

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

Северо-Кавказский филиал
ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного
бюджетного образовательного учреждения высшего образования
«Московский технический университет связи и информатики»

Основы радиотехники
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Учебное пособие
для лабораторных занятий

Направление подготовки: 10.03.01 «Информационная безопасность»
Профиль: «Безопасность компьютерных систем»

Ростов-на-Дону
2022

Учебное пособие
для лабораторных занятий

по дисциплине

Основы радиотехники

Составители: Я.Б. Константинова — к.ф.-м.н., доцент

Рассмотрено и одобрено
на заседании кафедры Общенаучной подготовки
Протокол от «30» августа 2022 г. №1

В пособии описаны лабораторные работы, входящие в рабочую программу дисциплины «Основы радиотехники» для студентов направления подготовки 10.03.01 «Информационная безопасность» СКФ МТУСИ. Каждая работа содержит цель, используемое оборудование, краткую теоретическую часть, описание экспериментальной установки, задания, примеры оформления отчетов, и контрольные вопросы.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Лабораторная работа № 1. Измерение полных сопротивлений на СВЧ.	5
Лабораторная работа № 2. Исследование потерь в прямоугольном волноводе.....	8
Лабораторная работа № 3. Исследование вынужденных колебаний в объемном резонаторе.....	11
Лабораторные работы № 4, 5. Синтез и исследование полиномиальных фильтров нижних (4) и верхних (5) частот.	14

ВВЕДЕНИЕ

Цель настоящего пособия — позволить студенту самостоятельно воспроизвести основные радиотехнические явления, приучить его к обращению с измерительными приборами и познакомить с важнейшими методами измерений. Лабораторные занятия прививают студентам навыки оценки достоверности полученных результатов, их интерпретации, в том числе, и графической.

Каждый студент выполняет лабораторные работы в соответствии с индивидуальным графиком, сообщаемым ему преподавателем на первом занятии. Все выполняемые студентом лабораторные работы оформляются на двойном тетрадном листе или в тетради для лабораторных работ.

Описания к работам содержат цель работы, используемое оборудование, а начинаются с кратких теоретических сведений. Они составлены так, чтобы ясное представление о существе изучаемых явлений и применяемом методе измерений могли себе составить как те студенты, которые уже прослушали этот материал на лекциях, так и те, которые только приступают к изучению соответствующего раздела основ радиотехники. Поэтому до прихода в лабораторию студент должен предварительно подготовиться к выполнению работы, ознакомившись с ее описанием, записав в тетради ее название, цель, оборудование, основные законы, используемые при выполнении конкретной работы, рабочие формулы, заготовки таблиц.

После теоретических сведений приводится описание экспериментальной установки и измерительной аппаратуры. Затем следуют задания, регламентирующие последовательность работы студентов при проведении измерений. Перед тем как к ним приступить, студенту рекомендуется проделать ряд простых опытов, позволяющих понять особенности исследуемого явления и измерительной аппаратуры, убедиться в ее исправности, оценить надежность результатов. Проведение таких опытов — и их описание в отчете — считается важнейшей составной частью работы студента. Задания составлены таким образом, что дают возможность преподавателю варьировать их подбор в соответствии с успеваемостью и личными наклонностями студентов.

В конце описаний приводятся списки контрольных вопросов и рекомендуемой литературы.

Измерение полных сопротивлений на СВЧ

1 Цель работы.

- Изучение методик калибровки СВЧ детектора, измерения коэффициента стоячей волны и полного сопротивления нагрузки при различных степенях рассогласования в линии.
- Приобретение практических навыков по исследованию электромагнитного поля в измерительной линии.

2 Материалы и оборудование.

Для проведения лабораторной работы на реальном оборудовании необходимы следующие приборы:

- измерительная линия Р1-17;
- генератор СВЧ Г4-79;
- набор нагрузок.

3 Порядок выполнения работы.

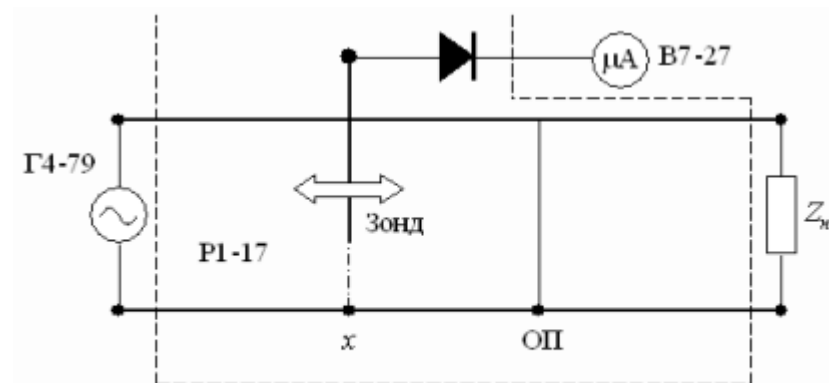


Схема лабораторной установки.

- Схема виртуальной лабораторной установки изображена на рисунке. Подготовить к работе генератор СВЧ и микроамперметр нажатием кнопки Сеть.
- Произвести калибровку детектора 1-м методом. Измерения необходимо начать от узла стоячей волны и перемещать каретку в сторону пучности. Между узлом и пучностью (в интервале $\lambda / 4$) необходимо измерить ток детектора минимум в 10 точках с равным интервалом.
- При каждом измерении тока детектора необходимо устанавливать такой предел индикатора микроамперметра, чтобы отображались три значащие цифры! При этом достигается максимальная точность измерения.

- Произвести калибровку детектора 2-м методом при десяти уровнях мощности генератора в диапазоне от -55 dB до -20 dB.
- По экспериментальным результатам определить область квадратичности детектора измерительной головки.
- По экспериментальным результатам построить график зависимости показателя степени n от мощности генератора.
- Определить положение опорной плоскости (ОП).
- Устанавливая последовательно нагрузки, реализующие малый, большой и очень большой КСВ, для каждой определить: расстояние d от ОП до ближайшего минимума и КСВ по соответствующей методике, используя полученные ранее результаты.
- Рассчитать полное сопротивление нагрузок по результатам эксперимента.

4 Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Вспомогательный график для калибровки детектора 1-м методом.
- График зависимости показателя степени n от мощности генератора.
- Описание эксперимента по определению области квадратичности детектора, расчетные формулы, результаты расчетов, включая результаты промежуточных расчетов, оформленные в виде таблицы.
- Вспомогательный график для определения области квадратичности детектора.
- Описание эксперимента по определению опорной плоскости и длины волны в линии и результаты измерений.
- Описание эксперимента по определению полного сопротивления нагрузок. Таблица результатов измерений. Расчетные формулы с пояснениями и результаты расчетов полных сопротивлений нагрузок, включая результаты промежуточных расчетов, оформленные в виде таблицы.

По каждому методу калибровки детектора должны быть приведены:

- четкое описание и схема эксперимента;
- экспериментальные результаты, оформленные в виде таблицы;
- расчетные формулы с пояснениями;
- результаты расчетов по экспериментальным данным, включая результаты промежуточных расчетов, оформленные в виде таблицы.

5 Контрольные вопросы.

1. Особенности поля в измерительной линии. Влияние зонда. Почему в качестве опорных точек выбирают минимумы поля?
2. Эквивалентная схема зонда. Согласование зонда с линией, выбор глубины погружения.

3. Что называется опорной плоскостью и как ее определяют.
4. Метод определения координаты узла стоячей волны. Измерение длины волны в линии.
5. Чем обусловлена необходимость калибровки детектора. В чем состоит калибровка.
6. Обоснование и процедура первого метода калибровки.
7. Обоснование и процедура второго метода калибровки.
8. Какой из двух методов калибровки более точен и почему.
9. Что называют областью квадратичности детектора. Как определить область квадратичности.
10. Как классифицируют КСВ по величине. Измерение малых КСВ.
11. Почему большие КСВ нельзя измерить методом максимума-минимума.
12. Обоснование и процедура метода измерения больших КСВ.
13. Обоснование и процедура метода измерения очень больших КСВ.
14. Процедура измерения полного сопротивления нагрузки.
15. Как определить Z_n по результатам эксперимента.

Лабораторная работа № 2

Исследование потерь в прямоугольном волноводе

1 Цель работы.

- Исследование частотной зависимости коэффициента затухания в волноводе с потерями.
- Исследование частотной зависимости погонной мощности потерь в волноводе.
- Приобретение навыков экспериментального исследования потерь в СВЧ структурах.

2 Оборудование.

- Генератор сигналов СВЧ Г4-83.
- Измерительная линия волноводная Р1-28.
- Короткозамкнутый отрезок волновода сечением 23х10 мм.
- Микроамперметр.

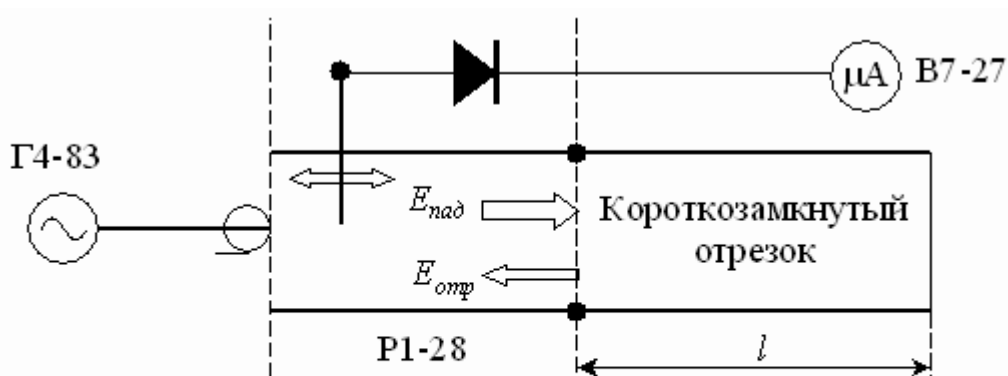


Схема лабораторной установки.

3 Экспериментальное определение коэффициента затухания.

На входе короткозамкнутого отрезка реального волновода существуют две волны: падающая $E_{\text{пад}}$ и отраженная $E_{\text{отр}}$. При отсутствии потерь амплитуды этих волн будут одинаковы, и при наложении они образуют стоячую волну. Однако наличие потерь приводит к затуханию волны, распространяющейся в отрезке волновода. Ее амплитуда будет уменьшаться по закону $e^{-\alpha z}$. Волна в отрезке проходит расстояние l до короткого замыкания и такое же расстояние на обратном пути. Пренебрегая потерями при отражении, можно считать, что амплитуды волн на входе отрезка связаны выражением:

$$|E_{omp}| = |E_{nad}|e^{-\alpha \cdot 2l}.$$

Тогда модуль коэффициента отражения на входе:

$$|\Gamma| = \frac{|E_{omp}|}{|E_{nad}|} = e^{-2\alpha l}.$$

$|\Gamma|$ можно определить по измеренному значению коэффициента стоячей волны ρ (п. 3.2.4):

$$|\Gamma| = \frac{\rho - 1}{\rho + 1} = e^{-2\alpha l}$$

Откуда легко получить выражение для коэффициента затухания через измеренные величины:

$$\alpha = \frac{1}{2l} \ln \left(\frac{\rho - 1}{\rho + 1} \right)$$

4 Порядок выполнения работы.

- Схема виртуальной лабораторной установки представлена на рисунке. Произвести подготовку приборов к работе нажатием кнопок Сеть.
- Рассчитать граничные частоты одномодового диапазона для волновода сечением 23x10 мм.
- В пределах одномодового диапазона на 10 частотах с равным интервалом измерить КСВ на входе короткозамкнутого волноводного тракта с потерями (нагрузка - Тракт). Необходимо использовать метод измерения очень больших КСВ!
- Определить по соответствующим индикаторам длину короткозамкнутого волноводного тракта l и мощность на выходе генератора в mW.
- На каждой частоте по измеренным величинам рассчитать коэффициент затухания α и построить зависимость α от частоты.
- Для каждой из частот рассчитать погонную мощность потерь в волноводе используя полученные результаты.
- Построить зависимость погонной мощности потерь от частоты.
- Для каждой из экспериментальных частот рассчитать погонную мощность потерь и построить частотную зависимость на том же графике, что и экспериментальная. Размеры волновода 23x10 мм.

