

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленная электроника»
(наименование)

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника
(код и наименование направления подготовки)

Электроника и робототехника
(направленность (профиль))

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Лабораторный стенд для исследования аналоговых микросхем

Обучающийся

О. М. Кузнецова

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

д.т.н., доцент, А. А. Шевцов

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

И.Ю. Усатова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Аннотация

Название бакалаврской работы: «Лабораторный стенд для исследования аналоговых микросхем».

Выпускная квалификационная работа (ВКР) состоит из введения, трех глав, 24 рисунков, 14 таблиц, заключения, списка литературы из 25 источников, включая иностранные.

Целью данной ВКР является разработка лабораторного стенда для исследования аналоговых микросхем с микроконтроллерной системой управления.

Объектом исследования является лабораторный стенд для исследования характеристик операционного усилителя LM358, включающий программируемый генератор сигналов и двухканальный веб-осциллограф и стабилизированный блок питания.

Предметом ВКР является разработка схемотехнического решения стенда и программного обеспечения микроконтроллера.

Ключевым вопросом ВКР является разработка лабораторного стенда на базе микроконтроллера с веб-интерфейсом, обеспечивающим исследование характеристик и схем включения операционного усилителя.

Степень внедрения: разработаны схемы и выбраны элементы, спроектирован корпус лабораторного стенда, написана программа для микроконтроллера.

Дипломную работу можно разделить на несколько логически связанных частей: обзор состояния вопроса, разработка блока питания, разработка лабораторного стенда.

В первой части описаны методики исследования усилителей и характеристики различных усилителей в интегральном исполнении.

Во второй части описана разработка блока питания, которое включает в себя обоснование и выбор схемотехнического решения реализации блока питания и расчет его параметров.

Третья часть состоит из разработки и моделирования исследуемых схем включения операционного усилителя LM358, разработки программного обеспечения микроконтроллера и проектирования конструкции стенда.

В заключение мы хотели бы подчеркнуть, что разработанный стенд с веб-интерфейсом позволяет исследовать основные характеристики и схемы включения операционного усилителя LM358.

Работа представляет интерес для широкого круга читателей, интересующихся разработкой лабораторного стенда для исследования аналоговых микросхем с микроконтроллерной системой управления.

Abstract

The title of the graduation work is «Laboratory bench for the study of analog integrated circuits».

The graduation work consists of an introduction, three parts, 24 figures, 14 tables, a conclusion, and a list of 25 references including foreign sources.

The aim of the graduation work is to develop a laboratory stand for studying analog microcircuits with a microcontroller control system.

The object of the graduation work is a laboratory bench for studying the characteristics of the LM358 operational amplifier, which includes a programmable signal generator and a two-channel web oscilloscope and a stabilized power supply.

The subject of the graduation work is the development of a circuit design solution for a stand and microcontroller software.

The key issue of the graduation work is the development of a laboratory stand based on a microcontroller with a web interface that provides for the study of the characteristics and switching circuits of an operational amplifier.

The degree of implementation: Schematics were developed and components were selected, the housing of the laboratory bench was designed, and a program for the microcontroller was written.

The graduation work may be divided into several logically connected parts which are overview of the status of the issue, the development of a power supply unit, and the development of a laboratory stand.

The first part describes in details the methods of amplifier research and the characteristics of various integrated amplifiers.

The second part outlines the results of the development of a power supply unit, which includes the justification and selection of a circuit design solution for the implementation of the power supply unit and the calculation of its parameters.

The third part consists of the development and simulation of the investigated switching circuits of the LM358 operational amplifier, the development of the microcontroller software and the design of the stand structure.

In conclusion we'd like to stress that the developed stand with a web interface allows us to explore the main characteristics and switching schemes of the LM358 operational amplifier.

The work is of interest for wide circle of readers interested in the development of a laboratory stand for the study of analog microcircuits with a microcontroller control system.

Содержание

Введение.....	7
1 Состояние вопроса	8
1.1 Обзор усилителей в интегральном исполнении	8
1.2 Методики исследования усилителей	18
2 Разработка блока питания	22
2.1 Обоснование выбора блока питания	22
2.2 Расчет трансформатора	24
2.3 Диодный мост	25
2.4 Расчет фильтрующего конденсатора	26
2.5 Узел стабилизации.....	26
2.6 Схема и элементы блока питания	27
3 Разработка лабораторного стенда	28
3.1 Разработка и моделирование исследуемых схем	28
3.2 Выбор микроконтроллера.....	34
3.3 Разработка алгоритма функционирования устройства.....	37
3.4 Программирование микроконтроллера	40
3.5 Проектирование конструкции стенда.....	42
Заключение	45
Список используемой литературы	46
Приложение А. Текст программы	50
Приложение Б. Программная реализация веб-интерфейса	55

Введение

Аналоговые интегральные микросхемы (ИМС), в первую очередь операционные усилители (ОУ), компараторы, специализированные усилители и стабилизаторы напряжения, остаются фундаментальными элементами современной электроники, несмотря на бурное развитие цифровых технологий. Они являются ключевыми компонентами в системах сбора данных, источниках питания, аудиоаппаратуре, медицинских приборах, системах автоматики и управления. Качественное изучение их характеристик, принципов работы и особенностей применения является неотъемлемой частью подготовки высококвалифицированных инженеров-электронщиков, радиотехников и схемотехников.

Однако эффективное освоение материала студентами и проведение научных исследований требуют современной, наглядной и функциональной лабораторной базы. Существующие решения часто обладают рядом недостатков: высокая стоимость коммерческих учебных стендов, ограниченный набор исследуемых схем, устаревшая элементная база, сложность или отсутствие автоматизации измерений, неинтуитивный интерфейс, отсутствие интеграции с современными средствами компьютерного моделирования. Это затрудняет глубокое понимание принципов работы аналоговых ИМС и их поведения в реальных условиях, снижает эффективность лабораторного практикума и исследовательской деятельности.

Целью данной дипломной работы является разработка лабораторного стенда, предназначенного для комплексного исследования характеристик и схем включения ключевых типов аналоговых микросхем. Ключевой особенностью разрабатываемого стенда станет реализация сквозного цикла исследований: от генерации сигналов до визуализации результатов измерений в браузере. Такой подход обеспечивает интерактивное взаимодействие пользователя со стендом.

1 Состояние вопроса

1.1 Обзор усилителей в интегральном исполнении

Рассмотрим функциональные выводы применяемые в маломощных микросхемах усилителей, которые могут применяться для усиления звука. Самый простой, дешёвый и распространённый это LM358. Данный усилитель построен на биполярных транзисторах. Он имеет в одном корпусе два операционных усилителя. Его характеристики представлены в таблице 1. Эта микросхема может работать как от однополярного, так и от двухполярного питания [15].

Таблица 1 – Характеристики LM358

Параметр	Значение	Единица измерения
Напряжение питания	3-32 или +/-16	В
Максимальное смещение входа	2	мВ
Максимальное дифференциальное входное напряжение	Не более напряжения питания	В
Максимальный выходной ток	40	мА
Частота единичного коэффициента усиления	1,1	МГц
Входной ток	20	нА

Также распространён операционный усилитель на полевых транзисторах – TL082. Его характеристики представлены в таблице 2 [24].

Таблица 2 – Характеристики TL082

Параметр	Значение	Единица измерения
Напряжение питания	+/-18	В
Максимальное смещение входа	3	мВ
Максимальное дифференциальное входное напряжение	+/-15	В
Максимальный выходной ток	40	мА
Частота единичного коэффициента усиления	4	МГц
Входной ток	20	пА

Это были простые усилители, перейдем к усилителям с выводами имеющие функции корректировки работы усилителя.

OP07 это прецизионный операционный усилитель с возможностью смещения входного сигнала. У него есть два дополнительных вывода VosTRIM 1 и 8 (рисунок 1), которые служат для задания смещения по постоянному напряжению [21].

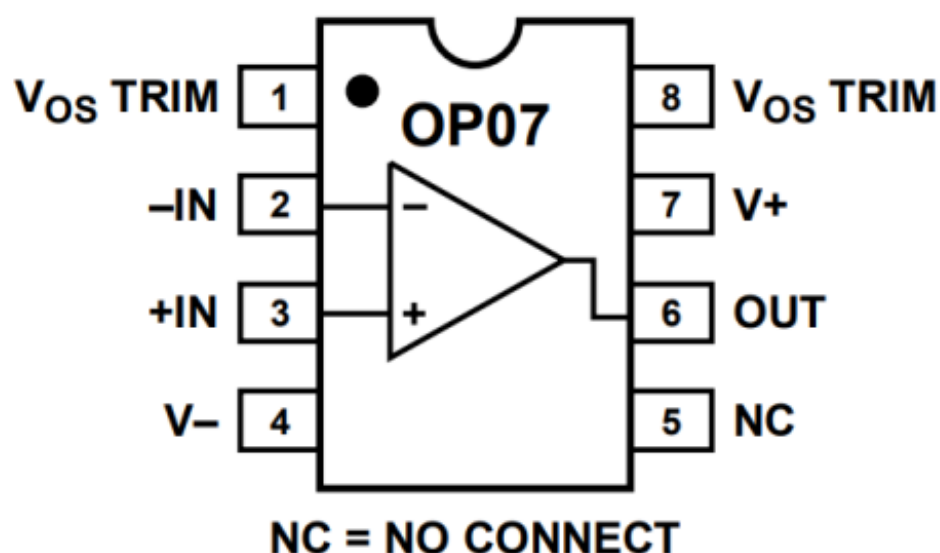


Рисунок 1 – Расположение выводов операционного усилителя OP07

Эти выводы в основном используются при точной работе с постоянным напряжением, когда нужно чтобы смещение было нулевое, например, в измерителях тока, напряжений и различных величин. Также данные выводы удобны для задания положительного смещения по постоянному напряжению, чтобы избавиться от отрицательной составляющей переменного напряжения [21].

LM386 это операционный усилитель звука. Расположение выводов изображено на рисунке 2.

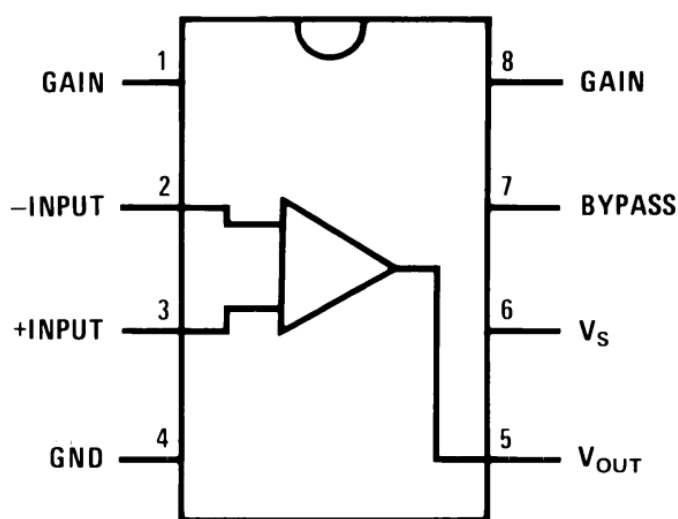


Рисунок 2 – Расположение выводов операционного усилителя LM386

У него есть вывода 1 и 8 для установки коэффициента усиления, также есть вывод BYPASS для подавления помех от источника питания. На вывод BYPASS устанавливается конденсатор (рисунок 3), и в зависимости от его ёмкости изменяется коэффициент подавления неустойчивости питания (рисунок 4) [16].

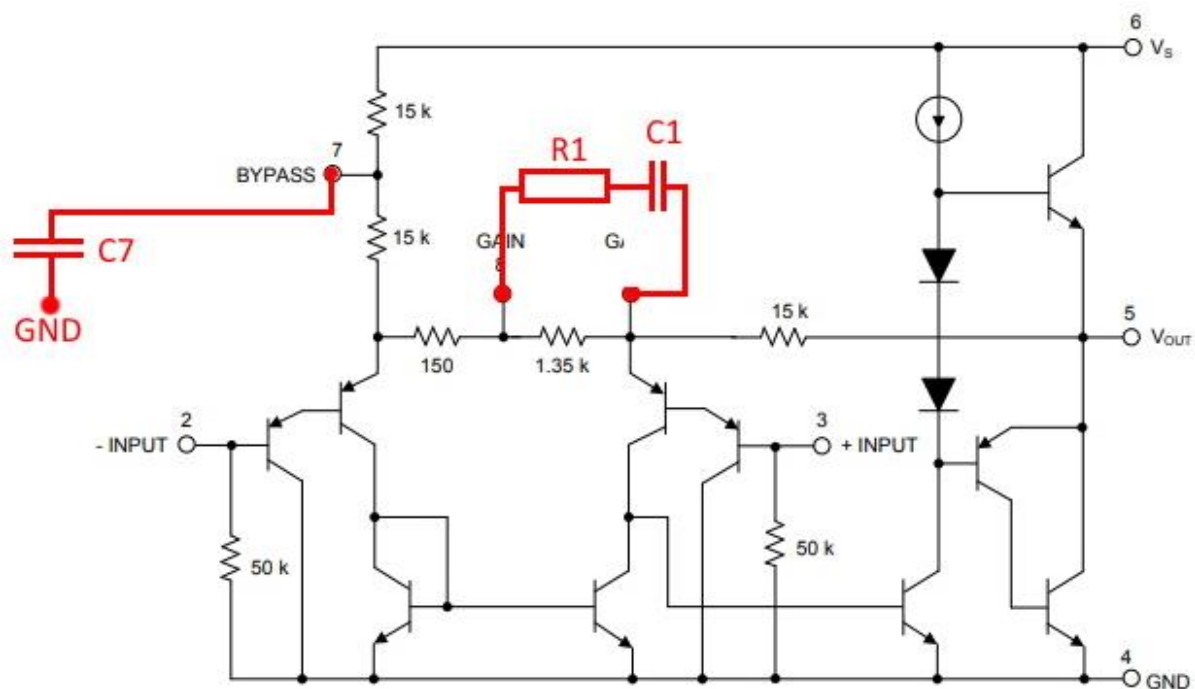


Рисунок 3 – Внутренняя принципиальная схема LM386

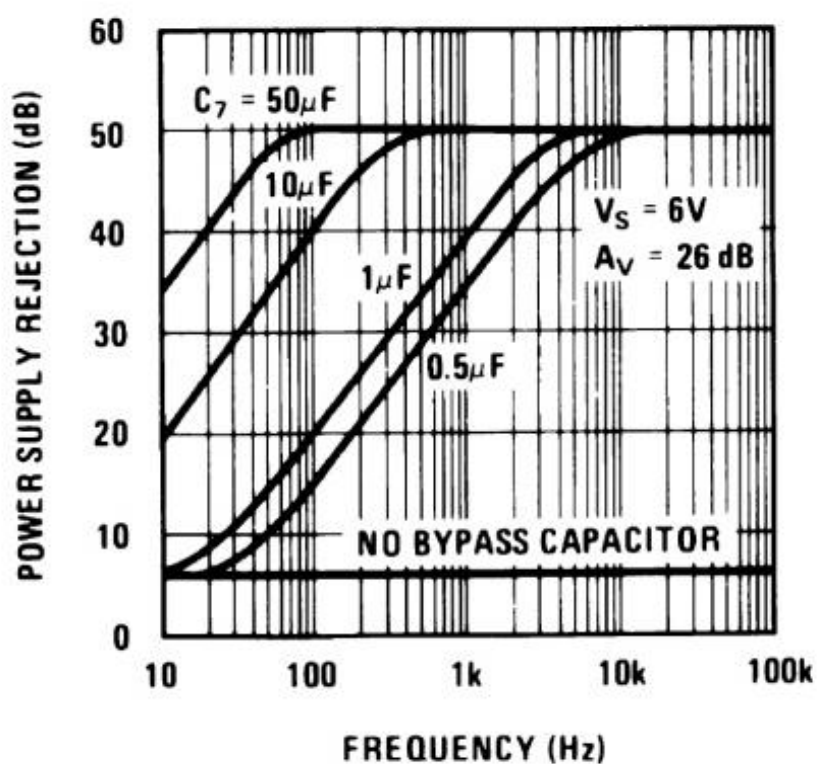


Рисунок 4 – График зависимости коэффициента подавления нестабильности питания операционного усилителя LM386 при различных емкостях конденсатора

