

Министерство образования Республики Беларусь  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный университет  
информатики и радиоэлектроники»

Факультет радиотехники и электроники

Кафедра электроники

**В. Н. Русакович**

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА  
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

В двух частях

Часть 1

**УСИЛИТЕЛЬНЫЕ И ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ  
УСТРОЙСТВА**

*Рекомендовано УМО по образованию в области информатики  
и радиоэлектроники в качестве учебно-методического пособия  
для специальности 7-07-0713-01 «Информационные  
и управляющие системы физических установок»*

Минск БГУИР 2024

УДК 621.375.9 (076.5)  
ББК 32.846я73  
Р88

**Рецензенты:**

кафедра автоматизации производственных процессов и электротехники  
учреждения образования «Белорусский государственный  
технологический университет»  
(протокол № 7 от 09.02.2023);

заведующий кафедрой телекоммуникационных систем  
учреждения образования «Белорусская государственная академия связи»  
кандидат технических наук, доцент С. И. Половения

**Русакович, В. Н.**

Р88      **Функциональные устройства информационно-управляющих систем.**  
Лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 1. Усилительные и частотно-избира-  
тельные устройства : учеб.-метод. пособие / В. Н. Русакович. – Минск :  
БГУИР, 2024. – 90 с. : ил. 70.  
ISBN 978-985-543-739-1 (ч. 1).

Излагается теоретический материал по типовым функциональным устройствам  
информационно-измерительных систем, приводятся методические указания и порядок  
выполнения ряда лабораторных работ по основным разделам дисциплины «Функцио-  
нальные устройства информационно-управляющих систем».

**УДК 621.375.9 (076.5)**  
**ББК 32.846я73**

**ISBN 978-985-543-739-1 (ч. 1)**  
**ISBN 978-985-543-740-7**

© Русакович В. Н., 2024  
© УО «Белорусский государственный  
университет информатики  
и радиоэлектроники», 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	4
1 Общие методические указания .....	5
2 Описание учебно-лабораторной базы .....	7
3 Лабораторная работа № 1. Исследование предварительных усилителей .....	10
3.1 Цель работы.....	10
3.2 Краткие теоретические сведения .....	10
3.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы .....	27
3.4 Порядок выполнения лабораторной работы.....	31
3.5 Содержание отчёта .....	32
3.6 Контрольные вопросы.....	33
4 Лабораторная работа № 2. Исследование усилителей мощности .....	34
4.1 Цель работы.....	34
4.2 Краткие теоретические сведения .....	34
4.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы .....	42
4.4 Порядок выполнения лабораторной работы.....	45
4.5 Содержание отчёта .....	47
4.6 Контрольные вопросы.....	47
5 Лабораторная работа № 3. Исследование операционных усилителей.....	49
5.1 Цель работы.....	49
5.2 Краткие теоретические сведения .....	49
5.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы .....	63
5.4 Порядок выполнения лабораторной работы.....	65
5.5 Содержание отчёта .....	69
5.6 Контрольные вопросы.....	69
6 Лабораторная работа № 4. Исследование активных фильтров электрических сигналов на основе операционных усилителей.....	71
6.1 Цель работы.....	71
6.2 Краткие теоретические сведения .....	71
6.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы .....	84
6.4 Порядок выполнения лабораторной работы.....	86
6.5 Содержание отчёта .....	87
6.6 Контрольные вопросы.....	87
Список использованных источников.....	89

## ВВЕДЕНИЕ

Данное учебно-методическое пособие является первой частью лабораторного практикума по дисциплине «Функциональные устройства информационно-управляющих систем» и предназначено для студентов специальности 7-07-0713-01 «Информационные и управляющие системы физических установок», получающих квалификацию инженера в области радиоэлектроники и системотехники.

Оно содержит необходимые материалы для выполнения цикла лабораторных работ по усилительным и частотно-избирательным устройствам, являющимся базовыми конструктивными компонентами информационных и управляющих систем различного назначения.

Пособие состоит из шести разделов, четыре из которых посвящены основным типам функциональных устройств информационных и управляющих систем и содержат необходимые теоретические сведения по физическим принципам работы таких схем, их основные характеристики и параметры, а также описание методов и порядка выполнения математического моделирования и экспериментальных исследований основных характеристик и параметров этих функциональных устройств.

В отдельных разделах пособия приведено описание учебно-лабораторной базы, необходимой для выполнения лабораторных работ, и общие методические указания.

Целью каждой лабораторной работы является выполнение расчётного задания по функциональному устройству, математическое моделирование полученной электрической схемы в САПР *OrCAD* для её верификации, а также экспериментальное исследование функционального устройства в различных режимах работы.

В ходе выполнения лабораторных работ студентам необходимо самостоятельно выполнить необходимые расчёты и математическое моделирование, произвести монтаж своих электрических схем с помощью дискретных электронных компонентов на макетной плате и выполнить экспериментальное исследование их характеристик и параметров с помощью современных радиоизмерительных приборов, а также подготовить отчёт о проделанной работе.

Отдельным общим заданием в ходе выполнения лабораторных работ является получение практических навыков применения современных радиоизмерительных приборов.

Выполнение лабораторного практикума будет полезно студентам как для усвоения теоретического материала, так и для получения практических навыков по эксплуатации и ремонту электрических схем различного назначения.

## 1 ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Лабораторные занятия по дисциплине «Функциональные устройства информационно-управляющих систем» проводятся в лаборатории кафедры электроники.

На первом занятии студенты знакомятся с действующим в университете «Положением о порядке подготовки, выполнения, оформления и защиты лабораторных работ», лабораторными установками, радиоизмерительными приборами. На этом же занятии со студентами проводится инструктаж по правилам техники безопасности в лаборатории, а также озвучивается перечень лабораторных работ и последовательность их выполнения. Кроме этого, перед каждой лабораторной работой на общем занятии преподаватель выдаёт исходные данные для выполнения предстоящей лабораторной работы, причём каждый студент получает индивидуальное задание.

**Подготовка к выполнению лабораторной работы.** Важным условием успешного выполнения лабораторной работы является предварительная самостоятельная подготовка к каждому занятию в лаборатории. При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо:

- изучить соответствующий раздел данного лабораторного практикума;
- усвоить теоретический материал, относящийся к данной лабораторной работе, по рекомендуемой литературе и конспекту лекций;
- изучить основные физические закономерности, которые являются предметом исследования в лабораторной работе;
- изучить цель, содержание, порядок и методику выполнения лабораторной работы;
- изучить руководства по эксплуатации радиоизмерительных приборов, которые необходимы для выполнения экспериментальных исследований;
- выполнить необходимые предварительные математические расчёты;
- оформить заготовку отчёта по лабораторной работе, включающую в себя титульный лист, цель работы, принципиальные и структурные электрические схемы исследуемых устройств, формы таблиц для экспериментальных данных.

**Выполнение лабораторной работы.** К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, прошедшие предварительные математические расчёты, представившие заготовку отчёта и прошедшие контроль знаний по основным теоретическим и практическим вопросам лабораторной работы.

В ходе работы необходимо следовать инструкциям, приведённым в методическом указании к лабораторной работе. В случае если указания кажутся неполными или недостаточными, необходимо обратиться к преподавателю.

Работа считается выполненной после проверки полученных результатов преподавателем. С разрешения преподавателя приборы отключаются от сети, и производится демонтаж схемы. По окончании работы приводится в порядок рабочее место.

После выполнения экспериментальной части лабораторной работы проводятся расчёты, использующие в качестве исходных данных экспериментальные

результаты, и построения необходимых графиков с использованием табличного редактора.

**Оформление отчёта и защита лабораторной работы.** После выполнения лабораторной работы студент оформляет индивидуальный отчёт, соответствующий требованиям Единой системы конструкторской документации (ЕСКД), и представляет его к защите на следующем занятии в лаборатории. Результаты экспериментальных исследований сводятся в таблицы. Графики, выполненные с использованием табличного редактора, предоставляются в печатном виде. Для удобства сравнения одинаковых зависимостей, полученных для различных значений параметров или типов устройств, их необходимо сводить в одну координатную систему. Текстовая часть отчёта предоставляется в рукописном виде. Общие требования к содержанию отчёта приводятся в описании лабораторной работы.

**Важной частью отчёта являются выводы по лабораторной работе.** Они выполняются самостоятельно, а их объём и содержание зависят от конкретного характера проделанной работы. В выводе необходимо отразить суть лабораторной работы, дать физическое истолкование полученных результатов и сравнить экспериментальные данные с результатами их расчёта и математического моделирования, а также теоретическими сведениями. В случае расхождения данных эксперимента, моделирования и расчёта указываются возможные причины, проводится оценка погрешности измерений и т. д.

## 2 ОПИСАНИЕ УЧЕБНО-ЛАБОРАТОРНОЙ БАЗЫ

Лабораторные занятия по дисциплине «Функциональные устройства информационно-управляющих систем» проводятся с использованием фронтального метода. Для этого в лаборатории кафедры предусмотрено восемь учебно-лабораторных рабочих мест. Каждое рабочее место оснащено комплектом современных радиоизмерительных приборов и приспособлений, необходимых для выполнения работ, в следующем составе:

- персональный компьютер с установленным необходимым программным обеспечением, в том числе САПР *OrCAD 17.2 Lite*;
- генератор сигналов произвольной формы *Tektronix AFG3000*;
- цифровой запоминающий осциллограф *Tektronix TDS3052C*;
- мультиметр *Agilent 34410A*;
- мультиметр *APPA-109N*;
- источник-измеритель *Keithley 2401*;
- источник постоянного тока *GW Instek GPS-2303*;
- таймер-счётчик-анализатор *Tektronix FCA3000*;
- макетная плата *Wish Board 502-L* (либо аналогичная);
- набор перемычек;
- набор соединителей;
- набор электронных компонентов.

Для выполнения отдельных заданий по лабораторным работам в лаборатории имеется ряд дополнительных радиоизмерительных приборов:

- двухканальный источник-измеритель *Keithley 2604B*;
- измеритель *RCL GW Instek RCL-76002*;
- анализатор спектра *Tektronix RSA 5103B*.

Они используются для измерения параметров электронных компонентов, используемых для проведения экспериментов, а также для контроля отдельных характеристик исследуемых функциональных устройств. Фотография учебно-лабораторного рабочего места приведена на рисунке 2.1.

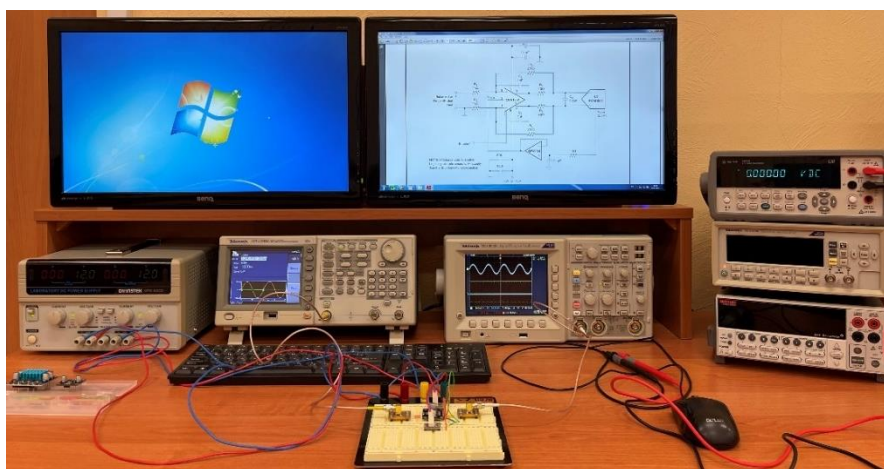


Рисунок 2.1 – Фотография учебно-лабораторного места

Описание используемых радиоизмерительных приборов и порядок их применения подробно изложен в руководствах по эксплуатации.

Монтаж электрической схемы исследуемого функционального устройства выполняется на макетной плате *Wish Board 502-L* (или аналогичной) с использованием необходимых электронных компонентов и перемычек, которые устанавливаются в контактное поле (рисунок 2.2).

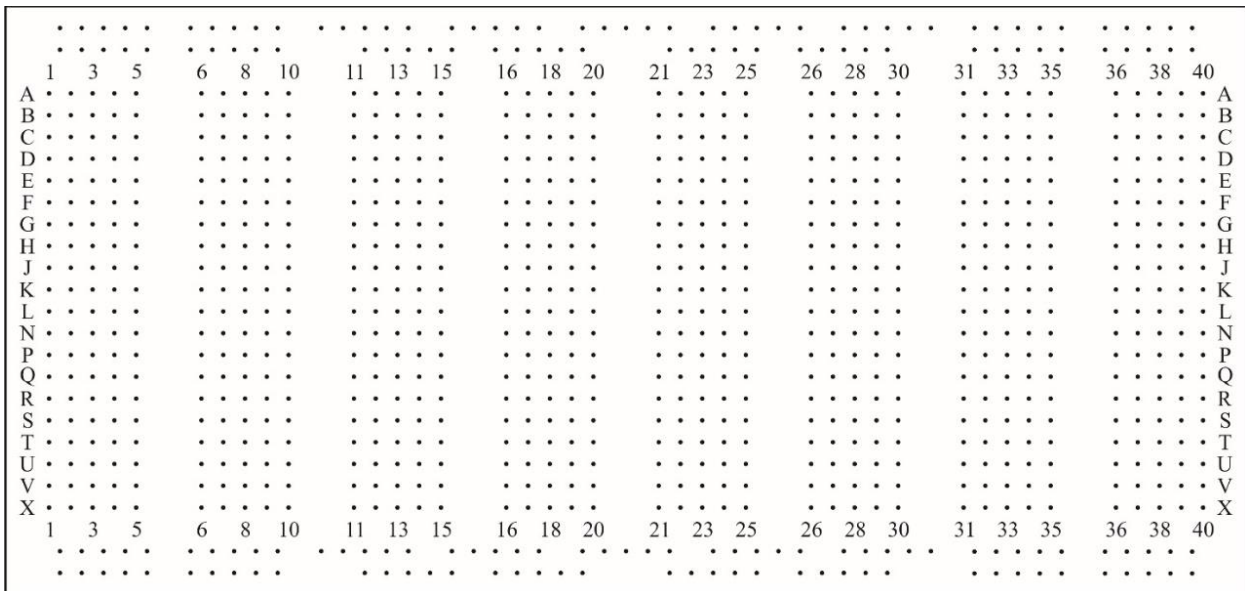


Рисунок 2.2 – Схема расположения контактного поля макетной платы

При коммутации необходимых цепей исследуемого функционального устройства нужно руководствоваться электрической схемой внутренних соединений макетной платы (рисунок 2.3).

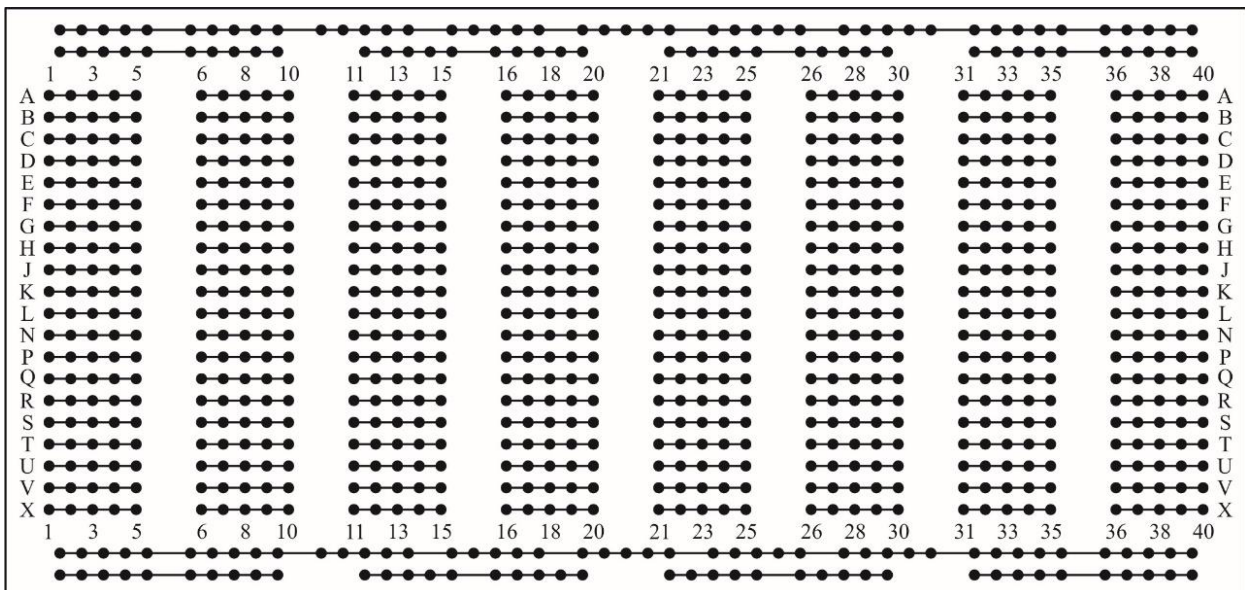


Рисунок 2.3 – Электрическая схема внутренних соединений макетной платы



Подключения к исследуемому функциональному устройству сигнальных цепей радиоизмерительных приборов необходимо выполнять с помощью универсальных соединителей с разъёмом *SMA-KWHD* и кабельных сборок с разъёмами *BNC* и *SMA-J2*. Для цепей питания необходимо использовать проводники сечением  $0,75 \text{ мм}^2$  с зажимными клеммами.

На каждом персональном компьютере лаборатории кафедры в папке ***D:\Student\Материалы для лабораторных работ*** размещены электронные копии справочных материалов по электронным компонентам, руководства по эксплуатации радиоизмерительных приборов, используемые литературные источники.

## **3 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

#### **3.1 Цель работы**

1 Изучить режимы работы, характеристики и параметры предварительных усилителей, а также способы задания и стабилизации рабочей точки активных компонентов.

2 Изучить аналитический метод расчёта усилительных каскадов.

3 Исследовать режимы работы, основные характеристики и параметры предварительных усилителей для разных схем включения активных компонентов путём математического моделирования в САПР *OrCAD*.

4 Экспериментально исследовать режимы работы, основные характеристики и параметры предварительных усилителей для разных схем включения активных компонентов.

#### **3.2 Краткие теоретические сведения**

Предварительные усилители предназначены для увеличения амплитуды напряжения или тока входного сигнала до уровня, при котором обеспечивается работоспособность усилителей мощности. Предварительные усилители содержат один или несколько усилительных каскадов и строятся такие каскады по однотактной схеме, которая содержит один или несколько параллельно соединённых активных компонентов (АК) и имеет несимметричные вход и выход. АК предварительных усилительных каскадов работают в условиях малых уровней сигнала, поэтому они обычно маломощные и их статические и динамические характеристики используются не полностью как по току, так и по напряжению. Основным требованием, предъявляемым к этим каскадам, является обеспечение максимального усиления сигнала по напряжению (току) при допустимых линейных и нелинейных искажениях (последние вследствие малых уровней сигналов в этих каскадах обычно очень малы). Расчёт и анализ усилительных каскадов предварительных усилителей проводятся аналитическим методом с использованием эквивалентных схем АК и самих усилительных каскадов по переменному току (сигналу).

Основными параметрами предварительных усилителей являются:

- коэффициенты усиления (передачи);
- входное и выходное сопротивление;
- полоса пропускания;
- коэффициенты нелинейных и линейных искажений.

Такие параметры, как выходная мощность и коэффициент полезного действия, не являются первостепенными.

Основными характеристиками предварительных усилителей являются:

- амплитудная характеристика;
- амплитудно-частотная характеристика;
- фазочастотная характеристика;
- переходная характеристика.

Коэффициент усиления (передачи) – отношение амплитудного или действующего значения величины выходного сигнала к амплитудному или действующему значению величины входного сигнала в установившемся режиме при гармоническом входном сигнале.

Различают коэффициент усиления по напряжению:

$$\dot{K}_H = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}}, \quad (3.1)$$

по току:

$$\dot{K}_T = \frac{\dot{I}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{I}_{\text{ВХ}}}. \quad (3.2)$$

Часто коэффициенты усиления выражают в логарифмических единицах – децибелах (дБ):

$$\dot{K}_H [\text{дБ}] = 20 \lg \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}}, \quad (3.3)$$

$$\dot{K}_T [\text{дБ}] = 20 \lg \frac{\dot{I}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{I}_{\text{ВХ}}}. \quad (3.4)$$

Логарифмическими единицами удобно пользоваться для описания многокаскадного усилителя, коэффициент усиления которого равен произведению коэффициентов усиления отдельных каскадов или сумме их логарифмических коэффициентов усиления:

$$\dot{K} = \dot{K}_1 \cdot \dot{K}_2 \cdot \dot{K}_3 \cdot \dots \cdot \dot{K}_N, \quad (3.5)$$

$$\dot{K} [\text{дБ}] = \dot{K}_1 + \dot{K}_2 + \dot{K}_3 + \dots + \dot{K}_N. \quad (3.6)$$

Коэффициент усиления в общем случае – комплексная величина, поскольку наличие реактивных элементов в принципиальной электрической схеме усилителя и инерционных свойств АК приводит к появлению фазового сдвига между выходным и входным сигналами. В полосе пропускания коэффициент усиления можно рассматривать как действительную величину.

Входное сопротивление усилителя (полное  $Z_{\text{ВХ}}$  или резистивное  $R_{\text{ВХ}}$ ) представляет собой сопротивление между входными зажимами усилителя и определяется отношением входного напряжения к входному току:

$$Z_{\text{ВХ}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВХ}}}{\dot{I}_{\text{ВХ}}}. \quad (3.7)$$

Выходное сопротивление (полное  $Z_{\text{ВЫХ}}$  или резистивное  $R_{\text{ВЫХ}}$ ) представляет собой сопротивление между выходными зажимами усилителя и определяется как отношение выходного напряжения к выходному току при отключённой нагрузке:

$$Z_{\text{ВЫХ}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{I}_{\text{ВЫХ}}}. \quad (3.8)$$

Характер входного и выходного сопротивлений усилителя зависит от частоты усиливаемого сигнала. В полосе пропускания их можно считать чисто активными (резистивными).

Амплитудная характеристика (АХ) – это зависимость амплитуды (или действующего значения) первой гармоники выходного напряжения от амплитуды (или действующего значения) гармонического синусоидального сигнала на входе усилительного устройства (рисунок 3.1).

Для идеального усилителя АХ линейна и проходит через начало координат (штриховая линия), наклон характеристики к оси абсцисс определяется коэффициентом усиления.

АХ реального усилителя обладает особенностями, обусловленными значениями *минимально допустимого входного* и *максимально допустимого выходного напряжений*.

Минимально допустимое напряжение на выходе усилителя определяется уровнем собственных шумов усилителя и внешними помехами.

Максимально допустимое напряжение на выходе усилителя определяется допустимыми нелинейными искажениями сигнала.

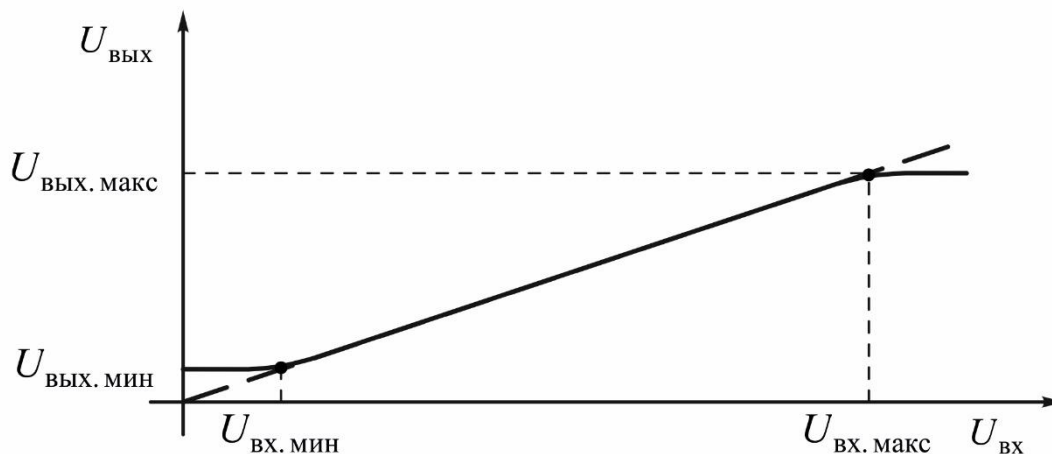


Рисунок 3.1 – Амплитудная характеристика

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) определяет зависимость модуля коэффициента усиления от частоты гармонического сигнала на входе усилителя (рисунок 3.2).

Идеальный усилитель должен иметь бесконечно большую полосу пропускания, т. е. его коэффициент усиления должен оставаться одинаковым для всех частот. АЧХ реального усилителя имеет спады в области *низких частот (НЧ)* и *высоких частот (ВЧ)*. В области *средних частот (СЧ)* характеристика практически линейна. Частоты, на которых модуль коэффициента усиления уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз, определяют нижнюю  $f_H$  и верхнюю  $f_B$  границы частотного

диапазона усиления и называются граничными частотами. Эти частоты определяют полосу пропускания.

Полоса пропускания (полоса усиливаемых частот) – диапазон частот от нижней граничной частоты  $f_H$  до верхней граничной частоты  $f_B$ , в пределах которой коэффициент усиления изменяется по определённому закону с заданной точностью  $\Delta f = f_B - f_H$ .

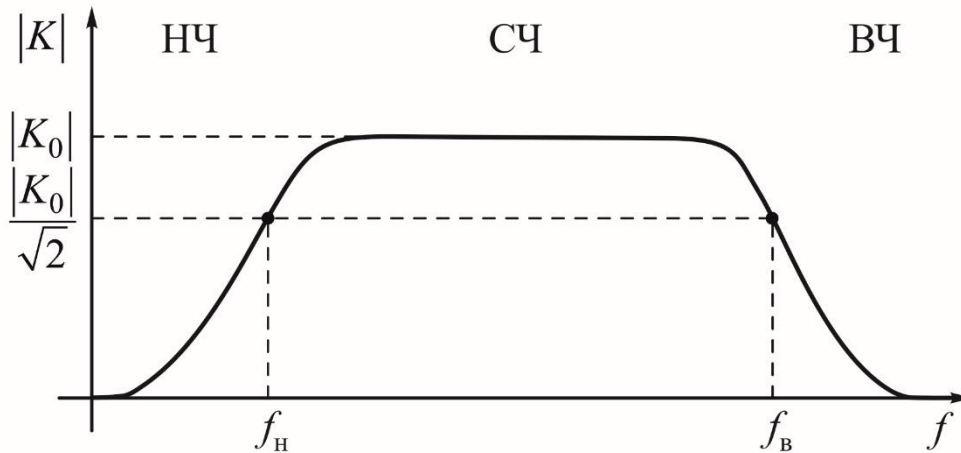


Рисунок 3.2 – Амплитудно-частотная характеристика

Степень отличия АЧХ реального усилителя от АЧХ идеального характеризуется коэффициентом частотных искажений.

Коэффициент частотных искажений численно равен отношению коэффициента усиления на средней частоте полосы пропускания к коэффициенту усиления на границах полосы пропускания:

$$M_H(f) = \frac{K_0}{K_H(f)}, \quad M_H(f)[\text{дБ}] = 20 \lg \left( \frac{K_0}{K_H(f)} \right), \quad (3.9)$$

$$M_B(f) = \frac{K_0}{K_B(f)}, \quad M_B(f)[\text{дБ}] = 20 \lg \left( \frac{K_0}{K_B(f)} \right). \quad (3.10)$$

Обычно, если к усилителю не предъявляют особых требований, то на граничных частотах полосы пропускания ( $f_H$  и  $f_B$ ) коэффициент частотных искажений имеет значение 3 дБ ( $\sqrt{2}$ ). При вычислении  $M$  обычно в качестве  $K_0$  принимают коэффициент усиления на частоте, определяемой выражением  $f_0 = \sqrt{f_H \cdot f_B}$ .

Для многокаскадного усилителя коэффициент частотных искажений определяется произведением коэффициентов частотных искажений отдельных каскадов, выраженных в безразмерных единицах:

$$M(f) = M_1(f) \cdot M_2(f) \cdot M_3(f) \cdot \dots \cdot M_N(f), \quad (3.11)$$

или суммой

$$M(f)[\text{дБ}] = M_1(f) + M_2(f) + M_3(f) + \dots + M_N(f), \quad (3.12)$$

если они выражены в децибелах.

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) определяет зависимость сдвига фазы коэффициента усиления от частоты гармонического сигнала на входе усилителя (рисунок 3.3). Вид ФЧХ обусловлен **фазовыми искажениями**. Под фазовыми искажениями подразумевают только сдвиги фаз, вызванные реактивными элементами усилителя. Мерой фазовых искажений ( $\Delta\varphi$ ) на заданной частоте является отличие реальной фазочастотной характеристики от идеальной.

В многокаскадном усилителе фазовый сдвиг между выходным и входным сигналами определяется суммой фазовых сдвигов, создаваемых каждым каскадом.

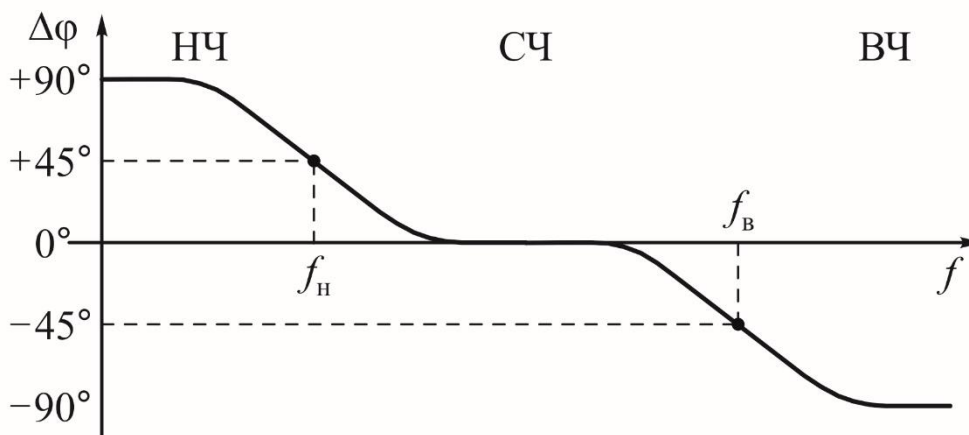


Рисунок 3.3 – Фазочастотная характеристика

По оси абсцисс на частотной и фазовой характеристиках откладывается частота (как правило, в логарифмическом масштабе).

