

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра радиотехники и электродинамики
наименование кафедры

**Активные RC-фильтры нижних частот в усилителях звуковой
частоты класса D: схмотехническое моделирование и
проектирование**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 2233 группы

направления 03.04.03 «Радиофизика»
код и наименование направления

института физики
наименование факультета

Лушникова Андрея Дмитриевича
фамилия, имя, отчество

Научный руководитель
доцент кафедры радиотехники
и электродинамики, к.ф.-м.н., доцент
должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

Слепченков М.М.
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой радиотехники и
электродинамики
д.ф.-м.н., профессор
должность, уч. степень, уч. звание

дата, подпись

О.Е. Глухова
инициалы, фамилия

Саратов 2022 г.

Введение. Данная работа посвящена вопросам расчета и проектирования активных фильтров в целях применения для усилителей класса D. Фильтрация сигнала для выделения его основной частоты из смеси других частот (шума) входит в число основных процессов, осуществляемых в любом радиоприемном устройстве. Конструирование фильтров не обходится без внимания множества факторов. В частности, конкретные требования предъявляются к амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) в ширине переходной полосы, полосе задерживания и полосе пропускания фильтра, характеристике группового времени или фазо-частотной характеристике (ФЧХ), а также к необходимым параметрам, как уровень сигнала, входное и выходное сопротивление габариты, вес и стоимость изделия [1]. Целью данной работы является проведение сравнительного анализа частотных характеристик активных RC-фильтров нижних частот (ФНЧ) различных порядков на операционных усилителях для выявления оптимальной схемы фильтра для применения в электронных усилителях класса D и проведение проектирования монтажной платы. Для достижения этой цели используется программа имитационного моделирования LTspice [2] и программа для проектирования монтажной платы DipTrace [3]. Работа состоит из трех глав. Первая глава носит обзорный характер. Она посвящена обзору типов электрических фильтров, их схемотехнических разновидностей и описанию усилителя класса D. Вторая глава содержит результаты схемотехнического моделирования активных фильтров (АФ) RC-цепи на базе операционного усилителя в программе LTspice, на основании которых подбирается наиболее подходящий тип фильтра для последующего применения в усилителях класса D. Наконец, в третьей главе представлены результаты моделирования в программе LTspice и экспериментального исследования работы усилителя класса D с выбранным АФ типа Бесселя 8-го порядка, изображение изготовленных печатных плат ФНЧ усилителя с АФ и осциллограммы различных сигналов, снятые с изготовленного усилителя и фильтра.

Основное содержание работы. В работе рассматривались различные варианты параметров схем АФ на базе операционного усилителя (ОУ) на ИНУН различного порядка и типа. Двухполюсные фильтры на ИНУН могут быть фильтрами Баттерворта, Бесселя и Чебышева за счет определенного подбора параметров элементов. Для создания фильтров высокого порядка может быть соединено определенное число двухполюсных секций на ИНУН. В каждой секции выбирались такие элементы $R_1=R_2=R$ и $C_1=C_2=C$. Значение R выбирались в диапазоне от 10 до 100кОм. Для расчета значений элементов цепи фильтра Баттерворта используется формула: $RC=1/2\pi f_c$, где f_c - частота среза. Для каждого звена написаны свои значения коэффициента усиления в таблице 1 [4].

Таблица 1. Значения коэффициента усиления и нормирующего множителя для проектирования активных ФНЧ на ИНУН.

	Фильтр Баттерворта		Фильтр Бесселя		Фильтр Чебышева (0,5 дБ)		Фильтр Чебышева (0,2 дБ)	
	K	f_n	K	f_n	K	f_n	K	f_n
2	1,586	1,274	1,268	1,231	1,842	0,907	2,114	
4	1,152	1,432	1,084	0,597	1,582	0,471	1,924	
	2,235	1,606	1,759	1,031	2,660	0,964	2,782	
6	1,068	1,607	1,040	0,396	1,537	0,316	1,891	
	1,586	1,692	1,364	0,768	2,448	0,730	2,648	
	2,483	1,908	2,023	1,011	2,846	0,983	2,904	
8	1,038	1,781	1,024	0,297	1,522	0,238	1,879	
	1,337	1,835	1,213	0,599	2,379	0,572	2,605	
	1,889	1,956	1,593	0,861	2,711	0,842	2,821	
	2,610	2,192	2,184	1,006	2,913	0,990	2,946	

Для того чтобы построить на ИНУН фильтр Бесселя или Чебышева, для каждой секции вычислялось свое произведение RC с помощью нормирующего множителя f_n (его значение приведено в таблице 1) по формуле $RC=f_n/2\pi f_c$.