Как видно из графика на рисунке 4, чем выше ёмкость $C7$, тем сильнее будет подавление помех от источника питания. Сопротивление $R1$ и $C1$ влияет на коэффициент усиления. Ёмкость $C1$ как правило ставят большую – 10 мкФ, такая ёмкость будет иметь минимальное влияние на коэффициент усиления по переменному току, а резистор 1,2 кОм или 0 Ом, что соответствует коэффициентам усиления 50 и 200. В таблице 3 представлены характеристики усилителя LM386 [16].

Таблица 3 – Характеристики LM386

Параметр	Значение	Единица измерения
Рабочее напряжение питания	От 4 до 12	В
Потребляемый ток	От 4 до 8	мА
Полоса пропускания	300	кГц
Коэффициент нелинейных искажений	0.2	%
Ослабление помех по питанию	50	дБ
Входное сопротивление	50	кОм
Входной ток смещения	250	нА

Рассмотрим операционный усилитель NE5534 который имеет вывода для подстройки смещения нуля и для частотной коррекцией (рисунок 5).

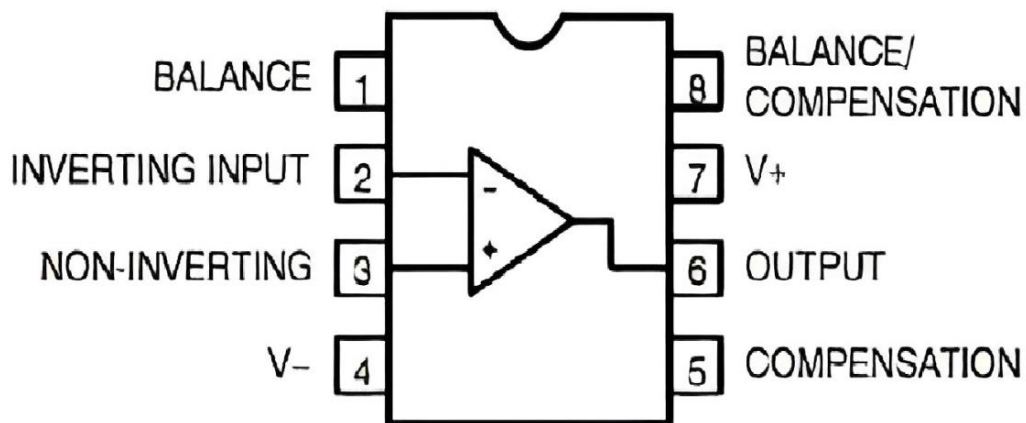


Рисунок 5 – Расположение выводов операционного усилителя NE5534

Назначением выводов микросхемы NE5534:

- BAL — регулировка смещения нуля;
- $-IN$ — инвертирующий вход;
- $+IN$ — неинвертирующий вход;
- $-V_{cc}$ — отрицательное напряжение питания;
- COMP — частотная коррекция;
- OUT — выход;
- $+V_{cc}$ — положительное напряжение питания;
- BAL/COMP — смещение нуля/частотная коррекция [20]

Это микросхема часто применяется для усиления звука. На рисунке 6 изображена внутренняя принципиальная схема NE5534.

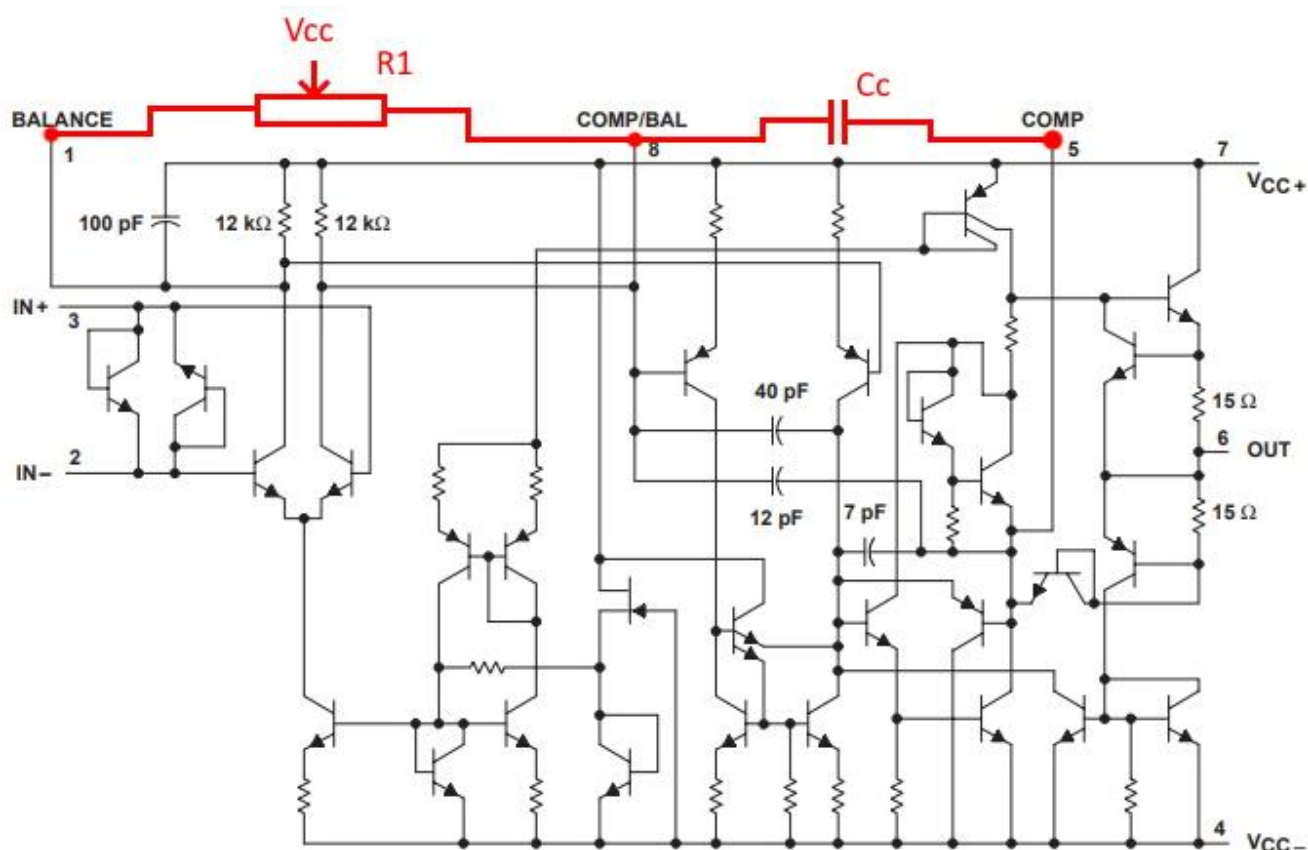


Рисунок 6 – Внутренняя принципиальная схема NE5534

С увеличением ёмкости конденсатора C_c изображенной на рисунке 6 уменьшается время нарастания выходного сигнала, и соответственно частота единичного коэффициента усиления. Данный конденсатор нужен для стабильности работы операционного усилителя – он обеспечивает запаздывание сигнала от 1 кГц на выходе на 90 градусов. Если этого конденсатора не будет, то на высоких частотах операционный усилитель может перейти в режим генерации. Это произойдет, когда запаздывание сигнала будет 180 градусов. Вывода BALANCE используются для задания смещения нуля. В таблице 4 представлены характеристики усилителя NE5534 [20].

Таблица 4 – Характеристики усилителя NE5534

Параметр	Значение	Единица измерения
Рабочее напряжение питания	$\pm 3\text{--}\pm 20\text{ В}$	В
Потребляемый ток	От 4 до 10	мА
Частота единичного усиления	10	МГц
Скорость нарастания	13	В/мкс
Выходной ток (без защиты от КЗ)	38	мА
Шум (напряжение, 1 кГц)	5	нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$

LM4250, LM346, КР140УД12, К140УД1208 – программируемые операционный усилители. Они применяются в изделиях с очень низким потреблением. Имеют низкий входной ток. Из-за особенности их конструкции у них низкая частота единичного коэффициента усиления, в связи с этим у них есть токозадающий вывод, который регулирует значение тока токовых зеркал внутренних каскадов [10, 14, 17]. Пример из документации на LM346 изображен на рисунке 7.

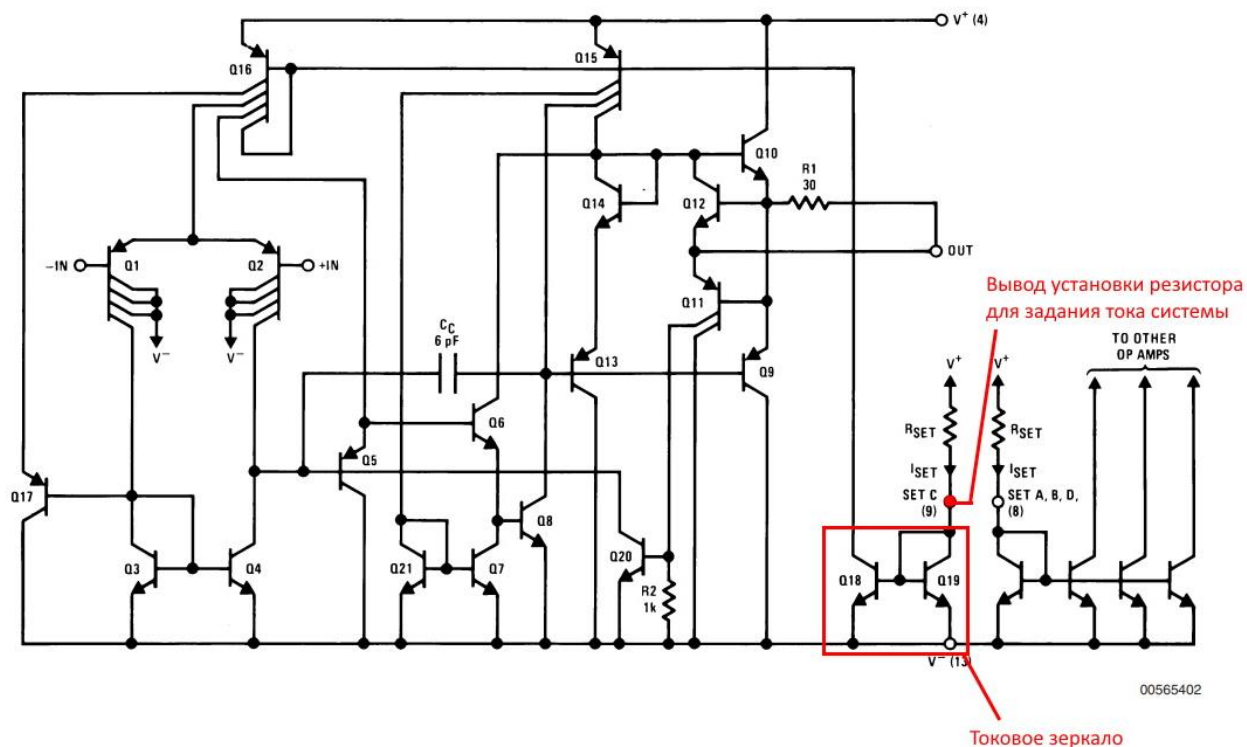


Рисунок 7 – Внутренняя принципиальная схема LM346

Как видно из графика на рисунке 8, чем выше установленный ток, тем выше частота единичного коэффициента усиления.

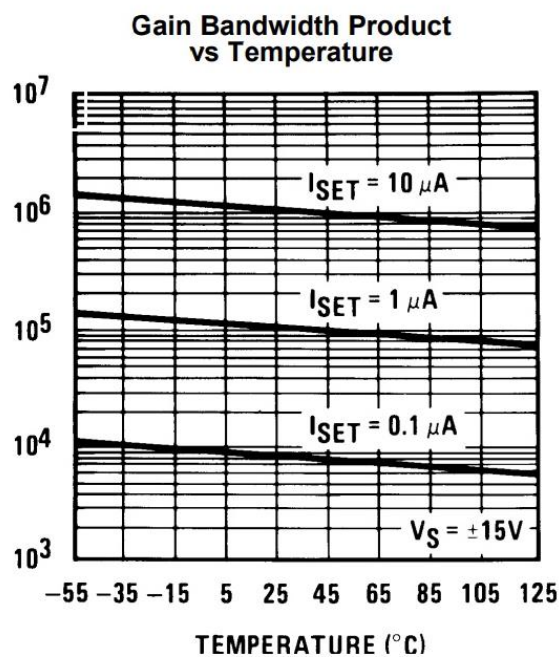


Рисунок 8 – Входное синфазное напряжение LM346

В таблице 5 представлены характеристики усилителя LM346.

