



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования «Московский государственный  
технический университет имени Н.Э. Баумана  
(национальный исследовательский университет)»  
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ФАКУЛЬТЕТ

Информатики и систем управления

КАФЕДРА

Проектирования и технологии производства ЭА

## РАСЧЁТНО - ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА

*к курсовому проекту на тему:*

***«Разработка, моделирование и экспериментальное  
исследование усилителя низкой частоты на полевых  
транзисторах»***

Студент

Бакулевский М. В.

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

Руководитель курсового проекта

Семенцов С. Г.

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

Консультант

(Подпись, дата)

(И.О.Фамилия)

Москва, 2023

## **АННОТАЦИЯ**

Работа посвящена разработке устройства «Усилитель низкой частоты». Описаны принципы работы устройства. В данной работе представлены схемотехнический этап проектирования, содержащий информацию об элементной базе, описание электрической структурной и принципиальной схем, а также моделирование работы устройства в среде “NI Multisim 14.2”; конструкторско-технологический этап проектирования, содержащий описания технологических процессов изготовления и сборки изделия “Усилитель низкой частоты”; экспериментально-исследовательский этап, содержащий информацию о проводимых экспериментальных исследованиях характеристик опытного образца “Усилитель низкой частоты”. В заключении представлены выводы о проделанной работе и соответствии разработанного изделия “Усилитель низкой частоты” техническому заданию.

Ключевые слова: полевой транзистор, диод, операционный усилитель, электролитический конденсатор, потенциометр.

## **ABSTRACT**

The work is devoted to the development of the device "Low frequency amplifier". The principles of operation of the device are described. This paper presents the circuit design stage, containing information about the element base, a description of the electrical structural and circuit diagrams, as well as modeling the operation of the device in the NI Multisim 14.2 environment; the design and technological design stage, containing descriptions of the technological processes of manufacturing and assembling the Low Frequency Amplifier product; an experimental research stage containing information on the ongoing experimental studies of the characteristics of the prototype “Low frequency amplifier”. In conclusion, the conclusions about the work done and the compliance of the developed product “Low frequency amplifier” with the technical task are presented.

Keywords: field effect transistor, diode, operational amplifier, electrolytic capacitor, potentiometer.

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ** **ВВЕДЕНИЕ**

#### **1. СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА «УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ»**

1.1. Разработка электрической структурной схемы (Э1)

1.2. Разработка электрической структурной схемы (Э3)

1.3. Моделирование в среде «PSPICE 9.2»

1.4. Выбор элементной базы устройства

1.5. Разработка перечня элементов (ПЭЗ)

Выводы

#### **2. КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА «УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ»**

2.1. Разработка чертежа ПП

2.2. Анализ общего сборочного состава изделия «Усилитель низкой частоты»

2.3. Разработка спецификации изделия (СП)

2.4. Технологический процесс изготовления изделия «Усилитель низкой частоты»

Выводы

#### **3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА «УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ»**

3.1. Разработка схемы электрической общей измерительного стенда (Э0)

3.2. Разработка методики проведения измерений характеристик изделия  
«Усилитель низкой частоты»

### 3.3. Экспериментальное исследование характеристик изделия «Усилитель низкой частоты»

Выводы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

## **СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ**

ГОСТ	– Государственный стандарт
ИЭТ	– Изделие электронной техники
КМО	– Компонент, монтируемый в отверстия
МЛТ	– Металлопленочные лакированные теплостойкие
ОПП	– Односторонняя печатная плата
ПП	– Печатная плата
САПР	– Система Автоматизированного Проектирования
СБ	– Сборочный чертеж
СП	– Спецификация
ТУ	– Техническое условие
УГО	– Условное графическое обозначение
ЭРЭ	– Электрорадиоэлементы

## **ВВЕДЕНИЕ**

**Работа посвящена** разработке и исследованию усилителя мощности низкой частоты на полевых транзисторах (далее – усилитель).

Усилитель низкой частоты — это устройство для усиления электрических сигналов в пределах диапазона частот, которые различает человеческое ухо (в среднем 20 Гц — 20 кГц). Усилитель повышает мощность сигнала источника звука, чтобы при подаче этого сигнала на устройство вывода звук получился громким и без искажений. Усилитель низкой частоты, выполненный в рамках данного курсового проекта, состоит из резисторов, электролитических конденсаторов, пленочных конденсаторов, диодов, потенциометров, операционных усилителей, которые усиливают входной сигнал и полевых транзисторов, которые выступают в роли ограничителей сигнала.

**Целью работы** является разработка усилителя класса АВ, разработка комплекта конструкторской документации, а также экспериментальное исследование устройства для выявления его пригодности к эксплуатации.

**Для достижения поставленных целей в работе был решен следующий комплекс задач:**

- Разработка схемы электрической структурной усилителя;
- Разработка схемы электрической принципиальной усилителя;
- Моделирование работы усилителя с помощью схемотехнической САПР;
- Разработка конструкции усилителя;
- Сборка опытного образца усилителя;
- Экспериментальное исследование усилителя.

**Исходными данными** для работы являются:

- задание на выполнение курсового проекта;

– календарный план выполнения курсового проекта.

**Результатами работы** являются:

- схема электрическая структурная усилителя (Э1);
- схема электрическая принципиальная усилителя (Э3);
- полнофункциональная модель усилителя в САПР OrCAD PSPICE 9.2;
- чертеж печатной платы усилителя;
- сборочный чертеж усилителя;
- разработанный опытный образец усилителя;
- схема электрическая общая (Э0) измерительного стенда усилителя;
- плакат демонстрационный (ПД1) сравнения результатов моделирования и эксперимента;
- расчетно-пояснительная записка (РПЗ).

**Структура и объем работы:** Работа состоит из 3 глав.

# **1. СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА «УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ»**

Схемотехнический этап выполнения курсового проекта включает:

- моделирование схемы выбранного устройства;
- разработка схемы электрической структурной Э1 устройства;
- разработка схемы электрической принципиальной Э3 устройства;
- моделирование разработанной схемы в OrCAD PSPICE 9.2;
- подбор элементной базы устройства;
- разработка перечня элементов ПЭЗ устройства.

## **1.1 Разработка электрической структурной схемы (Э1) усилителя**

Разработка схемы электрической структурной (Э1) предполагает первоначальную оценку работы и выделение основных структурных частей, из которых состоит усилитель. Разработанная схема электрическая структурная (Э1) усилителя представлена на рисунке 1.1.1, а также на чертеже ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 Э1.

Структурная схема устройства была разработана согласно ГОСТ 2.701 - 2008 [1] и ГОСТ 2.702-2011 [2] в САПР Altium Designer 2022.

