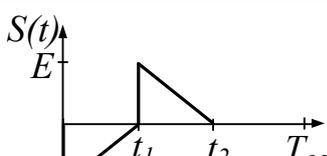
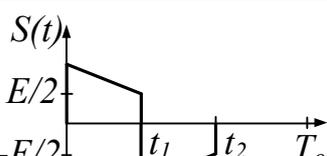
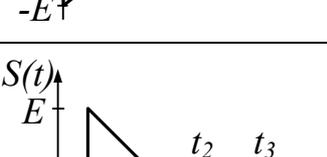
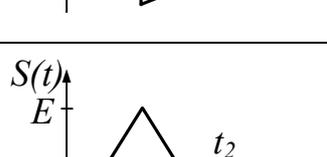
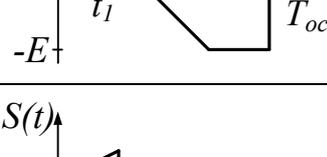
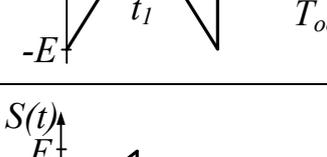
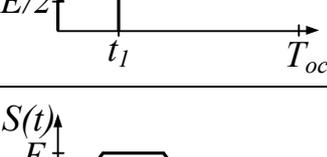
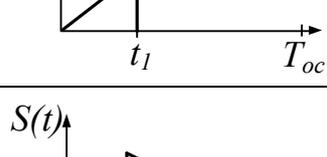
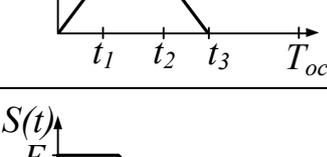
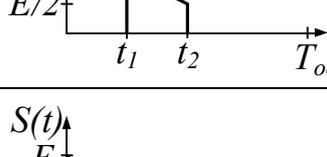
Шифр N_1N_2	График сигнала	Шифр N_1N_2	График сигнала
49		58	
50		59	
51		60	
52		61	
53		62	
54		63	
55		64	
56		65	
57		66	

Таблица 2 – Временная структура аналоговых сигналов t_1, t_2, t_3, T_{oc}

$N_3 N_4$	t_1	t_2	t_3	T_{oc}
01	10 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$4t_1$
02	20 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$3,5t_1$
03	30 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$3,5t_1$
04	40 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$4t_1$
05	50 мкс	$1,5t_1$	$3t_1$	$4t_1$
06	60 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$4t_1$
07	70 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$3,5t_1$
08	80 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$3,5t_1$
09	90 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$4t_1$
10	100 мкс	$1,5t_1$	$3t_1$	$4t_1$
11	110 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$4t_1$
12	120 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$3,5t_1$
13	130 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$3,5t_1$
14	140 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$4t_1$
15	150 мкс	$1,5t_1$	$3t_1$	$4t_1$
16	160 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$4t_1$
17	170 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$3,5t_1$
18	180 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$3,5t_1$
19	190 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$4t_1$
20	200 мкс	$1,5t_1$	$3t_1$	$4t_1$
21	210 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$4t_1$
22	220 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$3,5t_1$
23	230 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$3,5t_1$
24	240 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$4t_1$
25	250 мкс	$1,5t_1$	$3t_1$	$4t_1$
26	260 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$4t_1$
27	270 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$3,5t_1$
28	280 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$3,5t_1$
29	290 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$4t_1$
30	300 мкс	$1,5t_1$	$3t_1$	$4t_1$
31	310 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$4t_1$
32	320 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$3,5t_1$
33	330 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$3,5t_1$
34	340 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$4t_1$
35	350 мкс	$1,5t_1$	$3t_1$	$4t_1$
36	360 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$4t_1$
37	370 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$3,5t_1$
38	380 мкс	$2t_1$	$3t_1$	$3,5t_1$
39	390 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$4t_1$

Таблица 3 – Модели линейных электрических цепей (аналоговых фильтров-прототипов). Шифр $N_5 N_6$

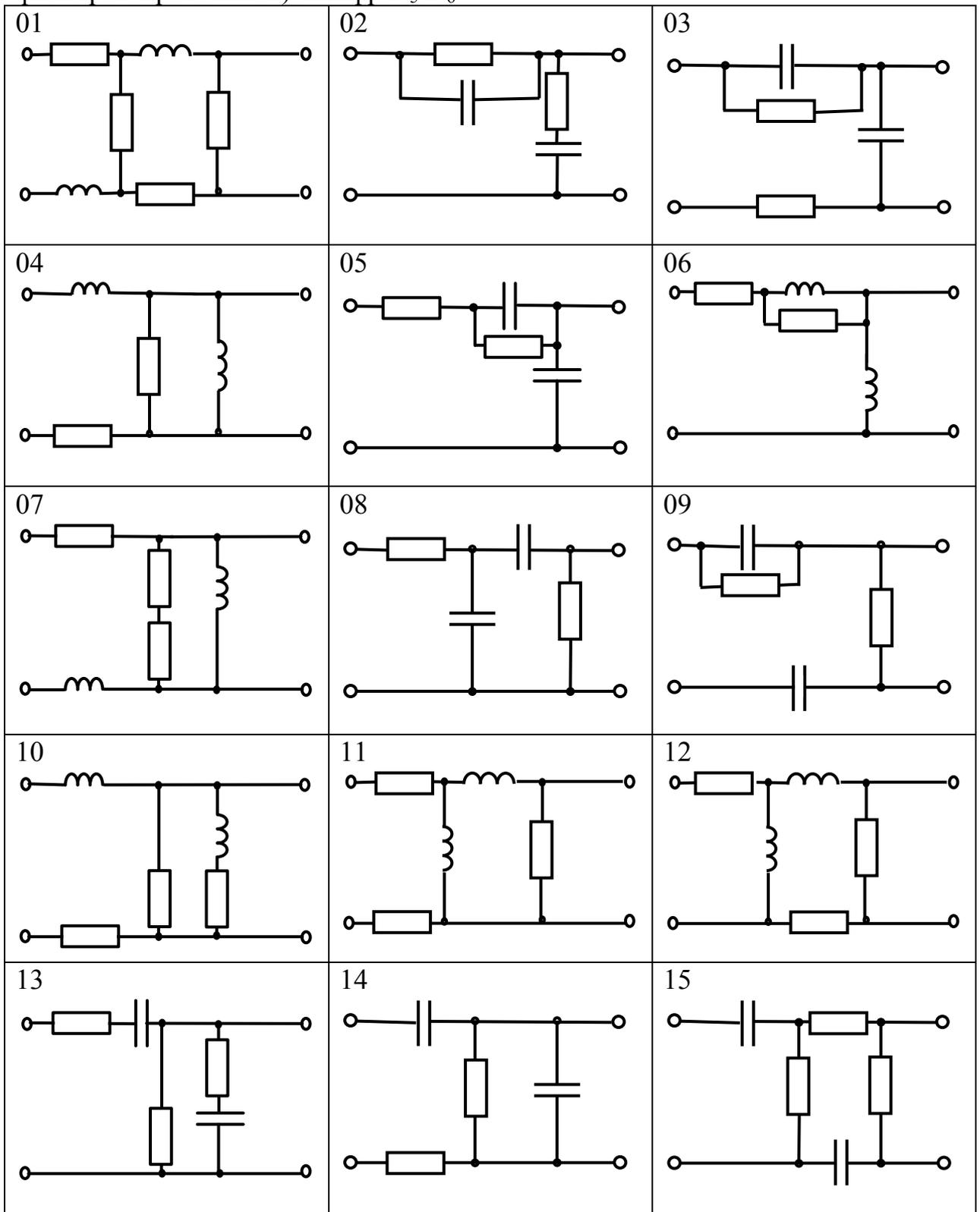


Таблица 3 (продолжение)

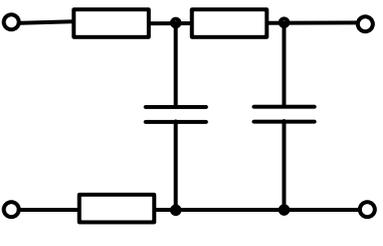
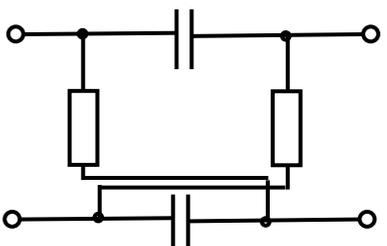
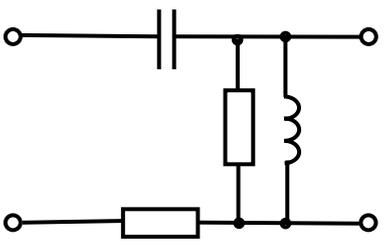
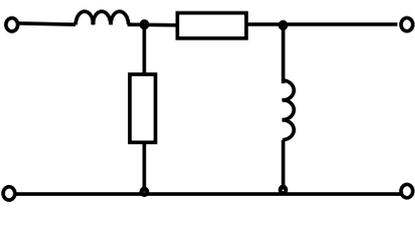
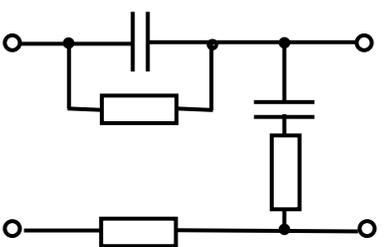
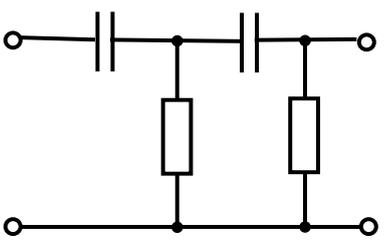
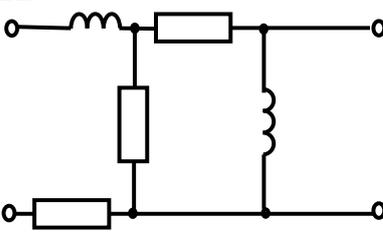
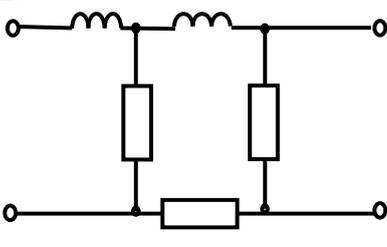
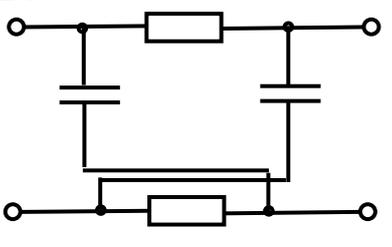
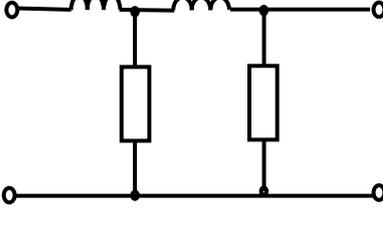
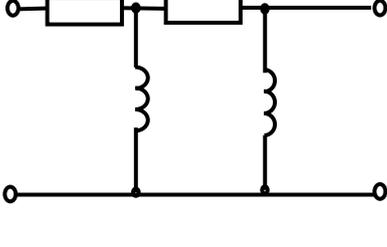
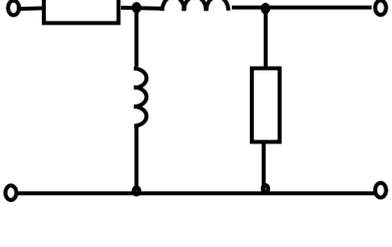
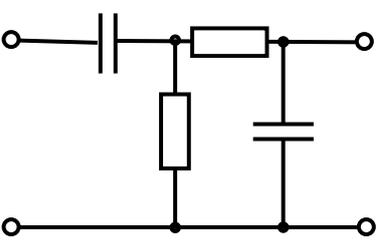
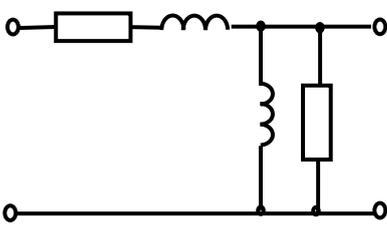
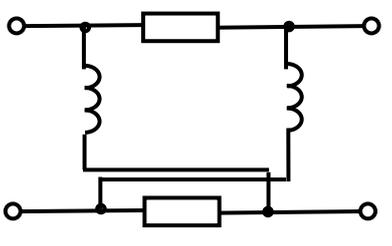
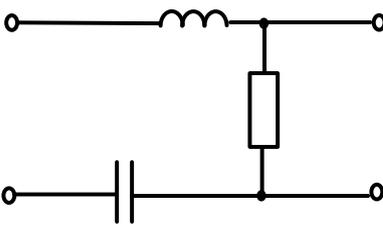
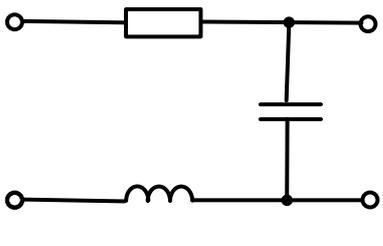
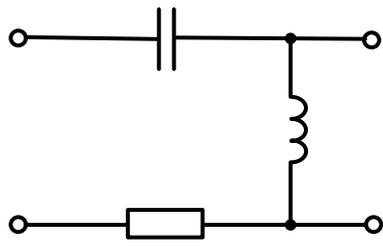
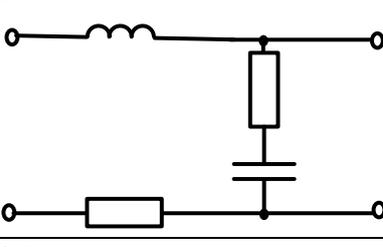
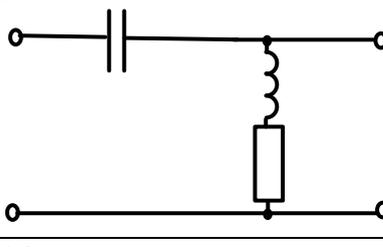
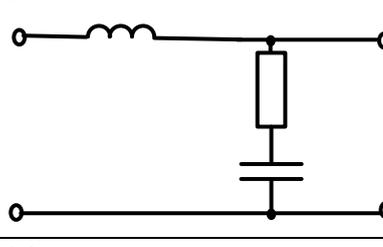
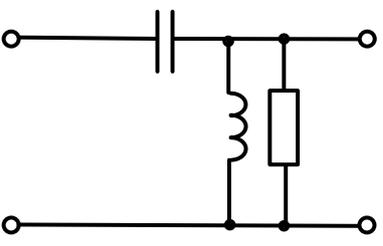
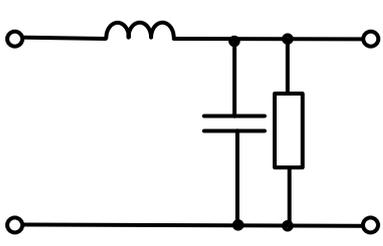
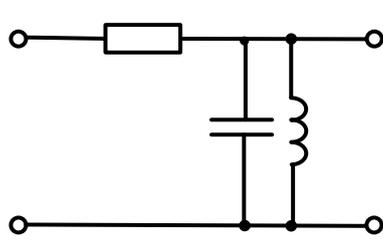
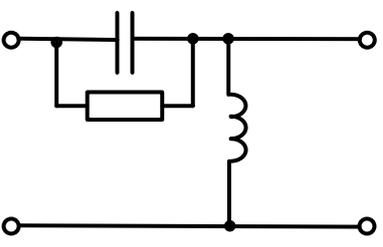
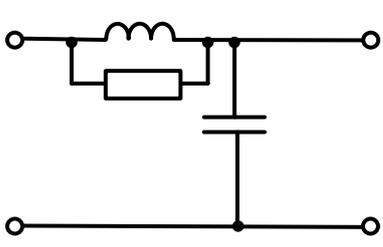
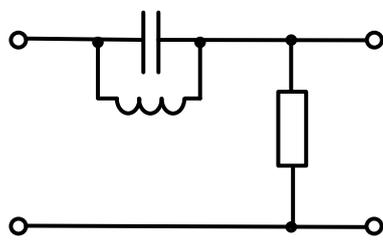
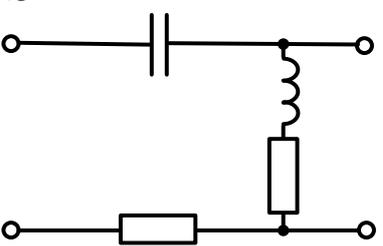
<p>16</p> 	<p>17</p> 	<p>18</p> 
<p>19</p> 	<p>20</p> 	<p>21</p> 
<p>22</p> 	<p>23</p> 	<p>24</p> 
<p>25</p> 	<p>26</p> 	<p>27</p> 
<p>28</p> 	<p>29</p> 	<p>30</p> 

Таблица 3 (окончание)

31 	32 	33 
34 	35 	36 
37 	38 	39 
40 	41 	42 
43 		

Примечания

Все электрические цепи составлены из сопротивлений R , индуктивностей L , емкостей C . Для вариантов 1-43 постоянные времени ЛЭЦ определяются из условий: $RC = t_1$, $\frac{L}{R} = t_1$ (см. табл.2). Для вариантов 31-43 резонансная частота $\omega_\delta = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ определяется из условия $\omega_\delta = \frac{4\pi}{t_1}$.

