

Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций
Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»
(СибГУТИ)

Кафедра _____ ТЭ
Допустить к защите
зав. кафедрой
_____/А.Н. Игнатов/
(подпись) (Ф.И.О.)

**ВЫПУСКНАЯ
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА**

РАЗРАБОТКА ЭЛЕКТРОННО-МУЗЫКАЛЬНОГО УСТРОЙСТВА

Пояснительная записка

ИТКП.

Студент _____ / М.В.Суворов /
(подпись) (Ф.И.О.)

Институт телекоммуникаций Группа ТЭН-21

Руководитель _____ / А.А.Шабронов /
(подпись) (Ф.И.О.)

Консультант: – по экономической части
_____/ А.А.Шабронов /
(подпись) (Ф.И.О.)

Новосибирск 2026 г.

Инва. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Инва. № дубл.	Подп. и дата

Министерство цифрового развития, связи и массовых коммуникаций
Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»
(СибГУТИ)

КАФЕДРА

ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

ЗАДАНИЕ НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ БАКАЛАВРА

СТУДЕНТА Суворова М.В. ГРУППЫ ТЭН-21

УТВЕРЖДАЮ

« ____ » _____ 20__ г.

Зав. кафедрой

_____ / А.Н. Игнатов /

Новосибирск 2026 г.

1. Тема выпускной квалификационной работы бакалавра

Разработка электронно-музыкального устройства

утверждена приказом СибГУТИ от «___» ___ 20__ г. № ___

2.Срок сдачи студентом законченной работы « ___ » ___ 20__ г.

3.Исходные данные к работе

Тип устройства	аналоговое электронно-музыкальное устройство
Принцип управления	бесконтактное емкостное управление высотой звука
Генераторный узел	два RC-генератора на 74HC14D
Смесительный узел	двойной балансный смеситель SA612A
Узел усиления	аудиотракт на операционном усилителе TL074C
Питание устройства	USB Type-C, +5 В; повышающее питание +9 В
Выходной интерфейс	аудиовыход jack 3,5 мм
Результат разработки	макетный образец устройства
Условия эксплуатации	лабораторные, демонстрационные

4.Содержание пояснительной записки (перечень подлежащих разработке вопросов)	Сроки выполнения по разделам
Введение	30.01.2026
Аналитический обзор и выбор варианта построения устройства	10.02.2026
Разработка структурной и принципиальной электрической схем	15.02.2026
Расчётная часть	15.03.2026
Конструкторская часть	15.04.2026
Практическая и экспериментальная часть	15.05.2026
Технико-экономическое обоснование, заключение и презентация	15.05.2026

Дата выдачи задания «___» _____ 20__ г.

Руководитель _____
подпись

Задание принял к исполнению «___» _____ 20__ г.

Студент _____
подпись

АННОТАЦИЯ

Выпускная квалификационная работа _____ Суворов М.В.
(Фамилия,И.О.)
по теме «Разработка электронно-музыкального устройства» _____

Объём работы – страницы, на которых размещены рисунки и таблицы. При написании работы использовались источники

Ключевые слова:

Терменвокс, электронно-музыкальное устройство, аналоговая схемотехника, гетеродинный принцип, емкостное управление.

Работа выполнена ФГБОУ ВО «СибГУТИ»
(название предприятия, подразделения)

Руководитель:
Шабронов А.А.

Целью работы являлось:

Разработка аналогового электронно-музыкального устройства «Терменвокс» с бесконтактным управлением высотой звука. В рамках работы предусматривается разработка структурной и принципиальной электрической схем, выбор элементной базы, расчет основных узлов, сборка и экспериментальная проверка макетного образца устройства.

Основные результаты:

Разработано электронно-музыкальное устройство «Терменвокс» ИТКП. Выполнен выбор элементной базы, разработаны генераторный, смесительный, фильтрующий, усилительный и питающий узлы. Изготовлен макетный образец устройства, подтверждена возможность бесконтактного изменения высоты звука.

ANNOTATION

Final qualifying work _____ Suvorov M.V.

(Фамилия,И.О.)

on topic: «Development of an electronic musical device “Theremin”»

Scope of work - 44 pages, on which are placed 22 picture and 18 tables. When writing the work, 6 sources were used.

Keywords:

Theremin, electronic musical device, analog circuitry, heterodyne principle, capacitive control.

The work is done Siberian State University of Telecommunications and Informatics, Department of Technical Electronics

(name of the company, division)

Scientific supervisor – Shabronov A.A.

The goal/subject of the paper is

Development of an analog electronic musical device “Theremin” with contactless pitch control. The work includes development of structural and electrical schematic diagrams, selection of the component base, calculation of the main functional units, assembly and experimental verification of the prototype.

Results:

The ИТКП. electronic musical device “Theremin” has been developed. The oscillator, mixer, filtering, audio amplification and power supply units have been implemented. A prototype has been manufactured and the possibility of contactless pitch control has been confirmed.

Уровень сформированности компетенций у студента
Суворова М.В.

Компетенции		Уровень сформированности компетенций		
		высокий	средний	низкий
1		2	3	4
Универсальные компетенции	УК-1 – способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач			
	УК-2 – способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений			
	УК-3 – способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде			
	УК-4 – способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(ых) языке(ах)			
	УК-5 – способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом, философском контекстах			
	УК-6 – способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни			
	УК-7 – способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности			
	УК-8 – способен создавать и поддерживать в повседневной жизни и в профессиональной деятельности безопасные условия жизнедеятельности для сохранения природной среды, обеспечения устойчивого развития общества, в том числе при угрозе и возникновении чрезвычайных ситуаций и военных конфликтов			
	УК-9 – способен принимать обоснованные экономические решения в различных областях жизнедеятельности			

	УК-10 – способен формировать нетерпимое отношение к проявлениям экстремизма, терроризма, коррупционному поведению и противодействовать им в профессиональной деятельности			
Общепрофессиональные компетенции	ОПК-1 – способен использовать положения, законы и методы естественных наук и математики для решения задач инженерной деятельности			
	ОПК-2 – способен самостоятельно проводить экспериментальные исследования и использовать основные приемы обработки и представления полученных данных			
	ОПК-3 – владеет методами поиска, хранения, обработки, анализа и представления в требуемом формате информации из различных источников и баз данных, соблюдая при этом основные требования информационной безопасности			
	ОПК-4 – способен применять современные компьютерные технологии для подготовки текстовой и конструкторско-технологической документации с учетом требований нормативной документации			
	ОПК-5 – способен разрабатывать алгоритмы и компьютерные программы, пригодные для практического применения			
Профессиональные компетенции	ПК-1 – способен к разработке и созданию квантово-оптических систем для решения задач навигации, связи и контроля пространства			
	ПК-2 – способен осуществлять разработку комплекта рабочей конструкторской документации на изделия "системы в корпусе"			

Руководитель выпускной квалификационной работы бакалавра
 Доцент кафедры ТЭ _____ /А.А.Шабронов/
 « ___ » июня 2026 г.

1 Введение

Электронные музыкальные инструменты являются отдельным направлением прикладной электроники, в котором электрический сигнал становится носителем музыкальной информации. В таких устройствах важны не только параметры усиления или частотной обработки, но и способ взаимодействия исполнителя с музыкальным инструментом. Терменвокс занимает в этой группе особое место, поскольку способ управления им осуществляется довольно непривычным и экзотическим способом. Высота и громкости звука в классическом варианте осуществляется без механического контакта с исполнительными органами.

Принцип работы терменвокса основан на изменении параметров электрического поля около антенны. Рука исполнителя образует вблизи с антенной малую емкость, которая изменяется при перемещении руки в пространстве. Эта емкость включается в частото задающую цепь генератора, поэтому перемещение руки приводит к изменению частоты одного из высокочастотных генераторов. После смещения этого сигнала с сигналом опорного генератора получается разностная составляющая, лежащая в слышимом диапазоне.

Актуальность разработки связана с тем, что аналоговый терменвокс позволяет наглядно рассмотреть несколько базовых процессов электронной техники: автогенерацию, влияние паразитных емкостей, смещение сигналов, их фильтрацию, усиление и согласование аудиовыхода с внешней акустической системой, что так же позволяет оценить уровень теоретической и практической подготовки студента. В отличие от цифрового синтезатора, аналоговая схема сохраняет прямую физическую связь между параметрами элементов и воспринимаемым звуком. Это делает устройство удобным объектом как для учебного проектирования и отображения навыков и знаний, так и для экспериментальной отладки.

В рамках данной выпускной квалификационной работы разрабатывается не копия исторического прибора, а современный прототип аналогового музыкального устройства, построенный на современной, доступной и удобной элементной базе. Такой подход позволяет уменьшить габариты устройства, повысить безопасность и упростить сборку макета без отказа от гетеродинного принципа работы.

Цель работы – разработать аналоговое музыкальное устройство типа «терменвокс», обеспечивающее бесконтактное управление высотой звука и вывод аудиосигнала на внешнюю акустическую систему.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи: провести аналитический обзор принципа действия терменвокса; рассмотреть историческую и современную структуру устройства; обосновать выбор гетеродинного принципа формирования звука; выбрать современную и доступную элементную базу; разработать функциональную структуру устройства; выполнить расчет основных узлов; изготовить прототип и провести экспериментальную проверку его работоспособности.

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

ИТКП.

Лист

3

Объектом разработки является аналоговое музыкальное устройство с бесконтактным управлением высотой звука. Предметом разработки являются схемотехнические решения генераторного, смесительного, фильтрующего, усилительного и питающего узлов терменвокса.

Практическая значимость работы заключается в создании действующего прототипа, который может использоваться как демонстрационный образец для изучения аналоговой обработки сигналов, а также отражения практических навыков студента. Конструктивно устройство ориентированно на дальнейшую доработку: улучшение стабильности генераторов, снижение шумов питания и возможную реализацию отдельного канала управления громкостью за счет введения в схему и реализации второй выносной антенны.

2. Аналитический обзор и обоснование структуры аналогового музыкального устройства «Терменвокс»

2.1 Исторические предпосылки разработки терменвокса

Терменвокс относится к числу первых электронных музыкальных инструментов. Его изобретение связано с работами Л. С. Термена, который в начале 1920-х годов занимался высокочастотными измерительными установками и устройствами, чувствительными к изменению электрического поля. В результате было обнаружено, что положение руки человека около проводящего электрода может заметно влиять на частоту генератора. Именно этот физический эффект был использован не только как измерительный, но и как музыкальный.

Согласно справочным материалам Encyclopaedia Britannica, терменвокс был изобретен в 1920 году в Советском Союзе Л. С. Терменом; звучание прибора формируется за счет двух высокочастотных колебаний, разность частот которых попадает в слышимую область [1]. В патенте US1661058A описан музыкальный инструмент, содержащий электрический генератор, электрод для изменения резонансной частоты под действием движения руки, второй генератор для получения биений, детекторную систему и звуковоспроизводящее устройство [2]. Это описание фактически задает базовую структуру терменвокса, которая используется и в современных приборах.

Исторические схемы терменвокса выполнялись на электровакуумных лампах и использовали LC-контуры. Такой подход был естественным для радиоэлектроники 1920-1930-х годов: лампы выполняли функции генераторов, детекторов и усилителей, а колебательные контуры задавали частоты. Серийным известным образцом стал RCA Thermin, выпущенный в конце 1920-х годов. Для изучения исторической схемы можно использовать сервисную документацию RCA Thermin Service Notes, где приведены оригинальные и восстановленные схемы прибора [3].