По оси ординат на амплитудно-частотной характеристике откладываются значения модуля коэффициента усиления  $|K_H|$ , при этом он может быть представлен как в относительных единицах, так и в децибелах.

По оси ординат на фазочастотной характеристике откладываются значения сдвига фазы коэффициента усиления  $\Delta\varphi$ .

Переходная характеристика (ПХ) – это зависимость амплитуды выходного напряжения (тока) или коэффициента усиления от времени при подаче на вход усилителя единичного скачка напряжения (тока). Вид ПХ представлен на рисунке 3.4.

В этом случае можно записать

$$K(t) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(t)}{U_{\text{ВХ}}(t)}, \quad (3.13)$$

где  $U_{\text{вх}}(t)$  является единичным скачком напряжения или единичной функцией, определяемой следующим образом:

$$U_{\text{вх}}(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t \leq 0, \\ 1 & \text{при } t > 0. \end{cases} \quad (3.14)$$

Для анализа работы усилительного каскада в импульсном режиме обычно пользуются *относительной переходной характеристикой* –  $h(t)$ , определяемой как отношение  $K(t)$  к  $K_0$ :

$$h(t) = \frac{K(t)}{K_0} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(t)}{K_0 U_{\text{ВХ}}(t)}. \quad (3.15)$$

Форма переходной характеристики отличается от единичной функции более длительным временем достижения максимального значения и непостоянством во времени вершины характеристики.

При этом процесс плавного изменения вершины импульса происходит гораздо медленнее и требует существенно большего времени, чем быстрое нарастание переднего фронта импульса. Это приводит к тому, что анализ всей переходной характеристики в едином масштабе времени оказывается затруднительным. Удобнее рассматривать отдельно область *малых времён (МВ)*, где происходят быстрые изменения фронта, и область *больших времён (БВ)*, где происходят сравнительно медленные изменения вершины. Вид ПХ обусловлен *переходными искажениями*.

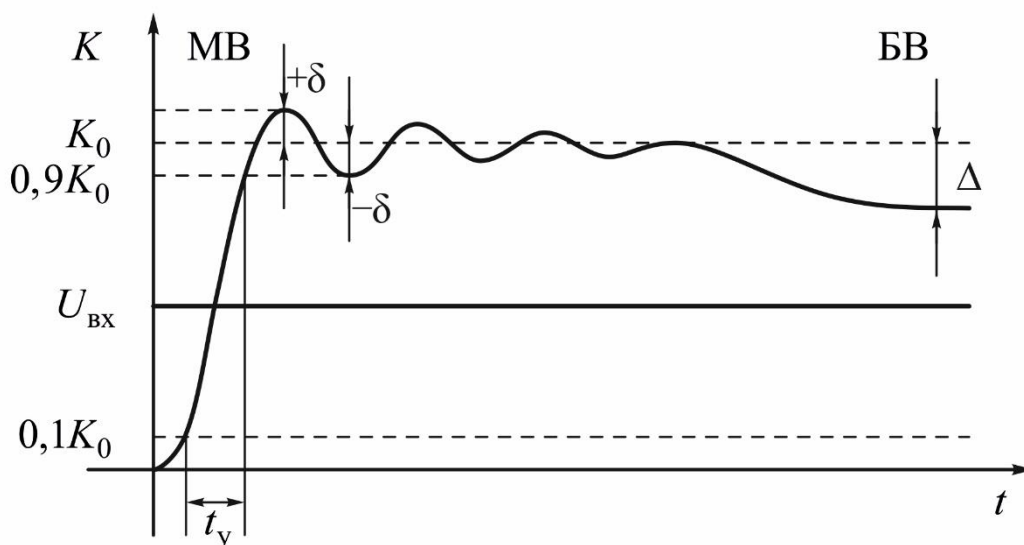


Рисунок 3.4 – Переходная характеристика

В области МВ искажения оцениваются *временем установления* переднего фронта импульса  $t_y$ , а также максимальными положительным  $+\delta$  и отрицательным  $-\delta$  *выбросами на вершине импульса*.

Параметр  $t_y$  представляет собой время, необходимое для нарастания фронта импульса от 0,1 до 0,9 установившегося значения.

Для области БВ искажения оцениваются *спадом вершины импульса*, или *сколом импульса*, –  $\Delta$ . Скол импульса определяется в момент его окончания.

Для многокаскадного усилителя общее время установления находится как корень квадратный из суммы квадратов значений времён установления для отдельных каскадов:

$$t_y = \sqrt{t_{1y}^2 + t_{2y}^2 + t_{3y}^2 + \dots + t_{ny}^2}. \quad (3.16)$$

Искажения плоской вершины импульса отдельных каскадов многокаскадного усилителя суммируются для получения общего скола вершины:

$$\Delta = \Delta_1 + \Delta_2 + \Delta_3 + \dots + \Delta_n. \quad (3.17)$$

Предварительные усилители строятся на основе биполярных или полевых транзисторов, включённых с общим эмиттером (общим истоком), общей базой (общим затвором) или общим коллектором (общим стоком).

В каскадах предварительных усилителей при отсутствии входного сигнала во входной и выходной цепях устанавливаются определённые значения постоянных токов и напряжений, такой режим работы каскада называют *статическим режимом (режимом по постоянному току, режимом покоя)*. Значения постоянных составляющих токов и напряжений определяются напряжением источников питания и сопротивлением нагрузок во входной и выходной цепях АК. Рабочая точка выбирается исходя из требуемого режима работы усилительного каскада. Существуют пять основных режимов работы усилительных каскадов:

- режим *A*;
- режим *B*;
- режим *AB*;
- режим *C*;
- режим *D*.

В предварительных усилителях преимущественно используется режим *A*.

*Режим A* – это такой режим работы усилительного каскада, при котором точка покоя расположена на середине линейного участка входной вольт-амперной характеристики АК (что обеспечивается подачей в его входную цепь необходимого тока или напряжения), а ток в выходной цепи АК протекает в течение всего периода действия сигнала, причём рабочая точка не выходит за пределы линейного участка характеристики. Диаграммы токов и напряжений для этого режима приведены на рисунке 3.5.

Достоинством режима *A* являются малые нелинейные искажения сигнала, а недостатком – сравнительно невысокие энергетические показатели. Это выражается прежде всего в сравнительно низком коэффициенте полезного действия (КПД) выходной цепи  $\eta = 50\%$ . Это означает, что только половина потребляемой выходной цепью АК мощности от источника питания преобразуется в мощность сигнала. Другая половина теряется на выходном электроде АК, вызывая его нагрев, что может вывести АК из строя.



Кроме этого, низкие энергетические показатели обусловлены тем, что выходная цепь АК потребляет мощность от источника питания не только в процессе усиления сигнала, но и при отсутствии входного сигнала.

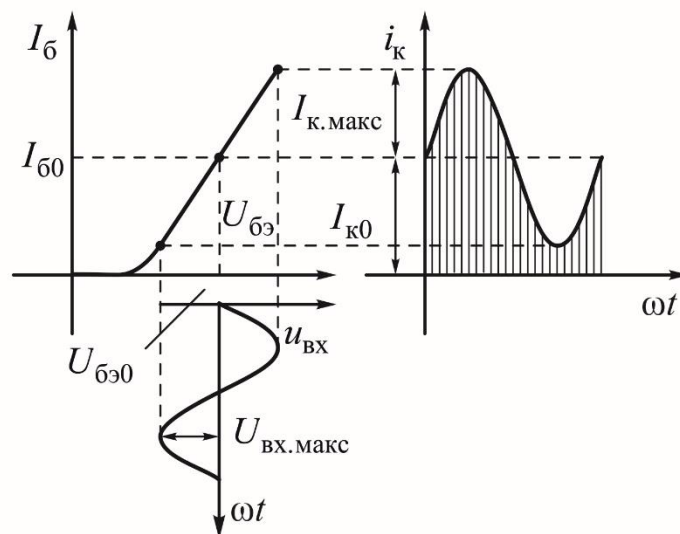


Рисунок 3.5 – Диаграммы токов и напряжений в режиме *A*

**Режим В** – это такой режим работы усилительного каскада, при котором точка покоя выбирается в начале входной вольт-амперной характеристики АК (что обеспечивается подачей соответствующего тока или напряжения смещения), а ток в выходной цепи АК протекает в течение половины периода. В режиме *B* ток покоя в выходной цепи АК равен нулю. При подаче в его входную цепь синусоидального сигнала выходной ток в режиме *B* прекратится при  $\theta = 90^\circ$  (рисунок 3.6).

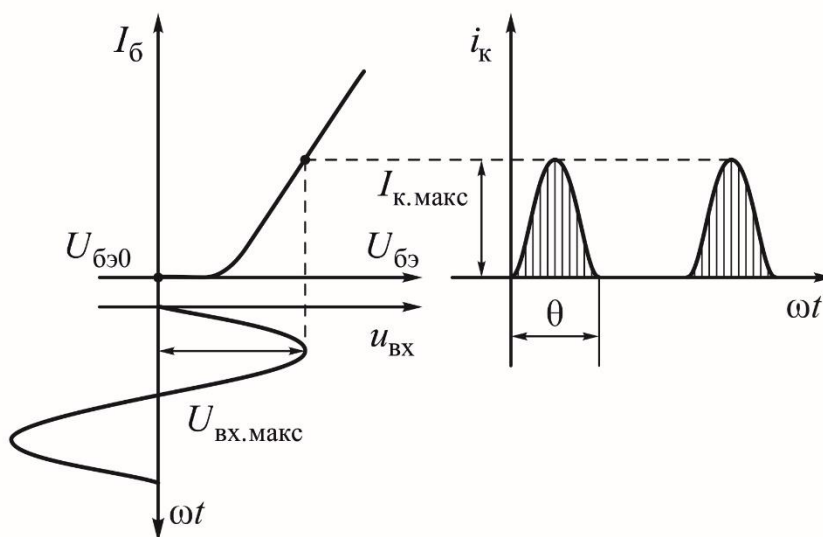


Рисунок 3.6 – Диаграммы токов и напряжений в режиме *B*

Из рисунка 3.6 следует, что при воздействии на вход АК синусоидального сигнала в режиме *B* на выходе получается только половина усиленного сигнала,

соответствующая той полярности входного сигнала, при которой АК открывается. Другая половина сигнала отсекается, что приводит к большим нелинейным искажениям. Поэтому режим *B* нельзя использовать в одноктактных каскадах аperiodических усилителей гармонических сигналов и биполярных импульсов. Его можно использовать лишь в двухтактных каскадах, которые представляют собой комбинацию двух одноктактных каскадов, образующих два плеча двухтактного каскада, работающих в противофазе.

Каждое плечо двухтактного каскада работает поочередно:

- открывается первое плечо, закрывается второе;
- открывается второе плечо, закрывается первое.

В результате на выходах плеч усилительного каскада возникают усиленные напряжения сигнала положительной и отрицательной полуволн.

Большим достоинством режима *B* являются более высокие, чем в режиме *A*, энергетические показатели. Это выражается прежде всего в более высоком КПД выходной цепи АК – порядка  $\eta = 80\%$ .

Этот режим считают экономичным ещё и потому, что в состоянии покоя усилительный каскад не потребляет мощность от источника питания. Недостатком его являются нелинейные искажения, возникающие как результат использования начального участка входной вольт-амперной характеристики АК.

**Режим АВ** – это такой режим работы усилительного каскада, при котором точка покоя выбирается в начале линейного участка входной вольт-амперной характеристики АК и ток в выходной цепи АК протекает в течение времени меньше половины периода входного сигнала (рисунок 3.7).

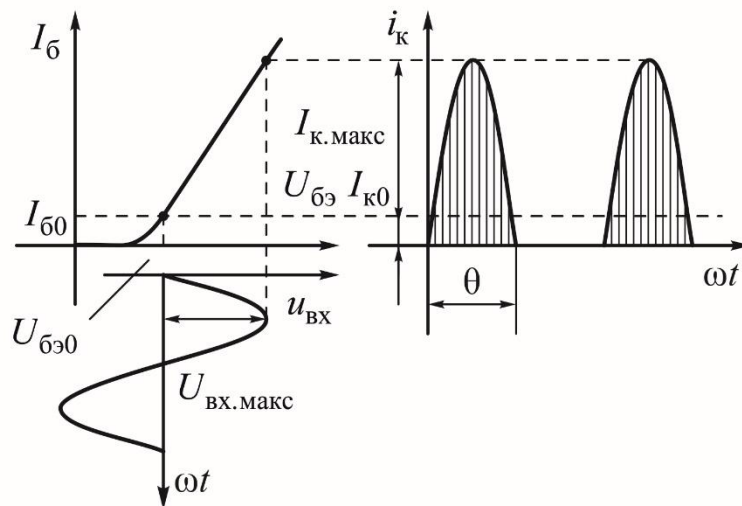


Рисунок 3.7 – Диаграммы токов и напряжений в режиме *AB*

В этом режиме угол отсечки больше  $\pi / 2$ , но меньше  $\pi$ , ток покоя АК составляет примерно 0,2...0,3 от его максимального значения. Это уменьшает нелинейные искажения, возникающие из-за нелинейности начальных участков вольт-амперных характеристик АК, а также упрощает его цепи питания.

**Режим С** – это такой режим работы усилительного каскада, при котором точка покоя находится на горизонтальной оси левее точки пересечения входной вольт-амперной характеристики АК с горизонтальной осью, а ток в выходной цепи при отсутствии входных сигналов или при малой их величине равен нулю. В режиме С угол отсечки выходного тока  $\theta$  меньше  $\pi / 2$  (рисунок 3.8). В аperiodических усилителях гармонических сигналов или двухполярных импульсов в режиме С нельзя получить на выходе сигнал той же формы, что и на входе даже при использовании двухтактных каскадов. Поэтому в аperiodических усилителях гармонических сигналов или биполярных импульсов режим С не применяется.

При аperiodическом усилении его можно использовать лишь в одноктактных каскадах для усиления только однополярных прямоугольных импульсов с постоянной амплитудой (или однополярных прямоугольных импульсов с разными амплитудами, если не требуется сохранять пропорциональность выходных и входных импульсов).

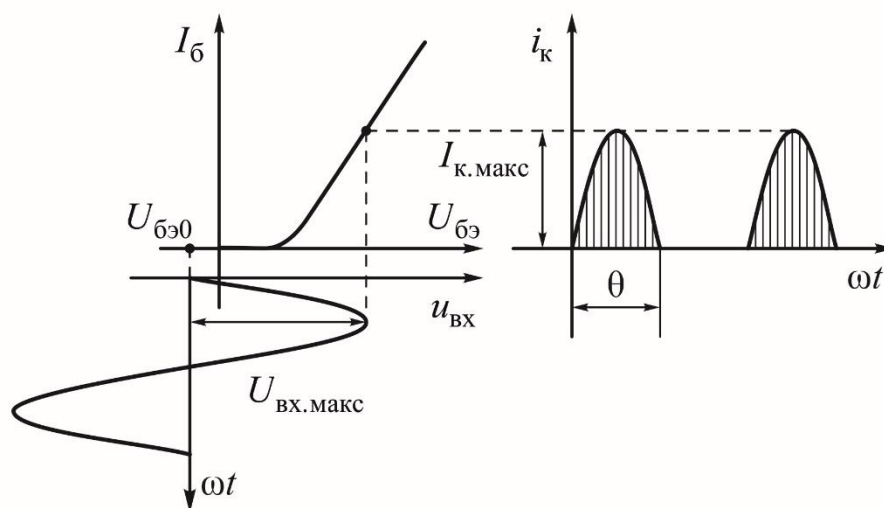


Рисунок 3.8 – Диаграммы токов и напряжений в режиме С

В то же время нет препятствий для применения режима С в каскадах избирательного усиления гармонических сигналов в узкой полосе частот. Частотно-избирательная нагрузка этих каскадов, например, параллельный резонансный контур, выделяет из импульсов выходного тока АК практически неискажённую первую гармонику, являющуюся усиленным сигналом.

Разложив в ряд Фурье импульсы выходного тока АК, можно показать, что отношение амплитуды первой гармоники выходного тока  $I_{1m}$  (усиленного сигнала) к среднему значению тока  $i_{ввых.ср}$  будет больше, чем в режиме В. Поэтому КПД выходной цепи АК в режиме С оказывается ещё больше, чем в экономичном режиме В, и увеличивается с уменьшением угла отсечки  $\theta$ , достигая 80 и более процентов. Режим С экономичнее режима В в состоянии ожидания сигнала, так

как ток покоя при этом отсутствует. Режим *C* нашёл широкое применение в однотактных и двухтактных каскадах мощных усилителей радиочастоты, избирательные системы которых выделяют полезный сигнал и подавляют все высшие гармоники.

**Режим *D*** – это такой режим, при котором АК во время работы может находиться только в двух состояниях – **полностью открытым**, когда ток в его выходной цепи максимальный, а напряжение между выходными электродами близко к нулю, либо – **полностью закрытым**, когда ток в его выходной цепи близок к нулю, а напряжение между выходными электродами максимально и близко к напряжению источника питания.

Достоинством этого режима работы является очень высокий КПД выходной цепи АК (близкий к 100 %). Режим *D* можно использовать для усиления прямоугольных импульсов произвольной длительности и скважности с ограничением их по максимуму: напряжение усиленных импульсов на выходе АК оказывается практически равным напряжению источника питания и не зависит от амплитуды входных импульсов. При необходимости использования режима *D* для усиления гармонических сигналов нужно этими сигналами модулировать по длительности прямоугольные импульсы постоянной амплитуды, усилить и преобразовать в первоначальный сигнал. Теоретические основы усилительных устройств более подробно изложены в источнике [1].

Для нормальной работы усилительного каскада при усилении сигналов необходимо задать рабочую точку АК. Для задания рабочей точки используются следующие методы:

- фиксированным током базы;
- фиксированным напряжением база – эмиттер (затвор – исток);
- автосмещением.

Метод задания рабочей точки фиксированным током базы реализует схема, представленная на рисунке 3.9.

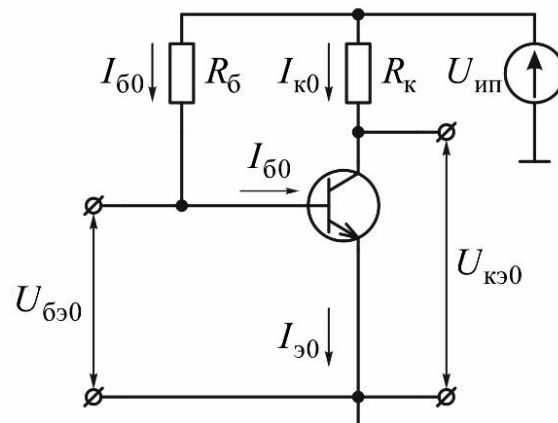


Рисунок 3.9 – Электрическая схема для задания рабочей точки фиксированным током базы

В этой схеме напряжение смещения поступает от общего источника питания с помощью резистора  $R_6$ . Ток смещения  $I_{60}$  здесь практически не зависит от свойств самого АК, изменяющихся под влиянием дестабилизирующих факторов, и определяется напряжением источника питания  $U_{\text{ип}}$  и сопротивлением резистора смещения  $R_6$ :

$$U_{6\text{э}0} = U_{\text{ип}} - I_{60}R_6, \text{ следовательно, } R_6 = \frac{U_{\text{ип}} - U_{6\text{э}0}}{I_{60}}. \quad (3.18)$$

Из-за большой нестабильности тока  $I_{к0}$  эта схема не применяется в серийных изделиях. Её можно использовать лишь в лабораторных условиях при подборе сопротивления резистора смещения для каждого экземпляра АК.

Другой простейшей нестабилизированной схемой подачи смещения от общего источника питания является схема смещения фиксированным напряжением  $U_{6\text{э}0}$  (рисунок 3.10). В ней напряжение смещения получают с помощью делителя питающего напряжения в цепи базы АК.

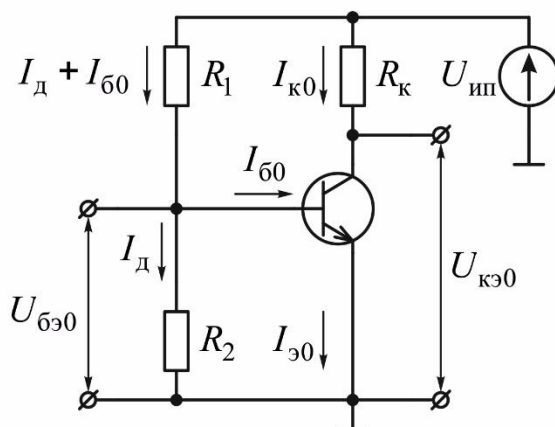


Рисунок 3.10 – Электрическая схема для задания рабочей точки фиксированным напряжением база – эмиттер

В этой схеме при токе делителя  $I_д$ , значительно большем тока смещения  $I_{60}$  ( $I_д = 5...10I_{60}$ ), напряжение смещения не зависит от свойств АК и определяется напряжением источника питания и сопротивлениями делителя:

$$U_{6\text{э}0} = U_{\text{ип}} - (I_{60} + I_д)R_1. \quad (3.19)$$

Эта схема более стабильна, однако её применение также ограничивается лишь лабораторными условиями.

В схемах на полевых транзисторах задание положения рабочей точки на передаточной характеристике, а соответственно и тока  $I_{с0}$ , обеспечивается подачей на затвор напряжения смещения  $U_{зп0}$ . В таких схемах задача определения рабочей точки решается одновременно с задачей её стабилизации. Питание цепи

затвора со стабилизацией осуществляется от общего источника питания. На рисунке 3.11 представлена наиболее типичная схема однотактного каскада на полевом транзисторе с управляющим  $p-n$ -переходом, включённым с общим истоком и работающим в режиме  $A$  с автоматическим смещением, обеспечивающим стабильность тока  $I_{c0}$ .

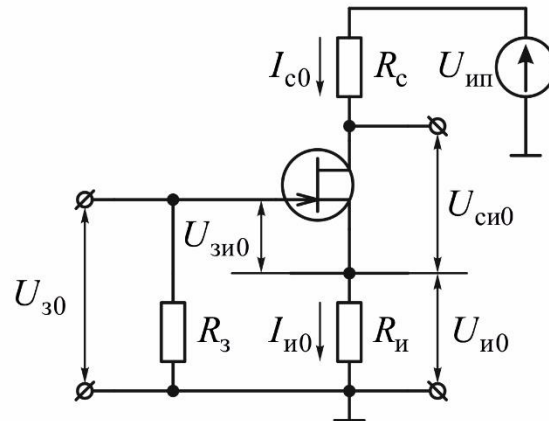


Рисунок 3.11 – Электрическая схема для задания рабочей точки автоматическим смещением

Напряжение смещения на затворе относительно истока  $U_{зи0}$  в этой схеме определяется падением напряжения на сопротивлении резистора  $R_{и}$ , создаваемым током истока  $I_{и0}$ , поскольку на резисторе в цепи затвора  $R_3$ , создающем гальваническую связь затвора с общим проводом, практически нет падения напряжения, так как ток затвора очень мал.

Сопротивление резистора в цепи затвора  $R_3$  обычно выбирают довольно большим, порядка 1 МОм, чтобы уменьшить шунтирование им входа полевого транзистора по сигналу. Сопротивление же резистора в цепи истока  $R_{и}$  в схеме выбирают таким, чтобы задать положение точки покоя в середине линейного участка передаточной характеристики.

В данной схеме с помощью резистора  $R_{и}$  не только задают исходное смещение на затворе, а значит, и значение тока стока  $I_{c0}$ , но и обеспечивают его температурную стабилизацию. Механизм стабилизации тока стока  $I_{c0}$  связан с механизмом автоматического смещения: при увеличении тока стока  $I_{c0}$  автоматически возрастает напряжение смещения, что сдерживает возрастание тока стока  $I_{c0}$ . Значение сопротивления резистора  $R_{и}$  должно удовлетворять двум условиям:

- условию получения начального напряжения смещения  $U_{зи0}$ ;
- условию получения требуемой глубины отрицательной обратной связи (ООС) по постоянному току для стабилизации.

Если для обеспечения требуемой глубины ООС необходимо большее значение сопротивления резистора  $R_{и}$ , то его увеличивают, а напряжение смещения подбирают с помощью делителя напряжения (рисунок 3.12).

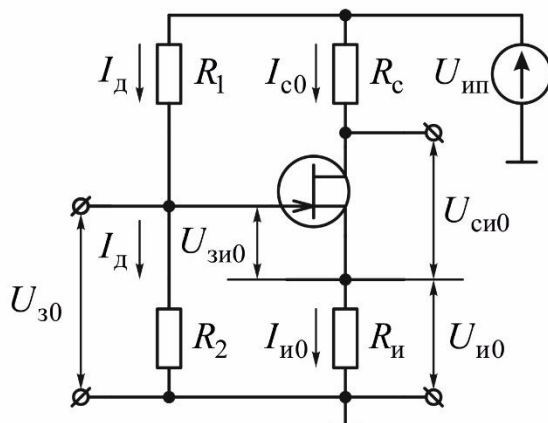


Рисунок 3.12 – Электрическая схема для задания рабочей точки фиксированным напряжением затвор – исток

Особый интерес представляют схемы автоматического смещения, в которых в цепи истока вместо обычного резистора используют генератор стабильного тока (ГСТ), как представлено на рисунке 3.13. В качестве ГСТ выступает транзистор  $VT_2$  совместно с резистором  $R_{и}$ . Особенностью ГСТ является небольшое сопротивление постоянному току и одновременно большое динамическое сопротивление, т. е. сопротивление переменному току.

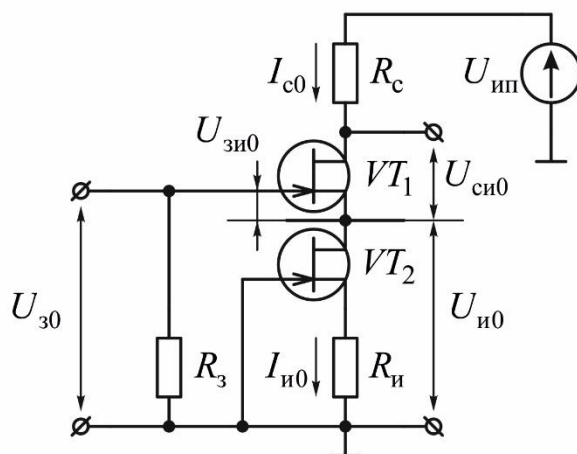


Рисунок 3.13 – Электрическая схема для задания рабочей точки автоматическим смещением на основе источника тока



Использование ГСТ позволяет при небольших потерях на нем питающего напряжения получить глубокую ООС в схеме автоматического смещения для стабилизации.

В схемах на полевых МДП-транзисторах применяются практически такие же цепи смещения, как и в схемах на полевых транзисторах с  $p-n$ -переходом. Надо только учитывать особенности МДП-транзисторов, в которых с возрастанием температуры ток стока  $I_{c0}$  может увеличиваться, уменьшаться или оставаться прежним. Кроме того, для МДП-транзисторов со встроенным каналом напряжение смещения  $U_{зи0}$  может быть отрицательным, нулевым или положительным. При этом полярность напряжения на затворе может совпадать с полярностью питающего напряжения на стоке, как для МДП-транзисторов с индуцированным каналом. Это позволяет получать напряжение смещения от общего источника питания с помощью резисторного делителя в цепи затвора как без стабилизации (рисунок 3.14), так и со стабилизацией (рисунок 3.15).

Для схемы, представленной на рисунке 3.14, напряжение затвор – исток определяется выражением

$$U_{зи0} = U_{ип} - I_d R_1, \quad (3.20)$$

а для схемы, представленной на рисунке 3.15, напряжение затвор – исток определяется выражением

$$U_{зи0} = U_{ип} - I_c R_c - I_d R_1. \quad (3.21)$$

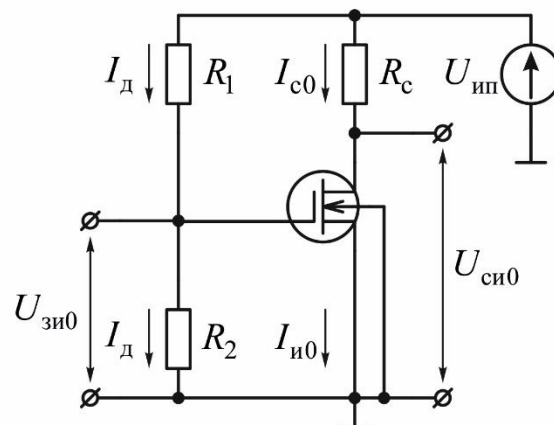


Рисунок 3.14 – Электрическая схема для задания рабочей точки фиксированным напряжением затвор – исток



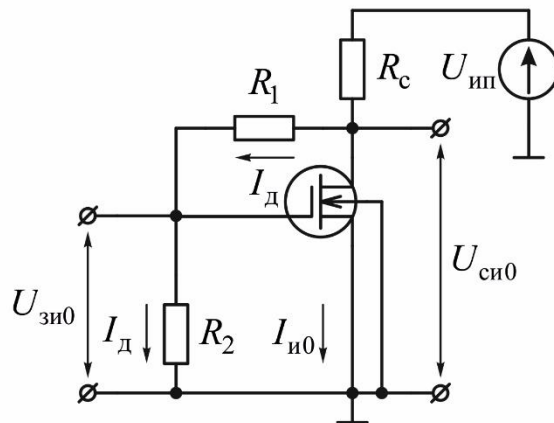


Рисунок 3.15 – Электрическая схема для задания рабочей точки фиксированным напряжением затвор – исток со стабилизацией

Стабилизация положения рабочей точки АК в усилительных каскадах на биполярных транзисторах обеспечивается следующими методами:

- эмиттерной стабилизацией;
- коллекторной стабилизацией;
- комбинированной стабилизацией.

Наиболее широкое применение в электронике получили электрические схемы с эмиттерной стабилизацией, в которых рабочая точка задана с помощью делителя напряжения. На рисунке 3.16 представлена схема на биполярном транзисторе, включённом с общим эмиттером, с эмиттерной стабилизацией.