Таблица 4 – Задание варианта цифрового фильтра

Вариант N_7N_8	Тип аппроксимации АЧХ (наименование окна)	Метод синтеза цифрового фильтра	Тип имп. х-ки	Тип ЦФ
01	Баттерворта	Билинейное z- преобразование	БИХ (РЦФ)	ФНЧ
02	Чебышева			
03	Баттерворта			
04	Чебышева	Метод ИИХ	КИХ (ТЦФ)	
05	Бартлетта			
06	Ханна	Метод частотной выборки	КИХ (ТЦФ)	
07	Хэмминга	Метод оконных функций		
08	Блэкмана			
09	Баттерворта	Билинейное z- преобразование	БИХ (РЦФ)	ФВЧ
10	Чебышева			
11	Баттерворта			
12	Чебышева	Метод ИИХ	КИХ (ТЦФ)	
13	Бартлетта			
14	Ханна	Метод частотной выборки	КИХ (ТЦФ)	
15	Хэмминга	Метод оконных функций		
16	Блэкмана			
17	Баттерворта	Билинейное z- преобразование	БИХ (РЦФ)	ПФ
18	Чебышева			
19	Баттерворта			
20	Чебышева	Метод ИИХ	КИХ (ТЦФ)	
21	Бартлетта			
22	Ханна	Метод частотной выборки	КИХ (ТЦФ)	
23	Хэмминга	Метод оконных функций		
24	Блэкмана			
25	Баттерворта	Билинейное z- преобразование	БИХ (РЦФ)	РФ
26	Чебышева			
27	Баттерворта			
28	Чебышева	Метод ИИХ	КИХ (ТЦФ)	
29	Бартлетта			
30	Ханна	Метод частотной выборки	КИХ (ТЦФ)	
31	Хэмминга	Метод оконных функций		
32	Блэкмана			

Таблица 5 – Параметры затухания A_{Γ} и A_{ζ} АЧХ цифровых ФНЧ и нормированные граничные частоты полос пропускания $\hat{\omega}_{\Gamma}$ и заграждения $\hat{\omega}_{\zeta}$

Шифр N_9N_{10}	Неравномерность (A_{Π}) АЧХ в пределах полосы пропускания (в децибелах)	Затухание (A_{Σ}) АЧХ в полосе заграждения (в децибелах)	Нормированные граничные частоты полос пропускания и заграждения	
Шифр N_9N_{10}	A_{Γ} , дБ	A_{ζ} , дБ	$\hat{\omega}_{\Gamma}$	$\hat{\omega}_{\zeta}$
01	0,1	10	0,1	0,2
02	0,1	15		
03	0,1	20		
04	0,1	25		
05	0,2	10		
06	0,2	15		
07	0,2	20		
08	0,2	25		
09	0,3	10		
10	0,3	15		
11	0,3	20		
12	0,3	25		
13	0,5	10		
14	0,5	15		
15	0,5	20		
16	0,5	25		
17	1,0	10	0,1	0,15
18	1,0	15		
19	1,0	20		
20	1,0	25		
21	1,5	10		
22	1,5	15		
23	1,5	20		
24	1,5	25		
25	2,0	10		
26	2,0	15		
27	2,0	20		
28	2,0	25		
29	2,5	10		
30	2,5	15		
31	2,5	20		
32	2,5	25		

Таблица 5 (продолжение)

Шифр N ₉ N ₁₀	Неравномерность (A _П) АЧХ в пределах полосы пропускания (в децибелах)	Затухание (A _з) АЧХ в полосе заграждения (в децибелах)	Нормированные граничные частоты полос пропускания и заграждения	
Шифр N ₉ N ₁₀	A _т , дБ	A _з , дБ	$\hat{\omega}_1$	$\hat{\omega}_z$
33	0,5	10	0,15	0,2
34	0,5	15		
35	1,0	10		
36	1,0	15		
37	1,5	10		
38	1,5	15		
39	2,0	10		
40	2,0	15		
41	0,5	10	0,2	0,25
42	0,5	15		
43	1,0	10		
44	1,0	15		
45	1,5	10		
46	1,5	15		
47	2,0	10		
48	2,0	15		
49	0,3	20	0,15	0,25
50	0,3	30		
51	0,3	35		
52	0,3	40		
53	0,5	20		
54	0,5	30		
55	0,5	35		
56	0,5	40		
57	1,0	20		
58	1,0	30		
59	1,0	35		
60	1,0	40		
61	1,5	20		
62	1,5	30		
63	1,5	35		
64	1,5	40		
65	2,0	20		
66	2,0	30		

Таблица 5 (окончание)

Шифр N ₉ N ₁₀	Неравномерность (A _п) АЧХ в пределах полосы пропускания (в децибелах)	Затухание (A _з) АЧХ в полосе заграждения (в децибелах)	Нормированные граничные частоты полос пропускания и заграждения	
Шифр N ₉ N ₁₀	A _п , дБ	A _з , дБ	$\hat{\omega}_1$	$\hat{\omega}_\zeta$
67	2,0	35	0,15	0,25
68	2,0	40		
69	2,5	20		
70	2,5	30		
71	2,5	35		
72	2,5	40		
73	3,0	20		
74	3,0	30		
75	3,0	35		
76	3,0	40		
77	0,1	20	0,125	0,25
78	0,2	20		
79	0,3	20		
80	0,5	20		
81	1,0	30		
82	1,5	30		
83	2,0	30		
84	2,5	30		
85	3,0	30		
86	1,0	40		
87	1,5	40		
88	2,0	40		
89	2,5	40		
90	3,0	40		
91	1,0	50		
92	1,5	50		
93	2,0	50		
94	2,5	50		
95	3,0	50		
96	1,0	60		
97	1,5	60		
98	2,0	60		
99	2,5	60		
00	3,0	60		

Таблица 6 – Параметры затухания A_{Γ} и A_{ζ} АЧХ цифровых ФВЧ и нормированные граничные частоты полос пропускания $\hat{\omega}_{\Gamma}$ и заграждения $\hat{\omega}_{\zeta}$

Шифр N_9N_{10}	Неравномерность (A_{Π}) АЧХ в пределах полосы пропускания (в децибелах)	Затухание (A_3) АЧХ в полосе заграждения (в децибелах)	Нормированные граничные частоты полос пропускания и заграждения	
Шифр N_9N_{10}	A_{Γ} , дБ	A_{ζ} , дБ	$\hat{\omega}_{\Gamma}$	$\hat{\omega}_{\zeta}$
01	0,1	10	0,2	0,1
02	0,1	15		
03	0,1	20		
04	0,1	25		
05	0,2	10		
06	0,2	15		
07	0,2	20		
08	0,2	25		
09	0,3	10		
10	0,3	15		
11	0,3	20		
12	0,3	25		
13	0,5	10		
14	0,5	15		
15	0,5	20		
16	0,5	25		
17	1,0	10	0,15	0,1
18	1,0	15		
19	1,0	20		
20	1,0	25		
21	1,5	10		
22	1,5	15		
23	1,5	20		
24	1,5	25		
25	2,0	10		
26	2,0	15		
27	2,0	20		
28	2,0	25		
29	2,5	10		
30	2,5	15		
31	2,5	20		
32	2,5	25		

Таблица 6 (продолжение)

Шифр N ₉ N ₁₀	Неравномерность (A _П) АЧХ в пределах полосы пропускания (в децибелах)	Затухание (A _з) АЧХ в полосе заграждения (в децибелах)	Нормированные граничные частоты полос пропускания и заграждения	
Шифр N ₉ N ₁₀	A _т , дБ	A _з , дБ	$\hat{\omega}_1$	$\hat{\omega}_\zeta$
33	0,5	10	0,2	0,15
34	0,5	15		
35	1,0	10		
36	1,0	15		
37	1,5	10		
38	1,5	15		
39	2,0	10		
40	2,0	15		
41	0,5	10	0,25	0,2
42	0,5	15		
43	1,0	10		
44	1,0	15		
45	1,5	10		
46	1,5	15		
47	2,0	10		
48	2,0	15		
49	0,3	20	0,25	0,15
50	0,3	30		
51	0,3	35		
52	0,3	40		
53	0,5	20		
54	0,5	30		
55	0,5	35		
56	0,5	40		
57	1,0	20		
58	1,0	30		
59	1,0	35		
60	1,0	40		
61	1,5	20		
62	1,5	30		
63	1,5	35		
64	1,5	40		
65	2,0	20		
66	2,0	30		

Таблица 6 (окончание)

Шифр N ₉ N ₁₀	Неравномерность (A _П) АЧХ в пределах полосы пропускания (в децибелах)	Затухание (A _з) АЧХ в полосе заграждения (в децибелах)	Нормированные граничные частоты полос пропускания и заграждения	
Шифр N ₉ N ₁₀	A _т , дБ	A _з , дБ	$\hat{\omega}_1$	$\hat{\omega}_\zeta$
67	2,0	35	0,25	0,15
68	2,0	40		
69	2,5	20		
70	2,5	30		
71	2,5	35		
72	2,5	40		
73	3,0	20		
74	3,0	30		
75	3,0	35		
76	3,0	40		
77	0,1	20	0,25	0,125
78	0,2	20		
79	0,3	20		
80	0,5	20		
81	1,0	30		
82	1,5	30		
83	2,0	30		
84	2,5	30		
85	3,0	30		
86	1,0	40		
87	1,5	40		
88	2,0	40		
89	2,5	40		
90	3,0	40		
91	1,0	50		
92	1,5	50		
93	2,0	50		
94	2,5	50		
95	3,0	50		
96	1,0	60		
97	1,5	60		
98	2,0	60		
99	2,5	60		
00	3,0	60		

Таблица 7 – Параметры затухания A_{τ} и A_{ζ} АЧХ цифровых ПФ и нормированные граничные частоты полос пропускания $\hat{\omega}_{\tau 1}$, $\hat{\omega}_{\tau 2}$ и заграждения $\hat{\omega}_{\zeta 1}$, $\hat{\omega}_{\zeta 2}$

Шифр N_9N_{10}	Неравномерность АЧХ в пределах полосы пропускания (в децибелах)	Затухание АЧХ в полосе заграждения (в децибелах)	Нормированные граничные частоты полос пропускания и заграждения			
Шифр N_9N_{10}	A_{τ} , дБ	A_{ζ} , дБ	$\hat{\omega}_{\tau 1}$	$\hat{\omega}_{\tau 2}$	$\hat{\omega}_{\zeta 1}$	$\hat{\omega}_{\zeta 2}$
01	1,0	10	0,1	0,15	0,05	0,2
02	1,0	15				
03	1,0	20				
04	1,5	10				
05	1,5	15				
06	1,5	20				
07	2,0	10				
08	2,0	15				
09	2,0	20				
10	2,5	10				
11	2,5	15				
12	2,5	20				
13	3,0	10				
14	3,0	15				
15	3,0	20				
16	3,0	25				
17	1,0	10	0,1	0,2	0,05	0,25
18	1,5	10				
19	2,0	10				
20	2,5	10				
21	3,0	10				
22	0,2	10	0,2	0,25	0,1	0,35
23	0,2	15				
24	0,2	20				
25	0,2	25				
26	0,2	30				
27	0,3	10				
28	0,3	15				
29	0,3	20				
30	0,3	25				
31	0,3	30				
32	0,5	10				

Таблица 7 (продолжение)

Шифр N ₉ N ₁₀	Неравномерность АЧХ в пределах полосы пропускания (в децибелах)	Затухание АЧХ в полосе заграждения (в децибелах)	Нормированные граничные частоты полос пропускания и заграждения			
Шифр N ₉ N ₁₀	A _г , дБ	A _з , дБ	$\hat{\omega}_{г1}$	$\hat{\omega}_{г2}$	$\hat{\omega}_{з1}$	$\hat{\omega}_{з2}$
33	0,5	15	0,15	0,2	0,05	0,3
34	0,5	20				
35	0,5	25				
36	0,5	30				
37	1,0	10				
38	1,0	15				
39	1,0	20				
40	1,0	25				
41	1,0	30				
42	1,5	10				
43	1,5	15				
44	1,5	20				
45	1,5	25				
46	1,5	30				
47	2,0	10	0,15	0,25	0,05	0,35
48	2,0	15				
49	2,0	20				
50	2,0	25				
51	2,0	30				
52	2,5	10				
53	2,5	15				
54	2,5	20				
55	2,5	25				
56	2,5	30				
57	3,0	10				
58	3,0	15				
59	3,0	20				
60	3,0	25				
61	3,0	30				
62	1,0	10	0,2	0,3	0,1	0,35
63	1,0	15				
64	1,5	10				
65	1,5	15				
66	2,0	10				

Таблица 7 (окончание)

Шифр N ₉ N ₁₀	Неравномерность АЧХ в пределах полосы пропускания (в децибелах)	Затухание АЧХ в полосе заграждения (в децибелах)	Нормированные граничные частоты полос пропускания и заграждения			
Шифр N ₉ N ₁₀	A _г , дБ	A _з , дБ	$\hat{\omega}_{г1}$	$\hat{\omega}_{г2}$	$\hat{\omega}_{з1}$	$\hat{\omega}_{з2}$
67	2,0	15	0,2	0,3	0,1	0,35
68	2,5	10				
69	2,5	15				
70	3,0	10				
71	3,0	15				
72	1,0	10	0,25	0,3	0,2	0,35
73	1,0	15				
74	1,0	20				
75	1,5	10				
76	1,5	15				
77	1,5	20				
78	2,0	10				
79	2,0	15				
80	2,0	20				
81	2,5	10				
82	2,5	15				
83	2,5	20				
84	3,0	10				
85	3,0	15				
86	3,0	20				
87	1,0	10	0,25	0,35	0,2	0,4
88	1,5	10				
89	2,0	10				
90	2,5	10				
91	3,0	10	0,3	0,4	0,25	0,45
92	1,0	10				
93	1,5	10				
94	2,0	10				
95	2,5	10				
96	3,0	10				
97	1,0	20	0,3	0,35	0,25	0,4
98	1,5	20				
99	2,5	20				
00	3,0	20				

Таблица 8 – Параметры затухания A_{Γ} и A_{ζ} АЧХ цифровых РФ и нормированные граничные частоты полос пропускания $\hat{\omega}_{\Gamma 1}$, $\hat{\omega}_{\Gamma 2}$ и заграждения $\hat{\omega}_{\zeta 1}$, $\hat{\omega}_{\zeta 2}$

Шифр N_9N_{10}	Неравномерность АЧХ в пределах полосы пропускания (в децибелах)	Затухание АЧХ в полосе заграждения (в децибелах)	Нормированные граничные частоты полос пропускания и заграждения			
Шифр N_9N_{10}	A_{Γ} , дБ	A_{ζ} , дБ	$\hat{\omega}_{\Gamma 1}$	$\hat{\omega}_{\Gamma 2}$	$\hat{\omega}_{\zeta 1}$	$\hat{\omega}_{\zeta 2}$
01	1,0	10	0,05	0,2	0,1	0,15
02	1,0	15				
03	1,5	10				
04	1,5	15				
05	2,0	10				
06	2,0	15				
07	2,5	10				
08	2,5	15				
09	3,0	10				
10	3,0	15				
11	1,0	10	0,05	0,25	0,1	0,2
12	1,5	10				
13	2,0	10				
14	2,5	10				
15	3,0	10				
16	0,1	10	0,1	0,35	0,2	0,25
17	0,1	15				
18	0,1	20				
19	0,1	25				
20	0,1	30				
21	0,2	10				
22	0,2	15				
23	0,2	20				
24	0,2	25				
25	0,2	30				
26	0,3	10				
27	0,3	15				
28	0,3	20				
29	0,3	25				
30	0,3	30				
31	0,5	10				
32	0,5	15				

Таблица 8 (продолжение)

Шифр N ₉ N ₁₀	Неравномерность АЧХ в пределах полосы пропускания (в децибелах)	Затухание АЧХ в полосе заграждения (в децибелах)	Нормированные границные частоты полос пропускания и заграждения			
Шифр N ₉ N ₁₀	A _г , дБ	A _з , дБ	$\hat{\omega}_{г1}$	$\hat{\omega}_{г2}$	$\hat{\omega}_{з1}$	$\hat{\omega}_{з2}$
33	0,5	20	0,1	0,35	0,2	0,25
34	0,5	25				
35	0,5	30				
36	1,0	10				
37	1,0	15				
38	1,0	20				
39	1,0	25				
40	1,0	30				
41	1,5	10				
42	1,5	15				
43	1,5	20				
44	1,5	25				
45	1,5	30				
46	1,5	35				
47	2,0	10	0,05	0,3	0,15	0,2
48	2,0	15				
49	2,0	20				
50	2,0	25				
51	2,0	30				
52	2,5	10				
53	2,5	15				
54	2,5	20				
55	2,5	25				
56	2,5	30				
57	3,0	10				
58	3,0	15				
59	3,0	20				
60	3,0	25				
61	3,0	30				
62	1,0	10	0,1	0,35	0,2	0,3
63	1,0	14				
64	1,5	10				
65	1,5	14				
66	2,0	10				

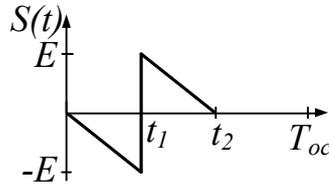
Таблица 8 (окончание)

Шифр N ₉ N ₁₀	Неравномерность АЧХ в пределах полосы пропускания (в децибелах)	Затухание АЧХ в полосе заграждения (в децибелах)	Нормированные границные частоты полос пропускания и заграждения			
Шифр N ₉ N ₁₀	A _г , дБ	A _з , дБ	$\hat{\omega}_{г1}$	$\hat{\omega}_{г2}$	$\hat{\omega}_{з1}$	$\hat{\omega}_{з2}$
67	2,0	14	0,1	0,35	0,2	0,3
68	2,5	10				
69	2,5	14				
70	3,0	10				
71	3,0	14				
72	1,0	10	0,2	0,35	0,25	0,3
73	1,0	15				
74	1,0	20				
75	1,5	10				
76	1,5	15				
77	1,5	20				
78	2,0	10				
79	2,0	15				
80	2,0	20				
81	2,5	10				
82	2,5	15				
83	2,5	20				
84	3,0	10	0,2	0,4	0,25	0,35
85	3,0	15				
86	3,0	20				
87	1,0	10				
88	1,5	10				
89	2,0	10				
90	2,5	10	0,25	0,45	0,3	0,4
91	3,0	10				
92	1,0	10				
93	1,5	10				
94	2,0	10				
95	2,5	10	0,25	0,4	0,3	0,35
96	3,0	10				
97	1,0	15				
98	1,5	15				
99	2,5	20				
00	3,0	20				

2.4 Пример выбора исходных данных по шифрам

Пример выбора исходных данных по таблицам 1-8 на основании 10 (десяти) цифр шифра.

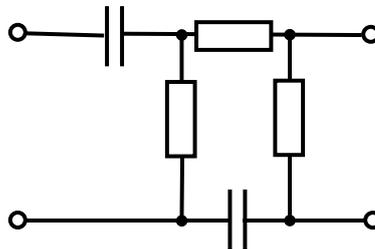
- По таблице 1 выбирается сигнал (шифр $N_1N_2=24$).



- По таблице 2 выбирается структура сигнала (шифр $N_3N_4=14$).

14	140 мкс	$1,5t_1$	$2,5t_1$	$4t_1$
----	---------	----------	----------	--------

- По таблице 3 выбирается схема ЛЭЦ (шифр $N_5N_6=15$).



- По таблице 4 выбирается вид аппроксимации, метод синтеза, тип цифрового фильтра и его назначение (шифр $N_7N_8=11$).

11	Баттерворта	Метод ИИХ	БИХ (РЦФ)	ФВЧ
----	-------------	-----------	-----------	-----

- На основании назначения цифрового фильтра (ФВЧ) выбирается таблица 6.