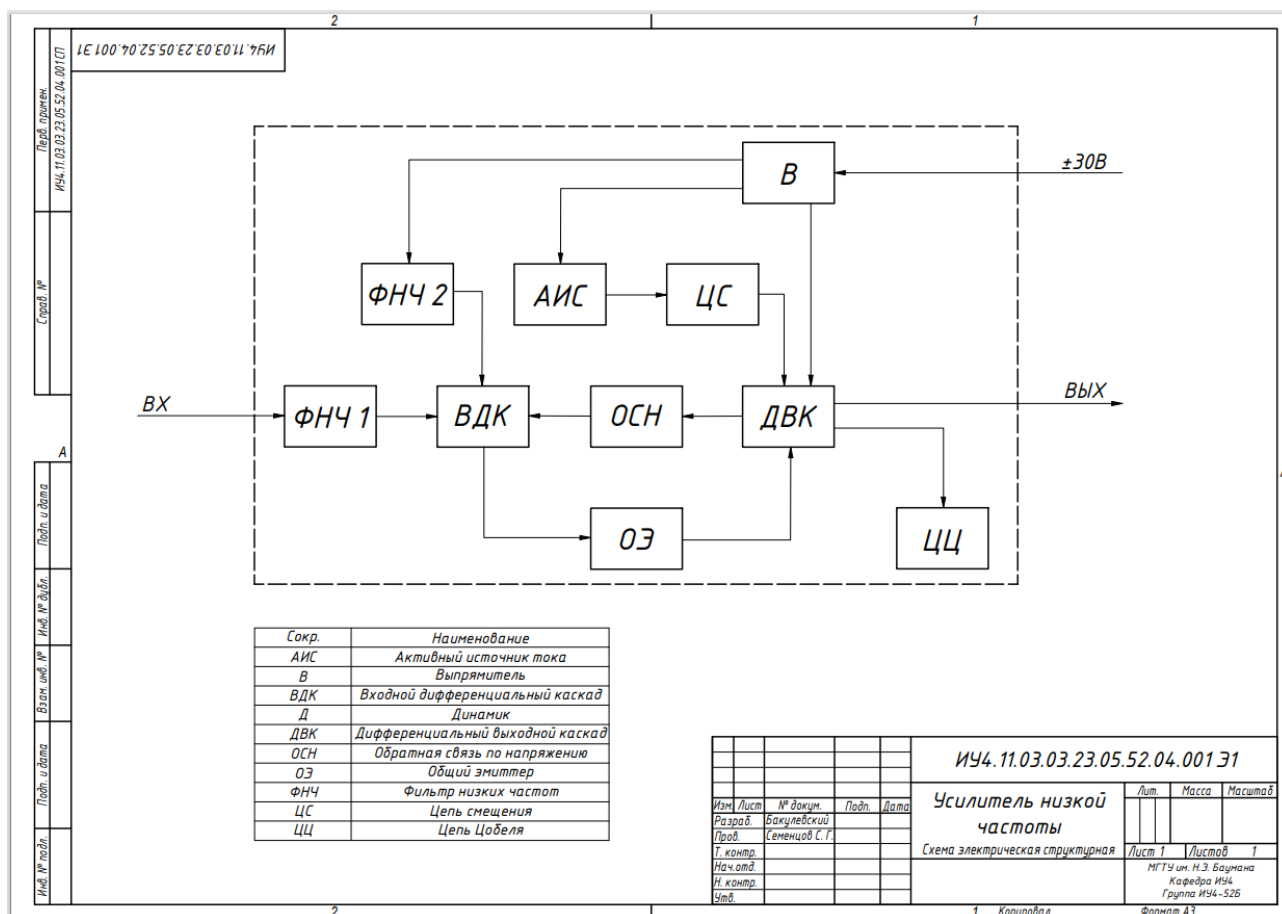


Рисунок 1.1.1 – Схема электрическая структурная (Э1) УНЧ

Устройство можно разделить на несколько основных частей:

- Активный источник тока;
- Выпрямитель;
- Входной дифференциальный каскад;
- Дифференциальный выходной каскад;
- Обратная связь по напряжению;
- Каскад усиления напряжения с общим эмиттером;
- Фильтр низких частот;
- Цепь смещения;
- Цепь Цобеля;



Входной сигнал через фильтр низких частот поступает на неинвертирующий вход входного дифференциального каскада, выходной сигнал с которого приходит на каскад усиления напряжения на общем эмиттере, ток покоя в котором задается с помощью схемы вольтдобавки. Выходной сигнал с каскада усиления напряжения поступает на вход ДВК, к выходу которого подключается нагрузка (динамик 3 Ом) и цепь обратной связи

## 1.2 Разработка электрической принципиальной схемы (ЭЗ) усилителя

Схема электрическая принципиальная (ЭЗ) усилителя была разработана согласно ГОСТ 2.701-2008 [2] и ГОСТ 2.702-2011 [3] на основе анализа электрической структурной схемы (Э1) (рисунок 1.1.1.). Разработанная схема электрическая принципиальная (ЭЗ) усилителя представлена на рисунке 1.2.1 и на чертеже ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 ЭЗ.

В качестве среды разработки была выбрана САПР «Altium Designer 2022»

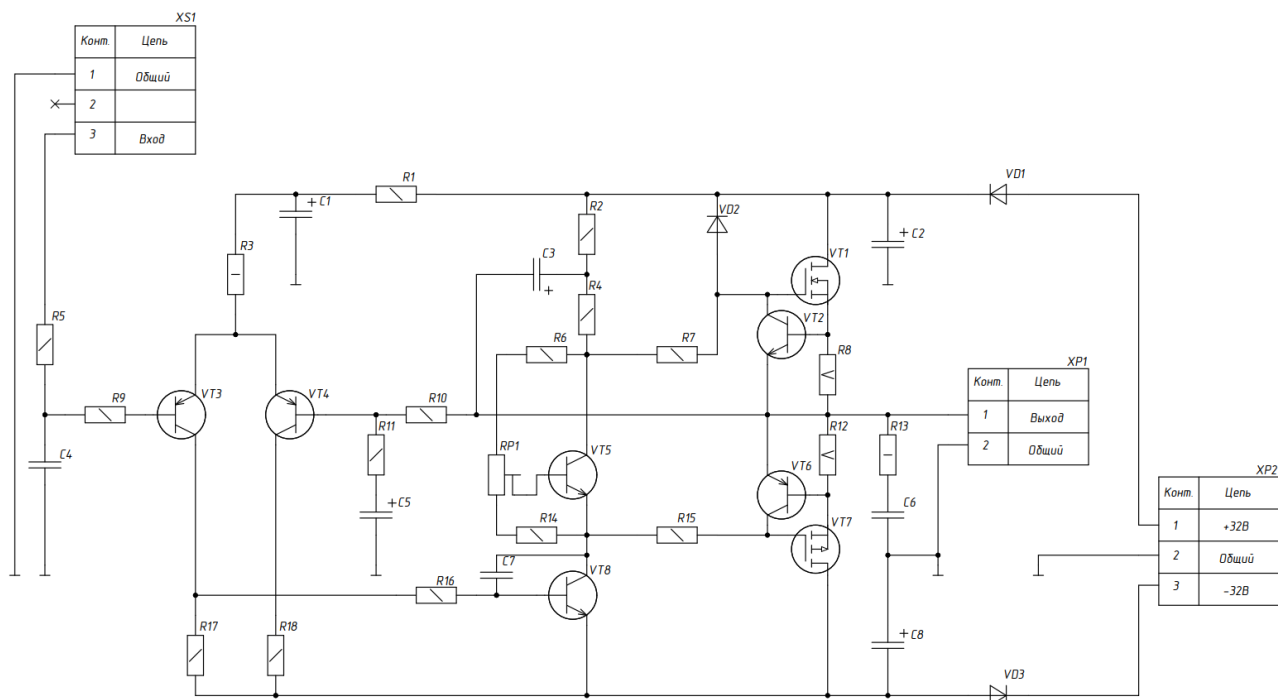


Рисунок 1.2.1 – Схема электрическая принципиальная (ЭЗ) усилителя

Выходные транзисторы VT1, VT7 включены по схеме с общим стоком (истоковый повторитель). Это дает двойное преимущество: снижается возможная паразитная генерация в мощном выходном каскаде, так как коэффициент усиления по напряжению составляет меньше единицы.

