



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «МИРЭА - Российский технологический университет»
РТУ МИРЭА

Институт Кибербезопасности и цифровых технологий
Кафедра КБ-6 «Приборы и информационно-измерительные системы»

ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ

по дисциплине «Схемотехническое проектирование приборов и систем»

Студент _____ А.Д. Глухов _____
подпись, дата инициалы и фамилия

Группа _____ шифр _____

Обозначение работы _____

Преподаватель _____
подпись, дата инициалы и фамилия

Москва 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Задание	4
1 Синтез фильтров нижних частот	6
1.1 Звено Саллена и Кея	6
1.2 Синтез фильтра Баттерворта на базе звеньев Саллена и Кея.....	8
1.3 Синтез фильтра Бесселя на базе звеньев Саллена и Кея	12
1.4 Синтез фильтра Чебышева на базе звеньев Саллена и Кея.....	14
1.5 Сравнение фильтров.....	16
2 Демонстрация фильтрации синусоидального и прямоугольного сигнала	17
3 Построение высокоточного выпрямителя на базе операционных усилителей.....	21
4 Генератор синусоидального напряжения на базе генератора меандра.....	24
Заключение	27
Список использованных источников	28
Приложение А Расчет фильтров нижних частот.....	29

ВВЕДЕНИЕ

Фильтры являются одной из самых важных составляющих электронных устройств. Они применяются для подавления шумов и помех сигналов и усиления полезных. Фильтры являются неотъемлемым элементом в системах телекоммуникации, радиоэлектроники, аудио-оборудовании и других областях электроники. Применение правильно спроектированных фильтров помогает улучшить качество сигнала и повысить производительность электронных устройств.

Цели лабораторной работы заключаются получение навыков расчета и моделирования различных видов фильтров с помощью САПР. Получение навыков анализа качества фильтров и их влияние на сигнал, а также изучение новых видов моделирования в САПР.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата							
Студент		Глухов А.Д.			Расчет и моделирование активных фильтров			Лит.	Лист	Листов	
Руковод.										3	30
Н. Контр.											
Зав.каф.											

ЗАДАНИЕ

Задание 1. Синтезировать фильтры нижних частот Чебышева, Баттерворта и Бесселя с частотой среза $f_{ср}$ 35 кГц табличным способом. Необходимо синтезировать фильтры 2-ого, 4-ого и 6-ого порядков на базе звеньев Саллена и Кея, а также простейший RC фильтр нижних частот. На выходе фильтров установить нормирующий усилитель, приводящий общий коэффициент усиления фильтрующей схемы к 1. Нормирующий усилитель, должен включать делитель напряжения и повторитель, построенный на базе одиночного операционного усилителя. Для каждого фильтра путем моделирования построить АЧХ и реакцию на единичное ступенчатое воздействие (мгновенный скачек напряжения с 0 до 1 В). По графикам проверить частоту среза для каждого фильтра и оценить время переходного процесса. Результаты занести в таблицу. Сделать подробные выводы по результатам моделирования. Сравнить различные типы фильтров. Оформить отчет в соответствии с требованиями стандарта предприятия, с приведением необходимых схем, графиков, расчетных соотношений и результатов расчета.

Задание 2. Продемонстрировать фильтрацию полезного синусоидального сигнала с амплитудой 1 В, и прямоугольного сигнала с размахом ± 1 В со скважностью 1/2, с помощью синтезированных ранее фильтров. Для этого подать на вход каждого из синтезированных в первом задании фильтров полезный сигнал, наложив на него синусоидальную помеху с частотой в 10 раз превышающей частоту среза и амплитудой 0,5 В. Частоту полезного сигнала выбрать равной $0.1 \cdot f_{ср}$. По графикам произвести грубую оценку качества фильтрации для каждого из синтезированных ранее фильтров и фильтруемых сигналов. Сделать выводы. Оформить отчет.

Задание 3. Построить схему высокоточного выпрямителя измерительного сигнала на базе операционных усилителей. Он должен включать классический детектор на 2-х операционных усилителях и активный фильтр не выше 4-ого порядка (Баттерворта или Бесселя или Чебышева). Амплитуда детектируемого синусоидального сигнала 1 В. Частота f_d 15 кГц. Необходимо обоснованно выбрать

тип фильтра (с учетом результатов полученных при выполнении предыдущих заданий), его частоту среза, синтезировать фильтр табличным способом и провести моделирование схемы. Допустимый остаточный размах пульсаций на выходе схемы не должен превышать 1 мВ. Постарайтесь минимизировать время переходного процесса для проектируемого выпрямителя. Сделать выводы. Оформить отчет.

Задание 4. Необходимо построить генератор синусоидального напряжения на базе генератора меандра с размахом ± 1 В и частотой f_d из предыдущего задания. Меандр подается на полосовой фильтр, на выходе которого должен сформироваться синусоидальный сигнал с той же частотой и амплитудой 1 В. Спроектируйте полосовой фильтр для данной задачи (порядок фильтра не более 4-ого). Приведите результаты моделирования схемы. Полученный на выходе синус не должен иметь видимых нелинейных искажений. Попробуйте оценить коэффициент гармонических искажений, на выходе, используя встроенные средства пакета моделирования.

1 СИНТЕЗ ФИЛЬТРОВ НИЖНИХ ЧАСТОТ

В данном разделе необходимо провести синтез различных ФНЧ на базе звеньев Саллена и Кея табличным способом. Для каждого фильтра путем моделирования построить АЧХ и реакцию на единичное ступенчатое воздействие, а также необходимо оценить время переходного процесса. Расчеты необходимы для синтеза ФНЧ представлены в приложениях А, Б, В.

1.1 Звено Саллена и Кея

Звеном Саллена и Кея называют активный фильтр второго порядка, состоящий из двух резисторов, операционного усилителя и двух конденсаторов. Типовая схема фильтра, построенного по схеме Саллена и Кея, представлена на рисунке 1.1.

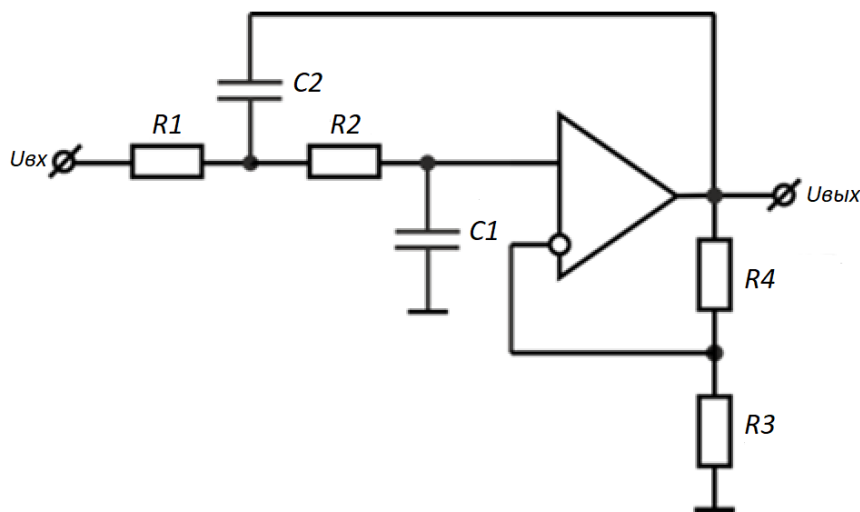


Рисунок 1.1 – Типовая схема фильтра Саллена и Кея

Передаточная функция фильтра, представленного на рисунке 1.1, имеет следующий вид:

$$K(p) = \frac{K}{1 + (C1(R1 + R2) + (1 + KR1C2)p + R1R2C1C2p^2)}. \quad (1)$$

Выражение в знаменателе может быть существенно упрощено, если принять R1 равное R2 равное R и C1 равное C2 равное C, тогда оно примет вид:

$$K(p) = \frac{K}{1 + RC(3 - K)p + R^2C^2p^2}. \quad (2)$$

Таким образом, задавая соответствующие коэффициенты R, C и α , мы получаем фильтр второго порядка необходимого вида. Синтез будет проводится табличным методом [1], занесем в таблицу 1 коэффициенты для фильтров Баттерворта, Бесселя и Чебышева до шестого порядка. Используя данные из таблицы 1, возможно реализовать фильтр необходимого вида и порядка.

Таблица 1 – Таблица для расчета фильтра

Порядок фильтра	Номер секции	Фильтр Баттерворта	Фильтр Бесселя		Фильтр Чебышева	
		K	fn	K	fn	K
2	1	1,586	1,274	1,268	1,231	1,842
4	1	1,152	1,432	1,084	0,597	1,582
	2	2,235	1,606	1,759	1,031	2,660
6	1	1,068	1,607	1,040	0,396	1,537
	2	1,586	1,692	1,364	0,768	2,448
	3	2,483	1,908	2,023	1,011	2,846

Для реализации фильтров 4 или 6 порядка следует последовательно подключить соответственно 2 или 3 секции фильтра.

Для расчета сопротивление резисторов R1 и R2 будем пользоваться формулой (3):

$$R1 = R2 = \frac{1}{2\pi \cdot f_{cp} \cdot f_n \cdot C}. \quad (3)$$

Рассмотрим расчет ФНЧ Баттерворта табличным способом, начиная с фильтра второго порядка. Сначала рассчитаем номиналы резисторов R1 и R2 по формуле (3), подставив f_{cp} равное 35 кГц, f_n по таблице равное 1 и C равное 0,1 мкФ, получаем:

$$R1 = R2 = \frac{1}{2\pi \cdot 35000 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10^{-6}} = 45,47284 \text{ Ом.}$$

Соппротивление резистора R4 рассчитывается по формуле:

$$R4 = (K - 1)R3. \quad (4)$$

Примем R3 равное 1 кОм. Коэффициент K по таблице 1 для данного фильтра равен 1,586, тогда номинальное значение резистора R3 будет равно:

$$R4 = (1,586 - 1)1000 = 586 \text{ Ом.}$$

Для построения фильтра четвертого и шестого порядков необходимо последовательно соединить две и три секции соответственно. Расчет каждой секции происходит по алгоритму, описанному выше. Однако на выходе таких ФНЧ необходимо установить нормирующий усилитель, состоящий из делителя напряжения и повторителя, построенного на базе одиночного операционного усилителя. Чтобы рассчитать необходимый коэффициент деления необходимо перемножить значения K соответствующего фильтра из таблицы 1.

1.2 Синтез фильтра Баттерворта на базе звеньев Саллена и Кея

В соответствии с расчетами, представленными в предыдущем пункте, строим схемы ФНЧ Баттерворта 2-ого, 4-ого и 6-ого порядка. Схемы фильтров представлены на рисунках 1.2, 1.3, 1.4.