5 Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Расчет граничных частот одномодового диапазона и мощности генератора.
- Краткое описание и схему эксперимента.
- Таблица результатов эксперимента.
- Расчет КСВ по измеренным величинам с пояснениями, таблица результатов расчета.
- Расчет коэффициентов затухания в волноводе с пояснениями, таблица результатов расчета.
- График экспериментальной зависимости коэффициента затухания от частоты.
- Расчеты теоретической и экспериментальной погонной мощности потерь в волноводе с пояснениями, таблица результатов расчета.
- Графики теоретической и экспериментальной зависимостей погонной мощности потерь в волноводе от частоты.

6 Контрольные вопросы.

1. Потери в прямоугольном волноводе. Погонная мощность потерь и метод ее расчета. Виды потерь.
2. Потери в стенках волновода. Метод расчета погонной мощности потерь в стенках.
3. Вывод формулы для погонной мощности потерь в стенках волновода в одномодовом режиме.
4. Потери в диэлектрике. Метод расчета погонной мощности потерь в диэлектрике.
5. Закон изменения амплитуды волны в волноводе с потерями. Коэффициент затухания и его связь с погонной мощностью потерь.
6. Экспериментальный метод определения коэффициента затухания.
7. Обосновать экспериментальный метод определения коэффициента затухания.
8. Чем объяснить различия между теоретическими и экспериментальными значениями погонной мощности потерь?

Лабораторная работа № 3

Исследование вынужденных колебаний в объемном резонаторе

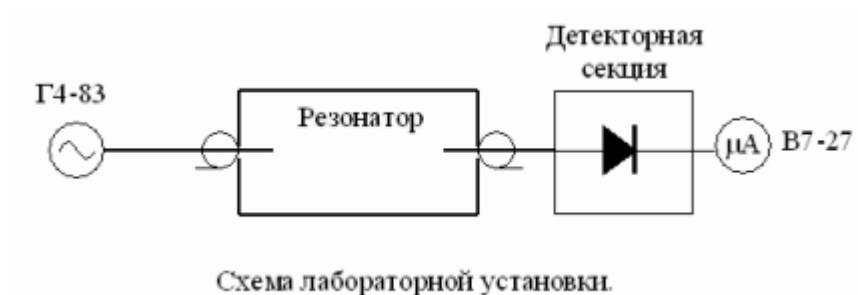
1 Цель работы.

- Определение нагруженной добротности объемного резонатора.
- Приобретение навыков экспериментального исследования объемных резонаторов СВЧ.

2 Оборудование.

- Генератор сигналов СВЧ Г4-83.
- Измерительная линия волноводная Р1-28.
- Объемный резонатор.
- Коаксиальная детекторная секция.
- Микроамперметр.

3 Экспериментальное определение нагруженной добротности.



Наиболее простой метод определения добротности резонатора – **метод передачи** основан на снятии вблизи резонанса частотной зависимости сигнала, наведенного во встроенном в резонатор зонде. Этот сигнал выпрямляется детекторной секцией и измеряется микроамперметром. Резонатор возбуждается сигналом другого зонда, соединенного с генератором СВЧ.

Из-за наличия устройств связи резонатора с внешними структурами его резонансная частота и добротность изменятся. Убывание электромагнитной энергии в резонаторе будет обусловлено его собственными потерями и потерями в связанных с ним устройствах. Этот процесс характеризуется нагруженной добротностью резонатора Q_H . Если известен коэффициент связи резонатора в зондом η , то нагруженную добротность можно выразить через собственную добротность резонатора Q_0 :

$$Q_H = \frac{Q_0}{1 + \eta} \quad (9.1)$$

Перепишем это выражение в виде:

$$\frac{1}{Q_H} = \frac{1}{Q_0} + \frac{\eta}{Q_0} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{Bн}},$$

где введено обозначение $Q_{Bн} = \eta / Q_0$ – внешняя добротность резонатора. Из этого равенстве можно заключить, что $Q_{Bн}$ описывает потери во внешних устройствах, связанных с резонатором, Q_0 – собственные потери резонатора.

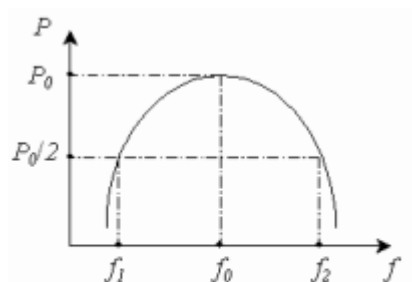


Рисунок 9.2 – Определение Q_H .

Метод передачи позволяет определить нагруженную добротность резонатора, однако при слабой связи $\eta \approx 0$ из (9.1) следует, что $Q_H \approx Q_0$. По снятой вблизи резонанса зависимости мощности от частоты (при квадратичном детекторе его сигнал пропорционален мощности в резонаторе) определяются частоты f_1, f_2 , соответствующие расстройкам при половинной мощности – рисунок 9.2. Нагруженная добротность рассчитывается по формуле:

$$Q_H = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (9.2)$$

4 Порядок выполнения работы.

Схема виртуальной лабораторной установки представлена на рисунке. Произвести подготовку приборов к работе включением кнопок Сеть.

- При низкой, средней и высокой добротностях резонатора последовательно произвести следующие измерения:
 1. Изменяя частоту генератора, определить резонансную частоту f_0 по максимуму показаний микроамперметра.

2. Снять частотную зависимость мощности в генераторе вблизи резонансной частоты. При этом максимальная расстройка должна соответствовать уменьшению мощности в 10 раз!
- По полученным результатам построить графики зависимостей мощности в генераторе от частоты при разных добротностях.
 - В соответствии с рисунком 9.2, определить частоты расстроек при половинной мощности и рассчитать нагруженные добротности по формуле (9.2).

5 Содержание отчета.

- Название и цель работы.
- Краткое описание и схему эксперимента.
- Таблица результатов эксперимента.
- Графики экспериментальной зависимостей мощности в генераторе от частоты с необходимыми построениями для расчетов нагруженной добротности.
- Расчеты нагруженных добротностей резонатора.

6 Контрольные вопросы.

1. Понятие объемного резонатора. Общие свойства резонаторов.
2. Отрезок линии передачи как объемный резонатор.
3. Вывод условия существования колебаний в объемном резонаторе.
4. Собственные колебания объемного резонатора и их связь с собственными волнами линии передачи. Типы колебаний. Основной тип колебаний.
5. Вывод формулы для собственных частот объемного резонатора. Спектр колебаний резонатора.
6. Потери в резонаторе. Виды потерь и добротность резонатора. Парциальные добротности.
7. Вывод закона затухания колебаний в резонаторе.
8. Метод расчета парциальной добротности, связанной в потерями в диэлектрике резонатора. Как она зависит от резонансной частоты?
9. Метод расчета парциальной добротности, связанной в потерями в стенках резонатора. Как она зависит от резонансной частоты?
10. Прямоугольный резонатор. Типы собственных колебаний, собственные частоты. Вырожденные колебания.
11. Классификация типов колебаний прямоугольного резонатора и ее особенности. Основной тип колебаний. Как определить его частоту по заданным размерам резонатора?
12. Нагруженная добротность резонатора и метод ее экспериментального определения.

Лабораторные работы № 4, 5

Синтез и исследование полиномиальных фильтров нижних (4) и верхних (5) частот

1 Назначение и классификация электрических фильтров

Электрическими фильтрами называются линейные четырехполюсники (ЧП) пассивной или активной структуры, обладающие избирательными свойствами. Они предназначены для выделения из состава спектра сложного электрического колебания, поданного на вход ЧП, заданных частотных составляющих:

- с небольшим ослаблением в заданной полосе частот (называемой полосой пропускания фильтра - ПП),
- подавления со значительным ослаблением частотных составляющих, находящихся в другой заданной полосе частот (называемой полосой задерживания – ПЗ).

Весь частотный диапазон фильтра от $f = 0$ до $f = \infty$ делится на несколько полос:

- полосу пропускания (ПП), где ослабление фильтра не должно превышать некоторого заданного значения, обозначаемого как ΔA и называемого максимально допустимым ослаблением в этой полосе. Ослабление фильтра измеряется в дБ (децибелах) или в Нп (неперах) и в ПП оно обычно задается в пределах от 0.1 до 3.0 дБ;
- полосу задерживания (ПЗ), где ослабления фильтра должно быть больше некоторого заданного значения A_s , называемого минимально допустимым ослаблением фильтра в ПЗ;
- полосу перехода, где величина ослабления не регламентируется.

Фильтр может иметь не одну, а две полосы: пропускания, задерживания или перехода.

По взаимному расположению ПП и ПЗ различают 4 типа фильтров: фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосовые (ПФ) и режекторные фильтры (РФ).

Графики амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) передаточных функций перечисленных идеальных фильтров приведены на рисунке 1.

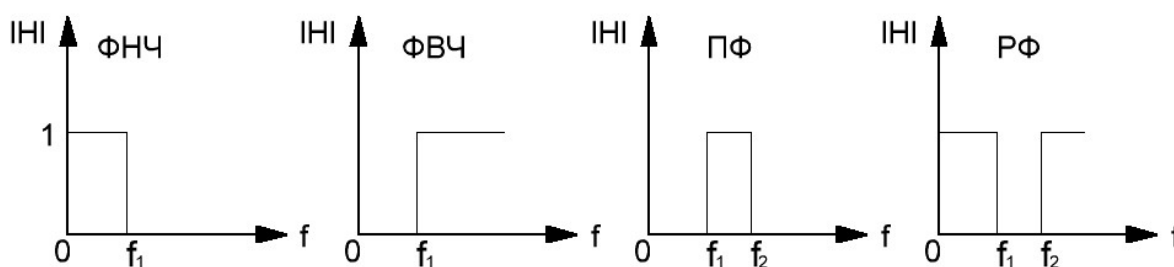


Рисунок 1 - Графики АЧХ различных фильтров

На рисунке 2 представлены требования к ослаблению в различных полосах частот идеальных электрических фильтров.

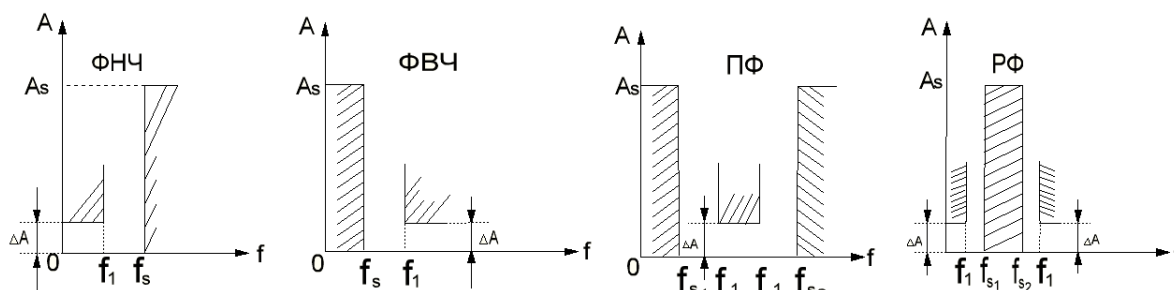


Рисунок 2 - Требования к ослаблению электрических фильтров в различных диапазонах частот

На всех рисунках приняты следующие обозначения:

- f_1 - граничная частота полосы пропускания ФНЧ и ФВЧ,
- f_s - граничная частота полосы задерживания ФНЧ и ФВЧ,
- f_{-1}, f_1 - нижняя и верхняя граничные частоты полосы пропускания ПФ,
- f_{s1}, f_{s2} - верхняя и нижняя граничные частоты двух полос задерживания ПФ,

- f_1, f_2 - верхняя и нижняя граничные частоты двух полос пропускания РФ,
- f_{s1}, f_{s2} - нижняя и верхняя граничные частоты полосы задерживания РФ,
- ΔA - максимально допустимое ослабление любого фильтра в ПП (ΔA также называется неравномерностью ослабления фильтра в ПП),
- A_s - минимально допустимое ослабление любого фильтра в ПЗ.