Симметричность выходного напряжения достигается подачей на затвор N-канального транзистора VT1 напряжения отрицательной обратной связи по постоянному сигналу с выхода усилителя.

Использование цепи обратной связи C5, R10, R11 также позволяет предварительному каскаду на транзисторе VT4 работать при практически постоянном токе, что улучшает линейность каскада схемы управления.

Диод VD2 работает как “подпорка” для цепи отрицательной обратной связи, ограничивая положительное напряжение на затворе VT1. Это позволяет поддерживать симметрию сигнала при подключении нагрузки.

Транзистор VT5 и резисторы R6, RP1, R14 обеспечивают напряжение смещения для выходных транзисторов, подстроечный резистор RP1 служит для регулирования выходного тока покоя изменением порогового напряжения.

Транзистор VT8 работает в режиме класса А при номинальном токе покоя 5 мА, определяемом номиналами резисторов R2, R4. Сигнал на VT8 подается от дифференциальной пары VT3, VT4. Ток покоя входного каскада составляет 2 мА и устанавливается резистором R3. Сигнал отрицательной обратной связи подается с выхода усилителя на базу VT4 через резистор R10.

Элементы R1, C5 определяют коэффициент усиления при замкнутой цепи обратной связи усилителя и обеспечивают увеличение коэффициента усиления на низких частотах.

Дополнительные элементы R13, C6, включенные между выходом и общим проводом, подавляют высокочастотный отклик выходного каскада, приводя к тому, что высокочастотные характеристики усилителя определяются характеристиками входного каскада. Элементы R5, R9, C4, на входе усилителя определяют входной импеданс (4,7 кОм) и служат для подавления высокочастотных помех.

Дополнительное подавление пульсаций напряжения источника питания, подаваемого на входной каскад, осуществляется элементами R1, C1. Дополнительные элементы схемы предназначены для обеспечения высокой стабильности всего усилителя.

### П.3. Моделирование в среде «OrCAD PSPICE 9.2»

Моделирование работы усилителя было проведено в программных пакетах «OrCAD PSPICE 9.2» [6]. Модель создавалась на основе схемы электрической принципиальной ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 Э3. Рабочее поле программы со схемой усилителя представлено на рисунках 1.3.1.

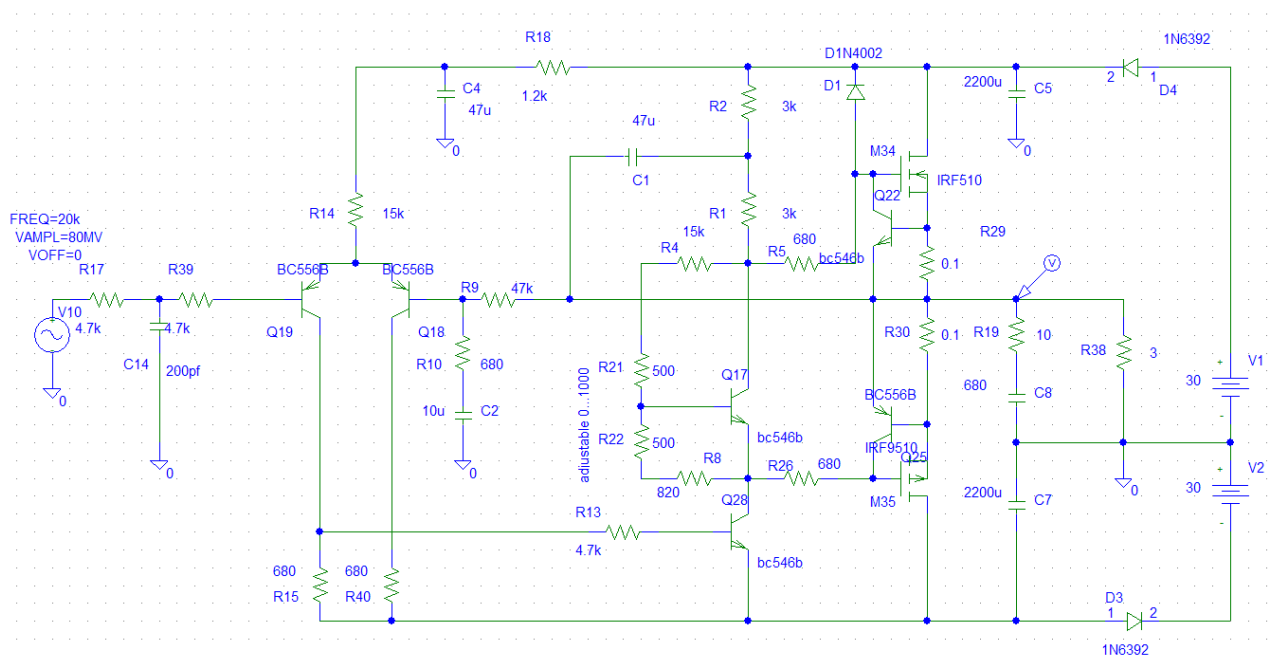


Рисунок 1.3.1 – Модель усилителя

В результате моделирования схемы усилителя, представленной на рисунках 1.3.1 были получены теоретические значения напряжения и формы сигнала на выходе схемы. Результаты представлены на рисунках 1.3.2-1.3.3.