К выходу каждого фильтра подключен нормирующий усилитель, приводящий общий коэффициент усиления фильтрующей схемы к 1.

Чтобы на входы всех фильтров подавать синусоидальный и ступенчатый сигнал, используем элементы VSIN и VPULSE. На рисунке 1.5 представлено как

подключены генераторы сигналов. На рисунках 1.6 и 1.7 представлены настройки VSIN и VPULSE.

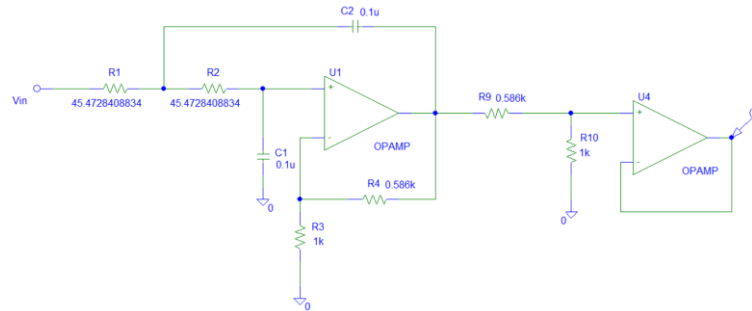


Рисунок 1.2 – ФНЧ Баттерворта 2-ого порядка

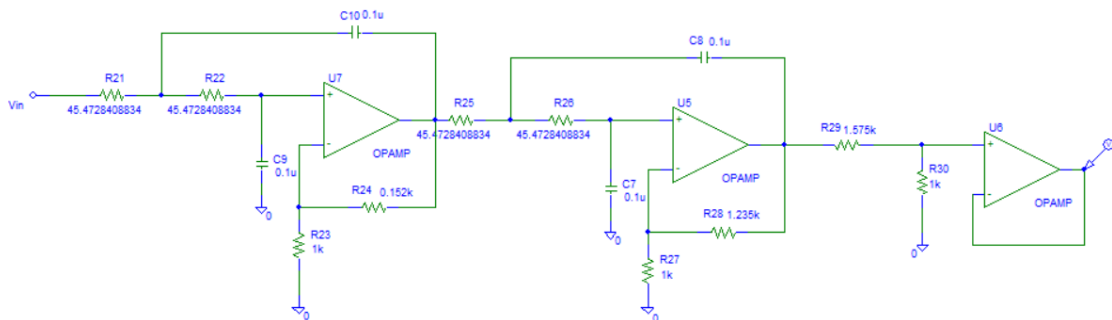


Рисунок 1.3 – ФНЧ Баттерворта 4-ого порядка

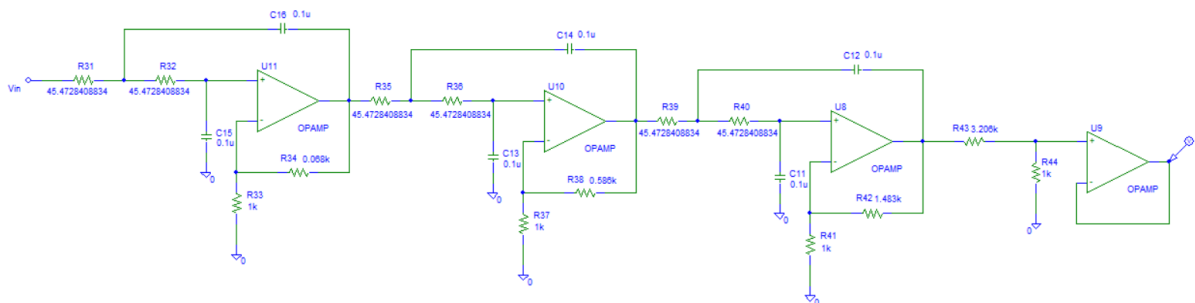


Рисунок 1.4 – ФНЧ Баттерворта 6-ого порядка

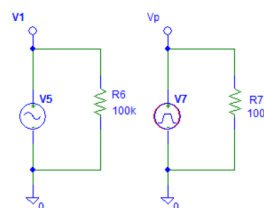


Рисунок 1.5 – Подключение генераторов сигналов

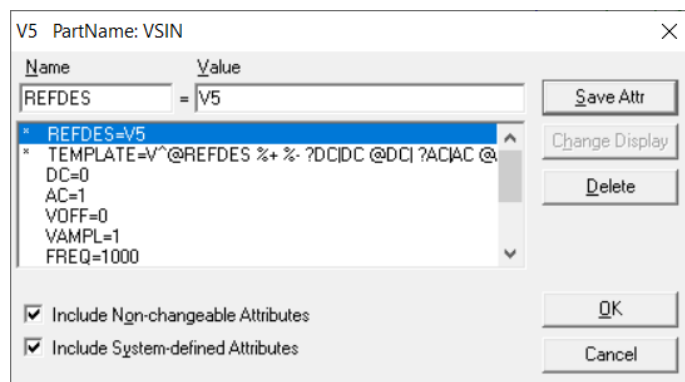


Рисунок 1.6 – Настройки VSIN для синтеза фильтров

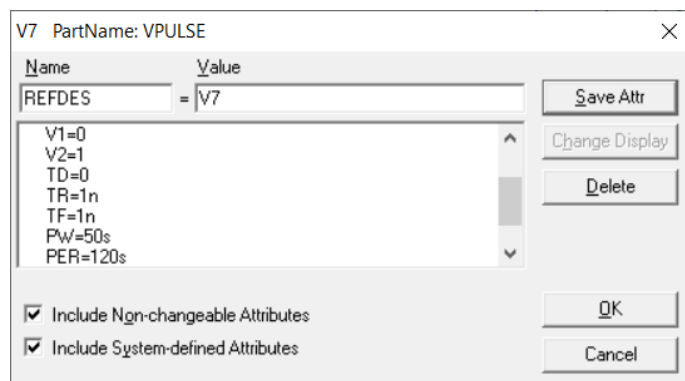


Рисунок 1.6 – Настройки VPULSE для синтеза фильтров

Для сравнения добавим в схему RC-цепочки. Чтобы рассчитать номинал резистора, воспользуемся формулой (3). Откуда получаем, что номинальное сопротивление резистора равно 45,472 Ом. Модель RC-цепочки представлена на рисунке 1.7.

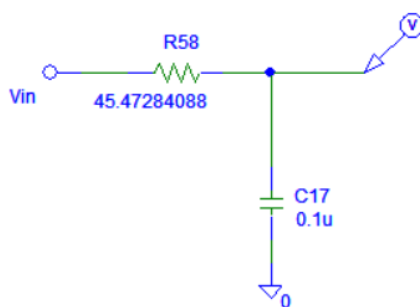


Рисунок 1.7 – Модель RC-цепочки

Чтобы получить АЧХ, необходимо провести анализ AC Sweep с подключенным ко входу фильтров генератором синусоидальных сигналов. Настройка AC Sweep представлена на рисунке 1.8. АЧХ фильтров представлена на рисунке 1.9.

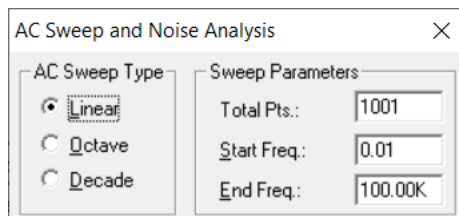


Рисунок 1.8 – Настройка AC Sweep для получения АЧХ

По рисунку 1.9 можно определить, что частота среза всех фильтров равна 35 кГц, на основании чего можно сделать вывод о корректности работы всех фильтров. По АЧХ также можно заключить, что чем выше порядок фильтра, тем круче переход из полосы пропускания в полосу подавления.

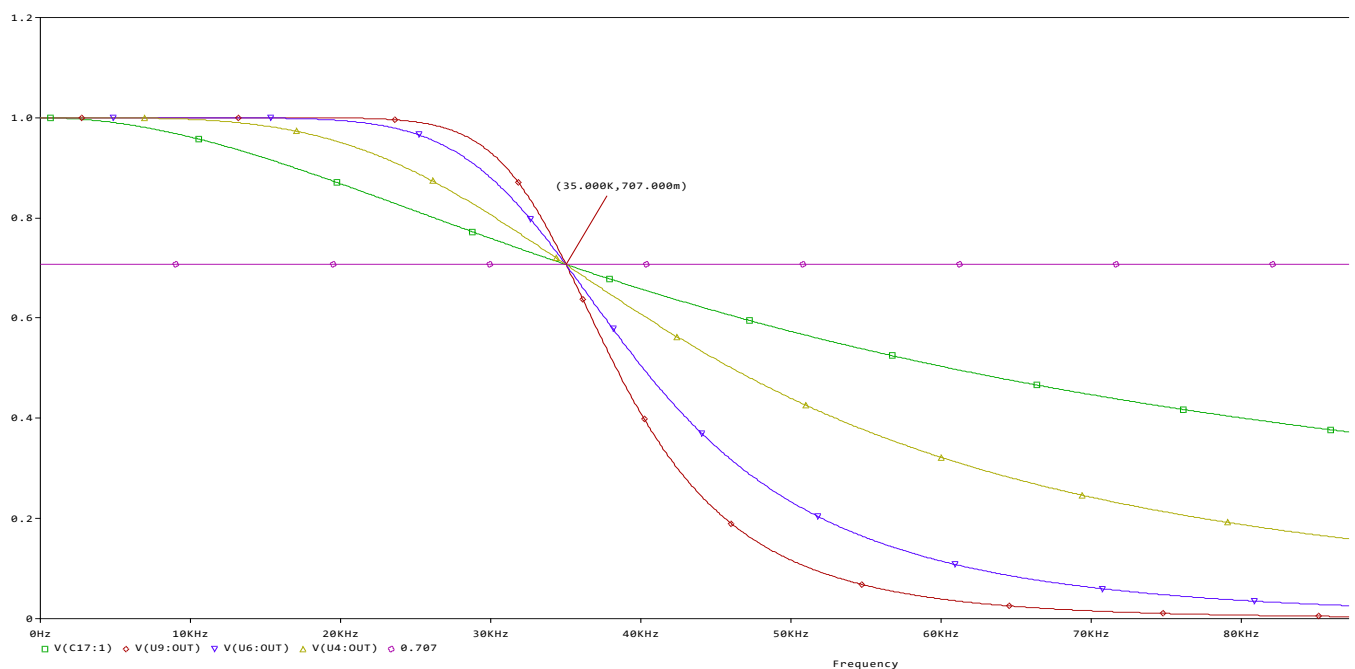


Рисунок 1.9 – АЧХ RC-цепочки, ФНЧ Баттерворта 2-ого, 4-ого и 6-ого порядков

Чтобы получить реакцию фильтров на единичное ступенчатое воздействие, необходимо провести анализ Transient с подключенным ко входу фильтров генератором прямоугольных сигналов. Настройка Transient представлена на рисунке 1.10.