На первом этапе исследования проводилось схемотехническое моделирование рассматриваемых вариантов с помощью программы моделирования работы аналоговых и цифровых электрических цепей LTspice. В

дипломной работе представлены принципиальные схемы АФ RC-цепи типа Баттерворта, Бесселя 2-го, 4-го, 6-го и 8-го порядка с идеальным ОУ и Чебышева 2-го порядка, построенные в программе LTspice. Также приведены таблицы с рассчитанными значениями параметров АФ различного порядка и типа для частоты среза, равной 20кГц. Для каждого рассматриваемого фильтра даны расчетные логарифмические амплитудно-частотные характеристики (ЛАЧХ), логарифмические фазо-частотные характеристики (ЛФЧХ) и временное запаздывание сигнала. В таблице 2 приведены важные параметры характеристик фильтра Баттерворта для сравнительного анализа.

Таблица 2. Основные параметры характеристик фильтра Баттерворта.

№ порядка	Частота среза	Ослабление АЧХ	Выброс	Искажение сигнала по времени
2-го	19 990Гц	11.14 дБ/октава	~0%	~2.36 мкс
4-го	20 010Гц	23.55 дБ/октава	~1.4%	~10.45 мкс
6-го	19 986Гц	35.78 дБ/октава	~0.6%	~21.16 мкс
8-го	19 986Гц	47.31 дБ/октава	~1.1%	~32.63 мкс

Из данных таблицы 2 видно, что с увеличением порядка фильтра на четное число крутизна спада АЧХ и время запаздывания сигнала увеличиваются. Анализируя табличные данные, можно прийти к заключению, что АФ типа Баттерворта 2-го, 4-го, 6-го и 8-го порядка оказывают существенное воздействие на фазовые характеристики сигнала. Следовательно, такие фильтры не подходят для усилителей класса D звуковых частот.

Рассмотрим другой тип АФ на ИНУН, который имеет свои достоинства и недостатки. В таблице 3 приведены важные параметры характеристик фильтра Бесселя для сравнительного анализа.

Таблица 3. Основные параметры характеристик схемы фильтра Бесселя.

№ порядка	Частота среза	Ослабление АЧХ	Выброс	Искажение сигнала по времени
2-го	20 016Гц	9.47 дБ/октава	~0%	~2мкс
4-го	20 086Гц	17.55 дБ/октава	~0%	~0.248 мкс
6-го	20 106Гц	23.94 дБ/октава	~0%	~0.1мкс
8-го	20 097Гц	26.37 дБ/октава	~0%	~0.13 мкс

Из данных таблицы 3 четко прослеживается главное достоинство АФ RC-цепи типа Бесселя, а именно очень малое вносимое фазовое искажение. Следовательно, этот фильтр является наиболее подходящим из рассмотренных фильтров для применения в звуковых цепях. В данной работе для последующего применения в усилителях класса D был выбран АФ RC-цепи типа Бесселя 8-го порядка с максимальной крутизной спада АЧХ. Рассматривался третий тип АФ на ИНУН с пульсациями в полосе пропускания равными 0.5дБ. В таблице 4 приведены важные параметры характеристик фильтра Чебышева с пульсациями в полосе пропускания равными 0.5дБ для сравнительного анализа.

Таблица 4. Основные параметры характеристик схемы фильтра Чебышева с пульсациями в полосе пропускания равными 0.5дБ.

Частота среза	Ослабление АЧХ	Выброс	Искажение сигнала по времени
20 032 Гц	11.77 дБ/октава	~6.1 %	~5.02 мкс

Анализируя приведенные выше данные расчета, можно прийти к заключению, что АФ RC-цепи типа Чебышева 2-го порядка с пульсацией 0.5дБ имеет фазовые характеристики хуже, чем у активных фильтров типа Бесселя и

Баттерворта. Поэтому данный фильтр не будет применяться для усилителей класса D в данной работе.