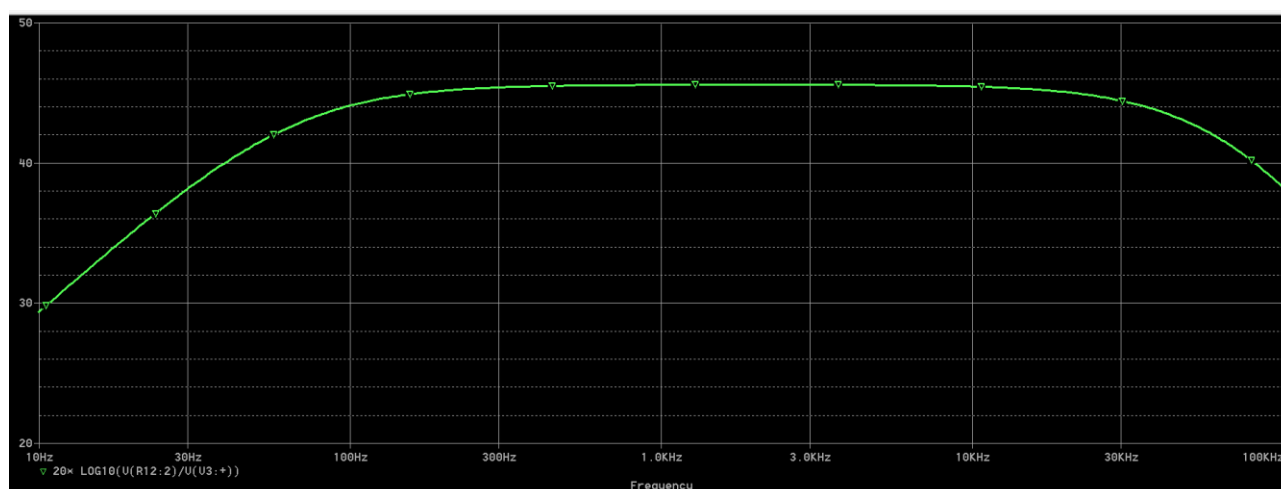


Рисунок 1.3.2 – АЧХ усилителя

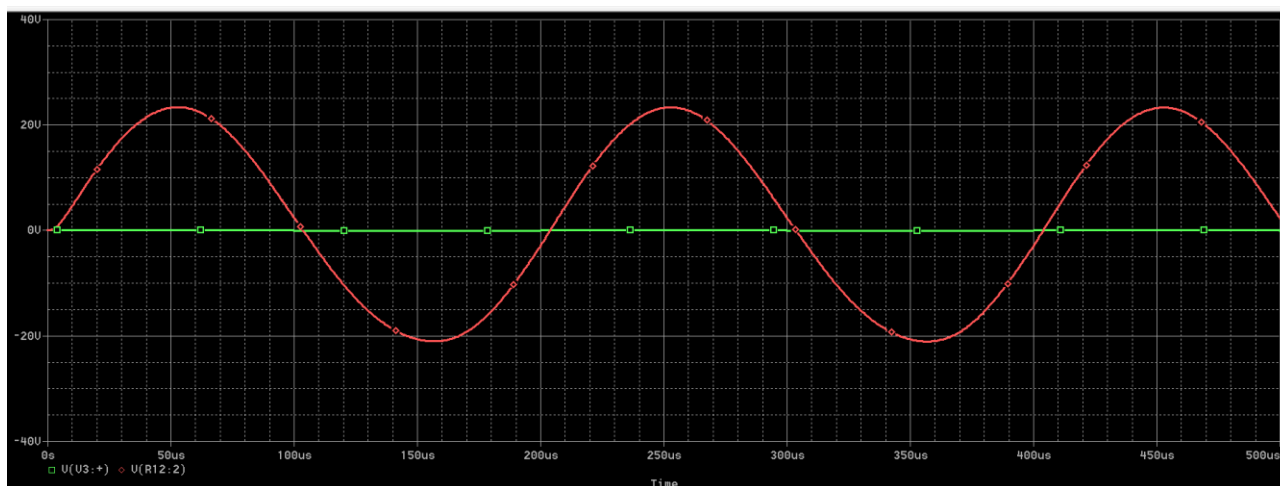


Рисунок 1.3.3 – Выходной сигнал без искажений при максимальной мощности

## 1.4 Выбор элементной базы устройства

Критерием выбора электрорадиоэлементов является соответствие технологических и эксплуатационных характеристик ЭРЭ заданным условиям работы и эксплуатации и требуемым электрическим параметрам.

В данной работе применены:

Диоды:

- 15SQ045 (Dongguan YFW, Китай)
- 1N4002 (Diotec Semiconductor, Германия)

Конденсаторы:

- K10-17Б X5R 1000пФ 50В (Murata Electronics, Япония)
- K10-17Б X5R 220пФ 50В (Murata Electronics, Япония)
- K73-17 0,68мкФ 250В
- K50-35 2200мкФ 35В (JB Capacitors, Гонконг)
- K50-35 мини 47мкФ 50В (JB Capacitors, Гонконг)

- K50-35 100мкФ 63В (JB Capacitors, Гонконг)

Разъемы для подключения входного сигнала, динамика и питания соответственно:

- Гнездо стерео 3,5мм ST-025 (Dragon City Industries, Китай)
- Клеммник разъемный 15EDGRC-3.81-02P (Degson, Китай)
- Клеммник разъемный 15EDGRC-3.81-03P (Degson, Китай)

Резисторы:

- CF-25 0,25Вт 4.7кОм  $\pm 5\%$
- CF-25 0,25Вт 680Ом  $\pm 5\%$
- CF-25 0,25Вт 3кОм  $\pm 5\%$
- CF-25 0,25Вт 15кОм  $\pm 5\%$
- CF-25 0,25Вт 1,2кОм  $\pm 5\%$
- CF-25 0,25Вт 820Ом  $\pm 5\%$
- CF-100 1Вт 10Ом  $\pm 5\%$
- CF-100 1Вт 15кОм  $\pm 5\%$
- SQP 5Вт 0,1Ом  $\pm 5\%$
- 3296W-1-1-2LF 0,25Вт 1кОм  $\pm 20\%$  (Bourns, США)

Транзисторы:

BC546B (Diode Semiconductor, Германия)

BC556B (Diode Semiconductor, Германия)

IRF540NPBF (Infineon Technologies, Германия)

IRF9540NPBF (Infineon Technologies, Германия)

## 1.5 Разработка перечня элементов (ПЭЗ)

После выбора элементной базы был составлен перечень элементов схемы (ПЭЗ) согласно ГОСТ 2.701-2008 [2]. Перечень элементов (ПЭЗ) представлен на рисунке 1.5.1, а также документом ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 ПЭЗ

Поз обозначение	Наименование	Кол	Примеч
	<u>Диоды</u>		
VD1, VD3	1SS0445 (Dongguan YFW, Китай)	2	
VD2	1N4002 (Diotec Semiconductor, Германия)	1	
	<u>Конденсаторы</u>		
C4	K10-17Б XSR 1000пФ 50В (Murata Electronics, Япония)	1	
C7	K10-17Б XSR 220пФ 50В (Murata Electronics, Япония)	1	
C6	K73-17 0,68мкФ 250В	1	
	(Кузнецкий завод конденсаторов, Россия)		
C2, C8	K50-35 2200мкФ 35В (JB Capacitors, Гонконг)	2	
C1, C3	K50-35 мини 47мкФ 50В (JB Capacitors, Гонконг)	2	
C5	K50-35 100мкФ 63В (JB Capacitors, Гонконг)		
	<u>Разъемы</u>		
XS1	Гнездо стерео 3,5мм ST-025	1	
	(Dragon City Industries, Китай)		
XP1	Клемник разъемный 1SEDGRC-3.81-03P (Degson, Китай)	1	
XP2	Клемник разъемный 1SEDGRC-3.81-03P (Degson, Китай)	1	
	<u>Резисторы</u>		
R5, R9, R16	CF-25 0,25Вт 4,7кОм ±5%	3	
R7, R11, R15, R17, R18	CF-25 0,25Вт 6800Ω ±5%	5	
R2, R4	CF-25 0,25Вт 3кОм ±5%	2	
R6	CF-25 0,25Вт 15кОм ±5%	1	
ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 ПЭЗ			
Изм	Лист	№ докум	Подп
Разраб	Вакулевский		
Проб	Кочетков С.Г.		
И контр			
Умб			
Усилитель низкой частоты Перечень элементов		Лит	Лист
			1
			2
		МГТУ им Н.Э. Баумана Кафедра ИУ4 Группа ИУ4 – 526	

Рисунок 1.5.1 – Часть перечень элементов (ПЭЗ)



Связь перечня с УГО элементов осуществляется через графу “Поз. Обозначения”. Та, в свою очередь, в ПЭЗ проставляется на основе схемы ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 Э3.