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

					ИТКП.	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		4

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата

Инд. № подл.

Подп. и дата

Взам. инв. №

Инд. № дубл.

Подп. и дата

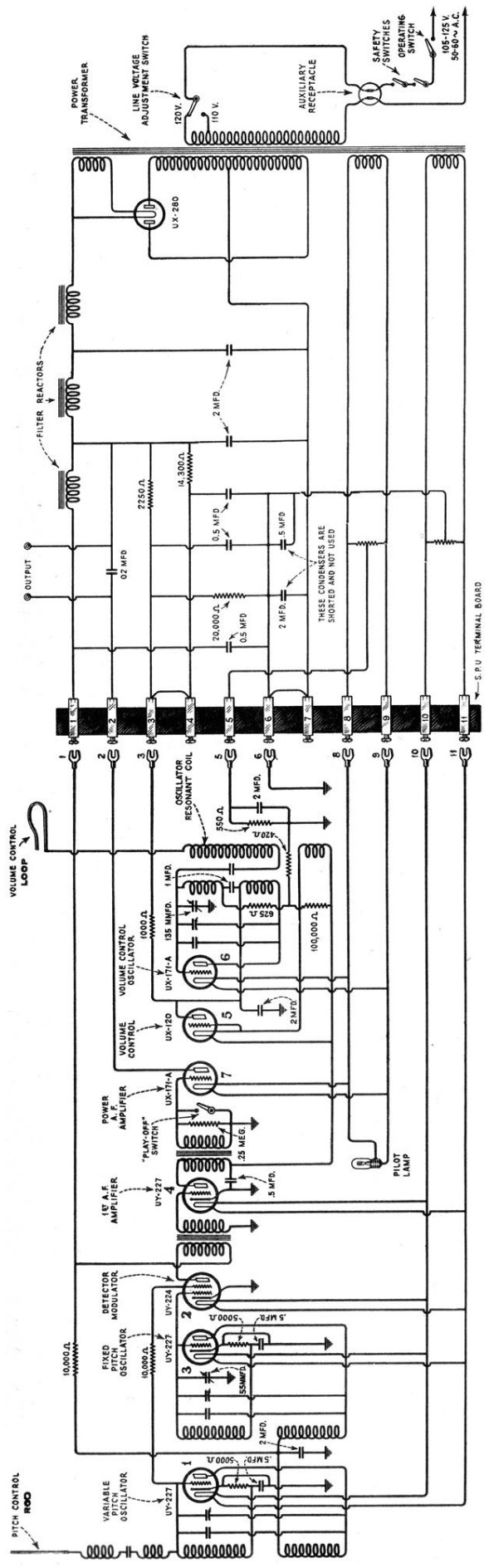


Рисунок 2.1 – Оригинальная схема RCA Theremin

ИТКП.

Для настоящей работы историческая схема имеет методическое значение. Она показывает, что ключевой принцип терменвокса не зависит от конкретной элементной базы: требуется управляемый генератор, опорный генератор, узел смещения, фильтрация и усиление. Поэтому при переходе от ламповой схемы к современной интегральной элементной базе сохраняется функциональная логика устройства, но изменяются способы реализации отдельных узлов.

2.2 Физический принцип бесконтактного управления высотой звука

Основой работы терменвокса является емкостное влияние руки исполнителя на антенный узел. Антенна не используется как радиопередающая система в обычном смысле. В данной схеме она является одной обкладкой малой паразитной емкости, второй обкладкой которой выступает рука и тело человека. При приближении руки эквивалентная емкость возрастает, а при удалении уменьшается.

Если эта емкость входит в частотообразующую цепь генератора, изменение положения руки приводит к изменению частоты колебаний. В классическом LC-варианте частота определяется индуктивностью и суммарной емкостью контура. В выбранном для прототипа RC-варианте изменение антенной емкости влияет на время заряда и разряда входного узла инвертора с триггером Шмидта. Несмотря на различие схемотехнической реализации, физический смысл остается одинаковым: электрическое поле около антенны преобразуется в изменение частоты.

Непосредственно воспроизвести высокочастотный сигнал генератора нельзя, поскольку его частоты выше слышимого диапазона частот. Поэтому используется гетеродинный принцип. Два генератора работают на близких частотах. При смешении сигналов формируются составляющие суммы и разности частот. Суммарная составляющая остается в высокочастотной области и остается не слышимой, но для чистоты сигнала, подавляется фильтром, а разностная составляющая попадает в аудиодиапазон и воспринимается как музыкальный тон.

Для устойчивого восприятия высоты звука важно, чтобы начальная разность частот двух генераторов была небольшой и попадала в область примерно от сотен герц до нескольких килогерц. Если разность частот слишком мала, становятся заметны дрейф, шумы и нестабильность. Если она слишком велика, тон выходит за удобный музыкальный диапазон. Поэтому настройка генераторов является одним из основных этапов отладки устройства.

2.3 Функциональная структура классического терменвокса

Классическая структура терменвокса включает два независимых канала управления: канал высоты звука и канал громкости. Канал высоты формирует звуковую частоту методом биений. Канал громкости управляет амплитудой

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ИТКП.	Лист
						6

аудиосигнала, обычно, также через емкостное влияние руки на отдельную антенну. Обобщенная структура прибора приведена на рисунке 1.2.



Рисунок 2.2 - Обобщенная структура классического терменвокса

В исторических схемах оба канала часто часто выполнялись на ламповых генераторах и детекторных каскадах. В канале высоты один генератор был связан с вертикальной антенной, а второй являлся опорным. После смешения сигналов выделялась частота биений. В канале громкости отдельная антенна влияла на другой высокочастотный тракт, который управлял усилением или запирианием выходного каскада.

Такое решение обеспечивает выразительное исполнительское управление, но усложняет проектирование и настройку. Для полноценной антенны громкости требуется отдельный генератор, выпрямитель или детектор уровня, фильтр управляющего напряжения и управляемый усилительный элемент. Поэтому в разрабатываемом прототипе основной задачей является надежная реализация канала высоты звука, а регулировка громкости временно выполняется ручной регулировкой - потенциометром. Фактически, этот способ управления каналом громкости не противоречит оригинальной схеме, даже, в некотором смысле, упрощает его органы управления. Это не изменяет гетеродинный принцип работы и позволяет сосредоточиться на наиболее важной части прибора.

2.4 Анализ схемотехнических вариантов реализации генераторного узла

Генераторный узел является наиболее чувствительной частью терменвокса. От его стабильности зависит как устойчивость нулевой настройки, так и плавность изменения высоты звука. Для проектирования можно рассматривать несколько вариантов: LC-генераторы, RC-генераторы на операционных усилителях, RC-генераторы на логических элементах с триггером Шмитта, а также цифровые генераторы с программным управлением.

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

ИТКП.

Лист

7

LC-генераторы ближе к классической реализации терменвокса. Их преимуществом является более синусоидальная форма сигнала и высокая чувствительность к малым изменениям емкости. Так же они позволяют гасить ближние гармоники к опорной, слышимой частоте, что обеспечивает чистоту звука. Недостатками являются необходимость подбора катушек индуктивности, влияние добротности контура, требования к экранировке и более трудоемкая настройка. Для учебного прототипа такие генераторы могут дать лучший тембр, но увеличивают риск затягивания этапа отладки.

RC-генератор на инверторе 74НС14, используемом в макете, проще в сборке. Входы микросхемы имеют гистерезис, поэтому медленное изменение напряжения на конденсаторе преобразуется в устойчивые фронты прямоугольного сигнала. Частота определяется номиналами резисторов и конденсаторов, а также порогами переключения микросхемы. Такое решение хорошо подходит для макетного прототипа, поскольку быстро запускается и легко контролируется осциллографом, а также прекрасно отражает принцип работы устройства.

Недостатком генераторов на 74НС14 является прямоугольная форма сигнала. Она содержит большое число гармоник, часть которых после смещения может попадать в слышимый диапазон и ухудшать чистоту тембра. Поэтому в схеме предусмотрены RC-цепи сглаживания перед смесителем, а в качестве дальнейшего направления доработки можно рассматривать переход к LC-генераторам или введение полосовых фильтров на частоте генерации.

2.5 Обоснование выбора современной элементной базы

При выборе элементной базы учитывались доступность компонентов, возможность ручного монтажа, работа от низковольтного питания и возможность проверки устройства простыми измерительными средствами. Разрабатываемый макет не требует высоковольтных цепей, поэтому использование ламповой схемотехники признано нецелесообразным: она увеличивает габариты, потребляемую мощность, цену и требования к безопасности.

Микросхема 74НС14 выбрана для генераторного узла, поскольку содержит шесть инверторов с триггером Шмитта. В документации Nexperia отмечается, что такие входы преобразуют медленно изменяющиеся сигналы в четко определенные выходные уровни [4]. Это свойство полезно для построения простых RC-автогенераторов, где напряжение на конденсаторе изменяется плавно.

Смеситель SA612A выбран как специализированная микросхема для образования частоты. Согласно описанию, SA612A представляет собой мало мощный VHF-смеситель с ячейкой Гильберта и встроенным генераторным узлом; микросхема предназначена для недорогих малопотребляющих систем связи. В данной работе встроенный генератор не используется, но балансный смеситель подходит для получения разностной звуковой составляющей между двумя внешними генераторами.

Для аудио тракта применена микросхема TL074С. Она содержит четыре операционных усилителя с JFET-входами, что удобно при работе с высокоомными цепями и сигналами малой амплитуды. В документации на TL074

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Изн. № дубл.	Подп. и дата

					ИТКП.	Лист 8
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		

TL074С, регулятор громкости и выходной разъем jack 3,5 мм. Структурная схема разрабатываемого прототипа приведена на рисунке 2.3.

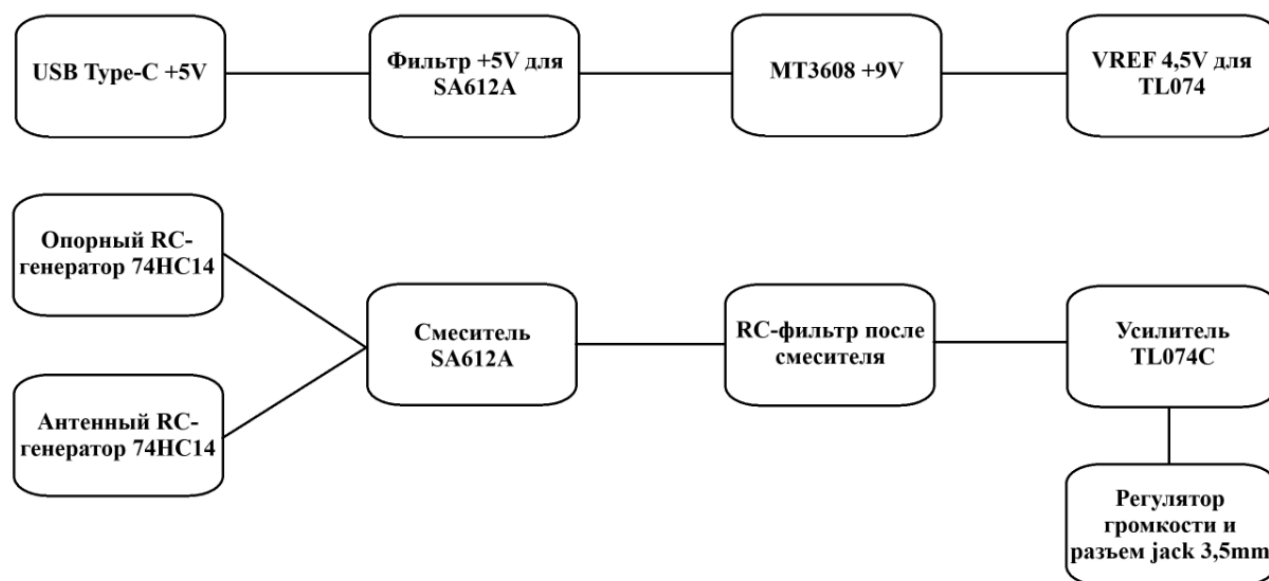


Рисунок 1.3 - Структурная схема разрабатываемого прототипа терменвокса

Опорный генератор формирует относительно стабильную частоту около 60 кГц. Антенный генератор работает в близком диапазоне, но его частота изменяется при приближении руки к антенне. Разность частот этих генераторов определяет высоту слышимого тона.