Таблица 5 – Характеристики усилителя LM346

Параметр	Значение	Единица измерения
Рабочее напряжение питания	$\pm 5\text{--}\pm 18\text{ В}$	В
Потребляемый ток	1.5–2 мА	мА
Частота единичного усиления	Программируется (до 1 МГц)	МГц
Скорость нарастания	Программируется (до 4 В/мкс)	В/мкс
Выходной ток (без защиты от КЗ)	20	мА
Шум (напряжение, 1 кГц)	18	нВ/ $\sqrt{\text{Гц}}$

Таким образом, можно заметить, что ключевое преимущество LM358 это то, что он спроектирован для работы от одного источника питания. LM386 также может работать от однополярного питания, но это не ОУ, а оконечный усилитель мощности. Отмечу, что LM358 имеет низкое напряжение питания. Эта микросхема работает от напряжений от 3В до 32В или $\pm 16\text{В}$ при двухполярном питании. Для микросхемы NE5534 минимальное рекомендуемое напряжение питания обычно $\pm 5\text{В}$. При однополярном включении входной сигнал не может опускаться ниже 3В от земли, что сильно ограничивает динамический диапазон.

Также выход LM358 имеет защиту от короткого замыкания на землю или на шину питания. При КЗ ток ограничивается на безопасном уровне ($\sim 40\text{--}60\text{мА}$), микросхема не сгорает. NE5534: Не имеет встроенной защиты от КЗ. Входы LM358 могут работать с напряжениями вплоть до отрицательной шины питания и почти до положительной шины.

Отмечу что микросхема LM358 одна из самых дешевых и распространенных микросхем в мире. Поэтому для проектирования лабораторного стенда для исследования аналоговых микросхем я предпочту использовать LM358.

1.2 Методики исследования усилителей

Интегральные усилители, включая операционные, линейные и специализированные аудиоусилители, являются основными элементами аналоговой электроники. Их использование охватывает широкий спектр задач — от предварительного усиления сигналов до построения фильтров, регуляторов и датчиков. Для корректной работы устройств на их основе важно знать параметры этих усилителей в реальных условиях, что делает актуальными как базовые измерения, так и расширенные исследования. В лабораторной и промышленной практике используется комплекс измерений, направленных на определение ключевых характеристик интегральных усилителей, таких как коэффициент усиления, частотный диапазон, уровень искажений, шумы и т.д. Современные подходы к исследованию этих параметров сочетают классические методы с цифровыми технологиями: используются программные пакеты анализа, виртуальные осциллографы, автоматизация на базе.

Основной целью исследования интегрального усилителя является определение его характеристик при различных режимах работы. Это включает в себя измерение коэффициента усиления по напряжению, току и мощности, построение амплитудно- и фазо-частотных характеристик, исследование переходных процессов и определение уровня гармонических искажений. Кроме того, важно оценить уровень собственных шумов усилителя, определить его входное и выходное сопротивление, а также изучить тепловые и перегрузочные режимы [5, 7].

Измерения начинаются с подготовки схемы и изучения документации усилителя. Обычно выбирается типовое включение — например, неинвертирующая конфигурация, обеспечивающая устойчивую работу и достаточное усиление. Проверяется питание, режимы работы и отсутствие перегрузки. Выбирается метод измерения и оборудование.

При измерении коэффициента усиления на вход подают синусоидальный сигнал небольшой амплитуды, после чего вычисляют отношение выходного и входного напряжения по формуле (1):

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \quad (1)$$

где K_U — коэффициент усиления по напряжению;

$U_{\text{ВЫХ}}$ — напряжение на выходе усилителя;

$U_{\text{ВХ}}$ — напряжение на входе усилителя [4, 6].

Полученные данные позволяют судить об основном функционале усилителя, однако они имеют смысл только в пределах рабочей полосы частот.

Для более глубокого анализа проводят измерения амплитудно-частотной характеристики. Это позволяет определить полосу пропускания усилителя, его резонансные или провальные участки, а также оценить стабильность усиления в широком частотном диапазоне. В классической методике частоту сигнала последовательно увеличивают, измеряя амплитуду на выходе. Полученные значения затем наносят на логарифмическую шкалу. Современные методы позволяют автоматизировать этот процесс: используются векторные анализаторы цепей, цифровые осциллографы, а также микроконтроллерные системы, выполняющие быструю дискретизацию и анализ сигнала.

Измерение фазо-частотной характеристики также важно, особенно при исследовании устойчивости усилителя.

Фазовый сдвиг между входным и выходным сигналами оценивается в зависимости от частоты. Превышение фазы в определённых условиях может указывать на потенциальные проблемы с обратной связью и нестабильность.

Переходные характеристики исследуются путём подачи на вход импульсного сигнала, чаще всего прямоугольного меандра. По форме отклика на выходе можно определить время нарастания и спада сигнала, наличие перерегулирования и установившегося значения. Такие измерения особенно актуальны при разработке быстродействующих схем, где критично важно поведение при резких изменениях входного сигнала.

Спектральный анализ позволяет оценить нелинейные искажения, возникающие в усилителе. Для этого на вход подают синусоидальный сигнал, а затем анализируют спектр выходного. Гармоники, возникающие на кратных частотах, указывают на наличие искажений. Их суммарное влияние характеризуется коэффициентом нелинейных искажений, которое можно рассчитать по формуле (2):

$$THD_F = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots + V_n^2}}{V_1} \quad (2)$$

где THD_F – коэффициент нелинейных искажений;

V_n – среднеквадратичное напряжение n-й гармоники.

Измерение шумов проводится при заземлении входа усилителя через эквивалентный резистор. На выходе фиксируются сигналы, вызванные собственными шумами усилителя и цепей питания. Анализ проводится либо интегрально — по общему уровню шума, либо спектрально — с определением распределения шумов по частоте. Это особенно важно в прецизионных схемах, где сигнал может быть соизмерим с уровнем шума.

Для получения корректных данных используются экранированные сборки, малошумящие источники питания и высокоточные АЦП.

Также в рамках исследования операционных усилителей определяют входное и выходное сопротивления усилителя. Это делается путём анализа изменения сигналов при подключении известных нагрузок или дополнительных резисторов. Такие измерения позволяют понять, насколько усилитель согласован с другими элементами схемы, особенно при работе с датчиками или в каскадных усилителях.

Также одним из способов исследования операционных усилителей стало применение микроконтроллеров для автоматизации измерений. Микроконтроллеры, такие как STM32, ESP32, Raspberry Pi Pico позволяют, как генерировать сигналы, так и измерять отклики усилителей.

Кроме генерации и съёма данных, микроконтроллеры позволяют полностью автоматизировать эксперимент. Например, можно программно изменять амплитуду, частоту или форму сигнала, записывать результаты в память или передавать их через USB, Wi-Fi или Bluetooth. Пользователь может управлять процессом через экран, веб-интерфейс или ПК. Всё это существенно сокращает время измерений и снижает влияние человеческого фактора.

Таким образом, современные методы исследования интегральных усилителей опираются на сочетание классических лабораторных техник и цифровых технологий. Микроконтроллеры открывают новые возможности для автоматизации, портативности и интеграции измерительных систем. Создание стенда на базе микроконтроллера позволяет существенно удешевить и ускорить измерения, делает возможным их использование в полевых условиях, образовательной среде и при разработке собственных устройств. Поэтому в разрабатываемом лабораторном стенде будет использоваться микроконтроллерная система сбора информации с подключением внешних устройств для того, что была возможность сравнить данные полученными разными способами.

2 Разработка блока питания

2.1 Обоснование выбора блока питания

Различают принципиально два типа блока питания импульсные и линейные (трансформаторные). Рассмотрим, как сделать линейный блок питания.

Преимущества линейных блоков питания:

- Простота изделия;
- Надежность конструкции;
- Доступность элементов;
- Отсутствие создаваемых радиопомех.

Недостатки линейных блоков питания:

- Большой вес и габариты, которые увеличиваются вместе с мощностью;
- Metallоемкость;
- Необходимость компромисса между снижением коэффициента полезного действия и стабильностью выходного параметра [3].

Усилитель на базе LM358 требует стабильного двухполярного напряжения питания с низким уровнем пульсаций и шума. Наличие помех на шинах питания напрямую влияет на выходной сигнал усилителя, искажая его и ухудшая. Для питания маломощных аналоговых схем с высокими требованиями к уровню шума и пульсаций традиционно используются линейные источники питания.

На рисунке 9 в верхней части изображена блок схема линейного источника питания, а в нижней части показана его возможная схемотехническая реализация.

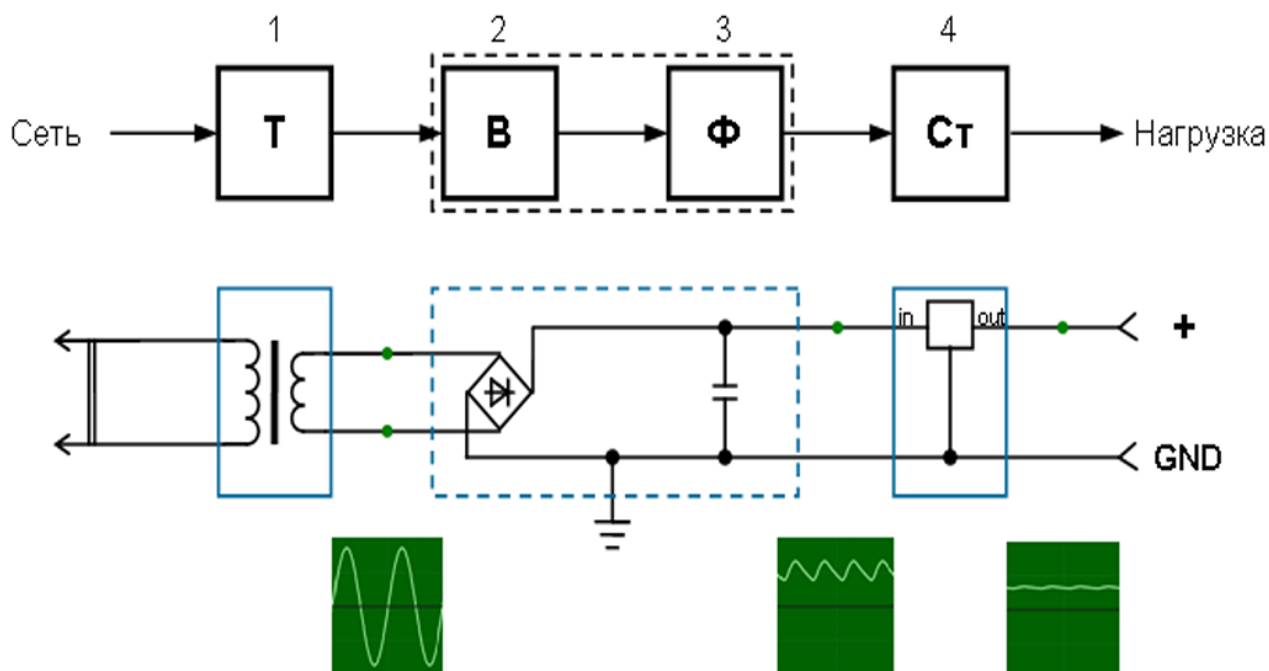


Рисунок 9 – Блок схема линейного блока питания

Описание блок схемы:

- Трансформатор (Т) – важный элемент этого вида блока питания. Он применяется для понижения переменного напряжения 220. Также полезным свойством трансформатора является гальваническая развязка высокого напряжения с относительно низким напряжением.
- Выпрямитель (В) – Необходим для выпрямления переменного напряжения в постоянное напряжение. Выпрямительные схемы бывают однофазными, трехфазными или многофазными. В зависимости от оличества фаз
- Фильтр (Ф) – Применяется для сглаживания пульсирующего напряжения.
- Стабилизатор (Ст) – Служит для поддержания стабильности выходного напряжения [9].

Согласно документации LM358, рекомендуемый диапазон напряжений питания составляет от ± 1.5 В до ± 16 В. Абсолютный максимум — ± 18 В.

Для обеспечения широкого динамического диапазона и запаса по питанию выберем номинальное напряжение питания ± 9 В.

Ток покоя одного операционного усилителя LM358 составляет 0.7 - 1.5 мА на канал. Основной ток нагрузки будет определяться резисторами в цепи обратной связи. Для усилителя с коэффициентом усиления $K = -10$ и входным резистором $R1 = 10$ кОм, ток через резисторы при максимальном входном напряжении 1 В составит примерно 0.1 мА. С учетом небольшой возможной емкостной нагрузки и запаса, установим максимальный выходной ток блока питания на каждую полярность 100 мА.

2.2 Расчет трансформатора

Требуемое выходное напряжение: $U_{\text{вых}} = \pm 9$ В.

Минимальное падение напряжения на стабилизаторе:

Падение напряжения на диодах выпрямительного моста будет равно 1.4 В, так как ток в каждый полупериод протекает через 2 диода моста.

Минимальное амплитудное напряжение на вторичной обмотке трансформатора 10.4 В.

Действующее напряжение на вторичной обмотке можно рассчитать по формуле 3:

$$U_{\text{rms}} = \frac{U_{\text{minamp}}}{\sqrt{2}} = \frac{10.4}{1.414} = 7.35\text{В} \quad (3)$$

где U_{rms} – действующее напряжение на вторичной обмотке;

U_{minamp} – минимальное амплитудное напряжение на вторичной обмотке трансформатора [4].

Учитывая возможные просадки напряжения под нагрузкой и колебания сети вниз, необходим запас. Примем $U_{\text{rms}} = 11$ В для каждой половины

вторичной обмотки. Обмотка должна быть с отводом от середины или две одинаковые обмотки.

Для двухполупериодного выпрямителя ток через обмотку и каждый диод носит импульсный характер. Приблизненно, требуемый действующий ток вторичной обмотки составит 0.12А

Требуется трансформатор с двумя вторичными обмотками или одной с отводом от середины 11В-0-11В, мощностью не менее 2.64 ВА. Выбираем стандартный трансформатор мощностью 5 ВА, например, ТПП 5-220-50 или аналогичный.

