

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 / специализации)

Электроника и робототехника
(направленность (профиль) / специализация)

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)**

на тему Система управления работой сейсмоисточника

Обучающийся

А.Ф. Калайджи

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

к.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

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке системы управления работой сейсмоисточника индукционно-динамического типа. Пояснительная записка разделена на 4 раздела, в которых описывается анализ аналогов, представленных на рынке, процесс разработки структурной схемы устройства, схемотехнического решения с выбором элементной базы, проектирование печатной платы, разработка управляющей программы для микроконтроллера, а также формирование документации и файлов для передачи в производство.

К пояснительной записке прилагаются следующие иллюстративные материалы:

1. Структурная схема системы управления сейсмоисточником;
2. Схема электрическая принципиальная устройства;
3. Чертеж печатной платы устройства;
4. Сборочный чертеж устройства;
5. Перечень элементов;
6. Спецификация.

Abstract

The title of the graduation work is Seismic Source Operation Management System. The graduation work consists of an introduction, four parts, 29 figures, 11 tables, a conclusion, and a list of 25 references including foreign sources. The aim of this graduation work is to develop an induction dynamic seismic source control system to ensure accurate formation of seismic waves with high reliability and electromagnetic compatibility. The object of the graduation work is code pulse seismic source. The subject of the graduation work is the development of a printed circuit board for an induction-dynamic seismic source control system. The key issue of the graduation work is the choice of the element base and composing the firmware for the device.

The graduation work may be divided into several logically connected parts which are market overview, development of a management system, development of a control program for a microcontroller, development of a control system printed circuit board. The first part describes in details various types of seismic sources, an overview of typical control system solutions on the market, and an overview of typical galvanic isolation solutions. We examine different types of similar devices and simulate the intended device. The second part outlines the results of the analysis of the necessary control channels and feedback. A block diagram was built and the element base for the electrical circuit was selected. The third part consists of developing a control program for the microcontroller and debugging it. The work is of interest for wide circle of readers interested in geological exploration, electronics, engineering research and ecology, as well as the academic community.

Содержание

Введение.....	5
1 Обзор состояния рынка.....	6
1.1 Описание объекта управления.....	6
1.2 Обзор типовых решений систем управления на микроконтроллерах для управления силовыми системами питания.....	14
1.3 Обзор решений гальванической развязки для подачи сигналов управления от микроконтроллера и снятия сигналов обратной связи с силовых частей объекта управления.....	26
2 Разработка системы управления.....	31
2.1 Анализ объекта управления. Выделение необходимых каналов управления и обратной связи.....	31
2.2 Построение структурной схемы системы управления.....	36
2.3 Разработка алгоритма управления и построение его блок-схемы.....	37
2.4 Разработка схемы электрической принципиальной системы управления сейсмоисточником	41
3 Разработка управляющей программы для микроконтроллера.....	51
4 Разработка печатной платы системы управления.....	60
Заключение	65
Список используемых источников.....	66

Введение

Современные геофизические исследования, направленные на изучение строения земной коры, поиск полезных ископаемых и мониторинг геодинамических процессов, требуют использования высокоточных и надежных сейсмоисточников. Среди них особое место занимают индукционно-динамические сейсмоисточники, которые обеспечивают управляемое возбуждение сейсмических волн с минимальным воздействием на окружающую среду. Такие устройства находят широкое применение в сейсморазведке, инженерной геофизике и научных исследованиях, особенно в условиях городской застройки, где применение взрывных источников ограничено.

Ключевым элементом эффективной работы сейсмоисточника является система управления, которая обеспечивает точное формирование параметров возбуждения, мониторинг состояния устройства и защиту от аварийных ситуаций. Разработка такой системы требует комплексного подхода, включающего анализ существующих решений, выбор элементной базы, проектирование аппаратной части, создание программного обеспечения и подготовку производственной документации.

Целью данной выпускной квалификационной работы является разработка системы управления индукционно-динамическим сейсмоисточником, обеспечивающей высокую точность, надежность и электромагнитную совместимость. В работе рассматриваются задачи анализа рынка сейсмоисточников и систем управления, проектирования структурной и принципиальной схем, выбора микроконтроллера и компонентов, разработки управляющей программы, а также создания печатной платы и сопроводительной документации.

Актуальность темы обусловлена растущей потребностью в компактных и экологически безопасных решениях для геофизических исследований, а также необходимостью повышения эффективности и автоматизации процессов сейсморазведки.

1 Обзор состояния рынка

1.1 Описание объекта управления

Сейсмоисточник — это устройство или система, предназначенная для генерации сейсмических волн в контролируемых условиях с целью изучения строения земной коры, поиска полезных ископаемых, мониторинга геодинамических процессов или других геофизических задач. Сейсмоисточники создают упругие колебания, которые распространяются в геологической среде, а их отражения и преломления регистрируются сейсмоприемниками для последующей обработки и интерпретации.