На входы смесителя SA612A поступают два высокочастотных сигнала. После перемножения на выходе смесителя появляются составляющие суммы и разности частот, а также продукты, вызванные несинусоидальной формой входных сигналов. Для подавления высокочастотных остатков после смесителя установлен RC-фильтр. Далее сигнал усиливается на TL074C и через разделительный конденсатор подается на регулятор громкости и аудиоразъем.

Питание разделено по функциональному назначению. Цифровые генераторы и смеситель питаются от +5 В, но для смесителя предусмотрена отдельная фильтрованная шина +5VFILTER. Аудиотракт питается от повышенного напряжения +9 В, что увеличивает допустимую амплитуду сигнала на выходе операционного усилителя. Для работы TL074C от однополярного питания формируется виртуальная средняя точка VREF около 4,5 В.

2.7 Требования к разрабатываемому прототипу

Перед разработкой принципиальной схемы сформированы требования, учитывающие как функциональное назначение прибора, так и реальные ограничения макетной сборки. Требования приведены в таблице 2.2.

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

ИТКП.

Лист

10

Таблица 2.2 – Основные требования к прототипу терменвокса

Параметр	Требование	Обоснование
Принцип формирования звука	Гетеродинный на основе двух близлежащих частот	Соответствует классическому принципу терменвокса
Управление высотой	Бесконтактное, через антенну	Позволяет реализовывать основной исполнительский эффект прибора
Диапазон генераторов	От сотен до пары тысяч килогерц	Удобство наблюдения измерительными приборами и получения слышимой разности частот
Смеситель	Аналоговый, без цифровой обработки	Сохраняет аналоговый характер и работу устройства
Выход	AUX, jack 3,5mm, моносигнал в оба канала	Совместимость с активными колонками, бытовыми акустическими системами для удобства пользования.
Питание	USB Type-C	Удобство использования исполнителя, разработчика
Регулировка громкости	Ручная, потенциометром	Упрощение схемотехники прототипа, упрощение органов управления

3 Расчетная часть по узлам аналогового терменвокса

В данном разделе приведены расчетные соотношения и инженерные обоснования номиналов элементов макетного аналогового терменвокса. Расчет выполнен по функциональным узлам: вход питания Type-C, фильтры питания +5 В и +9 В, источник средней точки +4,5 В, генераторы на микросхеме 74НС14, смеситель SA612А, фильтр аудиосигнала, усилитель на TL074С и выходной разъем jack 3,5 мм.

Расчеты ориентированы на фактическую схему устройства. Обозначения элементов в формулах соответствуют обозначениям на приведенных фрагментах схемы. Если параметр зависит от конкретного экземпляра микросхемы или условий измерения в расчете указана инженерная оценка.

3.1 Расчет узла питания Type-C

На рисунке 3.1 показан входной узел питания от разъема Type-C. Линия VBUS используется как вход +5 В. Резисторы R14 и R15 подключены к линиям CC1 и CC2 и задают режим подключения источника питания.

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изн. № подл.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
--------------	------	----------	-------	------

ИТКП.

Лист

11

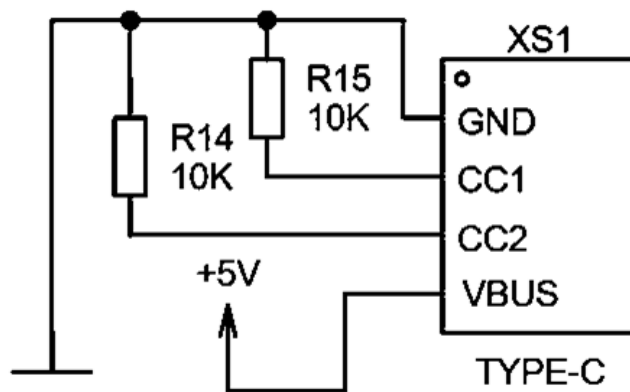


Рисунок 3.1 – Узел питания Type-C

Ток через резистор R14 рассчитывается законом Ома:

$$I = \frac{U}{R}, \quad (3.1)$$

$$I_{R14} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{14}} = \frac{5}{10000} = 0,0005 \text{ A} = 0,5 \text{ mA.}, \quad (3.2)$$

Аналогично для резистора R15:

$$I_{R15} = \frac{U_{\text{пит}}}{R_{15}} = \frac{5}{10000} = 0,0005 \text{ A} = 0,5 \text{ mA.}, \quad (3.3)$$

Суммарный ток, потребляемый резисторами R14 и R15 от входной линии +5 В, равен:

$$I_{CC} = I_{R14} + I_{R15} = 0,5 + 0,5 = 1,0 \text{ mA.}, \quad (3.4)$$

Мощность, рассеиваемая на каждом из резисторов R14 и R15 рассчитывается по формуле:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (3.5)$$

$$P_{R14} = P_{R15} = \frac{U_{\text{пит}}^2}{R} = \frac{5^2}{10000} = 0,0025 \text{ Вт} = 2,5 \text{ мВт.}, \quad (3.6)$$

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Изнв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Изнв. № дубл.	Подп. и дата

где U_{R16} – падение напряжения на резисторе R16, В;
 I_{SA612} – ток потребления микросхемы SA612, А;
 R_{16} – сопротивление резистора фильтра, Ом.

При типовом токе потребления микросхемы SA612 около 2,4 мА падение напряжения на R_{16} составит

$$U_{R16} = 2,4 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 0,024 \text{ В.}, \quad (3.12)$$

Даже при увеличении тока потребления до 3 мА падение напряжения будет равно:

$$U_{R16} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 0,03 \text{ В.}, \quad (3.13)$$

Тогда напряжение питания смесителя после фильтра при типовом токе потребления составит

$$U_{+5VFILTER} = 5 - 0,024 = 4,976 \text{ В.}, \quad (3.14)$$

Таким образом, падение напряжения на R_{16} является незначительным и не влияет на работоспособность SA612. При этом резистор R16 совместно с конденсаторами C17, C18, C19 обеспечивает локальную развязку цепи питания смесителя от помех общей шины +5 В. Выбранные номиналы являются обоснованными для питания микросхемы SA612 в составе аналогового музыкального устройства.

3.3 Расчет фильтра питания линии +9В и входного тока преобразователя

Узел формирования и фильтрации шины +9 В показан на рисунке 3.3 Повышающий преобразователь MT3608 формирует напряжение +9 В из входных +5 В. Конденсатор C₂₀ установлен на выходе модуля до дополнительного фильтра, а R₁₇, C₂₁ и C₂₂ образуют дополнительный фильтр питания аналоговой части.

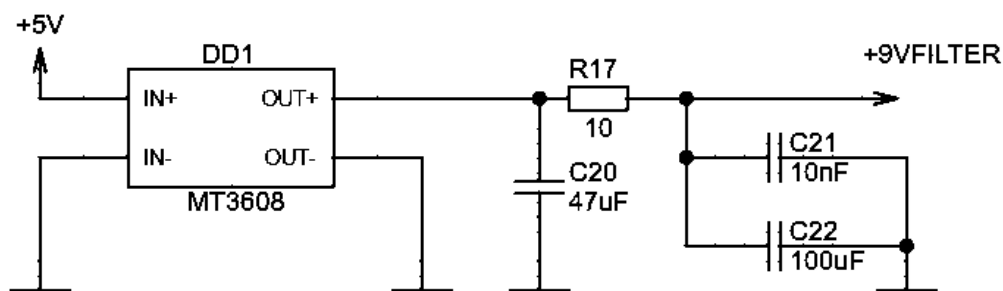


Рисунок 3.3 – Фильтрация линии +9 В

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Ивн. № подл.				
Подп. и дата				
Взам. инв. №				
Ивн. № дубл.				
Подп. и дата				

Итоговый ток, потребляемый устройством от входной линии +5 В, складывается из тока узлов +5 В и входного тока преобразователя:

$$I_{TOTAL} = I_5 + I_{IN} = 6,5 + 12,8 = 19,3 \text{ мА.}, \quad (3.22)$$

С учетом разброса параметров микросхем, нагрузки выхода и потерь преобразователя расчетное потребление макета целесообразно принимать с запасом 22 – 40 мА.

3.4 Расчет источника опорного напряжения +4,5 В

Узел формирования средней точки питания приведен на рисунке 3.4. Делитель R₁₈ – R₁₉ формирует напряжение +4,5VREF от шины +9VFILTER. Конденсатор C₂₃ снижает шум опорной точки и повышает устойчивость усилительных каскадов на TL074С при однополярном питании.

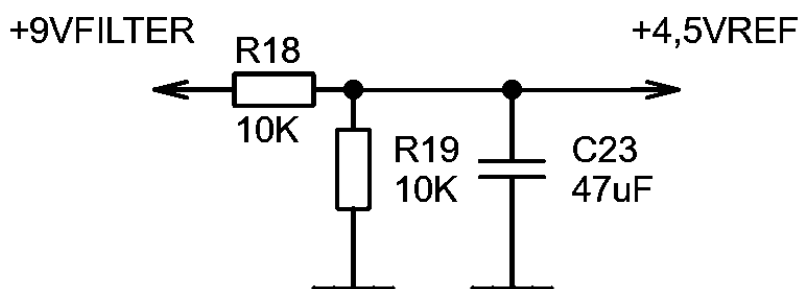


Рисунок 3.4 – Источник опорного напряжения +4,5 В

Напряжение делителя рассчитывается как:

$$V_{REF} = \frac{U_{+9VFILTER} \cdot R_{19}}{R_{18} + R_{19}}, \quad (3.23)$$

При R₁₈ = R₁₉ = 10 кОм и U_{+9VFILTER} ≈ 9 В:

$$V_{REF} = \frac{9 \cdot 10000}{10000 + 10000} = 4,5 \text{ В.}, \quad (3.24)$$

Ток делителя:

$$I_{R_{18}, R_{19}} = \frac{U_{+9VFILTER}}{R_{18} + R_{19}} = \frac{9}{20000} = 0,00045 \text{ А} = 0,45 \text{ мА.}, \quad (3.25)$$

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Индв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Индв. № дубл.	Подп. и дата

Эквивалентное выходное сопротивление делителя:

$$R_{OUT_{REF}} = R_{18} \parallel R_{19} = \frac{R_{18}R_{19}}{R_{18} + R_{19}} = \frac{10000 \cdot 10000}{20000} = 5000 \text{ Ом.}, \quad (3.26)$$

Постоянная времени фильтрации C_{23} относительно выходного сопротивления делителя:

$$\tau_{REF} = R_{OUT_{REF}} C_{23} = 5000 \cdot 47 \cdot 10^{-6} = 0,235 \text{ с.}, \quad (3.27)$$

Частота среза фильтра опорного напряжения:

$$f_{REF} = \frac{1}{2 \cdot \pi \tau_{REF}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 0,235} = 0,68 \text{ Гц.}, \quad (3.28)$$

Следовательно, $C_{23} = 47 \text{ мкФ}$ подавляет медленные пульсации и шумы в цепи средней точки. Это необходимо, так как V_{REF} используется как виртуальная земля для каскадов на TL074C.

