

31/2/2

Одобрено кафедрой  
«Железнодорожная  
автоматика, телемеханика  
и связь»

Утверждено деканом  
факультета  
«Управление процессами  
перевозок»

**ТЕОРИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ  
ЦЕПЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ  
АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ**

Рабочая программа  
и задание на контрольные работы № 1 и 2  
с методическими указаниями  
для студентов IV курса

специальности  
**190402 АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ (АТС)**

Разработана на основании примерной учебной программы данной дисциплины, составленной в соответствии с государственными требованиями к минимуму содержания и уровню подготовки по специальности 190402 — Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте.

Составители — д-р техн. наук, проф. Л.В. Панкратов  
канд. техн. наук, доц. Ю.Н. Панков

Рецензент — канд. техн. наук, доц. М.Л. Губенко

---

ТЕОРИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ  
И СВЯЗИ

Рабочая программа  
и задание на контрольные работы  
с методическими указаниями

Редактор *Г.В. Тимченко*  
Компьютерная верстка *Г.Д. Волкова*

---

Тип.зак.	Изд.зак. 240	Тираж 400 экз.
Подписано в печать 07.09.09	Гарнитура Newton	Формат 60 × 90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>
Усл.печ.л 2,25		

---

Издательский центр  
Информационно-методического управления РОАТ,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Участок оперативной печати  
Информационно-методического управления РОАТ,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

# РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

## 1. ЦЕЛЬ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Целью преподавания дисциплины является углубленное изучение теории линейных электрических цепей, включающей в себя методы решения задач анализа и синтеза электрических систем с сосредоточенными и распределенными параметрами. Уровень изучения предполагает активное использование понятий и методов теории линейных электрических цепей в процессе анализа режимов работы, оптимизации структуры и параметров элементов устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Сюда входят групповые, взаимовлияющие и индуктивно связанные линии, рельсовые цепи, фильтры, корректоры и другие элементы систем передачи информации и телеуправления.

Полученные знания найдут применение и дальнейшее развитие в таких специальных дисциплинах как «Многоканальная связь», «Автоматическая телефонная связь», «Линии железнодорожной автоматики, телемеханики и связи», «Автоматика и телемеханика на перегонах».

## 2. ТРЕБОВАНИЯ К УРОВНЮ ОСВОЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Изучив дисциплину, студент должен:

### 2.1. *Знать и уметь использовать:*

основные системы параметров, характеризующие связи между токами и напряжениями разветвленных цепей, и способы представления этих связей;

свойства функций сопротивления (проводимости), канонические схемы, основные приемы синтеза двухполюсных цепей по заданным частотным характеристикам;

схемы замещения и основные системы параметров четырехполюсных цепей;

свойства функций передачи и основные приемы синтеза четырехполюсных цепей;  
способы соединения четырехполюсников и правила определения свойств соединения;  
основные свойства волновых процессов в линиях автоматики, телемеханики и связи и характеризующие эти процессы параметры;  
частотные зависимости параметров рельсовых цепей и линий, практические способы улучшения условий передачи сигналов;  
влияние несогласованности сопротивлений на параметры цепей;  
схемы построения частотных фильтров и корректоров, основные соотношения, определяющие их параметры.

## 2.2. Владеть:

знаниями при эксплуатации, проектировании, разработке и усовершенствовании устройств железнодорожной автоматики, телемеханики и связи и, в частности, уметь выбирать системы параметров и определяющие их соотношения для анализа и синтеза цепи в каждом конкретном случае. При анализе заданной цепи определять ее общие свойства (теоретический вид частотных или временных зависимостей основных параметров);  
навыками экспериментального установления частотных параметров цепи и выявления причин несовпадения экспериментальных характеристик с теоретическими. При синтезе уметь составить схему, обеспечивающую заданные частотные зависимости параметров, выбирать метод расчета и необходимые расчетные соотношения, а также выполнять расчет на ЭВМ.

2.3. *Иметь представления* о направлениях развития теории цепей и связях ее с другими науками.

### 3. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

Вид учебной работы	Всего часов	Курс — IV
Общая трудоемкость дисциплины	200	—
Аудиторные занятия:	28	—
лекции	12	—
Лабораторный практикум	16	Зачет
Самостоятельная работа	142	—
Контрольные работы	30	№ 1, № 2
Вид итогового контроля	—	Экзамен Зачет

### 4. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

#### 4.1. Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Лекции, ч	Лабораторный практикум, ч
1	Линейная электрическая цепь как модель воздействия, реакции и характеристики цепей	0,5	2,0
2	Методы анализа и синтеза электрических цепей	0,5	2,0
3	Электрические цепи с распределенными параметрами	2,0	2,0
4	Характеристики цепей проводных линий автоматики, телемеханики и связи	2,0	2,0
5	Параметры передачи электрических цепей как четырехполюсников	2,0	2,0
6	Электрические цепи со специальными частотными и временными характеристиками, их анализ и синтез	2,0	2,0
7	Электрические фильтры LC, их характеристические параметры передачи	1,0	2,0
8	Активные RC- и цифровые фильтры	2,0	2,0

# СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

## *Введение*

Электрические цепи в устройствах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.

Особенности условий работы, критерии оценки и методы анализа и синтеза цепей, используемых для формирования, передачи, разделения и приема сигналов в системах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи.

Особенности энергетического режима работы цепей автоматики и связи.

Условия передачи в приемник наибольшей мощности.

## ***Раздел 1. ЛИНЕЙНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ КАК МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЯ, РЕАКЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕПЕЙ***

Линейная электрическая цепь как модель реальной цепи. Частотное, операторное и временное представление сигналов. Импульсные сигналы и их представление. Характеристики электрических цепей как реакции на воздействие определенного сигнала. Связь между частотными (операторными) и временными характеристиками. Электрические цепи при импульсных воздействиях. Параметрические электрические цепи. Переменная емкость. Переменная индуктивность. Принципы построения параметрических усилителей и генераторов.

## ***Раздел 2. МЕТОДЫ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ***

Примеры разветвленных цепей в устройствах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Определение входных сопротивлений (проводимостей) и сопротивлений (проводимостей) передачи. Матрицы сопротивлений и проводимостей разветвленной цепи. Графы электрических цепей. Определение входных и передаточных функций по графу цепи. Электрическая цепь как многополюсник. Двухполюсники и четырехполюсники. Приемы анализа и синтеза двухполюсных цепей.

Канонические схемы пассивных двухполюсников. Свойства функций входных сопротивлений и проводимостей двухполюсников. Методы построения схемы двухполюсника по заданной функции входного сопротивления или проводимости.

Методы анализа и синтеза четырехполюсных цепей. Уравнение электрической цепи четырехполюсника. Схемы замещения четырехполюсников. Примеры четырехполюсных цепей в устройствах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Рельсовые цепи. Корректоры в трактах передачи сигналов управления. Уравнения передачи четырехполюсников. Графы четырехполюсников. Уравнения и параметры схем замещения обратимых четырехполюсников. Трансформатор как четырехполюсник, его схема замещения. Схемы замещения и параметры необратимых четырехполюсников.

Соединения четырехполюсников и определение параметров соединения по параметрам составляющих четырехполюсников. Цепочное соединение четырехполюсников при согласованных нагрузках. Собственные параметры передачи. Смешанные соединения четырехполюсников. Входное и приведенное сопротивление, сопротивление передачи четырехполюсника. Рабочие коэффициенты и функции передачи напряжения, тока и мощности четырехполюсника. Общие свойства функции передачи обратимого четырехполюсника. Приемы синтеза обратимых четырехполюсников.

Понятие звена в системах автоматического регулирования, управления и связи. Соединение звеньев (параллельное, последовательное и с обратной связью). Приемы синтеза необратимых цепей с операционными усилителями и интеграторами по заданным функциям передачи. Характеристика цепей с переменными параметрами.