- По таблице 6 выбираются параметры затухания и граничные частоты цифрового ФВЧ (шифр $N_9N_{10}=37$).

37	1,5	10	0,2	0,15
----	-----	----	-----	------

3 Примерное содержание курсовой работы

3.1 Аналоговая обработка сигнала

- Представление неперiodического аналогового сигнала в виде элементарных односторонних функций
- Определение изображения элементарных сигналов по Лапласу
- Расчет спектральной плотности аналогового неперiodического сигнала
- Определение ширины спектра сигнала с помощью порогового критерия

3.2 Анализ аналоговой линейной электрической цепи

- Расчет и построение АЧХ и ФЧХ
- Расчет и построение переходной и импульсной характеристик

- Проверка выполнения предельных соотношений

3.3 Расчет и построение отклика на выходе аналоговой ЛЭЦ

3.4 Дискретная обработка аналогового сигнала

- Дискретизация заданного сигнала и восстановление аналогового сигнала с использованием ряда Котельникова
- Расчет спектра предварительно определенной дискретной последовательности и построение графика
- Вычисление Z -преобразования предварительно определенной дискретной последовательности
- Определение дискретного преобразования Фурье той же последовательности. Построение графика комплексных коэффициентов C_k .
- Восстановление аналогового сигнала с использованием тригонометрического ряда Фурье
- Нахождение исходной дискретной последовательности с применением обратного дискретного преобразования Фурье к C_k . Построение графика

3.5 Синтез цифровых фильтров по заданной аналоговой ЛЭЦ

3.5.1 Синтез цифровых фильтров методом билинейного Z -преобразования

- Расчет рекурсивного цифрового фильтра (РЦФ) методом билинейного Z -преобразования
- Построение структурной схемы РЦФ
- Составление алгоритма работы РЦФ
- Расчет и построение частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) РЦФ, синтезированного методом билинейного Z -преобразования
- Расчет и построение импульсной и переходной характеристик РЦФ, синтезированного методом билинейного Z -преобразования

3.5.2 Синтез цифровых фильтров методом инвариантности импульсной характеристики (ИИХ)

- Дискретизация импульсной характеристики аналоговой ЛЭЦ
- Расчет трансверсального цифрового фильтра (ТЦФ) методом ИИХ
- Расчет РЦФ методом ИИХ
- Построение структурных схем ТЦФ и РЦФ
- Составление алгоритмов работы ТЦФ и РЦФ
- Расчет и построение частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) ТЦФ и РЦФ, синтезированных методом ИИХ

- Расчет и построение импульсной и переходной характеристик ТЦФ и РЦФ, синтезированных методом ИИХ

3.6 Синтез рекурсивных цифровых фильтров по классическому НЧ-прототипу

3.6.1 Синтез цифровых фильтров Баттерворта или Чебышева методом билинейного Z -преобразования

- Расчет классического ФНЧ-прототипа
- Расчет рекурсивного цифрового фильтра (РЦФ) методом билинейного Z -преобразования
- Построение структурной схемы РЦФ
- Составление алгоритма работы РЦФ
- Расчет и построение частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) РЦФ, синтезированного методом билинейного Z -преобразования
- Расчет и построение импульсной и переходной характеристик РЦФ, синтезированного методом билинейного Z -преобразования

3.6.2 Синтез цифровых фильтров Баттерворта или Чебышева методом инвариантности импульсной характеристики (ИИХ)

- Расчет классического ФНЧ-прототипа
- Расчет рекурсивного цифрового фильтра (РЦФ) методом ИИХ
- Построение структурной схемы РЦФ
- Составление алгоритма работы РЦФ
- Расчет и построение частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) РЦФ, синтезированного методом ИИХ
- Расчет и построение импульсной и переходной характеристик РЦФ, синтезированного методом ИИХ

3.7 Синтез трансверсальных цифровых фильтров методом оконных функций

- Расчёт трансверсального цифрового фильтра методом частотной выборки или методом взвешивания
- Определение импульсной характеристики ТЦФ
- Выбор подходящей функции окна
- Расчёт сглаженной импульсной характеристики ТЦФ
- Расчет и построение частотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) ТЦФ, синтезированного методом оконных функций

4 Указания по оформлению курсовой работы

В пояснительную записку должен войти следующий материал:

- 1) задание к курсовой работе;
- 2) разделы, содержащие дискретное представление и анализ сигнала

во временной и частотной области, подробный расчет цифрового фильтра в соответствии с настоящими методическими указаниями. В пояснительную записку необходимо включить ряд иллюстраций:

- график амплитудного спектра $|X(\omega)|$ входного непрерывного сигнала, построенного согласно требованиям п. 1.1;
 - графическое изображение последовательности отсчетов $x(nT_d)$ входного сигнала;
 - изображение спектральной плотности дискретизированного сигнала;
 - схемы реализации синтезируемых фильтров (прямую и каноническую);
 - построенные в общих координатных осях графики АЧХ цифровых фильтров и АЧХ аналогового фильтра-прототипа;
 - графические изображения импульсной и переходной характеристик цифрового фильтра;
- 3) список используемых источников.

Курсовая работа оформляется в соответствии с ОС ТУСУР 6.1-97*.

Список используемых источников

1. Каратаева Н.А. Радиотехнические цепи и сигналы. Дискретная обработка сигналов и цифровая фильтрация: Учебное пособие. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР), 2007. – 240 с.
2. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы. - 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1986. – 512 с.
3. Баскаков С. И. Радиотехнические цепи и сигналы. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 448 с.
4. Хемминг Р.В. Цифровые фильтры. Пер.с англ./Под ред. А. М. Трахтмана. – М.: Сов. Радио, 1980. – 224 с.
5. Гольденберг Л.М., Матюшкин Б.Д., Поляк М.Н. Цифровая обработка сигналов: Справочник. – М: Радио и связь, 1985. – 312 с.
6. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1978. – 848 с.
7. Лэм Г. Аналоговые и цифровые фильтры. Расчет и реализация. Пер. с англ. В. Л. Левина, М. Н. Микшиса и И. И. Теплюка /Под ред. И. Н. Теплюка. – М.: Мир, 1982. – 592 с.
8. Карни Ш. Теория цепей. Анализ и синтез. – М.: Связь, 1973.
9. Янке Е., Эмде Ф., Леш Ф. Специальные функции. – М.: Наука, 1977.
10. Айфичер Э., Эммануил С., Джервис., Барри У. Цифровая обработка сигналов: практический подход, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2004. – 992 с.: – Парал. тит. англ. ISBN 5-8459-0710-1 (рус.)

11. Литюк В.И., Литюк Л.В. Методы цифровой многопроцессорной обработки ансамблей радиосигналов. – М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2007. – 592 с.: ил. – (Серия «Библиотека инженера»)
ISBN 5-98003-303-3
12. Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов: Учебник для вузов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2006. – 751 с.: ил.
ISBN 5-469-00816-9
13. Основы цифровой обработки сигналов: Курс лекций / А. И. Солонина, Д. А. Улахович, С. М. Арбузов, Е. Б. Соловьева / Изд. 2-е испр. и перераб. – СПб.: БХВ- Петербург, 2005. – 768 с.: ил.
ISBN 5-94157-604-8
14. Каратаева Н.А., Платонов А.В., Филиппов К.Н. Компьютерная система визуализации результатов моделирования рекурсивных и трансверсальных цифровых фильтров различного назначения – М.: ВНТИЦ, 2008. - №50200800875 (Свидетельство № 10433 об отраслевой регистрации разработки в «Отраслевом фонде алгоритмов и программ» от 25.04.2008 Москва.)

Приложение. Пример выполненной курсовой работы

П1 Титульный лист

Министерство образования и науки Российской Федерации

Томский государственный университет систем управления и
радиоэлектроники (ТУСУР)

Кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР)

**Курсовая работа по дисциплине «Радиотехнические цепи и
сигналы»**

**ДИСКРЕТНАЯ ОБРАБОТКА СИГНАЛОВ И ЦИФРОВАЯ
ФИЛЬТРАЦИЯ**

Выполнил: студент гр. з-161
Д.А. Иванов _____
«__» _____ 2012 г.

Проверил: профессор каф. ТОР
Н.А. Каратаева _____
«__» _____ 2012 г.

Томск
2012

П2 Содержание

1. Введение
2. Спектральный анализ аналогового сигнала
 - 2.1. Исходные данные
 - 2.2. Разложение сигнала на типовые составляющие
 - 2.3. Нахождение спектральной плотности сигнала
 - 2.4. Построение спектральной плотности сигнала
 - 2.4.1. Амплитудно-частотная характеристика
 - 2.4.2. Фазочастотная характеристика
 - 2.5. Нахождение коэффициентов комплексного ряда Фурье
 - 2.6. Построение спектра коэффициентов комплексного ряда Фурье
 - 2.6.1. Спектр модулей коэффициентов комплексного ряда Фурье
 - 2.6.2. Спектр фаз коэффициентов комплексного ряда Фурье
 - 2.7. Нахождение ширины спектра сигнала
 - 2.8. Восстановление сигнала усечённым рядом Фурье
3. Спектральный анализ аналогового фильтра
 - 3.1. Исходные данные
 - 3.2. Нахождение передаточной функции аналогового фильтра
 - 3.3. Построение частотных характеристик аналогового фильтра
 - 3.3.1. Амплитудно-частотная характеристика
 - 3.3.2. Фазочастотная характеристика
 - 3.4. Нахождение временных характеристик аналогового фильтра
 - 3.5. Построение временных характеристик аналогового фильтра
 - 3.5.1. Импульсная характеристика
 - 3.5.2. Переходная характеристика
 - 3.6. Нахождение отклика аналогового фильтра на сигнал
 - 3.7. Построение отклика аналогового фильтра на сигнал
4. Спектральный анализ дискретного сигнала
 - 4.1. Дискретизация исходного сигнала
 - 4.2. Разложение дискретного сигнала на типовые составляющие

- 4.3. Нахождение спектральной плотности дискретного сигнала
- 4.4. Построение спектральной плотности дискретного сигнала
 - 4.4.1. Амплитудно-частотная характеристика
 - 4.4.2. Фазочастотная характеристика
- 4.5. Нахождение комплексных коэффициентов ДПФ
- 4.6. Построение спектра комплексных коэффициентов ДПФ
 - 4.6.1. Спектр модулей комплексных коэффициентов ДПФ
 - 4.6.2. Спектр фаз комплексных коэффициентов ДПФ
- 4.7. Восстановление аналогового сигнала
 - 4.7.1. Восстановление с помощью теоремы Котельникова
 - 4.7.2. Восстановление по Фурье
- 5. Спектральный анализ цифрового фильтра
 - 5.1. Дискретизация импульсной характеристики аналогового фильтра
 - 5.2. Расчет ТЦФ методом ИИХ
 - 5.2.1. Нахождение системной функции ТЦФ
 - 5.2.2. Построение частотных характеристик ТЦФ
 - 5.2.2.1. Амплитудно-частотная характеристика
 - 5.2.2.2. Фазочастотная характеристика
 - 5.3. Расчет РЦФ методом ИИХ
 - 5.3.1. Нахождение системной функции РЦФ
 - 5.3.2. Построение частотных характеристик РЦФ
 - 5.3.2.1. Амплитудно-частотная характеристика
 - 5.3.2.2. Фазочастотная характеристика
 - 5.4. Расчет РЦФ методом билинейного Z -преобразования
 - 5.4.1. Нахождение системной функции РЦФ
 - 5.4.2. Построение частотных характеристик РЦФ
 - 5.4.2.1. Амплитудно-частотная характеристика
 - 5.4.2.2. Фазочастотная характеристика
 - 5.5. Расчет отклика ЦФ на дискретный сигнал

6. Синтез цифрового полосового фильтра Чебышева
 - 6.1. Анализ исходных данных
 - 6.2. Анализ аналогового фильтра Чебышева
 - 6.3. Синтез цифрового фильтра Чебышева
 - 6.4. Проверка результатов расчётов с помощью компьютерной системы

ПЗ Введение

Одним из новых перспективных направлений современной обработки радиосигналов является цифровая фильтрация. В ее основе лежит преобразование аналоговых сигналов в последовательность чисел и обработка этой последовательности в цифровых вычислительных устройствах.

Применение в радиоэлектронике цифровой фильтрации открывает дополнительные возможности при обработке сигналов. В частности, могут быть реализованы сложные алгоритмы фильтрации, которые аналоговыми методами в ряде случаев вообще не удастся осуществить. С другой стороны, возможен синтез в цифровой форме аналогов известных радиотехнических устройств различного функционального назначения, а именно фильтров, преобразователей частоты, детекторов и т.п.

Курсовая работа состоит из пяти частей:

— Первая часть представляет собой анализ аналогового сигнала, нахождение его спектра, разложение в ряд Фурье, нахождение необходимой полосы пропускания канала связи, по которому сигнал пройдет без значительных искажений;

— Вторая часть содержит анализ аналогового фильтра-прототипа, нахождение и анализ его частотных и временных характеристик, для последующего использования их при синтезе цифровых фильтров;

— Третья часть представляет собой нахождение минимального количества степеней свободы для описания заданного сигнала в дискретной форме, анализ выборки сигнала, нахождение его спектра с помощью Z -преобразования, нахождение комплексных коэффициентов дискретного преобразования Фурье, восстановление сигнала с использованием теоремы Котельникова и по Фурье.

— В четвертой части по аналоговым фильтрам-прототипам методом инвариантной импульсной характеристики и методом билинейного Z -преобразования рассчитываются трансверсальные и рекурсивные фильтры

по аналоговому фильтру-прототипу, находится отклик цифровых фильтров на дискретный сигнал.

— В пятой последней части анализируется аналоговый фильтр Чебышева, удовлетворяющий заданным параметрам, по его характеристикам синтезируется цифровой фильтр, а также методом дискретной свертки находится отклик полученного фильтра на дискретный сигнал.

П4 Спектральный анализ аналогового сигнала

Известны следующие исходные данные:

- $E = 8\hat{A}$ входное напряжение;
- $T_{\hat{i}\tilde{n}} = 2.4i\tilde{n}$ период описания сигнала;
- $t_1 = 800i\hat{e}\tilde{n}$ треть периода описания сигнала;
- $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_{\hat{i}\tilde{n}}}$ циклическая частота сигнала.

Временное представление аналогового сигнала дано на рис.1, ось абсцисс

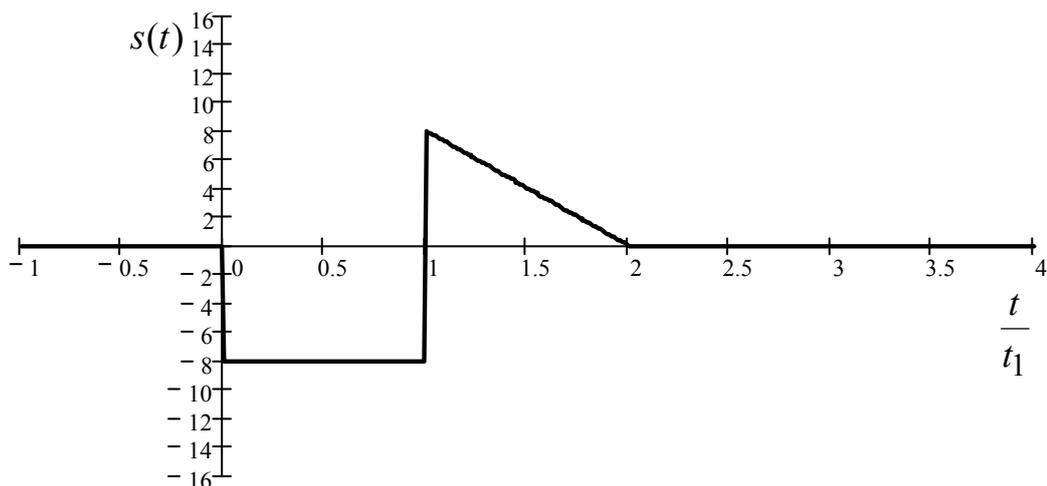


Рисунок 1 – Временное представление аналогового сигнала сложной формы

Разложение сигнала на типовые составляющие

Для упрощения нахождения спектральной плотности с помощью преобразования Лапласа, исходя из временного представления сигнала, разложим его на типовые составляющие, включающиеся в определенный момент времени. Для этого используем единичную функцию включения $\sigma(t)$.

$$s_1(t) = -E\sigma(t), \quad s_2(t) = 2E\sigma(t - t_1), \quad s_3(t) = -\frac{E}{t_1}(t - t_1)\sigma(t - t_1),$$

$$s_4(t) = \frac{E}{t_1}(t - 2t_1)\sigma(t - 2t_1).$$

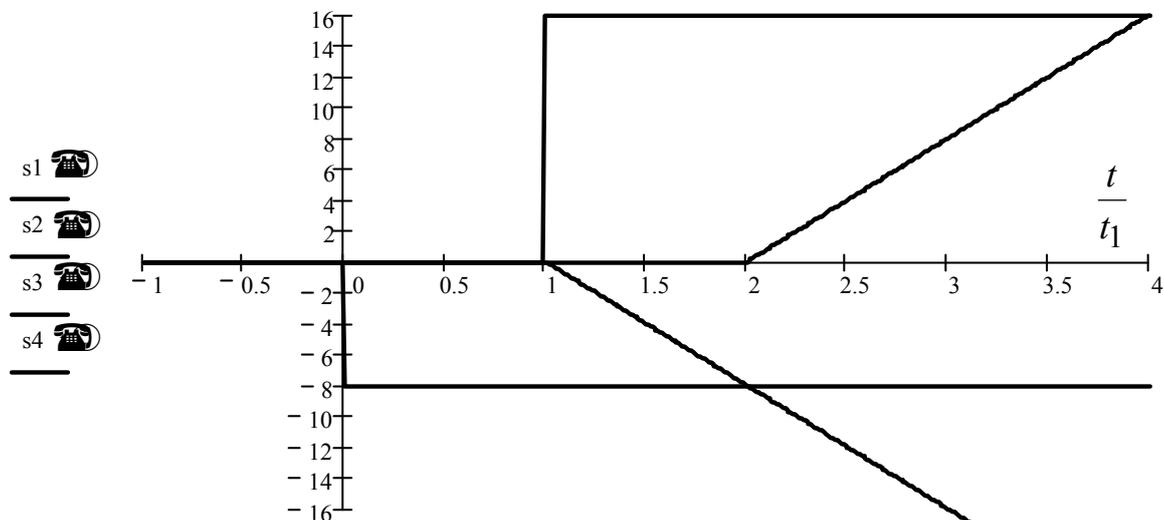


Рисунок 2 – Временное представление типовых составляющих аналогового сигнала

Нахождение спектральной плотности аналогового сигнала

Для нахождения спектральной плотности аналогового сигнала используем прямое преобразование Лапласа. Применив его к типовым составляющим, просуммируем:

$$S_1(p) = -\frac{E}{p}, \quad S_2(p) = \frac{2E}{p}e^{-pt_1}, \quad S_3(p) = -\frac{E}{p^2 t_1}e^{-pt_1},$$

$$S_4(p) = \frac{E}{p^2 t_1}e^{-2pt_1}.$$

$$S(p) = S_1(p) + S_2(p) + S_3(p) + S_4(p).$$

Из полученного выражения путем замены $p = j\omega$ найдем спектральную плотность аналогового сигнала:

$$S(\omega) = -\frac{E}{j\omega} + \frac{2E}{j\omega} e^{-j\omega t_1} - \frac{E}{\omega^2 t_1} e^{-j\omega t_1} - \frac{E}{\omega^2 t_1} e^{-2j\omega t_1}.$$

Спектральная плотность является комплексной величиной. Модуль спектральной плотности аналогового сигнала называют его амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), аргумент спектральной плотности – фазочастотной характеристикой (ФЧХ).