3.5 Расчет генераторов на микросхеме 74НС14

Фрагмент схемы генераторов приведен на рисунке 3.5. Микросхема DA1 74НС14D содержит инверторы с триггером Шмитта. В устройстве применяются два генератора: опорный и изменяемый (антенный). Частоты этих генераторов близки друг к другу, а звуковой сигнал получается, как разностная частота после смесителя.

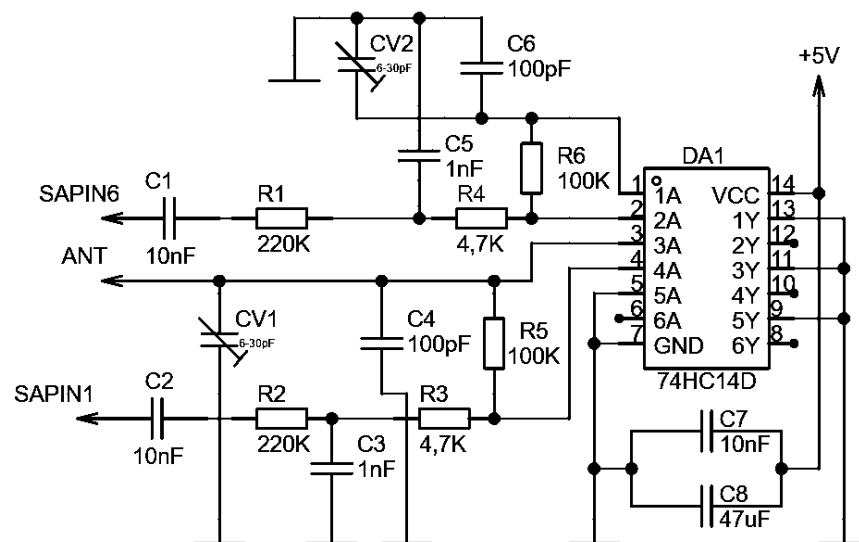


Рисунок 3.5 – Генераторы на схеме интегральной аналоговой 74НС14D

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Индв. № подл.	Взам. инв. №	Индв. № дубл.	Подп. и дата	

Для генератора на инверторе Шмитта период колебаний можно оценить через сопротивление обратной связи и эквивалентную емкость времязадающей цепи:

$$T = K_{SCH} \cdot R_{FB} \cdot C_{EQ}, \quad (3.29)$$

где T – период колебаний генератора, с;

K_{SCH} – коэффициент, учитывающий пороги переключения инвертора Шмитта;

R_{FB} – сопротивление резистора обратной связи генератора, Ом;

C_{EQ} – эквивалентная емкость времязадающей цепи, Ф.

Для 74НС14 при питании 5 В пороги переключения можно оценочно принять: $U_{T+} \approx 3$ В, $U_{T-} \approx 2$ В. Тогда коэффициент при RC:

$$K_{SCH} = \ln \frac{V_{CC} - U_{T-}}{V_{CC} - U_{T+}} + \ln \frac{U_{T+}}{U_{T-}}, \quad (3.30)$$

где V_{CC} – напряжение питания микросхемы 74НС14D, В;

U_{T+} – верхний порог переключения инвертора Шмитта, В;

U_{T-} – нижний порог переключения инвертора Шмитта, В.

Тогда:

$$K_{SCH} = \ln \frac{5 - 2}{5 - 3} + \ln \frac{3}{2} = \ln \frac{3}{2} + \ln \frac{3}{2} = 0,811., \quad (3.31)$$

Частота генератора:

$$f = \frac{1}{K_{SCH} R_{FB} C_{EQ}}, \quad (3.32)$$

В опорном генераторе роль сопротивления обратной связи выполняет $R_6 = 100$ кОм. В перестраиваемом генераторе аналогичную функцию выполняет $R_5 = 100$ кОм. Основная эквивалентная емкость задается C_4 , C_6 , подстроечными конденсаторами CV1, CV2 и паразитными емкостями монтажа и антенны. Для оценки примем:

$$\begin{aligned} C_{EQ} &= C_{MAIN} + C_{CV} + C_{PAR} = 100 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} + 18 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} + 80 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \\ &= 198 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}, \end{aligned} \quad (3.33)$$

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Инд. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата

3.6 Расчет смесителя SA612A

Фрагмент схемы смесителя DA2 – SA612A приведен на рисунке 3.6. На вход IN_A/IN_B поступает сигнал одного генератора, на вход OSC_B поступает сигнал второго генератора. На выходе OUT_A формируется сигнал, содержащий сумму и разность частот. Для терменвокса используется разностная низкочастотная составляющая.

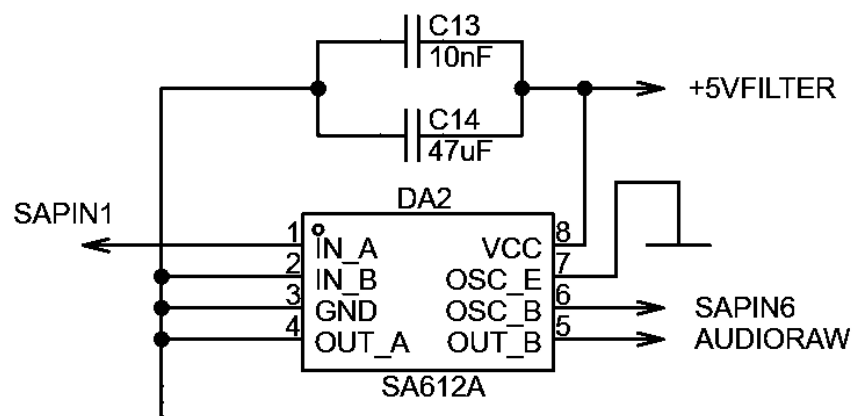


Рисунок 3.6 – Смеситель DA2 – SA612A

Разностная частота на выходе смесителя рассчитывается как модуль разности частот генераторов:

$$f_{AUDIO} = |f_{GEN1} - f_{GEN2}|, \quad (3.45)$$

Например, если опорный генератор настроен на 60,0 кГц, а перестраиваемый генератор имеет частоту 62,5 кГц, то:

$$f_{AUDIO} = |62500 - 60000| = 2500 \text{ Гц}, \quad (3.46)$$

Именно эта частота воспринимается как звуковой тон. При приближении руки к антенне емкость антенного узла изменяется, частота перестраиваемого генератора смещается, и f_{AUDIO} изменяется.

Конденсаторы C_{13} и C_{14} включены по питанию SA612A. Их назначение – локальная развязка питания. $C_{13} = 10 \text{ нФ}$ шунтирует высокочастотные помехи, $C_{14} = 47 \text{ мкФ}$ снижает низкочастотные просадки и пульсации.

Эквивалентная емкость развязки питания $A3$ рассчитывается как:

$$C_{A3} = C_{13} + C_{14} = 10 \cdot 10^{-9} \text{ Ф} + 47 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 47,01 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}, \quad (3.47)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Изн.	№ подл.	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

Оценочная частота, с которой электролитический конденсатор C_{14} начинает эффективно уменьшать пульсации при условном сопротивлении источника 10 Ом:

$$f_{A3} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10 \cdot 47,01 \cdot 10^{-6}} = 339 \text{ Гц.}, \quad (3.48)$$

Типовой ток потребления SA612A составляет около 2,4 – 3,0 мА. Для расчета принимаем:

$$I_{DA2} = 2,5 \text{ мА.}, \quad (3.49)$$

Мощность, потребляемая смесителем от шины +5VFILTER:

$$P_{DA2} = U_{+5VFILTER} I_{A3} = 4,935 \cdot 0,0025 = 0,0123 \text{ Вт} = 12,3 \text{ мВт.}, \quad (3.50)$$

3.7 Расчет фильтрации аудиосигнала после смесителя

Фрагмент фильтрации ВЧ и подачи аудиосигнала на усилитель приведен на рисунке 3.7. Конденсатор C_{15} выполняет разделение по постоянному току. Резистор R_{13} и конденсатор C_{16} задают частотную обработку сигнала перед усилителем.

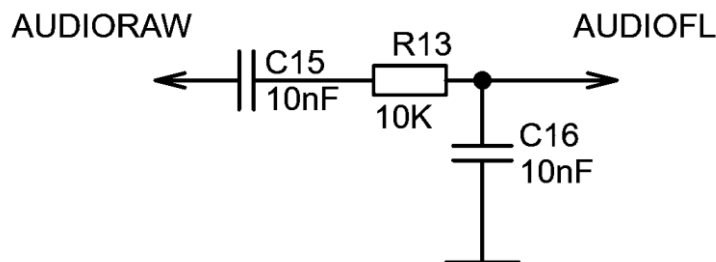


Рисунок 3.7 – Фильтр AUDIORAW-AUDIOFL

Нижняя частота среза, связанная с разделительным конденсатором C_{15} и входным сопротивлением R_{13} рассчитывается:

$$f_{НР} = \frac{1}{2 \cdot \pi R_{13} C_{15}}, \quad (3.51)$$

При $R_{13} = 10 \text{ кОм}$ и $C_{15} = 10 \text{ нФ}$:

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Индв. № подл.	Подп. и дата	Взам. инв. №	Индв. № дубл.	Подп. и дата

$$f_{HP} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10000 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = 1591 \text{ Гц.}, \quad (3.52)$$

Верхняя частота среза RC-звена $R_{13} - C_{16}$:

$$f_{LP} = \frac{1}{2 \cdot \pi R_{13} C_{16}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10000 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = 1591 \text{ Гц.}, \quad (3.53)$$

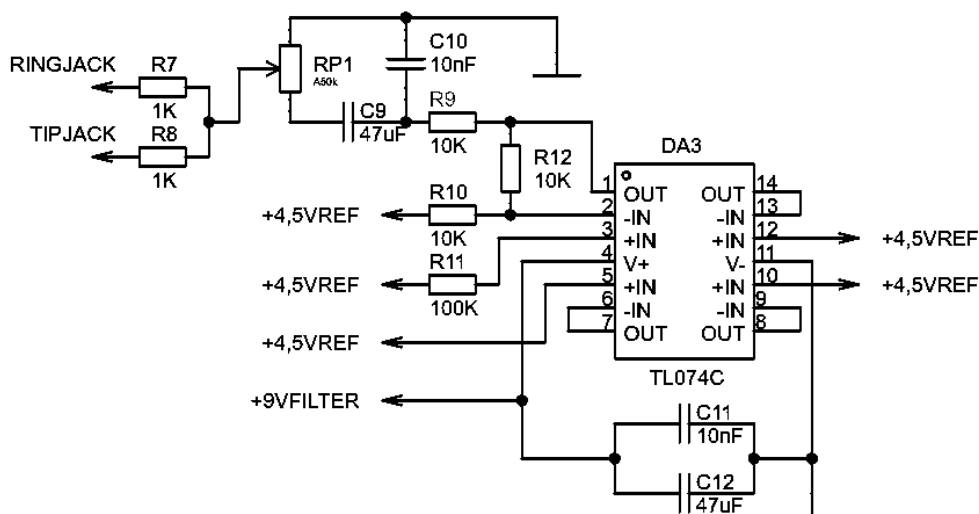
Такое включение ограничивает полосу вокруг звукового диапазона, одновременно уменьшая прохождение ВЧ-составляющих после смесителя. Если в дальнейшем потребуется расширить диапазон низких частот, C_{15} можно увеличить, например до 47 нФ или 100 нФ. При $C_{15} = 100$ нФ нижняя частота среза будет:

$$f_{100\text{н}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10000 \cdot 100 \cdot 10^{-9}} = 159 \text{ Гц.}, \quad (3.54)$$

Для текущего макетного варианта $C_{15} = 10$ нФ и $C_{16} = 10$ нФ позволяют уменьшить влияние остаточной ВЧ-составляющей генераторов на вход усилителя.