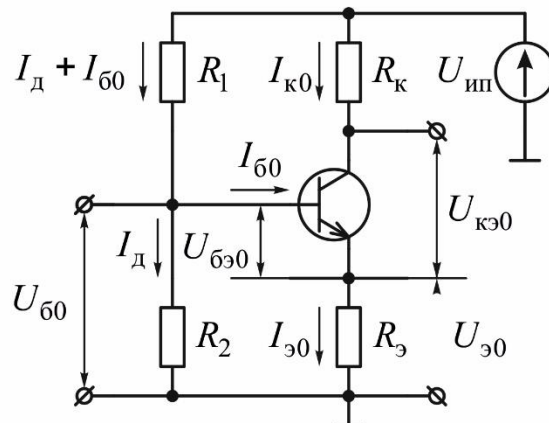


Рисунок 3.16 – Электрическая схема с эмиттерной стабилизацией рабочей точки

В этой схеме напряжение смещения  $U_{бэ0}$  и ток смещения  $I_{б0}$  получают от источника питания с помощью делителя сопротивлений  $R_1, R_2$  и резистора в цепи эмиттера  $R_э$ :

$$U_{бэ0} = U_{\text{ип}} - (I_{б0} + I_{д})R_1 - (I_{к0} + I_{б0})R_э, \quad (3.22)$$

откуда

$$I_{б0} = \frac{U_{\text{ип}} - U_{бэ0} - I_{д}R_1 - I_{к0}R_э}{R_1 + R_э}. \quad (3.23)$$

В этих уравнениях Кирхгофа заключается принцип действия стабилизации: при увеличении тока коллектора  $I_{к0}$  напряжение и ток смещения  $U_{бэ0}$  и  $I_{б0}$  уменьшаются, что препятствует увеличению тока коллектора  $I_{к0}$ , и наоборот – при уменьшении тока коллектора  $I_{к0}$  напряжение и ток смещения  $U_{бэ0}$  и  $I_{б0}$  увеличиваются, что тоже препятствует уменьшению тока коллектора  $I_{к0}$ .

Другой стабилизированной электрической схемой подачи смещения является более простая, но менее эффективная схема подачи смещения с коллекторной стабилизацией (рисунок 3.17).

В этой схеме напряжение смещения  $U_{бэ0}$  и ток смещения  $I_{б0}$  получаются с помощью резистора смещения  $R_б$  от питающего напряжения на коллекторе  $U_{кэ0}$ , зависящего от тока коллектора  $I_{к0}$ :

$$U_{бэ0} = U_{\text{ип}} - (I_{к0} + I_{б0})R_к - I_{б0}R_б, \quad (3.24)$$

откуда

$$I_{б0} = \frac{U_{\text{ип}} - U_{бэ0} - I_{к0}R_б}{R_б + R_к}. \quad (3.25)$$

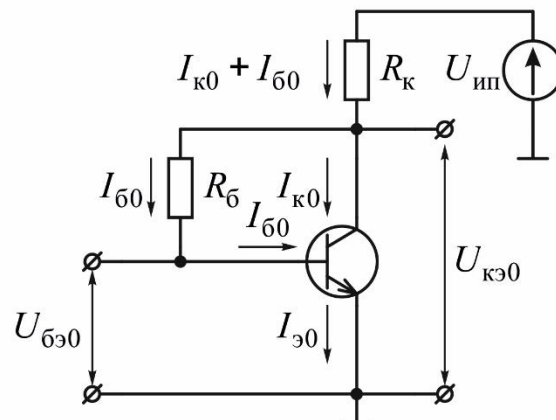


Рисунок 3.17 – Электрическая схема с коллекторной стабилизацией рабочей точки

В полученных уравнениях заключается принцип действия стабилизации для данной схемы: при увеличении тока коллектора  $I_{к0}$  напряжение и ток смещения  $U_{бэ0}$  и  $I_{б0}$  уменьшаются, что препятствует увеличению тока коллектора  $I_{к0}$ , и наоборот – при уменьшении тока коллектора  $I_{к0}$  напряжение и ток смещения  $U_{бэ0}$  и  $I_{б0}$  увеличиваются, что препятствует уменьшению тока коллектора  $I_{к0}$ .

Наибольшую стабильность тока коллектора  $I_{к0}$  обеспечивает электрическая схема подачи смещения с комбинированной стабилизацией, в которой объединены оба рассмотренных вида стабилизации (рисунок 3.18).

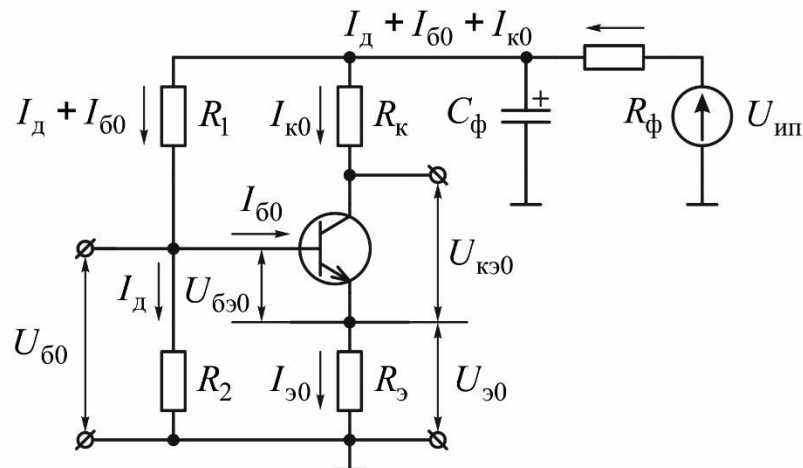


Рисунок 3.18 – Электрическая схема с комбинированной стабилизацией рабочей точки

В этой схеме элементом эмиттерной стабилизации является резистор  $R_3$ , а элементом коллекторной стабилизации – сопротивление резистора развязывающего (и сглаживающего) фильтра  $R_ф C_ф$ . Значение сопротивления резистора выбирается при расчёте фильтра с учётом допустимых потерь на нем питающего напряжения. Выбор резисторов  $R_3, R_1, R_2$  производится так же, как при эмиттерной стабилизации.

Комбинированная стабилизация применяется в каскадах как на дискретных компонентах, так и в интегральном исполнении.

### 3.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы

1 Математический анализ предварительного усилителя (далее усилителя) в САПР *OrCAD* необходимо проводить по постоянному (*Bias Point*) и переменному (*AC Sweep*) току. Для этого необходимо создать принципиальную электрическую схему исследуемого устройства путём создания проекта в приложении *Capture CIS Lite*. В качестве источника питания использовать источник *VDC*. В качестве источника сигнала использовать источник *VAC*.

Для выполнения анализа по переменному току необходимо задать параметры анализа *AC Sweep*, установив изменение частоты сигнала по декадам в диапазоне от 1 до  $10^9$  Гц и 10 точек на декаду.

Для оценки влияния значений параметров элементов электрической схемы усилителя и температуры на параметры исследуемого устройства необходимо использовать многовариантный анализ *Parametric* и температурный анализ *Temperature*. При выполнении измерений параметров усилителя целесообразно использовать маркерные измерения. Более подробно порядок работы в САПР *OrCAD* изложен в источнике [2].

2 Исследование амплитудной характеристики усилителя необходимо проводить на фиксированной частоте входного сигнала с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рисунке 3.19.

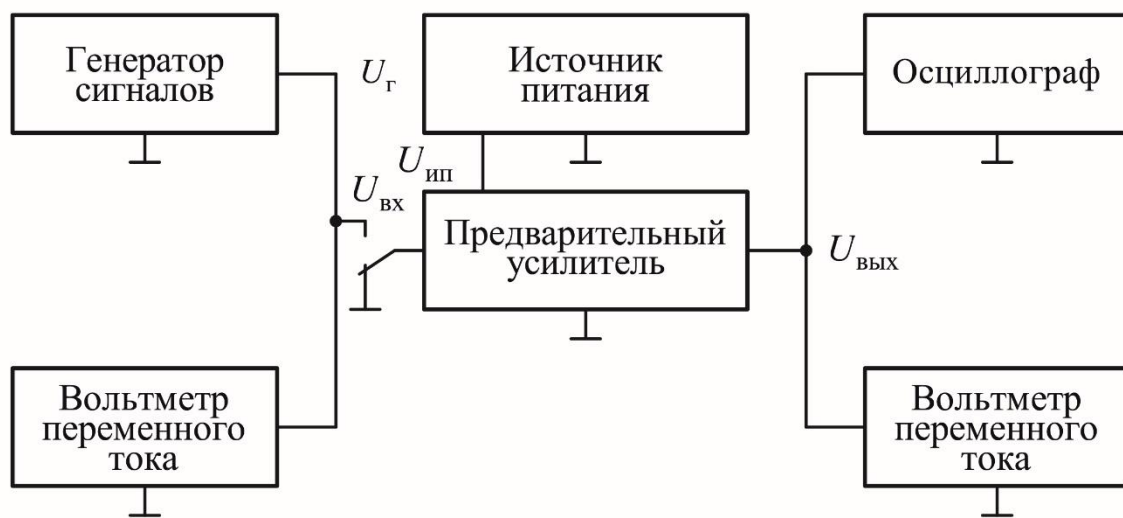


Рисунок 3.19 – Структурная схема лабораторной установки для исследования характеристик усилителя

Закоротить вход усилителя и с помощью вольтметра переменного тока, подключённого к выходу усилителя, измерить действующее напряжение шумов  $U_{ш}$ , при этом можно считать, что  $U_{вых. мин} = 2U_{ш}$ .

Переключить вход усилителя к выходу генератора сигналов и с помощью органов управления установить синусоидальный сигнал частотой  $f = 1$  кГц и минимальной амплитудой. Увеличивая напряжение сигнала на входе усилителя, добиться такого его уровня, при котором действующее значение напряжения выходного сигнала достигнет значения  $U_{вых. мин} = 2U_{ш}$ . С помощью вольтметра, подключённого ко входу усилителя, измерить  $U_{вх. мин}$ , соответствующее полученному значению  $U_{вых. мин}$ . Продолжая увеличивать напряжение сигнала на входе усилителя, добиться такого его уровня, при котором начинает искажаться

форма гармонического сигнала на выходе усилителя, контролируемая с помощью осциллографа.

Искажение формы сигнала проявляется в виде асимметрий верхней и нижней полуволн, в ограничении верхней или нижней полуволн сигнала и т. д.

При измерении напряжений входного и выходного сигналов также необходимо помнить, что вольтметры переменного тока предназначены для измерений действующего значения напряжения, а при использовании осциллографа можно измерить как действующее, так и амплитудное значение переменного напряжения. При выполнении измерений параметров усилителя с помощью осциллографа также целесообразно использовать маркерные измерения.

3 Исследование АЧХ необходимо проводить при фиксированной амплитуде входного сигнала, выбранной на линейном участке АХ  $U_{\text{вх}} = (0,1 \dots 0,3) U_{\text{вх. макс}}$ , с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рисунке 3.19.

Для упрощения расчётов коэффициента усиления по напряжению целесообразно выбрать целые значения действующего напряжения входного сигнала, например, 1, 5, 10 мВ.

Поскольку исследуемые усилители имеют полосу пропускания в несколько декад (декада – диапазон изменения некоторой величины, на границах которого её значения отличаются в 10 раз), при экспериментальном исследовании АЧХ и построении графиков необходимо по оси частот использовать логарифмический масштаб.

Измерения для АЧХ следует проводить в девяти точках на каждую декаду. Например: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 Гц; 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 Гц; 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000 Гц и т. д. Значения нижней  $f_{\text{н}}$  и верхней  $f_{\text{в}}$  граничных частот необходимо определять экспериментально по уменьшению уровня выходного напряжения или коэффициента усиления на 3 дБ по сравнению с их максимальными значениями в области средних частот (на частоте  $f = 1 \text{ кГц}$ ).

4 Измерения входного и выходного сопротивлений усилителя проводятся на фиксированной частоте входного сигнала ( $f = 1 \text{ кГц}$ ) при уровне входного сигнала, соответствующего линейному участку АХ, с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рисунке 3.20.

Входное сопротивление  $R_{\text{вх}}$  измеряется косвенным методом. Дополнительный резистор  $R_{\text{Г}}$  на входе усилителя и входное сопротивление усилительного каскада  $R_{\text{вх}}$  образуют делитель напряжения, для которого справедливо равенство

$$\frac{U_{\text{Г}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_{\text{Г}} + R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}}, \quad (3.26)$$

где  $U_{\text{Г}}$  – напряжение на выходе генератора сигналов;

$U_{\text{вх}}$  – напряжение непосредственно на входе усилителя.

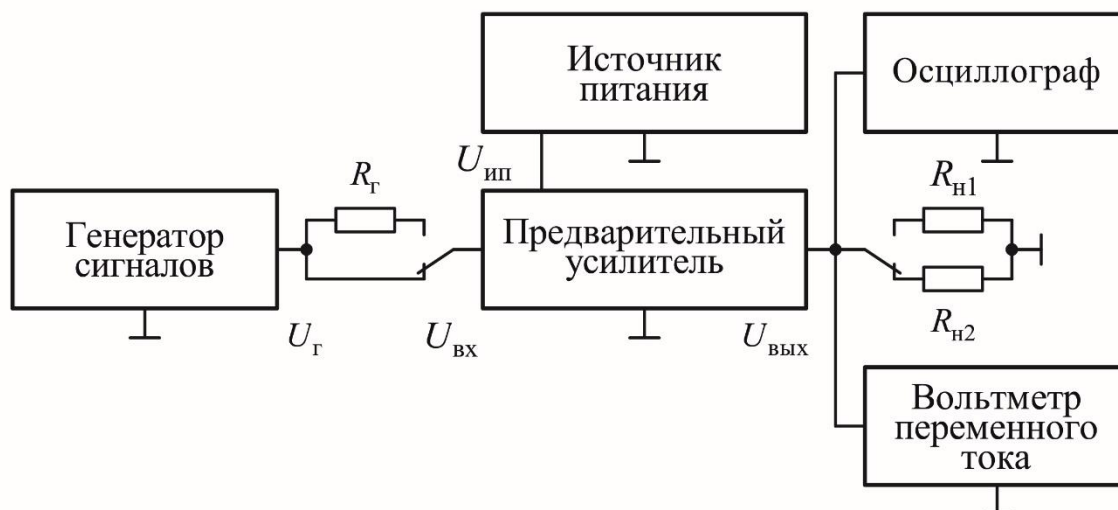


Рисунок 3.20 – Структурная схема лабораторной установки для измерений параметров усилителя

Можно измерить напряжения  $U_{\Gamma}$  и  $U_{\text{вх}}$ , а входное сопротивление рассчитать по выражению

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}} R_{\Gamma}}{U_{\Gamma} - U_{\text{вх}}}. \quad (3.27)$$

При высоком входном сопротивлении усилителя, когда оно соизмеримо со входным сопротивлением вольтметра, измеряют выходное напряжение  $U_{\text{вых}R}$  (при наличии добавочного резистора  $R_{\Gamma}$ ) и  $U_{\text{вых}0}$  (при его отсутствии) (см. рисунок 3.20). В этом случае входное сопротивление рассчитывается по выражению

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вых}R} R_{\Gamma}}{U_{\text{вых}0} - U_{\text{вых}R}}. \quad (3.28)$$

При выполнении лабораторной работы рекомендуется использовать в качестве дополнительного резистор с сопротивлением  $R_{\Gamma} = 1$  кОм.

Выходное сопротивление  $R_{\text{вых}}$  также измеряется косвенным методом, согласно которому проводятся измерения выходных напряжений  $U_{\text{вых}1}$  и  $U_{\text{вых}2}$  при двух известных сопротивлениях нагрузки  $R_{\text{н}1}$  и  $R_{\text{н}2}$  соответственно (см. рисунок 3.20). Значение выходного сопротивления рассчитывается по выражению

$$R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}1} - U_{\text{вых}2}}{\frac{U_{\text{вых}2}}{R_{\text{н}2}} - \frac{U_{\text{вых}1}}{R_{\text{н}1}}}. \quad (3.29)$$

При выполнении работы рекомендуется использовать в качестве нагрузки сопротивления  $R_{\text{н}1} = 2,2$  кОм и  $R_{\text{н}2} = 4,3$  кОм.

### 3.4 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Получить у преподавателя индивидуальное задание для выполнения лабораторной работы, которое содержит принципиальную электрическую схему усилителя и исходные данные для расчёта значений параметров её основных элементов.

2 Выполнить предварительный расчёт электрической схемы усилителя аналитическим методом [3; 4]. После расчёта значений параметров элементов схемы (резисторов и конденсаторов) необходимо выбрать их номинальные значения согласно рядам ГОСТ 28884 – 90. Значения параметров резисторов выбирать из ряда, соответствующего допустимому отклонению  $\pm 5\%$ , а параметров конденсаторов –  $\pm 20\%$ . При проведении всех последующих расчётов оперировать только номинальными значениями. Результаты расчётов свести в таблицу.

3 Выполнить анализ усилителя в САПР *OrCAD* по постоянному току. Для оценки эффективности температурной стабилизации положения рабочей точки АК измерить значения постоянных токов и напряжений в узлах схемы для температур 27 и 77 °С. Сравнить результаты измерений с результатами теоретических расчётов, выполненных в пункте 2.

4 Выполнить анализ усилителя в САПР *OrCAD* по переменному току. Построить частотные зависимости модулей и фаз коэффициентов усиления по напряжению и току. С использованием полученных зависимостей определить полосу пропускания усилителя и значения модулей коэффициентов усиления по напряжению и по току на средней частоте полосы пропускания. Сравнить результаты измерений с результатами теоретических расчётов, выполненных в пункте 2.

5 Исследовать в САПР *OrCAD* влияние значений параметров основных элементов принципиальной электрической схемы на АЧХ усилителя (перечень элементов определяется заданием).

6 Собрать электрическую схему усилителя с использованием дискретных элементов на макетной плате *Wish Board 502-L* для проведения экспериментальных исследований. Допускается использование функционального модуля предварительного усилителя.

7 Подключить к усилителю радиоизмерительные приборы в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 3.19.

В качестве источника питания использовать источник постоянного тока *GW Instek GPS-2303*, в качестве генератора сигналов – генератор сигналов произвольной формы *Tektronix AFG3000*, в качестве осциллографа – цифровой запоминающий осциллограф *Tektronix TDS3052C*, в качестве вольтметра переменного напряжения на входе – мультиметр *Agilent 34410A*, в качестве вольтметра переменного напряжения на выходе – источник-измеритель *Keithley 2401* (допускается измерение переменного напряжения на выходе с использованием осциллографа с помощью маркерных измерений).

В данном пункте задания и далее допускается использование других типов радиоизмерительных приборов, имеющих аналогичные технические параметры.

С помощью органов управления источника постоянного тока *GW Instek GPS-2303* установить требуемое напряжение питания  $U_{\text{пит}}$ . Измерить с помощью вольтметра постоянного тока постоянные напряжения на электродах АК. Для этого использовать мультиметр *APPA-109N* в режиме измерения постоянного напряжения. Рассчитать значения постоянных токов и напряжений в узлах схемы.

8 Экспериментально исследовать АХ усилителя. Для этого необходимо выполнить измерения напряжений входного и выходного сигналов в соответствии с методикой (см. пункт 2 подраздела 3.3). Построить амплитудную характеристику в *Microsoft Excel*. С использованием полученной зависимости рассчитать коэффициент усиления по напряжению для линейного участка АХ и динамический диапазон усилителя  $D$ .

В данном пункте и далее графики необходимо строить в отдельной координатной системе, размеры области построения – лист формата А4.

9 Экспериментально исследовать АЧХ усилителя. Для этого необходимо выполнить измерения напряжений входного и выходного сигналов в соответствии с методикой (см. пункт 3 подраздела 3.3). Построить частотную зависимость модуля коэффициента усиления по напряжению в *Microsoft Excel*. С использованием полученной зависимости рассчитать полосу пропускания усилителя  $\Delta f$  и значение модуля коэффициента усиления по напряжению  $|K_{\text{н}}|$  на средней частоте полосы пропускания.

10 Подключить к усилителю радиоизмерительные приборы в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 3.20, и экспериментально определить входное  $R_{\text{вх}}$  и выходное  $R_{\text{вых}}$  сопротивления усилителя. Для этого необходимо выполнить измерения выходного напряжения в соответствии с методикой (см. пункт 4 подраздела 3.3).

По полученным экспериментальным данным рассчитать входное  $R_{\text{вх}}$  и выходное  $R_{\text{вых}}$  сопротивления усилителя. Сравнить результаты расчётов по полученным экспериментальным данным с результатами теоретических расчётов, выполненных в пункте 2.

В данном пункте необходимо использовать радиоизмерительные приборы, указанные в пункте 7 подраздела 3.4.

11 Рассчитать значение коэффициента усиления по мощности  $K_{\text{м}}$  по полученным в ходе эксперимента значениям  $U_{\text{вх}}$  и  $U_{\text{вых}}$ .

### 3.5 Содержание отчёта

- 1 Титульный лист.
- 2 Цель лабораторной работы.
- 3 Принципиальная электрическая схема исследуемого усилителя.
- 4 Электрические параметры и вольт-амперные характеристики используемого АК.
- 5 Таблицы с результатами расчётов.



- 6 Таблицы с результатами экспериментов.
- 7 Графики характеристик.
- 8 Выводы.

### **3.6 Контрольные вопросы**

- 1 Что представляет собой АХ усилителя?
- 2 В чём заключается методика измерений входного и выходного сопротивления усилителя?
- 3 Что представляет собой динамический диапазон усилителя и как он определяется?
- 4 В чём заключается методика измерений АЧХ?
- 5 Перечислите способы температурной стабилизации рабочей точки АК усилителя.
- 6 Что представляет собой ФЧХ усилителя?
- 7 Покажите пути протекания постоянных токов в схеме с фиксированным током базы.
- 8 Что представляет собой АЧХ усилителя?
- 9 Перечислите способы задания рабочей точки АК усилителя.
- 10 В чём заключается методика измерений АХ?
- 11 Перечислите типы обратных связей в усилителях.
- 12 Покажите на входных и выходных характеристиках АК, как располагается рабочая точка по постоянному току для различных режимов работы.
- 13 Что представляет собой ПХ усилителя?
- 14 Объясните принцип действия электрической схемы с эмиттерной стабилизацией режима работы АК по постоянному току.
- 15 Какие элементы электрической схемы усилителя определяют его входное сопротивление?
- 16 Поясните принцип действия электрической схемы с коллекторной стабилизацией режима работы АК по постоянному току.
- 17 Какими преимуществами обладают усилители на полевых транзисторах по сравнению с усилителями на биполярных транзисторах?
- 18 Какой параметр усилителя определяет наклон его АХ?
- 19 Как влияет уменьшение сопротивления нагрузки усилителя на его коэффициент усиления по напряжению?
- 20 Поясните принцип действия усилителя на полевом транзисторе.
- 21 Покажите пути протекания постоянных токов в схеме с эмиттерной стабилизацией.
- 22 Как влияет увеличение ёмкости разделительного конденсатора на АЧХ усилителя?
- 23 В чём заключается назначение конденсатора в эмиттерной цепи усилителя?
- 24 Поясните принцип действия усилителя на биполярном транзисторе.
- 25 Какие параметры биполярного транзистора определяют коэффициент усиления по мощности усилительного каскада?

## 4 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ

### 4.1 Цель работы

- 1 Изучить основные характеристики и параметры усилителей мощности.
- 2 Изучить типовые электрические схемы усилителей мощности и режимы работы их усилительных каскадов.
- 3 Изучить графоаналитический метод расчёта усилительных каскадов усилителей мощности.
- 4 Исследовать режимы работы, основные характеристики и параметры усилителей мощности различных типов путём математического моделирования в САПР *OrCAD*.
- 5 Экспериментально исследовать режимы работы, основные характеристики и параметры усилителей мощности различных типов.

### 4.2 Краткие теоретические сведения

Усилители мощности являются выходными устройствами для усиления электрических сигналов и предназначены для передачи в нагрузку заданной мощности при высоком КПД и допустимых значениях коэффициентов линейных и нелинейных искажений. В своём составе они имеют предоконечные и окончные каскады усиления, а также часто и входной усилительный каскад, охваченные общей отрицательной обратной связью по постоянному и переменному току.

Оконечные каскады предназначены для обеспечения на выходе усилителя (на нагрузке) необходимой мощности или напряжения сигнала при допустимом уровне линейных и нелинейных искажений. Предоконечные каскады обеспечивают необходимую мощность или напряжение на входе окончного каскада, обеспечивая его нормальное функционирование.

Предоконечные и окончные каскады могут строиться как по одноконтурной, так и по двухконтурной схемам в зависимости от предъявляемых к усилителю требований. Двухконтурная схема по сравнению с одноконтурной обладает рядом преимуществ по сравнению с одноконтурной схемой:

- удвоенной выходной мощностью;
- меньшим значением коэффициента нелинейных искажений за счёт полной или частичной компенсации чётных гармоник;
- высоким коэффициентом полезного действия.

Основными параметрами усилителей мощности являются:

- коэффициенты усиления (передачи);
- входное и выходное сопротивления;
- полоса пропускания;
- коэффициенты нелинейных и линейных искажений.

Основными характеристиками предварительных усилительных каскадов являются:

- амплитудная характеристика;
- амплитудно-частотная характеристика;

- фазочастотная характеристика.
- переходная характеристика.

Более подробно о параметрах и характеристиках усилителей говорится в разделе 3.

В информационно-измерительных системах преимущественно используются бестрансформаторные схемы усилителей мощности, обладающие широкой полосой пропускания, малыми линейными и нелинейными искажениями сигналов, малыми габаритами и массой. Принцип построения бестрансформаторных усилителей соответствует требованиям интегральной технологии и используется для создания аналоговых интегральных микросхем.

Однотактные схемы усилительных каскадов усилителей мощности работают в режиме  $A$ , рабочая точка выбирается на середине линейного участка входной и выходной вольт-амперных характеристик АК (более подробное описание режимов работы усилительных каскадов приводится в разделе 3). Недостатком однотактной схемы является низкий КПД.

Двухтактные схемы усилительных каскадов усилителей мощности работают в режиме  $B$  или  $AB$  и позволяют получить существенно большие значения выходной мощности и более высокий КПД. Однако недостатком таких схем являются большие значения коэффициентов нелинейных искажений.

На практике широко применяются схемы с параллельным управлением однофазным напряжением на комплементарной паре биполярных транзисторов  $n-p-n$  и  $p-n-p$ -типа, включённых по схеме с общим коллектором. Вариант с двухполярным питанием (рисунок 4.1) позволяет подключить нагрузку непосредственно к выходу оконечного каскада. Оконечный каскад этого усилителя выполнен по двухтактной схеме, обеспечивающей работу транзистора в режиме  $B$  с высоким КПД.

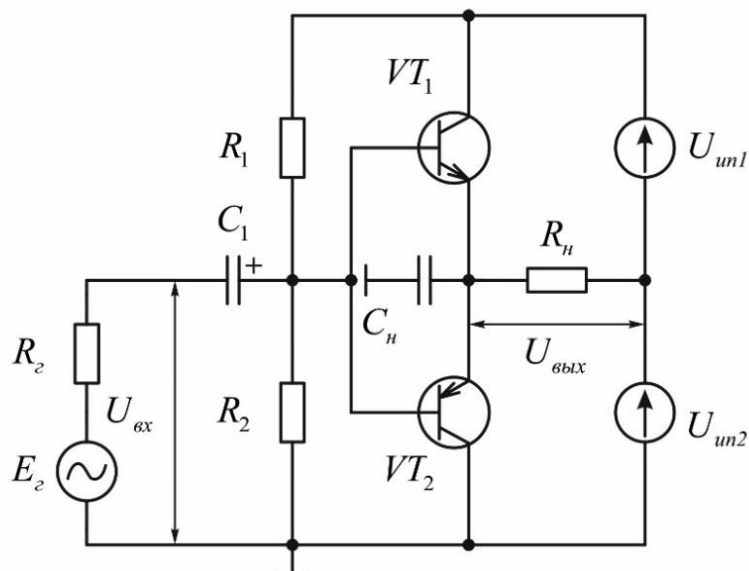


Рисунок 4.1 – Электрическая схема оконечного каскада усилителя мощности с двухполярным питанием

При действии на вход положительной полуволны сигнала открывается транзистор  $VT_1$ , при этом транзистор  $VT_2$  закрывается. При действии на вход отрицательной полуволны сигнала открывается уже транзистор  $VT_2$ , а транзистор  $VT_1$  закрывается, т. е. транзисторы  $VT_1$  и  $VT_2$  работают попеременно, каждый в течение одного полупериода входного сигнала. При отсутствии сигнала на входе оба транзистора закрыты. Следовательно, схема имеет ток покоя коллектора  $I_{к0}$  каждого из транзисторов, близкий к нулю, что характерно для режима  $B$ . Расчёт режима работы транзисторов, двухтактного оконечного каскада производится графоаналитическим методом на одно плечо, а результаты расчёта распространяются на оба плеча [3].

При однополярном питании оконечного каскада усилителя мощности (рисунок 4.2) нагрузка в виде резистора  $R_n$  подключается через разделительный конденсатор  $C_2$ . При действии на вход положительной полуволны сигнала открывается транзистор  $VT_1$ , и ток коллектора этого транзистора, протекающий через резистор  $R_n$ , заряжает конденсатор  $C_2$  до значения напряжения  $U_{инп} / 2$ . При действии на вход отрицательной полуволны сигнала транзистор  $VT_1$  закрывается, при этом источник питания  $U_{инп}$  отключается от эмиттера транзистора  $VT_2$ , а заряженный конденсатор  $C_2$  выступает в качестве источника питания для транзистора  $VT_2$ , который открывается под действием отрицательной полуволны входного сигнала.

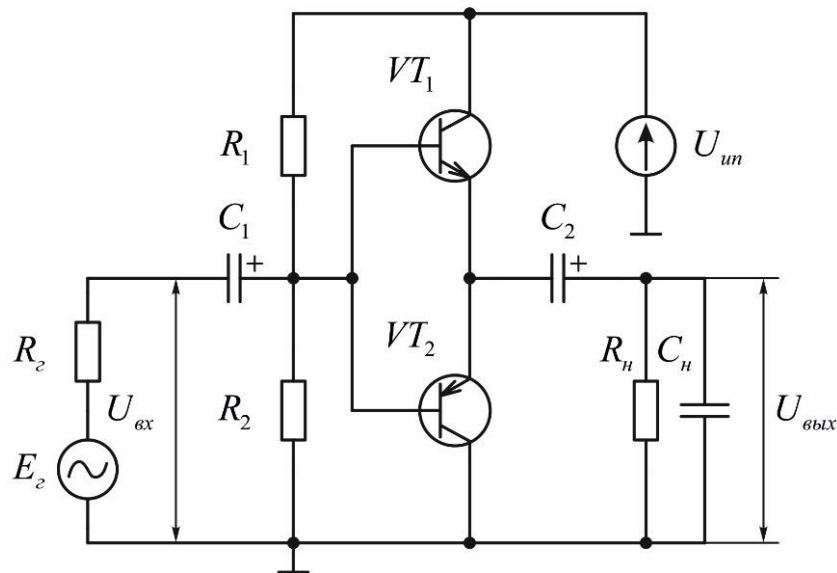


Рисунок 4.2 – Электрическая схема оконечного каскада усилителя мощности с однополярным питанием

Как было отмечено ранее, существенным недостатком в работе таких схем оконечных каскадов являются высокие нелинейные искажения. Для уменьшения их в двухтактных оконечных каскадах чаще используют режим  $AB$  (см. раздел 3).