Построение частотных характеристик аналогового сигнала

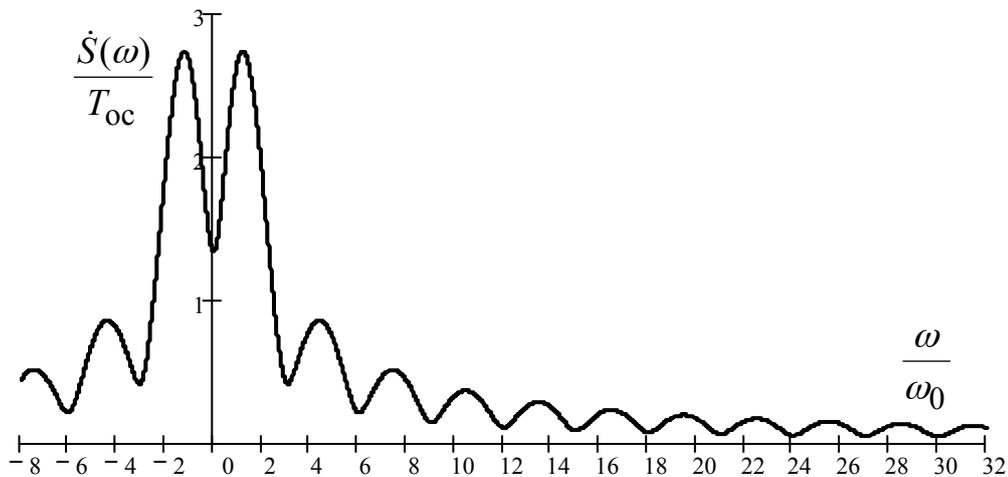


Рисунок 3 – АЧХ аналогового сигнала (частота нормирована относительно $\omega_0 = 2\pi/T_{\text{ин}}$)

На рисунке 3 изображена АЧХ аналогового сигнала. Из рисунка видно, что АЧХ пульсирует. Это происходит по причине того, что сигнал имеет ограниченный интервал описания во временной области.

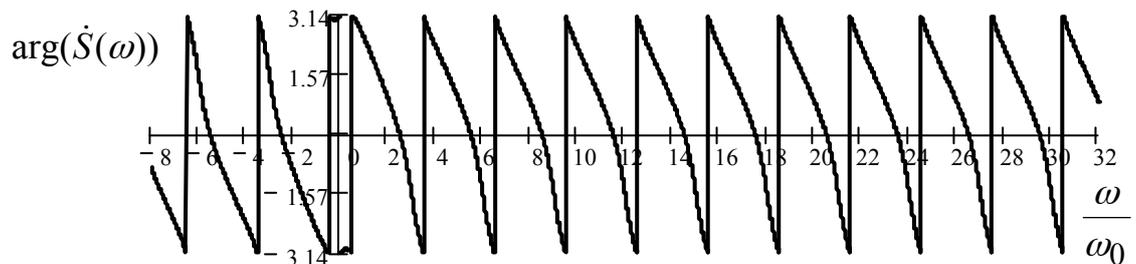


Рисунок 4 – ФЧХ аналогового сигнала

На рисунке 4 изображена ФЧХ аналогового сигнала. Она имеет большую линейную составляющую, которая мешает увидеть значимую часть ФЧХ. Для компенсации линейной составляющей ФЧХ, умножим спектральную плотность на $e^{j\omega t_1}$, тогда ФЧХ примет следующий вид:

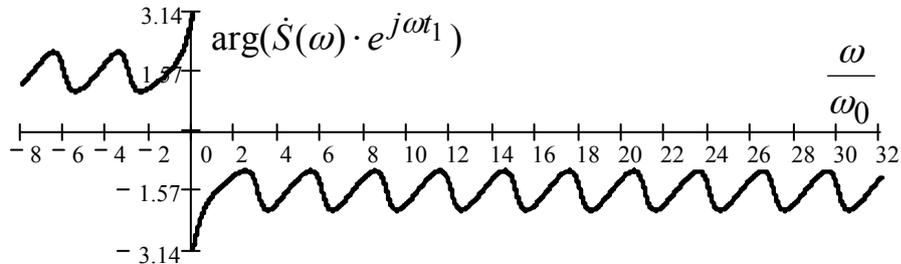


Рисунок 5 – ФЧХ аналогового сигнала с компенсированной линейной составляющей

Нахождение коэффициентов комплексного ряда Фурье

Для восстановления аналогового сигнала с помощью комплексного ряда Фурье необходимо найти его комплексные коэффициенты. Коэффициенты определим путем дискретизации спектральной плотности аналогового сигнала:

$$C_k = \frac{S(k\omega_0)}{T_{\text{вн}}}$$

Построение спектра коэффициентов комплексного ряда Фурье

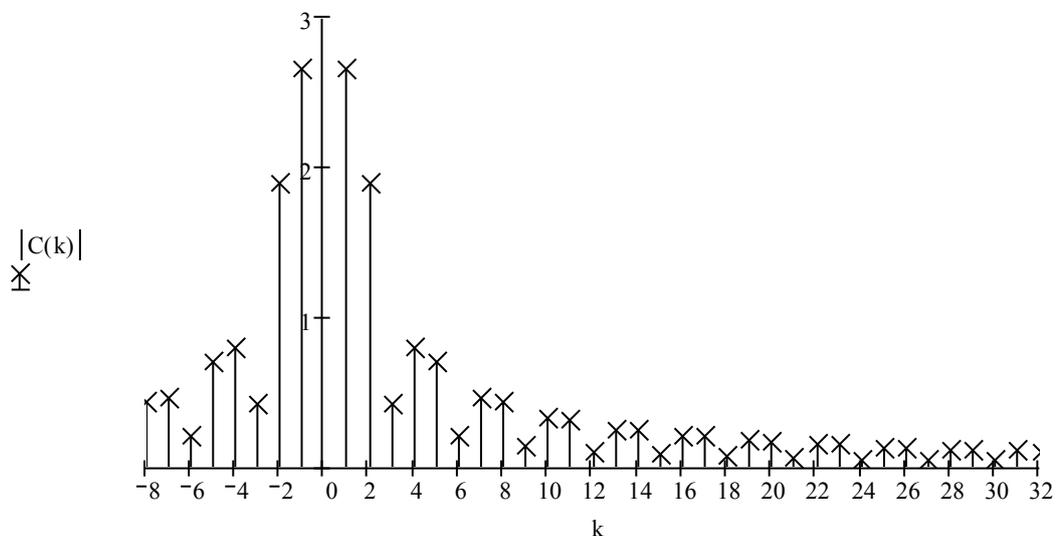


Рисунок 6 – Спектр коэффициентов комплексного ряда Фурье

Для сравнения с комплексными коэффициентами ряда, постоянную составляющую исходного аналогового сигнала определим отдельно. Она равна:

$$\frac{1}{T_{\text{ин}}} \int_0^{T_{\text{ин}}} s(t) dt = -\frac{E}{6}.$$

Нетрудно заметить, что наибольшей энергией обладает первая гармоника, поэтому пороговый критерий для нахождения ширины спектра сигнала в пункте определим именно по первому коэффициенту.

Спектр фаз коэффициентов комплексного ряда Фурье

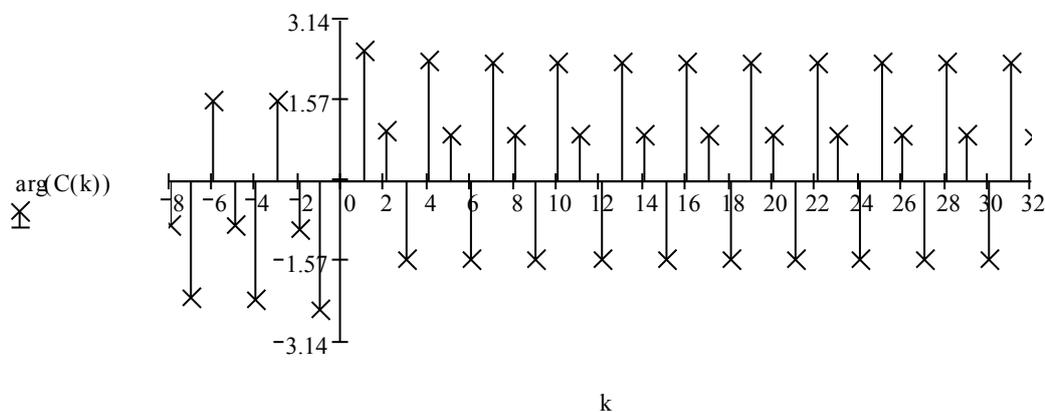


Рисунок 7 – Спектр фаз коэффициентов комплексного ряда Фурье

Из рисунка видно, что симметричные относительно начала координат коэффициенты являются комплексно-сопряженными.

Нахождение ширины спектра сигнала

Для ограничения спектра сигнала необходимо задаться пороговым критерием. Из соображений, приведенных выше, порог определим как десятую часть амплитуды первой гармоники.

На рисунке 8 изображен спектр коэффициентов комплексного ряда Фурье. Прямая линия параллельная частотной оси определяется пороговым критерием.

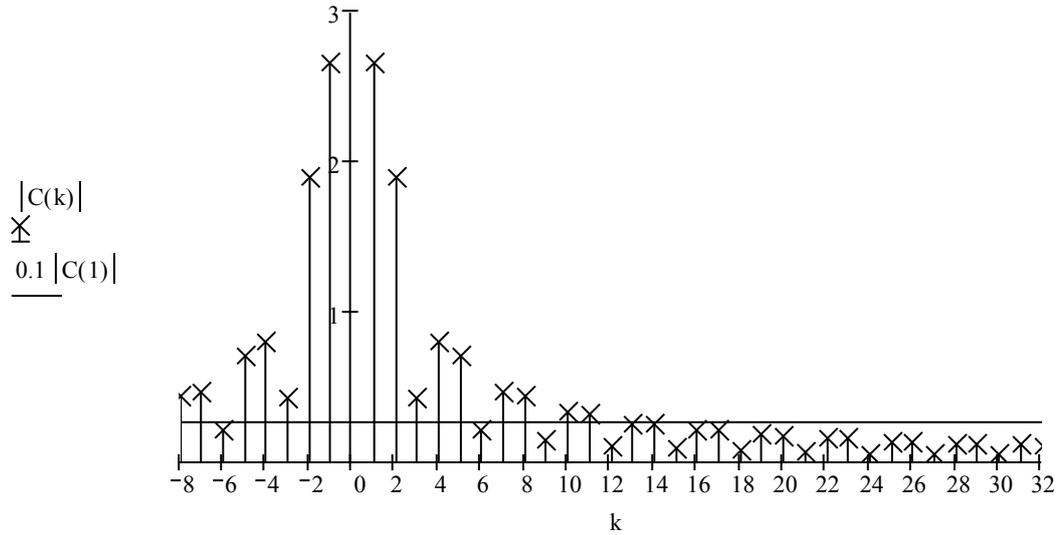


Рисунок 8 – Определение ширины спектра аналогового сигнала

Из рисунка видно, что одиннадцатый коэффициент – это последний коэффициент с амплитудой, превышающей порог, значит, сигнал будем восстанавливать по двенадцати гармоникам, то есть $\omega_{\max} = 12\omega_1$.

Восстановление сигнала усеченным рядом Фурье

Восстановление сигнала определяется следующей формулой:

$$s_{\text{вос}}(t) = -\frac{E}{6} + \sum_{k=1}^{12} (2|C_k| \cos(\omega_1 kt + \arg(C_k)))$$

Для анализа восстановленного сигнала на рисунке 9 приведено его временное представление.

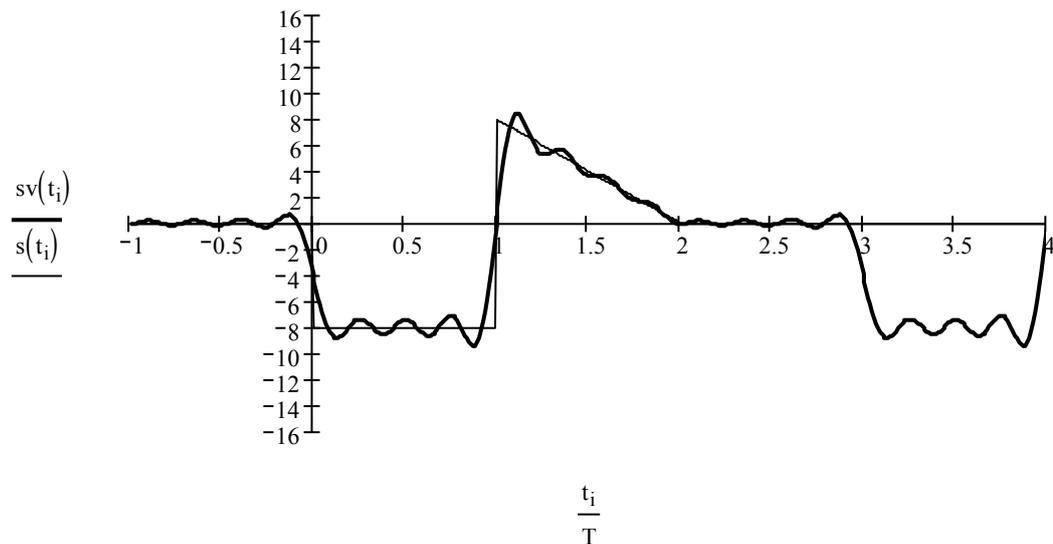


Рисунок 9 – Восстановление сигнала усеченным рядом Фурье

Восстановленный сигнал имеет периодический, пульсирующий характер. Периодизация сигнала произошла из-за дискретизации спектральной плотности в частотной области, а пульсирует восстановленный сигнал из-за ограниченной двенадцатью гармониками ширины спектра сигнала.

П4 Анализ аналоговой линейной электрической цепи

Схема заданного четырехполюсника выглядит следующим образом:

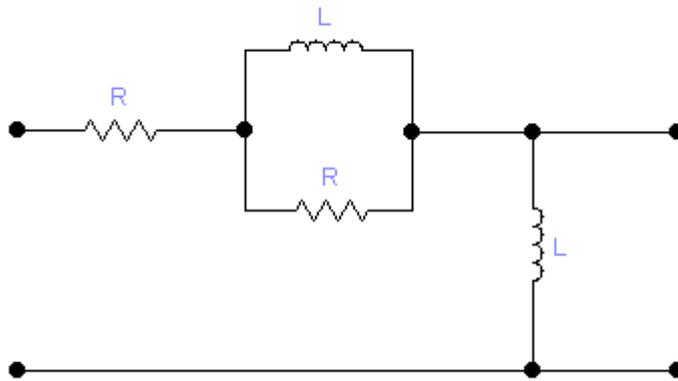


Рисунок 10 – Схема исходного аналогового фильтра-прототипа

При этом известно соотношение между постоянной времени цепи τ и интервалом описания фрагмента сигнала t_1 : $\tau = \frac{L}{R} = t_1$, или $\alpha = \frac{R}{L} = \frac{1}{t_1}$.

Нахождение передаточной функции аналогового фильтра

Передаточную функцию в операторной форме записи цепи находим методами ОТЦ:

$$K_u(p) = \frac{pL}{R + \frac{R \cdot pL}{R + pL} + pL} = \frac{RpL + p^2 L^2}{R^2 + 3RpL + p^2 L^2} =$$

$$= \frac{p^2 + \frac{R}{L} p}{p^2 + 3\frac{R}{L} p + \frac{R^2}{L^2}} = \frac{p^2 + \alpha p}{p^2 + 3\alpha p + \alpha^2}$$

Построение частотных характеристик аналогового фильтра

Переход от передаточной функции в операторной форме записи к частотным характеристикам производится путем замены $p = j\omega$.

Построим АЧХ сигнала, для того чтобы определить частоту среза, частоту ω_{\max} и другие величины, которые понадобятся при синтезе цифровых фильтров на основе данного аналогового фильтра-прототипа.

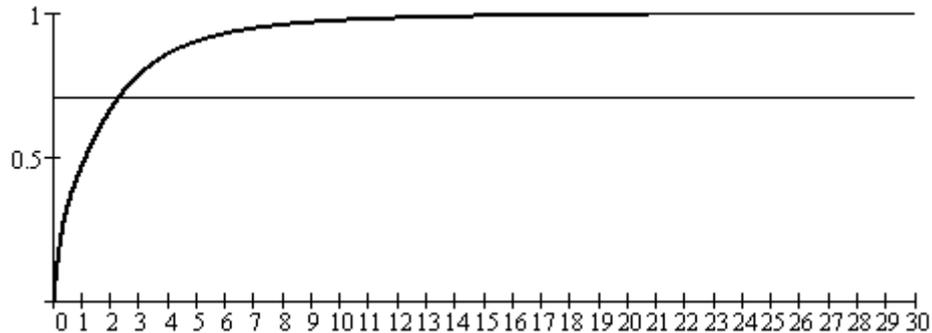


Рисунок 11 – АЧХ аналогового фильтра-прототипа

Из рисунка видно, что фильтра не пропускает частоты близкие к нулю, то есть является фильтром верхних частот. Прямая параллельная оси частот определяет пороговый уровень, по которому определяется частота среза $\omega_{cp} = 2.275\alpha$ (вычислена с помощью ЭВМ).