3.8 Расчет усилителя на TL074C

Фрагмент усилителя на DA3 – TL074C приведен на рисунке 3.8. Усилитель питается от шины +9VFILTER, а входы каскадов смещаются относительно средней точки +4,5VREF. Такое решение позволяет использовать операционный усилитель при однополярном питании.



Изм.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Инд. № подл.	Взам. инв. №	Инд. № дубл.	Подп. и дата	

Рисунок 3.8 – Усилитель DA3 TL074С

Для инвертирующего каскада коэффициент усиления по напряжению определяется отношением резистора обратной связи к входному резистору:

$$K_U = -\frac{R_{12}}{R_9} \quad (3.55)$$

При $R_{12} = 10$ кОм и $R_9 = 10$ кОм:

$$K_U = -\frac{10000}{10000} = -1. \quad (3.56)$$

Модуль коэффициента усиления равен единице. В этом каскаде основной задачей является не большое усиление, а перенос сигнала относительно V_{REF} , буферизация и согласование с выходным регулятором громкости.

Резистор $R_{10} = 10$ кОм задает привязку неинвертирующего входа к опорному напряжению. Резистор $R_{11} = 100$ кОм используется для смещения следующего входа относительно $+4,5V_{REF}$ и имеет большее сопротивление, чтобы слабее нагружать источник опорного напряжения.

Ток через R_{10} :

$$I_{R_{10}} = \frac{V_{REF}}{R_{10}} = \frac{4,5}{10000} = 0,45 \cdot 10^{-3} \text{ А.} \quad (3.57)$$

Ток через R_{11} :

$$I_{R_{11}} = \frac{V_{REF}}{R_{11}} = \frac{4,5}{100000} = 0,045 \cdot 10^{-3} \text{ А.} \quad (3.58)$$

Выходной разделительный конденсатор $C_9 = 47$ мкФ совместно с регулятором $RP1 = 50$ кОм формирует нижнюю частоты среза выходной цепи:

$$f_{OUT} = \frac{1}{2 \cdot \pi R_{V1} C_9} \quad (3.59)$$

Подстановка значений:

$$f_{OUT} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50000 \cdot 47 \cdot 10^{-6}} = 0,068 \text{ Гц.} \quad (3.60)$$

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ИТКП.	Лист
						24

Полученное значение значительно ниже звукового диапазона, поэтому $C_9 = 47 \text{ мкФ}$ практически не ослабляет полезный аудиосигнал при работе с высокоомной нагрузкой.

При подключении активной акустики с входным сопротивлением 10 кОм нижняя частота среза будет:

$$f_{OUT_{10k}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10000 \cdot 47 \cdot 10^{-6}} = 0,339 \text{ Гц.}, \quad (3.61)$$

Конденсатор $C_{10} = 10 \text{ нФ}$ в цепи обратной связи ограничивает высокочастотное усиление. При сопротивлении обратной связи $R_{12} = 10 \text{ кОм}$ частота среза:

$$f_{c10} = \frac{1}{2 \cdot \pi R_{12} C_{10}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 10000 \cdot 10 \cdot 10^{-9}} = 1591 \text{ Гц.}, \quad (3.62)$$

Конденсаторы $C_{11} = 10 \text{ нФ}$ и $C_{12} = 47 \text{ мкФ}$ являются развязкой питания TL074С. Эквивалентная емкость:

$$C_{DA3} = C_{11} + C_{12} = 10 \text{ нФ} + 47 \text{ мкФ} = 47,01 \cdot 10^{-6} \text{ Ф.}, \quad (3.63)$$

Типовой ток потребления TL074С принят $1,4 \text{ мА}$ на один операционный усилитель. Для четырех усилителей:

$$I_{A3} = 4 \cdot 1,4 = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ А.}, \quad (3.64)$$

Мощность, потребляемая А2 от шины +9VFILTER:

$$P_{DA3} = U_{+9VFILTER} I_{A2} = 8,94 \cdot 0,0056 = 0,050 \text{ Вт} = 50 \text{ мВт.}, \quad (3.65)$$

3.9 Сводный расчет потребления

Суммарное потребление устройства оценивается по токам основных узлов. Ток узлов +5 В:

$$I_5 = I_{DA2} + I_{DA1} + I_{CC} = 3 + 2,5 + 1 = 6,5 \text{ мА.}, \quad (3.66)$$

Ток узлов +9 В:

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ИТКП.	Лист
						25

$$I_9 = I_{DАЗ} + I_{R18,R19} = 5,6 + 0,45 = 6,05 \text{ мА.}, \quad (3.67)$$

Входной ток преобразователя при КПД 0,85:

$$I_{MT3608} = \frac{9 \cdot I_9}{0,85 \cdot 5} = 12,8 \text{ мА.}, \quad (3.68)$$

Общий расчетный ток от источника +5 В:

$$I_{Общий} = I_5 + I_{MT3608,IN} = 6,5 + 12,8 = 19,3 \text{ мА.}, \quad (3.69)$$

С учетом разброса параметров микросхем, нагрузки выходного каскада, потерь преобразователя и переходных процессов принимается расчетный ток потребления устройства:

$$I_{Общий} = 40 \text{ мА.}, \quad (3.70)$$

Расчетная мощность от входного источника +5 В:

$$P_{IN} = U_5 I_{Общий} = 5 \cdot 0,04 = 0,20 \text{ Вт.}, \quad (3.71)$$

Следовательно, питание от USB-порта или power bank имеет большой запас по току, так как даже с учетом запаса устройство потребляет менее 0,1 А.

4 Практическая реализация и экспериментальная проверка прототипа

В третьем разделе рассматривается практическая реализация аналогового музыкального устройства. Основное внимание уделено не только итоговой схеме, но и последовательности сборки, проверке узлов, особенностям настройки и ошибкам, выявленным в ходе разработки. Такой подход выбран потому, что для аналогового устройства с емкостным управлением важны не только расчетные номиналы элементов, но и фактическая работа схемы на макетной плате, разводка питания, длина соединительных проводников и паразитные емкости.

Практическая часть включает сборку и проверку следующих узлов: источника питания, генераторов на микросхеме 74НС14, сглаживающих цепей перед смесителем, смесителя SA612A, фильтра после смесителя, усилительного каскада на TL074C и выходного узла с разъемом jack 3,5 мм. Проверка выполнялась

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ИТКП.	Лист
						26

поэтапно: сначала контролировалась работа каждого узла отдельно, затем узлы объединялись в общий тракт.

4.1 Структура практического макета

Структура макета соответствует функциональной схеме терменвокса, но реализована на современной элементной базе. В отличие от исторических ламповых решений, в прототипе используются малогабаритные интегральные микросхемы и питание от источника 5 В.

Таблица 4.1 - Состав функциональных узлов прототипа

Узел	Элементная база	Назначение
Питание 5 В	USB Type-C, фильтр	Питание логической части и смесителя; уменьшение помех по шине +5 В
Питание 9 В	MT3608, фильтр	Формирование питания аудиотракта на TL074C
Виртуальная середина питания	R18, R19, C23	Создание опорного уровня +4,5 В для работы ОУ при однополярном питании
Генераторы	74HC14D, RC-цепи, подстроечные конденсаторы	Формирование опорной и антенной частоты около 60 кГц
Смеситель	SA612A	Преобразование пары ВЧ-сигналов в разностную звуковую составляющую
Фильтрация аудиосигнала	C15, R13, C16	Ослабление высокочастотных продуктов смешения
Усилитель	TL074C, цепи обратной связи и VREF	Усиление аудиосигнала и согласование с выходным узлом
Выход	Потенциометр RP1, R7, R8, jack 3,5 мм	Ручная регулировка уровня и подача моносигнала в оба канала внешней акустики

В качестве основного результата практической работы получен действующий прототип, в котором высота звука изменяется при приближении руки к антенне. Устройство не является законченным изделием, так как выполнено на макетной плате и требует дальнейшей механической доработки, однако основные функциональные узлы работают в соответствии с назначением и позволяют доработать до полноценного продукта.

Место для фотографии готового прототипа на макетной плате

ИТКП.

Лист

27

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Изн. № дубл.	Подп. и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

Рисунок 4.1 - Общий вид собранного прототипа терменвокса

4.2 Методика сборки и последовательности проверки

Сборка выполнялась поэтапно. Такой порядок выбран из-за высокой чувствительности генераторных и входных цепей к ошибкам монтажа. При одновременной пайке всего устройства поиск неисправности затрудняется: ошибка в питании, неверный номинал конденсатора или короткое замыкание в аудиотракте могут внешне проявляться одинаково – отсутствием звука на выходе.

На первом этапе был собран источник питания и проверено наличие напряжений. Затем были собраны генераторы на 74НС14 и проверена генерация на выходах микросхемы. После этого сигналы генераторов подавались через сглаживающие цепи на входы SA612A. Далее проверялся выход смесителя AUDIORAW, фильтр AUDIOFL, усилительный каскад TL074C и выход перед разъемом jack 3,5мм.

Контрольные точки выбирались так, чтобы можно было отделить неисправность конкретного узла от неисправности следующего каскада. Например, отсутствие сигнала на выходе внешней аудиосистемы не дает однозначного вывода о причине, поэтому проверка производилась поэтапно.

4.3 Практическая реализация узла питания

Питание прототипа выполнено от разъема USB Type-C. В схеме разъема используются резисторы R14 и R15 номиналом 10 кОм на линиях CC1 и CC2. Эти резисторы задают режим потребителя питания и позволяют получить напряжение VBUS от внешнего источника 5 В. От основной шины +5 В питаются логическая микросхема 74НС14 и смеситель SA612A. Для аудиотракта используется повышающий преобразователь MT3608, настроенный на напряжение около 9 В.