Упрощённые электрические схемы усилителей мощности на основе двухтактной схемы окончного каскада с двухполярным и однополярным питанием представлены на рисунках 4.3 и 4.4. Для возбуждения окончного каскада используется обычный резистивный каскад на биполярном транзисторе  $VT_3$ , включённом по схеме с общим эмиттером и работающим в режиме  $A$ . Для задания режима  $AB$  окончного каскада на резисторе  $R_3$  формируются напряжения смещения  $U_{бэ1}$  и  $U_{бэ2}$  для транзисторов  $VT_1$  и  $VT_2$  за счёт протекания постоянной составляющей коллекторного тока  $VT_3$ .

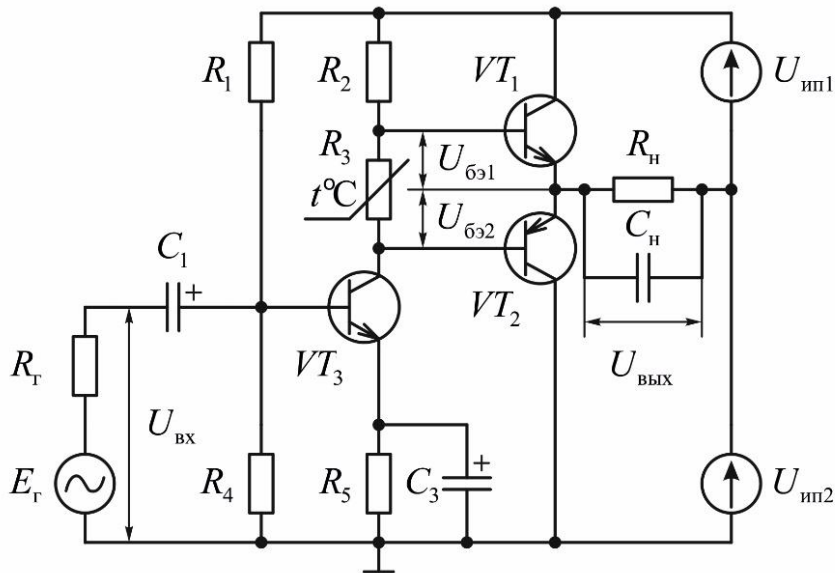


Рисунок 4.3 – Электрическая схема усилителя мощности с двухполярным питанием

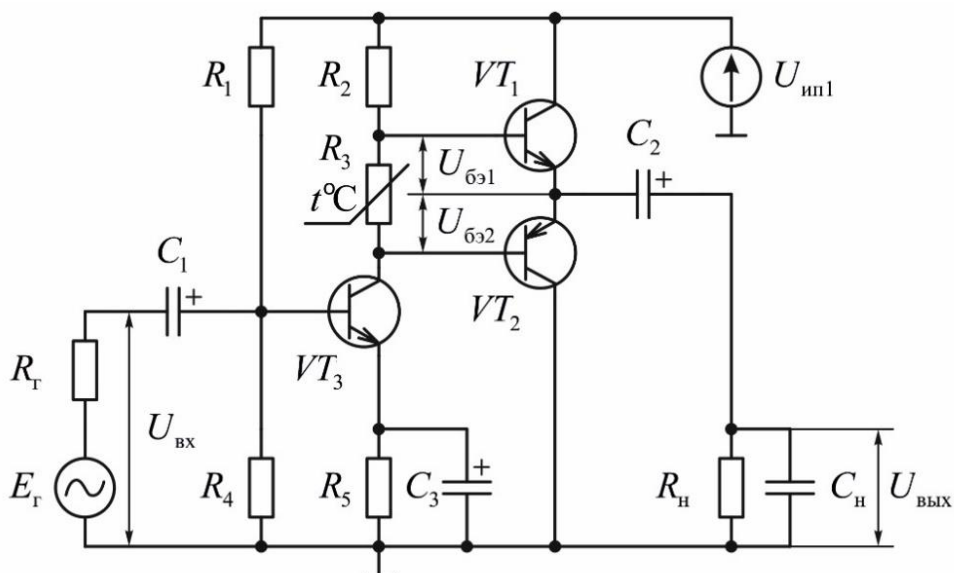


Рисунок 4.4 – Электрическая схема усилителя мощности с однополярным питанием

Для обеспечения температурной стабилизации положения рабочей точки транзисторов окончного каскада в качестве резистора  $R_3$  часто применяют терморезистор с отрицательным температурным коэффициентом сопротивления, который помещают на общий теплоотвод транзисторов  $VT_1$  и  $VT_2$ . Лучшие результаты в части температурной стабилизации рабочей точки транзисторов окончных каскадов даёт применение в качестве регулирующего элемента полупроводниковых приборов (диодов или транзисторов в диодном включении). В основе этого метода лежит температурная зависимость прямой ветви вольт-амперной характеристики  $p$ - $n$ -перехода, которая характеризуется отрицательным температурным коэффициентом и позволяет в идеальном случае осуществить полную компенсацию температурного дрейфа рабочей точки (рисунок 4.5).

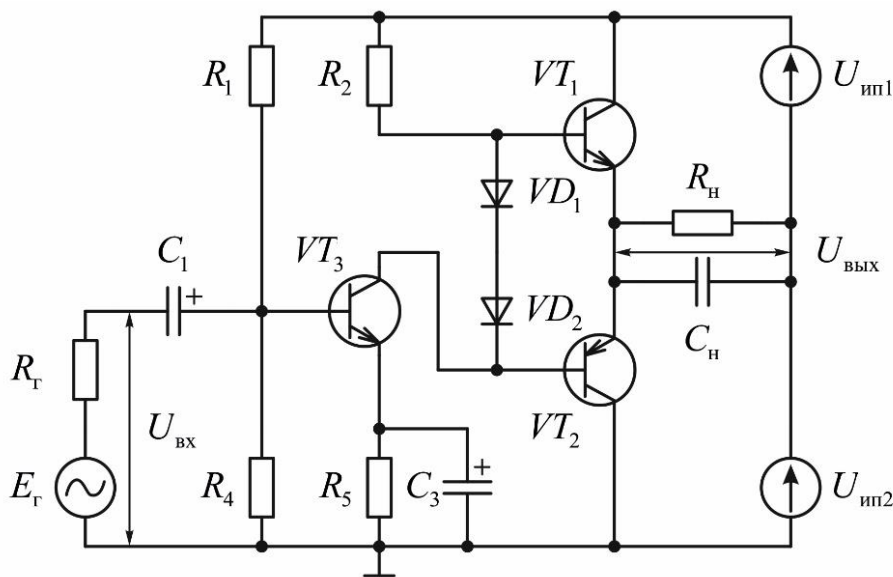


Рисунок 4.5 – Электрическая схема усилителя мощности с однополярным питанием и термостабилизацией на основе диодов

В любом из рассмотренных ранее вариантов схем можно образовать окончный каскад на паре составных транзисторов (рисунок 4.6). В этой схеме пара выходных мощных транзисторов  $VT_2$  и  $VT_5$  – транзисторы одного типа, а пара транзисторов сравнительно малой мощности  $VT_1$  и  $VT_4$  – комплементарные транзисторы. Плечо выходного каскада на транзисторах  $VT_1$  и  $VT_2$   $n$ - $p$ - $n$  типа, образующих составной транзистор  $n$ - $p$ - $n$  типа, представляет собой сдвоенный эмиттерный повторитель. Плечо выходного каскада на транзисторах  $VT_4$  и  $VT_5$  разного типа образующих комплементарный составной транзистор  $p$ - $n$ - $p$  типа, представляет собой сдвоенную схему с общим эмиттером со 100%-й обратной связью (последовательной по напряжению).

Параметры этих плеч соответствуют друг другу, так как сдвоенная схема с ОЭ со 100%-й обратной связью и сдвоенный эмиттерный повторитель характеризуется совпадающими по фазе выходным и входным напряжениями сигнала,

малым выходным и высоким входным сопротивлениями и коэффициентом передачи напряжения, близким к единице.

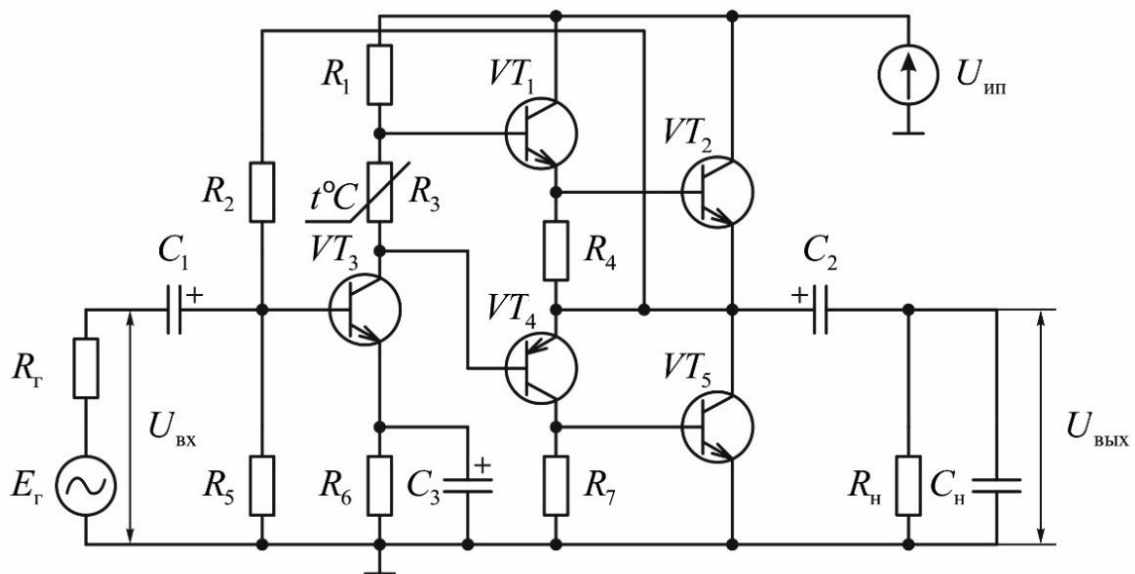


Рисунок 4.6 – Электрическая схема усилителя мощности на основе составных транзисторов

Резисторы  $R_4$  и  $R_7$  между базой и эмиттером выходных транзисторов улучшают температурную стабильность их режима. Сопротивления этих резисторов выбирают примерно в 5...10 раз больше значений входного сопротивления переменному току транзисторов  $VT_2$  и  $VT_5$  при максимальном входном сигнале.

На практике получили широкое применение схемы усилителей мощности на основе мощных полевых транзисторов. На рисунке 4.7 представлена электрическая схема оконечного каскада усилителя мощности на основе комплементарных МДП-транзисторов, включённых с общим истоком.

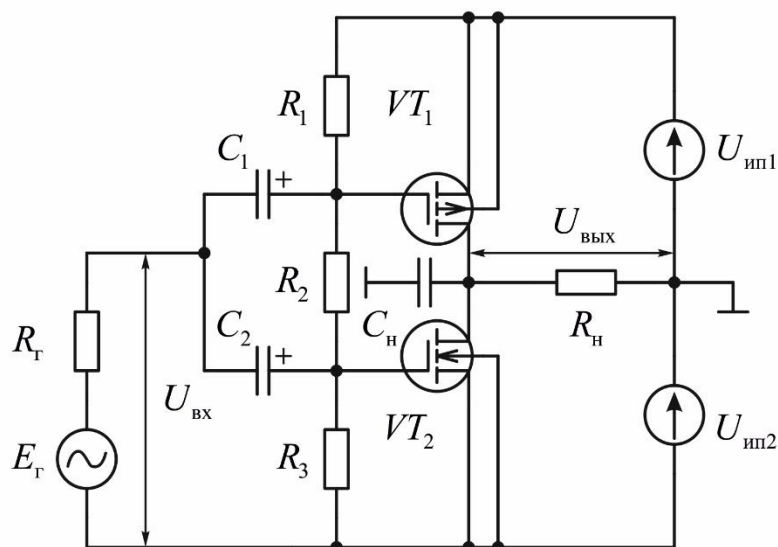


Рисунок 4.7 – Электрическая схема усилителя мощности на основе полевых МДП-транзисторов, включённых с общим истоком

Необходимое смещение для транзисторов  $VT_1$  и  $VT_2$ , являющихся мощными полевыми транзисторами с индуцированным каналом, обеспечивается за счёт резисторов  $R_1$  и  $R_3$ . Резистор  $R_2$  задаёт необходимый ток делителя. Эта схема имеет достаточно большой коэффициент усиления, но обладает и высоким выходным сопротивлением. Если транзисторы включить с общим стоком, как это представлено на рисунке 4.8, то благодаря глубокой отрицательной обратной связи можно получить заметно меньшие искажения и понизить выходное сопротивление.

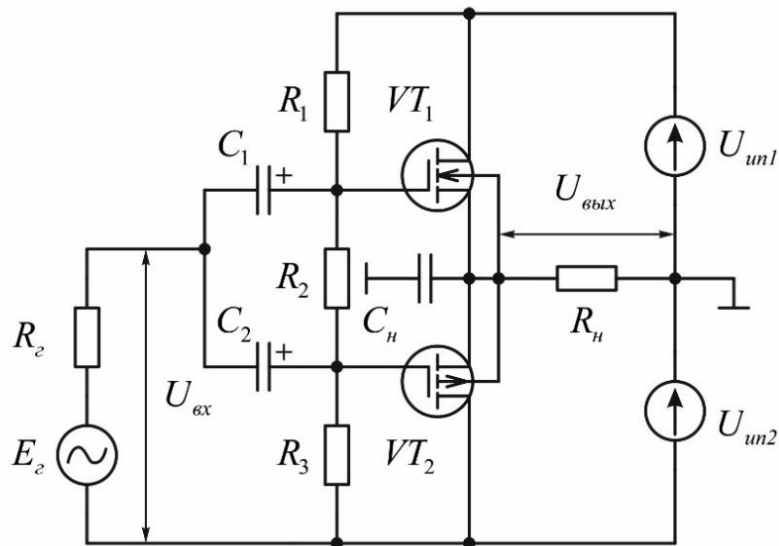


Рисунок 4.8 – Электрическая схема усилителя мощности на основе полевых МДП-транзисторов, включённых с общим стоком

Однако коэффициент усиления данной схемы становится меньше единицы и поэтому требует большого напряжения возбуждения. В данном случае напряжение смещения  $2U_{зи0}$  для обоих транзисторов создаётся за счёт падения напряжения на резисторе  $R_2$ , и уже резисторы  $R_1$  и  $R_3$  задают ток данного делителя напряжения. Поскольку мощные МДП-транзисторы с каналом  $p$ -типа распространены гораздо реже, чем с каналом  $n$ -типа, то и применение таких схем ограничено.

Предоконечные усилительные каскады усилителей мощности также могут быть построены на основе мощных полевых транзисторов. И в тех случаях, когда оконечные каскады строятся по схемам повторителей, нелинейные искажения всего усилителя будут определяться главным образом предоконечным каскадом. При этом он должен обеспечивать значительную амплитуду сигнала на выходе. В этом случае используются полевые транзисторы с высоколинейной передаточной характеристикой. На рисунках 4.9 и 4.10 представлены типовые схемы усилителей мощности с предоконечным усилительным каскадом на мощном полевом транзисторе с индуцированным каналом. В представленных схемах исполь-



зуется принцип «вольтодобавки». Это предполагает подачу выходного напряжения усилителя на часть стокового резистора предоконечного каскада (точка соединения  $R_1$  и  $R_2$ ) через конденсатор  $C_1$ , что позволяет увеличить амплитуду выходного напряжения этого каскада практически в 2 раза и полностью раскачать окончательный каскад.

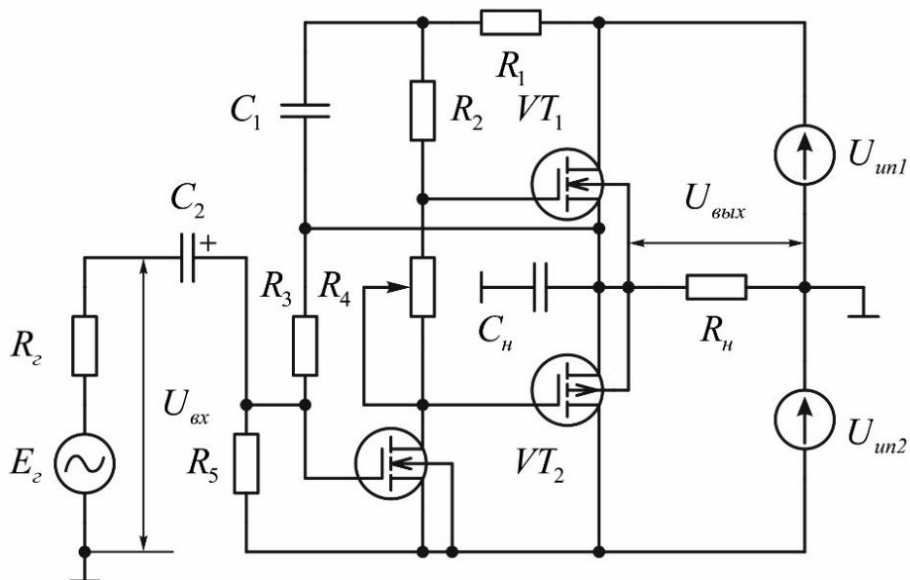


Рисунок 4.9 – Электрическая схема усилителя мощности на основе комплементарных полевых МДП-транзисторов

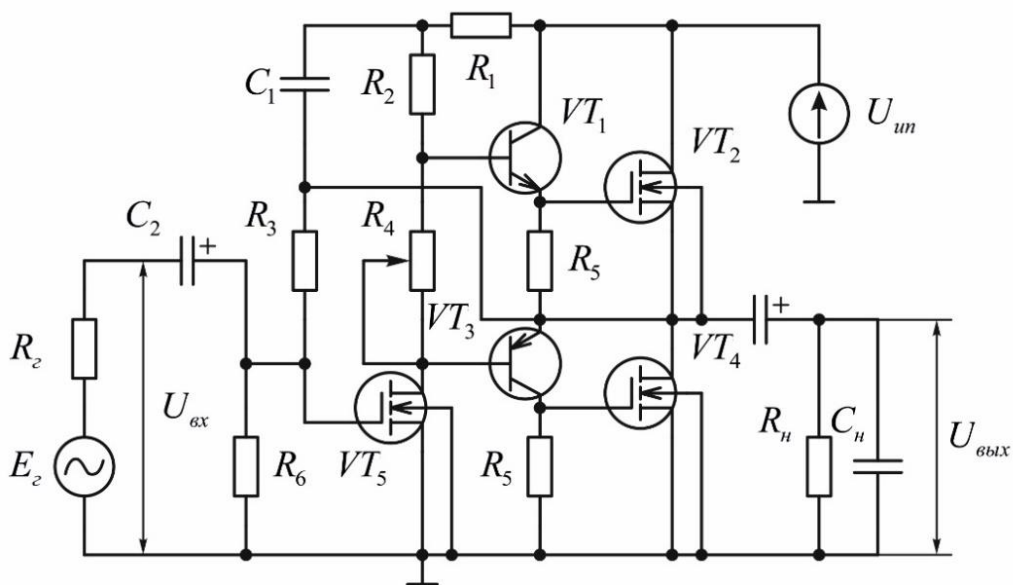


Рисунок 4.10 – Электрическая схема усилителя мощности на основе квазикомплементарных полевых МДП-транзисторов

Описанные типовые электрические схемы усилительных каскадов являются основой для построения усилителей мощности. Они, как правило, содержат

ещё цепи стабилизации рабочей точки, линейризующие цепи, а также цепи обратной связи.

#### 4.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы

1 Математический анализ усилителя мощности (далее усилителя) в САПР *OrCAD* необходимо проводить по постоянному (*Bias Point*) и переменному (*AC Sweep*) току. Для этого необходимо создать принципиальную электрическую схему исследуемого устройства путём создания проекта в приложении *Capture CIS Lite*. В качестве источника питания использовать источник *VDC*. В качестве источника сигнала использовать источник *VAC*.

Для выполнения анализа по переменному току необходимо задать параметры анализа *AC Sweep*, установив изменение частоты сигнала по декадам в диапазоне от 1 до  $10^9$  Гц и 10 точек на декаду.

Для оценки влияния значений параметров элементов электрической схемы усилителя и температуры на параметры исследуемого устройства необходимо использовать многовариантный анализ *Parametric* и температурный анализ *Temperature*. При выполнении измерений параметров усилителя целесообразно использовать маркерные измерения. Более подробно порядок работы в САПР *OrCAD* изложен в источнике [2].

2 Исследование амплитудной характеристики усилителя необходимо проводить на фиксированной частоте входного сигнала с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рисунке 4.11.

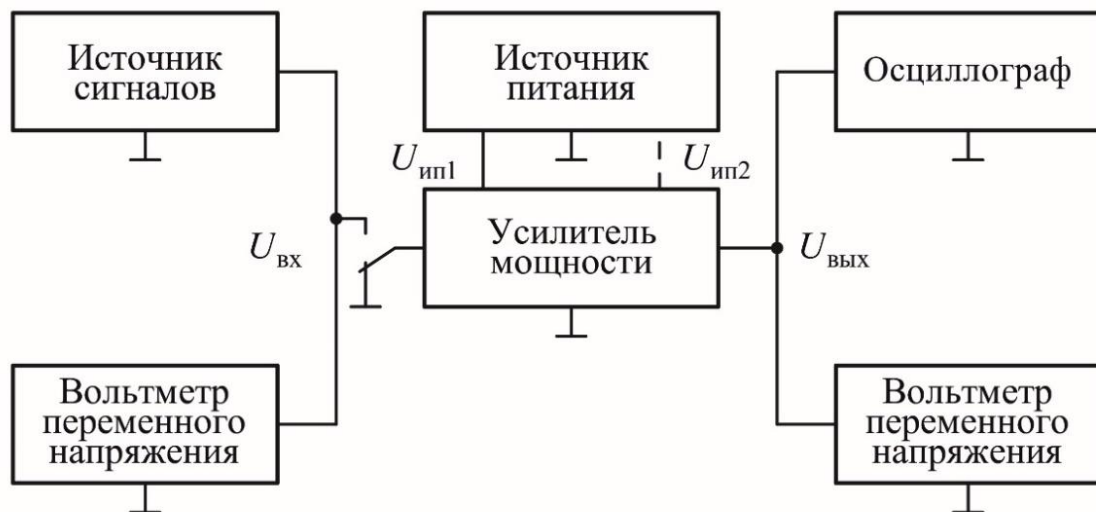


Рисунок 4.11 – Структурная схема лабораторной установки

Закоротить вход усилителя и с помощью вольтметра переменного напряжения, подключённого к выходу усилителя, измерить действующее напряжение шумов  $U_{ш}$ , при этом будем считать  $U_{вых. мин} = 2U_{ш}$ .

Переключить вход усилителя к выходу генератора сигналов и с помощью органов его управления установить синусоидальный сигнал частотой  $f = 1$  кГц

и минимальной амплитудой. Увеличивая напряжение сигнала на входе усилителя, добиться такого его уровня, при котором действующее значение напряжения выходного сигнала достигнет значения  $U_{\text{вых. мин}} = 2U_{\text{ш}}$ . С помощью вольтметра, подключённого ко входу усилителя, измерить  $U_{\text{вх. мин}}$ , соответствующее полученному значению  $U_{\text{вых. мин}}$ . Продолжая увеличивать напряжение сигнала на входе усилителя, добиться такого его уровня, при котором начинает искажаться форма гармонического выходного сигнала, контролируемая с помощью осциллографа.

Искажение формы сигнала проявляется в виде асимметрий верхней и нижней полуволн, в ограничении верхней или нижней полуволн сигнала и т. д.

При измерении напряжений входного и выходного сигналов также необходимо помнить, что вольтметры переменного тока предназначены для измерений действующего значения напряжения, а при использовании осциллографа можно измерить как действующее, так и амплитудное значение переменного напряжения. При выполнении измерений параметров усилителя с помощью осциллографа также целесообразно использовать маркерные измерения.

3 Исследование АЧХ необходимо проводить при фиксированной амплитуде входного сигнала, выбранной на середине линейного участка АХ с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рисунке 4.11.

Для упрощения расчётов коэффициента усиления по напряжению целесообразно выбрать целые значения действующего напряжения входного сигнала, например, 1, 5, 10 мВ.

Поскольку исследуемые усилители имеют полосу пропускания в несколько декад (декада – диапазон изменения некоторой величины, на границах которого её значения отличаются в 10 раз), при экспериментальном исследовании АЧХ и построении графиков необходимо по оси частот использовать логарифмический масштаб.

Измерения для АЧХ следует проводить в девяти точках на каждую декаду. Например: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 Гц; 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 Гц; 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000 Гц и т. д. Значения нижней  $f_{\text{н}}$  и верхней  $f_{\text{в}}$  граничных частот необходимо определять экспериментально по уменьшению уровня выходного напряжения или коэффициента усиления на 3 дБ по сравнению с их максимальными значениями в области средних частот (на частоте  $f = 1$  кГц).

4 Измерения входного и выходного сопротивлений усилителя проводятся на фиксированной частоте входного сигнала ( $f = 1$  кГц) при уровне входного сигнала, соответствующем середине линейного участка АХ, с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рисунке 4.12.

Входное сопротивление  $R_{\text{ВХ}}$  измеряется косвенным методом. Добавочный резистор  $R_{\Gamma}$  на входе усилителя и входное сопротивление усилительного каскада  $R_{\text{ВХ}}$  образуют делитель напряжения, для которого справедливо равенство

$$\frac{U_{\Gamma}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{R_{\Gamma} + R_{\text{ВХ}}}{R_{\text{ВХ}}}, \quad (4.1)$$

где  $U_{\Gamma}$  – напряжение на выходе генератора низких частот;

$U_{\text{ВХ}}$  – напряжение непосредственно на входе усилителя.

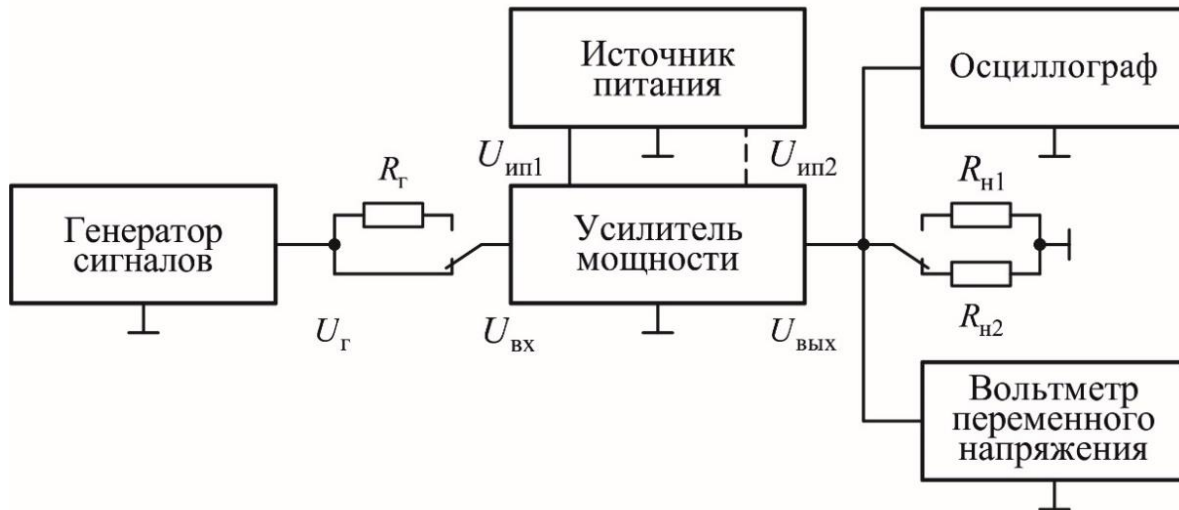


Рисунок 4.12 – Структурная схема лабораторной установки для измерений параметров усилителя мощности

Можно измерить напряжения  $U_{\Gamma}$  и  $U_{\text{ВХ}}$ , а входное сопротивление рассчитать по выражению

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}} R_{\Gamma}}{U_{\Gamma} - U_{\text{ВХ}}}. \quad (4.2)$$

При высоком входном сопротивлении усилителя, когда оно соизмеримо со входным сопротивлением вольтметра, измеряют выходное напряжение  $U_{\text{ВЫХ}R}$  (при наличии добавочного резистора  $R_{\Gamma}$ ) и  $U_{\text{ВЫХ}0}$  (при его отсутствии) (рисунок 4.12). В этом случае входное сопротивление рассчитывается по выражению

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}R} R_{\Gamma}}{U_{\text{ВЫХ}0} - U_{\text{ВЫХ}R}}. \quad (4.3)$$

При выполнении лабораторной работы рекомендуется использовать в качестве добавочного резистор с сопротивлением  $R_{\Gamma} = 510 \text{ Ом}$ .

Выходное сопротивление  $R_{\text{ВЫХ}}$  также измеряется косвенным методом, согласно которому проводятся измерения выходных напряжений  $U_{\text{ВЫХ}1}$  и  $U_{\text{ВЫХ}2}$

при двух известных сопротивлениях нагрузки  $R_{н1}$  и  $R_{н2}$  соответственно (см. рисунок 4.12).

Значение выходного сопротивления рассчитывается по выражению

$$R_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}1} - U_{\text{вых}2}}{\frac{U_{\text{вых}2}}{R_{н2}} - \frac{U_{\text{вых}1}}{R_{н1}}}. \quad (4.4)$$

При выполнении работы рекомендуется использовать нагрузки с сопротивлениями  $R_{н1} = 100 \text{ Ом}$  и  $R_{н2} = 51 \text{ Ом}$ .

#### 4.4 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Получить у преподавателя индивидуальное задание для выполнения лабораторной работы, которое содержит принципиальную электрическую схему усилителя и исходные данные для расчёта значений параметров её основных элементов.