Величину ω_{\max} определим следующим образом. Сначала преобразуем передаточную функцию, выделив целую часть.

$$K_u(p) = \frac{p^2 + \alpha p}{p^2 + 3\alpha p + \alpha^2} = 1 - \frac{\alpha^2 + 2\alpha p}{p^2 + 3\alpha p + \alpha^2} = 1 - K_{\sim}(p)$$

Затем применим пороговый критерий к переменной составляющей $K_{\sim}(p)$, заменяя p на $j\omega$.

$$\dot{K}_{\sim}(\omega) = \frac{\alpha^2 + 2\alpha j\omega}{-\omega^2 + 3\alpha j\omega + \alpha^2}$$

По порогу 0,1 определим $\omega_{\max} = 20\alpha$ (рис.12).

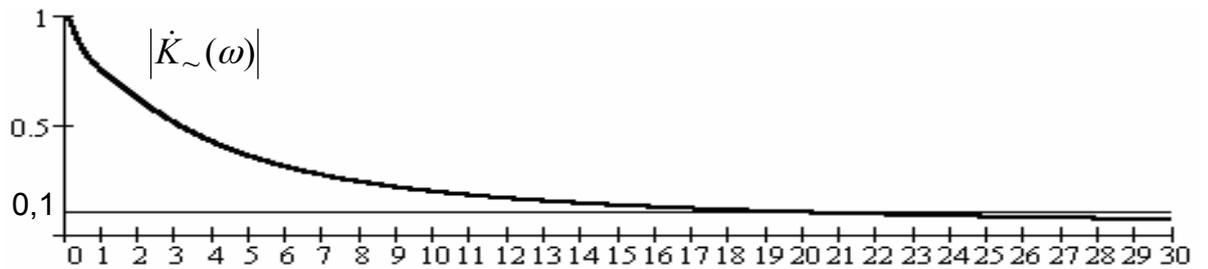


Рисунок 12 – Определение ω_{max}

Нахождение временных характеристик аналогового фильтра

Для нахождения отклика цепи на сигнал, необходимо определить временные характеристики заданного четырехполюсника, а именно отклики на типовые составляющие исходного сигнала.

Импульсную характеристику определяем с помощью обратного преобразования Лапласа взятого от передаточной функции:

$$g(t) = L^{-1}[K_u(p)] = \delta(t) - 0.106\alpha e^{-0.382\alpha t} \sigma(t) - 1.894\alpha e^{-2.618\alpha t} \sigma(t)$$

В этом выражении $\delta(t)$ – это обобщенная функция Дирака, которая равна бесконечности в точке равной нулю, и нулю во всех остальных точках.

Передаточную характеристику найдем, взяв обратное преобразование Лапласа от передаточной функции поделенной на p :

$$h(t) = L^{-1}\left[\frac{K_u(p)}{p}\right] = 0.276e^{-0.382\alpha t} \sigma(t) + 0.724e^{-2.618\alpha t} \sigma(t)$$

Построение временных характеристик аналогового фильтра

Импульсная характеристика (без указания дельта-функции)

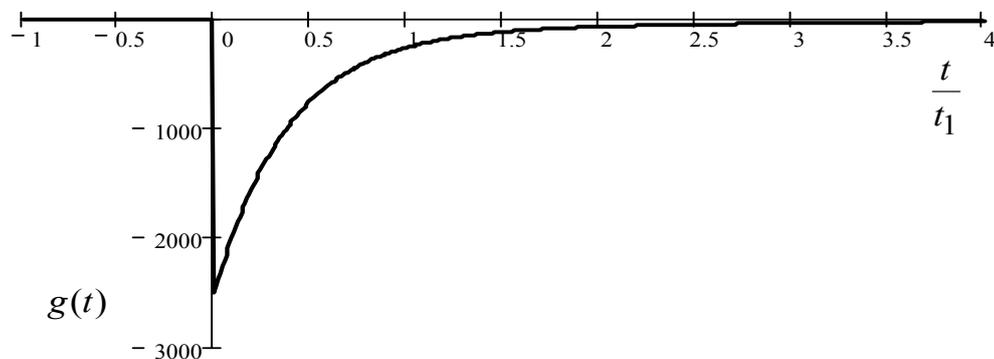


Рисунок 13 – Импульсная характеристика аналогового фильтра-прототипа

На рисунке 13 изображена импульсная характеристика заданного четырехполюсника, однако на ней не отображен тот факт, что импульсная характеристика в точке равной нулю равен бесконечности.

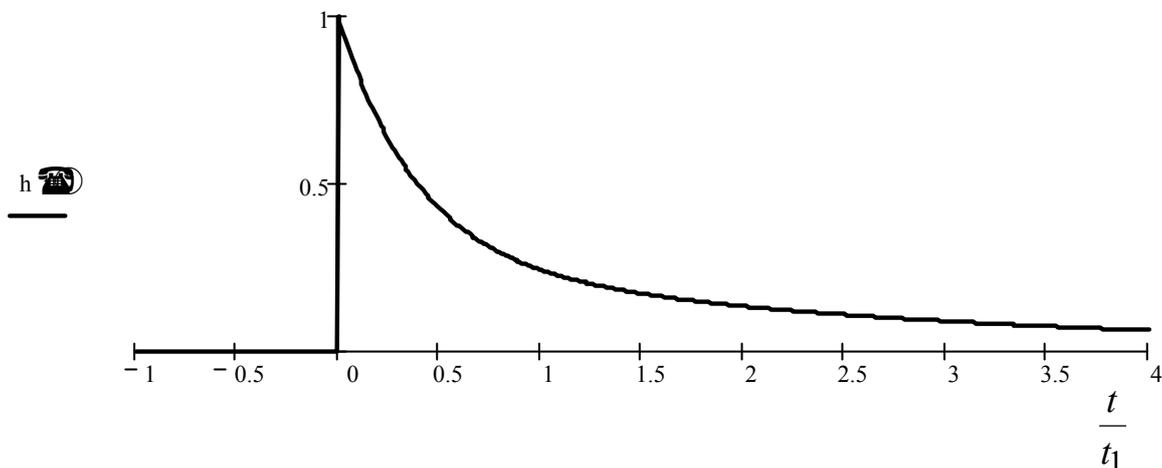


Рисунок 14 – Переходная характеристика аналогового фильтра-прототипа

Анализируя переходную характеристику на рисунке 14, можно определить, что заданный четырехполюсник является дифференциатором.

Нахождение отклика аналогового фильтра на сигнал

Для нахождения отклика аналогового фильтра на исходный сигнал, сначала найдем отклик цепи на линейную функцию. Отклик цепи на линейный сигнал определяем также с помощью обратного преобразования Лапласа взятого от передаточной функции, поделенной на p^2 .

$$s_{\hat{u}\hat{\delta}}(t) = L^{-1} \left[\frac{K_u(p)}{p^2} \right] =$$

$$= \frac{\sigma(t)}{\alpha} - \frac{0.724\sigma(t)}{\alpha} e^{-0.382\alpha t} - \frac{0.276\sigma(t)}{\alpha} e^{-2.618\alpha t} \frac{\sigma(t)}{\alpha}$$

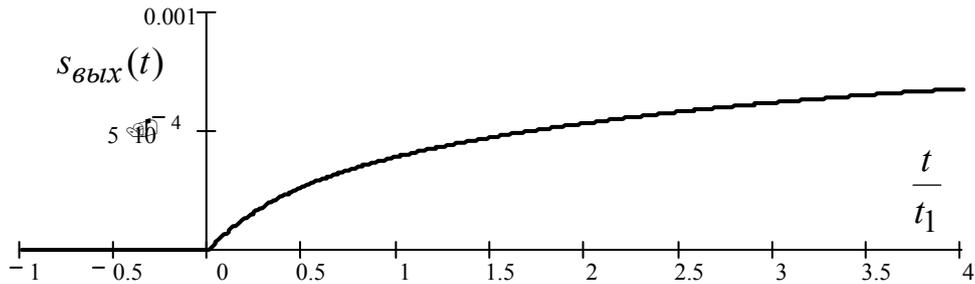


Рисунок 15 – Отклик аналогового фильтра-прототипа на линейный сигнал

Теперь необходимо просуммировать отклики на типовые сигналы с учетом весов и сдвигов по времени:

$$s_{\Sigma}(t) = -Eh(t) + 2Eh(t - t_1) - \frac{E}{t_1} s_{\hat{a}\hat{u}\hat{\delta}}(t - t_1) + \frac{E}{t_1} s_{\hat{a}\hat{u}\hat{\delta}}(t - 2t_1)$$

Построение отклика аналогового фильтра на сигнал

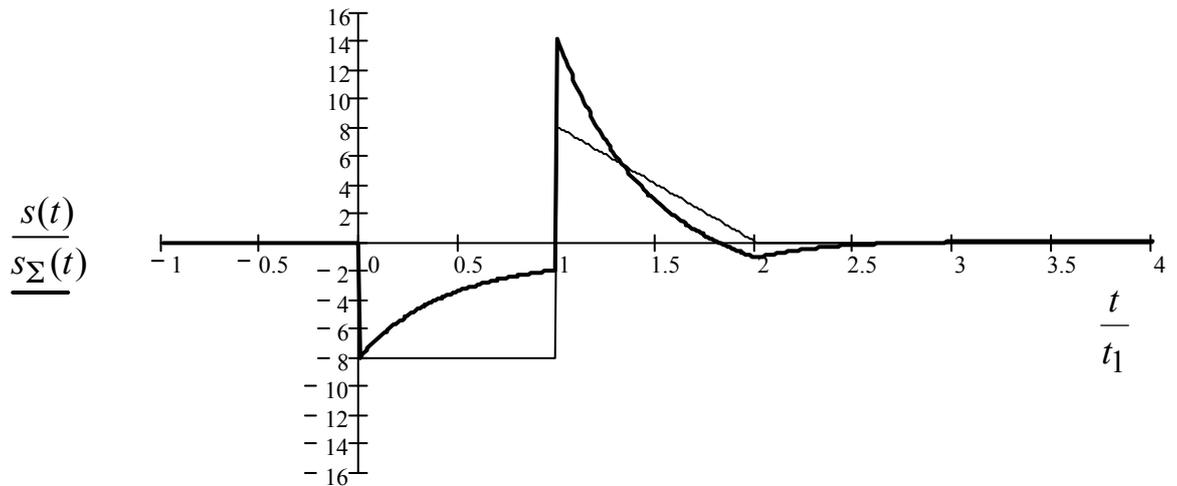


Рисунок 16 – Отклик аналогового фильтра-прототипа на исходный аналоговый сигнал

П5 Дискретизация аналогового сигнала

Прежде чем начать дискретизацию аналогового сигнала необходимо определить параметры дискретизации:

$$N = \frac{2\omega_{\max}}{\omega_0} \text{ - количество степеней свободы, } T_{\hat{a}} = \frac{T_{\hat{u}\hat{n}}}{N} \text{ - интервал}$$

дискретизации.

Дискретный сигнал определяется формулой $s_n = s(nT_a)$

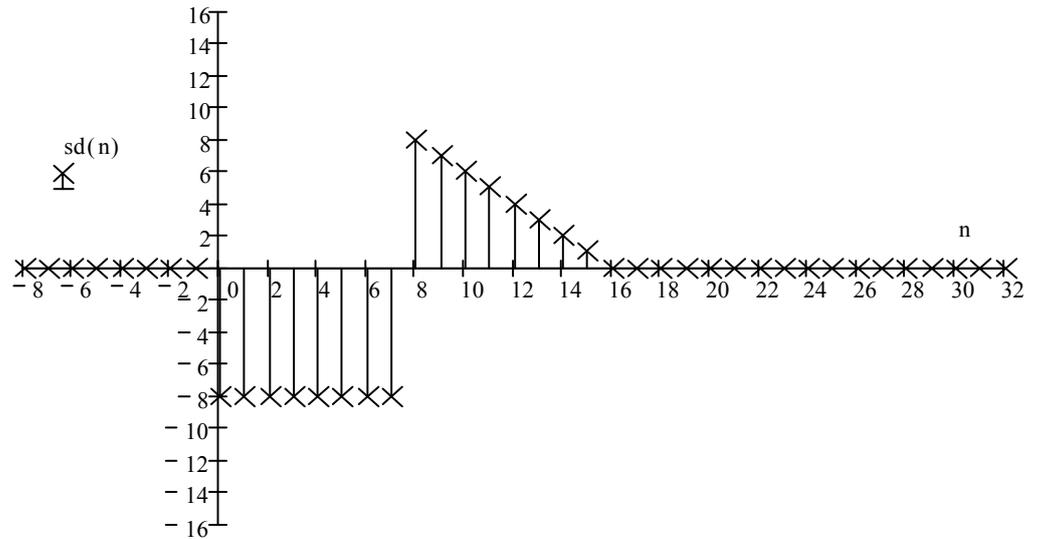


Рисунок 17 – Дискретный сигнал

Разложение дискретного сигнала на типовые составляющие

Для применения Z -преобразования лучше всего сначала разбить дискретный сигнал на типовые составляющие, как это было сделано при анализе аналогового сигнала:

$$s_{1n} = -E\sigma_n, \quad s_{2n} = -2E\sigma_{n-\frac{N}{3}}, \quad s_{3n} = -\frac{3E}{N}\left(n - \frac{N}{3}\right)\sigma_{n-\frac{N}{3}},$$

$$s_{4n} = \frac{3E}{N}\left(n - \frac{2N}{3}\right)\sigma_{n-\frac{2N}{3}}.$$

Графическое представление типовых составляющих дискретного сигнала представлено на рисунке 18.

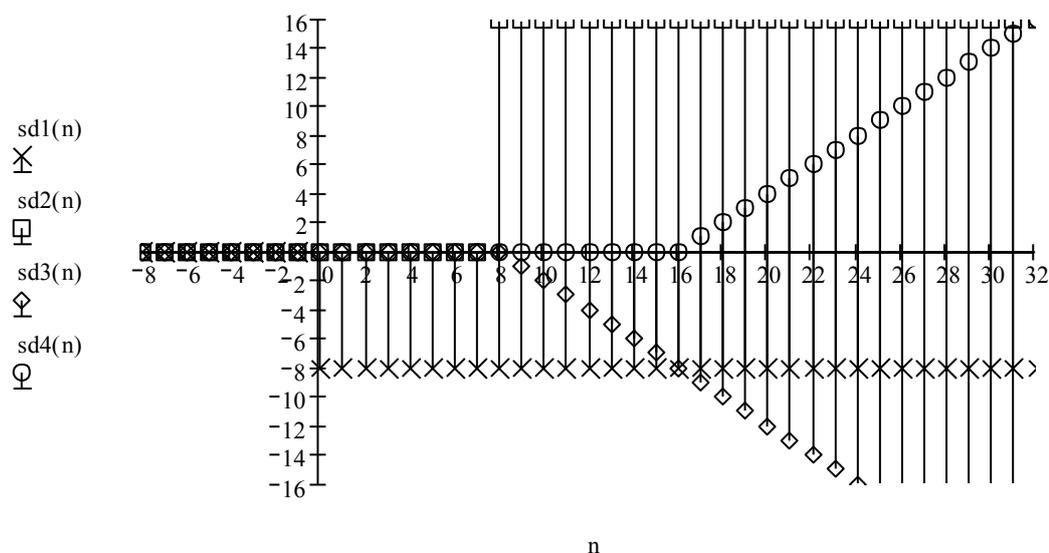


Рисунок 18 – Типовые составляющие дискретного сигнала

Нахождение спектральной плотности дискретного сигнала

Для нахождения спектральной плотности дискретного сигнала применим к нему прямое Z -преобразование:

$$S_{\ddot{a}}(\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{-j\omega n T_{\ddot{a}}}$$

Но так как в пункте 4.2 сигнал был разбит на типовые составляющие, которые можно свернуть по одному, а не весь сигнал сразу, что гораздо легче, сначала найдем их по отдельности, затем просуммируем и применим замену $z = e^{j\omega T_{\ddot{a}}}$.

$$S_1(z) = E \frac{z}{z-1}, \quad S_2(z) = 2E \frac{z}{z-1} z^{-\frac{N}{3}}, \quad S_3(z) = -\frac{3E}{N} \frac{z}{(z-1)^2} z^{-\frac{N}{3}},$$

$$S_3(z) = \frac{3E}{N} \frac{z}{(z-1)^2} z^{-\frac{2N}{3}}$$

$$S_{\ddot{a}}(\omega) = S_1(e^{j\omega T_{\ddot{a}}}) + S_2(e^{j\omega T_{\ddot{a}}}) + S_3(e^{j\omega T_{\ddot{a}}}) + S_4(e^{j\omega T_{\ddot{a}}})$$

Построение спектральной плотности дискретного сигнала

Для анализа влияния дискретизации на частотные характеристики

сигнала, спектральные плотности представлены на рисунке 19.

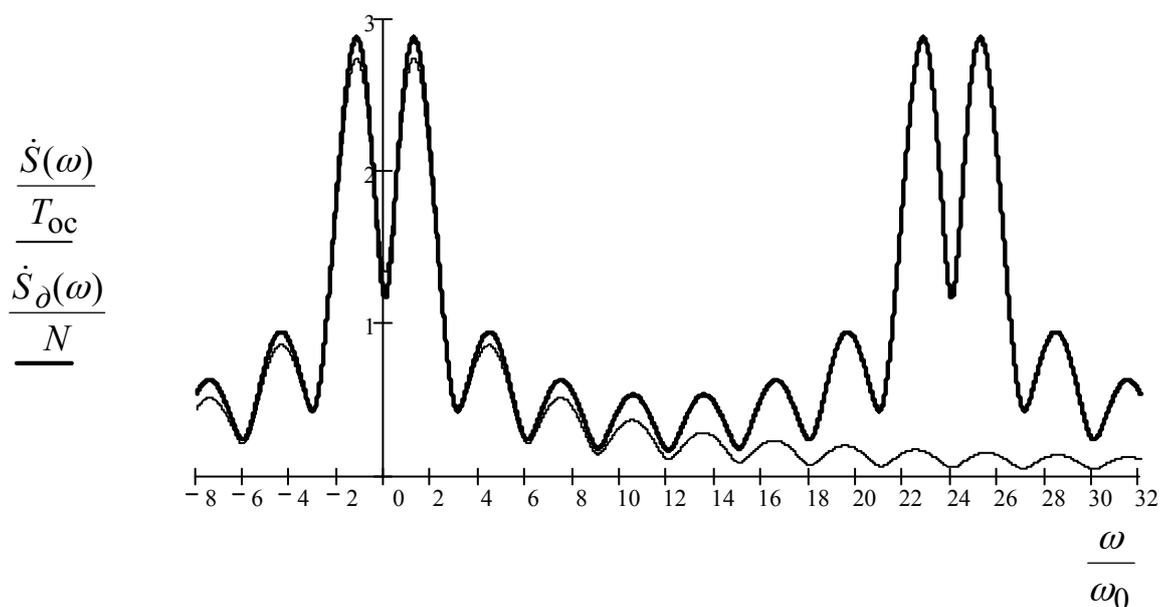


Рисунок 19 – Спектральная плотность дискретного сигнала

Из графика видно, что АЧХ претерпела периодизацию. Это произошло вследствие дискретизации исходного сигнала по времени. Также следует заметить, что спектральная плотность дискретного сигнала находится выше спектральной плотности аналогового сигнала, это обусловлено наложением «хвостов».