Фильтры могут быть нагружены двусторонне (рисунок 3а) или односторонне (рисунки 3б, 3в).

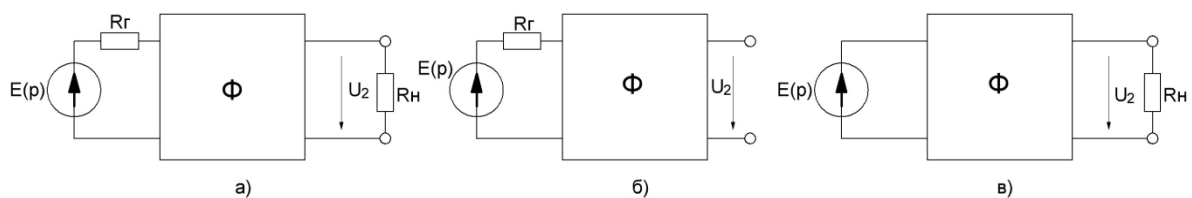


Рисунок 3 - Виды нагрузок электрических фильтров

где $E(p)$ - э.д.с. генератора в операторной форме,

p - комплексная частота ($p = \sigma + j\omega$, $\omega = 2\pi f$),

R_r - внутреннее сопротивление генератора,

$U_2(p)$ - напряжение на выходе фильтра в операторной форме,

R_n - сопротивление нагрузки фильтра.

Основной частотной характеристикой двусторонне нагруженного фильтра является его передаточная функция по напряжению [1]:

$$H(p) = \frac{2U_2(p)}{E(p)} \sqrt{\frac{R_r}{R_n}} \quad (1)$$

Ослабление фильтра в данном случае вычисляется по передаточной функции ЧП следующим образом:

$$A = -20 \lg[H(p)], \quad (2)$$

где $p = j\omega$.

2 Синтез полиномиальных фильтров по рабочим параметрам

Существующие электрические фильтры имеют различные передаточные функции. Широкое распространение получили полиномиальные реактивные фильтры, которые состоят только из реактивных элементов и имеют передаточную функцию следующего вида [1]:

$$H(p) = \frac{b_0}{v(p)} = \frac{b_0}{p^n + a_1 p^{n-1} + a_2 p^{n-2} + \dots + a_n} \quad (3)$$

где b_0 - постоянный множитель, равный ослаблению ФНЧ при частоте $f = 0$,
 $v(p)$ - полином Гурвица степени n . Все корни этого полинома имеют отрицательные вещественные части,
 n – порядок фильтра.

У полиномиального фильтра число его реактивных элементов равно порядку фильтра.

При синтезе полиномиальных фильтров широко используется нормирование элементов и частоты фильтра по сопротивлению и частоте:

$$R_0, \text{ - нормирующее сопротивление,} \quad (4)$$

$$\omega_0(f_0) \text{ - нормирующая круговая или циклическая частота,} \quad (5)$$

$$\hat{Z}(p) = Z(p)/R_0 \text{ - операторное сопротивление, нормированное по сопротивлению } R_0,$$

$$S = \frac{p}{\omega_0} \text{ - нормированная комплексная частота,} \quad (6)$$

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_0} \text{ - нормированная вещественная частота,} \quad (7)$$

$$\hat{z}(S) \text{ - операторное сопротивление, нормированное по сопротивлению } R_0 \text{ и по частоте } \omega_0(f_0). \quad (8)$$

Ослабление полиномиального фильтра определяется его амплитудно-частотной характеристикой, является четной функцией нормированной частоты Ω и записывается выражением [1]:

$$A(\Omega) = 10 \lg \frac{1}{|H(j\Omega)|^2} = 10 \lg(A_0 \Omega^{2n} + A_1 \Omega^{2n-1} + \dots + A_n), \quad (9) \text{ где}$$

$|H(j\Omega)|$ - модуль АЧХ фильтра.

Если принять, что все коэффициенты A_i равны друг другу:

$$A_1 = A_2 = \dots = A_{n-1},$$

а коэффициент $A_n = 1$, то выражение (9) записывается в виде:

$$A(\Omega) = 10 \lg \frac{1}{|H(j\Omega)|^2} = 10 \lg(A_0 \Omega^{2n} + 1). \quad (10)$$

Для полиномиальных фильтров Баттерворта принято нормировать частоту по такому значению частоты ω_0 (f_0), при которой модуль АЧХ фильтра уменьшается до значения $1/\sqrt{2}$ относительно максимального значения $H(0) = 1$. При этом ослабление фильтра составляет 3 дБ, а коэффициент A_0 становится равным 1. Тогда выражение ослабления фильтра в зависимости от частоты Ω приобретает следующий вид:

$$A(\Omega) = 10 \lg \frac{1}{|H(j\Omega)|^2} = 10 \lg(1 + \Omega^{2n}). \quad (11)$$

Полиномиальные фильтры с характеристиками вида (11) называются фильтрами с максимально плоскими характеристиками ослабления в ПП или **фильтрами с характеристиками Баттерворта** [1].

Модуль передаточной функции такого фильтра имеет вид:

$$|H(j\Omega)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \Omega^{2n}}}. \quad (12)$$

Графики модуля передаточной функции полиномиального фильтра нижних частот Баттерворта и его ослабления в зависимости от частоты Ω для различных порядков фильтра представлены на рисунках 4 и 5.

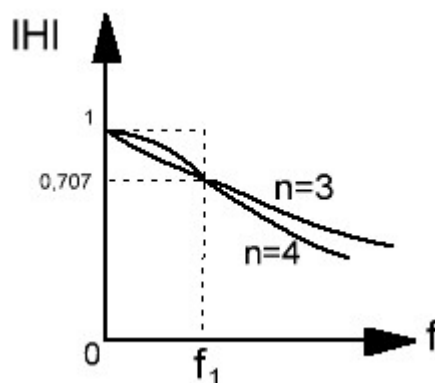


Рисунок 4 - Графики модуля передаточной функции полиномиального ФНЧ Баттерворта для различных порядков фильтра

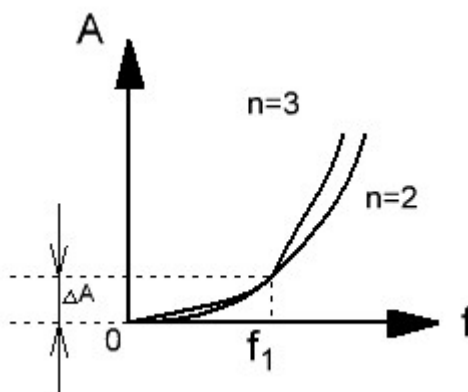


Рисунок 5 - Графики ослабления полиномиального ФНЧ Баттерворта для различных порядков фильтров

Если по условиям задачи ослабление ФНЧ в ПП на его граничной частоте f_1 не должно превышать некоторого заданного значения ΔA , не равного 3 дБ, то нормирующая частота ω_0 определяется выражением:

$$\omega_0 = \frac{\omega_1}{\sqrt[2n]{10^{0.1\Delta A} - 1}}, \quad (13)$$

а ослабление ФНЧ Баттерворта рассчитывается по формуле:

$$A = 10 \lg [1 + (10^{0.1\Delta A} - 1) \Omega^{2n}], \quad (14)$$

где нормированная частота Ω определяется выражением:

$$\Omega = \frac{\omega}{\omega_0} = \frac{f}{f_0}. \quad (15)$$

Передаточная функция ФНЧ Баттерворта в нормированных величинах записывается в виде:

$$H(s) = \frac{b_0}{s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \dots + a_n}, \quad (16)$$

где $u(s) = s^n + a_1 s^{n-1} + a_2 s^{n-2} + \dots + a_n$ – полином Гурвица, а $s = p / \omega_0$ – нормированная комплексная частота.

Нули полинома Гурвица (называемого также полиномом Баттерворта, который первым применил его для синтеза полиномиальных фильтров) рассчитываются по формулам:

при четных значениях n

$$s_k = \cos \frac{(2k-1)\pi}{n2} + j \sin \frac{(2k-1)\pi}{n2}, \quad (17)$$

при нечетных значениях n

$$s_k = \cos \frac{k}{n} \pi + j \sin \frac{k}{n} \pi. \quad (18)$$

В этих формулах $k = 1, 2, \dots, 2n$. Из этих $2n$ значений выбираются только те значения, у которых s_k имеют отрицательные вещественные части. Произведения сомножителей $(s - s_k)$, у которых все s_k имеют отрицательные вещественные части, образуют полином Баттерворта $u(s)$:

$$u(s) = \prod (s - s_k). \quad (19)$$

На основе использования формул (17), (18) составлена таблица 1, где приведены все коэффициенты полиномов Баттерворта, имеющие порядок в пределах от 2 до 7.

Таблица 1 - Коэффициенты полиномов Гурвица (Баттерворта), имеющие порядок фильтра в пределах от 2 до 7

№	a_1	a_2	a_2	a_2	a_5	a_6
2	1.4142	-	-	-	-	-
3	2.0000	2.0000	-	-	-	-
4	2.6131	3.4142	2.6131	-	-	-
5	3.2361	5.2361	5.2361	3.2361	-	-
6	3.8637	7.4641	9.1461	7.4641	3.8637	-
7	4.4940	10.0978	14.5918	14.5918	10.0978	4.4940

Полиномиальные фильтры Чебышева [1] синтезируются аналогично, но имеют равномерно-колебательную характеристику ослабления в ПП и монотонно возрастающую в ПЗ. Для этих фильтров квадрат модуля передаточной функции выражается формулой:

$$|H(j\Omega)|^2 = \frac{1}{1 + (10^{0.1\Delta A} - 1) T_n^2(\Omega)}, \quad (20)$$

где $T_n^2(\Omega)$ - полином Чебышева степени n .

Полином Чебышева может быть четным и нечетным. Зависимости модуля передаточной функции ФНЧ Чебышева от циклической частоты для четного и нечетного порядка фильтра приведены на рисунке 6.

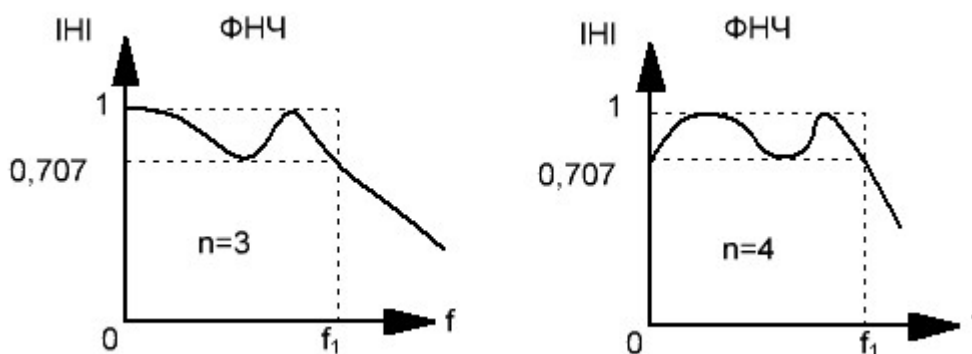


Рисунок 6 - Графики зависимости модуля передаточной функции ФНЧ Чебышева при нечетном и четном порядке фильтра

Ослабление ФНЧ Чебышева определяется по формуле:

$$\begin{aligned} A &= 10 \lg \left| 1 + \varepsilon^2 T_n^2(\Omega) \right| = \\ &= 10 \lg [1 + (10^{0.1\Delta A} - 1) T_n^2(\Omega)]. \end{aligned} \quad (21)$$

Выражение $T_n(\Omega) = \cosh(n \operatorname{Arch}\Omega)$ представляет собой полином Чебышева степени n . В нем ε – это коэффициент неравномерности (ранее был обозначен как ΔA). Коэффициент неравномерности связан с коэффициентом ρ отражения напряжения на границе ПП фильтра следующим соотношением:

$$\varepsilon = \frac{\rho}{\sqrt{1-\rho^2}}. \quad (22)$$

Кривые ослабления фильтра нижних частот Чебышева для нечетного и четного порядка приведены на рисунке 7.