В графе "Примечание" рекомендуется указывать технические данные элемента (устройства), не содержащиеся в его наименовании.

### **Выводы**

В главе проведено схемотехническое проектирование изделия «Усилитель низкой частоты на полевых транзисторах». Была разработана схема электрическая структурная (Э1) усилителя, в которой были выделены основные структурные узлы устройства. Данная схема представлена на чертеже ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 Э1, а также на рисунке 1.1.1. Затем последовала разработка схемы электрической принципиальной (Э3) усилителя, в которой подробно описаны соединения всех ИЭТ устройства и благодаря условным графическим обозначениям однозначно определяется функционал каждого ИЭТ, а также обоснован выбор каждого ИЭТ. Данная схема представлена на чертеже ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 Э3 и на рисунке 1.2.1. Заключительным этапом схемотехнической разработки стало моделирование работы усилителя для получения АЧХ и формы сигнала на выходе.

## **2. КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА “УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ”**

Конструкторско-технологический этап выполнения курсового проекта включает:



- ## 2.1 Разработка чертежа ПП

17

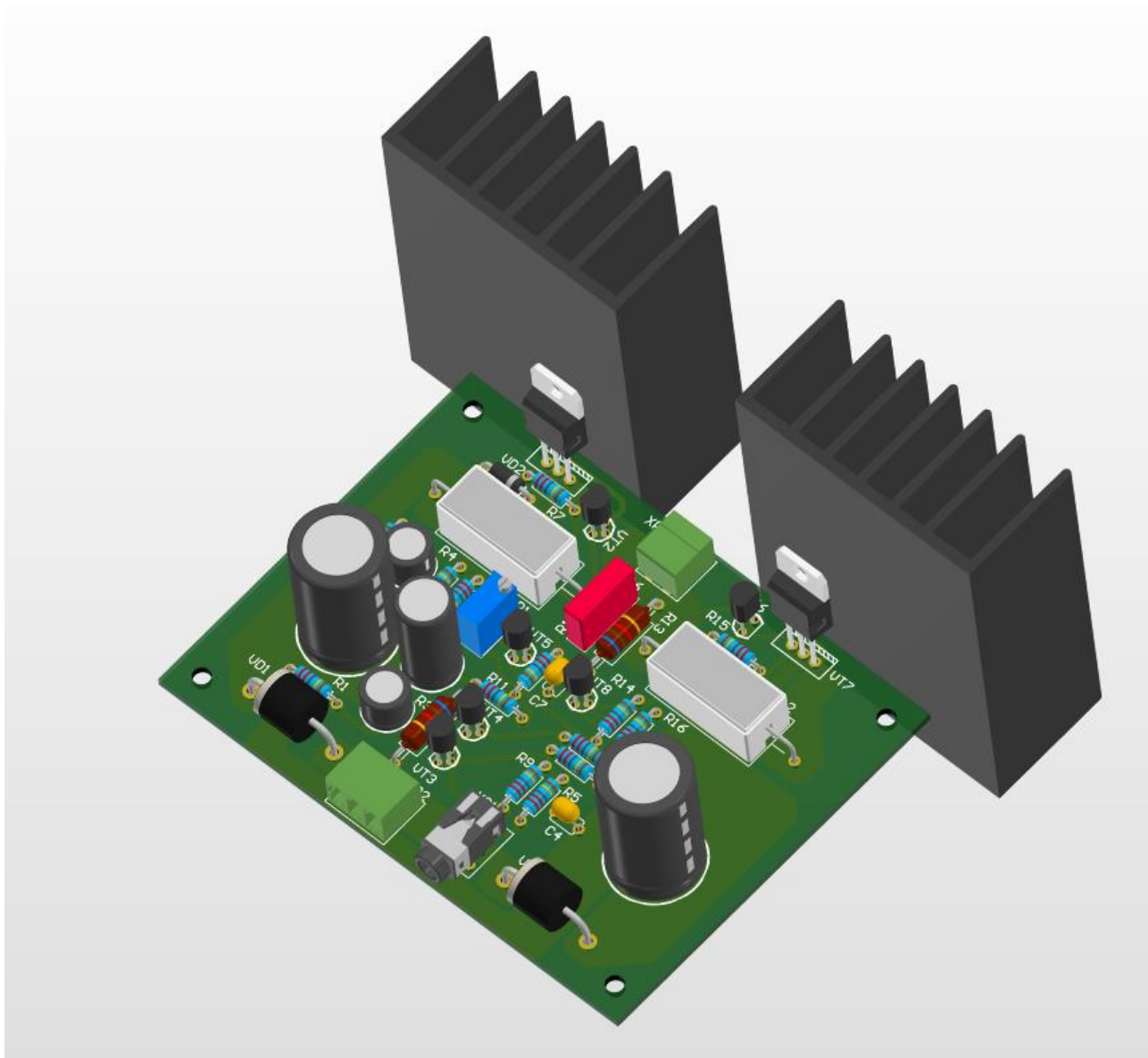


Рисунок 2.1.2 – 3D модель ПП усилителя в САПР «Autodesk Inventor 2024»

После трассировки был разработан чертеж ПП, который представлен на рисунке 2.1.3.



Материал платы – стеклотекстолит FR4-DE104, соответствующий требованиям ТУ 2296-001-39421663-13 [9].




Финишное покрытие – припой ПОС-61 ГОСТ 21930-76 [10].

К печатной плате предъявляются следующие требования: поверхность печатной платы не должна иметь пузырей, вздутий, посторонних включений, сколов, выбоин, трещин и расслоений материала основания, снижающих электрическое сопротивление и прочность изоляции.

В печатной плате имеются отверстия различных типов, характеристика которых приведена в таблице 2.1.1.

Таблица 2.1.1 – Таблица отверстий ПП

*Таблица 1 - Данные отверстий*

<i>Обозначение пмв</i>	<i>Диаметр отв., мм</i>	<i>Диаметр конт. площадки, мм</i>	<i>Наличие металлизации</i>	<i>Кол. отв.</i>
	1	2,0	Нет	89
	1,5	3,0	Нет	9
	3,2	-	Нет	4

Общее количество отверстий – 102.

Отверстия диаметром 1,0мм и 1,5мм являются монтажными отверстиями для КМО.

Отверстия 3,2 мм являются конструктивными, для возможной установки устройства в корпус. Отверстие соответствует требованиям ГОСТ 11284-75 [11] и предназначено для крепежа под винт М3.

Исходя из вышеперечисленных требований печатная плата опытного образца изготавливалась химическим негативным методом.

## 2.2. Анализ общего сборочного состава усилителя

Сборочный чертеж был разработан в САПР «Autodesk Inventor 2024».

Также он представлен на рисунке 2.2.1 и на чертеже

ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 СБ.