2.3 Диодный мост

Максимальное обратное напряжение на диоде равно:

$$U_{\text{maxdiod}} = \sqrt{2} * U_{\text{rms}} = 1.414 * 11\text{В} = 15.6\text{В} \quad (4)$$

где U_{rms} – действующее напряжение на вторичной обмотке;

U_{maxdiod} – максимальное обратное напряжение на диоде.

С учетом возможного повышения сетевого напряжения максимальное обратное напряжение на диоде будет равно 17.16 В.

Максимальный средний прямой ток диода равен:

$$I_{\text{avgдиода}} = \frac{I_{\text{outmax}}}{2} = \frac{0.1}{2} = 0.05\text{А} \quad (5)$$

где $I_{\text{avgдиода}}$ – максимальный средний прямой ток диода;

I_{outmax} – максимальный выходной ток блока питания.

Выбираем выпрямительный мост с параметрами, превышающими расчетные.

2.4 Расчет фильтрующего конденсатора

Емкость конденсатора можно рассчитать по формуле (6)

$$C_{\Phi} = \frac{I_{outmax}}{6.28 * U_H * F * K_{\Pi}} \quad (6)$$

где I_{outmax} – максимальный выходной ток блока питания;

K_{Π} – коэффициент пульсации;

C_{Φ} – емкость фильтрующего конденсатора;

F – частота переменного напряжения на входе диодного выпрямителя;

U_H – напряжение на нагрузке блока питания.

Коэффициент пульсации примем равным 0.01%:

$$C_{\Phi} = \frac{0,1}{9 * 0,01 * 6.28 * 100} = 1769[\text{мкФ}]$$

2.5 Узел стабилизации

Выпрямленное, а затем сглаженное напряжение необходимо стабилизировать, то есть нужно сделать, так что бы уровень напряжения на нагрузке поддерживался постоянным независимо от влияющих факторов [6]. Будем использовать широко применяемые стабилизаторы напряжения LM7809 и LM7909 у которых максимальный ток нагрузки 1,5 А [18, 19].

Производитель рекомендует подключать стабилизатор напряжения через входные и выходные емкости (рисунок 10):

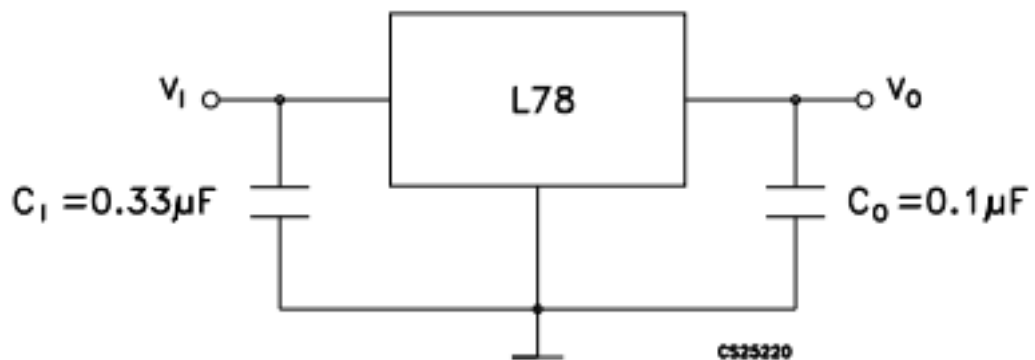


Рисунок 10 – Подключение стабилизатора

2.6 Схема и элементы блока питания

На рисунке 11 представлена схема разрабатываемого двухполярного блока питания.

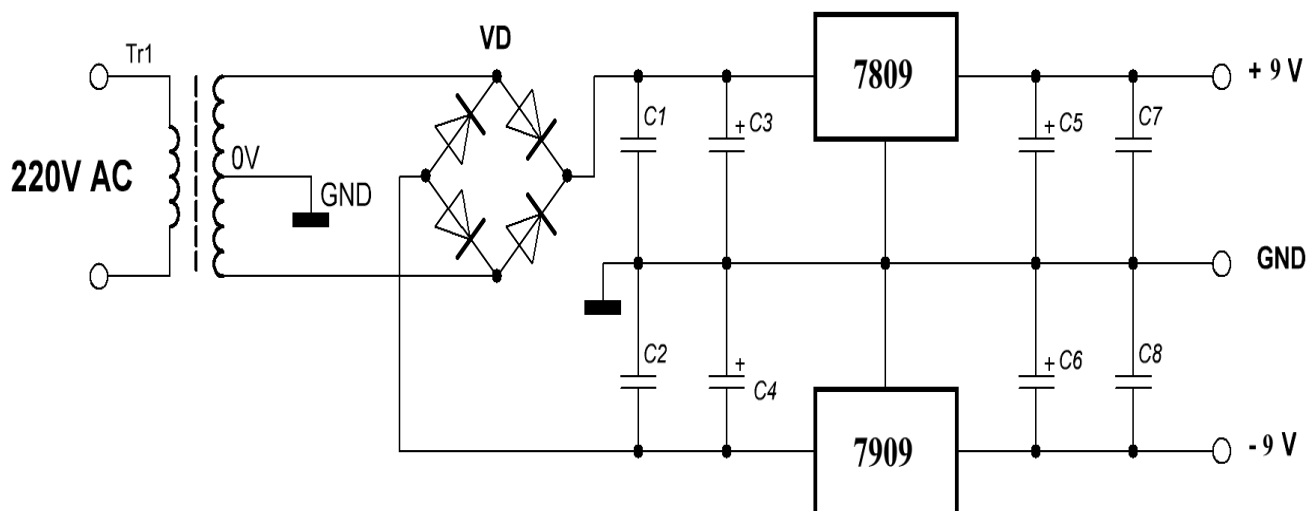


Рисунок 11 – Схема блока питания

Элементы блок питания представлены в таблице 6:

Таблица 6 – Элементы и их номиналы [2, 8, 13, 18, 19, 25]

Обозначение на схеме	Наименование
Tr1	ТП112-10 (ТП132-10), трансформатор, 2х14В, 0.25А
VD	W06М, диодный мост 1.5А 600В
C1, C2	K10-17Б 0.33мкФ конденсатор керамический выводной
C7, C8	K10-17Б 0.1мкФ конденсатор керамический выводной
7809	7809 ТО-220 (L7809CV), стабилизатор напряжения +9В, 1.5А
7909	L7909CV, стабилизатор напряжения -9В $\pm 4\%$ 1.5А
C5, C6	ЕСАР (K50-35 мини), 100мкФ, 25В
C3, C4	K50-35, 2200мкФ, 25В

В данном разделе была выбрана и обоснована схема блока питания, проведены необходимые расчеты, выбраны конкретные компоненты с учетом их характеристик.

3 Разработка лабораторного стенда

3.1 Разработка и моделирование исследуемых схем

Для ОУ применяют основные схемы включений: с инвертированием входного сигнала и без его инвертирования. В соответствии с этим получают устройства, называемые инвертирующими и неинвертирующими масштабными усилителями.

Для исследования характеристик операционного усилителя LM358 будем использовать схему инвертирующего и неинвертирующего усилителей.

Типовые схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителей приведены на рисунке 12.

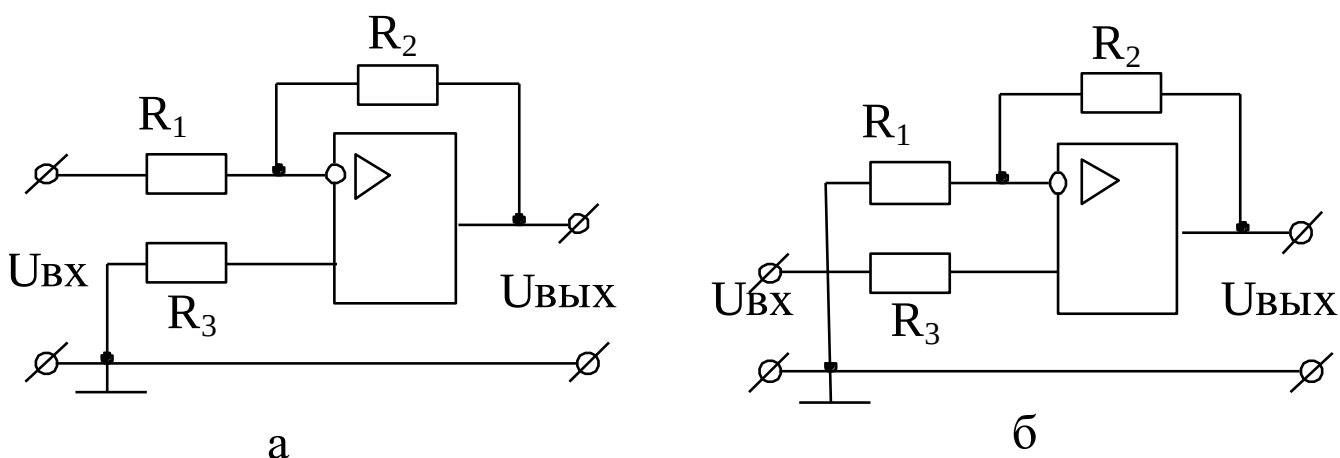


Рисунок 12 – Типовые схемы инвертирующего (а) и неинвертирующего (б) усилителей

Резистор R_3 , выбираемый из условия $R_3 = R_1 \parallel R_2$, служит для уменьшения усиления синфазной составляющей, обусловленной разностью входных токов, а также для снижения влияния температуры на общий коэффициент усиления масштабного усилителя

Коэффициента усиления инвертирующего усилителя, использующего идеальный ОУ равен:

$$K_{ui} = \frac{R_2}{R_1} \quad (7)$$

где K_{ui} – коэффициент усиления инвертирующего усилителя;

R_1 – сопротивление резистора R_1 инвертирующего усилителя;

R_2 – сопротивление резистора R_2 инвертирующего усилителя.

Коэффициента усиления неинвертирующего усилителя, использующего идеальный операционный усилитель равен:

$$K_{\text{ии}} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (8)$$

где $K_{\text{ии}}$ – коэффициент усиления неинвертирующего усилителя;

R_1 – сопротивление резистора R_1 неинвертирующего усилителя;

R_2 – сопротивление резистора R_2 неинвертирующего усилителя.

Схема была смоделирована в программе Micro-Cap (рисунок 13) с целью изучения её поведения при идеальных параметрах компонентов. Значение напряжения питания равно +/-9В, частота генерации синусоидального сигнала 10кГц.

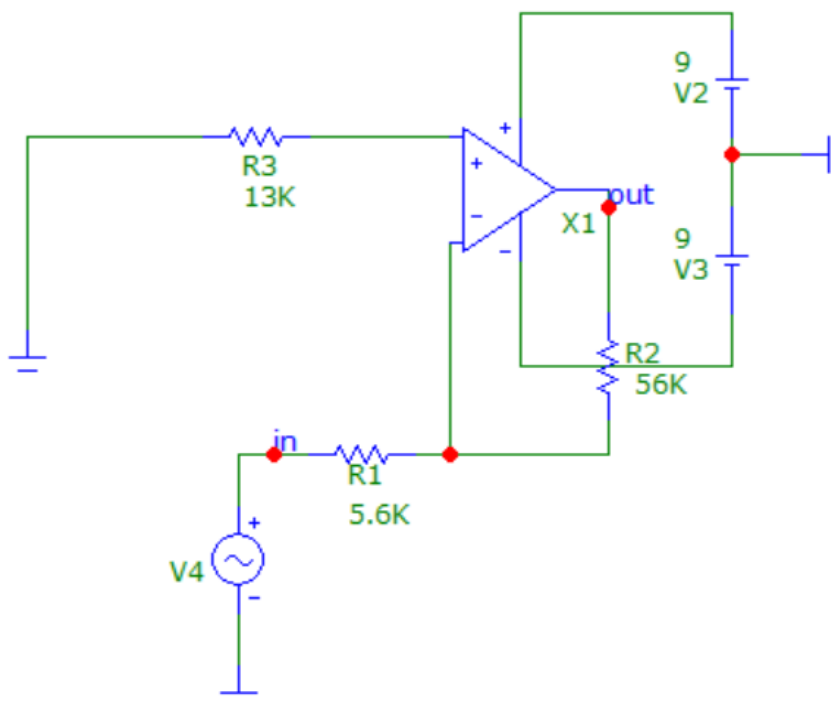


Рисунок 13 – Схема неинвертирующего усилителя в Micro-Cap

Номиналы используемых элементов приведены в таблице 7.

Таблица 7 – Номиналы элементов схемы

Обозначение	R13	R14	R16	R18	R20	R24
Значение	5,6 кОм	100 кОм	13 кОм	27 кОм	56 кОм	1 МОм

Для исследования коэффициента усиления инвертирующего усилителя сначала собрали схему с номиналами резисторов R13 и R20. Сняли значения напряжения на входе и выходе операционного усилителя при разных входных напряжениях генератора. Данные занесли в таблицу 8.

Таблица 8 – Амплитудные характеристики инвертирующего ОУ при номинальных резисторах

U _{вх} , В	0,05	0,17	0,29	0,41	0,53	0,62
U _{вых} , В	0,576	1,711	2,904	4,097	5,295	6,195
K _и U _{вых} /U _{вх}	11,52	10,07	10,03	9,99	9,99	9,99

Затем заменить резистор R13 на резистор R14. И аналогичным образом сняли характеристики. Резистор заменили R20 на резистор R24. Данные занесли в таблицу 9.

Таблица 9 – Амплитудные характеристики инвертирующего ОУ при не номинальных резисторах

U _{вх} , В	0,05	0,17	0,29	0,41	0,53	0,62
U _{вых} , В	0,562	1,754	2,947	4,139	5,332	6,226
K _и U _{вых} /U _{вх}	11,24	10,32	10,16	10,1	10,06	10,04

Для исследования коэффициента усиления неинвертирующего усилителя. Собрали схему со значением напряжение питания $\pm 9\text{В}$ и частотой генерации синусоидального сигнала 10кГц в программе Micro-Cap (рисунок 14).