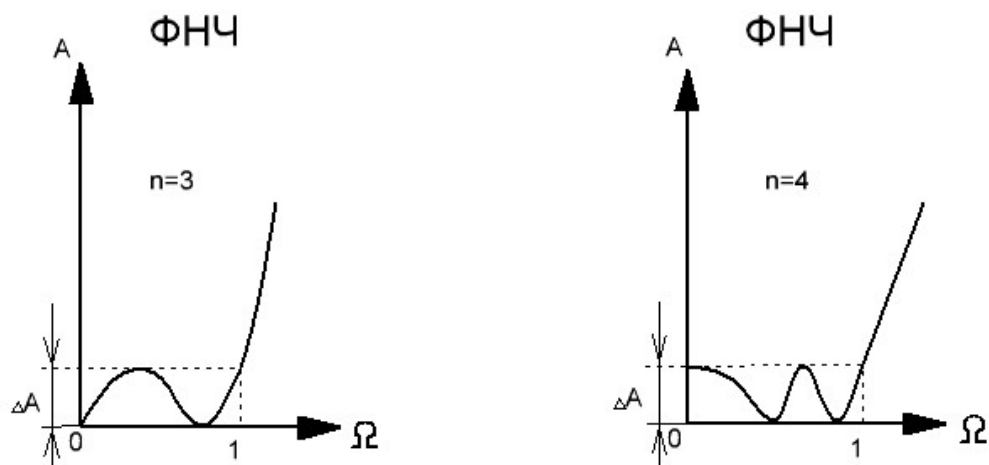


Рисунок 7 - Графики ослабления ФНЧ Чебышева для нечетного и четного порядка фильтра

Оптимальные свойства чебышевской аппроксимации заключаются в том, что из всех передаточных функций ФНЧ функция Чебышева имеет наименьшую сложность при заданной неравномерности в полосе пропускания фильтра и наибольшую крутизну ослабления в полосе задерживания. Фильтры Чебышева целесообразно применять в тех случаях, когда наиболее важным является равномерное прохождение частот во всей ПП. Однако эти фильтры обладают нелинейной фазовой характеристикой и соответственно непостоянным временем задерживания частотных составляющих в ПП.

При синтезе любого полиномиального фильтра вначале синтезируют ФНЧ, который называют фильтром-прототипом нижних частот (ФПНЧ), и от схемы этого фильтра переходят к схеме любого другого фильтра в нормированных параметрах. В процессе перехода получают не только схему другого фильтра, но рассчитывают значения его нормированных параметров и получают соответствующие частотные характеристики. Методика преобразования фильтра-прототипа в другой тип фильтра приводится в [2].

В самом начале расчета полиномиального ФНЧ определяется его порядок по одной из нижеприведенных формул для каждого из рассмотренных фильтров:

- фильтр Баттерворта (с плоской характеристикой в ПП)

$$n \geq \frac{A_s - 10 \lg(10^{0.1 \Delta A} - 1)}{20 \lg \Omega_s}; \quad (23)$$

- фильтр Чебышева (с равномерно-колебательной характеристикой в ПП)

$$n \geq \frac{A_s + 6 - 10 \lg(10^{0.1 \Delta A} - 1)}{20 \lg(\Omega_s + \sqrt{\Omega_s^2 - 1})} = \frac{\text{Arch} \sqrt{\frac{10^{0.1 A_s} - 1}{10^{0.1 \Delta A} - 1}}}{\text{Arch} \Omega_s}; \quad (24)$$

где $\Omega_s = \frac{f_s}{f_1}$ - нормированная частота ФНЧ на границе ПЗ,

f_1 - верхняя граничная частота ПП ФНЧ,

f_s - нижняя граничная частота ПЗ ФНЧ.

Значения n , полученные по этим формулам, округляются до ближайшего большего целого числа.

В процессе синтеза ФПНЧ значения параметров его элементов получают в нормированном виде. Нормированные значения сопротивления r , индуктивности l и емкости c рассчитываются по следующим формулам:

$$r = \frac{R}{R_0}, \quad l = \frac{2\pi f_0 L}{R_0}, \quad c = 2\pi f_0 C R_0, \quad (25)$$

где нормирующее сопротивление R_0 принимается равным сопротивлению нагрузки фильтра R_n , а нормирующая частота f_0 вычисляется по (13).

Полученные нормированные значения элементов фильтра далее денормируются, т.е. пересчитываются в действительные значения. Для этого нормированные значения каждого элемента схемы умножаются на соответствующие коэффициенты денормирования. Значения этих коэффициентов для сопротивления kr , индуктивности k_l и емкости k_c определяются по формулам:

$$kr = R_0, \quad k_l = \frac{R_0}{2\pi f_0}, \quad k_c = \frac{1}{2\pi f_0 R_0}. \quad (26)$$

Действительные же значения сопротивления R , индуктивности L и емкости C вычисляются с помощью коэффициентов денормирования по следующим формулам:

$$R = kr \cdot r, \quad L = k_l \cdot l, \quad C = k_c \cdot c. \quad (27)$$

При синтезе ФНЧ по рабочим параметрам значения нормированных элементов схемы ФНЧ можно определить с помощью таблиц или аналитически.

При определении значений нормированных элементов схемы ФНЧ с помощью таблиц после определения порядка фильтра по заданному значению неравномерности ослабления фильтра в ПП и требуемому виду АЧХ ФНЧ (типа Баттерворта, Чебышева и др.) выбирают значения нормированных элементов схемы ФНЧ из специально разработанных таблиц [2].

Нормированные значения элементов нормализованной схемы ФНЧ Баттерворта для случая, когда $R_r = R_n$, приведены в таблице 2 [2].

Таблица 2 - Значения нормированных элементов нормализованного ФНЧ Баттерворта

n	c_1 или l'_1	l_2 или c'_2	c_3 или l'_3	l_4 или c'_4	c_5 или l'_5	l_6 или c'_6	c_7 или l'_7	l_8 или c'_8	c_9 или l'_9	l_{10} или c'_{10}
1	2.0000	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1.4142	1.4142	-	-	-	-	-	-	-	-
3	1.0000	2.0000	1.0000	-	-	-	-	-	-	-
4	0.7654	1.8478	1.8478	0.7654	-	-	-	-	-	-
5	0.6180	1.6180	2.0000	1.6180	0.6180	-	-	-	-	-
6	0.5176	1.4142	1.9319	1.9319	1.4142	0.5176	-	-	-	-
7	0.4450	1.2470	1.8019	2.0000	1.8019	1.2470	0.4450	-	-	-
8	0.3902	1.1111	1.6629	1.9616	1.9616	1.6629	1.1111	0.3902	-	-
9	0.3473	1.0000	1.5321	1.8794	2.0000	1.8794	1.5321	1.0000	0.3473	-
10	0.3129	0.9080	1.4142	1.7820	1.9754	1.9754	1.7820	1.4142	0.9080	0.3129

Нормированные значения элементов нормализованной схемы ФНЧ Чебышева для случая, когда $R_r = R_n$, приведены в таблице 3 [2].

Таблица 3 - Значения нормированных элементов нормализованного ФНЧ Чебышева

ΔA , дБ	Порядок фильтра n	c_1 или l'_1	l_2 или c'_2	c_3 или l'_3	l_4 или c'_4	c_5 или l'_5	l_6 или c'_6	c_7 или l'_7
0.5	3	1.596	1.097	1.596	-	-	-	-
	5	1.706	1.230	2.541	1.230	1.706	-	-
	7	1.737	1.258	2.638	1.344	2.638	1.258	1.737
1.0	3	2.024	0.994	2.024	-	-	-	-
	5	2.135	1.091	3.001	1.091	2.135	-	-
	7	2.167	1.112	3.094	1.174	3.094	1.112	2.167
2.0	3	2.711	0.833	2.711	-	-	-	-
	5	2.831	0.899	3.783	0.899	2.831	-	-
	7	2.865	0.912	3.877	0.954	3.877	0.912	2.865
3.0	3	3.349	0.712	3.349	-	-	-	-
	5	3.481	0.762	4.538	0.762	3.481	-	-
	7	3.519	0.772	4.639	0.804	4.639	0.772	3.519

Значения элементов, приведенные в таблицах 2 и 3, относятся к схемам нормализованного фильтра Баттерворта и нормализованного фильтра Чебышева, нагруженных двусторонне согласовано:

$$r_z = r_n,$$

$$\text{где } r_z = \frac{R_r}{R_0}, \quad r_n = \frac{R_n}{R_0}.$$

Значения элементов фильтров нормализованы по отношению к верхней граничной частоте ПП и по отношению к сопротивлению нагрузки, т.е. таблицы рассчитана для случая, когда $\Omega_1 = 1$ и $r_n = 1$.

В таблицах 2 и 3 в каждом столбце приводятся нормированные значения либо индуктивности l_i , либо емкости c'_i . Значения индуктивности выбираются в случае, когда фильтр подключается к источнику напряжения (рисунок 8), а емкость выбирается, когда фильтр подключается к источнику тока (рисунок 9).