Электромонтаж ИЭТ осуществляется согласно схеме

ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 ЭЗ

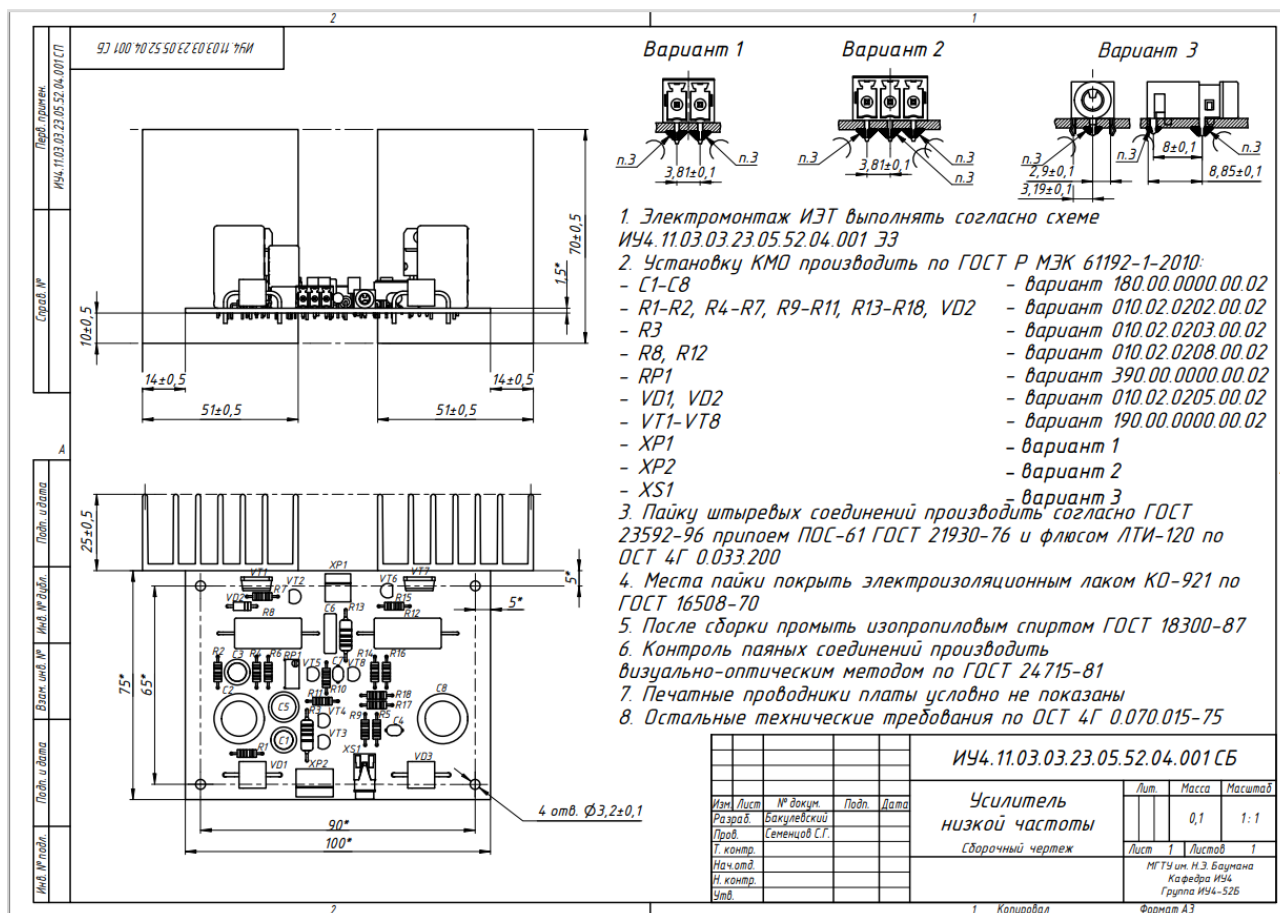
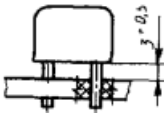
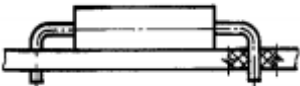
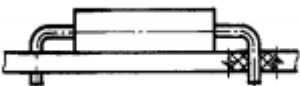
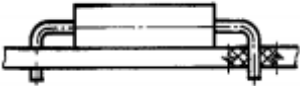
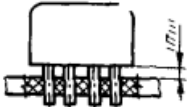
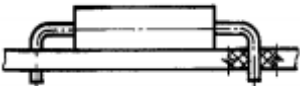
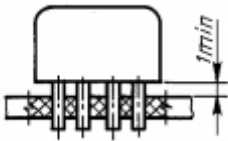
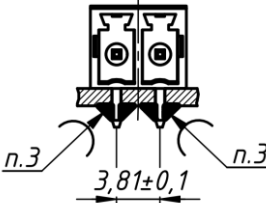
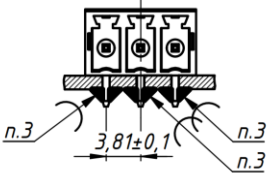


Рисунок 2.2.1 – Сборочный чертеж усилителя

Компоненты группируются по способу установки на плату. В сборку входят 19 типов корпусов. Установки ИЭТ осуществляется согласно ГОСТ 29137-91 [12]. Вариант установки приведены в таблице 2.2.1 и на чертеже ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 СБ.

Таблица 2.2.1 – Варианты установки ИЭТ на ПП усилителя

Ц.№	Наименование позиций	Эскиз варианта установки	Вариант установки и формовки
1	C1-C8		180.00.0000.00.02
2	R1-R2, R4-R7, R9-R11, R13-R18		010.02.0202.00.02
3	R3		010.02.0203.00.02
4	R8, R12		010.02.0208.00.02
5	RP1		390.00.0000.00.02
6	VD1, VD2		010.02.0205.00.02
7	VT1-VT8		190.00.0000.00.02
8	XP1		
9	XP2		

## Окончание таблицы 2.2.1

10	ХРЗ		
----	-----	--	--

Монтаж ИЭТ производится с одной стороны. Пайка выводов производится припоем ПОС-61 ГОСТ 21930-76 [10] согласно ГОСТ 23592-96 [13]. Допускается применение импортного аналога.

Габаритные размеры всего изделия составляют 132,38x99,2x29 мм.

После сборки изделие промыть изопропиловым ГОСТ 18300-87 [14].

Контроль паяных соединений производится визуально-оптическим методом ГОСТ 24715-81 [15].

Исходя из вышеперечисленных требований, при производстве опытного образца рекомендуется производить монтаж КМО припоем и капиллярной пайкой паяльником.

## 2.3 Разработка спецификации изделия (СП)

Спецификация – основной документ курсового проекта. В спецификацию вносят составные части, входящие в специфицируемое изделие, а также конструкторские документы, относящиеся к этому изделию и к его неспецифицируемым составным частям.

СП усилителя разработана в соответствии с ГОСТ 2.106 [16] и состоит из следующих разделов в соответствующей последовательности:

- документация;
- детали;
- прочие изделия.

Подобное содержание спецификации было определено специфицируемого изделия «Усилитель низкой частоты». Первая страница СП представлена на рисунке 2.3.1 и непосредственно в самом документе спецификации ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001.

В раздел «Документация» внесены все документы, составляющие основной комплект конструкторских документов специфицируемого изделия, кроме самой спецификации, а также документы основного комплекта записываемых в спецификацию неспецифицируемых составных частей (деталей), кроме их рабочих чертежей.

В раздел «Детали» была внесена деталь, непосредственно входящая в специфицируемое изделие – плата печатная и радиатор охлаждения HS 185-70.

Раздел «Прочие изделия» схож по наполнению с перечнем элементов (ПЭЗ), за исключением того, что запись изделий в пределах каждой группы происходит в алфавитном порядке наименований изделий, а обозначения УГО элементов записываются в графу «Примечание».