Отдельное внимание уделено фильтрации питания. Смеситель SA612A является чувствительным аналоговым узлом, поэтому его питание не подключается напрямую к общей шине +5 В. Между общей шиной и питанием смесителя установлен резистор R16 = 10 Ом, после которого подключены конденсаторы C17 = 100 нФ, C18 = 10 нФ и C19 = 10 мкФ. Такая комбинация конденсаторов работает в разных частотных областях: электролитическая емкость сглаживает низкочастотные просадки, а керамические конденсаторы уменьшают высокочастотные составляющие помех.

Для питания TL074C применена отдельная линия +9VFILTER. После модуля MT3608 установлен RC-фильтр на R17 и конденсаторах C20, C21, C22. Это решение связано с тем, что повышающий преобразователь работает в

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ИТКП.	Лист
						28

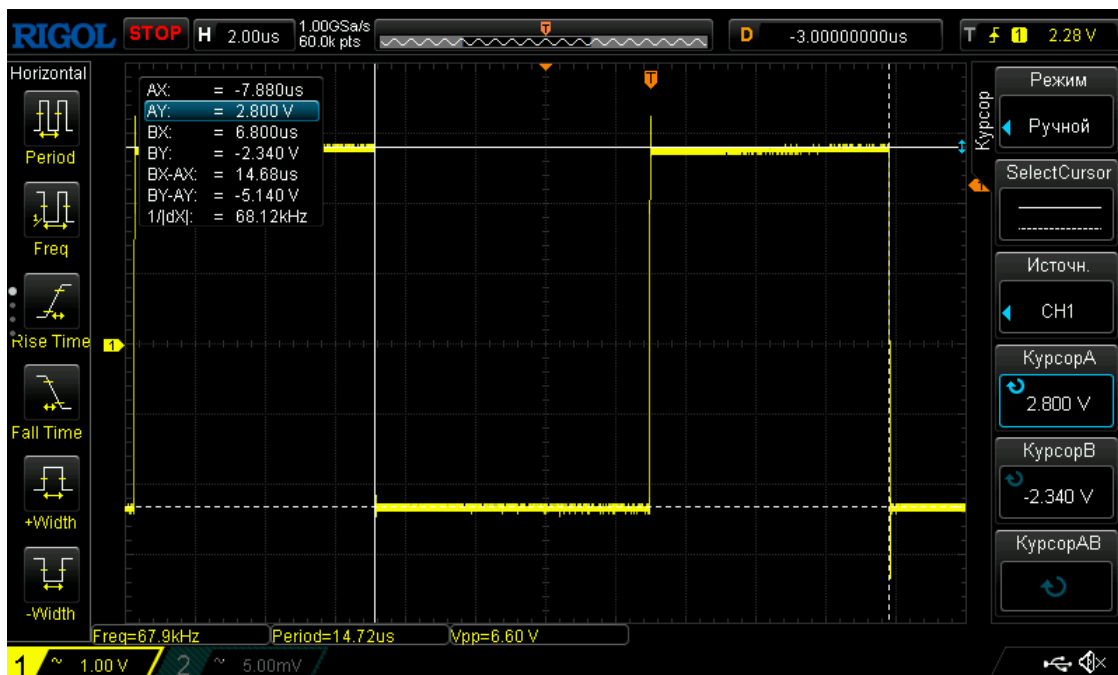


Рисунок 4.2 - Осциллограмма сигнала опорного генератора

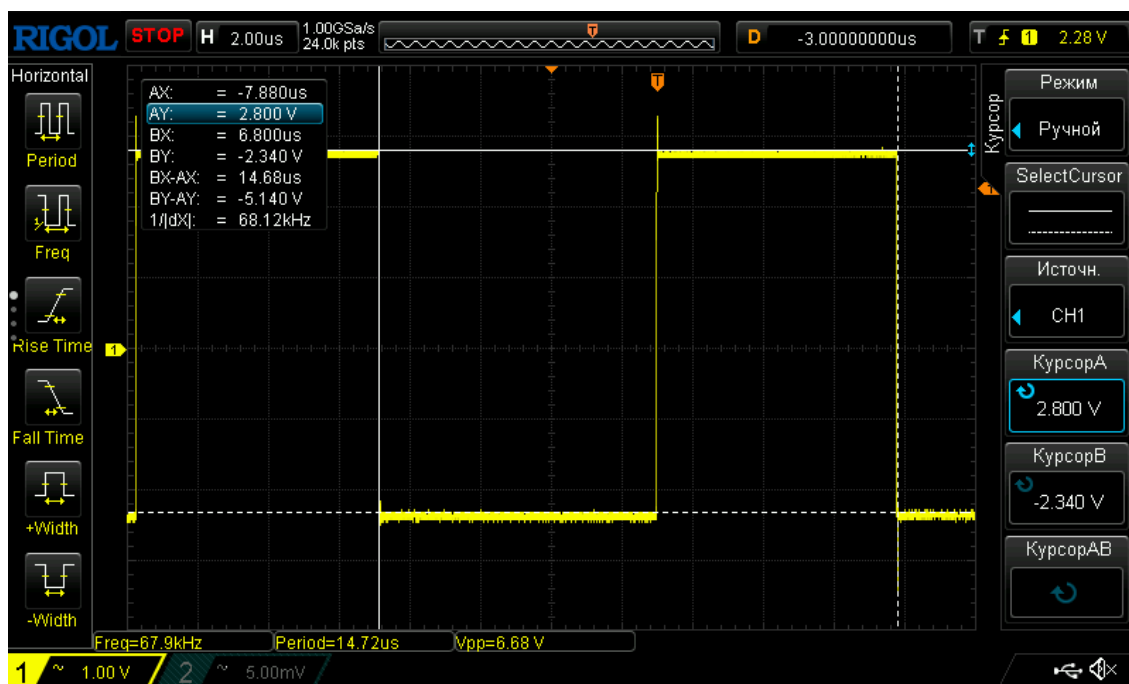


Рисунок 4.3 - Осциллограмма сигнала антенного генератора

4.5 Сглаживание сигналов генераторов перед смесителем

После генераторов сигналы проходят через RC-цепи согласования и сглаживания. Их назначение состоит в уменьшении амплитуды и ослаблении высокочастотных составляющих прямоугольного сигнала. На входы SA612A нежелательно подавать сигнал с чрезмерной амплитудой и крутыми фронтами, так как это может ухудшить спектр продуктов смешения и увеличить количество паразитных составляющих.

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	
Изн. № подл.	

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

ИТКП.

Практически на этом участке контролировался сигнал после резисторов и конденсаторов сглаживающей цепи, но до входов смесителя. Ожидаемая форма сигнала на этой точке отличается от идеального прямоугольника: фронты становятся более пологими, а амплитуда уменьшается. Такой сигнал лучше подходит для дальнейшего преобразования в SA612A.

При настройке было важно не сделать фильтрацию чрезмерной. Слишком большая емкость на этом участке способна сильно уменьшить амплитуду сигнала и привести к неустойчивой работе смесителя. Поэтому номиналы подбирались как компромисс между уменьшением гармоник и сохранением достаточного уровня высокочастотного сигнала.

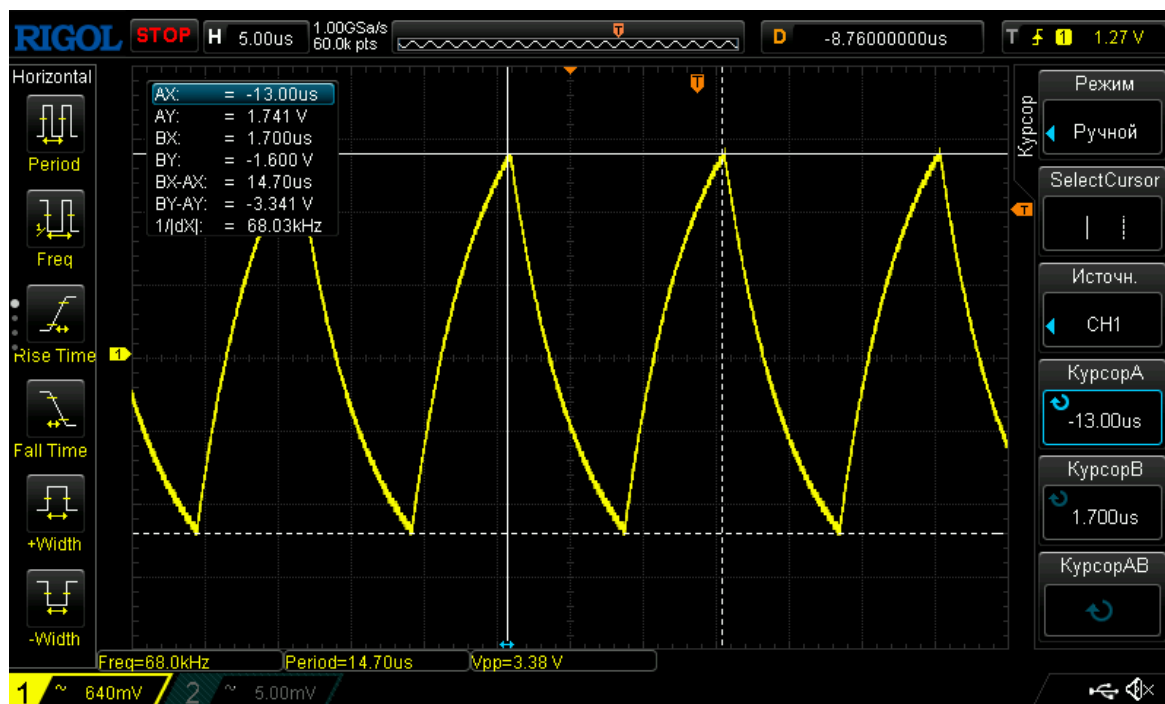


Рисунок 4.4 - Осциллограмма сигнала опорного генератора после сглаживающей цепи

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Изн. № подл.	Подп. и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

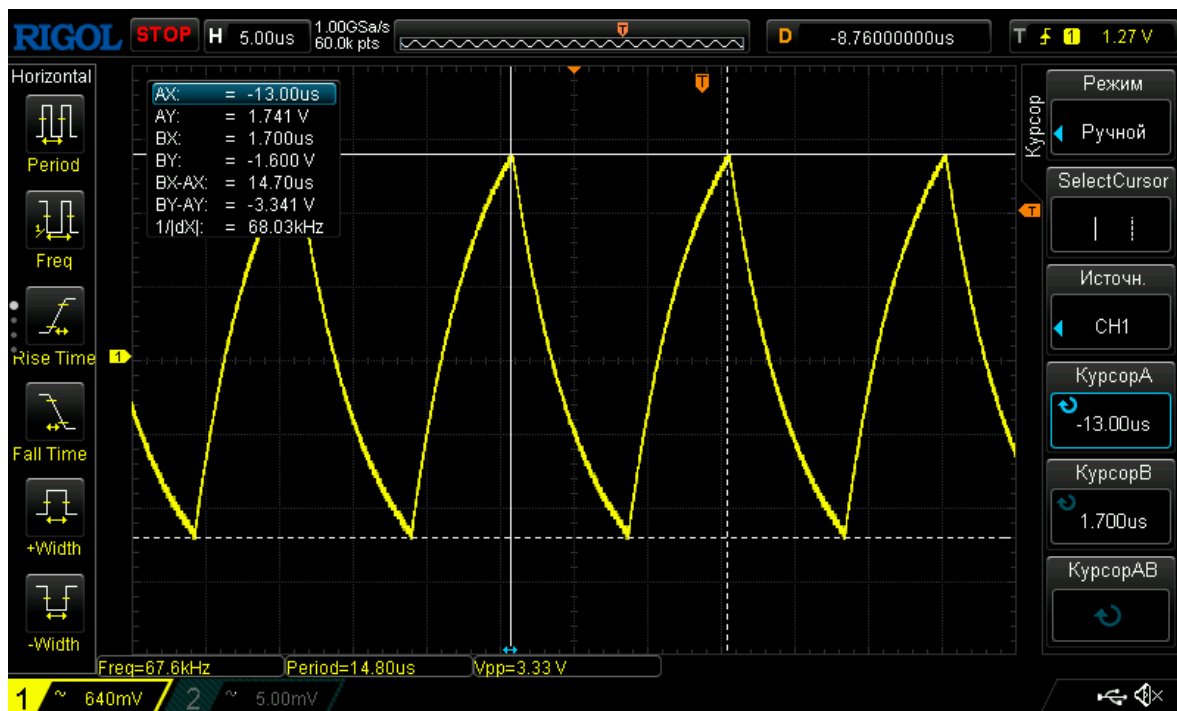


Рисунок 4.5 - Осциллограмма сигнала антенного генератора после сглаживающей цепи

Как можно заметить, сигналы с выходов являются практически идентичными, что хорошо для стабильной работы и настройки устройства.