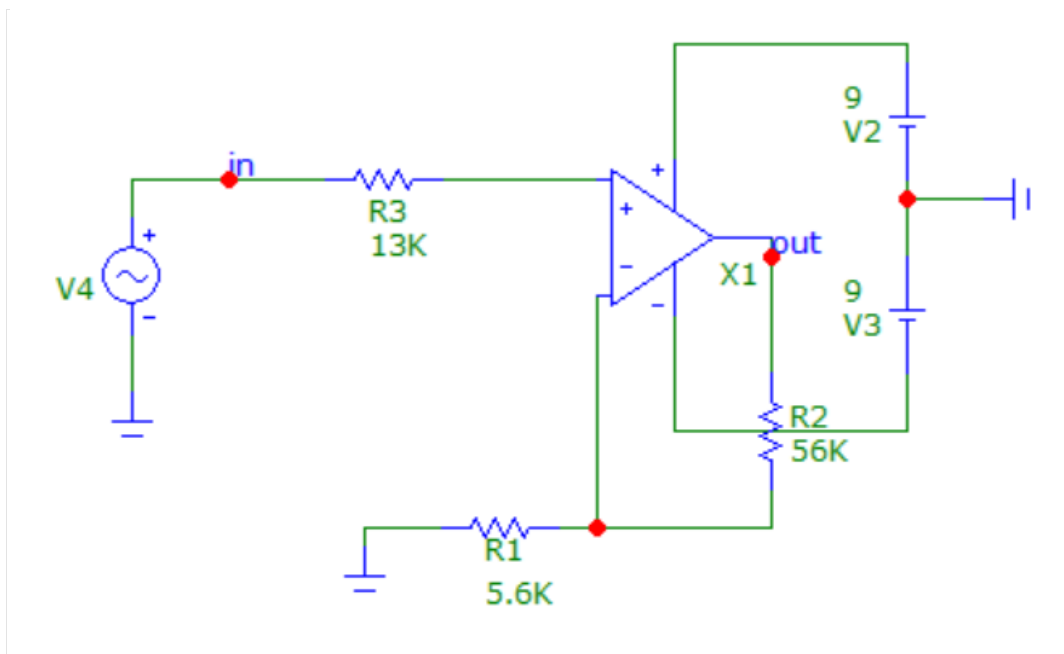


Рисунок 14 – Схема неинвертирующего усилителя в Micro-Cap

Определили коэффициент усиления для двух комбинаций резисторов обратной связи.

Сняли амплитудную характеристику при номинальных резисторах. Данные занесли в таблицу 10.

Таблица 10 – Амплитудные характеристики неинвертирующего ОУ при номинальных резисторах

$U_{вх}, \text{В}$	0,05	0,17	0,29	0,41	0,53	0,62
$U_{вых}, \text{В}$	0,5669	1,879	3,191	4,503	5,815	6,755
K_u $U_{вых}/U_{вх}$	11,14	11,05	11	10,983	10,97	10,90

Затем заменить резистор R13 на резистор R14. Полученные данные занесли в таблицу 11. И заменили резистор R20 на резистор R24.

Таблица 11 – Амплитудные характеристики неинвертирующего ОУ при не номинальных резисторах

$U_{вх}, В$	0,05	0,17	0,29	0,41	0,53	0,62
$U_{вых}, В$	0,608	1,879	3,212	4,515	5,816	6,789
K_u $U_{вых}/U_{вх}$	12,16	11,05	11,08	11,01	10,98	10,95

Построили график зависимости входного напряжения от выходного для всех предыдущих замеров амплитудной характеристики (рисунок 15).

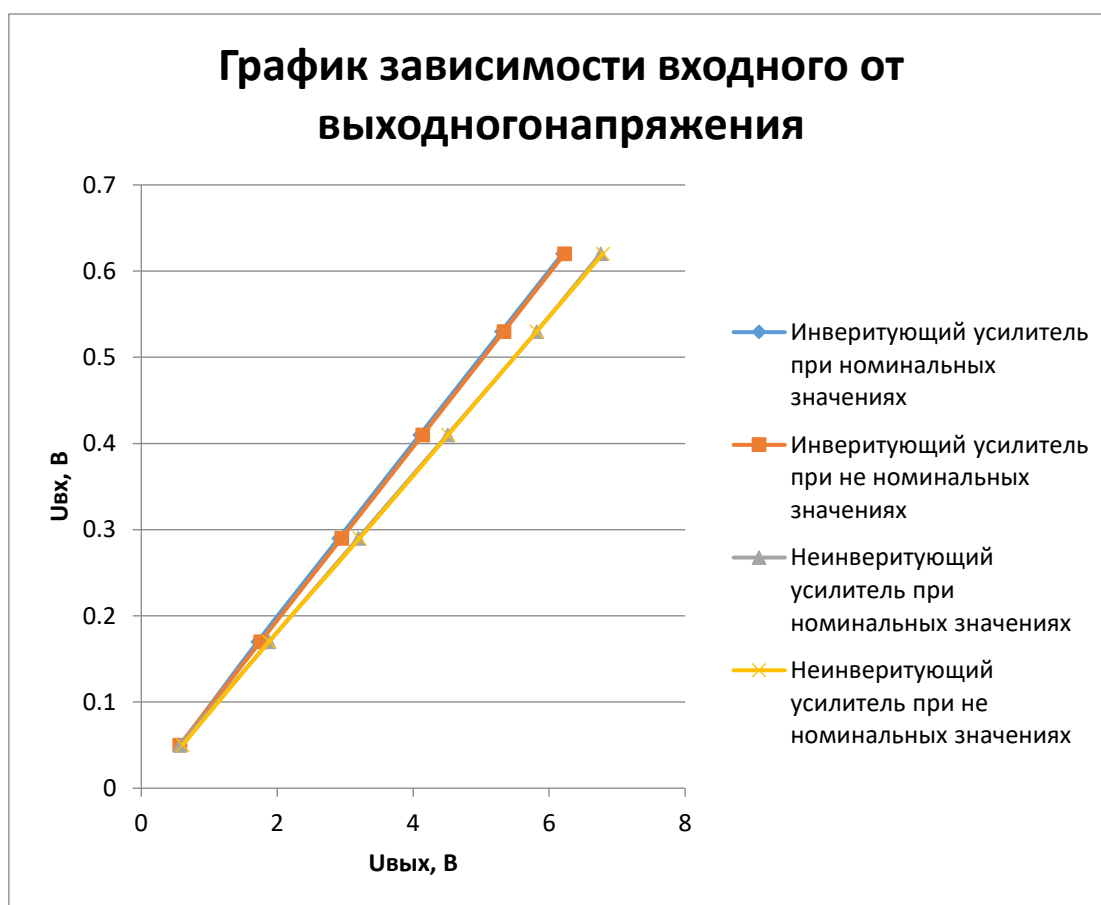


Рисунок 15 – График зависимости входного от выходного напряжения

Теоретическое значение коэффициента усиления инвертирующего и неинвертирующего усилителя определим по формуле (3) и (4) соответственно. Теоретические и экспериментальные значения коэффициентов усиления инвертирующего усилителя занесли в таблицу 12.

Таблица 12 – Теоретические и экспериментальные значения коэффициентов усиления инвертирующего усилителя

Резисторы	R13 и R20	R14 и R20
Теоретические данные	10	10
Усредненные экспериментальные данные	10,265	10,32

Теоретические и экспериментальные значения коэффициентов усиления неинвертирующего усилителя занесли в таблицу 13.

Таблица 13 – Теоретические и экспериментальные значения коэффициента усиления неинвертирующего усилителя

Резисторы	R13 и R20	R14 и R24
Теоретические данные	11	13
Усредненные экспериментальные данные	11,07	11,205

Полученные расчетные данные коэффициента усиления операционного усилителя сходятся с экспериментальными данными.

3.2 Выбор микроконтроллера

Основные задачи и требования к микроконтроллеру:

- Генерация аналогового сигнала произвольной формы с заданными параметрами

- Режим захвата аналоговых сигналов ("осциллограф") с возможностью визуализации.
- Управление параметрами генерации и захвата в реальном времени.
- Передача данных о генерируемых и захваченных сигналах, а также управляющих команд по сети.
- Предоставление интерактивного веб-интерфейса для удаленного доступа и управления.

Ключевые технические требования к микроконтроллеру:

- Наличие ЦАП (DAC) для генерации сигнала.
- Наличие быстрого многоразрядного АЦП (ADC) с достаточным количеством каналов для захвата сигнала.
- Интегрированный модуль Wi-Fi для реализации сетевого взаимодействия и веб-сервера без внешних компонентов.
- Значительный объем ОЗУ (RAM) для буферизации данных АЦП, обработки сигналов, работы стека Wi-Fi TCP/IP и веб-сервера.
- Достаточный объем Flash-памяти для хранения прошивки, веб-ресурсов и данных [1].

Для того что выбрать подходящий микроконтроллер для нашего лабораторного стенда сравним их основные характеристики (таблица 14).

Таблица 14 – сравнения основных характеристик микроконтроллеров [11, 12, 22, 23]

Характеристика	ESP32 WROOM 32	Arduino Uno (ATmega328P)	STM32F401C C (Black Pill)	Raspberry Pi Pico (RP2040)
Ядро/архитектура	2 x Xtensa LX6 (32-бит)	AVR (8- бит)	ARM Cortex-M4 (32- бит)	2 x ARM Cortex-M0+ (32- бит)
Тактовая частота	до 240 МГц	16 МГц	до 84 МГц	до 133 МГц

Продолжение таблицы 14

Flash память	4 МБ (внешняя SPI)	32 КБ	256 КБ	2 МБ (внешняя QSPI)
RAM	520 КБ	2 КБ	64 КБ	264 КБ
Wi-Fi	802.11 b/g/n (Встроенный)	-	-	-
Bluetooth	BLE 4.2 (Встроенный)	-	-	-
АЦП	2 x 12- бит SAR (До 18 каналов)	10- бит (8 каналов)	12- бит (16 каналов)	12- бит (3 канала)
Максимальная скорость АЦП	До 2 Мвыб/с	10 квыб/с	До 2.4 Мвыб/с	500 квыб/с
ЦАП	*2 x 8- бит	-	1 x 12- бит	-

Исходя из характеристик, приведенных в таблице 14, сделаем вывод, что у Arduino Uno (ATmega328P) отсутствует ЦАП, Wi-Fi, крайне малая производительность и ОЗУ. Что не соответствуют требованиям.

У микроконтроллера STM32F401CC (Black Pill) мощные ядра, хорошие АЦП/ЦАП, но у него отсутствует встроенный Wi-Fi.

Также у микроконтроллера Raspberry Pi Pico (RP2040) отсутствует встроенные ЦАП и Wi-Fi. Необходимость внешних модулей делает решение менее интегрированным и более сложным.

Таким образом, микроконтроллер ESP32-WROOM-32 (рисунок 16) был выбран как оптимальное решение, полностью соответствующее поставленным требованиям.

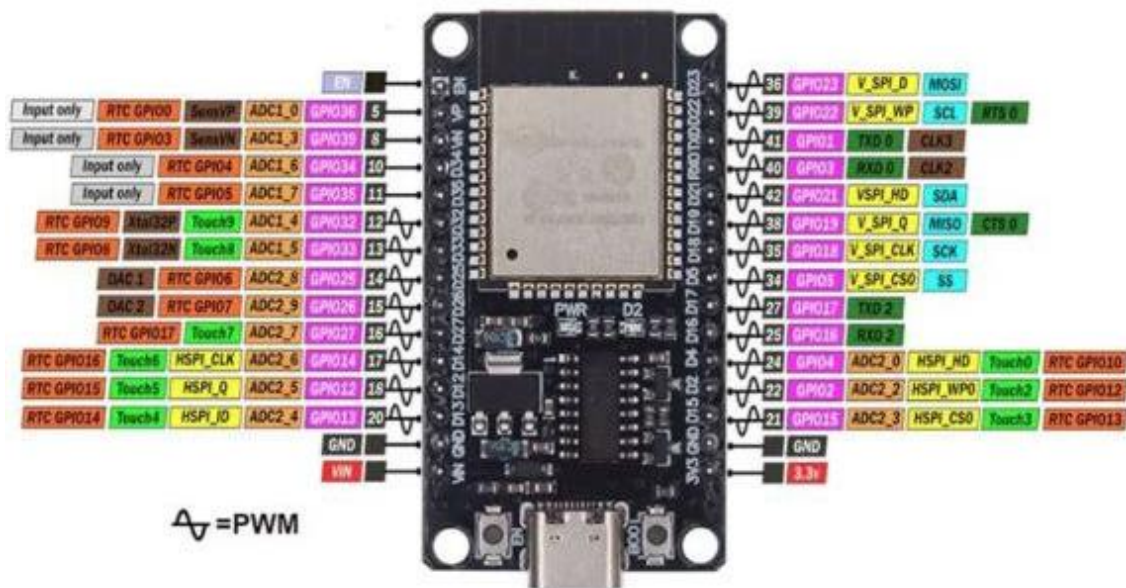


Рисунок 16 – Микроконтроллер ESP32-WROOM-32

Он обеспечивает аппаратную генерацию аналоговых сигналов благодаря встроенным ЦАП. Реализует сетевое взаимодействие и веб-интерфейс за счет интегрированного модуля Wi-Fi, без усложнения схемы. Обладает необходимым объемом ОЗУ для буферизации данных и работы сетевого стека. Имеет достаточный объем Flash-памяти и богатую экосистему для эффективной разработки.

3.3 Разработка алгоритма функционирования устройства

Алгоритм функционирования устройства можно описать следующим образом. После подачи напряжения питания микроконтроллер ESP32-WROOM-32 выполняет последовательную инициализацию системных компонентов. Устройство настраивает периферийные интерфейсы, генерирует таблицу значений для синусоидальных сигналов и устанавливает сетевое подключение через Wi-Fi. При невозможности подключения к существующей сети микроконтроллер автоматически переходит в режим точки доступа, создавая собственную беспроводную сеть [1].

На первом ядре микроконтроллера непрерывно работает осциллограф, который с фиксированным интервалом опрашивает два аналоговых канала и сохраняет результаты измерений в буфер. При заполнении буфера формируется готовый кадр данных для передачи. На втором ядре функционирует генератор сигналов, динамически рассчитывающий выходные значения на основе текущих настроек частоты, амплитуды и формы сигнала, передавая их на цифро-аналоговый преобразователь.