Реакция фильтров на единичное ступенчатое воздействие представлена на рисунке 1.11. Для определения времени переходного процесса каждого фильтра на рисунок 1.11 была нанесена трубка точности.

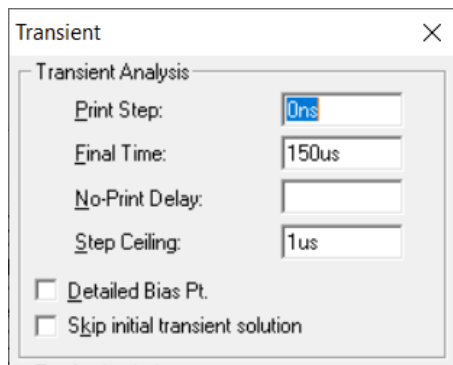


Рисунок 1.10 – Настройки Transient

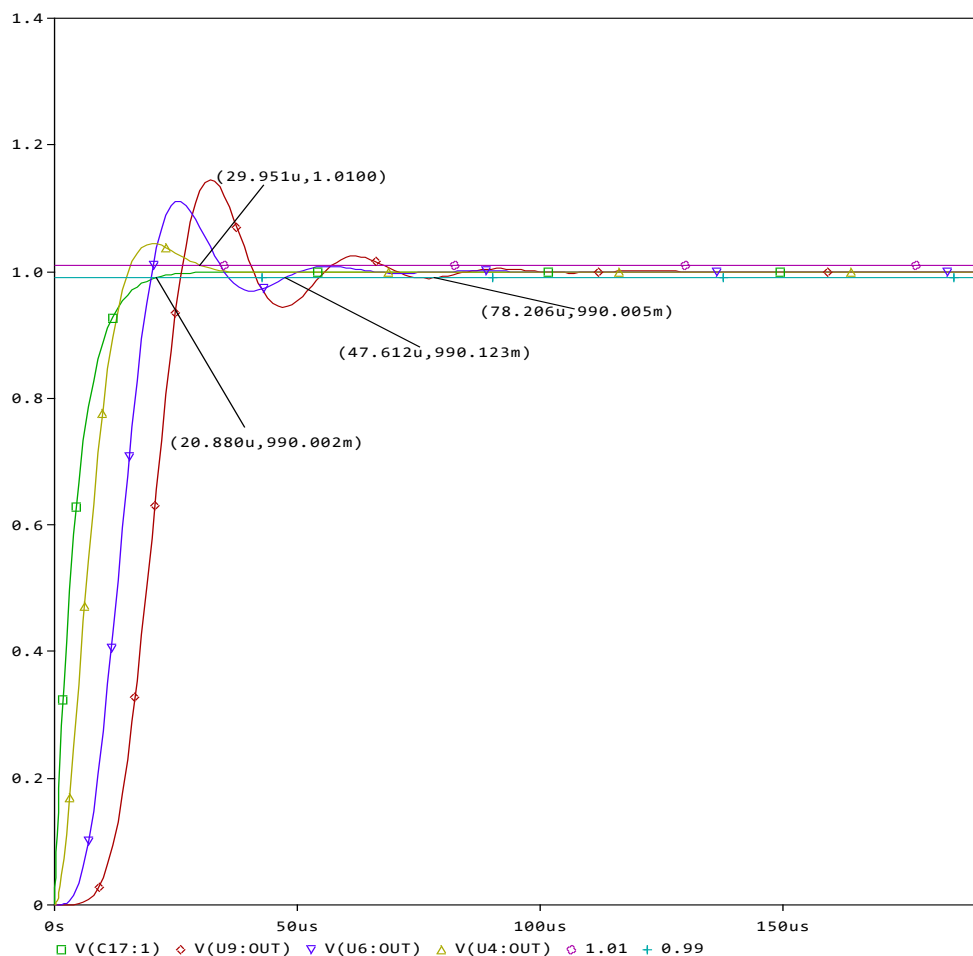


Рисунок 1.11 – Реакция ФНЧ Баттерворта на единичное ступенчатое воздействие

1.3 Синтез фильтра Бесселя на базе звеньев Саллена и Кея

Аналогично ФНЧ Баттерворта производим расчет для фильтров Бесселя и строим схемы ФНЧ Бесселя 2-ого, 4-ого и 6-ого порядка. Схемы фильтров представлены на рисунках 1.12, 1.13, 1.14.

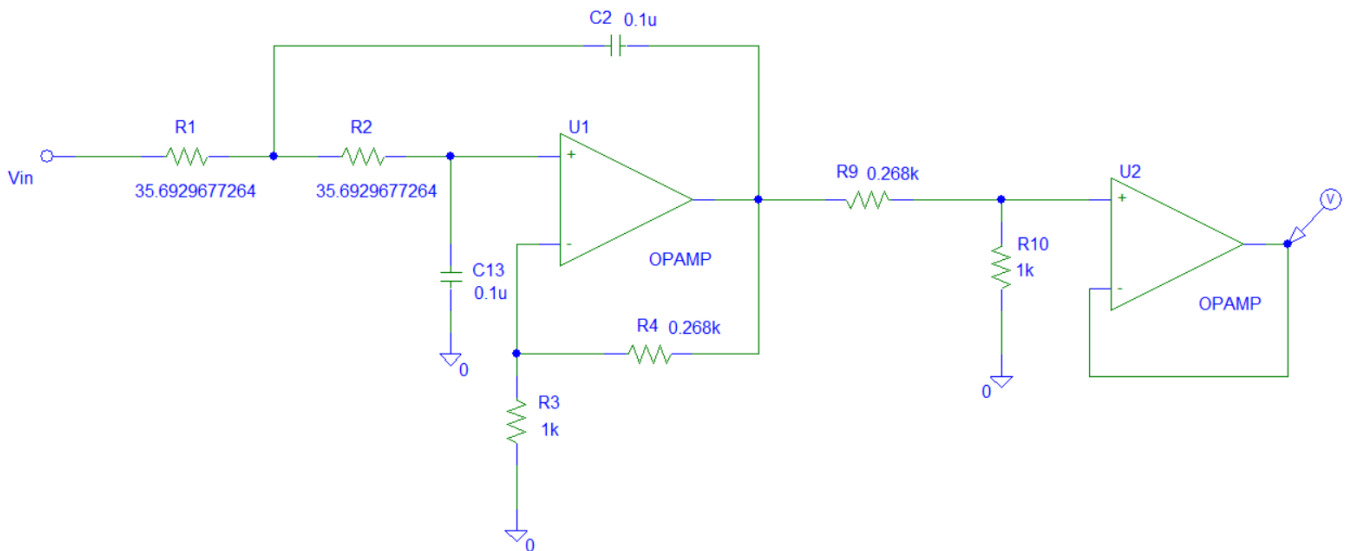


Рисунок 1.12 – ФНЧ Бесселя 2-ого порядка

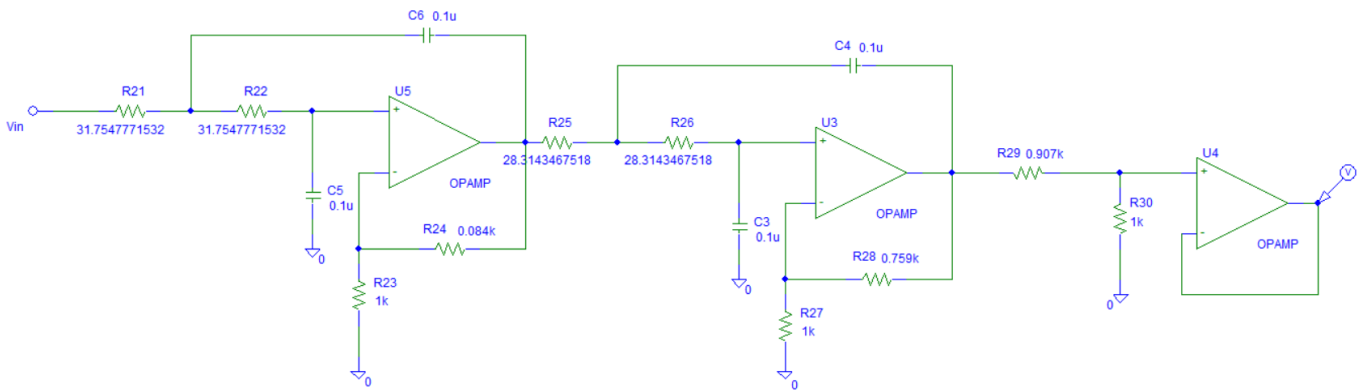


Рисунок 1.13 – ФНЧ Бесселя 4-ого порядка

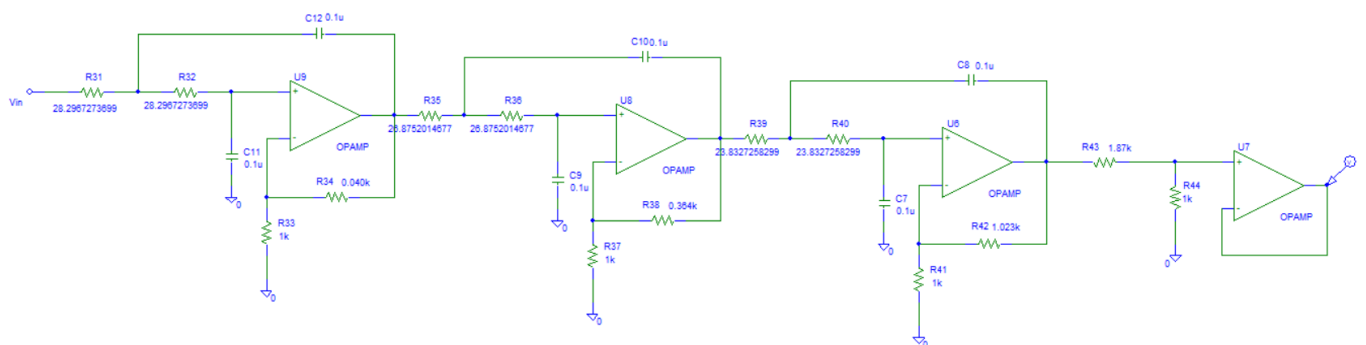


Рисунок 1.14 – ФНЧ Бесселя 6-ого порядка

Как было описано в п. 1.2 строим АЧХ ФНЧ Бесселя. АЧХ фильтров представлена на рисунке 1.15.