### ***Раздел 3. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ***

Цепи линий железнодорожной автоматики, телемеханики и связи, рельсовые цепи как цепи с распределенными параметрами. Первичные параметры и уравнения однородной уединен-

ной электрической линии. Уравнения линии в установившемся режиме гармонического переменного тока. Волновые процессы в линии. Волновые параметры. Распределение напряжения и тока вдоль линии. Однородная уединенная линия как четырехполюсник. Измерение параметров линий и рельсовых цепей. Волновые матрицы однородной линии. Возбуждение линии распределенными источниками. Неоднородные линии. Волновые процессы в несимметричной двухпроводной линии. Несимметричные рельсовые цепи. Экранирование симметричной двухпроводной линии. Условия передачи при обрыве одного провода. Расчет контрольного режима рельсовой цепи. Линии индуктивной связи. Примеры использования, особенности расчета условий передачи.

#### ***Раздел 4. ХАРАКТЕРИСТИКИ ЦЕПЕЙ ПРОВОДНЫХ ЛИНИЙ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ***

Волновые параметры цепей воздушных и кабельных линий связи. Зависимость их от частоты тока и других факторов. Особенности частотных зависимостей параметров рельсовых цепей. Единицы ослабления и уровни сигналов. Искажения сигналов. Временные характеристики однородной линии связи. Рабочие параметры однородной линии связи. Использование направленных графов для определения рабочих параметров передачи. Рабочие характеристики неоднородных трактов.

#### ***Раздел 5. ПАРАМЕТРЫ ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ КАК ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ***

Распространение волновых характеристик линий на цепи с сосредоточенными параметрами. Собственные параметры передачи четырехполюсников. Рабочие параметры четырехполюсников и их выражение через собственные параметры передачи. Волновые матрицы передачи. Примеры использования параметров передачи для расчета условий передачи по неоднородным трактам цепей технологической железнодорожной связи, диспетчерской централизации и др.



## ***Раздел 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СО СПЕЦИАЛЬНЫМИ ЧАСТОТНЫМИ И ВРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ***

Устройства со специальными характеристиками. Задачи, решаемые при проектировании. Примеры цепей со специальными характеристиками в устройствах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи (фильтры, корректоры в приеме-передающей аппаратуре железнодорожной автоматики и связи).

Виды аппроксимации, применяемые при синтезе цепей. Способы реализации. Частотные зависимости сопротивлений и проводимостей двухполюсных цепей и методы их исследования.

Построение двухполюсников по заданной частотной характеристике сопротивления или проводимости. Схемы простейших фильтрующих и корректирующих  $RC$ - и  $LC$ -цепей и их характеристики. Активные  $RC$ -фильтры, способы их построения. Фильтры с одно- и двухпетлевой обратной связью. Фильтры с частотнозависимыми отрицательными сопротивлениями. Корректоры амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик. Корректоры группового времени задержания. Цепи задержки и формирования коротких импульсов.

## ***Раздел 7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ LC-ФИЛЬТРЫ***

Цепочечные фильтры, условия пропускания и задерживания. Фильтры нижних и верхних частот типа  $k$ . Полосовые фильтры типа  $k$ . Преобразование масштаба частот. Влияние потерь и несогласованности нагрузок на характеристики фильтров. Звенья фильтров типа  $m$ . Частотные фильтры в виде связанных контуров. Мостовые фильтры. Чувствительность фильтров к изменениям параметров элементов. Электромеханические фильтры.

## ***Раздел 8. ЦИФРОВЫЕ ФИЛЬТРЫ***

Перспективы применения цифровых фильтров в устройствах железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. Дискретный фильтр как линейная модель цифрового фильтра. Построение схемы цифрового фильтра по заданной импульс-

ной характеристике. Нерекурсивные и рекурсивные фильтры. Канонические схемы цифровых фильтров. Расчет элементов схем по заданным частотным характеристикам. Аппаратная и программная реализация цифровых фильтров.

### 4.3 ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Номер раздела дисциплины	Название и краткое содержание работы
1	Исследование частотных зависимостей сопротивлений двухполюсников
2	Определение волновых параметров электрических цепей с распределенными параметрами методом короткого замыкания и холостого хода
3	Определение характеристических параметров четырехполюсников методом короткого замыкания и холостого хода
4	Исследование схем электрических фильтров
5	Исследование амплитудных корректоров
6	Исследование параметрических цепей
7	Исследование фильтров типа $k$ и $m$
8	Исследование цифровых фильтров

### 4.4. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Не предусмотрено

### 5. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

Изучение рекомендуемой литературы по курсу теории линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи, выполнение контрольных работ

## **6. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ**

### **6.1. РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА**

#### *Основная*

1. Попов В. П. Основы теории цепей. – М.: Высшая школа, 2000.

2. Волков Е. А. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи: Учеб./ Е.А. Волков, Э.И. Санковский, Д.Ю. Сидорович; Под общ. ред. В.А.Кудряшова. – М.: Маршрут, 2005.

#### *Дополнительная*

3. Каллер М. Я., Соболев Ю. В., Богданов А. Г. Теория линейных электрических цепей железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. – М.: Транспорт, 1987.

4. Бессонов Л. А. Линейные электрические цепи. – М.: Высшая школа, 1983.

5. Карташев В. Г. Основы теории дискретных сигналов и цифровых фильтров. – М.: Высшая школа, 1982.

6. Хьюсман Л. П., Аллен Ф. Е. Введение в теорию и расчет активных фильтров. – М.: Радио и связь, 1984.

7. Белецкий А. Ф. Теория линейных электрических цепей. – М.: Радио и связь, 1986.

8. Лосев А. К. Теория линейных электрических цепей. – М.: Высшая школа, 1987.

### **6.2. СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Обучающие и контролируемые компьютерные программы.

## **7. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

Специализированная лаборатория, компьютерный класс.

## 8. КРАТКИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ ПО КУРСУ ДИСЦИПЛИНЫ

Программа дисциплины отличается большим объемом теоретического материала, который студент должен изучить самостоятельно. Перед выполнением контрольных работ следует особо тщательно проработать соответствующие разделы курса. В течение учебного года и во время установочной сессии предусматриваются консультационные занятия.

### ЗАДАНИЕ НА КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ

Задание составлено в соответствии с действующей учебной программой. Контрольная работа № 1 включает три, а контрольная работа №2 – две задачи. Вариант исходных данных студент выбирает по двум последним цифрам своего учебного шифра (номера студенческого билета).

К выполнению контрольных работ следует приступать после изучения теоретического курса в целом, либо по мере изучения разделов, рекомендованных в методических указаниях к выполнению каждой задачи.

Для решения задач рекомендуется применять математическую систему *MathCAD*, что существенно сократит время, требуемое для расчетов, и облегчит построение графиков. Преимуществом системы *MathCAD* является ее доступность и простота реализации вычислений. Система содержит средства численных и символьных вычислений, хорошо сбалансированных со средствами графической визуализации результатов, современным интерфейсом пользователя, мощной справочной системой, обширными пакетами расширения и средствами для работы в Интернет.