4.6 Практическая реализация смесителя SA612A

Смеситель реализован на микросхеме SA612A. Согласно документации производителя, SA612A является маломощным монолитным двойным балансным смесителем с внутренним генераторным каскадом и стабилизированной схемой смещения; смеситель построен по структуре ячейки Гилберта [3]. В данном устройстве внутренний генератор SA612A не используется как самостоятельный задающий генератор. На соответствующие входы подаются внешние сигналы от генераторов.

На входы смесителя подаются два высокочастотных сигнала близкой частоты. В результате перемножения на выходе формируются составляющие с частотами суммы и разности. Суммарная составляющая остается в высокочастотной области, а разностная составляющая попадает в звуковой диапазон. Именно она является полезным сигналом для дальнейшего усиления.

Питание SA612A выполнено через отдельный фильтр +5VFILTER. Такое решение снижает проникновение помех от цифрового генератора и преобразователя питания. В процессе практической сборки этот узел оказался чувствительным к ошибкам в номиналах элементов и качеству соединения с общим проводом. После исправления ошибочно установленных малых емкостей и устранения

Ив. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Ив. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

4.8 Аудиоусилитель и выходной узел

Аудиотракт построен на микросхеме TL074С. Данный операционный усилитель относится к семейству малошумящих JFET-входных операционных усилителей. Для TL074 характерны высокое входное сопротивление, внутренняя частотная коррекция и достаточно высокая скорость нарастания выходного напряжения, что делает его пригодным для обработки аудиосигнала в данном макете [4].

Микросхема питается от однополярного напряжения +9VFILTER. Для корректной работы входные цепи привязаны к уровню +4,5VREF. Это позволяет усилителю обрабатывать переменную составляющую сигнала относительно виртуальной середины питания. Применение VREF является обязательным условием при однополярном питании, так как без него входные каскады операционного усилителя оказываются смещены к нижней границе допустимого диапазона.

Выходной сигнал после усилителя проходит через разделительный конденсатор и регулятор громкости (потенциометр). Далее сигнал подается на контакты TIP и RING разъема jack через отдельные резисторы и номиналом 1 кОм. Такой способ лучше прямого соединения каналов, так как левый и правый вход внешнего устройства получают один и тот же моносигнал через развязывающие сопротивления.

Контроль выходного сигнала выполняется в точке перед jack. На этой точке должен наблюдаться усиленный аудиосигнал, уровень которого изменяется регулятором громкости. При подключении активной акустической системы звук должен изменять высоту при движении руки около антенны.

Место для осциллограммы: выходной аудиосигнал перед разъемом jack

Рисунок 4.8 - Осциллограмма аудиосигнала на выходе усилителя перед jack

4.9 Методики экспериментальной проверки

Экспериментальная проверка выполнялась малогабаритным осциллографом, а также использовался метод проверки выходного аудиосигнала за счет снятия с помощью внешнего микрофона аудиоспектрограммы. Для генераторов контролировалась частота и наличие устойчивых фронтов. Для сигналов после сглаживающих цепей оценивались форма и уровень. Для смесителя и аудиотракта основное внимание уделялось появлению переменной составляющей, изменяющейся при движении руки около антенны.

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

ИТКП.

Лист

34

Одна из особенностей при снятии осциллограмм генераторов, было необходимо использовать общий провод устройства как общую точку измерения. Зонд осциллографа сам добавляет паразитную емкость к проверяемому узлу, поэтому при измерении антенного генератора возможно небольшое смещение частоты. Это не является неисправностью, а связано с высокой чувствительностью узла к дополнительной емкости.

Аудиоспектрограмма снималась и использовалась в конце, после полной сборки макета, для финальной настройки устройства. Она позволяла определить частоты слышимых шумов, паразитные гармоники, в следствии чего, можно было добавить дополнительные фильтры в определенные участки схемы, для улучшения качества звука.

4.10 Оценка результатов практической реализации

В результате практической сборки получен макет, реализующий основной принцип работы терменвокса. При изменении положения руки около антенны изменяется частота антенного генератора, а после смешения с опорным генератором изменяется высота слышимого звука.

Сигнальный тракт проходит через все основные стадии: генерацию двух близких высокочастотных сигналов, предварительное сглаживание, смешение, выделение аудиосоставляющей, фильтрацию, усиление и подачу на внешний аудиовход. Наличие контрольных точек позволяет подтвердить работу каждого узла при помощи осциллограмм.

Качество звучания прототипа ограничено особенностями выбранной схемы. Генераторы на микросхеме 74НС14D формируют прямоугольные сигналы, поэтому после смешения часть гармоник может попадать в слышимую область. Кроме того, макетный монтаж обладает заметными паразитными емкостями, что влияет на стабильность антенного генератора. Эти недостатки не исключают работоспособность макета, но определяют направления дальнейшего улучшения.

Для демонстрационного прототипа выбранная структура является оправданной. Она позволяет наглядно показать работу аналогового терменвокса и при этом использует доступные компоненты. Для дальнейшего повышения качества звука целесообразно рассмотреть переход к LC-генераторам или дополнительным полосовым фильтрам перед смесителем, улучшение разводки печатной платы, экранирование чувствительных участков и реализацию полноценной антенны громкости.

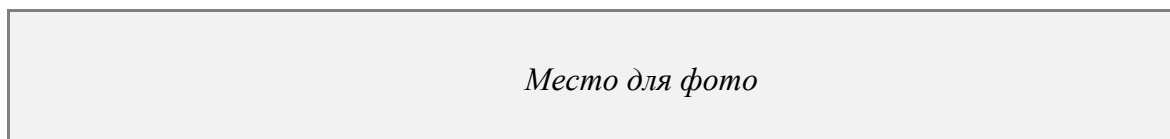


Рисунок 3.13 – Итоговый вид готового инструмента

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Подп. и дата
Инв. № дубл.	Подп. и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

ИТКП.

5. Технико-экономическое обоснование разработки электронно-музыкального устройства

5.1 Исходные данные и выбор методики расчета

Целью технико-экономического обоснования является определение затрат на разработку и изготовление опытного образца аналогового электронно-музыкального устройства «Терменвокс», а также оценка экономической целесообразности выбранного проектного решения. Разрабатываемое устройство представляет собой учебно-демонстрационный аналоговый прототип, в котором высота звука изменяется бесконтактно за счет изменения емкости антенного узла.

В отличие от проекта строительства сети связи, данный проект не предполагает получение регулярной абонентской выручки. Поэтому в экономической части применен адаптированный затратный подход: определяется трудоемкость разработки, прямые затраты на элементную базу, себестоимость опытного образца, ориентировочная цена разработки и сравнительный эффект относительно покупки готового коммерческого аналога.

Сначала определяются трудовые затраты, затем капитальные и эксплуатационные, после чего выполняется экономическое сравнение проектного решения с альтернативным вариантом. Для аппаратного прототипа в качестве основного результата рассматривается не операторский доход, а стоимость создания работоспособного образца и возможность его дальнейшего использования как демонстрационного и учебного изделия. Исходные данные для технико-экономического расчета представлены в таблице 4.1.

Таблица 5.1 - Исходные данные для технико-экономического расчета

Показатель	Принятое значение
Наименование устройства	Аналоговый терменвокс, опытный образец
Функциональный результат	Бесконтактное управление высотой звука и вывод аудиосигнала на внешний AUX-вход
Основные микросхемы	74HC14D, SA612A, TL074C
Источник питания	USB Type-C, 5 В; DC-DC преобразователь MT3608
Метод оценки	Затратный подход с расчетом трудоемкости, прямых затрат и цены разработки
Горизонт расчета	Разработка и изготовление одного опытного образца
Сравнительный вариант	Покупка готового терменвокса коммерческого класса

ИТКП.

Лист

36

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
------	------	----------	-------	------

5.2 Расчет трудоемкости разработки

Трудоемкость разработки определялась экспертным методом. Для каждого этапа заданы три оценки: минимальная, наиболее вероятная и максимальная продолжительность работ. Ожидаемое значение времени рассчитывается по формуле:

$$t_{ож} = \frac{t_{min} + 4t_{н.в.} + t_{max}}{6}, \quad (5.1)$$

где $t_{ож}$ - ожидаемая трудоемкость i -го этапа, дни; t_{min} - минимальная оценка трудоемкости, дни; $4t_{н.в.}$ - наиболее вероятная оценка, дни; t_{max} - максимальная оценка, дни.

Для оценки неопределенности по каждому этапу используется приближенная оценка стандартного отклонения:

$$\sigma_i = \frac{t_{max} - t_{min}}{6}, \quad (5.2)$$

Результаты оценки трудоемкости приведены в таблице 4.2.

Таблица 5.2 – Расчет трудоемкости разработки прототипа

Вид работы	Оценки трудоемкости			Расчетные величины	
	t_{min} , дни	$t_{н.в.}$, дни	t_{max} , дни	$t_{ож}$, дни	σ_i , дни
Анализ задания, требований и аналогов	3	4	6	4.17	0.50
Выбор структурной схемы устройства	4	6	9	6.17	0.83
Расчет и подбор номиналов элементов	3	5	8	5.17	0.83
Подбор и закупка элементной базы	2	3	5	3.17	0.50
Сборка и настройка генераторов 74НС14	3	4	7	4.33	0.67
Монтаж смесителя SA612 и фильтрующих цепей	4	5	8	5.33	0.67
Сборка питания, VREF и усилителя TL074	3	4	6	4.17	0.50
Экспериментальная настройка и измерения	4	5	8	5.33	0.67
Оформление документации и результатов	4	6	9	6.17	0.83
Итого	-	-	-	44.00	-

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Изн.	№ подл.	Взам. инв. №	Инв. № дубл.	Подп. и дата

Суммарная ожидаемая трудоемкость разработки составляет 44.00 человеко-дня. Полученное значение соответствует практическому характеру работы: значительная часть времени была затрачена не только на оформление схемы, но и на поэтапную сборку, поиск ошибок, настройку генераторов, проверку смесителя и доводку аудиотракта.