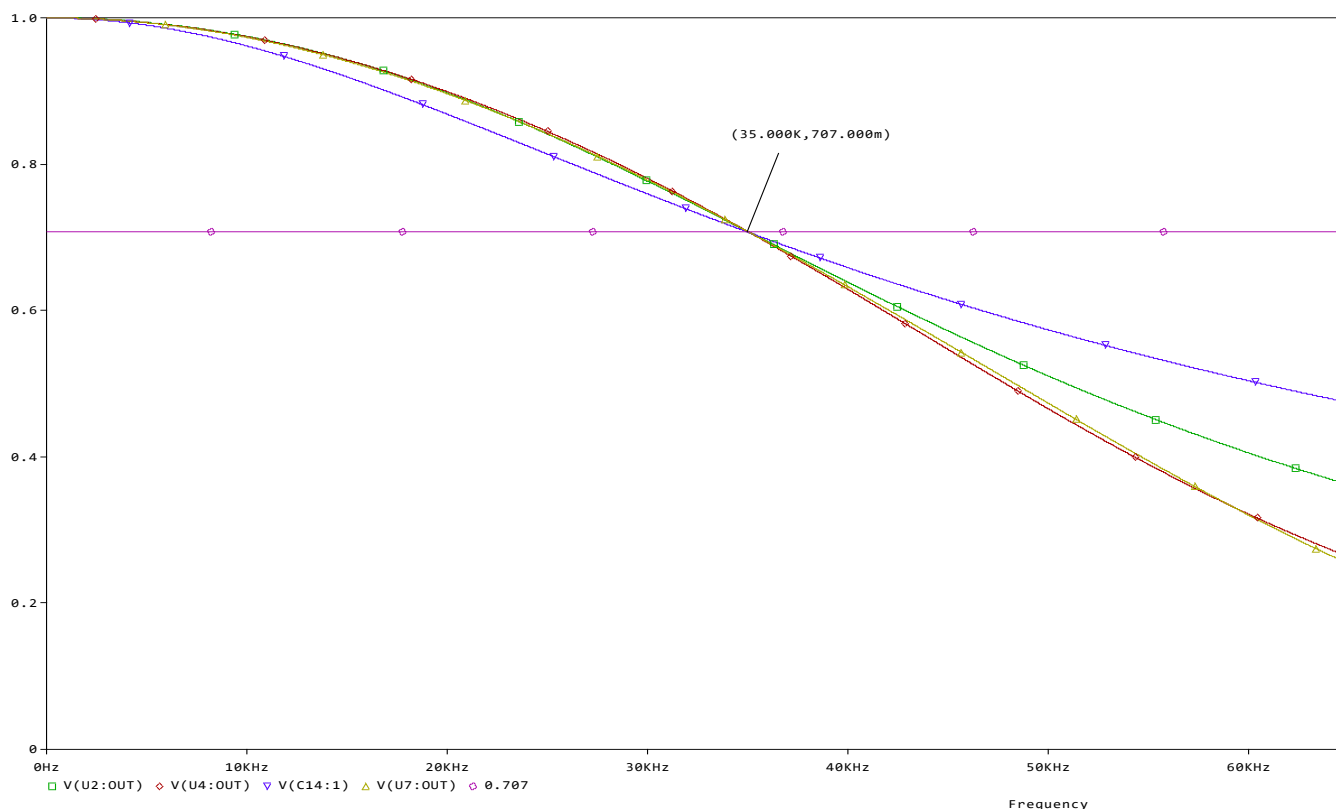


Рисунок 1.15 – АЧХ RC-цепочки, ФНЧ Бесселя 2-ого, 4-ого и 6-ого порядков

По рисунку 1.15 можно определить, что частота среза всех фильтров равна 35 кГц, на основании чего можно сделать вывод о корректности работы всех фильтров. По АЧХ также можно заключить, что чем выше порядок фильтра, тем круче переход из полосы пропускания в полосу подавления.

Как было описано в п. 1.2 определим реакцию ФНЧ Бесселя на единичное ступенчатое воздействие. Реакция фильтров представлена на рисунке 1.16. Для определения времени переходного процесса каждого фильтра на рисунок 1.16 была нанесена трубка точности.

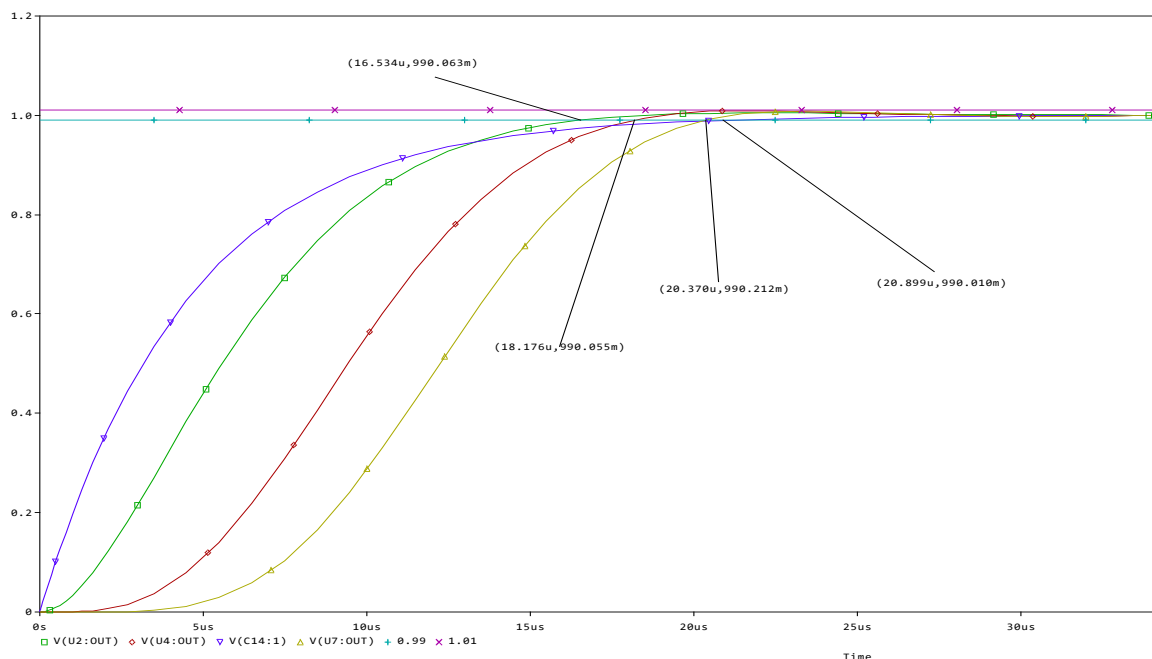


Рисунок 1.16 – Реакция ФНЧ Бесселя на единичное ступенчатое воздействие

1.4 Синтез фильтра Чебышева на базе звеньев Саллена и Кея

Аналогично ФНЧ Баттерворта производим расчет для фильтров Чебышева и строим схемы ФНЧ Чебышева 2-ого, 4-ого и 6-ого порядка. Схемы фильтров представлены на рисунках 1.17, 1.18, 1.19.

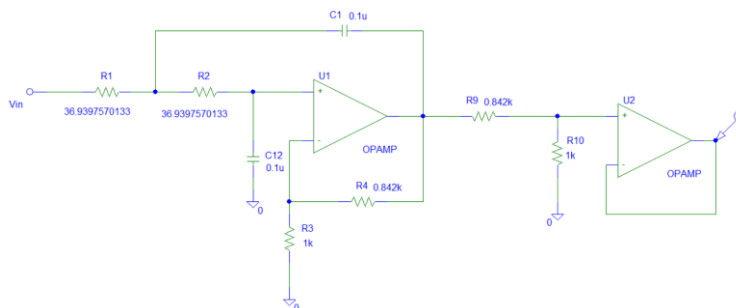


Рисунок 1.17 – ФНЧ Чебышева 2-ого порядка

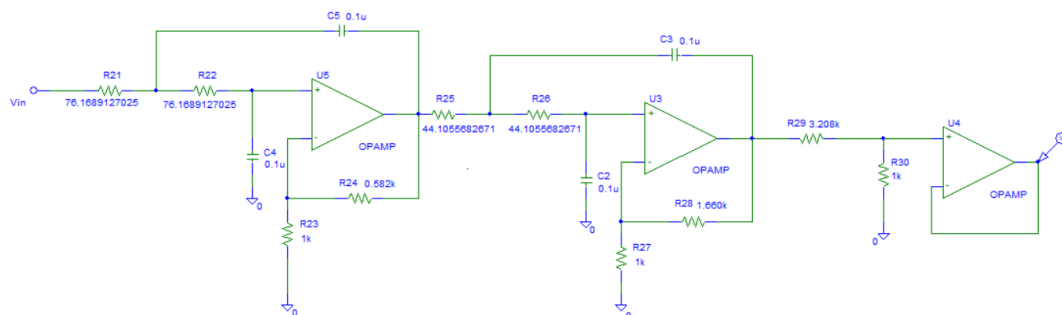


Рисунок 1.18 – ФНЧ Чебышева 4-ого порядка

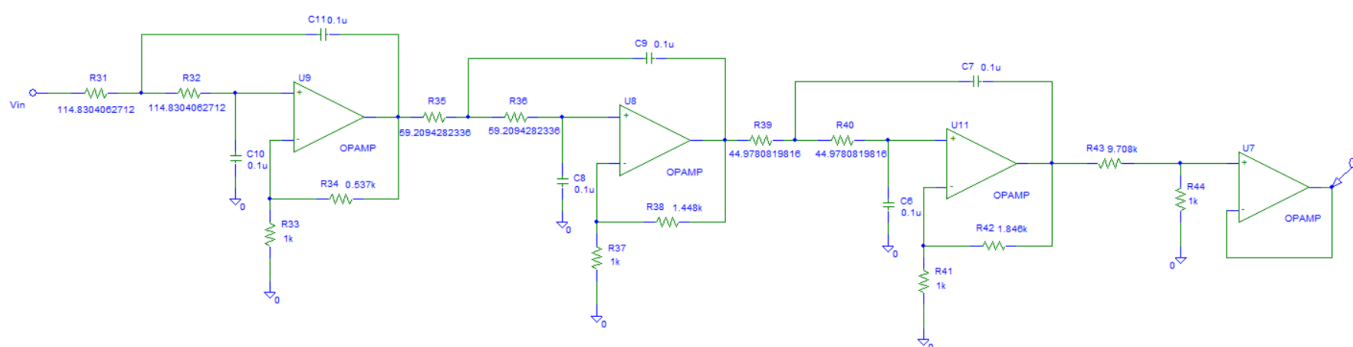


Рисунок 1.19 – ФНЧ Чебышева 6-ого порядка

Как было описано в п. 1.2 строим АЧХ ФНЧ Чебышева. АЧХ фильтров представлена на рисунке 1.20.