На втором этапе исследования проводилось схемотехническое моделирование усилителя класса D с помощью симулятора LTspice. В работе приводилась принципиальная схема усилителя D класса с задающим генератором. В данной работе применяемые активные фильтры должны подавить такие гармоники. На рисунках 1 и 2 представлены спектры сигналов до и после АФ. Частота входного сигнала для примера равна 5 кГц.

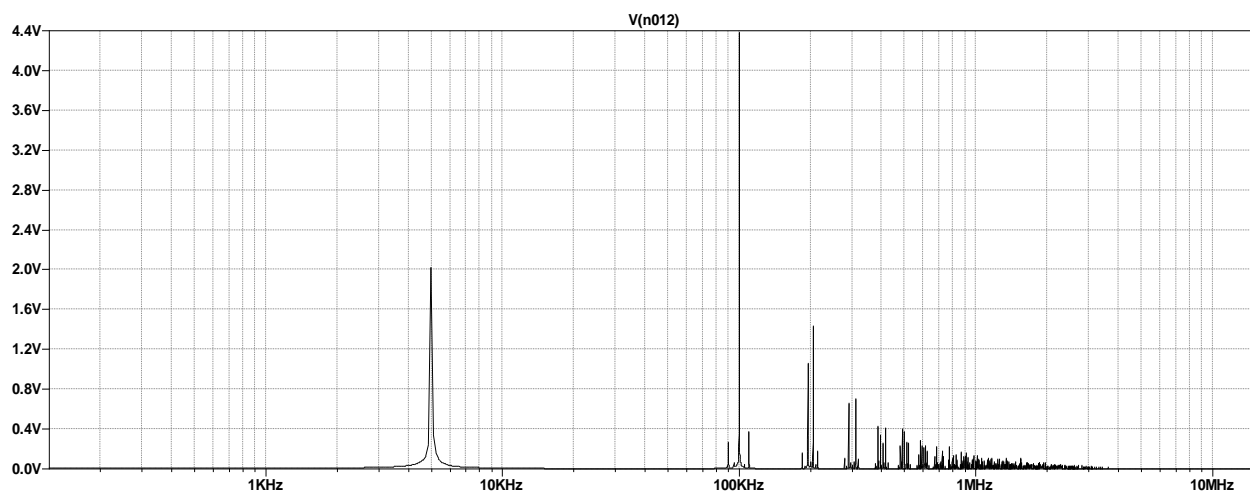


Рисунок 1. Спектр сигнала до активного фильтра на ИНУН типа Бесселя 8-го порядка

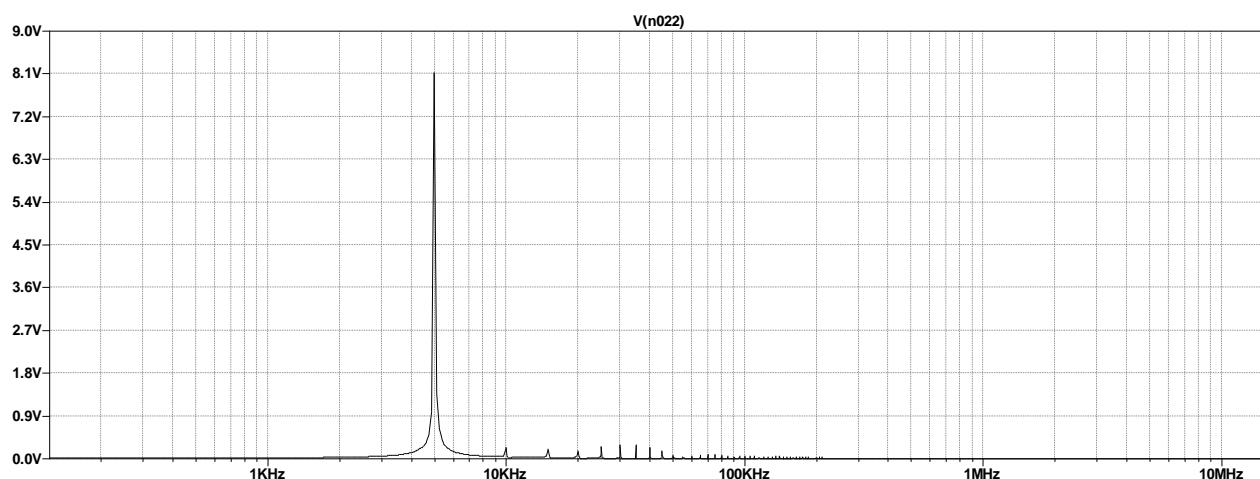


Рисунок 2. Спектр сигнала после активного фильтра на ИНУН типа Бесселя 8-го порядка.