Одновременно следует представить контрольный расчет. Это означает, что один из серии однотипных расчетов в каждой задаче выполнен вручную. Проведение контрольного расчета повышает достоверность результатов вычислений, оно позволяет

убедиться в правильности составления программы, отсутствии ошибок при введении исходных данных.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 1

### Задача 1

Рассчитать и построить амплитудно-частотные спектры для четырех периодических последовательностей прямоугольных импульсов. Исходные данные к задаче приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Длительность, мкс	Последняя цифра учебного шифра									
	1,5	3,5	2,2	1,2	4,6	4,2	3,6	1,6	2,8	3,2
	3,5	5,0	1,6	2,6	2,1	3,0	2,5	2,4	5,4	4,5
Амплитуда, В	8,5	6,5	7,0	3,5	5,0	4,5	2,5	5,5	9,0	7,2
Скважность	Предпоследняя цифра учебного шифра									
	12	6	10	8	12	13	12	10	9	7
	8	9	6	12	4	8	6	5	6	10

### *Методические указания*

Для решения задачи необходимо проработать материал, изложенный в [1, §1.3; 3, § 10,4 – 10,6; 4, гл. 7].

Периодическая последовательность прямоугольных импульсов показана на рис. 1. Она характеризуется амплитудой импульсов  $U_m$ , длительностью  $t_u$ , периодом следования  $T$ . Скважность импульсов равна  $S=T/t_u$ .

Любой периодический сигнал может быть разложен в тригонометрический ряд Фурье, представляющий собой сумму синусоидальных и косинусоидальных составляющих. Сигнал, показанный на рисунке 1, обладает осевой симметрией. Такой сигнал содержит постоянную составляющую  $U_0$  и бесконечное число косинусоидальных составляющих, являющихся гармониками основной частоты  $f_j=1/T$ .

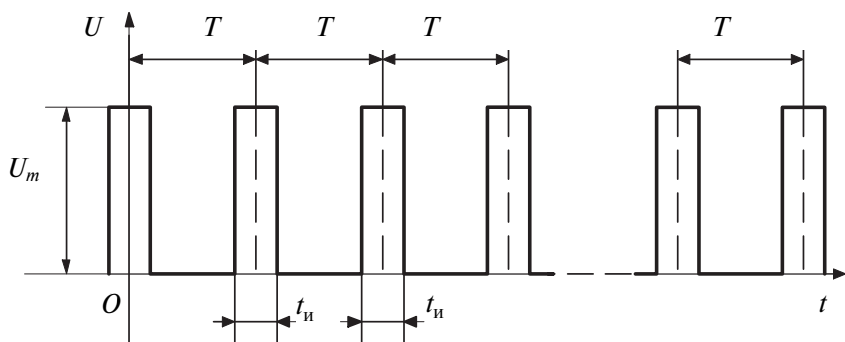


Рис. 1. Последовательность прямоугольных импульсов

Значения постоянной составляющей и амплитуд гармоник сигнала определяются соотношениями:

$$U_0 = \frac{U_m}{S}, \quad U_{mk} = \frac{2U_m}{k\pi} \left| \sin \frac{k\pi}{S} \right|,$$

где  $k$  – номер гармоники.

Совокупность значений амплитуд гармоник и постоянной составляющей образует амплитудно-частотный спектр, его графическое изображение показано на рис. 2. По мере увеличения номера гармоники  $k$  амплитуды гармоник изменяются. Они принимают нулевое значение на гармониках, кратных скважности последовательности импульсов.

Требуется рассчитать и построить по исходным данным четыре спектра: по два для каждого из двух заданных значений скважности  $S$ .

Для каждого спектра необходимо:

- определить номера гармоник, амплитуды которых равны нулю;
- рассчитать амплитуды всех гармоник в диапазоне частот от постоянного тока до второй нулевой гармоники, включая постоянную составляющую последовательности импульсов;

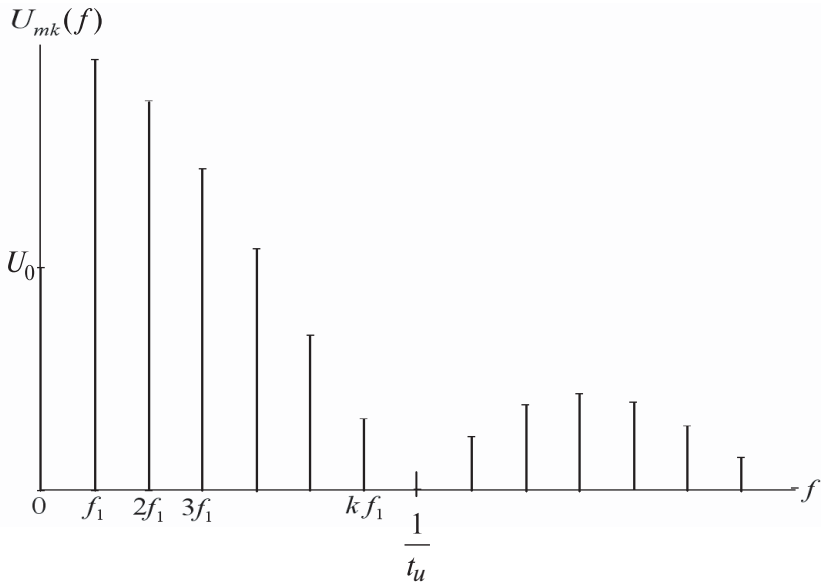


Рис. 2. Амплитудный спектр последовательности импульсов

— построить в масштабе спектрограмму сигнала.

В заключение по результатам расчетов и приведенным формулам следует сделать выводы о том, как изменяется спектр последовательности прямоугольных импульсов в случаях, когда:

- изменяется период следования  $T$  при неизменной длительности импульсов  $t_u$ ;
- изменяется длительность импульсов  $t_u$  при неизменном периоде следования  $T$ .

### ***Задача 2***

Рассчитать и построить передаточные характеристики активной электрической цепи с операционным усилителем, охваченным однопетлевой частотно-зависимой обратной связью. Исходные данные к задаче представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Исходные данные	Вариант контрольной работы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Схема цепи	Предпоследняя цифра учебного шифра									
	а	б	г	в	а	д	д	в	г	б
Нижняя частота расчетной полосы $f_n$ , кГц	Последняя цифра учебного шифра									
	2,5	3,0	6,0	3,6	5,0	8,0	6,5	3,5	7,0	8,2

Варианты схемы цепи представлены на рис. 3.