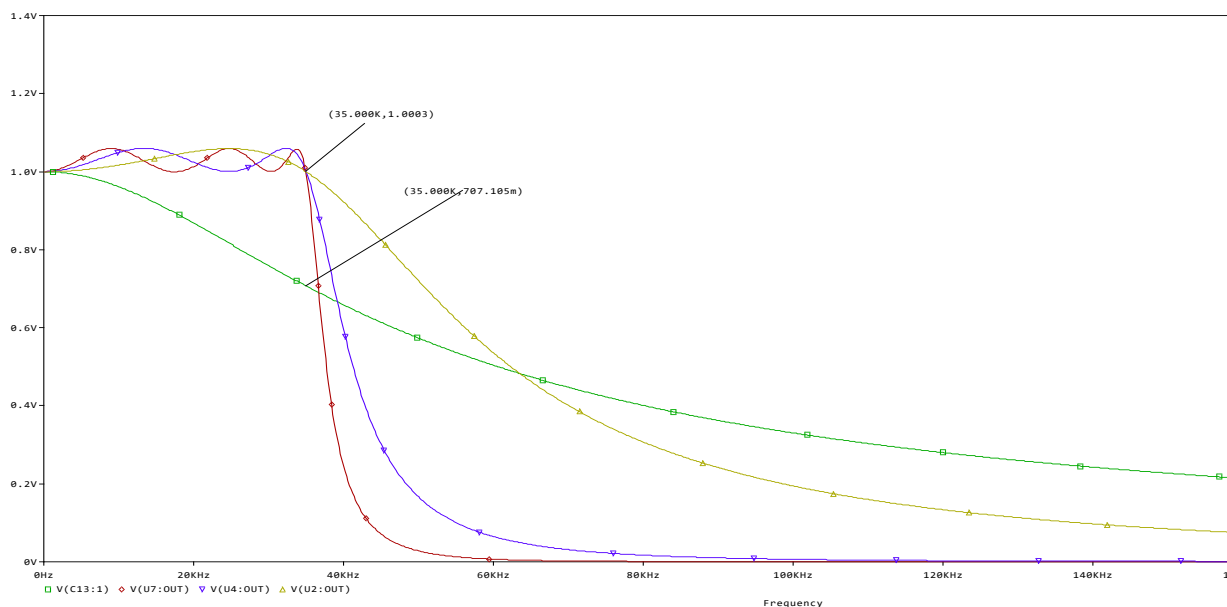


Рисунок 1.20 – АЧХ RC-цепочки, ФНЧ Чебышева 2-ого, 4-ого и 6-ого порядков

По рисунку 1.20 можно определить, что частота среза всех фильтров равна 35 кГц, на основании чего можно сделать вывод о корректности работы всех фильтров. По АЧХ также можно заключить, что чем выше порядок фильтра, тем круче переход из полосы пропускания в полосу подавления.

Как было описано в п. 1.2 определим реакцию ФНЧ Чебышева на единичное ступенчатое воздействие. Реакция фильтров представлена на рисунке 1.21. Для определения времени переходного процесса каждого фильтра на рисунок 1.21 была нанесена трубка точности.

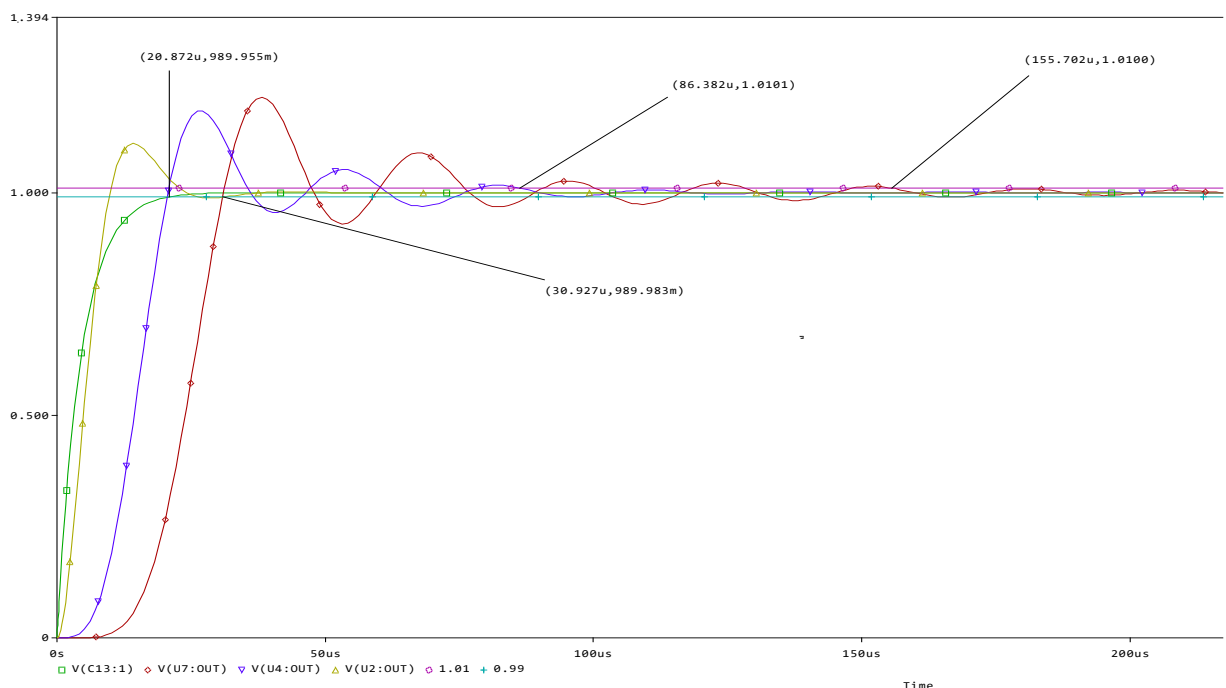


Рисунок 1.11 – Реакция ФНЧ Чебышева на единичное ступенчатое воздействие

1.5 Сравнение фильтров

Фильтр Баттерворта в полосе пропускания имеет максимально гладкую АЧХ и монотонную характеристику в полосе задерживания

АЧХ фильтра Чебышева наиболее круто переходит от полосы пропускания к полосе непрозрачности, чем фильтр Баттерворта. Фильтры Чебышева 1-го рода имеют неравномерности в полосе пропускания.

Фильтр Бесселя имеет наименьшую крутизну АЧХ, не имеет пульсаций.

Время переходного процесса разных типов фильтров занесены в таблице 2.

Таблица 2 – Время переходного процесса

Тип фильтра	RC- цепочка	Бесселя			Баттерворта			Чебышева		
Порядок фильтра	1	2	4	6	2	4	6	2	4	6
Время переходного процесса, мкс	20.9	16.5	18.2	20.4	30.0	47.6	78.2	30.9	86.4	155,7

По таблице 2 видно, что фильтры Бесселя имеют наименьшее время переходного процесса.

Для демонстрации работы фильтров используем Transient. Сигнал на выходе ФНЧ Чебышева представлен на рисунках 2.4 и 2.5.

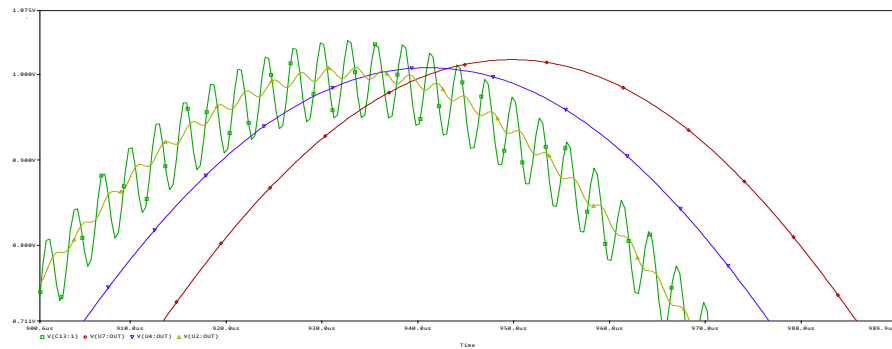


Рисунок 2.4 – Синусоидальный сигнал на выходе RC-цепочки и ФНЧ Чебышева 2-ого, 4-ого и 6-ого порядков

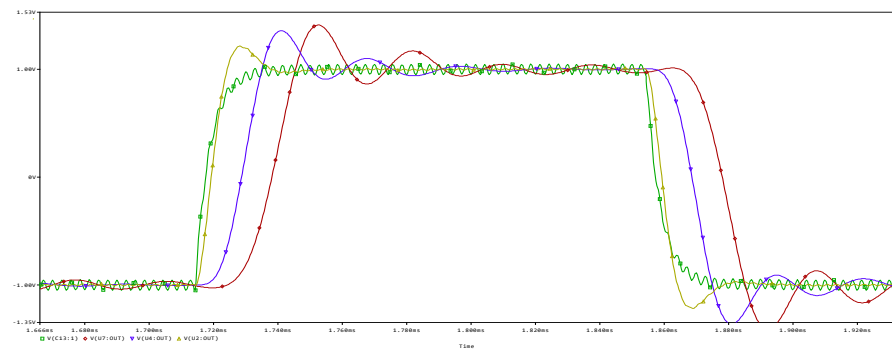


Рисунок 2.5 – Ступенчатый сигнал на выходе RC-цепочки и ФНЧ Чебышева 2-ого, 4-ого и 6-ого порядков

Сигнал на выходе ФНЧ Баттерворта представлен на рисунках 2.6 и 2.7.

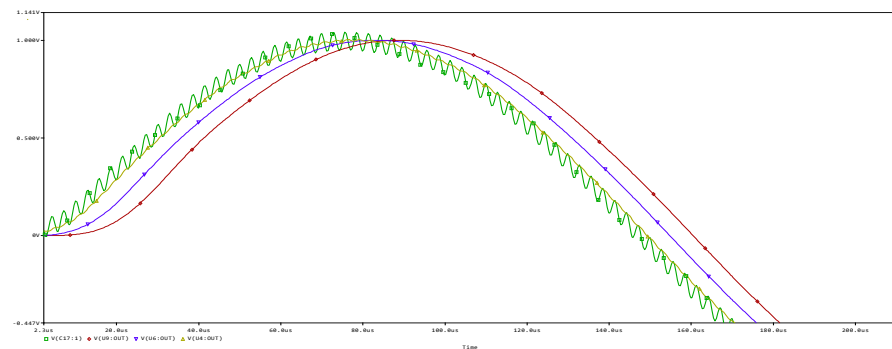


Рисунок 2.6 – Синусоидальный сигнал на выходе RC-цепочки и ФНЧ Баттерворта 2-ого, 4-ого и 6-ого порядков

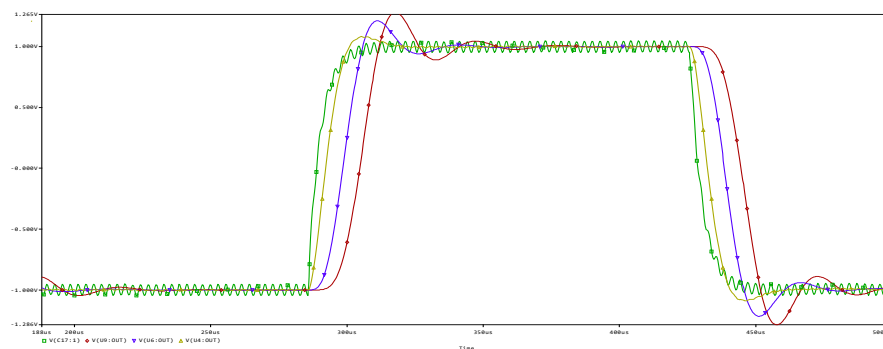


Рисунок 2.7 – Ступенчатый сигнал на выходе RC-цепочки и ФНЧ Баттерворта 2-ого, 4-ого и 6-ого порядков

Сигнал на выходе ФНЧ Бесселя представлен на рисунках 2.8 и 2.9.