2 Выполнить предварительный расчёт электрической схемы усилителя графоаналитическим методом [3; 4]. После расчёта значений параметров элементов схемы (резисторов и конденсаторов) необходимо выбрать их номинальные значения согласно рядам ГОСТ 28884 – 90. Значения параметров резисторов выбирать из ряда, соответствующего допустимому отклонению  $\pm 5 \%$ , а параметров конденсаторов –  $\pm 20 \%$ . При проведении всех последующих расчётов оперировать только номинальными значениями. Результаты расчёта занести в таблицу.

3 Выполнить анализ усилителя в САПР *OrCAD* по постоянному току. Для оценки эффективности температурной стабилизации положения рабочей точки АК измерить значения постоянных токов и напряжений в узлах схемы для температур 27 и 77 °С. Сравнить результаты измерений с результатами теоретических расчётов, полученных в пункте 2 подраздела 4.4.

4 Выполнить анализ усилителя в САПР *OrCAD* по переменному току. Построить частотные зависимости модулей и фаз коэффициентов усиления по напряжению, по току и по мощности. С использованием полученных зависимостей измерить полосы пропускания усилителя и значения модулей коэффициентов усиления по напряжению, по току и по мощности на средней частоте полосы пропускания. Сравнить результаты измерений с результатами теоретических расчётов, полученных в пункте 2 подраздела 4.4.

5 Исследовать в САПР *OrCAD* влияние значений параметров основных элементов принципиальной электрической схемы на АЧХ усилителя (перечень элементов определяется заданием).

6 Собрать электрическую схему усилителя с использованием дискретных элементов на макетной плате *Wish Board 502-L* для проведения экспериментальных исследований. Допускается использование функционального модуля усилителя мощности.

7 Подключить к усилителю радиоизмерительные приборы в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 4.11.

В качестве источника питания использовать источник постоянного тока *GW Instek GPS-2303*, в качестве генератора сигналов – генератор сигналов произвольной формы *Tektronix AFG3000*, в качестве осциллографа – цифровой запоминающий осциллограф *Tektronix TDS3052C*, в качестве вольтметра переменного напряжения на входе – мультиметр *Agilent 34410A*, в качестве вольтметра переменного напряжения на выходе – источник-измеритель *Keithley 2401* (допускается измерение переменного напряжения на выходе с использованием осциллографа с помощью маркерных измерений).

В данном пункте задания и далее допускается использование других типов радиоизмерительных приборов, имеющих аналогичные технические параметры.

С помощью органов управления источника постоянного тока *GW Instek GPS-2303* установить требуемое напряжение питания  $U_{\text{ип}}$  (в случае необходимости подачи двухполярного питания использовать два канала источника питания).

Измерить с помощью вольтметра постоянного тока постоянные напряжения на электродах АК. Для этого использовать мультиметр *APPA-109N* в режиме измерения постоянного напряжения. Рассчитать значения постоянных токов и напряжений в узлах схемы.

8 Экспериментально исследовать АХ усилителя. Для этого необходимо выполнить измерения значений напряжений входного и выходного сигналов в соответствии с методикой (см. пункт 2 подраздела 4.3). Построить АХ в *Microsoft Excel*. С использованием полученной зависимости рассчитать коэффициент усиления по напряжению для линейного участка АХ и динамический диапазон усилителя  $D$ .

В данном пункте и далее графики необходимо строить в отдельной координатной системе, размеры области построения – лист формата А4.

9 Экспериментально исследовать АЧХ усилителя. Для этого необходимо выполнить измерения напряжений входного и выходного сигналов в соответствии с методикой (см. пункт 3 подраздела 4.3). Построить частотную зависимость модуля коэффициента усиления по напряжению в *Microsoft Excel*. С использованием полученной зависимости рассчитать полосу пропускания усилителя  $\Delta f$  и значение модуля коэффициента усиления по напряжению  $|K_{\text{н}}|$  на средней частоте полосы пропускания.

10 Подключить к усилителю радиоизмерительные приборы в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 4.12, и экспериментально определить входное  $R_{\text{вх}}$  и выходное  $R_{\text{вых}}$  сопротивления усилителя. Для этого необходимо выполнить измерения значений выходного напряжения в соответствии с методикой (см. пункт 4 подраздела 4.3).

По полученным экспериментальным данным рассчитать входное  $R_{\text{вх}}$  и выходное  $R_{\text{вых}}$  сопротивления усилителя.

В данном пункте необходимо использовать радиоизмерительные приборы, указанные в пункте 7 подраздела 4.4.

11 По полученным в пункте 8 подраздела 4.4 экспериментальным данным в точке, соответствующей середине линейного участка АХ, рассчитать:

- мощность входного сигнала  $P_{\text{вх}}$ ;
- мощность выходного сигнала  $P_{\text{вых}}$ ;
- потребляемую мощность усилителя  $P_0$ ;
- коэффициент усиления по мощности  $K_M$ ;
- коэффициент усиления по напряжению  $K_H$ ;
- коэффициент усиления по току  $K_T$ ;
- коэффициент полезного действия  $\eta$ .

12 Результаты всех расчётов занести в таблицу и сравнить их с результатами теоретических расчётов, полученных в пункте 2 подраздела 4.4.

13 Подключить к усилителю радиоизмерительные приборы в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 4.11, и исследовать влияние положения рабочей точки АК на форму выходного сигнала усилителя и его коэффициент полезного действия. Для этого необходимо выполнить измерения значений необходимых напряжений с использованием методики (см. пункт 2 подраздела 4.3) для пяти положений рабочей точки АК оконечного каскада при фиксированной амплитуде входного сигнала, соответствующей середине линейного участка АХ. В ходе измерений необходимо сохранить на диск и распечатать полученные осциллограммы выходного сигнала.

#### **4.5 Содержание отчёта**

- 1 Титульный лист.
- 2 Цель лабораторной работы.
- 3 Принципиальная электрическая схема исследуемого усилителя.
- 4 Электрические параметры и вольт-амперные характеристики используемых АК.
- 5 Таблицы с результатами расчётов.
- 6 Таблицы с результатами экспериментов.
- 7 Графики характеристик.
- 8 Осциллограммы сигналов.
- 9 Выводы.

#### **4.6 Контрольные вопросы**

- 1 Перечислите основные параметры усилителей мощности.
- 2 Перечислите основные характеристики усилителей мощности.
- 3 Перечислите основные режимы работы предоконечных и оконечных каскадов усилителей мощности.
- 4 Назовите основные типы связи между усилительными каскадами.
- 5 В чём заключаются особенности работы усилительного каскада в режиме В?
- 6 Какое максимальное значение коэффициента полезного действия можно получить в усилительном каскаде, работающем в режиме В?

7 В чём заключаются особенности работы усилительного каскада в режиме *AB*?

8 Какое максимальное значение коэффициента полезного действия можно получить в усилительном каскаде, работающем в режиме *AB*?

9 Поясните назначение основных элементов схемы исследуемого усилителя мощности.

10 Каким методом выполняют расчёт предоконечных и окончных каскадов усилителей мощности?

11 Какими методами обеспечивают термостабилизацию рабочей точки АК окончных каскадов усилителей мощности?

12 Каким уравнением описывается нагрузочная прямая по постоянному току?

13 Каким уравнением описывается нагрузочная прямая по переменному току?

14 Приведите порядок построения нагрузочной прямой по постоянному току.

15 Приведите порядок построения нагрузочной прямой по переменному току.

16 В чём заключается принцип «вольтодобавки»?

17 Назовите причины нелинейности окончных каскадов усилителя мощности.

18 Поясните природу искажений типа «ступенька».

19 Каким методом рассчитывают коэффициент нелинейных искажений окончных каскадов усилителя мощности?

20 Какие элементы электрической схемы исследуемого усилителя определяют форму его АЧХ?

21 Какие требования предъявляют к АЧХ усилителей мощности в зависимости от назначения?

22 Нарисуйте электрическую схему окончного усилительного каскада усилителей мощности на комплементарных биполярных транзисторах.

23 С какой целью транзисторы окончного каскада усилителей мощности помещают на теплоотвод?

24 Напишите математическое выражение для расчёта коэффициента нелинейных искажений усилителей мощности.

25 Какие преимущества предоставляет использование в качестве окончного каскада усилителя мощности двухтактных каскадов?



## **5 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ**

#### **5.1 Цель работы**

1 Изучить принцип действия, классификацию, условные графические обозначения и область применения операционных усилителей.

2 Изучить основные схемы включения, характеристики и параметры операционных усилителей.

3 Экспериментально исследовать основные характеристики и параметры операционных усилителей по постоянному и переменному току.

4 Экспериментально исследовать основные характеристики и параметры усилителей на основе операционных усилителей.

#### **5.2 Краткие теоретические сведения**

Операционный усилитель (ОУ) – это многокаскадный усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и несимметричным выходом, предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми сигналами при работе его с глубокой отрицательной обратной связью.

По технологии производства ОУ подразделяются на:

- полупроводниковые (монокристалльные);
- гибридные.

По схемотехническому исполнению ОУ подразделяются на:

- устройства прямого усиления;
- устройства с преобразованием спектра частот усиливаемого сигнала, основанного на преобразовании медленно изменяющегося напряжения в переменное напряжение основной частоты.

По применению ОУ делятся на:

- ОУ общего применения;
- прецизионные ОУ, обладающие малым напряжением смещения нуля, малыми шумами, большим коэффициентом подавления синфазного сигнала и большим коэффициентом усиления без обратной связи;
- микромощные ОУ, характеризующиеся малым значением потребляемой мощности;
- быстродействующие ОУ, характеризующиеся высоким значением частоты единичного усиления (порядка 10 МГц) и высокой скоростью нарастания выходного напряжения.

Обозначения современных ОУ могут содержать до 13 позиций. Начальная буква обозначения К указывает, что данный ОУ является микросхемой общего применения (для бытовой и промышленной аппаратуры). Отсутствие начальной буквы обозначения указывает, что данный ОУ является микросхемой специального применения. Наименование микросхемы начинается с номера серии, причём первая цифра характеризует её конструктивно-технологическую особенность. Цифры 1, 5, 7 обозначают, что микросхема является полупроводниковой (7 присвоена бескорпусным полупроводниковым микросхемам), а цифры 2, 4, 6,

8 – гибридной. Другие две (или три) цифры являются порядковым номером разработки серии. О функции, которую выполняет ОУ, судят по двухбуквенному шифру, стоящему после номера серии микросхемы. Затем указывается порядковый номер микросхемы в данной серии. В конце условного обозначения типа микросхемы может быть буквенный индекс, характеризующий отличие микросхем данного типа по численному значению одного или нескольких параметров.

Пример условного обозначения ОУ приведён на рисунке 5.1. По двухбуквенному шифру УД заключаем, что перед нами ОУ (исключением из этого правила является К118УД1А-В, представляющий собой однокаскадный дифференциальный усилитель). Цифры свидетельствуют о том, что ОУ является полупроводниковой микросхемой серии 544 с номером разработки в данной серии 1. Буква А в конце условного обозначения предупреждает о различиях в численных значениях по меньшей мере одного из параметров ОУ данного типа. Однако информации о том, какой это параметр, в указанном индексе не содержится. Лишь по справочным данным можно узнать, что, например, операционные усилители К544УД1 и К544УД1А различаются значением коэффициента усиления. Микросхемам, различающимся только конструктивным исполнением, присваивают, как правило, единое цифровое обозначение серии. Для характеристики материала и типа корпуса перед цифровым обозначением серии могут быть добавлены следующие буквы:

- А – пластмассовый планарный корпус;
- Е – металлополимерный корпус второго типа;
- И – стеклокерамический планарный корпус;
- Р – пластмассовый и стеклокерамический корпус второго типа;
- М – металлокерамический корпус;
- Н – миниатюрный металлокерамический корпус;
- Ф – миниатюрный пластмассовый корпус;
- Б – бескорпусное исполнение.

При отсутствии буквы тип корпуса является металлостеклянным.

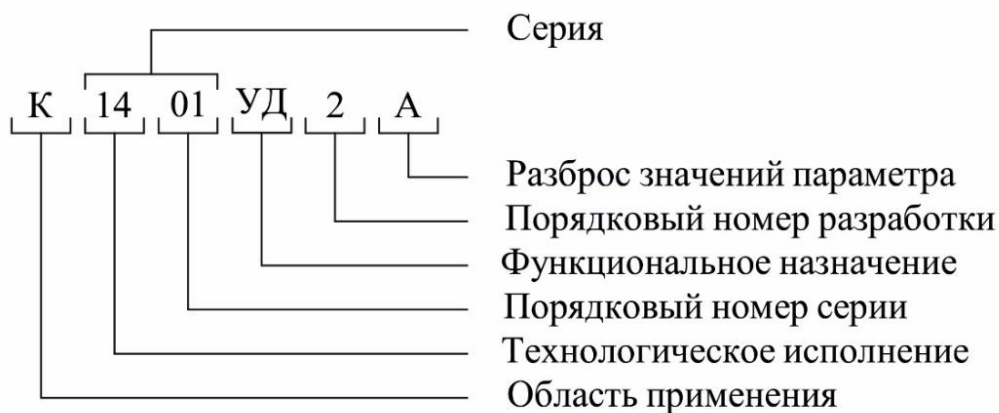


Рисунок 5.1 – Пример обозначения интегральной микросхемы ОУ

Также между порядковым номером разработки интегральной микросхемы ОУ и буквой различия в электрических параметрах может использоваться двузначный цифровой код, обозначающий тип корпуса.

Согласно ГОСТ 2.759 – 82 обозначения компонентов аналоговой техники, к числу которых относятся и интегральные микросхемы ОУ, выполняют на основе прямоугольника. Он может содержать основное и одно или два дополнительных поля, расположенных по обе стороны от основного (рисунок 5.2). Основное функциональное назначение усилителя обозначается треугольником на основном поле. Справа от него указывают коэффициент усиления (вместо символа  $m$ ). Если конкретное значение коэффициента усиления несущественно, его допускается не указывать (можно также вписать знак бесконечности). Дополнительные функции, выполняемые микросхемой, указывают слева от основной (вместо символа  $F$ ).

Выводы интегральной микросхемы ОУ делятся на входные, выходные и вспомогательные (не несущие функциональной нагрузки), к которым подключаются цепи напряжения питания и компоненты, обеспечивающие нормальную работу ОУ.

Входы ОУ показывают слева, выходы – справа; вспомогательные выводы изображают с любой стороны.

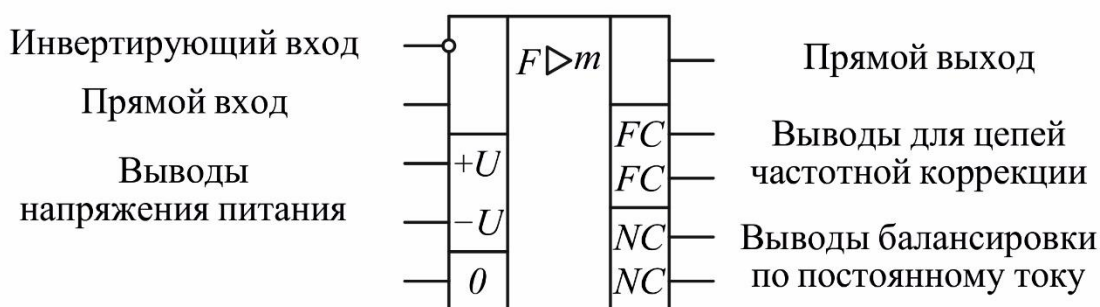


Рисунок 5.2 – Полное графическое обозначение ОУ

Большинство ОУ имеют один несимметричный выход и два входа, симметричных по отношению к общему проводу. Прямые входы и выходы обозначают линиями, присоединяемыми к контуру графического изображения ОУ без каких-либо знаков, с указателем в виде круга в месте присоединения – инвертирующие входы и выходы. Прямой вход называют также неинвертирующим, так как фаза выходного сигнала совпадает с фазой сигнала, поданного на этот вход. Другой вход называют инвертирующим, так как фаза выходного сигнала сдвинута на  $180^\circ$  относительно входного сигнала. Поэтому входы оказывают на выходное напряжение, равное в численном выражении, но противоположное по

знаку влияние. Если ко входам приложены синфазные (действующие одновременно одинаковые по значению и фазе относительно общего провода) сигналы, то их влияние будет взаимно скомпенсировано и выход будет иметь нулевой потенциал, благодаря чему параметры ОУ малочувствительны к изменениям напряжения питания, температуры и других внешних факторов. Напряжение на выходе ОУ должно быть лишь в том случае, когда на его входах действуют различные по уровню или фазе сигналы. Выходное напряжение пропорционально разности уровней сигналов, называемой *дифференциальным сигналом*. Усиленное выходное напряжение ОУ измеряется относительно общего провода схемы.

Выход ОУ в большинстве случаев присоединяется к нагрузке, которая, как правило, соединяется с корпусом, но это условие соблюдается не всегда. Чтобы обеспечить возможность работы ОУ как с положительными, так и с отрицательными входными сигналами, требуется двухполярное питающее напряжение. Для этого необходимо предусмотреть два источника постоянного напряжения, которые подключаются к соответствующим выводам ОУ. Их в общем случае обозначают латинской буквой  $U$ . Если питающих напряжений несколько, их условно нумеруют ( $U_1, U_2$ ) и указывают каждое напряжение у своего вывода в дополнительном поле. Вместо буквы можно указать номинальное значение напряжения и его полярность (выводы с метками +15 и –15 В, см. рисунок 5.1). При двухполярном питании постоянное напряжение на несимметричном выходе отсутствует при условии, что постоянных напряжений на входе ОУ нет. Значения напряжений источника питания согласно ГОСТ 17230-71  $\pm 15, \pm 12$  и  $\pm 6$  В. Известны ОУ, рассчитанные на работу от источника с напряжением питания  $\pm 27$  В. Некоторые типы ОУ сохраняют работоспособность при снижении напряжения питания до  $\pm 3$  В. Реже встречается несимметричное (+12 и –6 В) и однополярное напряжение питания. Наличие рассмотренных выводов необходимо для функционирования ОУ.

К вспомогательным относятся выводы с метками  $FC$  – для цепи, корректирующей АЧХ ОУ (используются для предотвращения генерации), выводы  $NC$  – для подключения балансировки по постоянному току (установки нуля на выходе), а также вывод металлического корпуса ( $0V$ ) для соединения с общим проводом устройства, в которое входит ОУ (этот вывод может и отсутствовать).

Для лучшего понимания и большей наглядности принципиальных схем допускается упрощённое обозначение ОУ, в котором сохраняются лишь основное поле и сигнальные выводы (рисунок 5.3). Общий провод, играющий роль сигнального вывода, также может быть не показан.

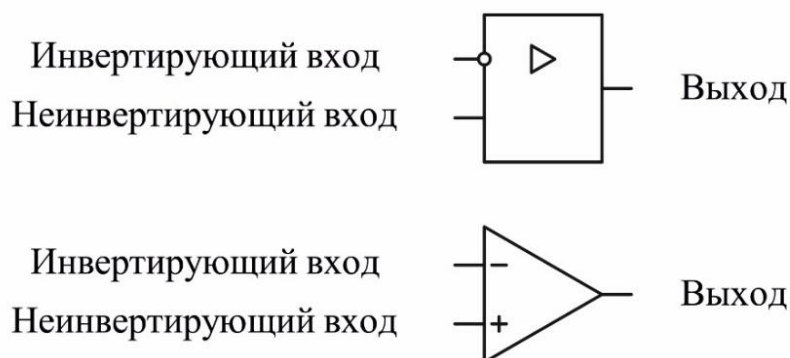


Рисунок 5.3 – Сокращённое графическое обозначение ОУ

В своей внутренней структуре ОУ содержит несколько усилительных каскадов. Структурная схема ОУ представлена на рисунке 5.4.

Первый (входной) каскад ОУ – это дифференциальный усилитель, имеющий высокий коэффициент усиления по отношению к дифференциальным входным сигналам, и низкий коэффициент усиления по отношению к синфазным входным сигналам. Использование полевых транзисторов на входе позволяет получить входные токи очень малых значений (от  $10^{-9}$  до  $10^{-12}$  А).



Рисунок 5.4 – Структурная схема ОУ

Второй каскад (или несколько каскадов) ОУ – это промежуточные усилительные каскады. Они обеспечивают уменьшение напряжения покоя на выходе усилителя до близкого к нулю значения и усиление по напряжению и по току.

Выходной каскад – это простой или комплементарный эмиттерный повторитель. Он должен обеспечивать низкое выходное сопротивление ОУ и ток, достаточный для питания ожидаемой нагрузки. Кроме того, этот каскад должен иметь достаточно высокое входное сопротивление, чтобы не нагружать последний из промежуточных каскадов.

На рисунке 5.5 представлена упрощённая принципиальная электрическая схема ОУ.

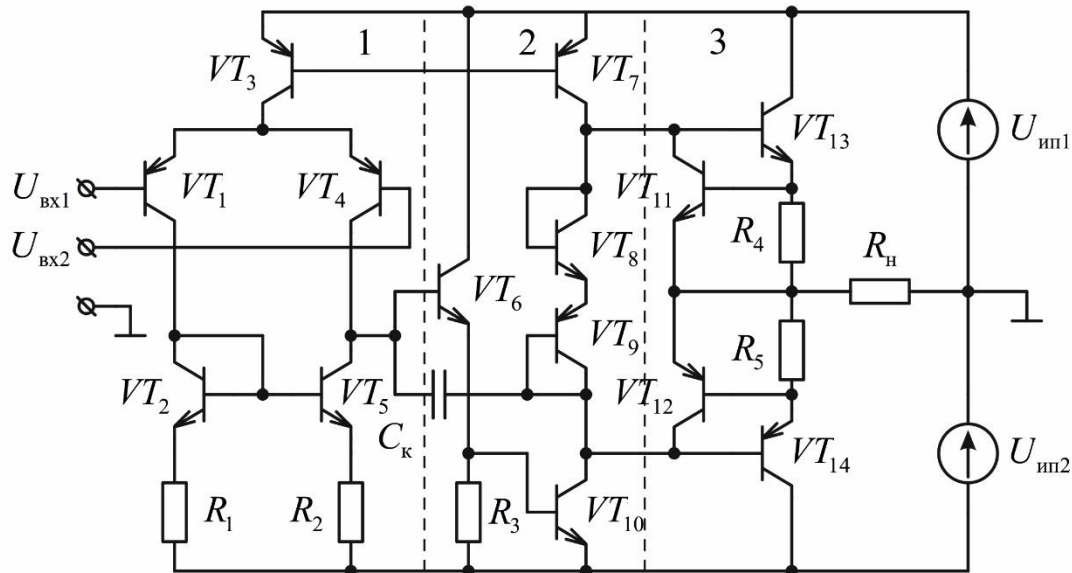


Рисунок 5.5. – Упрощённая электрическая схема ОУ

Первый каскад – дифференциальный усилитель на транзисторах  $VT_1$  и  $VT_4$ , динамическими нагрузками которых являются транзисторы  $VT_2$  и  $VT_5$ . Напряжение  $U_0$  (точка соединения баз транзисторов  $VT_3$  и  $VT_7$ ) формируется внутренним источником опорного напряжения и задаёт коллекторные токи транзисторов  $VT_3$  и  $VT_7$ .

Второй каскад – предоконечный каскад, на входе которого установлен эмиттерный повторитель на  $VT_6$ . Транзистор  $VT_{10}$  включён по схеме с общим эмиттером с динамической нагрузкой на  $VT_7$ . Транзисторы  $VT_8$  и  $VT_9$  (в диодных включениях) обеспечивают задание рабочей точки транзисторов  $VT_{13}$  и  $VT_{14}$  выходного каскада, соответствующего режиму *AB*.

Третий каскад – выходной каскад, выполненный на транзисторах  $VT_{13}$  и  $VT_{14}$  по двухтактной схеме с защитой от короткого замыкания нагрузки на транзисторах  $VT_{11}$  и  $VT_{12}$ . Коррекция частотной характеристики осуществляется конденсатором  $C_k$ .

Питание ОУ обычно осуществляется от двух разнополярных источников постоянного напряжения  $U_{ин1}$  и  $U_{ин2}$ .

ОУ обладает следующими основными параметрами:

Коэффициент усиления без обратной связи ( $\dot{K}_0$ ) – коэффициент усиления ОУ при отсутствии обратной связи, равный отношению приращения выходного напряжения (тока) к приращению входного напряжения (тока).  $\dot{K}$  является функцией частоты и с её увеличением значение коэффициента усиления уменьшается.

Коэффициент усиления может достигать значений, равных десяткам тысяч.

Входное сопротивление (полное  $Z_{вх}$  или резистивное  $R_{вх}$ ) – сопротивление усилителя по отношению к входному сигналу. Типовые значения  $R_{вх}$  на низких частотах для ОУ на биполярных транзисторах составляют от  $10^4$  до  $10^8$  Ом, на полевых транзисторах – от  $10^7$  до  $10^{12}$  Ом.

Следует различать *дифференциальное входное сопротивление*  $R_{вх.диф}$ , т. е. сопротивление между двумя входными выводами (значение  $R_{вх.диф}$  лежит в широком диапазоне – от единиц килоом до сотен мегаом), и *синфазное входное сопротивление*  $R_{вх.сф}$ , т. е. сопротивление между объединёнными обоими выводами входов и заземлением. Значение  $R_{вх.сф}$  обычно превышает 100 МОм.

Выходное сопротивление (полное  $Z_{вых}$  или резистивное  $R_{вых}$ ) – внутреннее сопротивление усилителя, о котором можно судить по напряжению на его выходе. Обычно  $R_{вых}$  не превосходит нескольких сотен ом.

Входной ток смещения ( $I_{вх}$ ) – ток на входе усилителя, необходимый для работы входного каскада операционного усилителя (ток базы, который должен быть обеспечен для входного транзистора или ток утечки затвора полевого транзистора).

Разность входных токов (ток сдвига) ( $\Delta I_{вх} = I_{вх}^- - I_{вх}^+$ ) – разность токов смещения, необходимых для двух входных транзисторов операционного усилителя. Появляется в следствие неточного согласования коэффициентов усиления по току входных транзисторов. Обычно ток сдвига лежит в диапазоне от нескольких единиц до нескольких сотен нА. Ток сдвига вызывает на выходе ОУ некоторое напряжение сдвига (приведённое ко входу оно имеет значение 1...5 мВ и зависит от значений сопротивлений резисторов, подключаемых ко входам).

Входное напряжение сдвига ( $U_{сд}$ ) – небольшое нежелательное внутреннее напряжение, вызывающее на выходе ОУ ненулевое напряжение при нулевом напряжении на обоих входах. Появление этого напряжения является следствием неточного согласования напряжений эмиттер – база (затвор – исток) входных транзисторов. Обычно оно равно нескольким милливольтам.

Для установки нулевого значения на выходе при нулевом дифференциальном сигнале на входе предусмотрены специальные выводы ОУ, с помощью которых производится коррекция нуля. Эту операцию называют *балансировкой ОУ*.

Коэффициент усиления дифференциальных сигналов ( $\dot{K}_{\text{н. диф}}$ ) – коэффициент, характеризующий способность усиливать дифференциальные сигналы:

$$\dot{K}_{\text{н. диф}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ. диф}}}, \dot{U}_{\text{ВХ. диф}} = \dot{U}_{\text{ВХ2}} - \dot{U}_{\text{ВХ1}}. \quad (5.1)$$

Коэффициент усиления синфазных сигналов ( $\dot{K}_{\text{н. сф}}$ ) – коэффициент, характеризующий способность усиливать синфазные сигналы:

$$\dot{K}_{\text{н. сф}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ. сф}}}, \dot{U}_{\text{ВХ. сф}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВХ2}} + \dot{U}_{\text{ВХ1}}}{2}. \quad (5.2)$$

Коэффициент ослабления синфазного сигнала:

$$K_{\text{ос. сф}} = \frac{\dot{U}_{\text{ВХ. сф}}}{\dot{U}_{\text{ВХ. диф}}}. \quad (5.3)$$

Обычно значение  $K_{\text{ос. сф}}$  составляет 60...80 дБ. Чем больше это значение, тем меньшую разность входных сигналов может различать ОУ на фоне большого синфазного сигнала.

Входная ёмкость ( $C_{\text{ВХ}}$ ) – ёмкость между входными выводами и заземлением.

Потребляемая мощность ( $P$ ) – мощность, рассеиваемая операционным усилителем.

Максимальная скорость нарастания выходного напряжения ( $V_{\text{н}} = \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt}$ ) – максимальная скорость изменения выходного напряжения, данная в вольтах на микросекунду.

Частота единичного усиления ( $f_1$ ) – значение частоты входного сигнала, при котором значение коэффициента усиления по напряжению уменьшается до единицы.

Время установления ( $t_y$ ) – это время, за которое выходное напряжение нарастает от 0,1 до 0,9 от установившегося значения.

Время восстановления ( $t_{\text{в}}$ ) – это время, необходимое для возвращения усилителя из режима насыщения в линейный режим.

Основными характеристиками ОУ являются:

- амплитудная характеристика;
- амплитудно-частотная характеристика;
- фазочастотная характеристика.

Амплитудная характеристика (АХ) операционного усилителя приведена на рисунке 5.6, где  $K^+$  – характеристика неинвертирующего усилителя,  $K^-$  – характеристика инвертирующего усилителя. На начальном участке амплитудная характеристика носит линейный характер, а при больших входных сигналах



имеет место ограничение выходного сигнала. Значение напряжения, при котором происходит ограничение, определяется напряжением питания ОУ. Угол наклона линейных участков АХ определяется коэффициентом усиления и именно в этой области происходит линейное преобразование входного сигнала, т. е. без искажения его формы. Горизонтальные участки АХ соответствуют режимам насыщения выходных транзисторов ОУ.

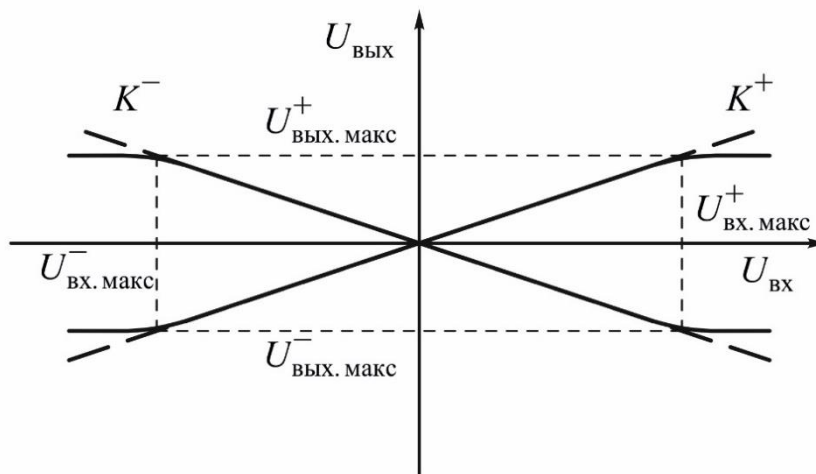


Рисунок 5.6 – Амплитудная характеристика ОУ

Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) операционного усилителя представлена на рисунке 5.7. Поскольку в ОУ используются непосредственные связи, то АЧХ в области низких частот не имеет спада вплоть до нулевой частоты.