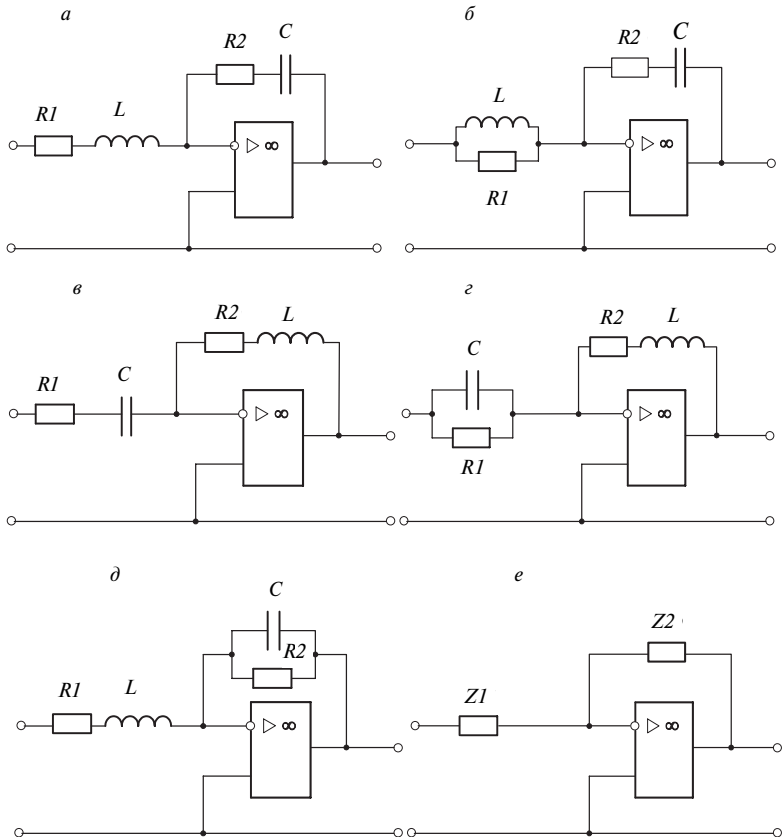


Рис. 3. Активные четырехполюсные цепи



Таблица 3

Схема цепи		Вариант (сумма двух последних цифр учебного шифра)								
		1; 14	2; 13	3; 10	4; 11	5; 18	6; 17	7; 16	8; 15	9; 12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
а	$R_1, \text{кОм}$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
	$R_2, \text{кОм}$	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0
	$L, \text{мГн}$	50,0	45,0	40,0	35,0	30,0	25,0	20,0	25,0	30,0
	$C, \text{мкФ}$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
б	$R_1, \text{кОм}$	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0
	$R_2, \text{кОм}$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,4	1,6
	$L, \text{мГн}$	100,0	90,0	80,0	70,0	65,0	60,0	55,0	50,0	45,0
	$C, \text{мкФ}$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
в	$R_1, \text{кОм}$	10,0	15,0	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0
	$R_2, \text{кОм}$	1,0	0,5	1,75	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0	3,5
	$L, \text{мГн}$	50,0	50,0	45,0	40,0	35,0	30,0	25,0	30,0	35,0
	$C, \text{мкФ}$	10,0	9,0	8,0	7,0	6,0	5,0	4,0	3,0	2,0
г	$R_1, \text{кОм}$	20,0	25,0	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0
	$R_2, \text{кОм}$	1,0	1,2	1,4	1,6	2,0	2,25	2,5	2,75	3,0
	$L, \text{мГн}$	10,0	12,0	14,0	16,0	18,0	20,0	22,0	24,0	26,0
	$C, \text{мкФ}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
д	$R_1, \text{кОм}$	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
	$R_2, \text{кОм}$	50,0	55,0	60,0	65,0	70,0	75,0	80,0	85,0	90,0
	$L, \text{мГн}$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
	$C, \text{мкФ}$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Перед решением задачи необходимо изучить материал, изложенный в [1, 2.15, 6.7; 3, 3.40–3.44, 6.19, 8.19, 13.3; 4, 12.60–12.62, 15.26–15.30].

К активным электрическим цепям относятся цепи, содержащие усилители сигналов. На основе активных элементов можно создавать цепи, обладающие различными нетрадиционными свойствами, такими как цепь с резистивным отрицательным

сопротивлением, резистивную частотнозависимую цепь, цепь с индуктивными свойствами, не содержащую катушек индуктивности. Можно получать колебательные контуры, АРС- фильтры, схемы которых не содержат катушек индуктивности и т.д.

Наибольшими возможностями для реализации активных цепей обладают операционные усилители (ОУ). Они усиливают сигналы в десятки тысяч раз, благодаря чему в схему с ОУ можно вводить глубокие обратные связи и получать необходимые характеристики.

Простейшая цепь с ОУ показана на рис. 3.е. Комплексная передаточная функция  $H(\omega)$  этой схемы равна отношению сопротивлений, образующих цепь обратной связи:

$$H(\omega) = -Z_2(\omega)/Z_1(\omega),$$

где  $Z_1(\omega)$  — сопротивление на входе схемы;

$Z_2(\omega)$  — сопротивление цепи обратной связи.

Запишем выражения для модуля и фазы передаточной функции, воспользовавшись соотношениями:

$$Z_1 = |Z_1|e^{j\varphi_1}, \quad Z_2 = |Z_2|e^{j\varphi_2},$$

где  $|Z_1|$ ,  $|Z_2|$ ,  $\varphi_1 = \arg(Z_1)$ ,  $\varphi_2 = \arg(Z_2)$  — соответственно модули и фазы сопротивлений двухполюсников  $Z_1$ ,  $Z_2$ .

Модуль передаточной функции  $|H(f)| = |Z_2|/|Z_1|$  является амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), а аргумент  $\varphi(f) = \varphi_2 - \varphi_1 + \pi$  — фазо-частотной характеристикой (ФЧХ) четырехполюсника.

В задаче для заданной схемы требуется:

- составить выражение для передаточной функции;
- рассчитать и построить АЧХ и ФЧХ в заданной полосе частот;
- по данным расчета построить графики АЧХ и ФЧХ.

Вычисления следует проводить в диапазоне одной октавы от  $f_1$  до  $2f_1$ , ограничившись 7–10 расчетными значениями.

Двухполюсники  $Z_1, Z_2$  представляют собой последовательное, либо параллельное соединение двух элементов (рис. 4).

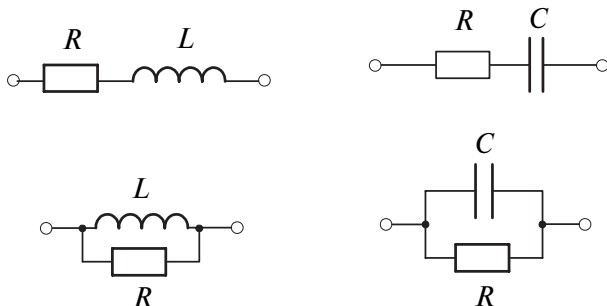


Рис. 4. Схемы двухполюсников

На первом этапе решения задачи следует записать выражения для модуля и фазы сопротивления двухполюсника в случае последовательного соединения его элементов. При параллельном соединении целесообразно оперировать с модулем и фазой проводимости двухполюсника. Этот выбор диктуется удобством получения и записи выражений. Для вычислений значений передаточной функции следует воспользоваться наиболее удобной из четырех эквивалентных форм представления:  $H(\omega) = -Z_2/Z_1 = -Z_2Y_1 = -1/Y_2Z_1 = -Y_1/Y_2$ .

### Задача 3

Рассчитать волновые параметры групповой линии связи на заданных частотах. Исходные данные к задаче приведены в табл. 4.

Таблица 4

Исходные данные	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
	Предпоследняя цифра учебного шифра									
Расстояние между аппаратами $l$ , км	1,5	2,2	3,1	2,7	4,5	3,3	2,7	3,5	2,5	1,8

Продолжение табл. 4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	Последняя цифра учебного шифра									
Модуль $Z_a$ , кОм	20	15	25	12	8	20	40	32	60	36
Угол $\varphi_a$ , град	18	25	15	32	42	35	28	22	40	20

Первичные параметры линии связи на заданных частотах приведены в табл. 5.

Таблица 5

Первичные параметры линии	Частота, кГц					
	0,8	2,0	5,0	10,0	20,0	40,0
$R$ , Ом/км	32,0	32,1	33,25	34,55	37,7	44,9
$L$ , мГн/км	0,824	0,824	0,824	0,823	0,821	0,815
$G$ , мкСм/км	0,54	1,5	4,1	9,0	20,8	51,5
$C$ , нФ/км	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5	26,5

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Основные теоретические положения по решению задачи изложены в [1, 3.1, 4.1; 4, гл. 11].

Линия, на протяжении всей длины которой параллельно подключены нагрузки, называется групповой линией. На железнодорожном транспорте к групповым относятся линии оперативно-технологической связи: поездной диспетчерской, станционной, линейно-путевой и др.

Параллельную нагрузку создают аппараты промежуточных пунктов (ПП), расположенных вдоль магистрали железной дороги.

Будем полагать, что аппараты включены в линию равномерно со средним расстоянием между ними  $l$  (рис. 5). Каждый аппарат ПП в точке подключения представляет собой дополнительную проводимость, равную  $1/|Z_a|e^{j\varphi_a}$ . В пересчете на 1 км линии погонное значение дополнительной проводимости составляет  $Y = 1/|Z_a|e^{j\varphi_a} l$ .