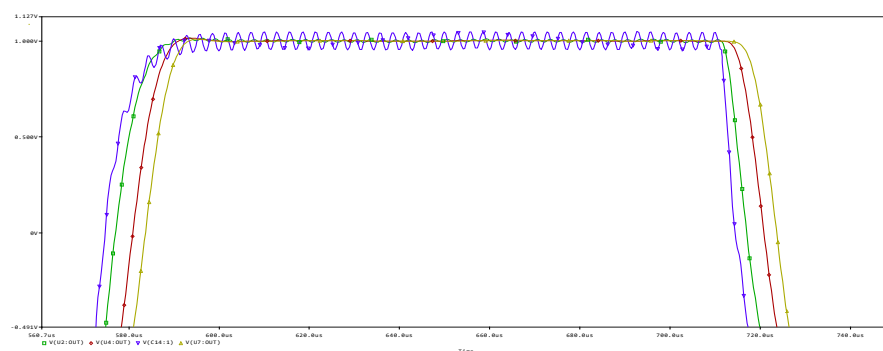


Рисунок 2.8 – Синусоидальный сигнал на выходе RC-цепочки и ФНЧ Бесселя 2-ого, 4-ого и 6-ого порядков

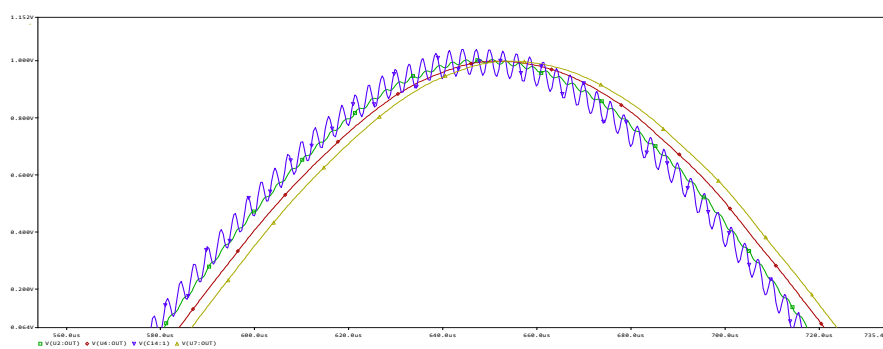


Рисунок 2.9 – Ступенчатый сигнал на выходе RC-цепочки и ФНЧ Бесселя 2-ого, 4-ого и 6-ого порядков

По результатам моделирования можно сделать вывод, что при подаче на вход синусоидального сигнала с повышением порядка фильтров уменьшается влияние

шумов на выходной сигнал. И начиная с 4-ого порядка шумы практически не заметны. Стоит также отметить, что чем выше порядок фильтра, тем больше фазовый сдвиг на выходе. ФНЧ Бесселя имеет наименьший фазовый сдвиг.

Анализируя результаты моделирования при подаче на вход ступенчатого сигнала, можно заключить, что ФНЧ Чебышева и Баттерворта не подходят для фильтрации ступенчатого сигнала, так как у них длительный переходный процесс, а также высокое перерегулирование сигнала.

3 ПОСТРОЕНИЕ ВЫСОКОТОЧНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ НА БАЗЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Модель схемы выпрямителя на базе операционных усилителей представлен на рисунке 3.1.

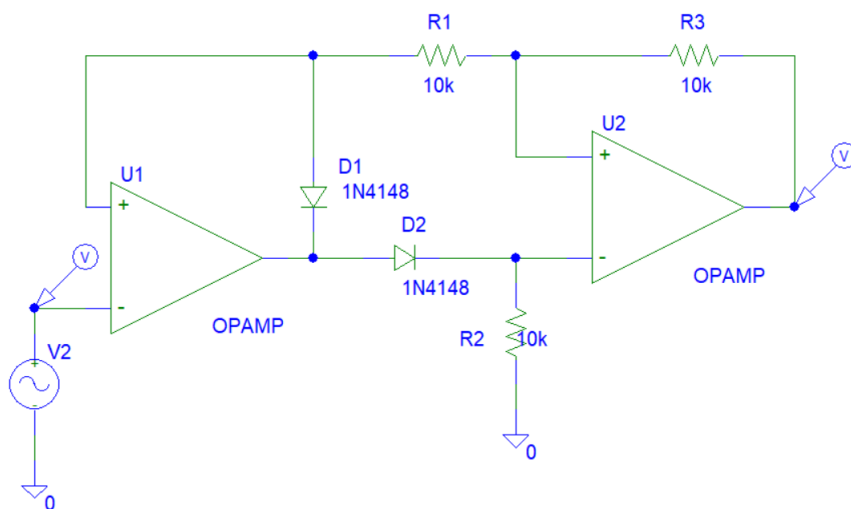


Рисунок 3.1 – Модель схемы выпрямителя на базе операционных усилителей

Принцип работы выпрямителя заключается в том, что при положительной полуволне диод D1 будет закрыт, а D2 – открыт, в таком случае схема работает как повторитель напряжения. При отрицательной полуволне диод D2 будет закрыт, а D1 – открыт, тогда на неинвертирующем входе U2 сформируется напряжение 0 В и схема будет работать как инвертирующий усилитель с коэффициентом передачи $-R3/R1$. Чтобы сигнал при отрицательной полуволне на выходе совпадал с сигналом при положительной полуволне, примем, что номиналы всех резисторов совпадают и равны 10 кОм.

Для подачи синусоидального сигнала будем использовать VSIN. Его настройка представлена в п.1.2. Как указано в задании изменяем частоту подаваемого сигнала на 15 кГц.

На рисунках 3.2 и 3.3 представлены сигнал на входе и на выходе выпрямителя.

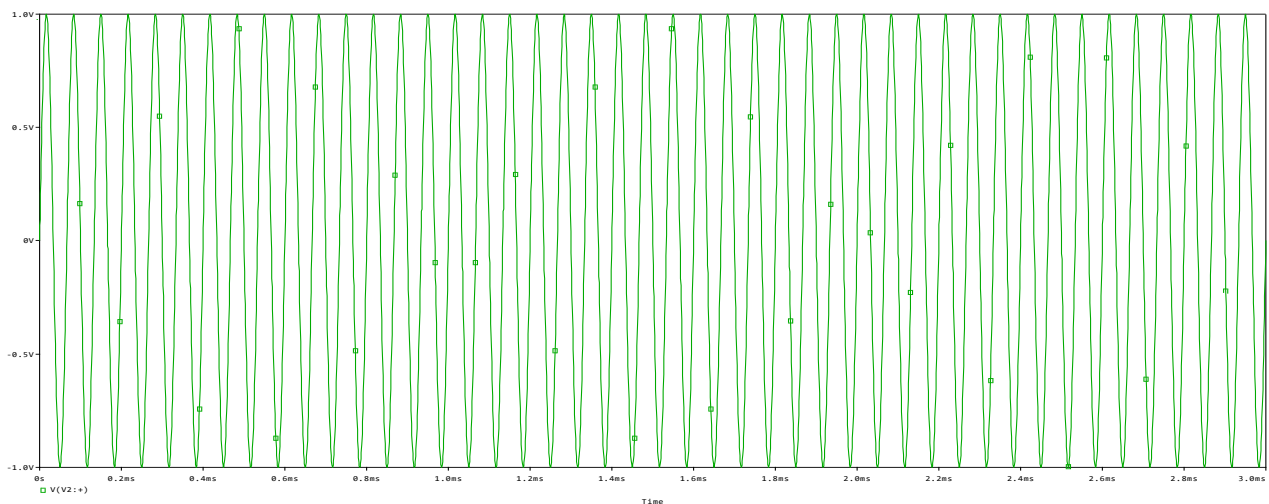


Рисунок 3.2 – Сигнал на входе выпрямителя

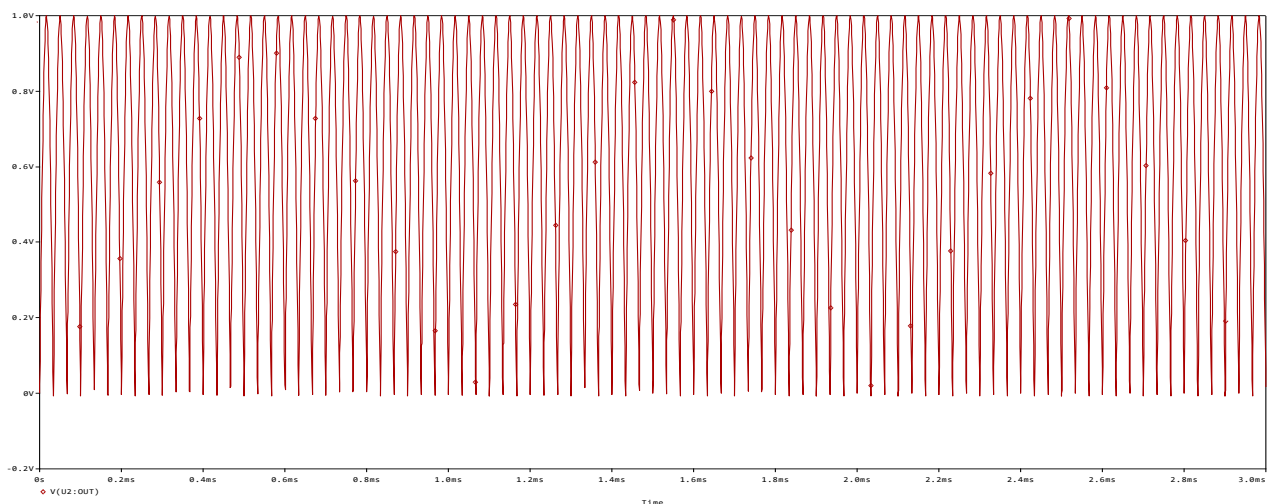


Рисунок 3.3 – Сигнал на выходе выпрямителя

Далее необходимо к выпрямителю подключить ФНЧ 4-ого порядка. Чтобы определить частоту среза, на которую необходимо настроить фильтр, проведем анализ сигнала на выходе выпрямителя. С помощью преобразования Фурье определим гармоники, входящие в состав получившегося сигнала. Результат преобразования представлен на рисунке 3.4.