Фазочастотная характеристика

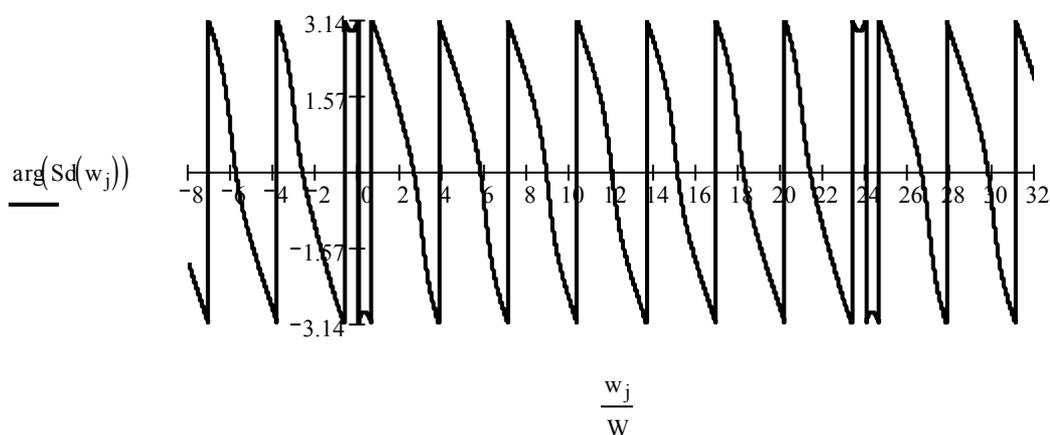


Рисунок 20 – ФЧХ дискретного сигнала

Как и в аналоговом сигнале, скомпенсируем с помощью теоремы сдвига линейную составляющую ФЧХ.

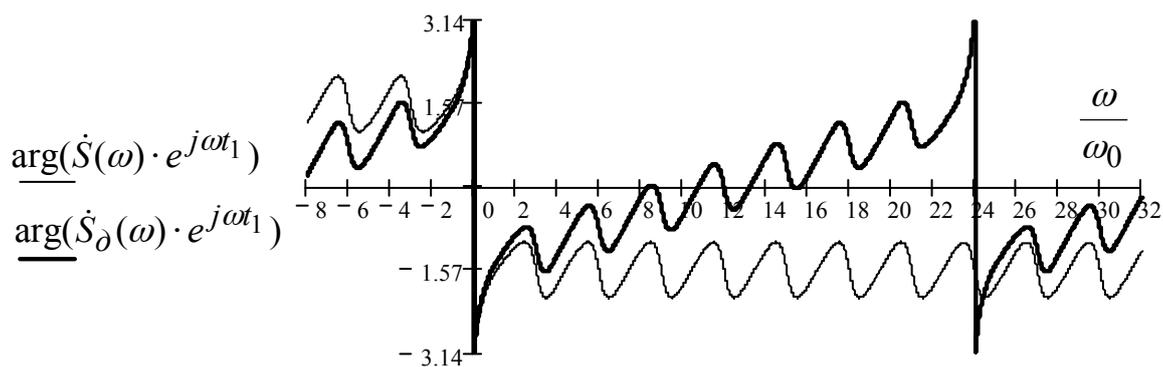


Рисунок 21 – ФЧХ дискретного сигнала с компенсированной линейной составляющей

Расчёт и построение спектра комплексных коэффициентов ДПФ

Для нахождения дискретного представления сигнала в частотной области применяем прямое дискретное преобразование Лапласа.

$$C_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} s_n e^{-j \frac{2\pi}{N} nk}$$

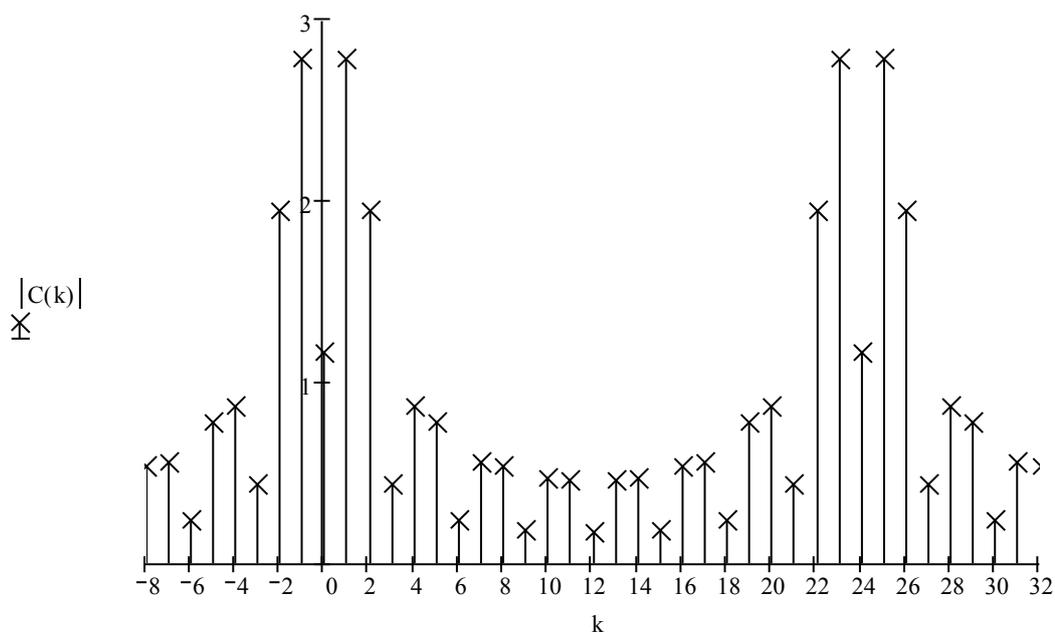


Рисунок 22 – Спектр модулей комплексных коэффициентов ДПФ

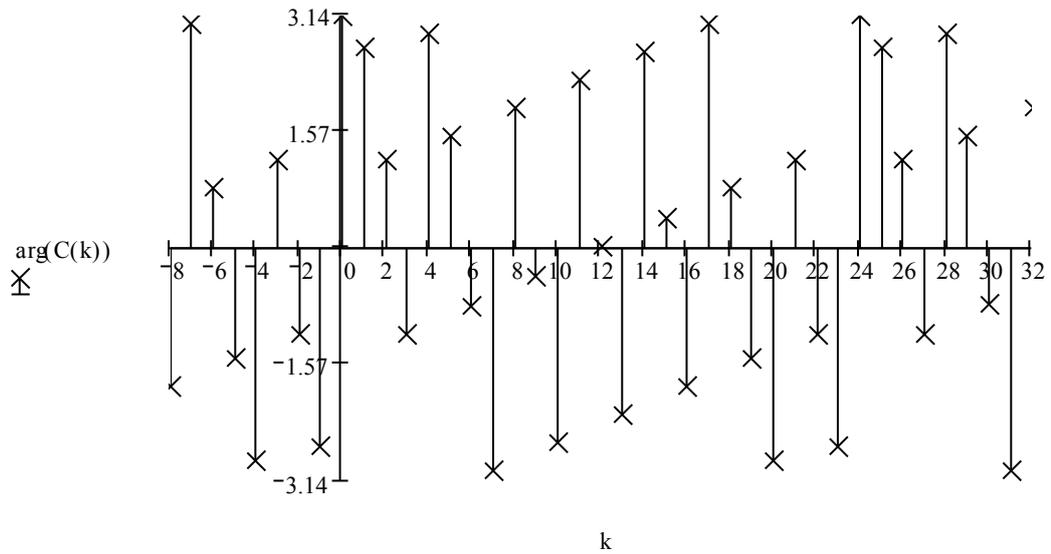


Рисунок 23 – Спектр фаз комплексных коэффициентов ДПФ

Из графика видно, что если поменять знак индекса на противоположный, знак аргумента также инвертируется, другими словами, комплексные коэффициенты, симметричные относительно начала координат, являются комплексно-сопряженными.

Восстановление аналогового сигнала

Восстановление сигнала проведём двумя способами: с помощью теоремы Котельникова и по Фурье.

Восстановление с помощью теоремы Котельникова

$$s_{\text{аналоговый}}(t) = \sum_{n=0}^{N-1} s_n \frac{\sin\left[\frac{N}{2}\omega_0(t - nT_{\text{д}})\right]}{\frac{N}{2}\omega_0(t - nT_{\text{д}})}$$

Сигнал восстанавливается из простых составляющих с разными весами и сдвигами по времени, подобных тем изображенным на рисунке 24. Результат суммирования этих составляющих представлен на рисунке 25. Это и есть восстановление сигнала по Котельникову.

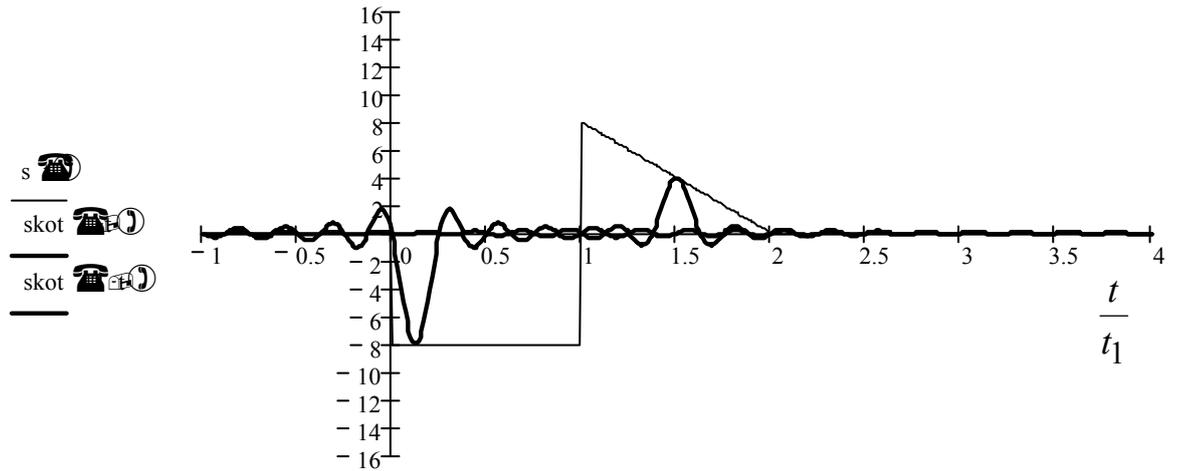


Рисунок 24 – Составляющие сигнала, восстановленного по Котельникову

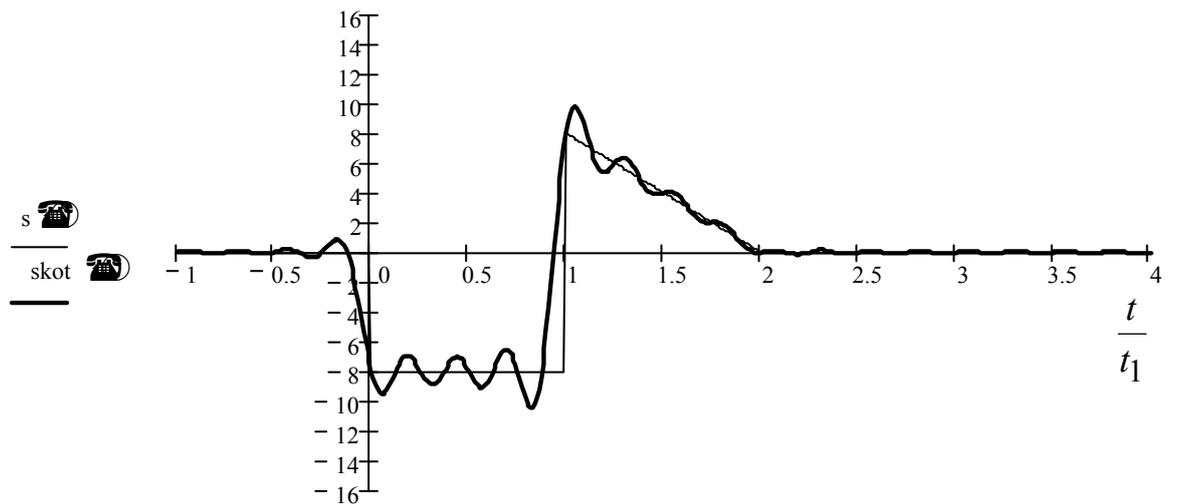


Рисунок 25 – Сигнал, восстановленный по Котельникову

Восстановление по Фурье определяется следующей формулой:

$$s_{\text{восстановленный}}(t) = C_0 + 2 \sum_{k=1}^{\frac{N}{2}-1} (|C_k| \cos(k\omega t + \arg C_k)) + \left| C_{N/2} \right| \cos\left(\frac{N}{2}\omega t + \arg C_{N/2}\right)$$

На рисунке 26 приведено графическое представление восстановления.

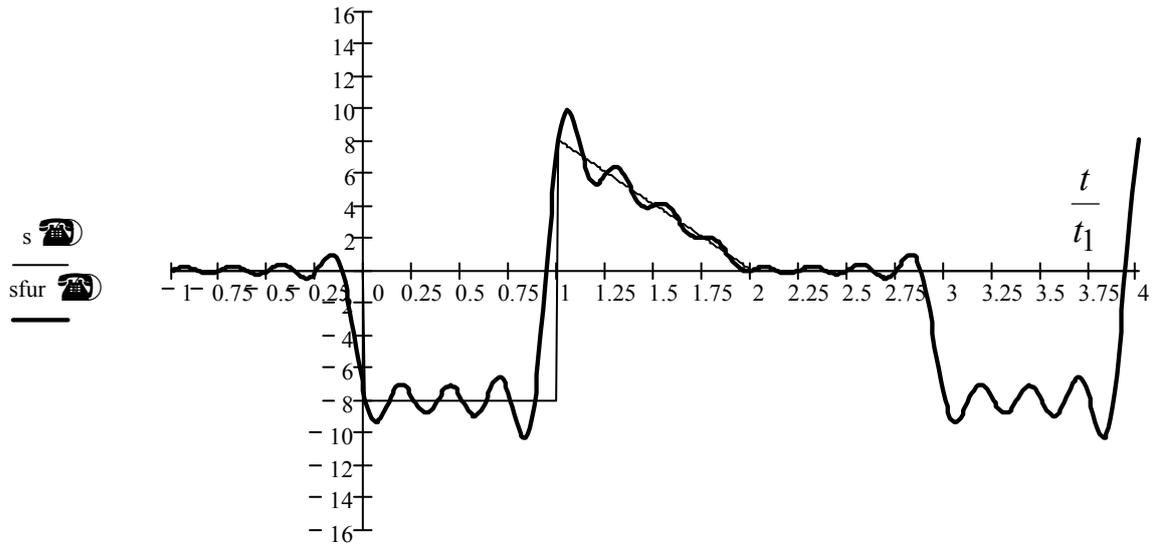


Рисунок 26 – Сигнал, восстановленный по Фурье

П6 Синтез цифрового фильтра методом инвариантности импульсной характеристики

Дискретизация импульсной характеристики проводится для нахождения системных функций методом инвариантной импульсной характеристики. Для дискретизации импульсной характеристики необходимо вначале найти интервал дискретизации. Он определяется следующей формулой:

$$T_{\ddot{a}} = \frac{\pi}{\omega_{\max}}$$

Дискретная импульсная характеристика:

$$g_n = g(nT_{\ddot{a}}) \cdot T_{\ddot{a}} = -0.017 \cdot 0.942^n \sigma_n - 0.297 \cdot 0.663^n \sigma_n$$

При этом обобщенная функция Дирака, имевшая место в аналоговом представлении, в цифровом представлении заменяется значением единицы в начале координат:

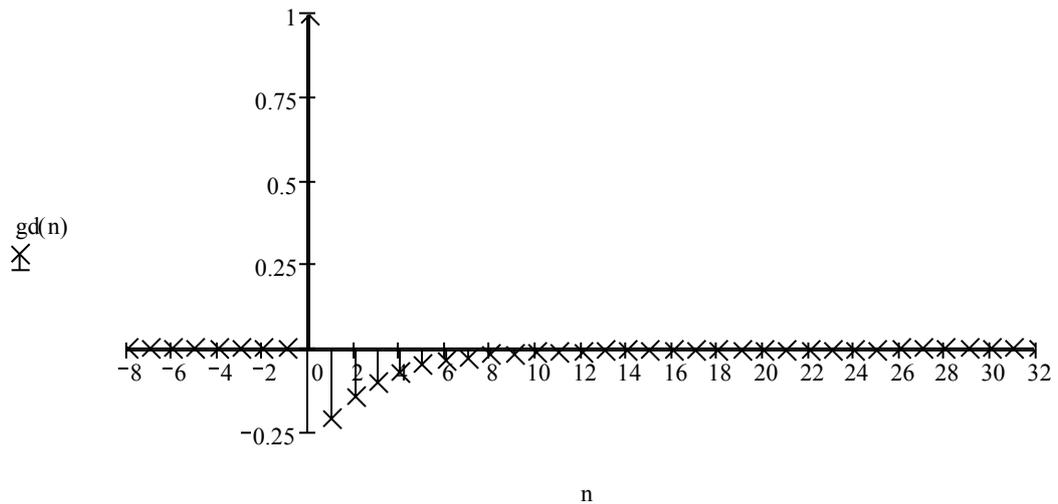


Рисунок 27 – Дискретная импульсная характеристика

Расчет ТЦФ методом ИИХ

Для нахождения системной функции ТЦФ необходимо ограничить импульсную характеристику по пороговому критерию, определенному как десятая часть первого отсчета дискретной импульсной характеристики:

$$g_1 = -0.213, g_2 = -0.145, g_3 = -0.101, g_4 = -0.071, g_5 = -0.05, \\ g_6 = -0.037, g_7 = -0.028, g_8 = -0.021, g_9 = -0.017, g_{10} = -0.014, \\ g_{11} = -0.012, g_{12} = -0.01.$$

Ограничиваем импульсную характеристику восемью отсчетами:

$$k_{\text{ТЦФ}}(z) = 1 + \sum_{n=1}^8 g_n z^{-n}$$

В системной функции единица означает, что в точке равной нулю импульсная характеристика равна единице, то есть сигнал на входе беспрепятственно проходит к выходу.