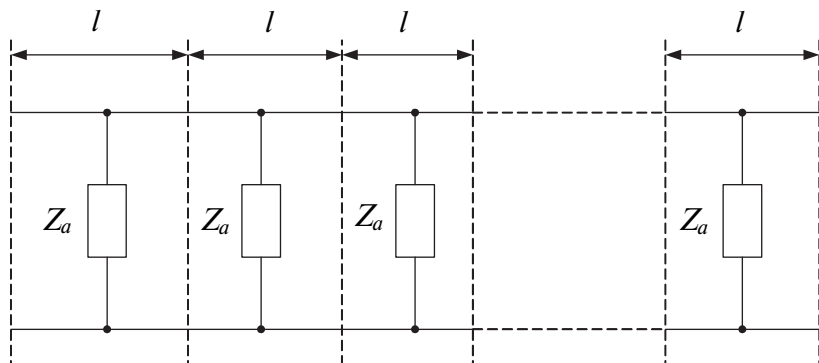


Рис. 5. Групповая линия связи

Эквивалентная схема линии длиной 1 км с учетом дополнительной проводимости изображена на рис. 6. Первичные параметры линии представлены погонными значениями сопротивления  $R$ , индуктивности  $L$ , емкости  $C$  и проводимости  $G$ .

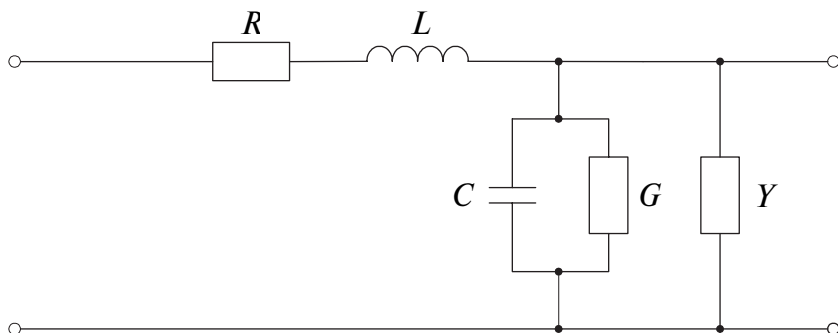


Рис. 6. Эквивалентная схема групповой линии связи

Волновая постоянная распространения электромагнитной волны и волновое сопротивление групповой линии связаны с первичными параметрами соотношениями:

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L) \left( G + j\omega C + \frac{1}{l|Z_a|e^{j\varphi_a}} \right)} = \alpha + j\beta,$$

$$Z_{\sigma} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C + \frac{1}{l|Z_a|e^{j\phi_a}}}} = |Z_{\sigma}|e^{j\phi_{\sigma}},$$

где  $\alpha, \beta$  — километрические коэффициенты ослабления и сдвига фазы;

$|Z_{\sigma}|, \phi_{\sigma}$  — модуль и угол волнового сопротивления линии.

Требуется определить волновые параметры  $\alpha, \beta, |Z_{\sigma}|, \phi_{\sigma}$  групповой линии связи на шести заданных частотах.

## КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА № 2

### Задача 1

Составить схему LC-фильтра и рассчитать ее элементы. Исходные данные к задаче приведены в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Исходные данные	Вариант контрольной работы									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Тип	Последняя цифра учебного шифра									
	НЧ	НЧ	ВЧ	НЧ	ВЧ	НЧ	ВЧ	НЧ	ВЧ	ВЧ
	Предпоследняя цифра учебного шифра									
Характеристика	*	*	**	*	**	*	**	**	*	**

**Примечание:** \*, \*\* — фильтры с частотными характеристиками Баттерворта и Чебышева, соответственно.

Таблица 7

Фильтр	Вариант (сумма двух последних цифр учебного шифра)									
	1; 11	2; 12	3; 13	4; 14	5; 15	6; 16	7; 17	8; 10	9; 18	
Нижних частот										
Баттерворта: Частота среза $f_C$ , кГц	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Продолжение табл. 7

Фильтр	Вариант (сумма двух последних цифр учебного шифра)									
	1; 11	2; 12	3; 13	4; 14	5; 15	6; 16	7; 17	8; 18	9; 18	
Сопrotивление нагрузки $R_H$ , Ом	400	850	400	850	400	850	400	850	400	
Ослабление на октаву $A_s$ , дБ/окт	37	35	41	38	40	37	39	41	38	
Чебышева: Частота среза $f_C$ , кГц	300	500	200	400	300	500	200	300	500	
Сопrotивление нагрузки $R_H$ , Ом	500	600	700	800	750	650	550	500	600	
Ослабление на октаву $A_s$ , дБ/окт	35	40	39	39	37	42	37	39	44	
Неравномерность ослабления $\Delta A$ , дБ	1,0	3,0	0,5	2,0	1,0	3,0	0,5	1,0	3,0	
<b>Верхних частот</b>										
Баттвортта: Частота среза $f_C$ , кГц	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
Сопrotивление нагрузки $R_H$ , Ом	650	600	650	600	650	600	650	600	650	
Ослабление на октаву $A_s$ , дБ/окт	38	40	37	39	41	38	40	37	39	
Чебышева: Частота среза $f_C$ , кГц	200	400	300	500	200	400	300	200	400	
Сопrotивление нагрузки $R_H$ , Ом	450	550	750	850	800	700	500	450	550	
Ослабление на октаву $A_s$ , дБ/окт	40	38	36	41	34	44	42	32	46	
Неравномерность ослабления $\Delta A$ , дБ/окт	0,5	2,0	1,0	3,0	0,5	2,0	1,0	0,5	2,0	

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Прежде чем приступить к решению задачи, необходимо изучить материал, приведенный в [1, 6.1, 6.8, 7.1 – 7.3; 3, 15.6 – 15.9, 15.12, 15.13; 4, гл. 15].

Расчет элементов фильтра нижних частот (НЧ) или верхних частот (ВЧ) с частотными характеристиками Баттерворта и Чебышева (сокращенно фильтры Баттерворта и Чебышева) выполняется по рабочим параметрам. Ослабление фильтра Баттерворта в полосе пропускания принимается не более 3 дБ.

На рис. 7, *а* и 7, *б* приведены для сравнения частотные характеристики ослабления фильтров Баттерворта и Чебышева. Ослабление фильтра Баттерворта по мере увеличения частоты монотонно возрастает в полосе пропускания, постепенно достигая значение 3 дБ на частоте среза  $f_c$ , а затем круто растет в полосе задерживания. Чем выше порядок фильтра  $n$ , т.е. число входящих в схему реактивных элементов, тем меньше ослабление в полосе пропускания и, одновременно, больше крутизна частотной характеристики в полосе задерживания. Такую характеристику в полосе пропускания называют максимально плоской.

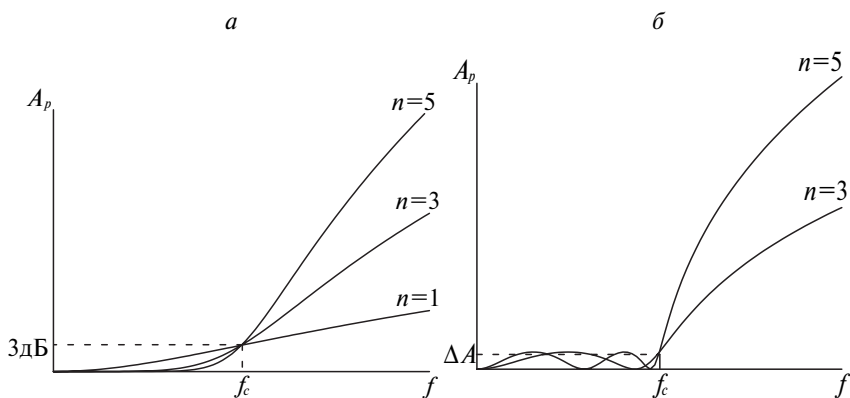


Рис.7. Частотные характеристики ослабления фильтров Баттерворта и Чебышева

Зависимость ослабления фильтра Чебышева от частоты в полосе пропускания имеет осциллирующий характер, в этом состоит принципиальное отличие его от фильтра Баттерворта. Суммарное число экстремальных точек равно порядку фильтра. Частотную характеристику ослабления фильтра Чебышева в полосе пропускания еще называют равномерно колебательной.