Система постоянно отслеживает управляющие команды, поступающие через веб-интерфейс. При получении новых параметров генерации микроконтроллер мгновенно корректирует рабочие характеристики выходного сигнала. Данные немедленно передаются через WebSocket-соединение для визуализации в веб-браузере, где пользователь может анализировать осциллограммы в реальном времени.

Пользовательский интерфейс предоставляет интуитивное управление устройством. Кнопки "Run" и "Stop" позволяют контролировать генерацию сигнала, регуляторы частоты и амплитуды обеспечивают точную настройку параметров, а переключатель формы сигнала дает возможность выбора между синусоидальными и прямоугольными импульсами. Интерфейс дополнительно отображает диагностическую информацию о характеристиках измеряемых сигналов. Изобразим описанный алгоритм в виде блок-схемы на рисунке 17.

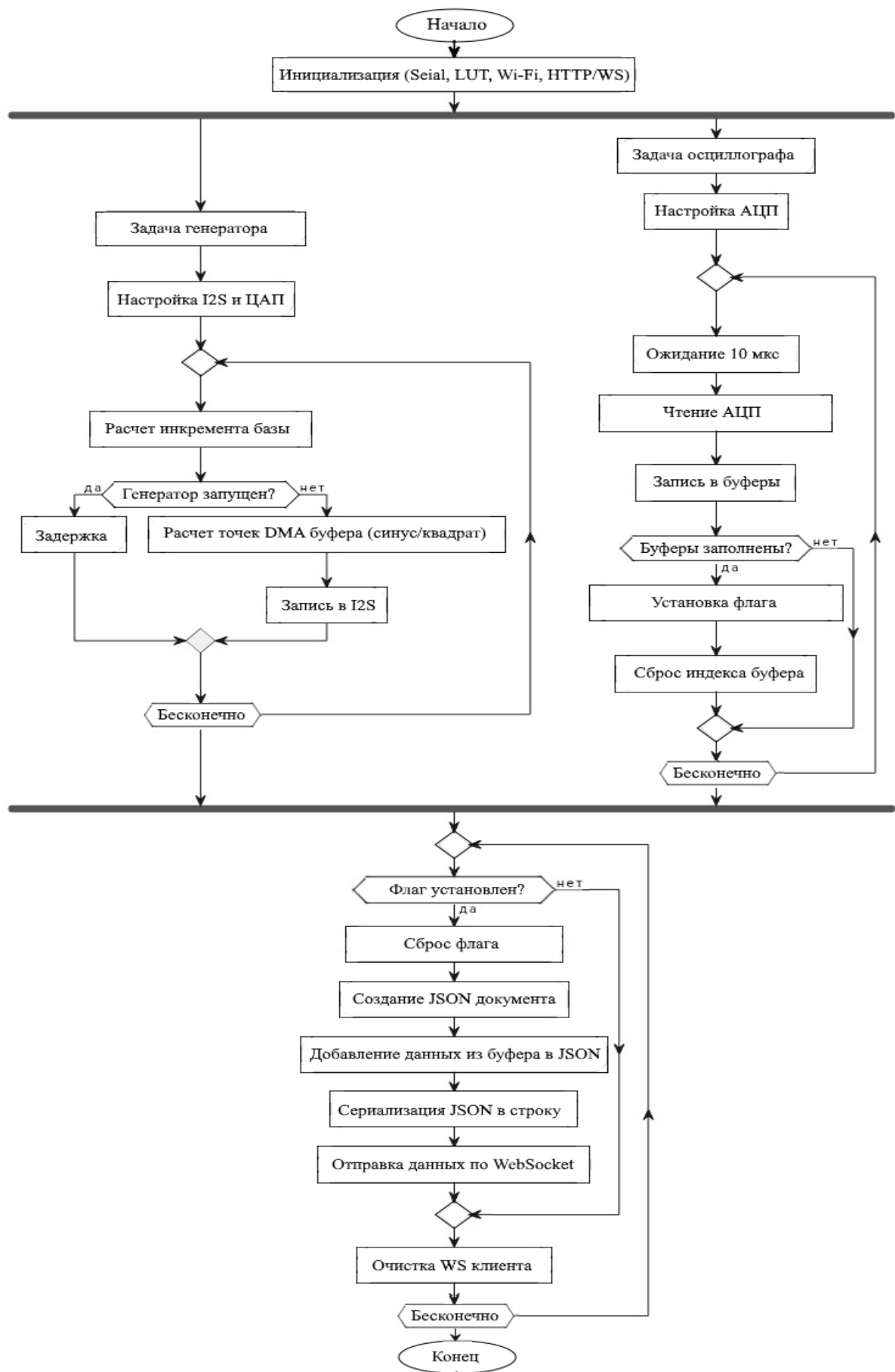


Рисунок 17 – Блок-схема алгоритма функционирования устройства

3.4 Программирование микроконтроллера

Опираясь на разработанный алгоритм функционирования устройства была написана программа для микроконтроллера ESP32-WROOM-32.

В результате разработанное программное обеспечение позволяет микроконтроллеру генерировать сигнал прямоугольной и синусоидальной прямоугольной формы с заданной амплитудой. А также снимать осциллограмму.

Пример генерации прямоугольного сигнала микроконтроллера изображен на рисунке 18 и 19. На рисунке 18 показана осциллограмма снятая осциллографом JHJDS6052S с выхода генератора на микроконтроллере. Заданная частота 1кГц, амплитуда 3.3В.

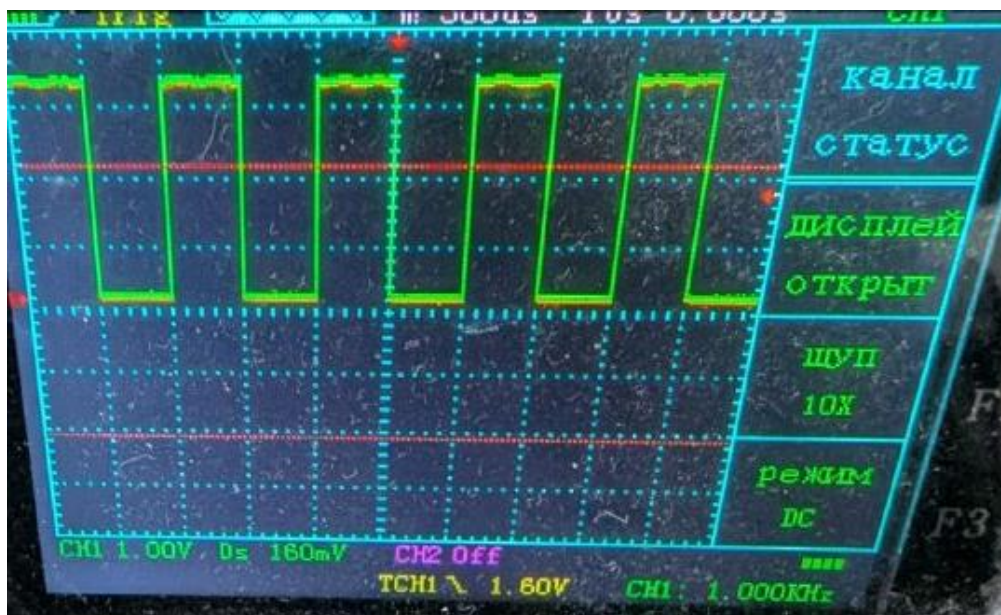


Рисунок 18 – Осциллограмма прямоугольного сигнала на осциллографе JHJDS6052S

Как видно из осциллограммы генерация сигнала происходит со смещением. Это обусловлено тем, что микроконтроллер не может генерировать двухполярный сигнал из-за аппаратных ограничений его цифро-аналогового-преобразователя.

На рисунке 19 изображена веб-страница на которой задаются параметры генерации сигнала, и отображается осциллограмма, снятая при помощи микроконтроллера с выхода генератора на ESP32-WROOM-32.

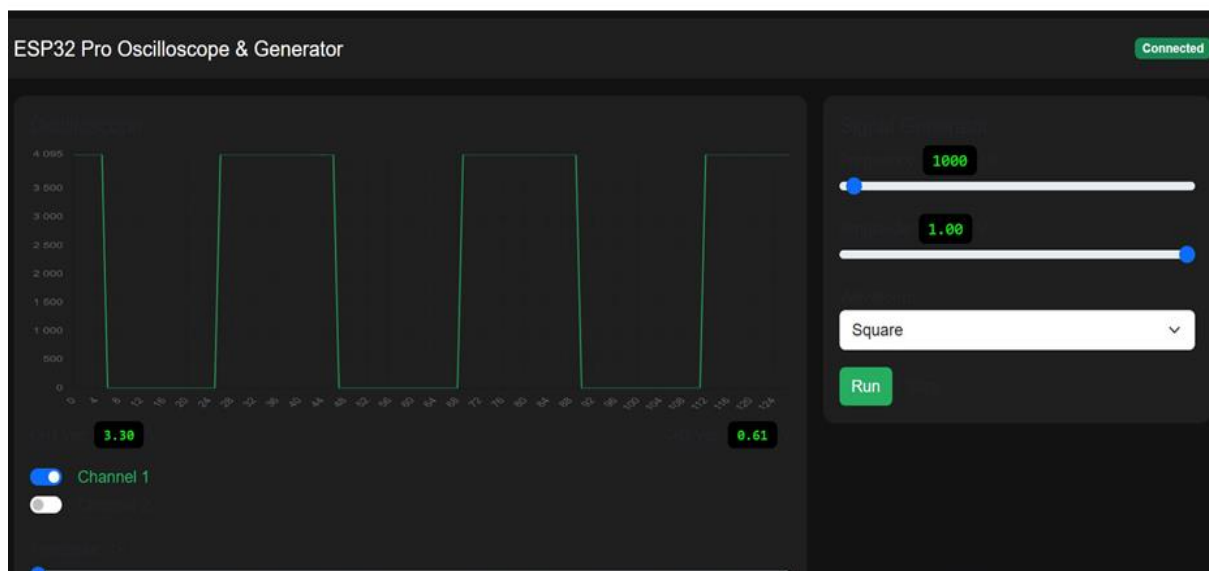


Рисунок 19 – Осциллограмма прямоугольного сигнала на веб-странице

Пример генерации синусоидального сигнала микроконтроллера изображен на рисунке 20 и 21.

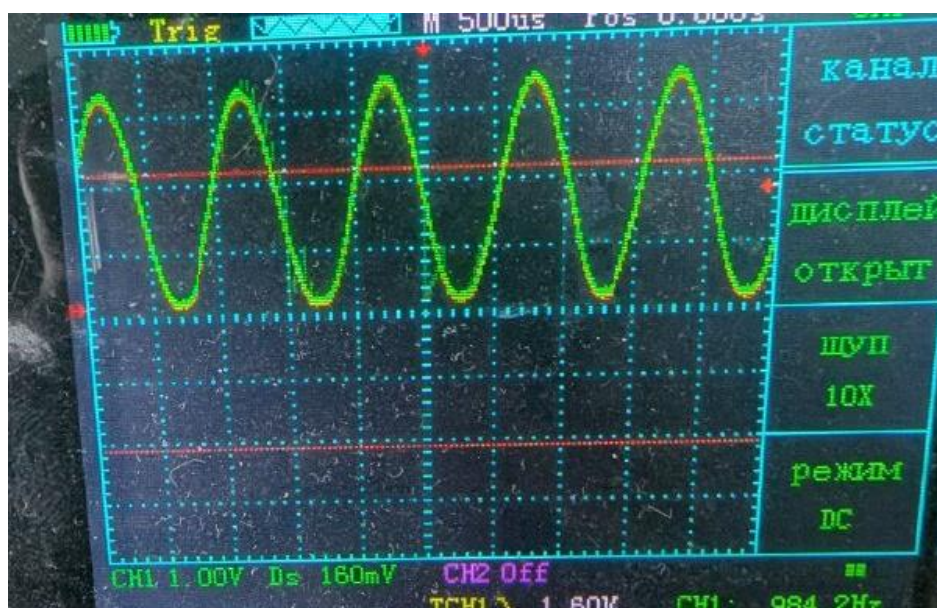


Рисунок 20 – Осциллограмма синусоидального сигнала на осциллографе JHJDS6052S

На рисунке 20 показана осциллограмма снятая осциллографом JHJDS6052S с выхода генератора на микроконтроллере. Заданная частота 1кГц, амплитуда 3.3В.

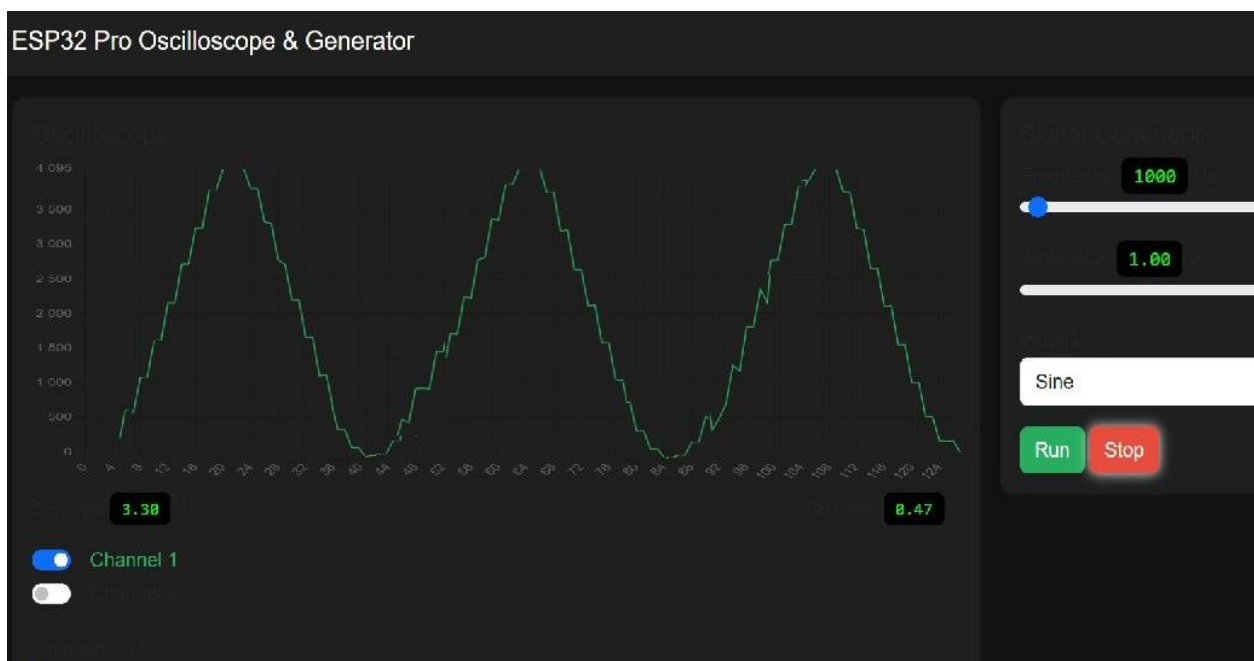


Рисунок 21 – Осциллограмма синусоидального сигнала на веб-странице

На рисунке 21 изображена веб-страница на которой задаются параметры генерации сигнала, и отображается осциллограмма, снятая при помощи микроконтроллера с выхода генератора на ESP32-WROOM-32.