Из данных таблицы 3 и видов спектров сигнала усилителя до и после применения АФ следует, что АФ RC-цепи на ИНУН типа Бесселя 8-го порядка справляется с поставленной задачей. Недостатком АФ типа Бесселя является его линейная АЧХ. Он “хорошо” ослабляет сигнал, частота которого сильно отличается от частоты среза.

На третьем этапе исследования осуществлялось проектирование рассматриваемой принципиальной схемы АФ на ИНУН типа Бесселя 8-го порядка и усилителя класса D в программе для создания печатных плат Sprint-Layout. На рисунке 3 и 4 представлены готовая плата усилителя и активного фильтра, соответственно.

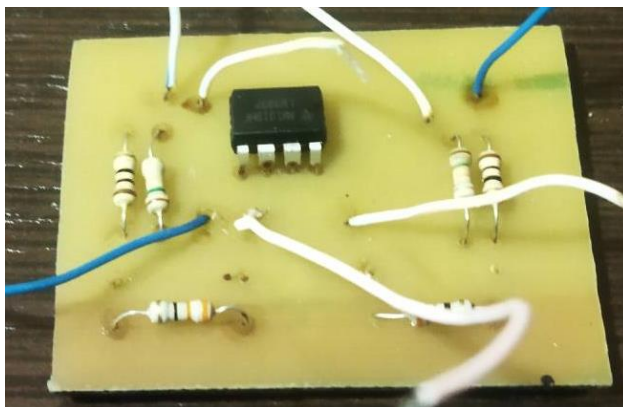


Рисунок 3. Печатная плата усилителя класса D.

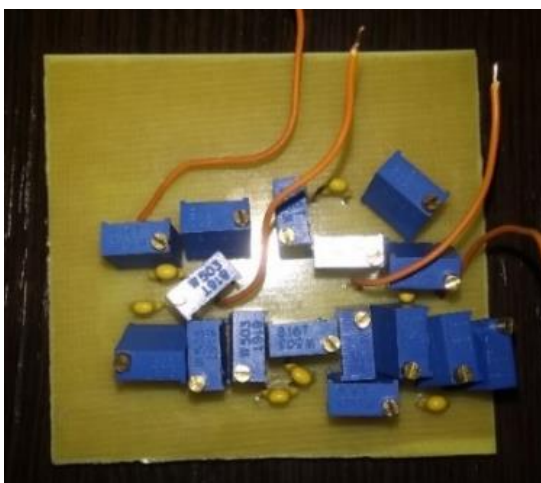


Рисунок 4. Печатная плата активного фильтра типа Бесселя 8-го порядка.

Затем было проведено подключение плат к источникам питания с напряжениями согласно даташиту. Осциллограммы входного сигнала перед

усилителем и выходного сигнала после фильтра на частоте 5 кГц приведены на рисунке 5.