Форм	Зона	Поз	Обозначение	Наименование	Кол	Примеч
				<u>Документация</u>		
A3			ИУ4. 11.03.03.23.05.52.12.001 СБ	Сборочный чертеж	1	
A3			ИУ4. 11.03.03.23.05.52.12.001 Э1	Схема электрическая	1	
				структурная		
A3			ИУ4. 11.03.03.23.05.52.12.001 Э3	Схема электрическая	1	
				принципиальная		
A3			ИУ4. 11.03.03.23.05.52.12.001 ПЭ3	Перечень элементов	1	
A3			ИУ4. 11.03.03.23.05.52.12.001 ПД1	Сравнение моделирования и	1	
				Экспериментальных данных		
				<u>Детали</u>		
A3	1		ИУ4. 11.03.03.23.05.52.12.002	Плата печатная	1	
				Радиатор HS 185-70 (Китай)	2	
				<u>Диоды</u>		
	2			15SQ045 (Dongguan YFW, Китай)	2	VD1, VD3
	3			1N4002	1	VD2
				(Diotec Semiconductor, Германия)		
				<u>Конденсаторы</u>		
	4			K10-17Б X5R 1000нФ 50В	1	С4
				(Murata Electronics, Япония)		
	5			K10-17Б X5R 220нФ 50В	1	С7
				(Murata Electronics, Япония)		
	6			K73-17 0,68мкФ 250В	1	С6
				(Кузнецкий завод конденсато- род, Россия)		
ИУ4. 11.03.03.23.05.52.04.001						
Изм	Лист	№ докум	Подп.	Дата	<b>Усилитель низкой частоты</b> Спецификация	
Разраб	Бакулевский					
Пров	Евменцов С.Г.					
Н.контр						
Итв						
					Лист	Лист
					1	2
					МГТУ им Н. Э. Баумана	
					Кафедра ИУ4	
					Группа ИУ4-52 Б	

Рисунок 2.3.1 – Первая страницы спецификации изделия «Усилитель низкой частоты»

## 2.4 Технологический процесс изготовления усилителя

Для изготовления ПП был выбран химический негативный метод изготовления [17]. Технологический процесс описан в таблице 2.4.1.

Таблица 2.4.1 – Технологический процесс изготовления ПП Усилителя

<b>№ оп.</b>	<b>Наименование операции</b>
00	Раскрой и разделение листа стеклотекстолита FR4-DE104 на заготовки
05	Химико-механическая очистка поверхности
10	Нанесение фоторезиста
15	Прямое экспонирование – негатив
20	Химическое травление фольги на пробельных местах ПП
25	Удаление фоторезиста
30	Сверление монтажных и конструкционных отверстий
35	Нанесение финишных покрытий – флюсование и химическое лужение
40	Промывка готовой ПП
45	Сушка готовой ПП
50	Электрическое тестирование

Операции сборки представлены в таблице 2.4.2.

Таблица 2.4.2 – Операции процесса сборки изделия «Усилитель»

<b>№ оп.</b>	<b>Наименование операции</b>
00	Распаковка и комплектование ЭРЭ
05	Формовка выводов КМО
10	Установка КМО
15	Пайка КМО
20	Обрезка выводов
25	Промывка
30	Сушка
35	Визуальный контроль
40	Функциональный контроль

## **Выводы**

В данной главе был описан процесс проектирования топологии печатной платы в САПР «Altium Designer 2022» и составление 3D модели усилителя в САПР «Autodesk Inventor 2024».

Разработанная топология ПП представлена на чертеже ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.002. На основе же 3D модели платы разработан сборочный чертеж – ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 СБ. Была составлена спецификация изделия «Усилитель низкой частоты» – ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 – куда вошли все составляющие курсового проекта.

Описан процесс изготовления печатной платы изделия «Усилитель низкой частоты» химическим негативным методом. Дан технологический процесс сборки изделия “ Усилитель низкой частоты”, а именно – процесс монтажа ЭРЭ на готовую печатную плату.

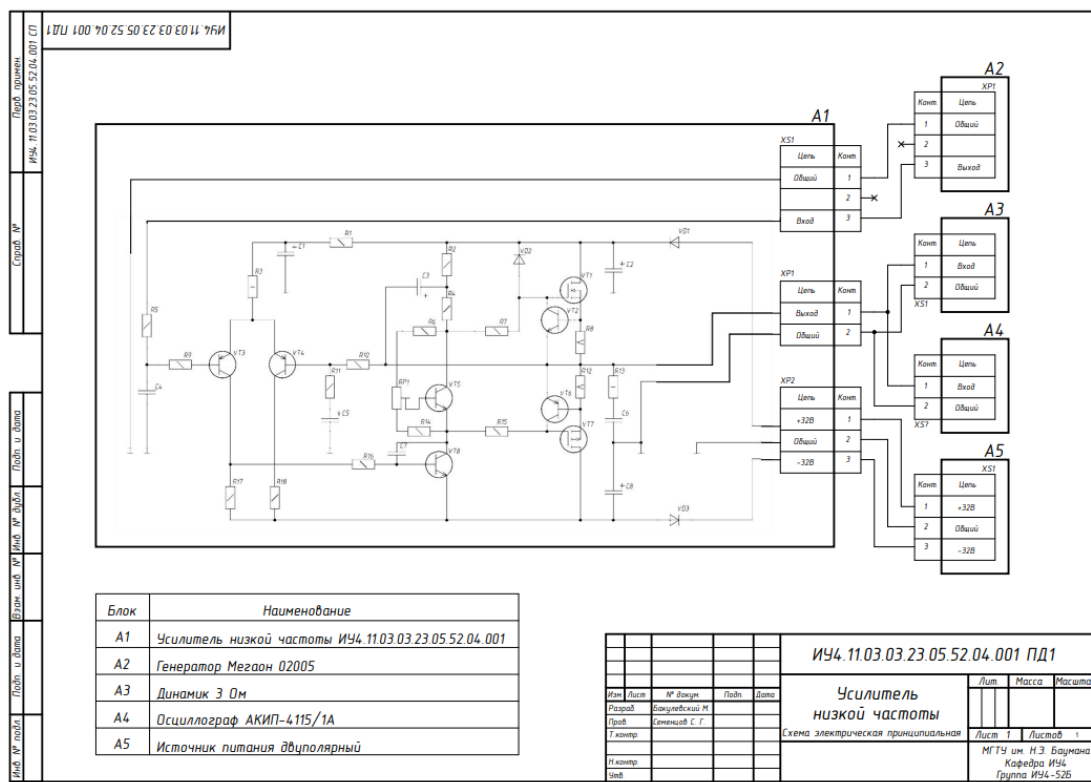
## 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТРОЙСТВА

### «УСИЛИТЕЛЬ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ»

В главе представлено экспериментальное исследование работоспособности опытного образца усилителя низкой частоты. Разработана электрическая общая схема измерительного стенда, описана методика проведения эксперимента, с помощью которой определяется работоспособность разработанного устройства. Проведено сравнение результатов, полученных на опытном образце усилителя, и результатов компьютерного моделирования из 1 главы.