В полосе задерживания ослабление растет монотонно. Следует отметить, что с ростом неравномерности ослабления в полосе пропускания  $\Delta A$  растет крутизна характеристики фильтра в полосе задерживания. По мере уменьшения неравномерности в полосе пропускания частотная характеристика ослабления фильтра Чебышева постепенно вырождается в частотную характеристику фильтра Баттерворта. Повышение порядка фильтра Чебышева пропорционально увеличивает крутизну характеристики в полосе задерживания.

При одном и том же порядке фильтра  $n$  крутизна характеристики фильтра Чебышева в полосе задерживания больше крутизны характеристики фильтра Баттерворта, но фазовая характеристика фильтра Баттерворта ближе к линейной, чем характеристика фильтра Чебышева.

***При решении задачи требуется:***

- определить порядок фильтра нижних или верхних частот Баттерворта или Чебышева;
- рассчитать значения элементов схемы фильтра;
- рассчитать ослабление фильтра и построить его частотную характеристику ослабления.

***Пояснение к расчету фильтра Баттерворта***

При расчете фильтров нижних частот используется относительная или нормированная частота  $\hat{f} = f/f_c$ . Методику расчета удается обобщить и на фильтры верхних частот, если для них ввести относительную частоту как  $\hat{f} = f_c/f$ .

Порядок фильтра определяется требованиями к крутизне частотной характеристики ослабления в полосе задерживания. Для расчета используется приближенное соотношение:

$$n \geq \frac{A_s}{20 \lg \hat{f}_s},$$

где значение нормированной частоты  $\hat{f}_s$  соответствует изменению частоты в два раза (одна октава).

Методика расчета порядка фильтра основывается на значении крутизны характеристики фильтра первого порядка в полосе задерживания 6 дБ/окт.

Определив число реактивных элементов, следует составить схему фильтра. В цепочечных фильтрах конденсаторы и катушки индуктивности чередуются, поэтому возможны два варианта построения схем фильтра одного и того же порядка, это Т- и П-образные схемы фильтров. Схемы фильтра нижних частот пятого порядка приведены на рис. 8.

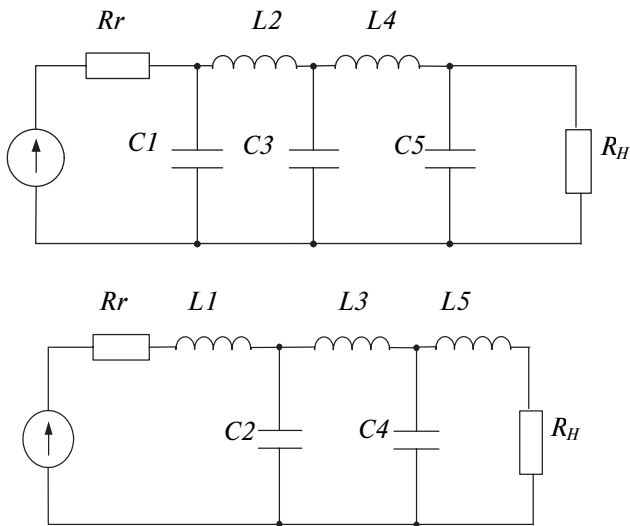


Рис. 8. Схемы фильтра нижних частот

Из двух приведенных на рисунке схем следует отдать предпочтение схеме с П-образным входом, в ней на единицу меньше катушек индуктивности.

Расчет значений элементов схемы выполняется с учетом сопротивления нагрузки  $R_H$ , которое принято равным сопротивлению генератора  $R_r$ . Вид частотной характеристики обеспечивается подбором соотношений между значениями параметров реактивных элементов. Значения нормированных коэффициентов приведены в табл. 8.

Таблица 8

Порядок фильтра $n$	Порядковый номер элемента фильтра							
	1	2	3	4	5	6	7	8
3	1,000	2,000	1,000	—	—	—	—	—
4	0,765	1,848	1,848	0,765	—	—	—	—
5	0,618	1,618	2,000	1,618	0,618	—	—	—
6	0,518	1,414	1,932	1,932	1,414	0,518	—	—
7	0,445	1,247	1,802	2,000	1,802	1,247	0,445	—
8	0,390	1,111	1,663	1,962	1,962	1,663	1,111	0,390

Значение индуктивности каждой катушки определяется соотношениями:

$$L = K \frac{R_H}{2\pi f_c} \text{ — для ФНЧ; } L = \frac{1}{K} \frac{R_H}{2\pi f_c} \text{ — для ФВЧ;}$$

а емкости конденсаторов — соотношениями:

$$C = K \frac{1}{2\pi f_c R_H} \text{ — для ФНЧ; } C = \frac{1}{K} \frac{1}{2\pi f_c R_H} \text{ — для ФВЧ.}$$

В представленных соотношениях  $K$  — нормированный коэффициент (табл. 8), учитывающий порядок фильтра и порядковый номер реактивного элемента схемы.

После нахождения параметров элементов схемы проводится расчет ослабления фильтра:

$$A_p = 10 \lg(1 + \hat{f}^{2n}),$$

где  $\hat{f} = f/f_c$  — для ФНЧ;  $\hat{f} = f_c/f$  — для ФВЧ.

Расчет ослабления следует проделать в пределах двух смежных октав, расположенных по обе стороны от частоты среза в полосах пропускания и задерживания фильтра. Расчетные частоты студент выбирает самостоятельно, добиваясь правильного воспроизведения формы амплитудно-частотной характеристики фильтра. После вычислений следует проверить, выполняются ли исходные требования к частотной характеристике фильтра.

### Пояснение к расчету фильтра Чебышева

Методика расчета фильтра Чебышева аналогична расчету фильтра Баттерворта. Рассмотрим некоторые особенности. Порядок фильтра Чебышева зависит от крутизны частотной характеристики в полосе задерживания  $A_s$  и допустимой неравномерности ослабления  $\Delta A$  в полосе пропускания:

$$n \geq \frac{A_s + 6 - 10 \lg(10^{0,1\Delta A} - 1)}{20 \lg(\hat{f}_s + \sqrt{\hat{f}_s^2 - 1})},$$

где  $\hat{f}_s = f_s/f_c$  — для ФНЧ;  $\hat{f}_s = f_c/f_s$  — для ФВЧ. Эта приведенная величина означает изменение частоты в 2 раза (одна октава).

Нормированные коэффициенты для расчета значений элементов фильтра Чебышева приведены в табл. 9.

Таблица 9

$\Delta A$ , дБ	Порядок фильтра	Порядковый номер элемента фильтра						
		1	2	3	4	5	6	7
0,1	3	1,032	1,147	1,032	—	—	—	—
	5	1,147	1,371	1,975	1,371	1,147	—	—
	7	1,181	1,423	2,097	1,573	2,097	1,432	1,181
0,25	3	1,303	1,146	1,303	—	—	—	—
	5	1,382	1,326	2,209	1,326	1,382	—	—
	7	1,447	1,356	2,348	1,469	2,348	1,356	1,447
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

Для расчета ослабления фильтра Чебышева используют формулы:

$$A_p = 10 \lg \left| 1 + \varepsilon^2 \cos^2(n \arccos \hat{f}) \right| \text{ — в полосе пропускания};$$

$$A_p = 10 \lg \left| 1 + \varepsilon^2 \operatorname{ch}^2(n \operatorname{arcch} \hat{f}) \right| \text{ — в полосе задерживания},$$

где  $\varepsilon^2 = 10^{0,1\Delta A} - 1$ .