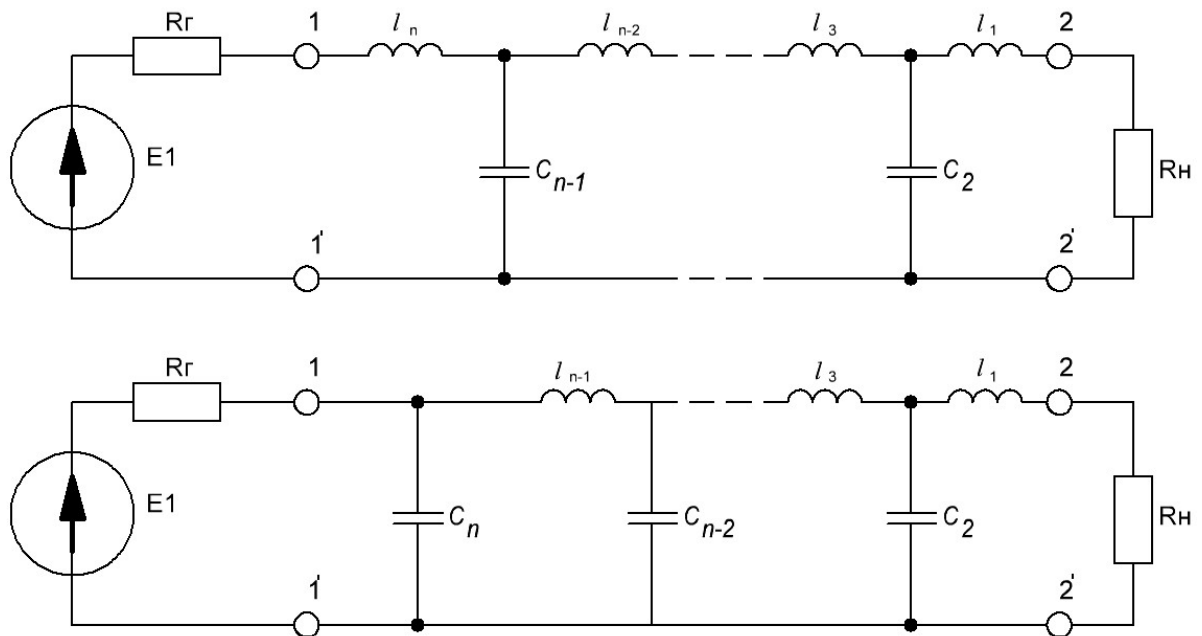


Рисунок 8 - Схема подключения ФНЧ к источнику напряжения

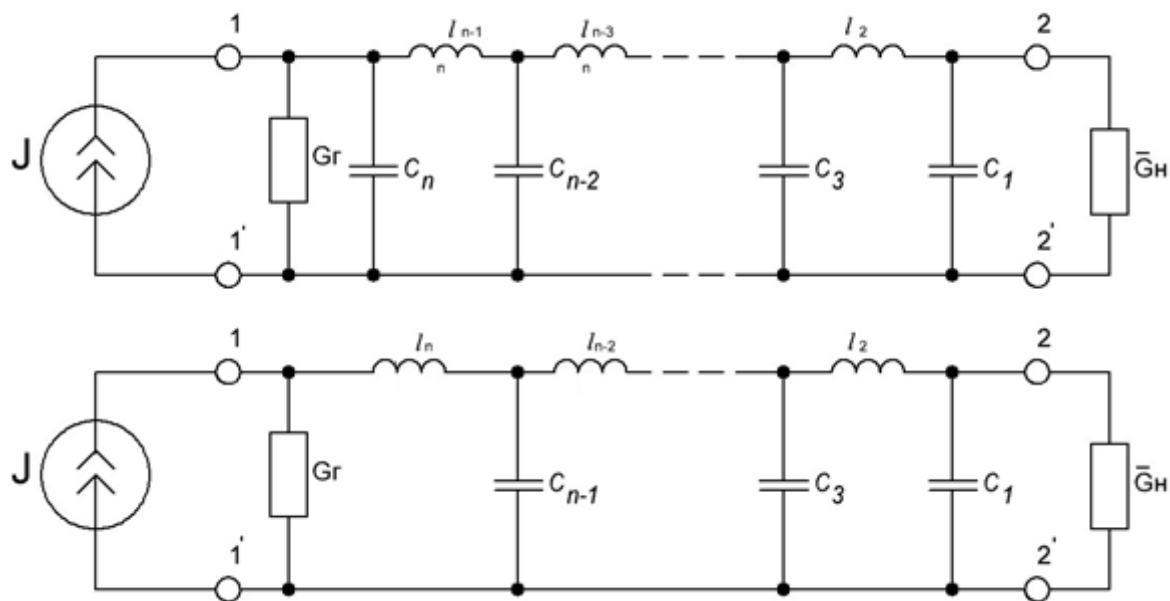


Рисунок 9 - Схема подключения ФНЧ к источнику тока

Далее производится денормирование выбранных нормированных значений элементов схемы фильтра и получается схема рассчитываемого фильтра с действительными значениями элементов.

Синтез полиномиального фильтра, нагруженного двусторонне, когда соблюдается равенство: $R_r = R_n$, может быть выполнен также аналитически на основе формулы входного сопротивления фильтра в нормированных значениях его элементов:

$$Z_{BX}(s) = \frac{v(s) + h(s)}{v(s) - h(s)}, \quad (28)$$

где $v(s)$ - полином Баттерворта,

$h(s)$ - функция фильтрации,

$h(s) = s^n$ - функция фильтрации для фильтра Баттерворта.

При синтезе фильтра Чебышева функция фильтрации находится следующим образом [1]:

- берется полином Чебышева n порядка $T_n(\Omega)$ (таблица 4) и вычисляется его нормированное значение путем деления $T_n(\Omega)$ на 2^{n-1} ,

- в полученном выражении Ω заменяется комплексной частотой p и все члены полученного многочлена считаются положительными,
- полученный многочлен считается функцией фильтрации $h(p)$ для фильтра Чебышева.

Выражения функций фильтрации для фильтров Чебышева приведены в таблице 4.

Таблица 4 - Выражения функции фильтрации для фильтров Чебышева

Порядок фильтра n	Полином Чебышева $T_n(\Omega)$	Нормированный полином Чебышева	Функция фильтрации для фильтра Чебышева $h(p)$
1	Ω	Ω	p
2	$2\Omega^2 - 1$	$\Omega^2 - 0.5$	$p^2 + 0.5$
3	$4\Omega^3 - 3\Omega$	$\Omega^3 - 0.75\Omega$	$\rho^3 + 0.75\rho$
4	$8\Omega^4 - 8\Omega^2 + 1$	$\Omega^4 - \Omega^2 + 0.125$	$\rho^4 + \rho^2 + 0.125$
5	$16\Omega^5 - 20\Omega^3 + 5\Omega$	$\Omega^5 - 1.125\Omega^3 + 0.3125\Omega$	$\rho^5 + 1.25\rho^3 + 0.3125\rho$

Следует отметить, что при синтезе двусторонне нагруженных фильтров Баттерворта и Чебышева при $R_r = R_n$ для нечетных значений n и любых значений ΔA , схемы фильтров будут симметричны относительно вертикальной оси, проведенной по середине фильтра, т.е. каждая половина представляет собой зеркальное отображение другой относительно этой оси.

Далее полученное нормированное выражение входного сопротивления ФНЧ (28) раскладывается в цепную дробь следующего вида:

$$Z_{BX}(s) = \alpha_1 s + \frac{1}{\beta_1 s + \frac{1}{\alpha_2 s + \frac{1}{\beta_2 s + \dots + \frac{1}{s\alpha_{n+1}}}}} . \quad (29)$$

Данный вид разложения получается при указанных в (28) знаках сложения и вычитания в числителе и знаменателе. Полученные в (29) значения α_i соответствуют нормированным значениям индуктивностей в схеме фильтра (рисунок 8), а значения β_i соответствуют нормированным значениям емкостей в той же схеме. Входное сопротивление фильтра полученного таким образом фильтра будет называться Т - образным.

Если же в выражении (28) поставить в числителе минус, а в знаменателе плюс, то в результате разложения получится цепная дробь другого вида:

$$Z_{BX}(s) = \frac{1}{\beta_1 s + \frac{1}{\alpha_1 s + \frac{1}{\beta_2 s + \frac{1}{\alpha_2 s + \dots \frac{1}{s\beta_{n+1}}}}}} . \quad (30)$$

В этом выражении элементам β_i будут соответствовать нормированным значениям емкостей в схеме фильтра (рисунок 9), а элементам α_i будут соответствовать нормированным значениям индуктивностей. Входное сопротивление полученного таким образом фильтра будет называться П - образным.

После денормирования нормированных значений элементов схемы полученной по выражению (28) получается схемы фильтра в действительных параметрах. Далее нужно для полученной схемы фильтра рассчитать зависимость его ослабления от частоты в диапазоне частот от 0 до бесконечности. В полученном графике ослабления фильтра в ПП оно не должно превышать значения ΔA , а в ПЗ ослабление должно быть не меньше значения A_s .

3 Экспериментальное определение частотных характеристик ослабления ФНЧ Баттерворта и Чебышева

Целью данной лабораторной работы является синтезирование полиномиальных ФНЧ 3-го порядка Баттерворта и Чебышева согласованно нагруженных двусторонне и определение частотных характеристик ослабления полученных фильтров. При решении указанной задачи используется готовая схема реактивного фильтра нижних частот 3 порядка, которая двусторонне нагружена сопротивлениями $R_{\Gamma} = R_{\text{Н}}$ (рисунок 10).

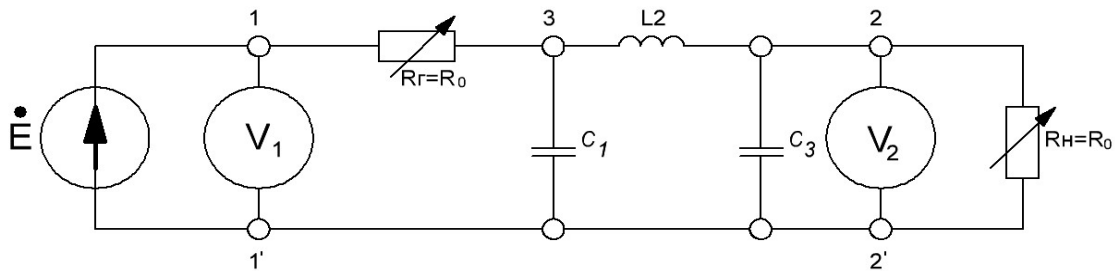


Рисунок 10 - Схема ФНЧ 3-го порядка нагруженного согласованно двусторонне

Известны значения реактивных элементов схемы фильтра L_2 , C_1 и C_3 , а также допустимая неравномерность ослабления фильтра в ПП, равная 3 дБ.

Требуется подобрать значения сопротивлений генератора и нагрузки такими, чтобы заданная схема фильтра соответствовала бы ФНЧ Баттерворта или Чебышева, имеющей заданные значения элементов L_2 , C_1 и C_3 и значение допустимой неравномерности ослабления фильтра в ПП, равное 3 дБ.

Для синтеза схемы ФНЧ Баттерворта заданного порядка и допустимой неравномерности в ПП используем таблицу 2, из которой выбираем для заданных n и ΔA значения нормированных элементов схемы нормализованного фильтра Баттерворта 3-го порядка:

$$c_1 = c_3 = 1.0, \quad l_2 = 2.0. \quad (31)$$

Запишем выражения действительных значений элементов L_2 и $C_1 = C_3$ ФНЧ через найденные нормированные значения этих же элементов с помощью формул (26, 27):

$$L_2 = k_l \cdot l_2 = \frac{R_0}{2\pi f_0} \cdot l_2, \quad C_1 = k_c \cdot c_l = \frac{1}{2\pi f_0 R_0} \cdot c_l. \quad (32)$$

Из (32) запишем выражения сопротивления R_0 , через действительные и нормированные значения элементов L_2 и C_1 :

$$R_0 = \frac{2\pi f_0}{l_2} L_2, \quad R_0 = \frac{c_1}{2\pi f_0} \cdot \frac{1}{C_1}. \quad (33)$$

Перемножив между собой два выражения сопротивления R_0 , полученные в (33), и преобразовав полученный результат, получим выражение сопротивления R_0 через нормированные и действительные значения элементов L_2 и $C_1 = C_3$ синтезируемого фильтра:

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_2 c_1}{l_2 C_1}}. \quad (34)$$

Аналогичным образом из формул (32) можно получить два выражения для частоты f_0 :

$$f_0 = \frac{R_0 \cdot l_2}{2\pi L_2}, \quad f_0 = \frac{c_1}{2\pi R_0 C_1}. \quad (35)$$

Перемножив между собой эти выражения частоты f_0 , извлекаем корень из полученного выражения. Таким образом, получим формулу для расчета граничной частоты f_0 полосы пропускания ФНЧ:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_1 l_2}{C_1 L_2}}. \quad (36)$$

Полученное значение f_0 называется частотой среза, поскольку на этой частоте, соответствующей верхней граничной частоте ПП ФНЧ, ослабление его должно быть равно 3 дБ (это значение было задано условиями задания на синтез ФНЧ). Характеристики ослабления всех ФНЧ Баттерворта разных порядков

должны проходить через точку с координатами: частота f_0 -ослабление ΔA . Зная граничную частоту ПП f_0 можно экспериментально определить характеристику ослабления всего фильтра для разных диапазонов частоты: ПП - при частотах от 0 до значения f_0 и ПЗ - при частотах от f_0 до значения, равного ∞ . У фильтров Баттерворта нет четкого разделения ПП и ПЗ.

При снятии частотной зависимости рабочего ослабления A_p ФНЧ необходимо учитывать не только ослабление самого фильтра, но и учитывать несогласованности: внутреннего сопротивления генератора входного напряжения и входного сопротивления фильтра, а также выходного сопротивления фильтра и сопротивления нагрузки.