В области высоких частот имеет место спад характеристики, обусловленный наличием верхней границы усиливаемых частот активных компонентов, паразитными ёмкостными связями между близко расположенными проводниками, а также между проводниками и подложкой микросхемы.

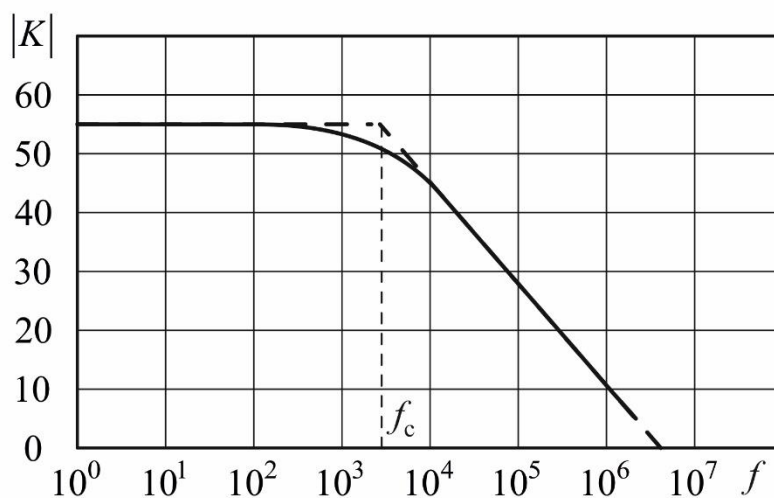


Рисунок 5.7 – Амплитудно-частотная характеристика ОУ

Фазочастотная характеристика (ФЧХ) операционного усилителя приведена на рисунке 5.8. Она представляет зависимость от частоты фазового сдвига выходного сигнала относительно входного. На частоте среза фазовый сдвиг составляет  $45^\circ$ . При уменьшении частоты сигнала частотный сдвиг падает практически до нуля, а при увеличении частоты сигнала достигает  $-90^\circ$ .

Пунктирными линиями на рисунке 5.7 и рисунке 5.8 представлены аппроксимированные АЧХ и ФЧХ. Характеристики, аппроксимированные отрезками прямых линий и используемые в теории усилителей, называют асимптотическими или диаграммами Боде.

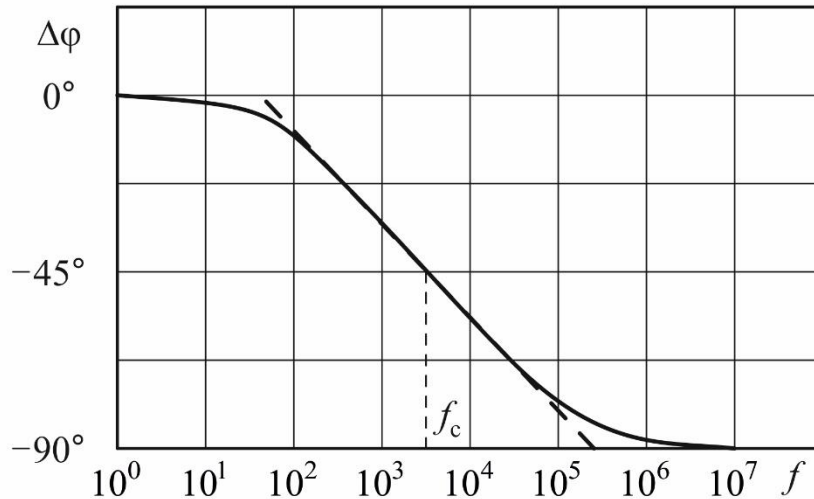


Рисунок 5.8 – Фазочастотная характеристика ОУ

Существует множество схем, иллюстрирующих применение ОУ, основными из которых являются:

- повторитель напряжения;
- инвертирующий усилитель;
- неинвертирующий усилитель;
- усилитель с дифференциальным входом;
- полностью дифференциальный усилитель.

Применение ОУ в схеме повторителя напряжения представлено на рисунке 5.9. В этой схеме выходное напряжение подаётся непосредственно на инвертирующий вход. Напряжение между входными выводами  $U_d$  – это то напряжение, которое усиливается с коэффициентом  $K$ . Согласно закону Кирхгофа

$$U_{\text{вх}} + U_d = U_{\text{вых}}. \quad (5.4)$$

Поскольку  $U_{\text{вых}} = KU_{\text{вх}}$ , получим  $U_d = U_{\text{вых}} / K$ . В соответствии с этим  $U_{\text{вх}} + U_{\text{вых}} / K = U_{\text{вых}}$ . Поскольку  $K$  стремится к бесконечности, то второе слагаемое последнего выражения обращается в нуль.

В результате этого можно записать

$$U_{\text{вх}} \approx U_{\text{вых}}. \quad (5.5)$$

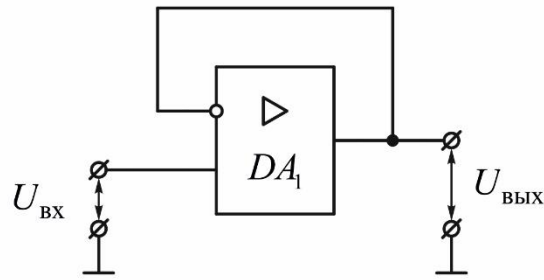


Рисунок 5.9 – Электрическая схема повторителя напряжения на основе ОУ

Схема, представленная на рисунке 5.10, иллюстрирует применение ОУ в качестве неинвертирующего усилителя с высоким входным сопротивлением. Резисторы  $R$  и  $R_{oc}$  образуют делитель с очень малой нагрузкой, так как  $I_{cm} \approx 0$ . По этой причине через  $R$  и  $R_{oc}$  протекают практически одинаковые токи  $I \approx I_{oc}$ .

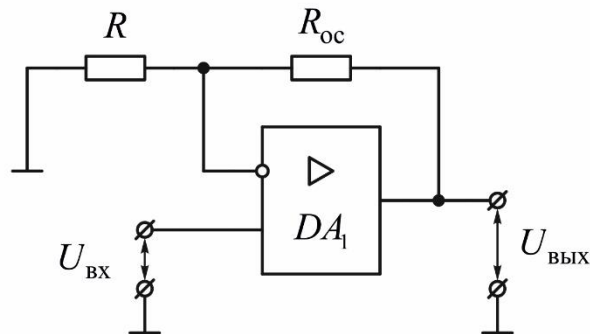


Рисунок 5.10 – Электрическая схема неинвертирующего усилителя на основе ОУ

Напряжение, приложенное к инвертирующему входу ОУ, будет определяться выражением  $U = U_{вх} + U_{д}$ . Следовательно, для тока, протекающего через  $R$ , можно записать

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_{вх} + U_{д}}{R}. \quad (5.6)$$

В то же время ток, протекающий через  $R_{oc}$ , будет равен

$$I_{oc} = \frac{U_{вых} - U}{R_{oc}} = \frac{U_{вых} - (U_{вх} + U_d)}{R_{oc}}. \quad (5.7)$$

Поскольку  $U_d \approx 0$ , справедливо выражение

$$\frac{U_{вх}}{R} = \frac{U_{вых} - U_{вх}}{R_{oc}}. \quad (5.8)$$

Из этого выражения можно найти коэффициент усиления схемы, который принято называть **коэффициентом усиления с замкнутой петлёй обратной связи**  $K_{oc}$  или **коэффициентом усиления замкнутого усилителя**. В результате решения уравнения (5.8) получим

$$K_{oc} = \frac{R_{oc}}{R} + 1. \quad (5.9)$$

Схема, представленная на рисунке 5.11, иллюстрирует применение ОУ в качестве инвертирующего усилителя с высоким входным сопротивлением. Ток, протекающий через  $R$ , будет равен

$$I = \frac{U}{R} = \frac{U_{вх} - U_d}{R}, \quad (5.10)$$

а ток, протекающий через  $R_{oc}$ , будет определяться выражением

$$I_{oc} = -\frac{U_{вых} + U_d}{R_{oc}}. \quad (5.11)$$

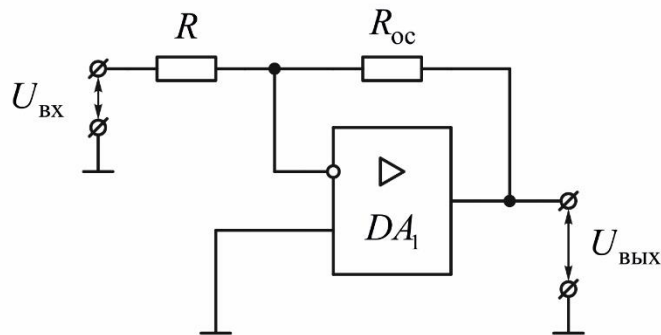


Рисунок 5.11 – Электрическая схема инвертирующего усилителя на основе ОУ

Поскольку  $U_d \approx 0$ , справедливо выражение

$$\frac{U_{вх}}{R} = -\frac{U_{вых}}{R_{oc}}. \quad (5.12)$$

Из полученного выражения можно вывести коэффициент усиления данной схемы:

$$K_{oc} = -\frac{R_{oc}}{R}. \quad (5.13)$$

Применение ОУ в схеме усилителя с дифференциальным входом представлено на рисунке 5.12.

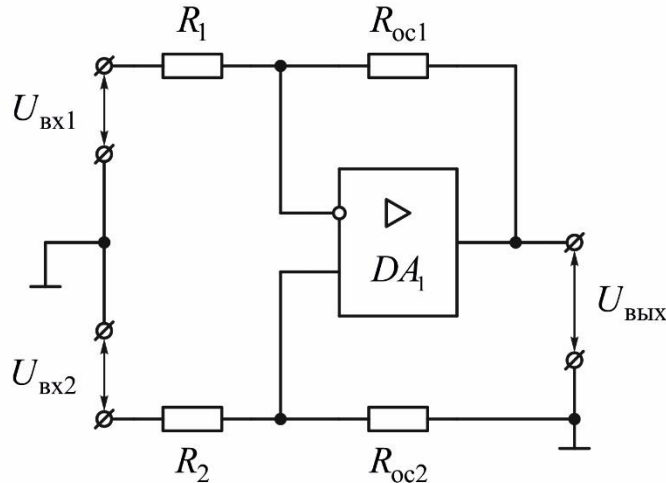


Рисунок 5.12 – Электрическая схема усилителя с дифференциальным входом на основе ОУ

Разность напряжений между инвертирующим и неинвертирующим входами ОУ очень мала, так как очень мало отношение  $U_{вых} / K$ . Поэтому в данном случае мы будем считать, что инвертирующий и неинвертирующий входы находятся под одинаковым напряжением, равным  $U_{oc}$ .

Если напряжение  $U_{вх2}$  на рисунке 5.12 равно нулю, то усилитель будет действовать по отношению к напряжению  $U_{вх1}$  как инвертирующий усилитель.

Если напряжение  $U_{вх1}$  на рисунке 5.12 равно нулю, то усилитель будет действовать по отношению к напряжению  $U_{вх2}$  как неинвертирующий усилитель.

Если оба напряжения  $U_{вх1}$  и  $U_{вх2}$  подаются на соответствующие входы одновременно, то сигнал на инвертирующем входе вызовет такое изменение выходного напряжения, что напряжение в точке соединения сопротивлений  $R_1$  и  $R_{oc1}$  станет равным

$$U_{oc} = \frac{U_{вх2} R_{oc2}}{R_2 + R_{oc2}}. \quad (5.14)$$

Получим выражение для выходного напряжения. Вследствие того, что усилитель имеет очень высокое входное сопротивление, имеем

$$I_1 \approx I_{oc1}. \quad (5.15)$$

С учётом этого можем записать

$$\frac{U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ОС}}}{R_1} = \frac{U_{\text{ОС}} - U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ОС1}}}. \quad (5.16)$$

Выразим из данного выражения  $U_{\text{ВЫХ}}$ :

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ОС}} \frac{R_1 + R_{\text{ОС}}}{R_1} - U_{\text{ВХ1}} \frac{R_{\text{ОС1}}}{R_1}. \quad (5.17)$$

Подставляя в полученное выражение вместо  $U_{\text{ОС}}$  выражение (5.14), получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{U_{\text{ВХ2}} R_{\text{ОС2}}}{R_2 + R_{\text{ОС2}}} \frac{R_1 + R_{\text{ОС}}}{R_1} - U_{\text{ВХ1}} \frac{R_{\text{ОС1}}}{R_1}. \quad (5.18)$$

В том случае, когда  $R_1 = R_2$ , а  $R_{\text{ОС1}} = R_{\text{ОС2}}$ , выражение для выходного напряжения получим в следующем виде:

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{ОС1}}}{R_1} (U_{\text{ВХ2}} - U_{\text{ВХ1}}). \quad (5.19)$$

В данной схеме полярность выходного напряжения будет определяться бóльшим напряжением из напряжений  $U_{\text{ВХ1}}$  и  $U_{\text{ВХ2}}$ .

На рисунке 5.13 представлен усилитель с дифференциальными входом и выходом – **полностью дифференциальный операционный усилитель (ПД ОУ)**. Такие усилители широко используются для приёма и передачи аналоговых сигналов в условиях сильных помех, для подачи сигналов на входы быстродействующих АЦП и во многих других областях. При рассмотрении данной схемы будем исходить из того, что  $R_1 = R_2$ , а  $R_{\text{ОС1}} = R_{\text{ОС2}}$  и что напряжения на выводах инвертирующего и неинвертирующего входов усилителя, представленного на рисунке 5.13, одинаковы и равны  $U_{\text{ОС}}$ . Напряжение  $U_{\text{ВЫХ1}}$  имеет полярность, противоположную  $U_{\text{ВХ1}}$ , а напряжение  $U_{\text{ВЫХ2}}$  имеет полярность, противоположную  $U_{\text{ВХ2}}$ . Выходное напряжение является алгебраической суммой  $U_{\text{ВЫХ1}}$  и  $U_{\text{ВЫХ2}}$ .

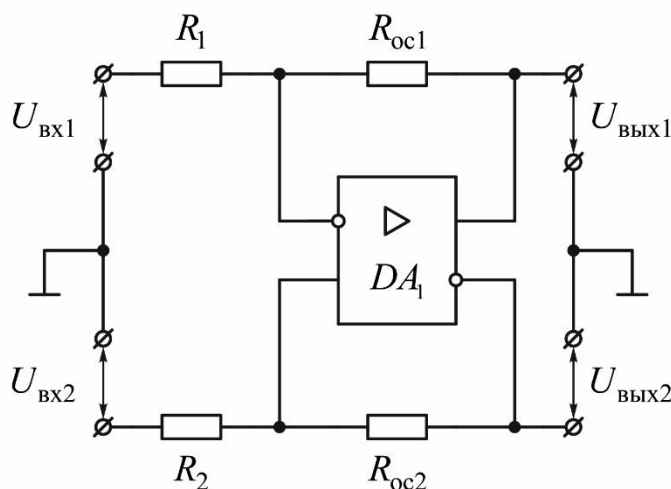


Рисунок 5.13 – Электрическая схема полностью

дифференциального усилителя на основе ОУ

Поскольку  $I_1 \approx I_{oc1}$  и  $I_2 \approx I_{oc2}$ , то справедливы и равенства

$$\frac{U_{вх1} - U_{oc}}{R_1} = \frac{U_{oc} - U_{вых1}}{R_{oc1}} \quad \text{и} \quad \frac{U_{вх2} - U_{oc}}{R_2} = \frac{U_{oc} - U_{вых2}}{R_{oc2}}. \quad (5.20)$$

Вычитаем первое выражение из второго:

$$\frac{U_{вх2} - U_{вх1}}{R_1} = \frac{U_{вых1} - U_{вых2}}{R_{oc1}} = \frac{U_{вых}}{R_{oc1}}. \quad (5.21)$$

Отсюда выходное напряжение будет равно

$$U_{вых} = \frac{R_{oc1}}{R_1} (U_{вх2} - U_{вх1}). \quad (5.22)$$

Дополнительно об операционных усилителях и устройствах на их основе изложено в источниках [5 – 7].

### 5.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы

1 Исследование основных параметров ОУ необходимо проводить с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рисунке 5.14.

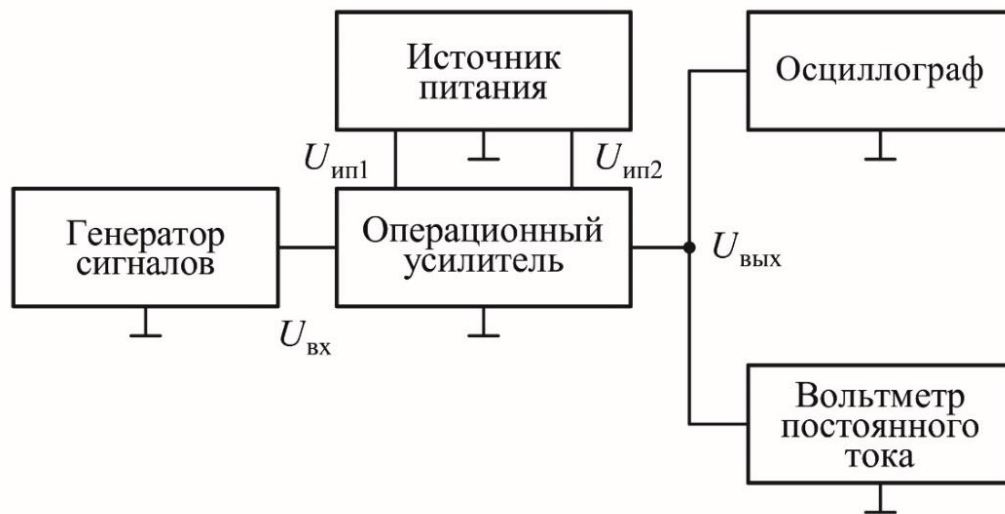


Рисунок 5.14 – Структурная схема лабораторной установки для исследования основных параметров ОУ

2 Перед проведением измерений основных характеристик усилителя на ОУ необходимо выполнять балансировку ОУ. Для этого к выводам, предназначенным для балансировки, необходимо подключить переменный резистор, с помощью которого нужно добиться нулевого показания значения напряжения на выходе ОУ (или минимально возможного – десятые...сотые доли вольта) при отсутствии сигнала на входе (для этого вход должен быть закорочен).

3 Контроль напряжения на выходе ОУ при его балансировке и исследовании характеристик нужно выполнять с помощью цифрового вольтметра или осциллографа.

4 Исследование АХ усилителя на ОУ необходимо проводить по постоянному и по переменному токам на фиксированной частоте входного сигнала с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рисунке 5.15. Для исследования АХ усилителя на ОУ по постоянному току в качестве источника входного сигнала необходимо использовать специальный источник постоянного тока, а для исследования АХ усилителя на ОУ по переменному току необходимо использовать генератор сигналов синусоидальной формы (частоту входного сигнала при этом необходимо установить равной 1 кГц).

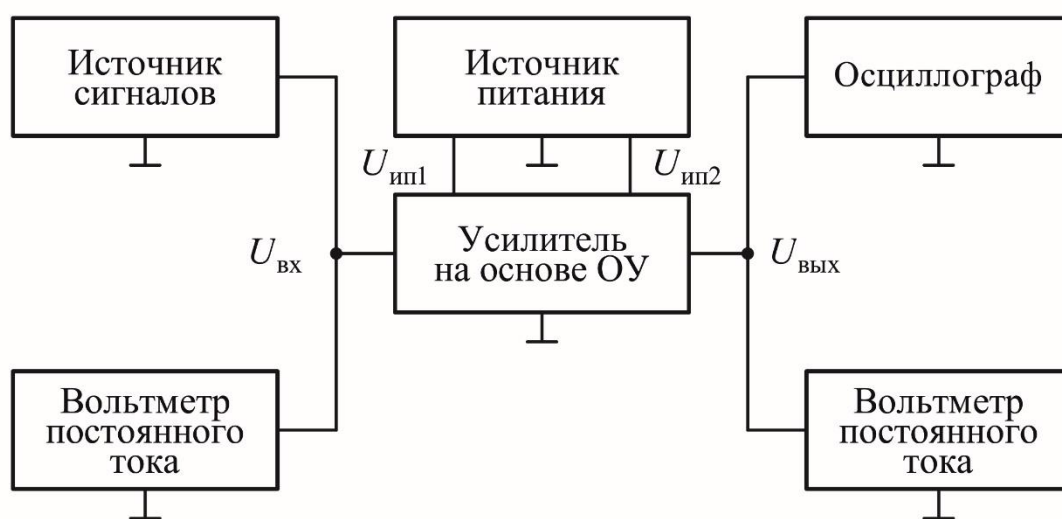


Рисунок 5.15 – Структурная схема лабораторной установки для исследования характеристик усилителя на основе ОУ

При исследовании АХ усилителя на ОУ по переменному току напряжение сигнала на входе схемы необходимо изменять от минимального значения, которое можно установить на источнике сигналов, до значения, при котором наступает насыщение усилителя на ОУ либо начинает искажаться форма гармонического сигнала на выходе, контролируемая с помощью осциллографа. Искажение формы сигнала проявляется в виде асимметрии верхней и нижней полуволн сигнала, в ограничении верхней или нижней полуволн сигнала и т. д.

5 Исследование АЧХ усилителя на ОУ необходимо проводить при фиксированной амплитуде входного сигнала, выбранной на линейном участке АХ по переменному току  $U_{вх} = 0,1 \dots 0,3 U_{вх. макс}$  с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рисунке 5.15.

Для упрощения расчётов коэффициента усиления по напряжению целесообразно выбрать целые значения действующего напряжения входного сигнала, например, 1, 5, 10 мВ.



Поскольку исследуемые усилители имеют полосу пропускания в несколько декад (декада – диапазон изменения некоторой величины, на границах которого её значения отличаются в 10 раз), при экспериментальном исследовании АЧХ и построении графиков необходимо по оси частот использовать логарифмический масштаб.

Измерения для АЧХ следует проводить в девяти точках на каждую декаду. Например: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 Гц; 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 Гц; 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000 Гц и т. д. Значения нижней  $f_n$  и верхней  $f_v$  граничных частот необходимо определять экспериментально по уменьшению уровня выходного напряжения или коэффициента усиления на 3 дБ по сравнению с их максимальными значениями в области средних частот (на частоте  $f = 1$  кГц).

#### 5.4 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Получить у преподавателя индивидуальное задание для выполнения лабораторной работы, необходимые пассивные элементы и электронные компоненты.

2 Собрать на макетной плате *Wish Board 502-L* с использованием дискретных элементов электрическую схему, представленную на рисунке 5.16, для проведения экспериментальных исследований основных параметров ОУ. Допускается использование функционального модуля на основе ОУ.

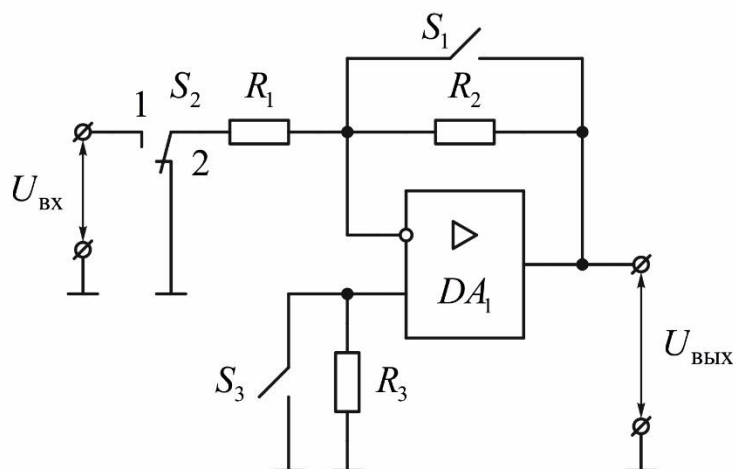


Рисунок 5.16 – Электрическая схема для исследования параметров ОУ

3 Подключить к ОУ радиоизмерительные приборы в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 5.14.

В качестве источника питания использовать источник постоянного тока *GW Instek GPS-2303*, в качестве генератора сигналов – генератор сигналов произвольной формы *Tektronix AFG3000*, в качестве осциллографа – цифровой запоминающий осциллограф *Tektronix TDS3052C*.

В данном пункте задания и далее допускается использование других типов радиоизмерительных приборов, имеющих аналогичные параметры.

4 Экспериментально определить входное напряжение сдвига  $U_{сд}$  с помощью измерения выходного напряжения для следующих напряжений источника питания (при измерении ключ  $S_2$  должен находиться в положении 2, ключ  $S_1$  разомкнут, ключ  $S_3$  замкнут):

а)  $U_{ип1} = +12 \text{ В}$ ,  $U_{ип2} = -12 \text{ В}$ ;

б)  $U_{ип1} = +12 \text{ В}$ ,  $U_{ип2} = -11 \text{ В}$ ;

в)  $U_{ип1} = +11 \text{ В}$ ,  $U_{ип2} = -12 \text{ В}$ ;

г)  $U_{ип1} = +6 \text{ В}$ ,  $U_{ип2} = -6 \text{ В}$ ;

д)  $U_{ип1} = +6 \text{ В}$ ,  $U_{ип2} = -5 \text{ В}$ ;

е)  $U_{ип1} = +5 \text{ В}$ ,  $U_{ип2} = -6 \text{ В}$ .

5 Установить напряжение источника питания схемы  $U_{ип1} = +12 \text{ В}$   $U_{ип2} = +12 \text{ В}$  и экспериментально определить следующие токи ОУ:

а) инвертирующего входа  $I_{вх}^-$ ,

б) неинвертирующего входа  $I_{вх}^+$ ,

в) разность входных токов  $\Delta I_{вх}$ .

Для этого измерить значение выходного напряжения для трех комбинаций ключей (при этом ключ  $S_2$  в схеме измерений, представленной на рисунке 5.16, должен находиться в положение 1):

а)  $U_{вых} = U_{сд}$ , когда ключи  $S_1$  и  $S_3$  замкнуты;

б)  $U_{вых} = U_{вых1}$ , когда ключ  $S_1$  разомкнут, а ключ  $S_3$  замкнут;

в)  $U_{вых} = U_{вых2}$ , когда ключ  $S_1$  замкнут, а ключ  $S_3$  разомкнут.

Токи ОУ необходимо рассчитать с использованием следующих математических выражений:

$$I_{вх}^- = \frac{|U_{вых1} - U_{вых}|}{R_2}, \quad I_{вх}^+ = \frac{|U_{вых2} - U_{вых}|}{R_3}, \quad \Delta I_{вх} = \frac{|U_{вых1}| - |U_{вых2}|}{R}.$$

В приведенных выражениях  $R = R_2 = R_3$ .

6 Экспериментально определить скорость нарастания выходного напряжения ОУ. Для этого в схеме измерений, представленной на рисунке 5.16, установить ключ  $S_2$  в положение 1, разомкнуть ключ  $S_1$  и замкнуть ключ  $S_3$ . После этого подать на вход схемы сигнал прямоугольной формы от генератора сигналов произвольной формы *Tektronix AFG3000* амплитудой 5 В и частотой 10 кГц. С помощью осциллографа измерить амплитуду  $U_{вых.макс}$  и длительность фронта  $t_\phi$  (промежуток времени, в течение которого напряжение на выходе ОУ нарастает от нуля до амплитудного значения  $U_{вых.макс}$ ) выходного сигнала. Рассчитать скорость нарастания выходного напряжения с помощью следующего математического выражения:

$$V_n = \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{t_{\phi}}$$

7 Собрать на макетной плате *Wish Board 502-L* с использованием дискретных элементов электрическую схему, представленную на рисунке 5.17, для проведения экспериментальных исследований основных характеристик инвертирующего усилителя на ОУ.

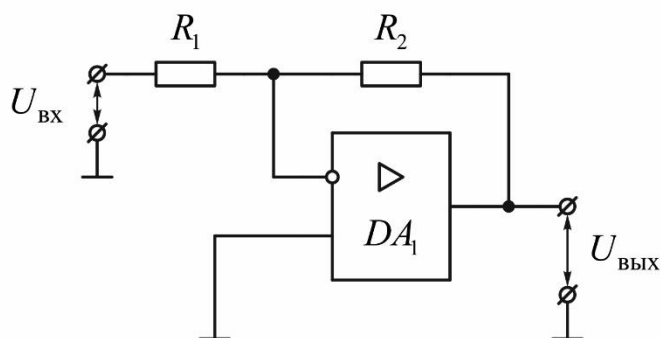


Рисунок 5.17 – Электрическая схема инвертирующего усилителя на ОУ

8 Подключить к инвертирующему усилителю на ОУ радиоизмерительные приборы в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 5.15.

В качестве источника питания необходимо использовать источник постоянного тока *GW Instek GPS-2303*. В качестве источника сигналов для исследования АХ по постоянному току необходимо использовать источник-измеритель *Keithley 2401*, а для исследования АХ по переменному току необходимо использовать генератор сигналов произвольной формы *Tektronix AFG3000*, в качестве осциллографа использовать цифровой запоминающий осциллограф *Tektronix TDS3052C*, в качестве вольтметра постоянного тока на входе использовать мультиметр *APPA-109N*, в качестве вольтметра постоянного тока на выходе использовать мультиметр *Agilent 34410A* (измерение переменного напряжения на выходе выполнять с помощью осциллографа).

9 Экспериментально исследовать АХ по постоянному и переменному току. Для этого необходимо выполнить измерения напряжений входного и выходного сигналов в соответствии с методикой (см. пункт 4 подраздела 5.3). Построить амплитудные характеристики в *Microsoft Excel*, рассчитать коэффициенты усиления по напряжению  $|K_n|$  для линейного участка АХ и определить динамический диапазон *D*.

В данном пункте и далее однотипные графики необходимо строить в одной координатной системе, размеры области построения – лист формата А4.

10 Экспериментально исследовать АЧХ инвертирующего усилителя на ОУ при отсутствии и наличии цепи частотной коррекции. Для этого необходимо выполнить измерения напряжений входного и выходного сигналов в соответствии с методикой (см. пункт 5 подраздела 5.3). Построить частотные зависимости модуля коэффициента усиления по напряжению в *Microsoft Excel*. С использованием полученных зависимостей определить для каждого случая полосу пропускания усилителя  $\Delta f$  и значение модуля коэффициента усиления по напряжению  $|\dot{K}_H|$  на средней частоте полосы пропускания.