По рисунку 3.4 видно, что сигнал состоит нескольких гармоник. Для решения поставленной задачи необходимо оставить гармонику с максимальной амплитудой.

Из анализируемых видов фильтров было выбран фильтр Бесселя, так как он имеет наименьшее время переходного процесса, а также наименьшее значение перерегулирования.

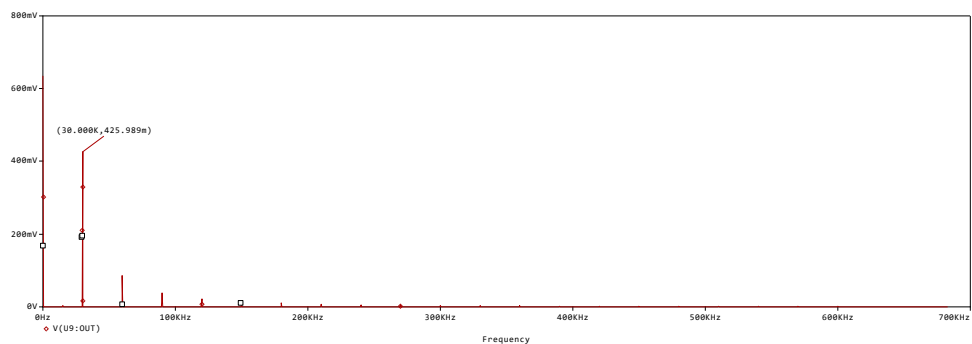


Рисунок 3.4 – Результат преобразования Фурье

Так как фильтры 4-ого порядка имеют неидеальную АЧХ, частота среза фильтра должна быть меньше 30 кГц. Опытным путем было выявлено, что при частоте среза равной 3 кГц остаточный размах пульсаций на выходе схемы не превышает 1 мВ.

Модель высокочастотного выпрямителя представлена на рисунке 3.5, сигнал на выходе выпрямителя представлен на рисунке 3.6.

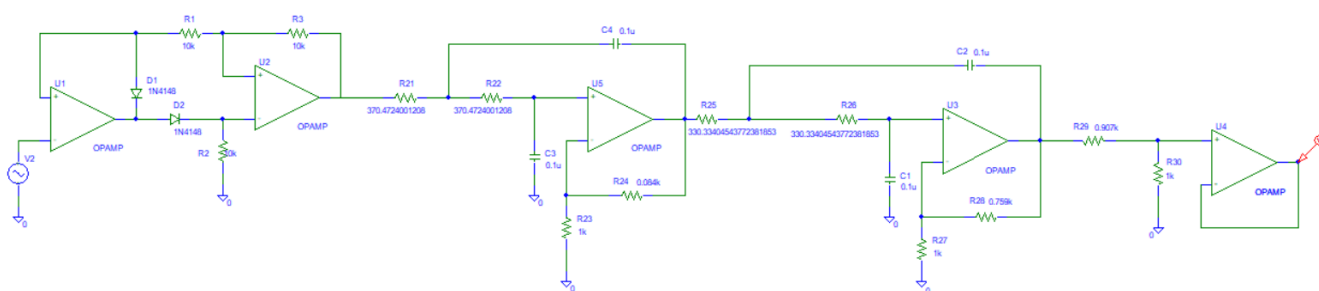


Рисунок 3.5 – Модель высокочастотного выпрямителя

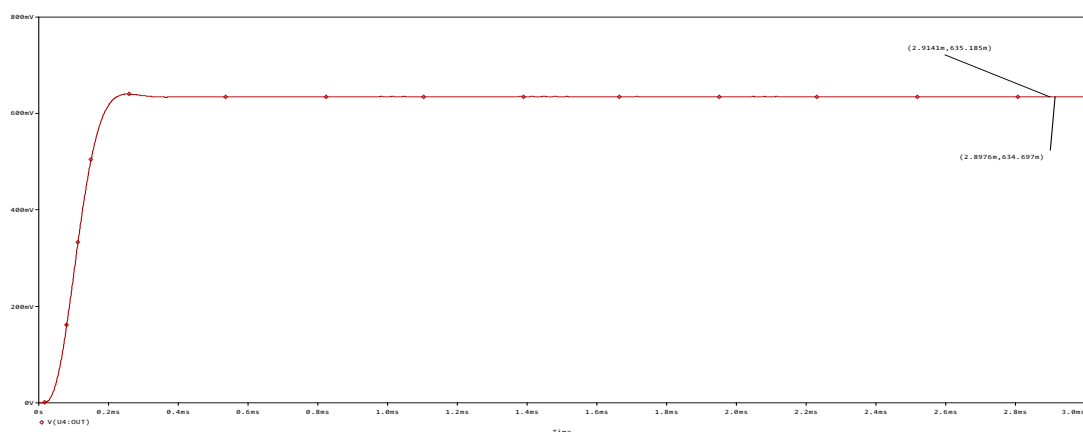


Рисунок 3.6 – Сигнал на выходе высокочастотного выпрямителя

4 ГЕНЕРАТОР СИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ НА БАЗЕ ГЕНЕРАТОРА МЕАНДРА

Чтобы получить генератор синусоидального напряжения необходимо спроектировать полосовой фильтр не более 4-ого порядка. Так как для решения данной задачи понадобится оставить одну гармонику, тогда оптимальным вариантом будет являться полосовой фильтр Чебышева.

Чтобы построить ПФ Чебышева 4-ого порядка необходимо последовательно соединить ФНЧ и ФВЧ 4-ого порядка. Для ФНЧ частоту среза примем равно частоте входного сигнала плюс 10%, а для ФВЧ частоту среза примем равно частоте входного сигнала минус 10%.

Модель схемы полосового фильтра Чебышева представлена на рисунке 4.1.

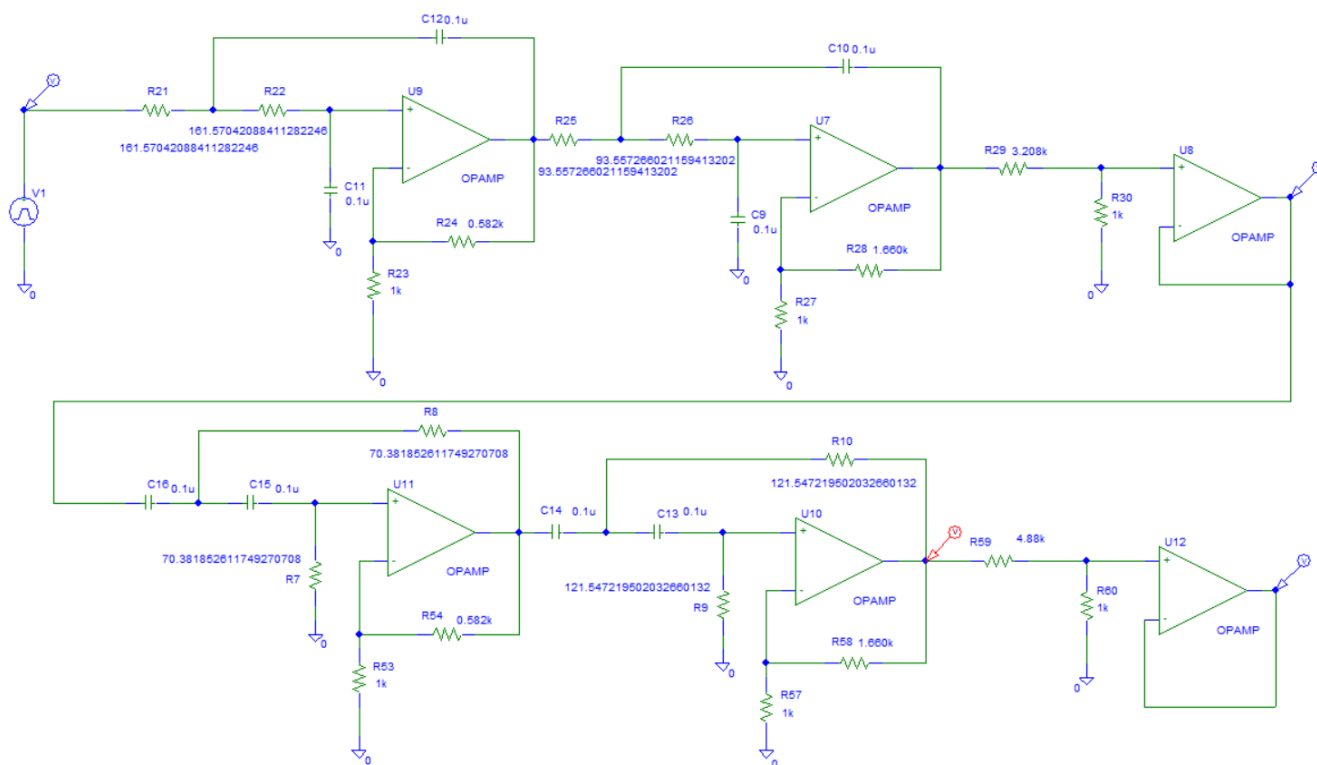


Рисунок 4.1 – Модель схемы ПФ Чебышева

В качестве генератора меандра используется элемента VPULSE, настройка которого представлена в п.1.2.

На рисунке 4.2 представлены сигналы на входе и на выходе полосового фильтра.