3.5 Проектирование конструкции стенда

Для визуализации конструкции стенда, предназначенного для проведения исследования микросхемы LM358, была создана трёхмерная модель стенда (рисунок 22). Модель создана с использованием программного обеспечения Компас 3D.

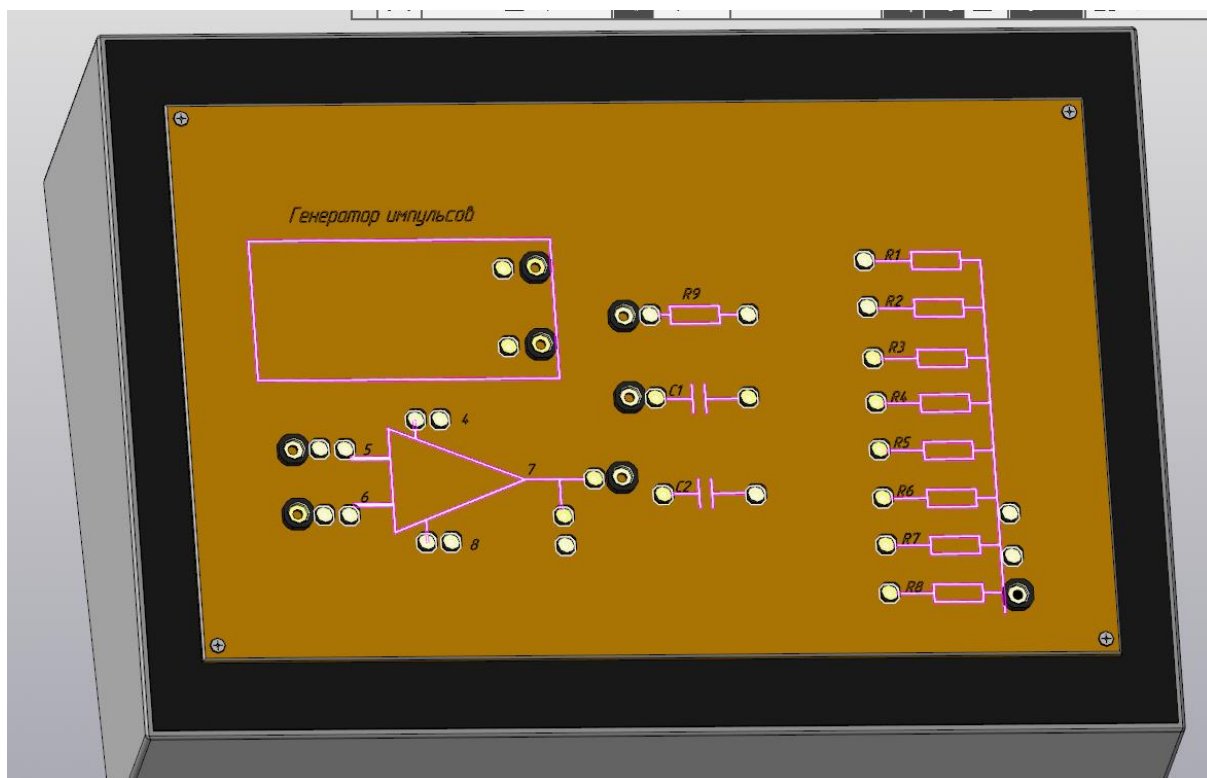


Рисунок 22 – Трехмерная модель стенда

Для соединения элементов будут использоваться гнезда Г1.6 и Г4 (рисунок 23).



Рисунок 23 – Гнездо

Большое количество гнезд на лабораторном стенде позволяет подключать несколько осциллографов, мультиметров. Также можно будет подключить внешний генератор сигнала. Большое количество гнезд превращает лабораторный стенд в гибкий и универсальный инструмент.

Под листом гетинакса будут крепиться блок питания, микроконтроллерная система сбора информации, плата с исследуемой схемой включения микросхемы LM358 (рисунок 24) на которой будет находиться набор сменных резисторов и конденсаторов. Для разработки печатных плат была использована программа DipTrace.

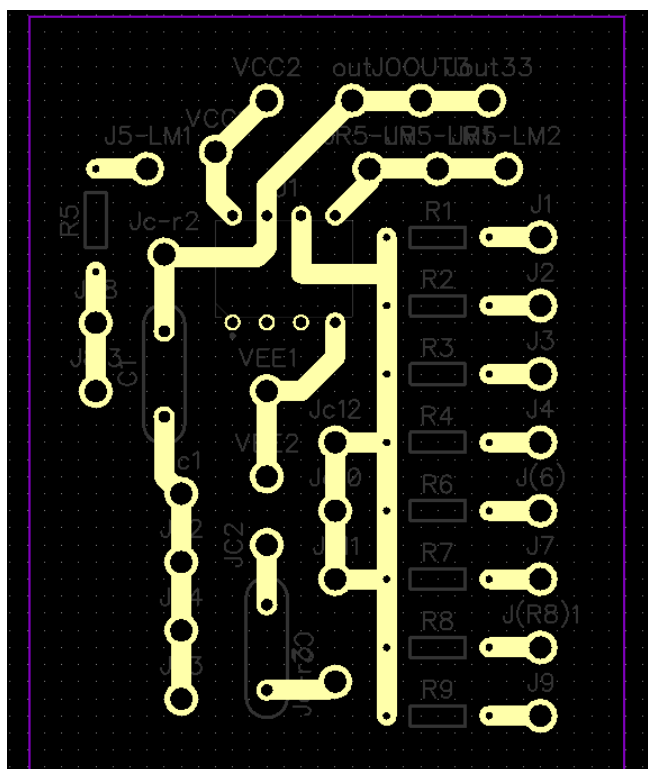


Рисунок 24 – Топологическая схема платы с исследуемой схемой включения микросхемы LM358

В рамках данной главы дипломного проекта была выполнена разработка алгоритма программного обеспечения и написана программа для микроконтроллера ESP32-WROOM-32 в среде разработки Arduino IDE. Разработана топологическая схема платы исследуемой схемы и проведено моделирование работы схем на операционных усилителях в среде Micro-Cap. Также была разработана трехмерная модель конструкции стенда.

Заключение

В ходе выполнения дипломного проекта были детально изучены принципы работы, основные характеристики ОУ LM358, проанализированы схемы инвертирующего и неинвертирующего усилителей. Было выполнено моделирование работы инвертирующего и неинвертирующего усилителей на LM358 в среде Micro-cap. Результаты моделирования подтвердили работоспособность схем и легли в основу их практической реализации. Также была разработана печатная плата, содержащая схему инвертирующего и неинвертирующего усилителя на микросхеме LM358.

Обоснована и детально проработана схема блока питания.

Разработано, отлажено и загружено программное обеспечение для микроконтроллера ESP32, реализующее генерацию сигналов синусоидальной и прямоугольной формы с управляемыми параметрами при помощи веб-страницы. Функциональность программного обеспечения проверена на отладочной плате ESP32, подтвердив корректность алгоритмов и работу веб-интерфейса. Веб-интерфейс интуитивно понятен и предоставляет пользователю возможность гибкой генерируемых сигналов в реальном времени и визуализации результатов измерений.

Основные перспективы и дальнейшие шаги для логического завершения проекта это сборка стенда в единый корпус с необходимыми разъемами, обеспечивающий эргономическое размещение плат и безопасную эксплуатацию. Проведение полного цикла испытания собранного стенда на предмет соответствия всем техническим требованиям и расширение его функционала.

Проделанная работа представляет собой законченный этап проектирования и подготовки к изготовлению лабораторного стенда, обладающего значительным потенциалом для применения в учебном процессе и дальнейшего развития.

Список используемой литературы

1. Боровский А. С. Программирование микроконтроллера Arduino в информационно-управляющих системах : учебное пособие / А. С. Боровский, М. Ю. Шрейдер. – Оренбург : ОГУ, 2017. – 113 с. – URL: <https://www.iprbookshop.ru/78913.html> (дата обращения: 10.03.2025).

2. КЕРАМИЧЕСКИЕ КОНДЕНСАТОРЫ МНОГОСЛОЙНЫЕ К10 17Б имп. [Электронный ресурс] // Чип и Дип : [сайт]. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/056/DOC000056282.pdf> (дата обращения: 19.03.2025).

3. Ким Р. В. Линейные и импульсные блоки питания персонального компьютера / Р. В. Ким // Молодой ученый. — 2024. — № 29 (528). — С. 39-42. — URL: <https://moluch.ru/archive/528/116788/> (дата обращения: 27.12.2024).

4. Корневский Н. А. Аналоговые элементы, узлы и блоки биотехнических систем : Учебное пособие / Корневский Н. А., Юлдашев З. М., Родионова С. Н. 1– 2024 : ТНТ, 2024. – 252 с. - ISBN 978-5-94178-867-5. Текст : электронный // ЭБС ТНТ [сайт]. – URL: <https://www.tnt-ebook.ru/library/book/857> (дата обращения: 23.06.2025).

5. Осадченко В. Х. Операционные усилители : учебное пособие / В. Х. Осадченко, Я. Ю. Волкова ; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Уральский федеральный университет. — Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2020. — 156 с. : ил. — Библиогр.: с. 154. — ISBN 978-5-7996-3062-1. — Текст : непосредственный. — URL: https://elar.urfu.ru/bitstream/10995/93460/1/978%E2%80%915%E2%80%917996-3062-1_2020.pdf (дата обращения: 21.10.2024).

6. Приходько С. В. Нелинейные цепи (выпрямители, стабилизаторы). Учебно-методическое пособие для студентов факультета нано- и биомедицинских технологий / С. В. Приходько, Б. П. Безручко, С. Б. Вениг.

— Саратов, 2009. — 25 с. — [Электронный ресурс]. – URL: http://elibrary.sgu.ru/uch_lit/111.pdf (дата обращения: 19.11.2024).

7. Сдобняков В. В. Изучение операционного усилителя и схем на его основе с использованием виртуальных приборов LabVIEW : практикум / В. В. Сдобняков, В. В. Карзанов, М. Г. Белянина, Л. С. Бовкун ; Нижегородский госуниверситет. — Нижний Новгород, 2012. — 45 с. — [Электронный ресурс]. – URL: http://www.unn.ru/books/met_files/OU_fin_crossword.pdf (дата обращения: 20.10.2024).

8. Трансформатор ТП-112 [Электронный ресурс] // Чип и Дип : [сайт]. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/961/DOC013961824.pdf> (дата обращения: 23.12.2025).

9. Трансформаторный (линейный) блок питания [Электронный ресурс] // ROTR : [сайт]. – URL: <https://www.rotr.info/electronics/practical/network/power/linear/index.htm> (дата обращения: 26.11.2024).

10. 140УД12 Datasheet [Электронный ресурс] // Альфа-Радио : [сайт]. – URL: <https://www.alfa-radio.ru/attachments/get/145/140ud1201.pdf> (дата обращения: 08.01.2025).

11. ATmega328P Datasheet [Электронный ресурс] // Microchip Technology : [сайт]. – URL: https://content.arduino.cc/assets/ATmega328P_Datasheet.pdf (дата обращения: 05.12.2024).

12. ESP32-WROOM-32 Datasheet [Электронный ресурс] // Espressif Systems : [сайт]. –URL: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf (дата обращения: 15.12.2024).

13. L7809CV Datasheet [Электронный ресурс] // STMicroelectronics : [сайт]. – URL: https://ruelectronics.com/files/Datasheet_L7809CV_HXY-726488c9305a5f9b72e352eaa31ac2bb.pdf (дата обращения: 27.02.2025).

14. LM346 Datasheet [Электронный ресурс] : документация на серию LM346 // Компэл : [сайт]. – URL: <https://www.compel.ru/pdf-items/st/ps/lm346/14ee6b12d96b273cbc0b8dd75aa2b157?ysclid=mc39h18pcm41665217> (дата обращения: 24.01.2025).

15. LM358 Datasheet [Электронный ресурс] : документация на серию LM358 // Компэл : [сайт]. – URL: <https://www.compel.ru/pdf-items/runic/ps/lm358/fbc6262b975879144bc233aff8225f4c?ysclid=mc398dauwl124414754> (дата обращения: 12.12.2024).

16. LM386 Low Voltage Audio Power Amplifier datasheet (Rev. C) [Электронный ресурс] // MIKROE : [сайт]. – URL: https://download.mikroe.com/documents/datasheets/LM386_datasheet.pdf (дата обращения: 25.01.2025).

17. LM4250 Programmable Operational Amplifier (Rev. A) [Электронный ресурс] // Электронные компоненты : [сайт]. – URL: <https://elsg.ru/pdf/lm4250.pdf> (дата обращения: 25.01.2025).

18. LM78xx / LM78xxA datasheet [Электронный ресурс] // Texas Instruments : [сайт]. – URL: <https://ece-classes.usc.edu/ee459/library/datasheets/LM7805.pdf> (дата обращения: 27.02.2025).

19. LM79xx / LM78xxA datasheet [Электронный ресурс] // Чип и Дип: [сайт]. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/261/DOC053261018.pdf> (дата обращения: 27.02.2025).

20. NE5534 - Single Low Noise Operational Amplifier [Электронный ресурс] // onsemi: [сайт]. – URL: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ne5534-d.pdf> (дата обращения: 27.01.2025).