Принцип работы сейсмоисточников основан на преобразовании энергии (механической, электрической, химической или гидравлической) в упругие волны. Характеристики генерируемых волн, такие как частота, амплитуда и длительность, определяются типом источника, его конструкцией и задачами исследования. Сейсмоисточники широко применяются в сейсморазведке, инженерной геофизике, мониторинге тектонической активности и научных исследованиях.

Сейсмоисточники классифицируются по нескольким критериям: типу энергии, способу возбуждения волн, среде применения и мобильности. Ниже приведены основные виды сейсмоисточников по типу энергии.

Взрывные источники: используют энергию химического взрыва (например, тротил или аммонал) для создания мощных импульсных волн. Применяются преимущественно в глубинной сейсморазведке на суше и в море. Преимущества — высокая энергия, недостатки — экологические риски и сложность транспортировки.

Механические источники: включают устройства, использующие ударное воздействие (например, падающий груз, молот) или вибрацию. Пример — вибросейсмические источники, генерирующие управляемые гармонические сигналы.

Электродинамические источники: преобразуют электрическую энергию в механические колебания через электромагнитные системы. Используются для высокоточного возбуждения волн в лабораторных условиях или при мониторинге.

Пневматические и гидравлические источники: применяются в морской сейсморазведке, где энергия сжатого воздуха или жидкости создает акустические импульсы.

Для моей работы необходимо рассмотреть сейсмоисточники индукционно-динамического типа. Электродинамические сейсмоисточники основаны на преобразовании электромагнитных сил, возникающих в обмотках электрической машины при прохождении тока высокой силы. Принцип действия заключается в создании мощного импульса силы за счет взаимодействия электромагнитных полей якоря и статора. В 1970-х и начале 1980-х годов на этом принципе были разработаны первые модели таких источников, наиболее известной из которых стала установка Сейсמודин-140, выпускавшаяся малыми сериями на шасси автомобиля КрАЗ-225Б [18]. Эта модель обеспечивала максимальную силу воздействия на грунт до 140×10^4 Н (в некоторых модификациях до 250×10^4 Н). Излучающий элемент состоял из якоря, жестко соединенного с рабочей плитой, воздействующей на грунт, и статора, связанного с инертной массой. Разряд тока от батареи конденсаторов, заряжаемых через электрогенератор и блок питания, подавался на обмотки, вызывая быстрое перемещение якоря и статора относительно друг друга. Якорь передавал усилие на грунт, возбуждая сейсмические волны, а статор с инертной массой перемещался вверх и затем возвращался в исходное положение с помощью спускоподъемной системы.

Параллельно с серией Сейсמודин в последние годы малыми партиями выпускаются электродинамические источники Енисей, монтируемые на тракторах Т-150К (Енисей ТН) или на санях (Енисей СВ). Принцип их действия аналогичен Сейсמודин, но излучатель имеет принципиальное отличие: он выполнен в виде двух плоских катушек, которые при протекании тока от-

талкиваются друг от друга, передавая усилие на грунт. В конструкции используется шесть излучателей, попарно установленных в передней, средней и задней частях транспортной базы. Хотя энергетические параметры одного излучателя Енисей ниже, чем у Сейсмодин-140, суммарный импульс силы сопоставим, что относит оба источника к категории средней мощности (2-й разряд).

Одним из значимых достижений в развитии электродинамических сейсмоисточников является разработка, описанная в патенте RU2253136C1, посвященная конструкции электромагнитного источника сейсмических волн с повышенной эффективностью и надежностью [5].

Электромагнитный сейсмоисточник, представленный на Рисунке 1, представляет собой инновационную конструкцию, предназначенную для генерации сейсмических волн в геологической среде. Основными элементами устройства являются пригруз 1, жестко соединенный с индуктором электромагнита 2, в пазах которого размещены верхняя 3 и нижняя 4 обмотки, подключенные к системе электропитания 5. Соосно с индуктором расположен якорь электромагнита 6, жестко связанный с излучающей плитой 7, которая передает колебания на грунт. Индуктор 2 опирается на плиту 7 через упругие элементы 8, а устройство 9 для прижима плиты к грунту выполнено в виде пригруза на упругих элементах. Такая конфигурация обеспечивает стабильное сцепление с поверхностью и эффективную передачу энергии.

Принцип работы сейсмоисточника основан на двухтактном электромагнитном воздействии. Система электропитания 5 поочередно подает импульсы тока i_V и i_H в верхние и нижние обмотки 3 и 4, что приводит к возникновению магнитных потоков Φ_V и Φ_H . Эти потоки создают знакопеременные силовые взаимодействия между якорем 6 и индуктором 2, вызывая их относительные колебания. Якорь, через жестко соединенную излучающую плиту 7, передает эти колебания на грунт, возбуждая сейсмические волны. Частота и амплитуда генерируемых волн напрямую зависят от параметров

токовых импульсов, управляемых системой электропитания, что позволяет гибко адаптировать источник к различным геофизическим задачам.