#### 3.1 Разработка схемы электрической общей измерительного стенда (ПД2) усилителя

Для получения характеристик опытного образца усилителя был разработан измерительный стенд. Схема измерительного стенда представлена на рисунке 3.1.1, а также на схеме электрической общей ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.003 ПД1



### Рисунок 3.1.1 – Схема измерительного стенда усилителя

В данном измерительном стенде цифровой осциллограф АКИП-4115/1А применяется для определения формы сигнала и его амплитуды на выходе усилителя. Для питания усилителя используется двуполярный блок питания

### **3.2. Разработка методики проведения измерений характеристик изделия «Усилитель низкой частоты»**

1. Подключить блок питания  $\pm 30\text{В}$  к усилителю.
2. Зафиксировать сигнал на выходе усилителя с помощью цифрового осциллографа А4.

### **3.3 Экспериментальное исследование характеристик изделия «Усилитель низкой частоты»**

В результате проведенных экспериментов были получены графики АЧХ и формы сигнала на выходе усилителя, аналогичные полученным ранее теоретическим графикам из 1 главы 3 пункта: «OrCAD PSPICE 9.2». Полученные в результате экспериментов графики изображены на рисунках 3.3.1 и 3.3.2.

### Рисунок 3.3.1 – АЧХ сигнала на выходе усилителя



Рисунок 3.3.2 – Форма сигнала на выходе усилителя (частота 1 кГц)

АЧХ и форма сигнала несколько отличаются от смоделированных. Фактическое напряжение на выходе незначительно меньше, чем на выводах модели, так как при моделировании в САПР «OrCAD PSPICE 9.2» не учитывался разброс параметров электрических компонентов

## Выводы

В заключительной главе курсового проекта был разработан измерительный стенд для снятия характеристик полученного опытного образца, а также разработана схема электрическая общего измерительного стенда изделия ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.003 ПД1. Была разработана методика проведения измерений характеристик изделия «Усилитель низкой частоты». Согласно этой методике, были произведены необходимые замеры и сняты соответствующие характеристики. Произведено сравнение уровней

напряжения, полученных с модели и полученных экспериментально с опытного образца. В результате большинство требований технического задания оказалось выполнено и точность теоретической модели практически соответствует экспериментальной, за исключением небольшой погрешности уровней напряжения. Было установлено, что расхождения в уровнях напряжений по большей вероятности обусловлено неточным моделированием характеристик входного сигнала и характеристик нагрузки в САПР «OrCAD PSpICE 9.2», так результаты эксперимента схожи с теоретическими значениями.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате курсового проекта был проведен общетехнический обзор устройства «Усилитель низкой частоты».

На схемотехническом этапе разработки усилителя была разработана схема электрическая структурная (Э1), в которой были выделены основные структурные узлы устройства. Данная схема представлена на чертеже ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 Э1, а также на рисунке 1.1.1. После, последовала разработка схемы электрической принципиальной (Э3), в которой подробно описаны соединения всех ИЭТ устройства и благодаря условным графическим обозначениям однозначно определяется функционал каждого ИЭТ. Данная схема представлена на чертеже ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 Э3, а также на рисунке 1.2.1. Помимо этого, был обоснован выбор каждого элемента изделия и на основе этого составлен перечень элементов ПЭЗ, представленный на документе ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 ПЭЗ. Заключительным этапом схемотехнической разработки стало моделирование изделия “Усилитель низкой частоты” и получение сигнала на выходе усилителя. На конструкторско-технологическом этапе разработки изделия “Усилитель низкой частоты” были выбран тип ПП, расположение печатных проводников, а также базовый материал ПП. В результате разработана топология ПП изделия, которая отображена на чертеже ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.002 и на рисунке 2.1.3. На основе разработанной 3D модели устройства был составлен СБ, представленный на рисунке 2.2.1 и на чертеже ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 СБ. Были выбраны варианты установки компонентов на плату, а в результате анализа электрических соединений был выбран припой для установки КМО на ПП. На этом этапе также был разработан и описан технологический процесс изготовления печатной платы для опытного образца, а также представлен процесс монтажа компонентов на готовую ПП.

На этапе экспериментального исследования устройства «Усилитель низкой частоты» был разработан экспериментальный стенд для изделия. В результате



получена схема измерительного стенда усилителя, представленная на рисунке 3.1.1, а также на чертеже ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.003 Э0. Разработана методика проведения эксперимента для выяснения работоспособности устройства. Согласно данной методике произведены экспериментальные измерения усилителя получены графики работы изделия. Сделано сравнение результатов моделирования и экспериментального исследования, сделаны выводы о правильности работы устройства и о соответствии разработанного устройства требованиям технического задания.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1] М. Х. Джонс. Электроника – практический курс. Москва: Постмаркет, 1999. – 528с.
- [2] ГОСТ 2.701-2008 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению (с Поправкой).
- [3] ГОСТ 2.702-2011 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Правила выполнения электрических схем.
- [4] Монк, Саймон. Электроника. Теория и практика – 4-е изд.: Пер. с англ./ Саймон Монк, Пауль Шерц. – СПб.: БХВ-Петербург, 2018. – 1168 с.: ил. – (Электроника)
- [5] Хоровиц П., Хилл У. Искусство схемотехники: Пер. с англ. – 5-е изд, перераб \_ М.: Мир, 1998. – 704 с., ил.
- [6] Семенцов С.Г., сборник лекции по курсу “Основы аналого-цифровой схемотехники”.
- [7] ГОСТ 23752-79 Платы печатные. Общие технические условия (С изменениями №1-5).
- [8] ГОСТ Р 53429-2009 Платы печатные. Основные параметры конструкции.
- [9] ГОСТ 10316-78 Гетинакс и стеклотекстолит фольгированные. Технические условия (с Изменениями №1-6).
- [10] ГОСТ 21930-76 Припой оловянно-свинцовые в чушках. Технические условия (с Изменениями №1,2,3,4).

- [11] ГОСТ 11284-75 Отверстия сквозные под крепежные детали. Размеры  
(С изменением №1)
- [12] ГОСТ 29137-91 Формовка выводов и установка изделий электронной  
техники на печатные платы. Общие требования и нормы  
конструирования.
- [13] ГОСТ 23592-96 Монтаж электрический радиоэлектронной  
аппаратуры и приборов. Общие требования к объемному монтажу  
изделий электронной техники и электротехнических.
- [14] ГОСТ 18300-87 Спирт этиловый ректификованный технический.  
Технические условия.
- [15] ГОСТ 24715-81 Соединения паяные. Методы контроля качества.
- [16] ГОСТ 2.106 Единая система конструкторской документации (ЕСКД).  
Текстовые документы (с Изменением №1).
- [17] Проектирование коммутационных структур электронных средств:  
учеб. пособие / В.Н. Гриднев, Г. Н. Гриднева – М.: Изд-во МГТУ им.  
Н.Э.Баумана, 2014 – 344 с.: ил. (Библиотека “Конструирование и  
технология электронных средств” в 25 кн. Кн.7).

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Таблица П.А.1 – Перечень документов

Децимальный номер	Наименование
—	Техническое задание
—	Календарный план
ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 Э1	Схема электрическая структурная
ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 Э3	Схема электрическая принципиальная
ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 ПЭ3	Перечень элементов
ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.002	Чертеж печатной платы
ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 СБ	Сборочный чертеж
ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001	Спецификация на общую сборку
ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 ПД1	Схема электрическая общая измерительного стенда
ИУ4.11.03.03.23.05.52.04.001 ПД2	Плакат сравнения характеристик