Численные значения  $\varepsilon^2$  и  $\Delta A$  приведены в табл. 10.

Таблица 10

$\Delta A$ , дБ	3	2	1	0,5	0,25	0,1
$\varepsilon^2$	0,9953	0,5849	0,2589	0,1220	0,05925	0,02329

### Задача 2

Построить схему ARC-фильтра нижних частот и рассчитать его элементы. Исходные данные к задаче приведены в табл. 11 и 12.

Таблица 11

Исходные данные	Вариант (последняя цифра учебного шифра)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0
Характеристика фильтра	*	*	**	*	**	*	*	*	**	**

**Примечание:** \*, \*\* — характеристики Баттерворта и Чебышева, соответственно.

Таблица 12

Тип фильтра	Вариант (сумма двух последних цифр учебного шифра)									
	1; 15	2; 16	3; 17	4; 18	5; 10	6; 11	7; 12	8; 13	9; 14	
Баттерворта:										
Частота среза $f_C$ , кГц	10	60	10	60	10	60	10	60	10	
Ослабление на октаву $A_s$ , дБ/окт	26	27	28	29	26	27	28	29	26	

Тип фильтра	Вариант (сумма двух последних цифр учебного шифра)									
	1; 15	2; 16	3; 17	4; 18	5; 10	6; 11	7; 12	8; 13	9; 14	
Чебышева:										
Частота среза $f_c$ , кГц	50	40	30	20	20	30	40	50	50	
Ослабление на октаву $A_o$ , дБ/окт	26	15	13	18	25	16	14	17	24	
Неравномерность ослабления $\Delta A$ , дБ/окт	3,0	2,0	1,0	0,5	3,0	2,0	1,0	0,5	3,0	

### МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Прежде чем приступить к решению задачи, необходимо изучить материал, изложенный в [1, 6.7, 6.8; 3, 15.19 – 15.27; 4, гл. 15].

Активный RC-фильтр (ARC) представляет собой электрическую цепь, при построении которой используются операционные усилители (ОУ), конденсаторы и резисторы. Для конструирования ARC-фильтров высокого порядка используются звенья первого и второго порядков. Звено первого порядка содержит один реактивный элемент (конденсатор), звено второго порядка – два.

Звено первого порядка в сущности представляет собой пассивную RC-цепь, отделенную от последующих звеньев повторителем напряжения, собранным на ОУ. Усилитель охвачен сильной отрицательной обратной связью и характеризуется высоким входным сопротивлением и практически равным единице коэффициентом передачи. Схема звена приведена на рис. 9, а. Для нее следует рассчитать значения сопротивления резистора  $R$  и емкости конденсатора  $C$ .

Звенья второго порядка могут быть собраны по различным схемам включения элементов, например по схеме с многопетлевой обратной связью, приведенной на рис. 9, б. Для нее сле-

дует рассчитать значения сопротивлений трех резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и емкости двух конденсаторов  $C_1$ ,  $C_2$ .

Операционный усилитель должен иметь граничную частоту хотя бы на порядок большую, чем частота среза фильтра.

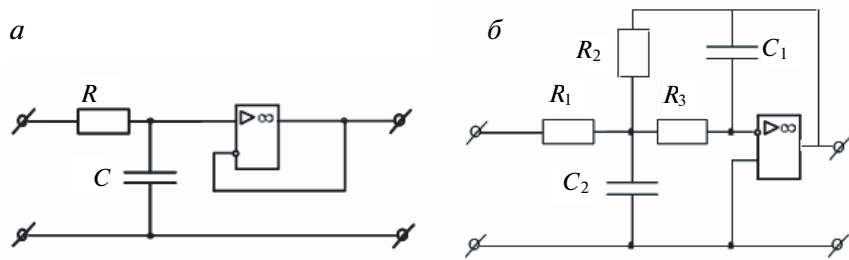


Рис. 9. Схемы активных фильтров

При решении задачи требуется:

- определить порядок  $ARC$ -фильтра;
- рассчитать ослабление отдельных звеньев и всего фильтра;
- рассчитать значения сопротивлений резисторов и емкости конденсаторов, входящих в схему фильтра;
- по результатам расчетов построить графики зависимости ослабления от частоты для отдельных звеньев и фильтра в целом.

Рассчитываемый  $ARC$ -фильтр должен обладать частотными свойствами фильтров Баттерворта или Чебышева. В этом плане методика расчета порядка фильтра аналогична пассивным  $LC$ -фильтрам: используются приближенные соотношения, приведенные в задаче 1.

Определив порядок фильтра  $n$ , вычисляют ослабление его отдельных звеньев и полное ослабление фильтра.

Ослабление  $i$ -го звена определяется соотношением:

$$A_{pi} = 20 \lg \sqrt{(1 - b_i \hat{f}^2)^2 + (a_i \hat{f})^2},$$

где приведенные коэффициенты  $a_i$  и  $b_i$  зависят от порядка фильтра  $n$ , номера звена  $i$ , а для фильтра с частотной характери-

кой Чебышева и от неравномерности ослабления  $\Delta A$  в полосе пропускания.

Значения коэффициентов  $a_i$  и  $b_i$  для фильтров с характеристикой Баттерворта приведены в табл. 13, для фильтров с характеристикой Чебышева в табл. 14.

Ослабление многозвенного фильтра вычисляется как алгебраическая сумма ослаблений всех его звеньев  $A_{p\sigma} = \sum A_{pi}$ .

Таблица 13

Порядок фильтра	Номер звена	Приведенный коэффициент	
		$a_i$	$b_i$
$n$	$i$		
1	1	1,000	0,000
2	1	1,414	1,000
3	1	1,000	0,000
	2	1,000	1,000
4	1	1,848	1,000
	2	0,765	1,000
5	1	1,000	0,000
	2	1,618	1,000
	3	0,618	1,000

Таблица 14

Порядок фильтра	Номер звена	Неравномерность в полосе пропускания $\Delta A$ , дБ							
		0,5		1,0		2,0		3,0	
		$a_i$	$b_i$	$a_i$	$b_i$	$a_i$	$b_i$	$a_i$	$b_i$
$n$	$i$								
1	1	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000	1,000	0,000
2	1	1,362	1,338	1,302	1,552	1,181	1,778	1,065	1,931
3	1	1,864	0,000	2,216	0,000	2,800	0,000	3,350	0,000
	2	0,640	1,193	0,554	1,206	0,430	1,204	0,356	1,192
4	1	2,828	3,434	2,590	4,130	2,403	4,986	2,185	5,534
	2	0,369	1,131	0,304	1,168	0,237	1,190	0,196	1,201
5	1	2,924	0,000	3,571	0,000	4,635	0,000	5,633	0,000
	2	1,303	2,353	1,128	2,490	0,908	2,608	0,782	2,653
	3	0,229	1,083	0,187	1,081	0,143	1,075	0,117	1,069



После расчета ослабления фильтра переходят к расчету элементов его звеньев. Частотная характеристика первого звена определяется емкостью конденсатора  $C_1$  и сопротивлением резистора  $R_1$ . Частота среза связана с параметрами звена соотношением  $f_c = 1/2\pi R_1 C_1$ , откуда следует, что  $C_1 = 1/2\pi f_c R_1$ . Задаются значением сопротивления, оно должно быть порядка десятков кОм, после чего вычисляют требуемое значение емкости.