Для определения рабочего ослабления применяется Z- метод. При его использовании, имеющийся генератор с произвольным внутренним сопротивлением R_{Γ} должен быть преобразован в генератор с постоянным внутренним сопротивлением, равным сопротивлению нагрузки фильтра: $R_{\Gamma} = R_n$. При использовании такого генератора фильтр будет нагружен согласовано двусторонне: на входе - $R_{\Gamma} = R_0$ и на выходе - $R_n = R_0$.

Сопротивления генератора и нагрузки выбираются равными друг другу и имеющими значение нормирующего сопротивления R_0 :

$$R_n = R_{\Gamma} = R_0 . \quad (37)$$

При заданной неравномерности ослабления фильтра в ПП и известном порядке фильтра нормированные значения элементов фильтра Баттерворта могут быть определены с помощью таблицы 2. Далее с помощью формул (34) и (36) вычисляются значения R_0 и f_0 , а затем составляется схема определения рабочего ослабления исследуемого фильтра Z- методом (рисунок 11).

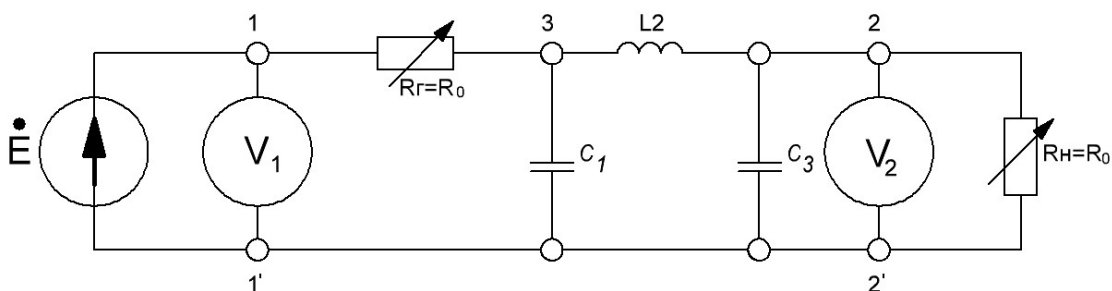


Рисунок 11 - Схема определения рабочего ослабления ФНЧ Z - методом

Рабочее ослабление A_p фильтра при использовании Z - метода рассчитывается по формуле:

$$\begin{aligned}
 A_p &= 20 \lg \frac{U_1}{2U_2} \sqrt{\frac{R_H}{R_\Gamma}} = 20 \lg \frac{U_1}{0.775} - 20 \lg \frac{U_2}{0.775} - 20 \lg 2 + 10 \lg \frac{R_H}{R_\Gamma} = \\
 &= p_1 - p_2 - 6 + \Delta,
 \end{aligned}
 \tag{38}$$

где U_1 , U_2 – входное и выходное напряжения, измеряемые вольтметрами V_1 и V_2 ,

p_1 , p_2 – уровни измеряемых напряжений U_1 , U_2 (в вольтах),

Δ - дополнительное ослабление, зависящее только от соотношения величин R_Γ и R_H . В исследуемой схеме $R_\Gamma = R_H$ (следовательно, $\Delta = 0$).

В качестве базового уровня, равного нулю, принимается напряжение 0.775 В, обеспечивающее в нагрузке 600 Ом мощность 1 мВт. Если напряжение больше 0.775В, то уровень напряжения положительный, если меньше, то – отрицательный.

При измерениях удобно устанавливать на входе схемы напряжение, равное $U_1 = 0.775$ В, тогда $p_1 = 0$. Если при этом соблюдается равенство $R_\Gamma = R_H$, то рабочее ослабление будет вычисляться по формуле:

$$A_p = - p_2 - 6. \quad (39)$$

Для упрощения процедуры измерения рабочего ослабления, на входе схемы устанавливают напряжение, равное $U_1 = 1.55 \text{ В}$, при этом $p_1 = 6 \text{ дБ}$. В этом случае рабочее ослабление фильтра отсчитывается непосредственно по шкале вольтметра, имеющего шкалу в децибелах:

$$A_p = - p_2. \quad (40)$$

Следует отметить, что ослабление A_p будет равно отрицательному значению уровня p_2 .

Итак, на входе генератора с помощью вольтметра V_1 устанавливается напряжение 1.55 В и при различных частотах производится измерение уровня выходного напряжения U_2 . Значение входного напряжения U_1 при этом поддерживается постоянным при каждой частоте.

Для синтеза схемы **ФНЧ Чебышева** заданного порядка и допустимой неравномерности ослабления фильтра в ПП используется таблица 3, из которой для заданных n и ΔA выбираются значения нормированных элементы схемы нормализованного фильтра Чебышева 3-его порядка:

$$c_1 = c_3 = 1.596, \quad l_2 = 1.097. \quad (41)$$

Схема ФНЧ Чебышева 3 порядка будет такой же, как и схема ФНЧ Баттерворта такого же порядка. Отличие в данном случае будет заключаться только в значениях нормированных элементов, а соответственно в значениях сопротивления R_0 и частоты среза f_0 .

Зная нормированные и действительные значения элементов схемы ФНЧ Чебышева по формуле (33) можно определить значение сопротивления R_0 , при ис-

пользовании которого схема исследования заданного фильтра (рисунок 11) превращается в схему исследования ФНЧ Чебышева 3 порядка. По формуле (36) можно рассчитать частоту среза f_0 полученного фильтра Чебышева, а затем снять экспериментально характеристику ослабления фильтра. У фильтра Чебышева частота среза f_0 и верхняя граничная частота f_1 его полосы пропускания совпадают по значению. Таким образом, установив в исследуемой схеме сопротивления $R_{\Gamma} = R_{\Pi}$ равные новому найденному значению R_0 , получаем схему исследования ФНЧ Чебышева 3 порядка.

Все расчеты в данном случае выполняются таким же образом, каким они проводились при синтезе ФНЧ Баттерворта.

Расчет собственного ослабления ФНЧ Чебышева проводится по формуле (21), а рабочее ослабление рассчитывается по формуле (40), как и при исследовании ФНЧ Баттерворта.

4 Подготовка и порядок выполнения лабораторной работы

При подготовке к выполнению лабораторной работы студенту необходимо:

- ознакомиться с описанием данной лабораторной работы, уяснить цель работы,
- изучить основные теоретические положения, приведенные в описании лабораторной работы,
- ответить на контрольные вопросы для допуска к выполнению и защите лабораторной работы, приведенные в конце описания,
- ознакомиться со схемой проведения исследования, используемыми приборами и порядком выполнения лабораторной работы.

Для выполнения лабораторной работы на универсальном лабораторном стенде учебной лабораторной установки ТЭЦ необходимо собрать схему синтезируемого ФНЧ 3-его порядка (рисунок 12):

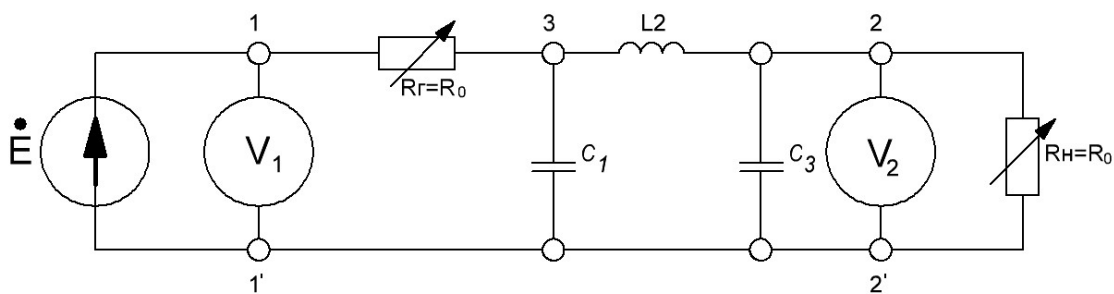


Рисунок 12 - Схема ФНЧ 3-его порядка

К входным зажимам 1-1' цепи подключается генератор синусоидального напряжения E и вольтметр V_1 , а к выходным зажимам 2 - 2' подключается магазин сопротивлений с величиной сопротивления R_0 , соответствующего сопротивлению нагрузки R_H , и вольтметр V_2 .

К зажимам 1-3 подключается магазин сопротивлений, на котором устанавливается сопротивление R_0 , эквивалентное внутреннему сопротивлению идеального генератора, вырабатывающему э.д.с. $E = U_1$.

При исследовании ФНЧ Баттерворта сопротивление R_0 , при котором исследуемая цепь (рисунок 12) обладает свойствами ФНЧ Баттерворта, рассчитывается по формуле (34):

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_2 c_1}{l_2 C_1}}.$$

где $C_1 = C_3$, L_2 - истинные (номинальные) значения элементов схемы фильтра,

c_1, l_2 - нормированные значения элементов фильтра, выбираемые для заданного порядка фильтра ($n = 3$) и заданной неравномерности $\Delta A = 3$ дБ (таблица 2).

Далее по формуле (36) определяем частоту среза f_0 исследуемого фильтра:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c1l_2}{C_1L_2}}.$$

До начала проведения эксперимента по определению частотной зависимости рабочего ослабления фильтра Баттерворта 3-его порядка с помощью Z-метода составляем таблицу 5, в которую будут заноситься результаты эксперимента.

Таблица 5 - Результаты экспериментального исследования рабочего ослабления ФНЧ Баттерворта

ФНЧ Баттерворта, $U_1 = 1.55 \text{ В}$		
f	f , кГц	A_p , дБ
$0.2 f_0$		
$0.4 f_0$		
$0.6 f_0$		

Продолжение таблицы 5

$0.8 f_0$		
f_0		
$1.5 f_0$		
$2.0 f_0$		
$3.0 f_0$		

Зная значения частоты среза f_0 , рассчитываем конкретные значения частот f , при которых будет проходить исследование, и заносим их в таблицу 5. Для упрощения процедуры измерения рабочего ослабления устанавливаем на входе фильтра напряжение U_1 , равное 1.55В, что соответствует уровню входного сигнала - $p_1 = 6\text{дБ}$. В этом случае рабочее ослабление фильтра определяется по формуле (40) и отсчитывается непосредственно по соответствующей шкале вольтметра, имеющего шкалу в децибелах.

Итак, на выходе генератора с помощью милливольтметра V_1 устанавливается напряжение 1.55В и при различных значениях частоты, указанных в таблице 5, производятся измерения уровня выходного напряжения U_2 . При

этом значение входного напряжения U_1 поддерживается постоянным на всех частотах. Измеренные значения уровня выходного напряжения, записанные с обратным знаком, представляют собой рабочее ослабление ФНЧ Баттерворта и они заносятся в таблицу 5.

По этим данным строится график рабочего ослабления фильтра нижних частот Баттерворта.

При исследовании ФНЧ Чебышева 3-его порядка после сбора на универсальном лабораторном стенде схемы ФНЧ 3-его порядка к выходным зажимам 2 - 2' и зажимам 1–3 подключаются магазины сопротивлений с величиной сопротивления R_0 , рассчитанного по нормированным параметрам (41) фильтра Чебышева. Далее рассчитывается частота среза f_0 по нормированным параметрам (41) фильтра Чебышева, и на ее основе заполняется левый столбец таблицы 6, а остальные столбцы заполняются по результатам конкретных исследований рабочего ослабления фильтра.

Таблица 6 - Результаты экспериментального исследования рабочего ослабления ФНЧ Чебышева

ФНЧ Чебышева, $U_1 = 1.55 \text{ В}$		
f	f , кГц	A_p , дБ
$0.2 f_0$		
$0.4 f_0$		
$0.5 f_0$		
$0.6 f_0$		
$0.867 f_0$		
$1 f_0$		
$1.5 f_0$		
$2.0 f_0$		
$3.0 f_0$		

Зная значение частоты f_0 , заполняется левый столбец таблицы 6.