21. OP07 Datasheet [Электронный ресурс] : документация на OP07 // Компэл : [сайт]. – URL: <https://www.compel.ru/item-pdf/ac43cdb5743a53cce3d94f1331971f2c/pn/ruimeng~op07.pdf> (дата обращения: 27.01.2025).

22. RP2040 Datasheet [Электронный ресурс] // Raspberry Pi Ltd : [сайт].
– URL: https://wiki.amperka.ru/_media/products/raspberry-pi-pico-w:rp2040-datasheet.pdf?ysclid=mc3azwlcnn314106002 (дата обращения: 19.02.20245).

23. STM32F401CC Datasheet [Электронный ресурс] // STMicroelectronics : [сайт]. – URL: <https://storage.googleapis.com/media.amperka.com/products/chip-stm32f401ccu6/media/stm32f401cc-datasheet.pdf?ysclid=mc3ay9ifko549953152> (дата обращения: 25.02.2025).

24. TL082 Datasheet [Электронный ресурс] : документация на серию TL082 // Компэл :[сайт]. – URL: <https://www.compel.ru/item-pdf/2353e741d89fb2e071ab92d6a4b13f09/ps/st~tl082.pdf> (дата обращения: 27.12.2025).

25. W06M Datasheet [Электронный ресурс] : Диодный мост 1.5А 600В // Чип и Дип : [сайт]. – URL: <https://static.chipdip.ru/lib/772/DOC059772541.pdf> (дата обращения: 27.01.2025).

Приложение А

Текст программы

```
#include <WiFi.h>
#include <AsyncTCP.h>
#include <ESPAsyncWebServer.h>
#include <driver/i2s.h>
#include <driver/adc.h>
#include "webpage.h"
#include <ArduinoJson.h>

/* ————— Wi-Fi ————— */
#define WIFI_SSID "NeOrite"
#define WIFI_PASS "Mariy2299"

/* ————— генератор ————— */
constexpr uint32_t LRCLK = 1'000'000;
constexpr uint32_t FS_DAC = LRCLK * 2;
constexpr uint16_t LUT_N = 256;

/* ————— осциллограф ————— */
constexpr uint16_t NPTS = 128; // было 256
constexpr uint32_t SCOPE_FS = 100'000; // 100 kSa/s

/* ————— глобальные ————— */
AsyncWebServer server(80);
AsyncWebSocket ws("/ws");

volatile float gFreq = 1000.0f, gAmp = 1.0f;
volatile bool gSquare = false, gRun = true;
```

Продолжение Приложения А

```
uint8_t sinLUT[LUT_N];
uint16_t buf1[NPTS], buf2[NPTS];
volatile bool frameReady = false;

/* ----- LUT ----- */
void buildLUT(){
    for(int i=0;i<LUT_N;i++)
        sinLUT[i] = 128 + int(127*sin(2*PI*i/LUT_N));
}

/* ----- DDS-task ----- */
void ddsTask(void*){
    i2s_config_t cfg{};
    cfg.mode = (i2s_mode_t)(I2S_MODE_MASTER | I2S_MODE_TX |
I2S_MODE_DAC_BUILT_IN);
    cfg.sample_rate = LRCLK;
    cfg.bits_per_sample = I2S_BITS_PER_SAMPLE_16BIT;
    cfg.channel_format = I2S_CHANNEL_FMT_ONLY_RIGHT;
    cfg.dma_buf_len  = 256; cfg.dma_buf_count = 8;
    i2s_driver_install(I2S_NUM_0,&cfg,0,nullptr);
    i2s_set_dac_mode(I2S_DAC_CHANNEL_RIGHT_EN);

    uint32_t phase=0, incr=0; float prevF=-1;
    uint16_t dma[256]; size_t wr;

    for(;;){

if(prevF!=gFreq){incr=(uint32_t)(gFreq*(double)UINT32_MAX/FS_DAC);prevF
=gFreq;}
```

Продолжение Приложения А

```
if(!gRun){vTaskDelay(10);continue;}

bool sq=gSquare; float A=gAmp;
for(int i=0;i<256;i++){
    phase+=incr; uint8_t idx=phase>>24;
    uint8_t smp=sq? (idx<128?128+uint8_t(127*A):128-uint8_t(127*A))
        : 128+int((sinLUT[idx]-128)*A);
    dma[i]=smp<<8;
}
i2s_write(I2S_NUM_0,dma,sizeof(dma),&wr,portMAX_DELAY);
}
}
/* ----- sampling-task ----- */
void scopeTask(void*){
    adc1_config_width(ADC_WIDTH_BIT_12);
    adc1_config_channel_atten(ADC1_CHANNEL_6,ADC_ATTEN_DB_11);
    adc1_config_channel_atten(ADC1_CHANNEL_7,ADC_ATTEN_DB_11);

    uint32_t t=micros(); int i=0;
    for(;;){
        if(micros()-t >= 10){ // 100 kSa/s → 10 μs между точками
            t+=10;
            buf1[i]=adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_6);
            buf2[i]=adc1_get_raw(ADC1_CHANNEL_7);
            if(++i==NPTS){i=0;frameReady=true;}
        }
        vTaskDelay(1);
    }
}
```

Продолжение Приложения А

```
/* ----- Wi-Fi ----- */
void wifiStart(){
    WiFi.mode(WIFI_STA);
    WiFi.begin(WIFI_SSID,WIFI_PASS);
    for(int i=0;i<60 && WiFi.status()!=WL_CONNECTED;i++) delay(100);
    if(WiFi.status()!=WL_CONNECTED){
        WiFi.softAP("ESP32_CFG","12345678");
        Serial.println("AP: 192.168.4.1");
    }else Serial.println(WiFi.localIP());
}

/* ----- HTTP + WS ----- */
void onWS(AsyncWebSocket*,AsyncWebSocketClient* c,AwsEventType
t,void*,uint8_t*,size_t){
    if(t==WS_EVT_CONNECT){
        Serial.println("WS client");
        // можно отправить «hello»
    }
}

void httpSetup(){
    ws.onEvent(onWS); server.addHandler(&ws);
    server.on("/",HTTP_GET,[](auto*r){r-
>send_P(200,"text/html",PAGE_HTML);});
    server.on("/ctrl",HTTP_GET,[](auto*r){
        if(r->hasParam("freq"))gFreq=r->getParam("freq")->value().toFloat();
        if(r->hasParam("amp" ))gAmp =r->getParam("amp" )->value().toFloat();
        if(r->hasParam("wave"))gSquare=r->getParam("wave")->value()=="1";
        if(r->hasParam("run" ))gRun =r->getParam("run" )->value()=="1";
        r->send(200,"text/plain","OK");
    });
}
```

Продолжение Приложения А

```
server.begin();
}

/* ----- setup & loop ----- */
void setup(){
  Serial.begin(115200);
  buildLUT(); wifiStart(); httpSetup();
  xTaskCreatePinnedToCore(ddsTask,"DDS",4096,nullptr,1,nullptr,1);
  xTaskCreatePinnedToCore(scopeTask,"SCOPE",4096,nullptr,1,nullptr,0);
}

void loop(){
  if(frameReady){
    frameReady=false;
    DynamicJsonDocument doc(2048);
    doc["type"]="frame";
    JsonArray a1=doc.createNestedArray("ch1");
    JsonArray a2=doc.createNestedArray("ch2");
    for(int i=0;i<NPTS;i++){a1.add(buf1[i]);a2.add(buf2[i]);}
    String pkt; serializeJson(doc,pkt);
    ws.textAll(pkt);          // PUSH!
  }
  ws.cleanupClients();
  delay(1);
}
```

Приложение Б

Программная реализация веб-интерфейса

```
#pragma once
const char PAGE_HTML[] PROGMEM = R"HTML(
<!DOCTYPE html>
<html lang="en">
<head>
  <meta charset="UTF-8">
  <meta name="viewport" content="width=device-width,initial-scale=1">
  <title>ESP32 Pro Oscilloscope & Generator</title>
  <link
href="https://cdn.jsdelivr.net/npm/bootstrap@5.3.3/dist/css/bootstrap.min.css"
rel="stylesheet">
  <script
src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/chart.js@4.4.1/dist/chart.umd.min.js"></script>
  <script src="https://cdn.jsdelivr.net/npm/chartjs-plugin-zoom@2.0.1/dist/chartjs-
plugin-zoom.umd.min.js"></script>
  <style>
    body {background:#121212;color:#eaeaea;font-family:sans-serif;}
    .card {background:#1f1f1f;border-radius:0.7rem;}
    canvas {height:250px !important;}
    .btn-run{background:#27ae60;color:white;border:none;}
    .btn-stop{background:#e74c3c;color:white;border:none;}
    .active-btn{box-shadow:0 0 10px #fff;}
    input[type=range] {accent-color:#27ae60;}
    .toggle-label {margin-left:.5rem;}
    .toggle-input:checked + .toggle-label {color:#27ae60;}
    .info-box {background:#000;color:#0f0;padding:.3rem .6rem;border-
radius:.4rem;font-family:monospace;}
  </style>
```

Продолжение Приложения Б

```
</head>
<body class="p-3">
  <nav class="navbar navbar-dark mb-3" style="background:#1f1f1f;">
    <div class="container-fluid">
      <span class="navbar-brand">ESP32 Pro Oscilloscope & Generator</span>
      <span class="badge bg-success">Connected</span>
    </div>
  </nav>

  <div class="container-fluid">
    <div class="row g-3">
      <!-- Oscilloscope -->
      <div class="col-lg-8">
        <div class="card p-3">
          <h5>Oscilloscope</h5>
          <canvas id="scopeChart"></canvas>
          <div class="d-flex justify-content-between mt-2 small">
            <div>CH1 Vpp: <span class="info-box" id="vpp1">--</span> V</div>
            <div>CH2 Vpp: <span class="info-box" id="vpp2">--</span> V</div>
          </div>
          <div class="form-check form-switch mt-3">
            <input class="form-check-input toggle-input" type="checkbox"
id="ch1Toggle" checked>
            <label class="form-check-label toggle-label" for="ch1Toggle">Channel
1</label>
          </div>
          <div class="form-check form-switch">
            <input class="form-check-input toggle-input" type="checkbox"
id="ch2Toggle" checked>
```


Продолжение Приложения Б

```
<label class="form-check-label toggle-label" for="ch2Toggle">Channel
2</label>

</div>

<label class="mt-3">Timebase: <span id="tbVal">1</span>Γ—</label>

<input type="range" class="form-range" id="timebase" min="1" max="8"
value="1">

</div>

</div>

<!-- Generator -->

<div class="col-lg-4">

  <div class="card p-3">

    <h5>Signal Generator</h5>

    <label>Frequency: <span class="info-box" id="fVal">1000</span>
Hz</label>

    <input type="range" class="form-range" id="freq" min="1" max="50000"
value="1000">

    <label class="mt-3">Amplitude: <span class="info-box"
id="aVal">1.00</span> V</label>

    <input type="range" class="form-range" id="amp" min="0" max="100"
value="100">

    <label class="mt-3">Waveform:</label>

    <select class="form-select" id="wave">

      <option value="0">Sine</option>

      <option value="1">Square</option>

    </select>
```

Продолжение Приложения Б

```
<div class="mt-3">
  <button id="btnRun" class="btn btn-run active-btn">Run</button>
  <button id="btnStop" class="btn btn-stop">Stop</button>
</div>
</div>
</div>
</div>
</div>

<script>
  const
freq=document.getElementById('freq'),amp=document.getElementById('amp'),

fVal=document.getElementById('fVal'),aVal=document.getElementById('aVal'),

btnRun=document.getElementById('btnRun'),btnStop=document.getElementById(
'btnStop'),

ch1Toggle=document.getElementById('ch1Toggle'),ch2Toggle=document.getEle
mentById('ch2Toggle'),

timebase=document.getElementById('timebase'),tbVal=document.getElementById
('tbVal');

freq.oninput=e=>fVal.textContent=e.target.value;
amp.oninput=e=>aVal.textContent=(e.target.value/100).toFixed(2);

btnRun.onclick=()=>setRun(true);
btnStop.onclick=()=>setRun(false);
```

Продолжение Приложения Б

```
function setRun(run){
  btnRun.classList.toggle('active-btn',run);
  btnStop.classList.toggle('active-btn',!run);

  fetch(`/ctrl?run=${run?1:0}&freq=${freq.value}&amp=${amp.value/100}&wave
=${wave.value}`);
}

const ctx=document.getElementById('scopeChart').getContext('2d');
const chart=new Chart(ctx,{
  type:'line',
  data:{
    labels:Array.from({length:128},(_i)=>i),
    datasets:[
      {borderColor:'#27ae60',data:[],borderWidth:1.2,pointRadius:0},
      {borderColor:'#e74c3c',data:[],borderWidth:1.2,pointRadius:0}
    ]
  },
  options:{
    animation:false,scales:{y:{min:0,max:4095}},
    plugins:{legend:{display:false},zoom:{zoom:{wheel:true},pan:{enabled:true}}}}
});

ch1Toggle.onChange=()=>{chart.setDatasetVisibility(0,ch1Toggle.checked);chart.
update();};
```



```
ch1Toggle.onChange=()=>{chart.setDatasetVisibility(0,ch1Toggle.checked);chart.
update();};
```

Продолжение Приложения Б

```
ch2Toggle.onchange=()=>{chart.setDatasetVisibility(1,ch2Toggle.checked);chart.  
update();};
```

```
timebase.oninput=()=>{  
  tbVal.textContent=timebase.value;  
  chart.options.scales.x.max=128/timebase.value;  
  chart.update();  
};
```

```
const ws=new WebSocket(`ws://${location.host}/ws`);  
ws.onmessage=evt=>{  
  const d=JSON.parse(evt.data);  
  if(d.type==='frame'){  
    chart.data.datasets[0].data=d.ch1;  
    chart.data.datasets[1].data=d.ch2;  
    chart.update();  
    document.getElementById('vpp1').textContent=((Math.max(...d.ch1)-  
Math.min(...d.ch1))*3.3/4095).toFixed(2);  
    document.getElementById('vpp2').textContent=((Math.max(...d.ch2)-  
Math.min(...d.ch2))*3.3/4095).toFixed(2);  
  }  
};  
</script>  
</body>  
</html>  
)HTML";
```