В звене второго порядка 5 элементов определяют вид частотной характеристики, это резисторы  $R_{21}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{23}$  и конденсаторы  $C_{21}$  и  $C_{22}$ . Расчет производят для приведенных значений элементов фильтра  $R_{21}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{23}$ ,  $C_{21}$ ,  $C_{22}$ , для которых частота среза  $\hat{f}_c = 1/2 \pi$ . Исходные и приведенные значения связаны соотношениями:

$$\hat{R}_i = R_i / f_c, \quad \hat{C}_i = C_i / f_c.$$

При расчете звеньев второго порядка задаются значениями  $\hat{R}_1$ ,  $\hat{R}_2$  и  $\hat{C}_1$ , а значения  $\hat{R}_3$  и  $\hat{C}_2$  определяют из формул:

$$\hat{R}_3 = \frac{\hat{R}_1(a_2 - \hat{R}_2 \hat{C}_1)}{\hat{C}_1(\hat{R}_1 + \hat{R}_2)}; \quad \hat{C}_2 = \frac{b_2}{\hat{R}_2 \hat{R}_3 \hat{C}_1}.$$

Рассчитав приведенные значения  $\hat{R}_3$  и  $\hat{C}_2$ , определяют:

$$R_1 = \hat{R}_1 f_c; \quad R_2 = \hat{R}_2 f_c; \quad R_3 = \hat{R}_3 f_c;$$

$$C_1 = \frac{\hat{C}_1}{2\pi f_c R_1}; \quad C_2 = \frac{\hat{C}_2}{2\pi f_c R_2}.$$

**Пример.** Для АРС-фильтра нижних частот с характеристикой Чебышева требуется рассчитать частотную характеристику ослабления в диапазоне от постоянного тока до удвоенной частоты среза и рассчитать элементы схемы при следующих исходных данных:

- частота среза  $f_c = 40$  кГц;
- крутизна характеристики в полосе задерживания  $A_S = 41$  дБ/окт;
- неравномерность ослабления в полосе пропускания  $\Delta A = 1$  дБ.

По результатам вычислений порядок фильтра равен  $n = 4,622$ . Выбирая ближайшее большее целое число, получаем значение .

Фильтр пятого порядка можно составить из одного звена первого порядка и двух звеньев второго порядка (рис. 10).

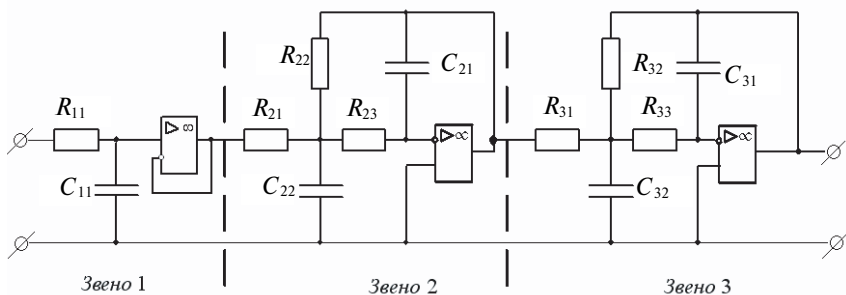


Рис. 10. Активный RC-фильтр 5-го порядка

Используя представленные в табл. 14 значения, для  $\Delta A = 1,0$  дБ и  $n = 5$ :

$$a_1 = 3,571, \quad b_1 = 0,000 \quad \text{— для первого звена;}$$

$$a_2 = 1,128, \quad b_2 = 2,490 \quad \text{— для второго звена;}$$

$$a_3 = 0,187, \quad b_3 = 1,081 \quad \text{— для третьего звена.}$$

Затем рассчитаем ослабление звеньев фильтра. Так как для фильтра первого порядка  $b_1 = 0$ , то

$$A_{p1} = 20 \lg \sqrt{1 + (a_1 \hat{f})^2}.$$

Для второго звена

$$A_{p2} = 20 \lg \sqrt{(1 - b_2 \hat{f}^2)^2 + (a_2 \hat{f})^2}.$$

Для третьего звена

$$A_{p3} = 20 \lg \sqrt{(1 - b_3 \hat{f}^2)^2 + (a_3 \hat{f})^2}.$$

Частотная зависимость ослабления фильтра и отдельных его звеньев представлена на рис.11. По результатам вычислений следует проверить, реализуются ли исходные требования к частотной характеристике фильтра.

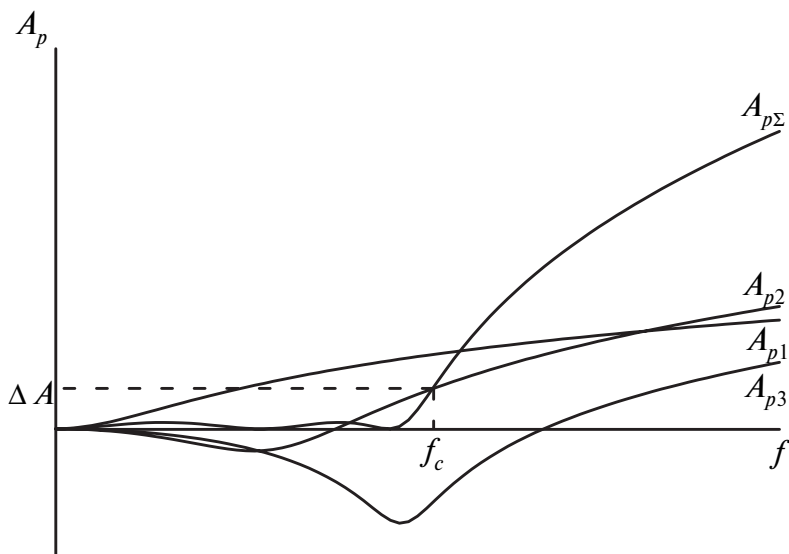


Рис. 11. Частотная характеристика ослабления ARC-фильтра и его звеньев

*Расчет элементов схемы фильтра.* Для первого звена задаем сопротивление резистора  $R_{11} = 30 \text{ кОм}$ , емкость конденсатора определяется соотношением  $C_{11} = 1/2\pi f_c R_1$ . Округляя до ближайшего номинального значения, получаем значение  $C_{11} = 130 \text{ пФ}$ .

Для второго звена задаемся ориентировочными значениями  $\hat{R}_{21} = 1$ ;  $\hat{R}_{22} = 0,1$ ;  $\hat{C}_{21} = 10$ . Коэффициент  $a_2 = 1,128$  и необходимое условие  $a_2 \geq R_{22}C_{21}$  выполняется.

В результате вычислений находим:

$$R_{21} = \hat{R}_{21} f_C, R_{21} = 40 \text{ кОм}; R_{22} = \hat{R}_{22} f_C, R_{22} = 4,0 \text{ кОм};$$

$$C_{21} = \hat{C}_{21} / 2\pi f_C R_{21}, C_{21} = 1,0 \text{ нФ};$$

$$\hat{R}_{23} = \frac{\hat{R}_{21}(a_2 - \hat{R}_{22}\hat{C}_{21})}{\hat{C}_{21}(\hat{R}_{21} + \hat{R}_{22})}, \hat{R}_{23} = 0,01164 \text{ Ом/Гц};$$

$$R_{23} = \hat{R}_{23} f_C, R_{23} = 470 \text{ Ом};$$

$$\hat{C}_{22} = \frac{b_2}{\hat{R}_{22}\hat{R}_{23}\hat{C}_{21}}, \hat{C}_{22} = 249; C_{22} = \frac{\hat{C}_{22}}{2\pi f_C R_{22}}, C_{22} = 250 \text{ нФ}.$$

Аналогичным образом рассчитывают элементы третьего звена фильтра.