Далее на выходе генератора с помощью милливольтметра V_1 устанавливается напряжение 1.55В и при различных значениях частоты, указанных в таблице 6, проводятся измерения уровня выходного напряжения U_2 . Значение входного напряжения U_1 поддерживается постоянным на всех частотах. Измеренные значения уровня выходного напряжения, записанные с обратным знаком, представляют собой рабочее ослабление ФНЧ Чебышева, которые заносятся в соответствующий столбец таблицы 6.

По этим данным строится график рабочего ослабления фильтра нижних частот Чебышева в зависимости от частоты f .

4 Экспериментальное определение рабочего ослабления ФНЧ и анализ получаемых результатов

Рассмотрим конкретный пример синтеза ФНЧ Баттерворта и Чебышева по рабочим параметрам и определения рабочего ослабления этих фильтров.

Будем считать, что задана П-образная схема ФНЧ 3-его порядка, имеющая следующие параметры:

$$C_1 = C_3 = 2336 \text{ пФ}, \quad L_2 = 1.31 \text{ мГн}.$$

Требуется составить схему исследования этого ФНЧ 3-его порядка, который обладал бы частотными характеристиками фильтра Баттерворта и ослабление которого на верхней граничной частоте ПП, было бы равно 3 дБ.

Зная порядок фильтра $n=3$ и допустимую неравномерность ослабления в ПП, из таблицы 2 выберем значения нормированных параметров нормализованного ФНЧ Баттерворта:

$$c_1 = c_3 = 1.0, \quad l_2 = 2.0. \quad (42)$$

По (34) определим значение сопротивления R_0 , которое должно быть установлено на входе и выходе фильтра, чтобы заданный ФНЧ был нагружен на входе и выходе согласовано:

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_2 c_1}{l_2 C_1}} = \sqrt{\frac{1.31 \cdot 10^{-3} \cdot 1}{2 \cdot 2336 \cdot 10^{-12}}} = 529.5 \text{ Ом} . \quad (43)$$

Далее по (36) определим значение частоты среза f_0 :

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_1 l_2}{C_1 L_2}} = \frac{1}{6.28} \sqrt{\frac{2 \cdot 1}{2336 \cdot 10^{-12} \cdot 1.31 \cdot 10^{-3}}} = 128.73 \text{ кГц} . \quad (44)$$

После этого заполняем левый столбец таблицы 5 и получаем таблицу 7, в которую заносятся результаты конкретного исследования рабочего ослабления ФНЧ 3-его порядка Баттерворта.

Таблица 7 - Результаты конкретного исследования рабочего ослабления ФНЧ 3-его порядка Баттерворта

ФНЧ Баттерворта, $U_1 = 1.55 \text{ В}$		
f	f , кГц	A_p , дБ
$0.2 f_0$	0.761	- 0.8
$0.4 f_0$	1.522	- 0.5
$0.6 f_0$	2.284	0.3
$0.8 f_0$	3.045	0.8
f_0	3.806	2.5
$1.5 f_0$	5.709	11.0
$2.0 f_0$	7.612	18.5
$3.0 f_0$	11.418	28.0

Далее в схеме ФНЧ 3-его порядка (рисунок 12) устанавливаем на входном и выходном магазинах сопротивлений величину 529.5 Ом и начинаем эксперимент. На генераторе устанавливаем первую частоту 25.75 кГц и выходное напряжение $U_1 = 1.55 \text{ В}$. По шкале вольтметра V_2 , проградуированной в децибелах, определяем уровень выходного напряжения и соответствующее ему

ослабление ФНЧ. Полученные значения ослабления заносим в соответствующий столбец таблицы 7. Эксперимент проводим для всех значений частоты, указанных в таблице 7. По полученным значениям частоты и ослабления строим график зависимости рабочего ослабления ФНЧ 3-его порядка Баттерворта от частоты (рисунок 13).

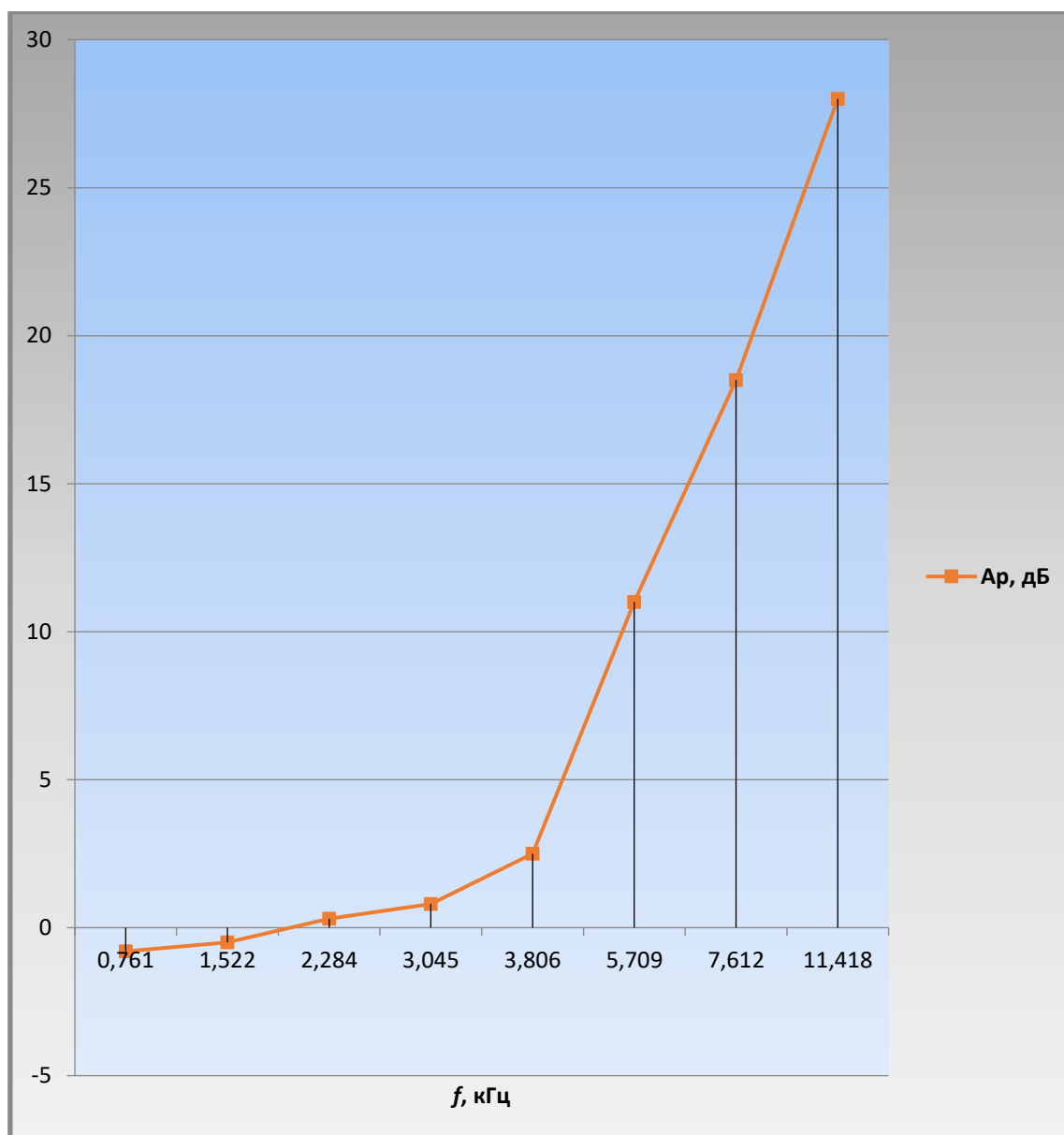


Рисунок 13 - График рабочего ослабления ФНЧ Баттерворта 3-его порядка

Аналогичные исследования проводим для ФНЧ 3-его порядка Чебышева. Все исходные данные задания остаются прежними. Значения нормированных параметров фильтра Чебышева 3-его порядка выбираем из таблицы 3:

$$c_1 = c_3 = 3.349, \quad l_2 = 0.712.$$

Значения сопротивлений нагрузок на входе и выходе фильтра рассчитывалось по той же формуле, что и для фильтра Баттерворта:

$$R_0 = \sqrt{\frac{L_2 c_1}{l_2 C_1}} = \sqrt{\frac{1.31 \cdot 10^{-3} \cdot 3.349}{0.712 \cdot 2336 \cdot 10^{-12}}} = 1624 \text{ Ом.}$$

Частота среза для фильтра Чебышева составила следующее значение:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{c_1 l_2}{C_1 L_2}} = \frac{1}{6.28} \sqrt{\frac{3.349 \cdot 0.712}{2336 \cdot 10^{-12} \cdot 1.31 \cdot 10^{-3}}} = 140.6 \text{ кГц.}$$

Зная значения частоты среза, заполняем два столбца таблицы 6 и получаем таблицу 8, куда заносим результаты проводимого далее исследования фильтра Чебышева.

Таблица 8 - Результаты конкретного исследования рабочего ослабления ФНЧ 3-его порядка Чебышева

ФНЧ Чебышева, $U_1 = 1.55 \text{ В}$		
f	f , кГц	A_p , дБ
$0.2 f_0$	0.831	0.7
$0.4 f_0$	1.662	2.4
$0.5 f_0$	2.078	2.5
$0.6 f_0$	2.494	2.2
$0.867 f_0$	3.603	0.7
f_0	4.156	3.7
$1.5 f_0$	6.234	19.5
$2.0 f_0$	8.312	28.0
$3.0 f_0$	12.468	40.0

Далее в схеме ФНЧ 3-его порядка (рисунок 12) устанавливаем на входном и выходном магазинах сопротивлений величину 1624 Ом и начинаем эксперимент. На генераторе устанавливаем первую частоту 28.1 кГц и выходное напряжение $U_1 = 1.55$ В. По шкале вольтметра V_2 , проградуированной в децибелах, определяем уровень выходного напряжения и соответствующее ему ослабление ФНЧ. Полученные значения ослабления заносим в правый столбец таблицы 8. Эксперимент проводим для всех значений частоты, указанных в таблице 8. По полученным значениям частоты и ослабления строим график зависимости рабочего ослабления ФНЧ 3-его порядка Чебышева от частоты (рисунок 14).