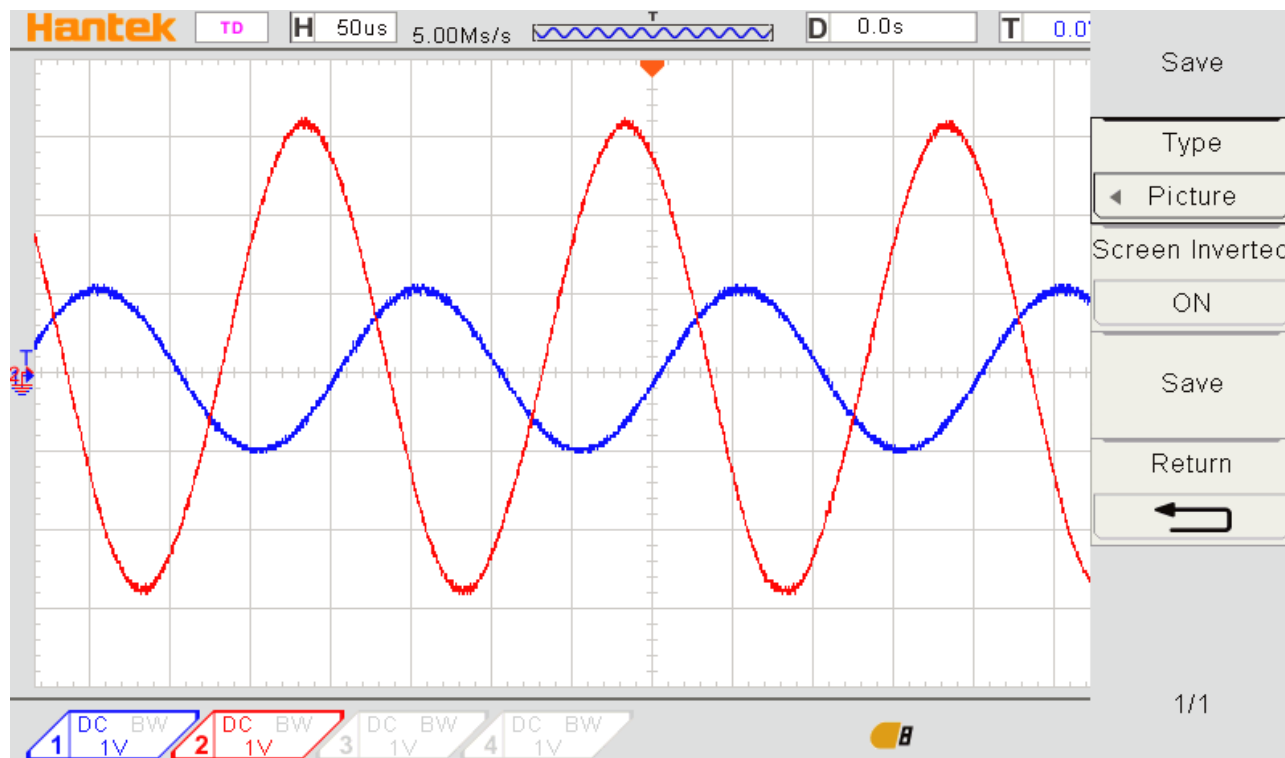


Рисунок 5. Осциллограмма входного сигнала перед усилителем и выходного сигнала после фильтра с частотой 5кГц обозначены соответственно синим и красным цветом.

Закключение. В ходе исследования были рассмотрены активные ФНЧ с источником напряжения, управляемым напряжением (ИНУН), в качестве активного элемента. В программе LTspice были построены схемы 4-х фильтров типа Баттерворта 2-го,4-го,6-го и 8-го порядка, 4-х фильтров типа Бесселя 2-го,4-го,6-го,8-го порядка и 2-х фильтров Чебышева 2-го порядка с пульсациями в полосе пропускания 0,5 дБ. Для всех рассматриваемых типов фильтров были сняты ЛАЧХ и ЛФЧХ с помощью инструментов симулятора LTspice. В ходе сравнительного анализа снятых частотных характеристик фильтров установлено, что наиболее подходящими для работы усилителей класса D является фильтр Бесселя 8-го порядка. Показано, что ЛАЧХ фильтра Бесселя линейна во всей полосе пропускания, и этот тип фильтра не вносит фазовые

искажения, т.е. для всех частот в полосе пропускания временная задержка одинакова. Следовательно, для усилителей звуковых частот этот тип фильтра будет предпочтителен. Фильтр Баттерворта имеет более крутой спад АЧХ, чем у фильтра Бесселя, но обладает неодинаковым временным запаздыванием для разных частот.

В программе LTspice проведены симуляции работы схемы усилителя класса D с выбранными типами ФНЧ. Получены спектры сигналов на выходе усилителя до и после применения активных фильтров. Анализ полученных спектров свидетельствует о том, что применение фильтра Бесселя 8-го порядка позволяет убрать лишние гармоники после диапазона звуковых частот, слышимых ухом. Также изготовлены печатные платы усилителя и фильтра. С помощью осциллограмм сигналов доказана работоспособность данной схемы. Таким образом, с помощью фильтра и усилителя можно получить идентичный усиленный полезный сигнал.

Библиографический список

- [1] Г. Лэм. Аналоговые и цифровые фильтры: расчет и реализация. Пер. с англ. В. Л.Левина, М.Н. Микшиса и И.Н. Теплюка под редакцией канд. тех. наук И.Н. Теплюка - Москва: Мир,1982 - 302 стр.
- [2] LTspice: <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html#>
- [3] Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники. Пер. с англ.-Изд.2-у 2014 - 704 стр.