Исходя из системной функции, нетрудно составить структурную схему трансверсального цифрового фильтра (рис.28)

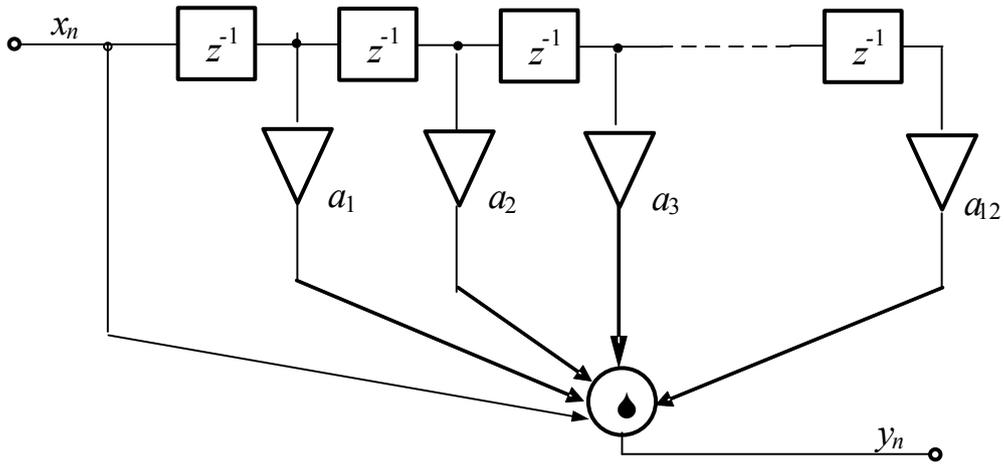


Рисунок 28 – Структурная схема трансверсального цифрового фильтра

Построение частотных характеристик ТЦФ

Частотные характеристики ТЦФ получаем из его системной функции путем замены $z = e^{j\omega T\ddot{a}}$.

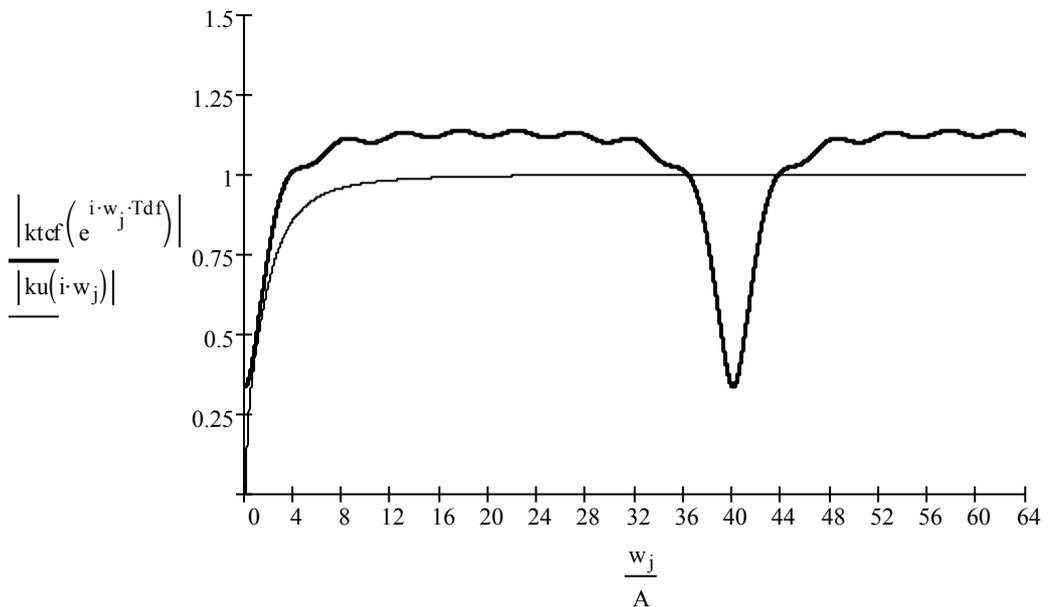


Рисунок 29 – АЧХ трансверсального цифрового фильтра

Из рисунка видно, что амплитудно-частотная характеристика трансверсального цифрового фильтра пульсирует – это является следствием того, что трансверсальный цифровой фильтр имеет конечную импульсную характеристику, из-за этого иногда трансверсальный

цифровой фильтр называют фильтром с конечной импульсной характеристикой, КИХ-фильтром.

Фазочастотная характеристика

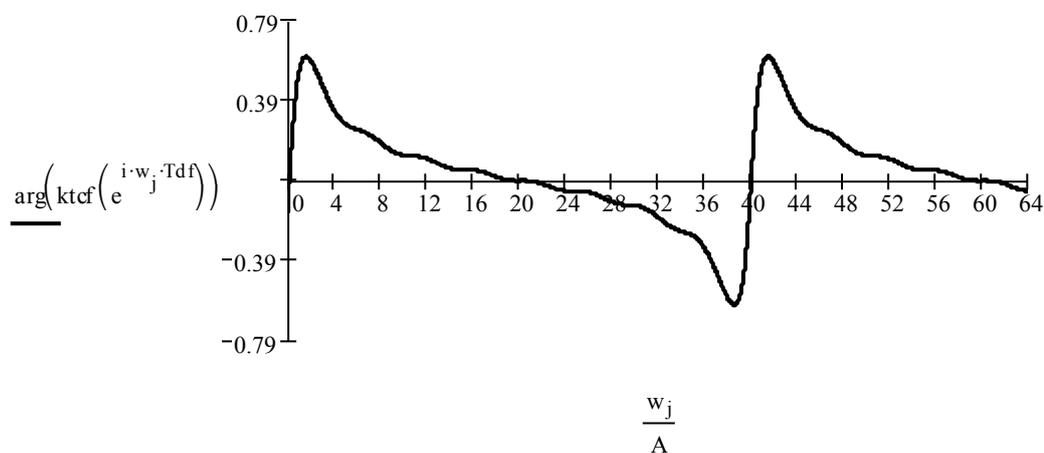


Рисунок 30 – ФЧХ трансверсального цифрового фильтра

Расчет РЦФ методом ИИХ

Нахождение системной функции РЦФ

В отличие от трансверсальных фильтров, имеющих конечную импульсную характеристику, рекурсивные фильтры имеют бесконечную импульсную характеристику, из-за этого их иногда называют фильтрами бесконечной импульсной характеристики, БИХ-фильтрами. Системная функция рекурсивного цифрового фильтра определяется формулой:

$$k_{\text{БИХ}}(z) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} g_n z^{-n}$$

Подставив дискретную импульсную характеристику, свернем бесконечные геометрические прогрессии, получающиеся при этом:

$$k_{\text{БИХ}}(z) = 1 - \frac{0.016z^{-1}}{1 - 0.942z^{-1}} - \frac{0.197z^{-1}}{1 - 0.663z^{-1}}$$

Приведем выражение к каноническому виду и, в результате, будем иметь:

$$k_{\text{DÖÖ}}(z) = \frac{1 - 1.818z^{-1} + 0.822z^{-2}}{1 - (1.605z^{-1} - 0.625z^{-2})}$$

На основе системной функции запишем алгоритм работы РЦФ:

$$\begin{aligned} Y_n &= X_n - 1.818X_{n-1} + 0.822X_{n-2} + 1.605Y_{n-1} - 0.625Y_{n-2} = \\ &= X_n + a_1X_{n-1} + a_2X_{n-2} + b_1Y_{n-1} + b_2Y_{n-2} = \end{aligned}$$

Структурная схема приведена ниже на рисунке 31.

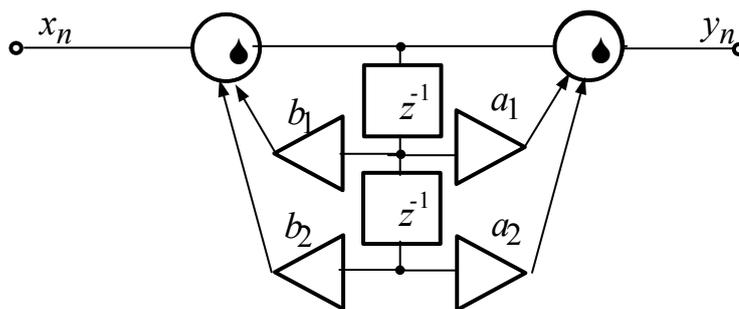


Рисунок 31 – Структурная схема рекурсивного цифрового фильтра

Построение частотных характеристик РЦФ

Переход от системной функции осуществим путем замены

$$z = e^{j\omega T_{\text{ä}}}.$$

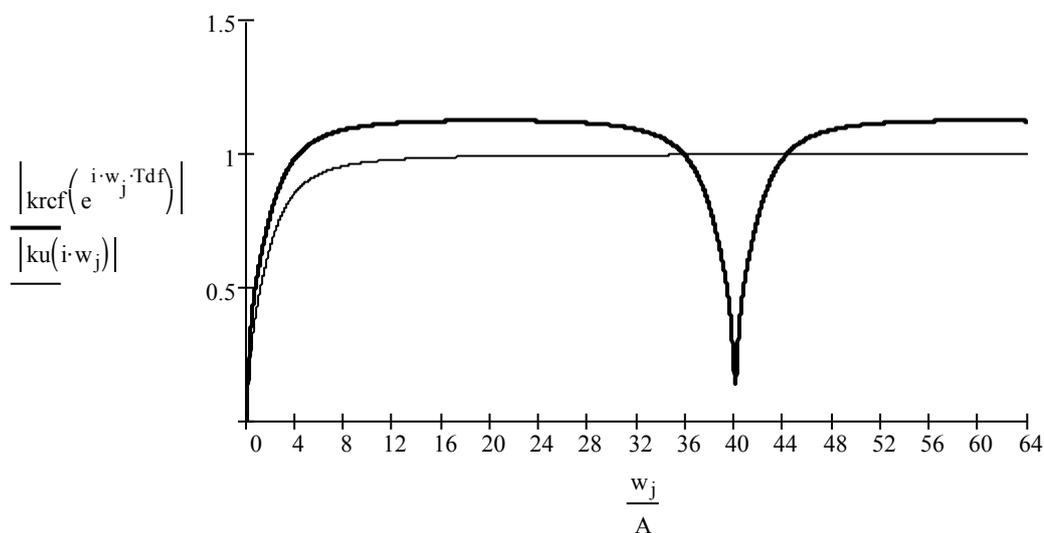


Рисунок 32 – АЧХ рекурсивного цифрового фильтра

Из рисунка видно – АЧХ не пульсирует, это говорит о бесконечности импульсной характеристики.

Фазочастотная характеристика

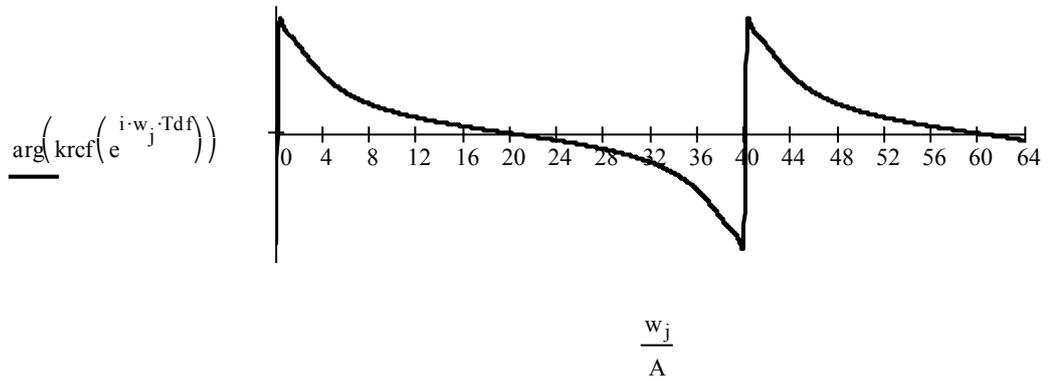


Рисунок 33 – ФЧХ рекурсивного цифрового фильтра

П7 Синтез цифрового фильтра методом билинейного Z-преобразования

Нахождение системной функции РЦФ

В этом методе используется билинейная подстановка. К системной функции рекурсивного фильтра перейдем путем замены следующего вида:

$$p = \frac{2}{T_{\bar{a}}} \cdot \frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}}$$

В полученном выражении проводим преобразования, аналогичные проделанным выше. В итоге получим системную функцию рекурсивного цифрового фильтра в канонической форме:

$$k_{D\ddot{O}\ddot{O}}(z) = \frac{0.869 - 1.611z^{-1} + 0.742z^{-2}}{1 - (1.611z^{-1} - 0.62z^{-2})}$$

Алгоритм работы и структурная схема имеют вид:

$$\begin{aligned} Y_n &= 0.869X_n - 1.611X_{n-1} + 0.742X_{n-2} + 1.611Y_{n-1} - 0.62Y_{n-2} = \\ &= a_0X_n + a_1X_{n-1} + a_2X_{n-2} + b_1Y_{n-1} + b_2Y_{n-2} = \end{aligned}$$

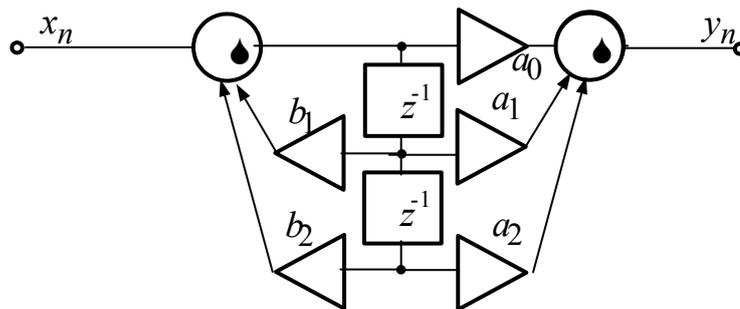


Рисунок 34 – Структурная схема рекурсивного цифрового фильтра

Построение частотных характеристик РЦФ

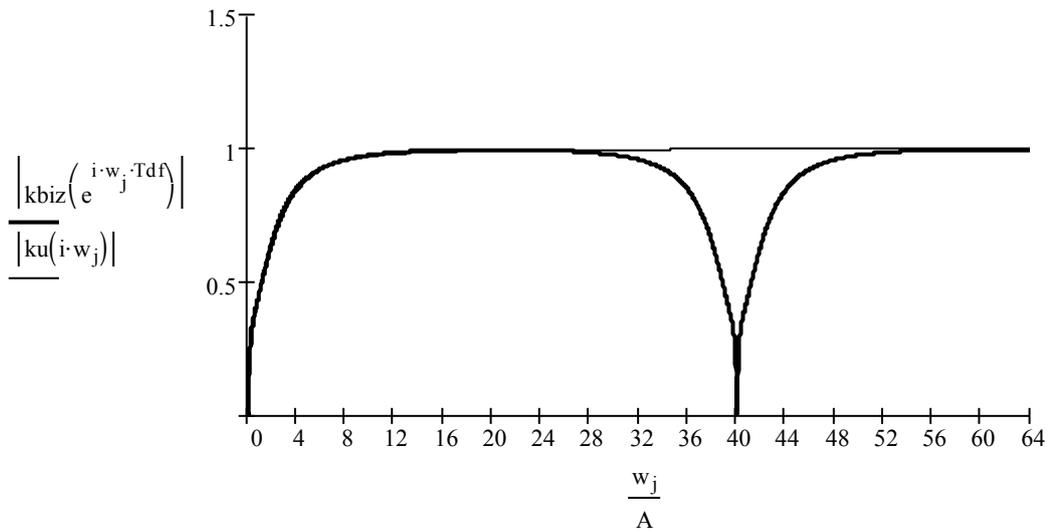


Рисунок 35 – АЧХ рекурсивного цифрового фильтра

В методе билинейного Z-преобразования, в отличие от метода ИИХ, полученная АЧХ практически совпадает с АЧХ аналогового фильтра-прототипа.

Фазочастотная характеристика

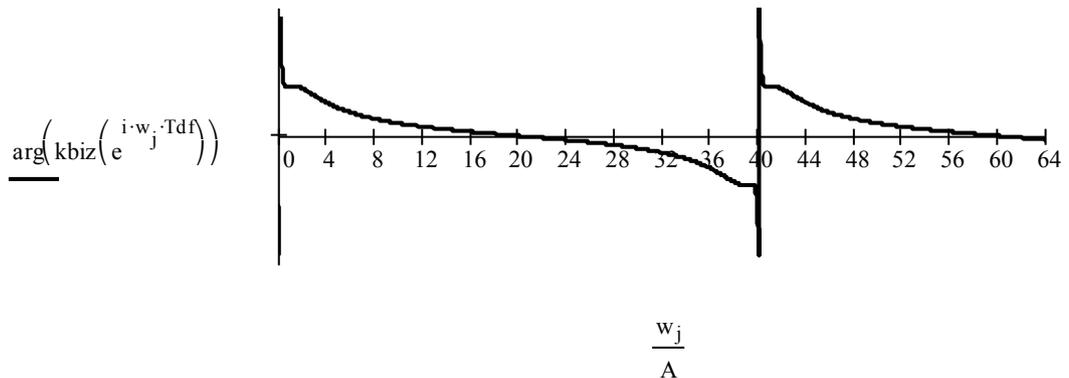


Рисунок 36 – ФЧХ рекурсивного цифрового фильтра

Расчет отклика ЦФ на дискретный сигнал

По алгоритму работы РЦФ построим отклик РЦФ на дискретный сигнал, полученный путем дискретизации исходного аналогового сигнала.