11 Собрать на макетной плате *Wish Board 502-L* с использованием дискретных элементов электрическую схему, представленную на рисунке 5.18, для проведения экспериментальных исследований основных характеристик неинвертирующего усилителя на ОУ.

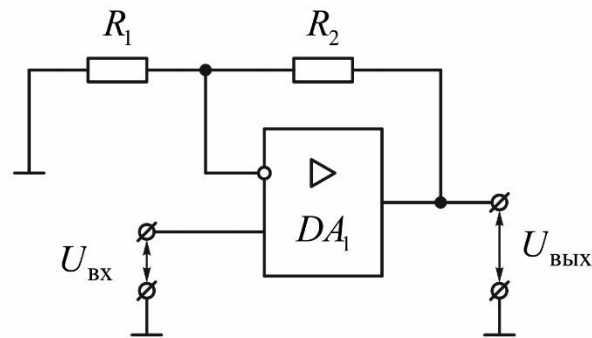


Рисунок 5.18 – Электрическая схема неинвертирующего усилителя на ОУ

12 Подключить к неинвертирующему усилителю на ОУ радиоизмерительные приборы в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 5.15.

В данном пункте необходимо использовать радиоизмерительные приборы, указанные в пункте 8 подраздела 5.4.

13 Экспериментально исследовать АХ по постоянному и переменному току. Для этого необходимо выполнить измерения напряжений входного и выходного сигналов в соответствии с методикой (см. пункт 4 подраздела 5.3). Построить амплитудные характеристики в *Microsoft Excel*, рассчитать коэффициенты усиления по напряжению  $|\dot{K}_H|$  для линейного участка АХ и определить динамический диапазон  $D$ .

14 Экспериментально исследовать АЧХ неинвертирующего усилителя на ОУ при отсутствии и наличии цепи частотной коррекции. Для этого необходимо выполнить измерения напряжений входного и выходного сигналов в соответ-

ствии с методикой (см. пункт 5 подраздела 5.3). Построить частотные зависимости модуля коэффициента усиления по напряжению в *Microsoft Excel*. С использованием полученных зависимостей определить для каждого случая полосу пропускания усилителя  $\Delta f$  и значение модуля коэффициента усиления по напряжению  $|K_{\text{н}}|$  на средней частоте полосы пропускания.

### 5.5 Содержание отчёта

- 1 Титульный лист.
- 2 Цель лабораторной работы.
- 3 Принципиальная электрическая схема исследуемого устройства.
- 4 Электрические параметры ОУ.
- 5 Таблицы с результатами расчётов.
- 6 Таблицы с результатами экспериментов.
- 7 Графики характеристик.
- 8 Выводы.

### 5.6 Контрольные вопросы

- 1 Что представляет собой ОУ?
- 2 Перечислите разновидности ОУ.
- 3 Назовите области применения ОУ.
- 4 Нарисуйте графическое обозначение ОУ.
- 5 Назовите основные характеристики ОУ.
- 6 Перечислите основные параметры ОУ.
- 7 Как выглядит схема инвертирующего усилителя ОУ?
- 8 Запишите математическое выражение для коэффициента передачи инвертирующего усилителя ОУ.
- 9 Нарисуйте схему неинвертирующего усилителя на ОУ.
- 10 Запишите математическое выражение для коэффициента передачи неинвертирующего усилителя ОУ.
- 11 Для чего необходима балансировка ОУ?
- 12 Что такое полностью дифференциальный усилитель на ОУ?
- 13 Нарисуйте АХ ОУ.
- 14 Нарисуйте АЧХ ОУ.
- 15 По какой причине АЧХ ОУ не имеет спада коэффициента передачи в области низких частот?
- 16 Как повлияет на полосу пропускания ОУ подключение к нему цепи частотной коррекции?
- 17 Нарисуйте схему повторителя напряжения на ОУ.
- 18 Какое значение имеет входное сопротивление ОУ?
- 19 Чем отличаются схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителя на ОУ?
- 20 В каких случаях применяется полностью дифференциальный усилитель на ОУ?

21 Назовите причину появления напряжения сдвига на выходе ОУ.

22 Что понимают под входным сопротивлением ОУ для дифференциального сигнала?

23 Какой тип усилительных каскадов применяют в качестве выходных каскадов ОУ?

24 Каким способом можно понизить выходное сопротивление ОУ?

25 Какой физический смысл имеет коэффициент ослабления синфазного сигнала?

## 6 ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ НА ОСНОВЕ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

### 6.1 Цель работы

1 Изучить основные характеристики, параметры, классификацию и область применения фильтров электрических сигналов.

2 Изучить основные электрические схемы и методы расчётов активных фильтров на основе операционных усилителей.

3 Исследовать основные характеристики и параметры активных фильтров на основе операционных усилителей путём математического моделирования в САПР *OrCAD*.

4 Экспериментально исследовать основные характеристики и параметры активных фильтров на основе операционных усилителей.

### 6.2 Краткие теоретические сведения

Фильтром электрических сигналов (далее – фильтр) называется устройство, которое пропускает электрические сигналы одних частот и не пропускает (подавляет) электрические сигналы других частот. Основной характеристикой фильтра является его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ), т. е. зависимость модуля коэффициента передачи  $K$  от частоты сигнала.

Область частот пропускаемых сигналов, для которых модуль коэффициента передачи практически не изменяется, называется **полосой пропускания**. Область частот подавляемых сигналов, для которых модуль коэффициента передачи не превосходит некоторого незначительного, заранее заданного значения, называется **полосой подавления (затухания)**.

В первую очередь фильтры подразделяются на пассивные и активные. Пассивные фильтры выполняются на *RLC*-цепях без применения активных компонентов. Они не требуют источников питания и имеют простое исполнение. Однако такие фильтры не обеспечивают хорошего разделения полосы пропускания от полосы затухания, кроме этого, в областях пропускания и затухания могут наблюдаться значительные неравномерности коэффициента передачи. Активные фильтры чаще всего реализуются на операционных усилителях с *RC*-цепями на входе и в качестве обратной связи. Они обеспечивают более качественное разделение полос пропускания и затухания. Электрические схемы таких фильтров, как правило, также имеют цепи, позволяющие регулировать неравномерность частотной характеристики в области пропускания и затухания. Кроме этого, активные фильтры могут быть также усилителями, т. е. иметь значение коэффициента передачи больше единицы.

Активные фильтры можно разделить на группы по ряду признаков: назначение, вид АЧХ фильтра, порядок фильтра, тип используемого активного компонента, вид обратных связей и др.

В зависимости от вида АЧХ различают следующие типы фильтров:

- фильтр нижних частот (ФНЧ);
- фильтр верхних частот (ФВЧ);
- полосно-пропускающий фильтр (ППФ);
- полосно-заграждающий (режекторный) фильтр (ПЗФ).

Нормированные АЧХ фильтров представлены на рисунках 6.1...6.4.

Различают фильтры по числу полюсов на частотной характеристике – фильтры первого порядка, второго и более высоких порядков. Фильтры более высоких порядков можно реализовать, соединяя соответствующим образом звенья более низких порядков. Фильтры высоких порядков имеют более крутые границы полос пропускания и затухания и более плоскую частотную характеристику в области полосы пропускания.

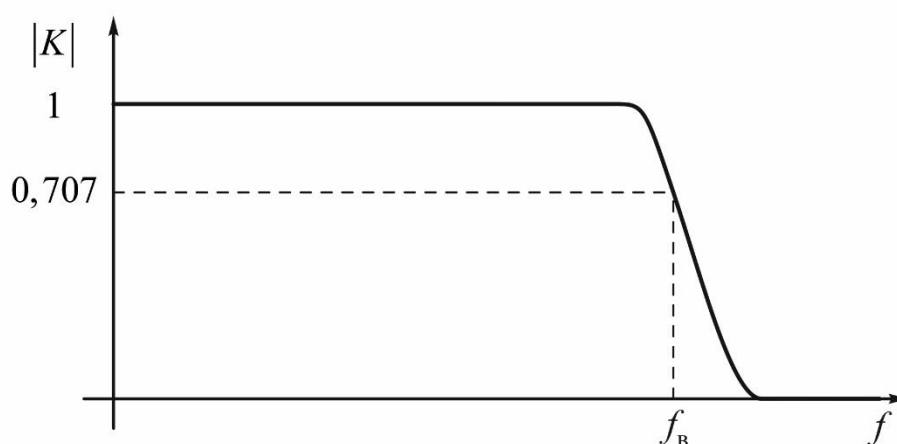


Рисунок 6.1 – Нормированная АЧХ ФНЧ

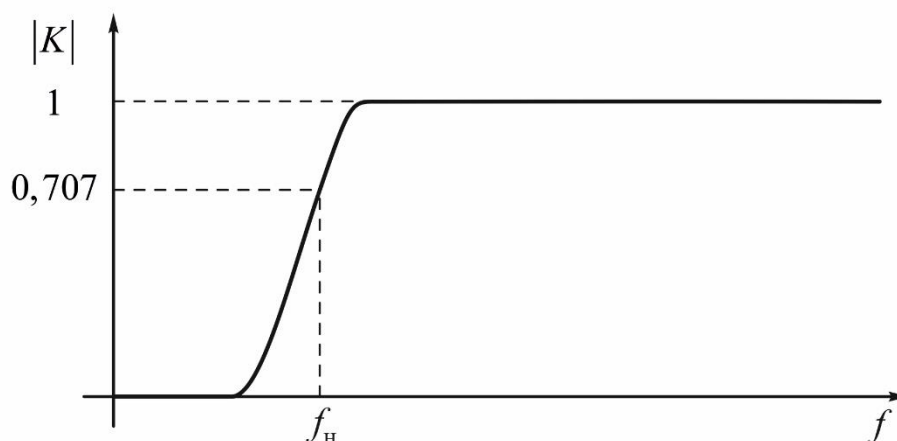


Рисунок 6.2 – Нормированная АЧХ ФВЧ



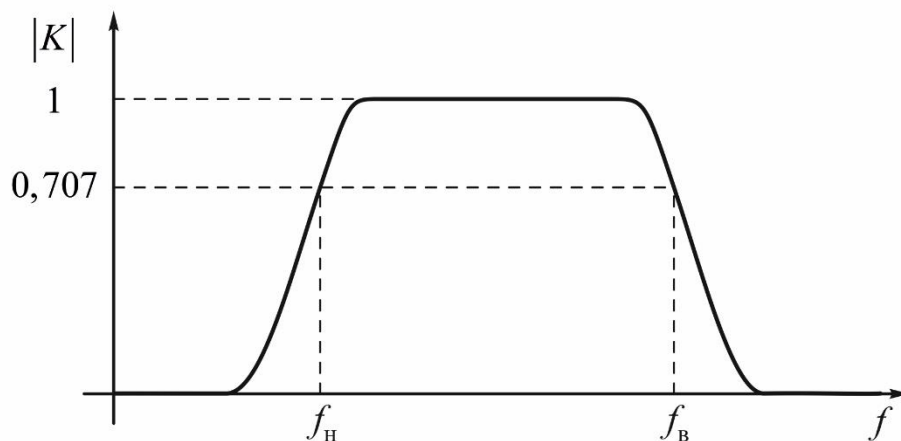


Рисунок 6.3 – Нормированная АЧХ ППФ

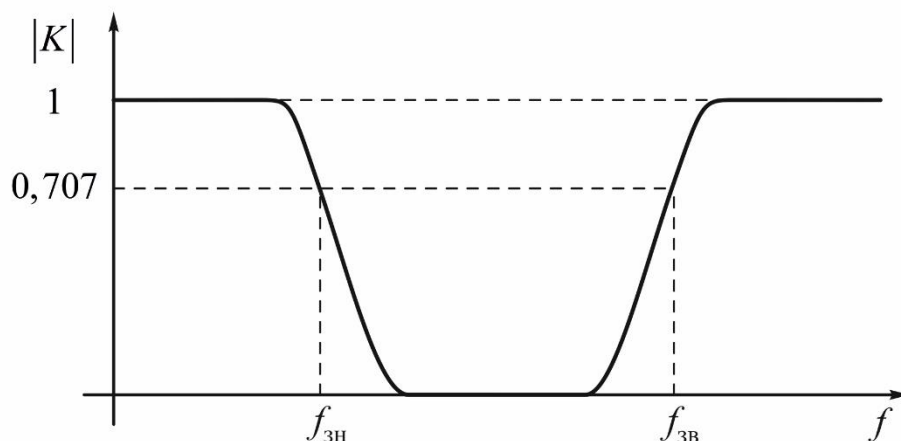


Рисунок 6.4 – Нормированная АЧХ ПЗФ

В зависимости от аппроксимирующего полинома фильтры разделяются на фильтры Чебышева, Баттерворта, Бесселя.

При изложении принципа построения аппроксимирующих функций фильтров как основу обычно используют ФНЧ. На рисунке 6.5 представлены частотные характеристики следующих фильтров:

- фильтр Баттерворта, который позволяет получить максимально плоскую АЧХ в полосе пропускания при заданном порядке фильтра. АЧХ ФНЧ Баттерворта имеет довольно длинный горизонтальный участок и резко спадает за частотой среза. Переходная характеристика такого фильтра при ступенчатом входном сигнале имеет колебательный характер;

- фильтр Чебышева, который позволяет получить максимально возможную крутизну АЧХ ФНЧ в переходной области при заданном порядке фильтра.

Частотная характеристика этого фильтра в полосе пропускания имеет волнообразный характер с постоянной амплитудой. Колебания переходного процесса при ступенчатом входном сигнале сильнее, чем у фильтра Баттерворта;

– фильтр Бесселя, который позволяет получить максимально линейную фазовую характеристику при заданном порядке фильтра. Он характеризуется меньшей длиной горизонтального участка частотной характеристики, чем фильтр Баттерворта и более пологим спадом АЧХ за частотой среза, чем фильтры Баттерворта и Чебышева. Данный фильтр обладает оптимальной переходной характеристикой (переходный процесс практически не имеет колебаний).

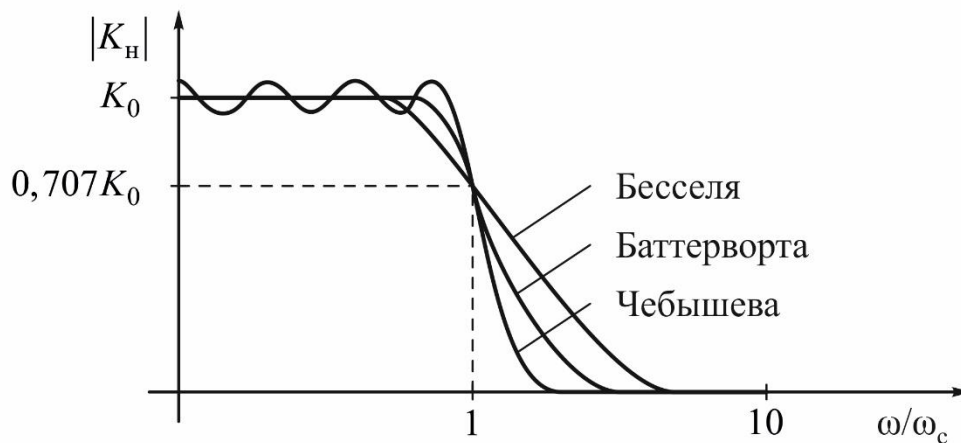


Рисунок 6.5 – Типы фильтров в зависимости от формы АЧХ

Широкие возможности активных  $RC$ -фильтров связаны с использованием в них активных компонентов. Цепи, содержащие только резисторы и конденсаторы, имеют полюсы передаточной функции на отрицательной действительной полуоси комплексной плоскости  $p = c + i\omega$ , что ограничивает возможности создания фильтров. В отличие от пассивных активные  $RC$ -фильтры могут иметь полюсы в любой части комплексной плоскости. Однако схемы с полюсами в правой полуплоскости неустойчивы, поэтому в активных фильтрах используются только те схемы, полюсы передаточной функции которых располагаются в левой полуплоскости или на оси  $i\omega$ .

Широкое применение получили активные фильтры на операционных усилителях с одноконтурной обратной связью. Структурная схема активного фильтра на ОУ с одноконтурной обратной связью приведена на рисунке 6.6. Она состоит из двух пассивных четырёхполюсников (входного и обратной связи) и инвертирующего усилителя на ОУ. Входной четырёхполюсник включён между входом фильтра и входом операционного усилителя, а четырёхполюсник обратной связи включён в цепи обратной связи ОУ. При анализе схем будем использовать инвертирующее включение ОУ и считать его идеальным.

Передаточную функцию для схемы, приведённой на рисунке 6.6, можно получить, используя уравнения для  $Y$ -параметров четырёхполюсника.

Для входного четырёхполюсника запишем уравнения для  $Y$ -параметров в следующем виде:

$$\begin{cases} i_{1B} = y_{11B}u_{1B} + y_{12B}u_{2B}, \\ i_{2B} = y_{21B}u_{1B} + y_{22B}u_{2B}, \end{cases} \quad (6.1)$$

где  $y_{12B} = y_{21B}$ .

Аналогичным образом запишем уравнения для  $Y$ -параметров четырёхполюсника обратной связи:

$$\begin{cases} i_{1O} = y_{11O}u_{1O} + y_{12O}u_{2O}, \\ i_{2O} = y_{21O}u_{1O} + y_{22O}u_{2O}, \end{cases} \quad (6.2)$$

где  $y_{12O} = y_{21O}$ .

Поскольку для идеального ОУ  $u_{BX} = 0$  и  $i_{BX} = 0$ , то  $u_{2B} = u_{1O} = 0$  и  $i_{2B} = -i_{1O}$ , уравнения (6.1) и (6.2) упрощаются и приводятся к виду

$$\begin{cases} i_{1B} = y_{12B}u_{1B}, & i_{1O} = y_{12O}u_{2O}, \\ i_{2B} = y_{22B}u_{1B}, & i_{2O} = y_{22O}u_{2O}, \end{cases} \quad (6.3)$$

откуда получаем, что  $y_{12B}u_{1B} = -y_{12O}u_{2O}$ .

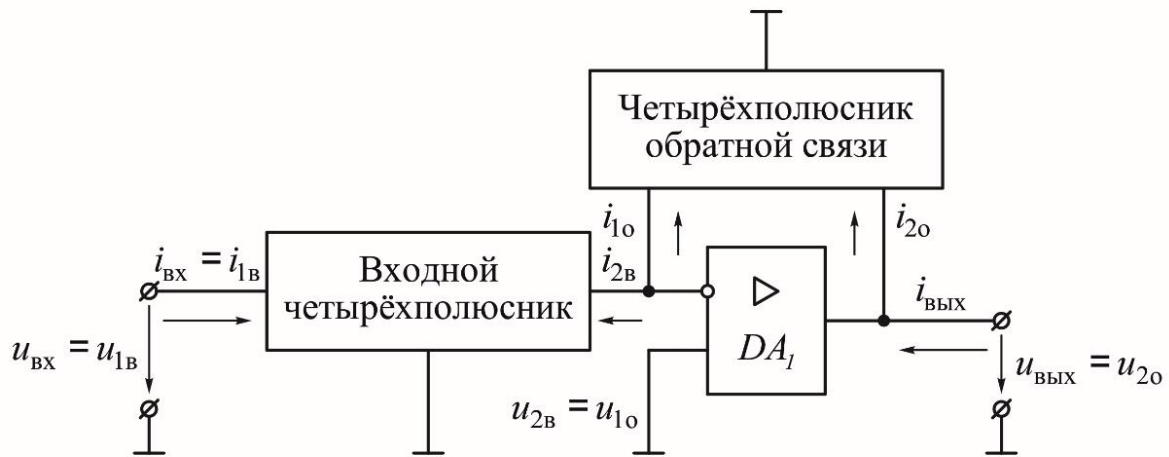


Рисунок 6.6 – Структурная схема активного фильтра на ОУ с одноконтурной обратной связью

Используя уравнение (6.3), запишем коэффициент передачи фильтра по напряжению:

$$K_H = \frac{u_{2O}}{u_{1B}} = -\frac{y_{12B}}{y_{12O}} \text{ или } K_H = \frac{u_{2O}}{u_{1B}} = -\frac{y_{21B}}{y_{21O}}, \quad (6.4)$$

который определяется отношением передаточных проводимостей пассивных четырёхполюсников.

Поскольку четырёхполюсники пассивные, то их полюсы лежат на отрицательной части действительной полуоси комплексной плоскости  $p$ . Если обе цепи

имеют одинаковые полюсы, то знаменатели функций  $y_{12в}$  и  $y_{12о}$  сократятся и их полюсы не будут влиять на коэффициент передачи фильтра. В этом случае полюсы передаточной функции фильтра (выражение (6.4)) будут определяться нулями передаточной проводимости  $y_{12о}$ . При этом, поскольку нули передаточной проводимости пассивной  $RC$ -цепи могут лежать в любой точке комплексной плоскости  $p$ , то становится возможным реализовать цепь с коэффициентом передачи, имеющим комплексно-сопряжённые полюсы, как для колебательного контура. Однако для обеспечения устойчивости схемы эти полюсы должны лежать в левой части комплексной плоскости, т. е. вещественная часть комплексного полюса должна быть отрицательной.

Подобным же образом можно утверждать, что нули коэффициента передачи (выражение (6.4)) будут определяться нулями передаточной проводимости  $y_{12в}$  и, следовательно, можно получить любые требуемые действительные или комплексно-сопряжённые нули коэффициента передачи фильтра. Таким образом, активный  $RC$ -фильтр с одноконтурной обратной связью в цепи идеального ОУ даёт возможность получать коэффициент передачи практически с любыми нулями и полюсами.

ФНЧ с одноконтурной обратной связью предназначен для выделения сигналов, частота которых находится ниже некоторой заданной частоты, называемой частотой среза фильтра  $\omega_c$ . ФНЧ практически без ослабления пропускает сигналы в полосе частот от постоянного тока до частоты среза и ослабляет сигналы, частота которых выше частоты среза.

В зависимости от числа полюсов в передаточной характеристике ФНЧ делятся на фильтры первого порядка, второго порядка и высокого порядка. Электрическая схема ФНЧ первого порядка приведена на рисунке 6.7. Такой фильтр имеет монотонную АЧХ, максимальный наклон которой в области затухания сигнала равен 20 дБ/дек.

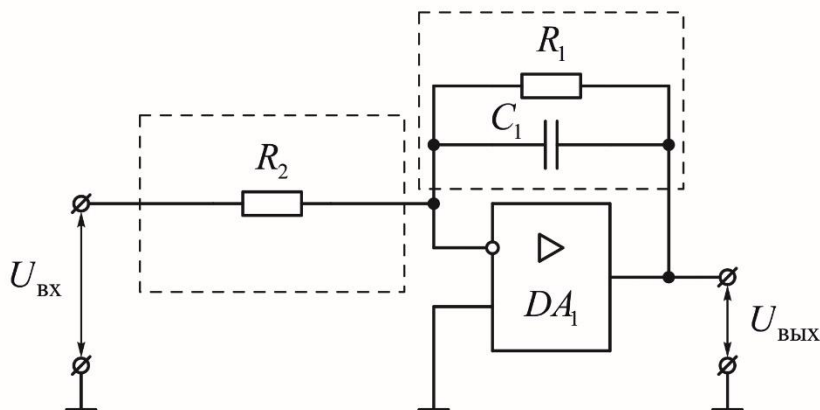


Рисунок 6.7 – Электрическая схема ФНЧ с одноконтурной обратной связью первого порядка

В нём входной четырёхполюсник выполнен на одном резисторе  $R_2$ , а четырёхполюсник обратной связи содержит параллельно соединённые элементы: резистор  $R_1$  и конденсатор  $C_1$ .

Передачная проводимость входного четырёхполюсника имеет значение в соответствии с выражением  $y_{21в} = -g_2$ , а четырёхполюсника обратной связи – в соответствии с выражением  $y_{21о} = -(g_1 + pC_1)$ , где  $g_2 = 1/R_2$ , а  $g_1 = 1/R_1$ .

Тогда коэффициент передачи ФНЧ по напряжению будет равен

$$K_u = -\frac{y_{21в}}{y_{21о}} = -\frac{g_2}{g_1 + pC_1} = -K_0 \frac{\omega_c}{p + \omega_c}, \quad (6.5)$$

где  $K_0 = -\frac{g_2}{g_1} = -\frac{R_1}{R_2}$  – коэффициент передачи фильтра по напряжению на постоянном токе, а  $\omega_c = g_1 / C_1 = 1/R_1 C_1$  – частота среза фильтра.

Для установившихся колебаний синусоидальной формы модуль и аргумент коэффициента передачи фильтра по напряжению определяются выражениями

$$|K_H| = K_0 \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 / \omega_c^2}}, \quad \varphi(\omega) = -\arctg \frac{\omega}{\omega_c}. \quad (6.6)$$

График для модуля коэффициента передачи фильтра приведён на рисунке 6.8, откуда следует, что на частоте среза  $\omega_c$  фильтр вносит затухание, определяемое коэффициентом передачи, равном  $0,707K_0$  (или 3 дБ).

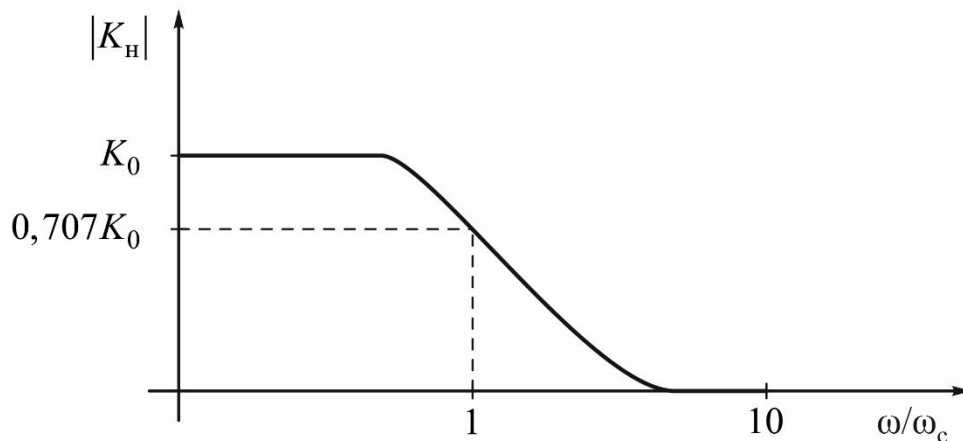


Рисунок 6.8 – АЧХ ФНЧ с одноконтурной обратной связью первого порядка

Коэффициент усиления ОУ ФНЧ первого порядка с одноконтурной связью на частоте среза  $\omega_c$  должен быть не менее 60 дБ, при этом стабильность параметров фильтра будет определяться в основном стабильностью пассивных элементов  $R_1, R_2, C_1$ .

Коэффициент передачи ФНЧ второго порядка, представленного на рисунке 6.9, определяется выражением

$$K_H = -K_0 \frac{\omega_c^2}{p^2 + \alpha\omega_c p + \omega_c^2}, \quad (6.7)$$

где  $K_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4}$  – коэффициент передачи фильтра по напряжению на постоянном токе;

$\omega_c = 1/\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}$  – частота среза фильтра;

$\alpha = \sqrt{\frac{C_2 (R_1 + R_2)^2}{C_1 R_1 R_2}}$  – затухание фильтра.

Выражение (6.7) имеет два полюса:

$$p_{1,2} = -\frac{\alpha\omega_c}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha\omega_c}{2}\right)^2 - \omega_c^2}, \text{ следовательно, при } \alpha < 2 \text{ полюсы коэффициента}$$

передачи будут комплексно-сопряжёнными, а при  $\alpha > 2$  вещественными. Добротность этого фильтра определяется выражением

$$Q = 1/\alpha = \left( \sqrt{\frac{C_2 (R_1 + R_2)^2}{C_1 R_1 R_2}} \right)^{-1}. \quad (6.8)$$

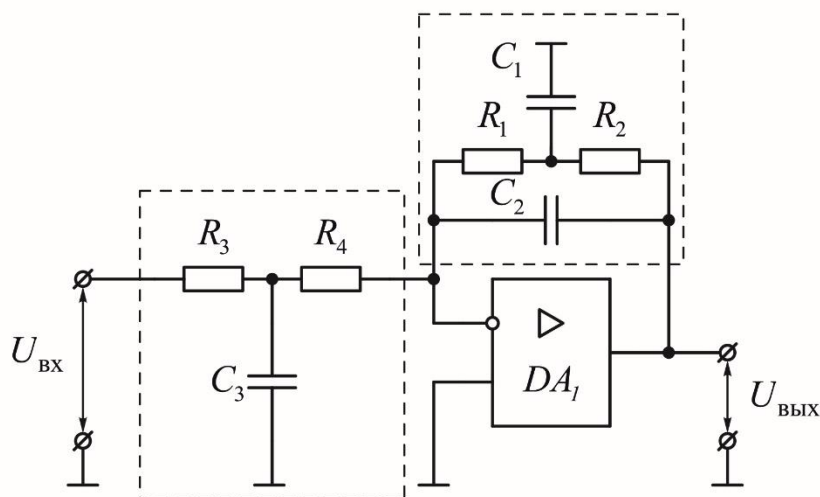


Рисунок 6.9 – Электрическая схема ФНЧ с одноконтурной обратной связью второго порядка

Амплитудно-частотные характеристики ФНЧ второго порядка для различных значений  $\alpha \leq 2$  приведены на рисунке 6.10. При  $\alpha \rightarrow 0$  добротность  $Q \rightarrow \infty$  и фильтр может возбуждаться на частоте  $\omega_c$ .