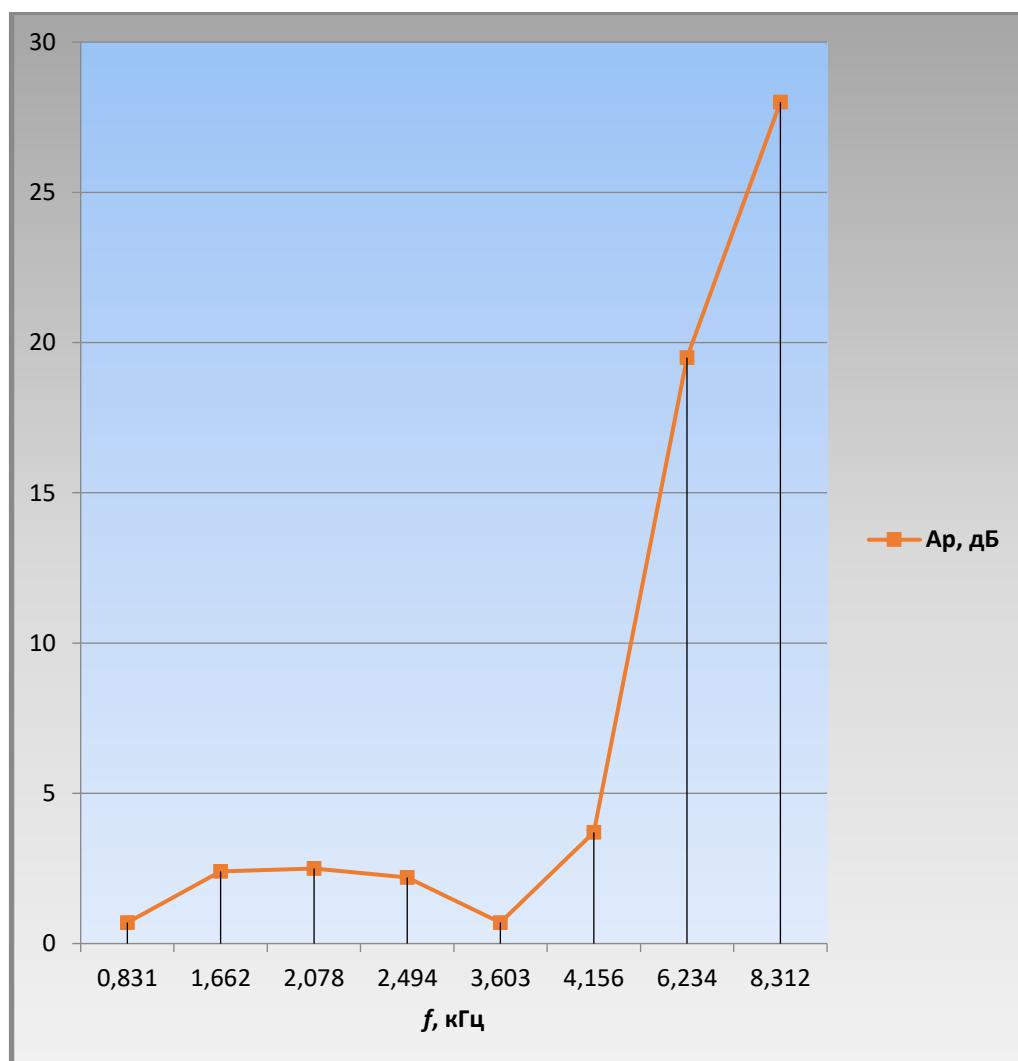


Рисунок 14 - График рабочего ослабления ФНЧ 3-его порядка Чебышева

Для сравнения между собой характеристик рабочего ослабления двух фильтров на рисунке 15 представлены вместе характеристики рабочего ослабления ФНЧ 3-его порядка Баттерворта и Чебышева.

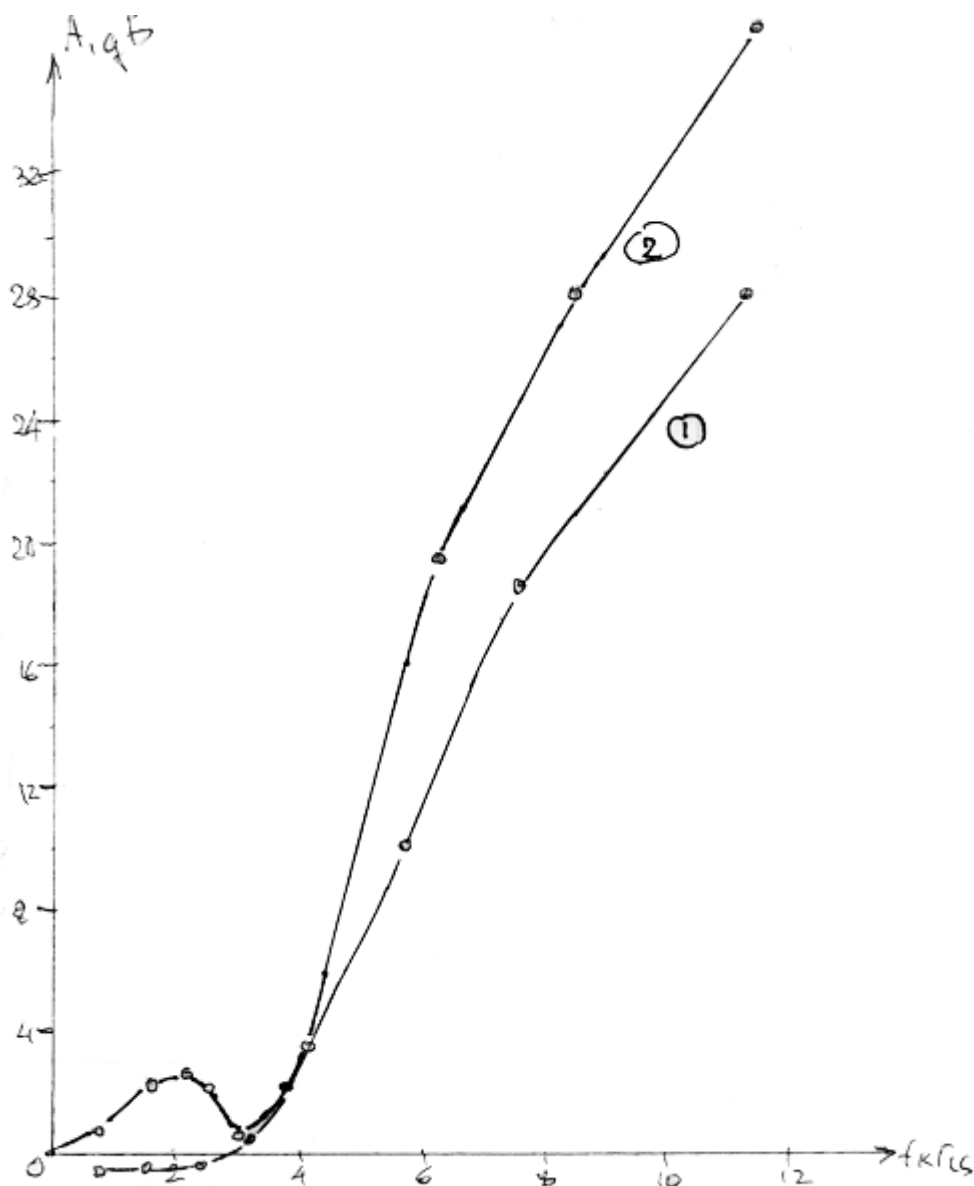


Рисунок 15 - Характеристики рабочего ослабления ФНЧ 3-его порядка Баттерворта и Чебышева

В результате проведенных исследований было экспериментально подтверждено, что в цепи с распределенными параметрами при подаче на ее вход синусоидального напряжения возникает падающая, а при определенных условиях и отраженная волна напряжения.

В зависимости от значения нагрузки на выходе линии в ней наблюдаются следующие режимы работы: режим холостого хода, режим короткого замыкания, режим согласованной нагрузки. Были рассмотрены и исследованы все эти режимы работы в искусственной длинной линии с малыми потерями.

Подробно исследован режим стоячей волны. Визуально подтверждено образование стоячих волн в линии при холостом ходе и коротком замыкании, когда происходило полное отражение падающей волны от конца линии.

Экспериментально подтверждены теоретически установленные законы распределения напряжения вдоль такой линии в режиме стоячей волны при холостом ходе и коротком замыкании. Сняты графики распределения напряжения вдоль линии в этих режимах.

Исследован режим бегущей волны. Подтверждено отсутствие в линии отраженной волны при согласованной нагрузке. Показано также, что в этом режиме волновое сопротивление линии становится чисто активным, так как отсутствует сдвиг фаз между напряжением и током по всей длине линии.

Неполное совпадение при различных режимах работы линии ее амплитудно-частотных характеристик, рассчитанных теоретически и полученных экспериментально, объясняется наличием определенных потерь в линии и погрешностью показаний отдельных измерительных приборов, имеющих определенный класс точности.

5 Содержание отчета по лабораторной работе

В отчете по итогам выполнения лабораторной работы должны быть приведены:

- наименование и цель лабораторной работы,
- структурные схемы электрических фильтров, предназначенные для проведения исследования, с указанием всех их элементов, включая измерительные приборы и источник питания,

- математический аппарат, использованный при подготовке к проведению исследования и обработке полученных результатов,
- результаты измерений, полученные в процессе экспериментов, а также итоговые результаты обработки полученных измерений, оформленные численно и графические,
- выводы о результатах проведенных исследований.

6 Контрольные вопросы для допуска к выполнению лабораторной работы

1. Что называется электрическим фильтром?
2. На какие области делится весь частотный диапазон фильтров?
3. Какие фильтры называются полиномиальными?
4. Как классифицируются фильтры по полосе пропускания?
5. Что такое полоса пропускания фильтра?
6. Что такое полоса задерживания фильтра?
7. Сколько полос пропускания может иметь полиномиальный фильтр?
8. Сколько полос задерживания может иметь полиномиальный фильтр?
9. Какие требования предъявляются к фильтрам нижних частот?
10. Какой вид имеет характеристика ослабления фильтра нижних частот (ФНЧ) Баттерворта?
11. Какой вид имеет характеристика ослабления ФНЧ Чебышева?
12. Что такое порядок полиномиального фильтра?
13. Что такое реактивный фильтр?
14. Как связано количество элементов в схеме полиномиального реактивного фильтра с его порядком?
15. Что такое синтез фильтра?
16. Что такое рабочие параметры фильтра и сколько их?

17. Что такое коэффициент неравномерности ослабления в полосе пропускания фильтра?
18. Какой величины должен быть коэффициент неравномерности ослабления в полосе пропускания?
19. Как меняется график ослабления ФНЧ Баттерворта при изменении порядка фильтра?
20. Как изменяется график ослабления ФНЧ Чебышева при изменении порядка фильтра?
21. Что такое ослабление?
22. В каких единицах измеряется ослабление?
23. Что такое передаточная функция фильтра?
24. Какой ослабление должно быть в полосе пропускания фильтра и почему?
25. Какое ослабление должно быть в полосе задерживания и почему?
26. Чем отличаются пассивные фильтры от активных фильтров?
27. Чем отличаются реальные фильтры от идеальных фильтров?

8 Контрольные вопросы для защиты лабораторной работы

1. Что такое синтез электрического фильтра?
2. Какими методами можно синтезировать фильтр?
3. Что такое нормирование параметров фильтра?
4. Что такое денормирование элементов фильтра?
5. Что такое фильтр-прототип?
6. Как получить схему фильтра верхних частот зная схему фильтра-прототипа?
7. Запишите выражение коэффициента распространения для линии с потерями и без потерь.

8. Запишите телеграфные уравнения линии для определения тока и напряжения в линии в точке, отстоящей на определенном расстоянии от конца линии.

9. С какой скоростью распространяется электромагнитная волна вдоль линии?

10. Запишите формулу для расчета длины волны в линии.

11. Запишите формулу для расчета фазовой скорости волны в линии.

12. Дайте определение фазовой скорости волны в линии.

13. Как определить частоту электромагнитного колебания, при которой в искусственной длинной линии уложится целая длина волны.

14. Нарисуйте и объясните физически график распределения напряжения (тока) вдоль линии, разомкнутой на конце.

15. Нарисуйте и объясните физически график распределения напряжения (тока) вдоль линии, замкнутой на конце.

16. Нарисуйте и объясните физически график распределения напряжения вдоль линии с согласованной нагрузкой.

17. Нарисуйте и объясните физически график распределения напряжения вдоль линии при не согласованной нагрузке.

18. В каком режиме по линии передается активная мощность?

Список использованных источников

1. Шебес М.Р. Задания на курсовую работу и методические указания к ним по теме: «Расчет электрических фильтров». – М.: ООО «Инсвязьиздат», 2006. – 52с.

2. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей: Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия-Телеком, 2013

3. Витков М.Г., Смирнов Н.И. Основы теории цепей. Лабораторный практикум: Учебное пособие для вузов - М.: Радио и связь, 2001

4. Учебная лабораторная установка «Теория линейных электрических цепей» СПб государственного университета телекоммуникаций, 2012

5. Бакалов В.П., Журавлева О.Б., Крук Б.И. Основы анализа цепей: Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия-Телеком, Радио и связь, 2007.

6. Шебес М.Р. Каблукова М.В. Задачник по теории линейных электрических цепей. Учебное пособие для электротехнических, радиотехнических специальностей вузов. – 4-е изд., переработанное и дополненное - М.: Высшая школа, 1990. – 544с.: ил.