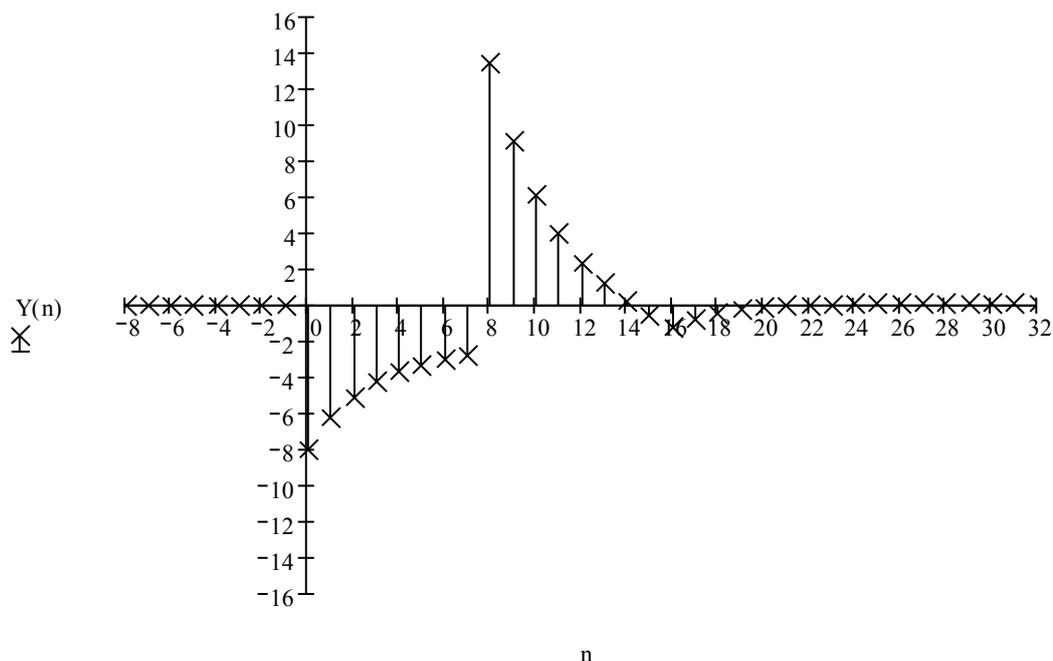


Рисунок 37 – Отклик цифрового фильтра на дискретный сигнал

Из рисунка видно – рассчитанный ЦФ дифференцирует входной дискретный сигнал. Значит, расчет проведен правильно.

П8 Синтез цифрового полосового фильтра Чебышева

Анализ исходных данных

У фильтра Чебышева I типа амплитудно-частотная характеристика имеет равноволновое приближение внутри полосы и плоское приближение вне полосы. Такой фильтр будет исследоваться в данном разделе курсовой работы.

Заданы нормированные цифровые граничные частоты для требуемого полосового фильтра Чебышева:

$$\hat{\omega}_{i_1} = 0,1; \hat{\omega}_{i_2} = 0,2; \hat{\omega}_{c_1} = 0,05; \hat{\omega}_{c_2} = 0,25.$$

Также заданы коэффициенты затухания внутри полосы и вне полосы соответственно:

$$A_i = 3\text{дБ}; A_c = 20\text{дБ}.$$

Перед расчётом деформированных частот необходимо рассчитать параметры преобразования:

$$\gamma = \operatorname{ctg} \pi(\hat{\omega}_{12} - \hat{\omega}_{11}) = \frac{1}{\operatorname{tg}(0,1\pi)} = 3,078;$$

$$\alpha = \frac{\cos \pi(\hat{\omega}_{12} - \hat{\omega}_{11})}{\sin \pi(\hat{\omega}_{12} - \hat{\omega}_{11})} = \frac{\cos(0,3\pi)}{\sin(0,1\pi)} = 0,618;$$

Вычислим нормированные деформированные граничные частоты полосы пропускания аналогового фильтра-прототипа:

$$\hat{\Omega}_{\hat{\omega}_{11}} = \gamma \frac{\alpha - \cos 2\pi \hat{\omega}_{11}}{\sin 2\pi \hat{\omega}_{11}} = 3,078 \frac{0,618 - \cos(0,2\pi)}{\sin(0,2\pi)} = -1;$$

$$\hat{\Omega}_{\hat{\omega}_{12}} = \gamma \frac{\alpha - \cos 2\pi \hat{\omega}_{12}}{\sin 2\pi \hat{\omega}_{12}} = 3,078 \frac{0,618 - \cos(0,4\pi)}{\sin(0,4\pi)} = 1.$$

Граничные аналоговые частоты полосы заграждения определим по формуле

$$\hat{\Omega}_{\hat{\omega}} = \min(|\hat{\Omega}_{\hat{\omega}}^{\text{I}}|, |\hat{\Omega}_{\hat{\omega}}^{\text{II}}|), \text{ где}$$

$$\hat{\Omega}_{\hat{\omega}}^{\text{I}} = \gamma \frac{\alpha - \cos 2\pi \hat{\omega}_{\zeta 1}}{\sin 2\pi \hat{\omega}_{\zeta 1}};$$

$$\hat{\Omega}_{\hat{\omega}}^{\text{II}} = \gamma \frac{\alpha - \cos 2\pi \hat{\omega}_{\zeta 2}}{\sin 2\pi \hat{\omega}_{\zeta 2}}.$$

Очевидно, $\hat{\Omega}_{\hat{\omega}} = 1,902$, откуда получаем $\hat{\Omega}_{\zeta 1} = -1,902$ и $\hat{\Omega}_{\zeta 2} = 1,902$.

Найдём порядок НЧ-прототипа:

$$N \geq \frac{\operatorname{arch} \sqrt{\frac{10^{0,1A_{\zeta}} - 1}{10^{0,1A_{\hat{\omega}}} - 1}}}{\operatorname{arch} \frac{\hat{\Omega}_{\zeta}}{\hat{\Omega}_{\hat{\omega}}}} = 2,376.$$

Поскольку порядок фильтра выражается натуральным числом, необходимо принять $N=3$.

Анализ аналогового фильтра Чебышева

Передаточная функция аналогового фильтра Чебышева I типа удовлетворяет равенству

$$\left| K_{\times 1}(\hat{\Omega}) = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon^2 T_N^2 \hat{\Omega}}} \right|.$$

Здесь T_N - полином Чебышева N -го порядка (в данном случае $N=3$):

$$T_3(\hat{\Omega}) = 4\hat{\Omega}^3 - 3\hat{\Omega}.$$

Также необходимо знать параметр ε , характеризующий величину флуктуаций АЧХ в полосе пропускания:

$$\varepsilon = \sqrt{10^{0,1A_i} - 1} = 0,998.$$

На рисунке 38 приведена АЧХ фильтра Чебышева третьего порядка.

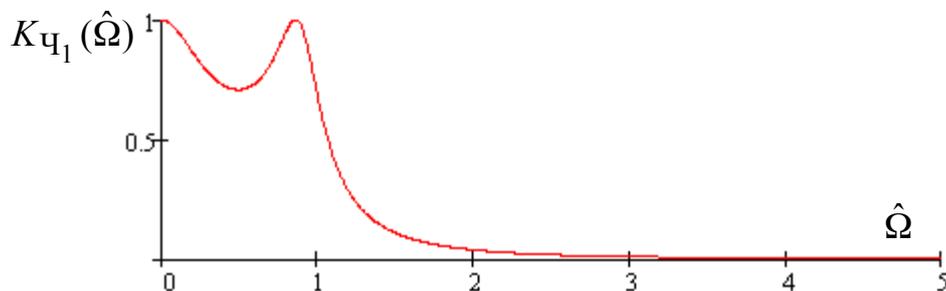


Рисунок 38 – АЧХ фильтра Чебышева

Синтез цифрового фильтра Чебышева

Согласно справочнику, полюса передаточной функции фильтра Чебышева 3-го порядка с затуханием в полосе пропускания $A_i = 3$ дБ равны

$$\hat{p}_1 = 0,299; \hat{p}_{2,3} = -0,149 + j0,904.$$

Передаточная функция для такого фильтра примет вид

$$K_{\times}(p) = \frac{0,251}{(\hat{p} + 0,299)(\hat{p}^2 + 0,298\hat{p} + 0,839)}.$$

Для нахождения системной функции требуется произвести обобщённую билинейную замену:

$$\hat{p} = \gamma \frac{1 - 2\alpha z^{-1} + z^{-2}}{1 - z^{-2}} = 3,078 \frac{1 - 1,236z^{-1} + z^{-2}}{1 - z^{-2}}.$$

Системная функция фильтра приобретёт вид

$$K(z) = 0,015 \cdot \frac{1 - z^{-2}}{1 - [1,126z^{-1} - 0,823z^{-2}]} \times \\ \times \frac{1 - 2z^{-2} + z^{-4}}{1 - [1,808z^{-1} - 1,899z^{-2} + 1,34z^{-3} - 0,621z^{-4}]}.$$

Коэффициенты получающегося цифрового фильтра занесены в таблицу П.1. Структура фильтра приведена на рисунке 39.

Таблица П.1. Коэффициенты цифрового фильтра.

k	l	a_l^k	b_l^k
0		0,015	
1	1		-1,126
	2	-1	0,823
2	1		-1,808
	2	-2	1,899
	3		-1,34
	4	1	0,621

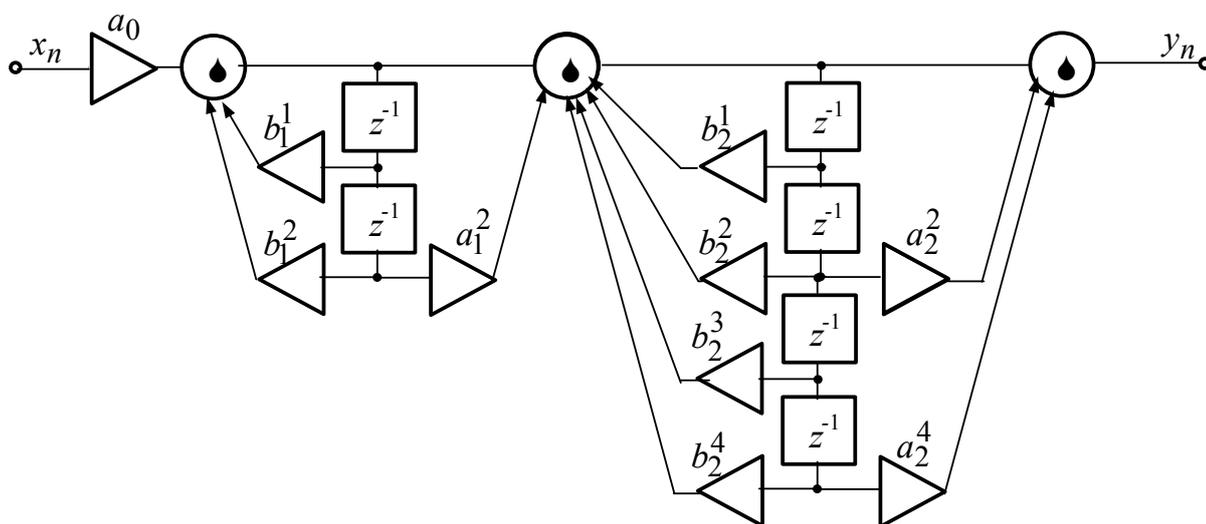


Рисунок 39 – Структурная схема цифрового фильтра Чебышева

Произведём проверку фильтра на устойчивость. Чтобы фильтр был

устойчивым, необходимо, что все полюса передаточной функции лежали на Z -плоскости внутри окружности единичного радиуса.

Полюса передаточной функции равны

$$z_{1,2} = 0,325 \pm j0,89; z_{3,4} = 0,562 \pm j0,713; z_{5,6} = 0,77 \pm j0,582.$$

Модули полюсов соответственно равны 0,947, 0,908 и 0,965. В самом деле, фильтр является электрически устойчивым.

Чтобы от системной функции цифрового фильтра перейти к его амплитудно-частотной характеристике, достаточно сделать замену следующего вида:

$$z = e^{j\omega T_a} = e^{j\frac{2\pi}{9}\hat{\omega}}.$$

На рисунке 40 приведена АЧХ цифрового фильтра Чебышева, а на рисунке 41 – его ФЧХ.

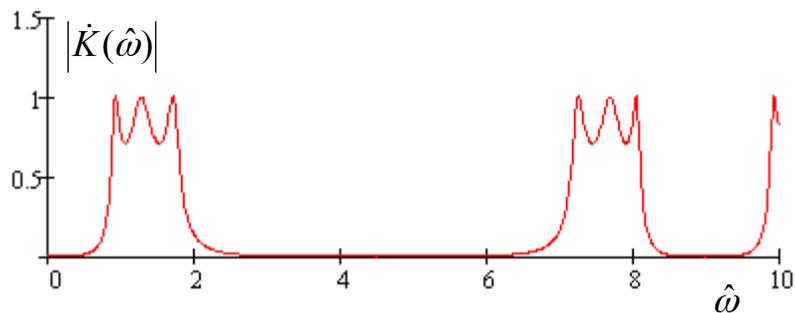


Рисунок 40 – АЧХ цифрового фильтра

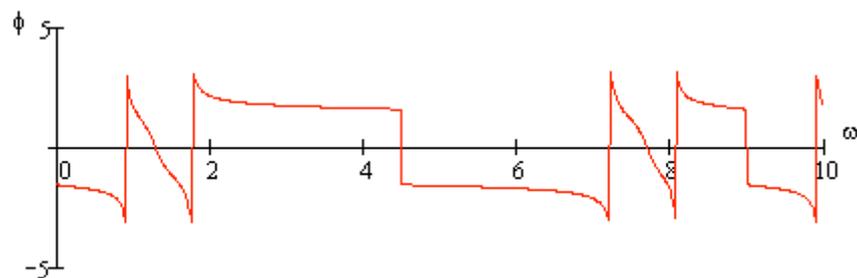


Рисунок 41 – ФЧХ фильтра Чебышева

Для получения импульсной характеристики цифрового фильтра необходимо произвести обратное Z -преобразование системной функции

фильтра.

$$g_n = Z^{-1}[K(z)].$$

Дискретная импульсная характеристика фильтра приведена на рисунке 42.

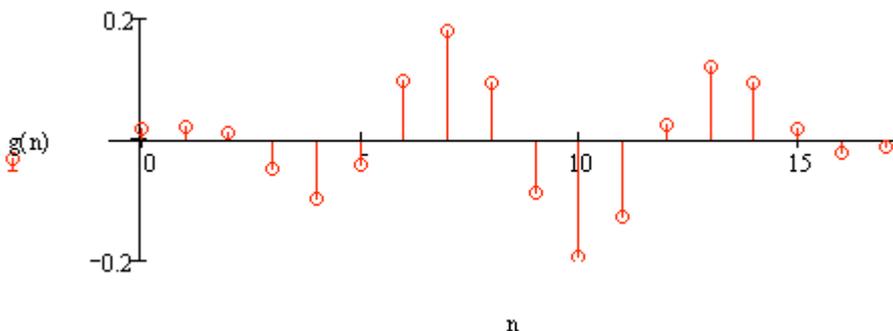


Рисунок 42 – Отсчёты импульсной характеристики фильтра

П9 Проверка результатов расчётов с помощью компьютерной системы визуализации результатов моделирования цифровых фильтров

Проверку расчётов выполним с помощью компьютерной системы визуализации результатов моделирования рекурсивных и трансверсальных цифровых фильтров различного назначения. Частотные и временные характеристики синтезированного полосового фильтра представлены на рисунке 43.

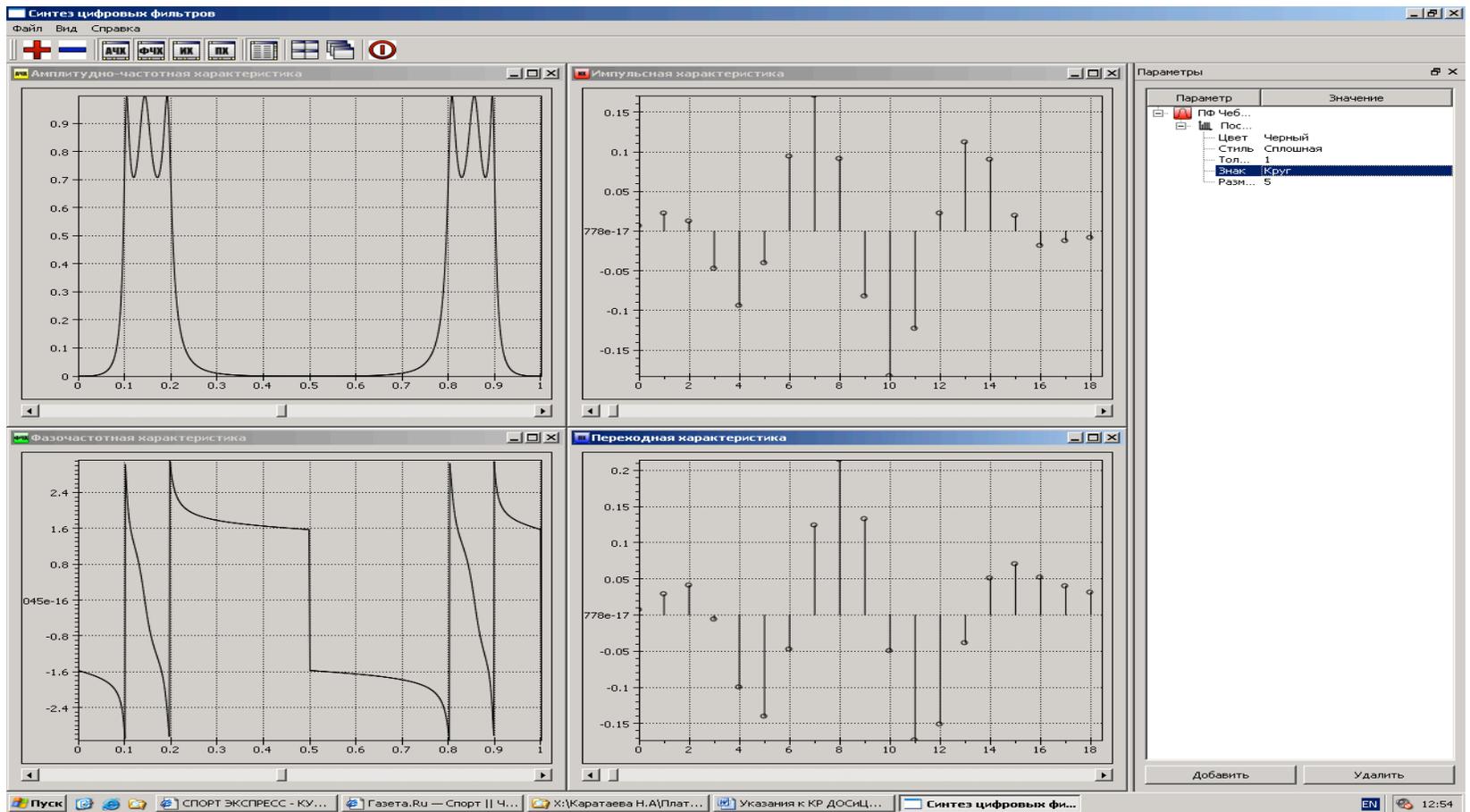


Рисунок 43 – Рабочее окно компьютерной системы визуализации результатов моделирования цифровых фильтров, иллюстрирующее частотные и временные характеристики рассчитанного полосового фильтра