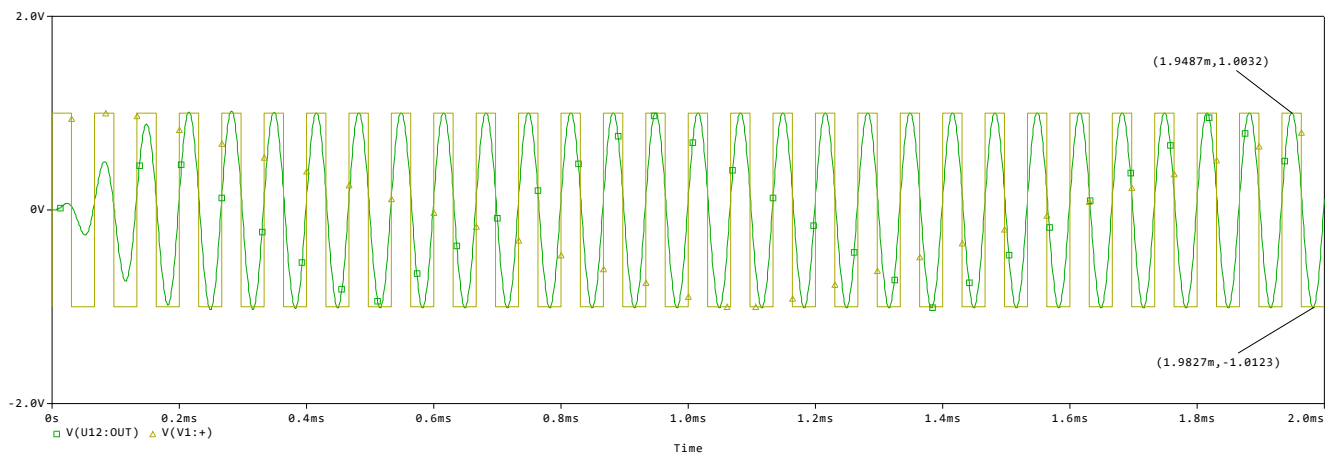


Рисунок 4.2 – Сигналы на входе и на выходе полосового фильтра

Чтобы оценить коэффициент гармонических искажений воспользуемся следующей формулой:

$$K_{\Gamma} = \sqrt{\sum_{i=2}^n U_i^2 / U_1}. \quad (5)$$

где U_1 – напряжение наивысшей гармоники;

U_i – напряжение i -ой гармоники.

На рисунках 4.3 и 4.4 представлены наивысшие гармоники выходного сигнала.

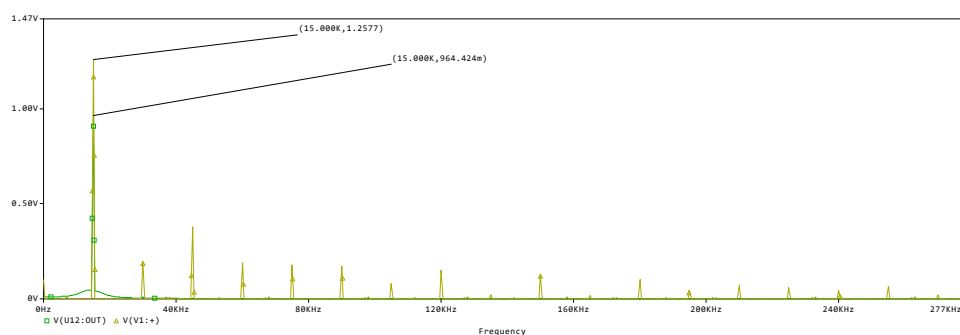


Рисунок 4.3 – Наивысшая гармоника выходного сигнала

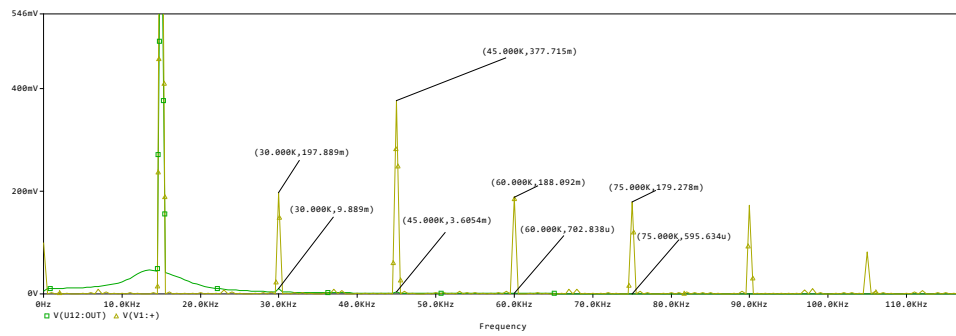


Рисунок 4.3 – Наивысшие гармоники выходного сигнала

Подставив в формулу (5) значения из рисунков 4.3 и 4.4 получаем коэффициент гармонических искажений равный:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{9,9^2 + 3,6^2 + 0,7^2 + 0,6^2}}{964,4} = 0,011 = 1,1\%$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения лабораторной работы были получены навыки расчета и моделирования различных видов фильтров с использованием САПР, изучены новые виды моделирования. Были получены навыки оценки качества фильтров и оценки их влияния на сигнал. Были получены навыки проектирования выпрямителей, а также генераторов синусоидального сигнала, в состав которых входят полосовые фильтры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. – Изд. 2-е. – Мю: Издательство БИНОМ. – 2014. – 704., ил.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

РАСЧЕТ ФИЛЬТРОВ НИЖНИХ ЧАСТОТ

$$f_{sr} := 1500 \quad C1 := 0.1 \cdot 10^{-6} \quad C2 := C1 \quad f_n := 1$$

Расчет ФНЧ Баттерворта 2-ого порядка

$$R := \frac{1}{2\pi \cdot f_{sr} \cdot C1 \cdot f_n} \quad R \rightarrow 1061.0329539459689051$$

Значение R для фильтров Баттерворта неизменно для всех порядков

Расчет номиналов резисторов нормирующего усилителя

$$K := 1.586 \quad R1 := 1000$$

$$R2 := (K - 1)R1 \quad R2 \rightarrow 586.0$$

Расчет ФНЧ Баттерворта 4-ого порядка

$$K1 := 1.152 \quad K2 := 2.235 \quad K := K1 \cdot K2 = 2.575$$

Расчет номиналов резисторов нормирующего усилителя

$$R2 := (K - 1)R1 \quad R2 \rightarrow 1574.7199999999997$$

Расчет ФНЧ Баттерворта 6-ого порядка

$$K1 := 1.068 \quad K2 := 1.586 \quad K3 := 2.483 \quad K := K1 \cdot K2 \cdot K3 = 4.206$$

Расчет номиналов резисторов нормирующего усилителя

$$R2 := (K - 1)R1 \quad R2 \rightarrow 3205.8245840000001$$

Рисунок А.1 – Расчет ФНЧ Баттерворта

$$f_{sr} := 1000 \quad C1 := 0.1 \cdot 10^{-6}$$

Расчет ФНЧ Бесселя 2-ого порядка

$$f_n := 1.274 \quad R := \frac{1}{2\pi \cdot f_{sr} \cdot C1 \cdot f_n} \quad R \rightarrow 1249.2538704230403122$$

Расчет номиналов резисторов нормирующего усилителя

$$K := 1.268 \quad R2 := (K - 1)R1 \quad R2 \rightarrow 268.0$$

Расчет ФНЧ Бесселя 4-ого порядка

$$\text{Первая секция} \quad f_n := 1.432 \quad R := \frac{1}{2\pi \cdot f_{sr} \cdot C1 \cdot f_n} \quad R \rightarrow 1111.4172003623975962$$

$$\text{Вторая секция} \quad f_n := 1.606 \quad R := \frac{1}{2\pi \cdot f_{sr} \cdot C1 \cdot f_n} \quad R \rightarrow 991.0021363131714556$$

Расчет номиналов резисторов нормирующего усилителя

$$K1 := 1.084 \quad K2 := 1.759 \quad K := K1 \cdot K2 = 1.907 \quad R2 := (K - 1)R1 \quad R2 \rightarrow 906.7560000000001$$

Расчет ФНЧ Бесселя 6-ого порядка

$$\text{Первая секция} \quad f_n := 1.607 \quad R := \frac{1}{2\pi \cdot f_{sr} \cdot C1 \cdot f_n} \quad R \rightarrow 990.38545794583282992$$

$$\text{Вторая секция} \quad f_n := 1.692 \quad R := \frac{1}{2\pi \cdot f_{sr} \cdot C1 \cdot f_n} \quad R \rightarrow 940.63205137053980951$$

$$\text{Третья секция} \quad f_n := 1.908 \quad R := \frac{1}{2\pi \cdot f_{sr} \cdot C1 \cdot f_n} \quad R \rightarrow 834.14540404557303862$$

Расчет номиналов резисторов нормирующего усилителя

$$K1 := 1.040 \quad K2 := 1.364 \quad K3 := 2.023 \quad K := K1 \cdot K2 \cdot K3 = 2.87$$

$$R2 := (K - 1)R1 \quad R2 \rightarrow 1869.74688$$

Рисунок А.2 – Расчет ФНЧ Бесселя

$$f_{sr} := 10000 \quad C1 := 0.1 \cdot 10^{-6}$$

Расчет ФНЧ Чебышева 2-ого порядка

$$f_n := 1.231 \quad R := \frac{1}{2\pi \cdot f_{sr} \cdot C1 \cdot f_n} \quad R \rightarrow 129.28914954662496813$$

Расчет номиналов резисторов нормирующего усилителя

$$K := 1.842 \quad R2 := (K - 1)R1 \quad R2 \rightarrow 842.0$$

Расчет ФНЧ Чебышева 4-ого порядка

$$\text{Первая секция} \quad f_n := 0.597 \quad R := \frac{1}{2\pi \cdot f_{sr} \cdot C1 \cdot f_n} \quad R \rightarrow 266.59119445878615707$$

$$\text{Вторая секция} \quad f_n := 1.031 \quad R := \frac{1}{2\pi \cdot f_{sr} \cdot C1 \cdot f_n} \quad R \rightarrow 154.36948893491303178$$

Расчет номиналов резисторов нормирующего усилителя

$$K1 := 1.582 \quad K2 := 2.660 \quad K := K1 \cdot K2 = 4.208 \quad R2 := (K - 1)R1 \quad R2 \rightarrow 3208.12$$

Расчет ФНЧ Чебышева 6-ого порядка

$$\text{Первая секция} \quad f_n := 0.396 \quad R := \frac{1}{2\pi \cdot f_{sr} \cdot C1 \cdot f_n} \quad R \rightarrow 401.90642194923064588$$

$$\text{Вторая секция} \quad f_n := 0.768 \quad R := \frac{1}{2\pi \cdot f_{sr} \cdot C1 \cdot f_n} \quad R \rightarrow 207.23299881757205178$$

$$\text{Третья секция} \quad f_n := 1.011 \quad R := \frac{1}{2\pi \cdot f_{sr} \cdot C1 \cdot f_n} \quad R \rightarrow 157.42328693560369512$$

Расчет номиналов резисторов нормирующего усилителя

$$K1 := 1.537 \quad K2 := 2.448 \quad K3 := 2.846 \quad K := K1 \cdot K2 \cdot K3 = 10.708$$

$$R2 := (K - 1)R1 \quad R2 \rightarrow 9708.291295999999$$

Рисунок А.3 – Расчет ФНЧ Чебышева