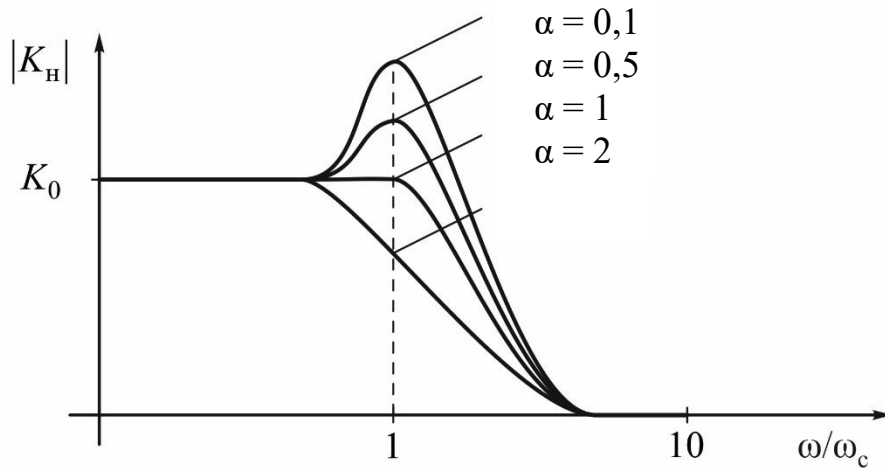


Рисунок 6.10 – АЧХ ФНЧ с одноконтурной обратной связью второго порядка

ФВЧ с одноконтурной обратной связью предназначен для выделения сигналов, частота которых находится выше некоторой заданной частоты, называемой частотой среза фильтра  $\omega_c$ . ФВЧ практически без ослабления пропускает сигналы выше частоты среза и ослабляет сигналы с частотой ниже частоты среза.

В зависимости от числа полюсов в передаточной характеристике ФВЧ так же, как и ФНЧ делят на фильтры первого порядка, второго порядка и высокого порядка. Электрическая схема ФНЧ первого порядка приведена на рисунке 6.11. Такой фильтр имеет монотонную АЧХ, максимальный наклон которой в области затухания сигнала равен 20 дБ/дек. В этой схеме изменён только входной четырёхполюсник, в котором резистор  $R_2$  заменён конденсатором  $C_2$ . Передаточные проводимости пассивных четырёхполюсников имеют значения в соответствии с выражениями  $y_{21B} = -pC_2$ ,  $y_{21O} = -(g_1 + pC_1)$ , где  $g_1 = 1/R_1$ .

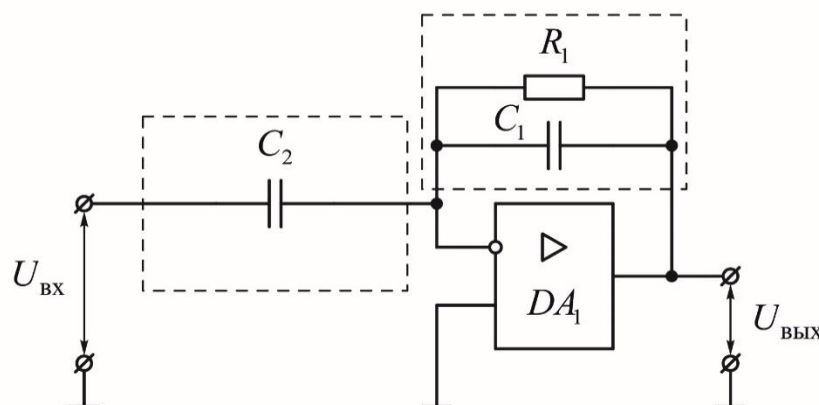


Рисунок 6.11 – Электрическая схема ФВЧ с одноконтурной обратной связью первого порядка

Коэффициент передачи этого фильтра по напряжению также определяется выражением (6.4):

$$K_H = -\frac{y_{21B}}{y_{21o}} = -\frac{pC_2}{g_1 + pC_1} = -K_0 \frac{p}{p + \omega_c}, \quad (6.9)$$

где  $K_0 = C_2 / C_1$  – коэффициент передачи фильтра на бесконечно высокой частоте ( $\omega \rightarrow \infty$ ), а  $\omega_c = g_1 / C_1 = 1 / R_1 C_1$  – частота среза фильтра.

Для установившихся колебаний синусоидальной формы модуль и аргумент коэффициента передачи фильтра определяются выражениями

$$|K_H| = K_0 \frac{\omega}{\sqrt{\omega_c^2 + \omega^2}}, \quad \varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \operatorname{arctg} \frac{\omega}{\omega_c}. \quad (6.10)$$

График для модуля коэффициента передачи фильтра приведен на рисунке 6.12, откуда следует, что на частоте среза  $\omega_c$  фильтр вносит затухание, определяемое коэффициентом передачи, равным  $0,707K_0$  (или 3 дБ).

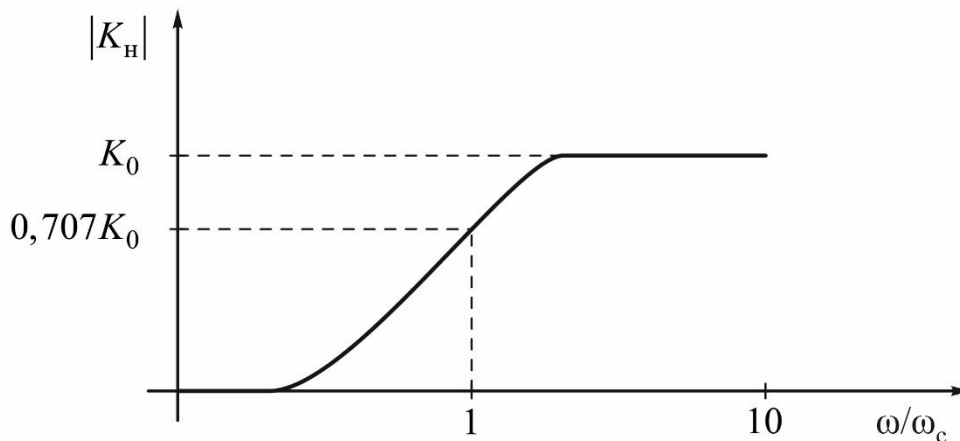


Рисунок 6.12 – АЧХ ФВЧ с одноконтурной обратной связью первого порядка

Стабильность ФВЧ в основном определяется стабильностью пассивных элементов  $R_1, C_1, C_2$ , если коэффициент усиления ОУ в полосе пропускания больше 60 дБ.

Передаточная характеристика ФВЧ второго порядка, приведённая на рисунке 6.13, определяется выражением

$$K_H = -K_0 \frac{1}{p^2 + \alpha\omega_c p + \omega_c^2}, \quad (6.11)$$

где  $K_0 = \frac{C_3 C_4}{C_2 (C_3 + C_4)}$  – коэффициент передачи фильтра на бесконечно высокой частоте ( $\omega \rightarrow \infty$ );



$$\alpha = \sqrt{\frac{C_2 (R_1 + R_2)^2}{C_1 R_1 R_2}} \text{ – затухание фильтра;}$$

$$\omega_c = 1 / \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2} \text{ – частота среза фильтра.}$$

Выражение (6.11) также имеет два полюса:

$$p_{1,2} = -\frac{\alpha \omega_c}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\alpha \omega_c}{2}\right)^2 - \omega_c^2}.$$

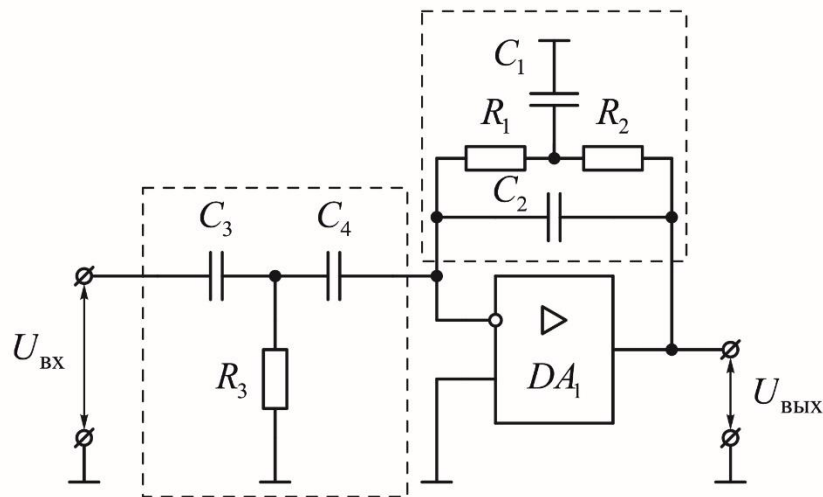


Рисунок 6.13 – Электрическая схема ФВЧ с одноконтурной обратной связью второго порядка

При значении  $\alpha < 2$  полюсы коэффициента передачи ФВЧ являются комплексно-сопряжёнными, а при  $\alpha > 2$  – вещественными. Для получения максимально гладкой характеристики ФВЧ обычно выбирают  $\alpha = \sqrt{2}$ . При этом наклон характеристики составляет 40 дБ на декаду. Добротность фильтра определяется выражением

$$Q = 1 / \alpha = \left( \sqrt{\frac{C_2 (R_1 + R_2)^2}{C_1 R_1 R_2}} \right)^{-1}. \quad (6.12)$$

Амплитудно-частотные характеристики ФВЧ второго порядка для различных значений  $\alpha$  приведены на рисунке 6.14.

ППФ с одноконтурной обратной связью предназначен для выделения сигналов, частота которых находится в пределах некоторой полосы  $\omega_{01} < \omega < \omega_{02}$ . При этом он практически без ослабления пропускает сигналы, лежащие в этой полосе, и ослабляет сигналы, частоты которых лежат за пределами полосы пропускания. ППФ бывают второго порядка и высокого порядка.

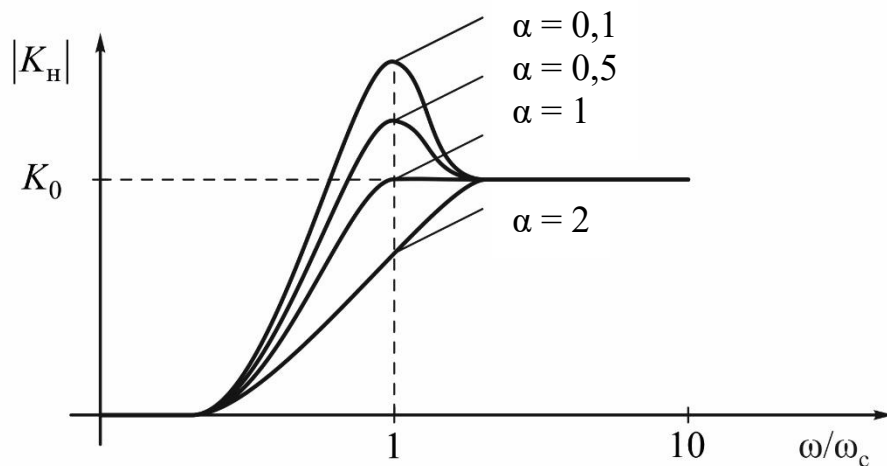


Рисунок 6.14 – АЧХ ФВЧ с одноконтурной обратной связью второго порядка

Передаточная характеристика ППФ второго порядка, представленного на рисунке 6.15, определяется выражением

$$K_H = \frac{K_0 \alpha \omega p}{p^2 + \alpha \omega_0 p + \omega_0^2}, \quad (6.13)$$

где  $K_0 = \frac{C_1 R_1 R_2}{C_2 R_3 (R_1 + R_2)}$  – максимальный коэффициент усиления фильтра в полосе пропускания;

$$\alpha = \sqrt{\frac{C_2 (R_1 + R_2)^2}{C_1 R_1 R_2}} \text{ – коэффициент затухания фильтра;}$$

$\omega_0 = \sqrt{\omega_{01} \omega_{02}} = 1 / \sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}$  – частота максимального усиления (квazирезонансная частота).

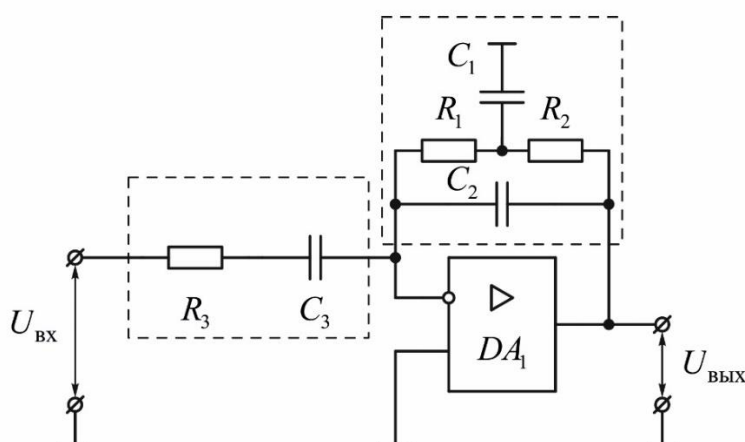


Рисунок 6.15 – Электрическая схема ППФ с одноконтурной обратной связью второго порядка

Добротность фильтра определяется выражением

$$Q = 1/\alpha = \left[ \frac{C_2 (R_1 + R_2)^2}{C_1 R_1 R_2} \right]^{-1/2}. \quad (6.14)$$

Амплитудно-частотная характеристика ППФ определяется выражением (6.13), которое имеет два комплексно-сопряжённых полюса  $\omega_{01}$  и  $\omega_{02}$ .

График амплитудно-частотной характеристики ППФ для двух значений добротности приведён на рисунке 6.16. Максимальное усиление ППФ обеспечивается в полосе пропускания и равно  $K_0$  на частоте  $\omega = \omega_0$ .

С повышением добротности полоса пропускания фильтра сужается, а максимальное усиление остаётся неизменным.

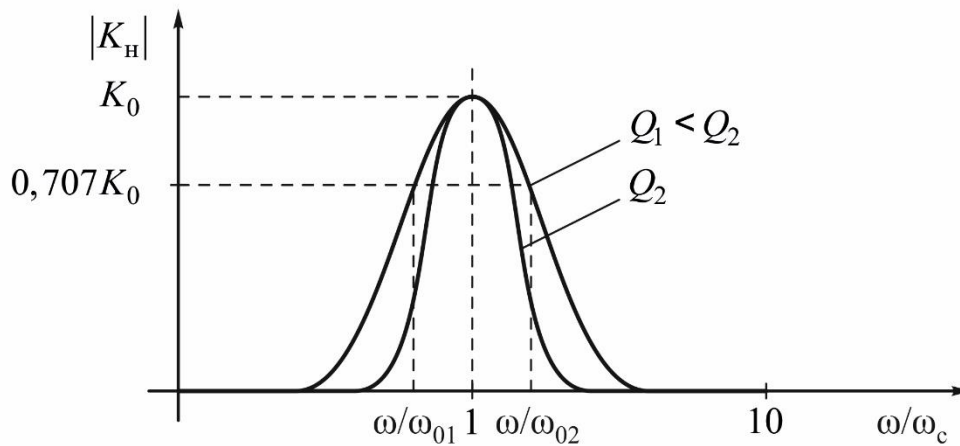


Рисунок 6.16 – АЧХ ППФ с одноконтурной обратной связью второго порядка

ПЗФ с одноконтурной обратной связью имеет частотную характеристику, противоположную АЧХ ППФ. ПЗФ ослабляет сигналы в полосе частот  $\omega_{01} < \omega < \omega_{02}$  и пропускает на выход сигналы, частота которых лежит за пределами этой полосы частот.

Передающую функцию ПЗФ, представленного на рисунке 6.17, можно получить, используя передающую функцию ППФ:

$$K_{зф} = K_0 - K_{пф} = K_0 - \frac{K_0 \alpha \omega p}{p^2 + \alpha \omega_0 p + \omega_0^2} = \frac{K_0 (p^2 + \omega_0^2)}{p^2 + \alpha \omega_0 p + \omega_0^2}, \quad (6.15)$$

где  $K_0 = \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4}$  – коэффициент передачи ПЗФ на постоянном токе;

$\omega_0 = 1/\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}$  – центральная частота полосы затухания.

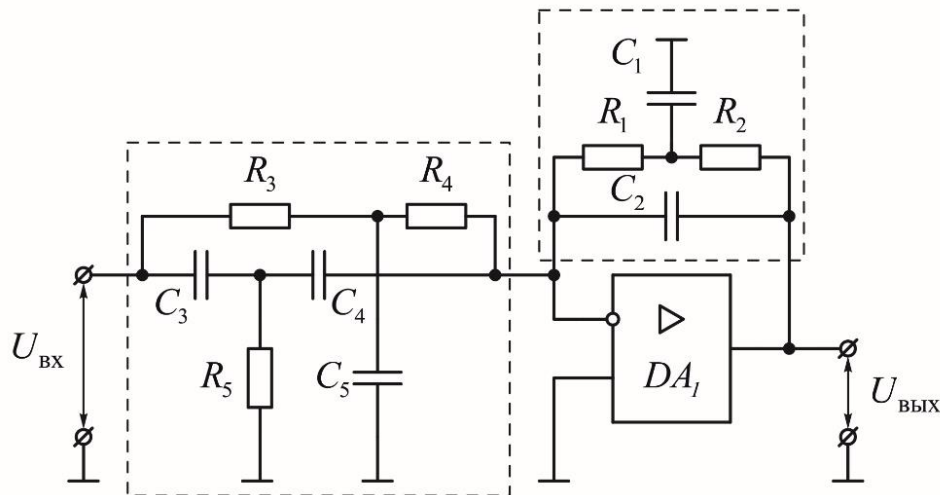


Рисунок 6.17 – Электрическая схема ПЗФ с одноконтурной обратной связью второго порядка

Амплитудно-частотная характеристика ПЗФ изображена на рисунке 6.18. На частоте  $\omega = \omega_0$  коэффициент передачи имеет значение  $K_H = 0$ , а на постоянном токе ( $\omega = 0$ ) получаем  $K_H = K_0$ . С повышением частоты  $K_{эф}$  также стремится к значению  $K_H = K_0$ .

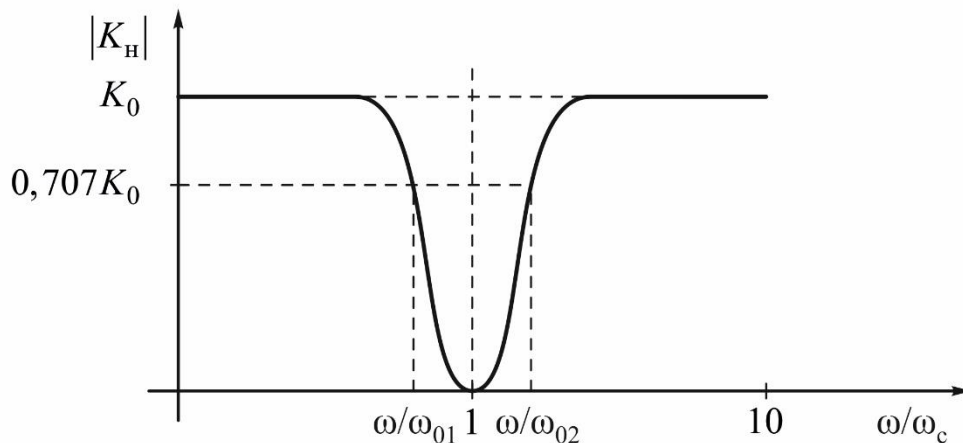


Рисунок 6.18 – АЧХ ПЗФ с одноконтурной обратной связью второго порядка

Дополнительно о фильтрации электрических сигналов и применении аналоговых фильтров в измерительных системах изложено в источниках [8 – 10].

### 6.3 Методические указания по выполнению лабораторной работы

1 Математический анализ фильтра в САПР *OrCAD* необходимо проводить по переменному току (*AC Sweep*).

Для этого необходимо создать принципиальную электрическую схему исследуемого устройства путём создания проекта в приложении *Capture CIS Lite*. В качестве источника питания использовать источник *VDC*. В качестве источника сигнала использовать источник *VAC*.

Для выполнения анализа на переменном токе необходимо установить параметры анализа *AC Sweep*, задав изменение частоты по декадам в диапазоне от 1 до  $10^9$  Гц, 10 точек на декаду.

Для оценки влияния значений параметров элементов электрической схемы фильтра на параметры исследуемого устройства необходимо использовать многовариантный анализ *Parametric*. Более подробно порядок работы в САПР *OrCAD* изложен в источнике [1].

2 Исследование АЧХ фильтра необходимо проводить при фиксированной амплитуде входного сигнала  $U_{\text{вх}} = 0,4 \dots 0,6 U_{\text{вх. макс}}$  с использованием измерительной установки, структурная схема которой представлена на рисунке 6.19.

Для упрощения расчётов коэффициента усиления по напряжению целесообразно выбрать целые значения действующего напряжения входного сигнала, например, 1, 5, 10 мВ.

Поскольку исследуемые фильтры имеют полосу пропускания (затухания) в несколько декад (декада – диапазон изменения некоторой величины, на границах которого её значения отличаются в 10 раз), при экспериментальном исследовании АЧХ и построении графиков необходимо по оси частот использовать логарифмический масштаб.

Измерения для АЧХ следует проводить в девяти точках на каждую декаду. Например: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 Гц; 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 Гц; 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000 Гц и т. д. Значения частот среза необходимо определять экспериментально по уменьшению уровня выходного напряжения или коэффициента усиления на 3 дБ по сравнению с их максимальными значениями в полосе пропускания.

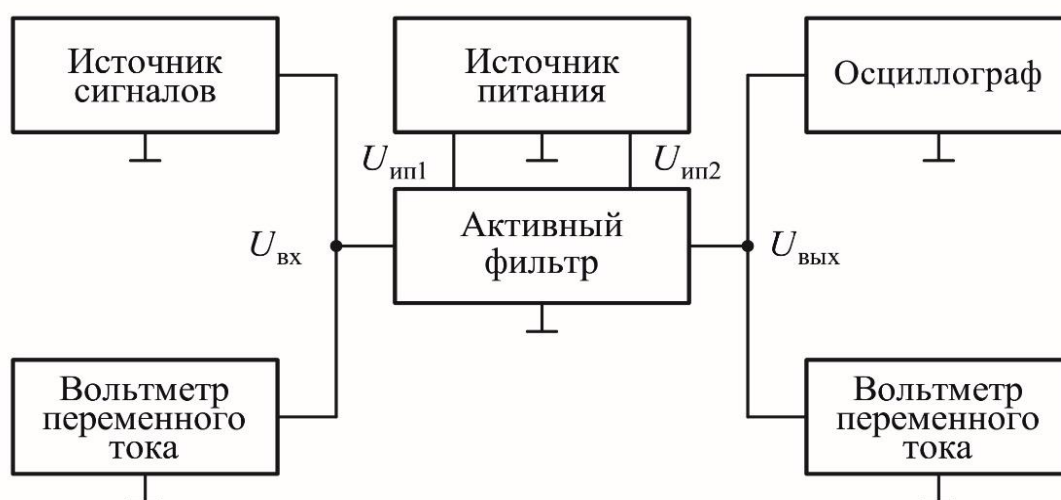


Рисунок 6.19 – Структурная схема лабораторной установки для исследования АЧХ фильтра

## 6.4 Порядок выполнения лабораторной работы

1 Получить у преподавателя индивидуальное задание для выполнения лабораторной работы, которое содержит принципиальную электрическую схему фильтра и исходные данные для расчёта значений параметров её основных элементов.

2 Выполнить предварительный расчёт электрической схемы фильтра. Порядок расчёта фильтра изложен в источниках [11; 12]. После расчёта значений параметров элементов схемы (резисторов и конденсаторов) необходимо привести их значения к номинальным согласно рядам ГОСТ 28884 – 90. Значения параметров резисторов выбирать из ряда, соответствующего допустимому отклонению  $\pm 5\%$ , а параметров конденсаторов –  $\pm 20\%$ . При проведении всех последующих расчётов оперировать только номинальными значениями. Результаты расчёта свести в таблицу.

3 Выполнить анализ фильтра в САПР *OrCAD* по переменному току. Построить частотные зависимости модулей и фаз коэффициентов усиления по напряжению. С использованием полученных зависимостей определить полосу пропускания фильтра и значение модуля коэффициента усиления по напряжению в полосе пропускания и полосе затухания. Сравнить результаты измерений с результатами теоретических расчётов, выполненных в пункте 2 подраздела 6.4.

4 Исследовать в САПР *OrCAD* влияние значений параметров основных элементов принципиальной электрической схемы на АЧХ фильтра (перечень элементов определяется заданием).

5 Собрать электрическую схему фильтра с использованием дискретных элементов на макетной плате *Wish Board 502-L* для проведения экспериментальных исследований. Допускается использование функционального модуля фильтра.

6 Подключить к фильтру радиоизмерительные приборы в соответствии со структурной схемой, представленной на рисунке 6.19.

В качестве источника питания использовать источник постоянного тока *GW Instek GPS-2303*, в качестве генератора сигналов – генератор сигналов произвольной формы *Tektronix AFG3000*, в качестве осциллографа – цифровой запоминающий осциллограф *Tektronix TDS3052C*, в качестве вольтметра переменного напряжения на входе – мультиметр *Agilent 34410A*, в качестве вольтметра переменного напряжения на выходе – источник-измеритель *Keithley 2401* (допускается измерение переменного напряжения на выходе с использованием осциллографа с помощью маркерных измерений).

В данном пункте задания и далее допускается использование других типов радиоизмерительных приборов, имеющих аналогичные технические параметры.

7 С помощью органов управления источника постоянного тока *GW Instek GPS-2303* установить требуемые напряжения питания  $U_{\text{ин1}}$  и  $U_{\text{ин2}}$  для исследуемой схемы и экспериментально исследовать АЧХ фильтра. Для этого необходимо выполнить измерения напряжений входного и выходного сигналов в соответствии с методикой (см. пункт 2 подраздела 6.3).

Построить частотные зависимости модулей коэффициента усиления по напряжению в *Microsoft Excel*. С использованием полученных зависимостей рассчитать полосу пропускания (затухания) фильтра  $\Delta f$  и значение модуля коэффициента усиления по напряжению  $|\dot{K}_n|$  в полосе пропускания (затухания) для всех исследуемых случаев.

Графики необходимо строить в отдельной координатной системе, размеры области построения – лист формата А4.

## 6.5 Содержание отчёта

- 1 Титульный лист.
- 2 Цель лабораторной работы.
- 3 Принципиальная электрическая схема исследуемого устройства.
- 4 Электрические параметры исследуемого устройства.
- 5 Таблицы с результатами расчётов.
- 6 Таблицы с результатами экспериментов.
- 7 Графики исследуемых характеристик.
- 8 Выводы.

## 6.6 Контрольные вопросы

- 1 Назовите назначение фильтров электрических сигналов.
- 2 Перечислите признаки для классификации фильтров.
- 3 Каким образом классифицируют фильтры по виду АЧХ?
- 4 Чем отличается пассивный фильтр от активного?
- 5 Расскажите о преимуществах и недостатках тех или иных способов построения фильтров.
- 6 Какие параметры обычно используются при анализе четырёхполюсников?
- 7 В чём заключается преобразование Лапласа?
- 8 Какими преимуществами обладают активные фильтры электрических сигналов?
- 9 Что такое порядок фильтра?
- 10 Расскажите о методе анализа четырёхполюсников с помощью  $Y$ -параметров.
- 11 В чём заключаются достоинства и недостатки фильтров высокого и низкого порядков?
- 12 Какой порядок может иметь фильтр?
- 13 Какими свойствами обладает фильтр Баттерворта?
- 14 Какими свойствами обладает фильтр Чебышева?
- 15 Чем отличается фильтр Баттерворта от фильтра Чебышева?
- 16 Какое преимущество имеют активные фильтры перед пассивными?
- 17 Как зависит АЧХ фильтра от добротности?
- 18 Какой тип фильтра является интегрирующим устройством?
- 19 Чему равен коэффициент передачи многокаскадного фильтра?
- 20 Какими свойствами обладает фильтр Бесселя?

21 Какой тип фильтра обладает максимально линейной фазовой характеристикой при заданном порядке?

22 Почему для проектирования многокаскадных фильтров удобно использовать повторитель напряжения на ОУ?

23 Как влияет порядок фильтра на крутизну АЧХ и задержку сигнала?

24 Какой тип фильтра является дифференцирующим устройством?

25 Что общего у коэффициентов передачи для фильтров второго порядка всех типов?



## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Титце, У. Полупроводниковая схемотехника. В 2 ч. / У. Титце, К. Шенк : пер. с нем. – М. : ДМК Пресс, 2008. – Ч. 1. – 832 с.
- 2 Алёхин, В. А. OrCAD 17.2. Анализ и проектирование электронных устройств : учеб. пособие / В. А. Алёхин. – М. : Горячая линия – Телеком, 2020. – 328 с.
- 3 Травин, Г. А. Основы схемотехники телекоммуникационных устройств : учеб. пособие / Г. А. Травин. – СПб. : Издательство «Лань», 2021. – 216 с.
- 4 Травин, Г. А. Основы схемотехники устройств радиосвязи, радиовещания и телевидения : учеб. пособие / Г. А. Травин. – М. : Высш. шк., 2007. – 606 с.
- 5 Титце, У. Полупроводниковая схемотехника. В 2 ч. / У. Титце, К. Шенк : пер. с нем. – М. : ДМК Пресс, 2007. – Ч. 2. – 942 с.
- 6 Пейтон, А. Д. Аналоговая электроника на операционных усилителях / А. Д. Пейтон, В. Волш. – М. : Бином, 1994. – 352 с.
- 7 Креккрафт, Д. Аналоговая электроника. Схемы, системы, обработка сигнала / Д. Креккрафт, С. Джерджли : пер. с англ. – М. : Техносфера, 2005. – 362 с.
- 8 Кудряков, С. А. Теоретические основы фильтрации сигналов : учеб. пособие / С. А. Кудряков, Е. В. Соболев, Е. А. Рубцов. – СПб. : СПбГУ ГА, 2018. – 198 с.
- 9 Ванин, В. К. Аналоговые и цифровые фильтры в измерительных устройствах и устройствах автоматики энергосистем / В. К. Ванин, А. В. Мокеев, Г. М. Попов. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – 196 с.
- 10 Прянишников, В. А. Электроника / В. А. Прянишников. – СПб. : «КОРОНА принт», 1998. – 401 с.
- 11 Мошиц, Г. Проектирование активных фильтров / Г. Мошиц, П. Горн : пер. с англ. – М. : Мир, 1984. – 340 с.
- 12 Бессонова, Е. А. Расчёт фильтров: учеб. пособие / Е. А. Бессонова, К. А. Семенов. – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2004. – 49 с.

*Учебное издание*

**Русакович Владимир Николаевич**

**ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА  
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИХ СИСТЕМ.  
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

В двух частях  
Часть 1

**УСИЛИТЕЛЬНЫЕ И ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ  
УСТРОЙСТВА**

Редактор *Ю. В. Ляховец*  
Корректор *Е. Н. Батурчик*  
Компьютерная правка, оригинал-макет *О. И. Толкач*

Подписано в печать 13.03.2024. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».  
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 5,46. Уч.-изд. л. 5,6. Тираж 40 экз. Заказ 135.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования  
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014,  
№ 2/113 от 07.04.2014, № 3/615 от 07.04.2014  
Ул. П. Бровки, 6, 220013, г. Минск