5.3 Расчет прямых затрат на изготовление прототипа

Прямые материальные затраты включают стоимость микросхем, пассивных элементов, печатно-монтажной основы, соединителей, антенны, расходных материалов и простейших конструктивных элементов. В расчет включались элементы, фактически необходимые для сборки прототипа, а не комплектующие серийного промышленного изделия. Перечень комплектующих и материалов для изготовления прототипа приведен в таблице 4.3.

Таблица 4.3 - Ориентировочная стоимость элементной базы и материалов

Наименование	Назначение	Кол-во	Цена, руб	Сумма, руб
74HC14D	RC-генераторы и буферизация сигналов	1	20	20
SA612AD/SA612A	Двойной балансный смеситель	1	216	216
TL074CDT/TL074C	Аудиоусилитель и буферизация	1	25	25
MT3608	Повышающий DC-DC преобразователь 5/9 В	1	82	82
Плата USB Type-C	Вход питания +5 В	1	80	80
Макетная монтажная плата	Основа для сборки прототипа	1	250	250
Переходные платы и панельки	Монтаж SMD-корпусов и сервисная замена	3	50	150
Разъем jack 3,5 мм	Аудиовыход на внешнюю акустику	1	15	15
Потенциометр 50 кОм	Ручная регулировка громкости	1	80	80
Подстроечные конденсаторы 6-30 пФ	Настройка частоты генераторов	2	100	200
Резисторы	Делители, фильтры, обратные связи	25	4	100
Керамические конденсаторы	Фильтрация и развязка сигналов	18	10	180
Электролитические конденсаторы	Фильтрация питания и разделение аудио	5	20	100
Монтажный провод	Соединения на плате и выводы к органам управления	1	150	150

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
-----	------	----------	-------	------

ИТКП.

Лист

38

Провод/штырь для антенны	Емкостный чувствительный элемент	1	200	200
Разъемы и клеммы	Подключение питания и сигналов	1	150	150
Крепеж и стойки	Механическая фиксация платы	1	150	150
Корпус или основание макета	Защита и демонстрационное исполнение	1	500	500
Припой, флюс и расходные материалы	Монтаж и доработка прототипа	1	250	250
Итого				2898

Суммарные прямые материальные затраты рассчитываются как сумма произведений количества элементов на цену единицы:

$$K_{\text{мат}} = \Sigma(n \cdot C), \quad (5.3)$$

По данным таблицы 4.3:

$$K_{\text{мат}} = 2898 \text{ руб.}, \quad (5.4)$$

Для макетной разработки дополнительно учитываются неучтенные материалы: запас проводов, термоусадочные трубки, крепеж, повторная пайка элементов при исправлении ошибок. Величина принята укрупненно в размере 10 % от стоимости основной элементной базы:

$$K_{\text{неуч}} = 0,10 \cdot K_{\text{мат}}, \quad (5.5)$$

$$K_{\text{неуч}} = 0,10 \cdot 2898 = 290 \text{ руб.}, \quad (5.6)$$

Транспортно-заготовительные расходы приняты в размере 20 % от суммы основных и неучтенных материалов:

$$K_{\text{ТР}} = 0,20 \cdot (K_{\text{мат}} + K_{\text{неуч}}), \quad (5.7)$$

$$K_{\text{ТР}} = 0,20 \cdot (2898 + 290) = 638 \text{ руб.}, \quad (5.8)$$

Итоговая стоимость изготовления одного опытного макета без учета труда разработчика определяется выражением:

$$K_{\text{макет}} = K_{\text{мат}} + K_{\text{неуч}} + K_{\text{ТР}}, \quad (5.9)$$

$$K_{\text{макет}} = 2898 + 290 + 638 = 3826 \text{ руб.}, \quad (5.10)$$

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Изн. № подл.	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ИТКП.	Лист
						39

5.4 Расчет полной себестоимости разработки

Для оценки полной себестоимости разработки необходимо учитывать труд разработчика. В качестве расчетной базы принята среднемесячная оплата труда исполнителя инженерно-технического уровня. Так как разработка выполняется в учебных целях, данная величина показывает экономическую стоимость работы, а не фактические денежные выплаты студенту.

Расходы на оплату труда с учетом районного коэффициента и страховых взносов рассчитываются по формуле:

$$W_{\text{тр}} = \frac{W_{\text{мес}} \cdot K_p \cdot K_{\text{п}} \cdot K_{\text{св}}}{m} \cdot T, \quad (5.11)$$

где $W_{\text{мес}}$ – среднемесячная заработная плата исполнителя, руб.;

K_p – районный коэффициент;

$K_{\text{п}}$ – коэффициент премирования;

$K_{\text{св}}$ – коэффициент, учитывающий страховые взносы;

m – среднее количество рабочих дней в месяце;

T – трудоемкость разработки, дни.

В расчете приняты следующие значения: $W_{\text{мес}} = 35000$ руб.; $K_p = 1.2$; $K_{\text{п}} = 1.0$; $K_{\text{св}} = 1.302$; $m = 22$ дней; $T = 44$ дней.

$$W_{\text{тр}} = \frac{35000 \cdot 1.2 \cdot 1.0 \cdot 1.302}{22} \cdot 44 = 109368 \text{ руб.}, \quad (5.12)$$

Накладные расходы включают освещение рабочего места, использование помещения, мелкий инструмент, организационные расходы и расходные материалы, не учтенные в спецификации. Для учебного опытного образца они приняты укрупненно в размере 40 % от трудовых затрат:

$$W_{\text{накл}} = 0,40 \cdot W_{\text{тр}}, \quad (5.13)$$

$$W_{\text{накл}} = 0,40 \cdot 109368 = 43747 \text{ руб.}, \quad (5.14)$$

Стоимость машинного времени принята для работ по оформлению схемы, подготовке документации и анализу результатов. При 20 рабочих днях использования ПК по 8 часов и расчетной стоимости 15 руб./ч затраты составляют 2400 руб.

Амортизационные отчисления по измерительному и монтажному оборудованию учитываются пропорционально времени использования в проекте. В расчет включены осциллограф, лабораторный блок питания, мультиметр и паяльное

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата	ИТКП.	Лист
						40

Цена разработки без НДС определяется как сумма себестоимости и прибыли:

$$P_{\text{безНДС}} = C_{\text{разр}} + R, \quad (5.21)$$

$$P_{\text{безНДС}} = 159263 + 31853 = 191115 \text{ руб.}, \quad (5.22)$$

Цена разработки с учетом НДС 22 %:

$$P_{\text{НДС}} = P_{\text{безНДС}} \cdot 1,22, \quad (5.23)$$

$$P_{\text{НДС}} = 191115 \cdot 1,22 = 233160 \text{ руб.}, \quad (5.24)$$

Для оценки экономической целесообразности рассмотрен альтернативный вариант - приобретение готового терменвокса. В качестве аналогов приняты Moog Theremini и Moog Etherwave Theremin. Эти устройства имеют существенно более высокую степень готовности, корпус, заводскую настройку и, в отдельных вариантах, дополнительные цифровые функции. Поэтому сравнение выполняется не как полная замена промышленного прибора, а как оценка целесообразности самостоятельной разработки учебно-демонстрационного макета. Сравнение прямых материальных затрат на самостоятельное изготовление макета с покупкой готового коммерческого аналога приведено в таблице 4.5.

Таблица 4.5 - Сравнение прямых затрат с покупкой готового аналога

Вариант	Характеристика	Ориентировочная стоимость
Самостоятельное изготовление макета	Один антенный канал высоты, аналоговый тракт, AUX-выход	3 508 руб. прямых затрат
Moog Theremini	Коммерческий терменвокс с расширенными функциями	413 EUR, ориентировочно 37170 руб. при курсе 90 руб./EUR
Moog Etherwave Theremin	Коммерческий аналоговый терменвокс	599 EUR, ориентировочно 53910 руб. при курсе 90 руб./EUR

Средняя ориентировочная стоимость коммерческого аналога по двум рассмотренным вариантам составляет:

$$P_{\text{ср}} = \frac{C_{\text{Theremini}} + C_{\text{Etherwave}}}{2}, \quad (5.25)$$

Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата
Изн.	№ подл.	Взам. инв. №	Изн. № дубл.	Подп. и дата

$$P_{\text{ср}} = \frac{37170 + 53910}{2} = 45540 \text{ руб.}, \quad (5.26)$$

Экономический эффект самостоятельной сборки опытного образца по прямым затратам определяется как разность между средней стоимостью аналога и стоимостью макета:

$$P_{\text{разн}} = P_{\text{ср}} - K_{\text{макет}}, \quad (5.27)$$

$$P_{\text{разн}} = 45540 - 3826 = 41714 \text{ руб.}, \quad (5.28)$$

При этом необходимо подчеркнуть, что полная себестоимость разработки с учетом труда разработчика выше прямой стоимости готового учебного макета. Это нормально для опытно-конструкторской работы: значительная часть затрат относится к поиску схемотехнического решения, исправлению ошибок, настройке и оформлению документации. При серийном изготовлении затраты разработки распределяются между несколькими изделиями, поэтому себестоимость одной единицы снижается.

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

					ИТКП.	Лист
Изн.	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		43

Библиография

- [1] Вайспапир В. Я. Стандартизация конструкторской документации: учебное пособие / Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики; каф. технической электроники. - Новосибирск, 2020.
- [2] Вайспапир В. Я., Фадеева Н. Е. Основы конструирования электронных средств. Часть 2: практикум / Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики; каф. технической электроники. - Новосибирск, 2023. - 63 с.
- [3] Мухина И. С. Техничко-экономическое обоснование проектных решений при выполнении выпускных квалификационных работ: методическое пособие. - Новосибирск: СибГУТИ, 2020.
- [4] Horowitz P., Hill W. The Art of Electronics. - 3rd ed. - Cambridge: Cambridge University Press, 2015. - 1220 p.
- [5] Титце У., Шенк К. Полупроводниковая схемотехника: справочное руководство. - М.: ДМК Пресс, 2007. - 832 с.
- [6] Nexperia. 74HC14; 74HCT14 Hex inverting Schmitt trigger: product data sheet. - URL: https://assets.nexperia.com/documents/data-sheet/74HC_HCT14.pdf (дата обращения: 15.06.2026).
- [7] NXP Semiconductors. SA612A Double-balanced mixer and oscillator: data sheet. - URL: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/SA612A.pdf> (дата обращения: 15.06.2026).
- [8] Texas Instruments. TL074, TL07xx Low-Noise, FET-Input Operational Amplifiers: data sheet. - URL: <https://www.ti.com/product/TL074> (дата обращения: 15.06.2026).
- [9] AeroSemi Technology. MT3608 High Efficiency 1.2 MHz 2 A Step Up Converter: data sheet. - URL: <https://www.aerosemi.com/Products/MT3608> (дата обращения: 15.06.2026).
- [10] Theremin L. S. Method of and apparatus for the generation of sounds: patent US1661058A. - URL: <https://patents.google.com/patent/US1661058A/en> (дата обращения: 15.06.2026).
- [14] RCA Theremin Schematics and Manuals. - URL: <https://www.rcatheremin.com/manuals.php> (дата обращения: 15.06.2026).

Изн. № подл.	Подп. и дата
Взам. инв. №	Изн. № дубл.
Подп. и дата	Подп. и дата

					ИТКП.	Лист
Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		45