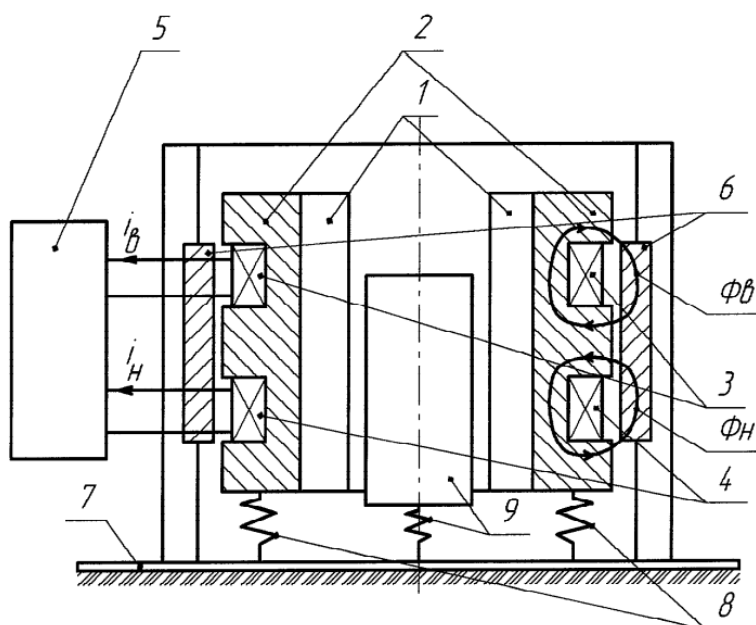


Рисунок 1 – Конструктивная схема электромагнитного вибрационного сейсмоисточника

Упругие элементы 8, соединяющие индуктор 2 с излучающей плитой 7, выполняют важную компенсаторную функцию, выравнивая вес индуктора и связанных с ним компонентов. При этом их влияние на динамику работы устройства минимально, что обеспечивает стабильность и точность возбуждения волн. Устройство 9 для прижима плиты к грунту, реализованное через пригруз на упругих элементах, гарантирует надежный контакт с поверхностью, даже на неровных участках, что критично для эффективности сейсморазведки. Такая конструкция выделяет сейсмоисточник среди традиционных источников благодаря управляемости и возможности точной настройки параметров сигнала.

Ключевым новшеством, согласно патенту, является оптимизированная конструкция электромагнитного излучателя, которая минимизирует потери энергии в процессе преобразования электрического импульса в механическое воздействие. Обмотки якоря и статора выполнены с учетом высокой

плотности тока, что обеспечивает мощный импульс силы при компактных размерах устройства. Спускоподъемная система, интегрированная в конструкцию, позволяет плавно возвращать инертную массу в исходное положение после каждого цикла возбуждения, снижая механические нагрузки и увеличивая долговечность оборудования.

Устройство разработано для монтажа на мобильной платформе, что обеспечивает его удобство транспортировки и эксплуатации в различных условиях местности. В состав электрооборудования входят электрический генератор, блок питания с аккумулятором конденсаторов и система управления, которая координирует разряд тока и регулирует параметры сигнала. В отличие от традиционных электродинамических источников, эта разработка обладает улучшенными силовыми характеристиками и повышенной стабильностью работы, что особенно важно для задач, требующих высокой точности при обработке сейсмических данных.

Так же был рассмотрен электромагнитный сейсмоисточник, описанный в патенте RU2028646C1 [4]. Он представляет собой устройство, разработанное для возбуждения сейсмических волн в геологической среде с целью проведения сейсморазведочных работ. Конструкция источника основана на использовании электромагнитных сил, генерируемых при взаимодействии токов в обмотках электромагнита.

Источник сейсмических волн, представленный на Рисунке 2, включает магнитопровод 1 с полюсами 2 и 3, образующими кольцевой воздушный зазор 4, в котором размещена обмотка возбуждения 5. На поверхностях полюсов закреплены секции импульсной обмотки 6, а магнитопровод с обмоткой возбуждения формирует пригруз, опирающийся на излучающую плиту 7, расположенную на грунте. Между магнитопроводом и плитой установлен демпфер 8, а к плите прикреплена цилиндрическая гильза 9 из материала с низким электрическим сопротивлением, такая как медь или алюминий, способная перемещаться в зазоре. Гильза может выступать за пределы зазора, а обмотка возбуждения подключена к источнику постоянного тока 10, а им-

пульсная обмотка — к схеме импульсного питания 11. Такая конструкция обеспечивает эффективное преобразование электрической энергии в механические колебания.

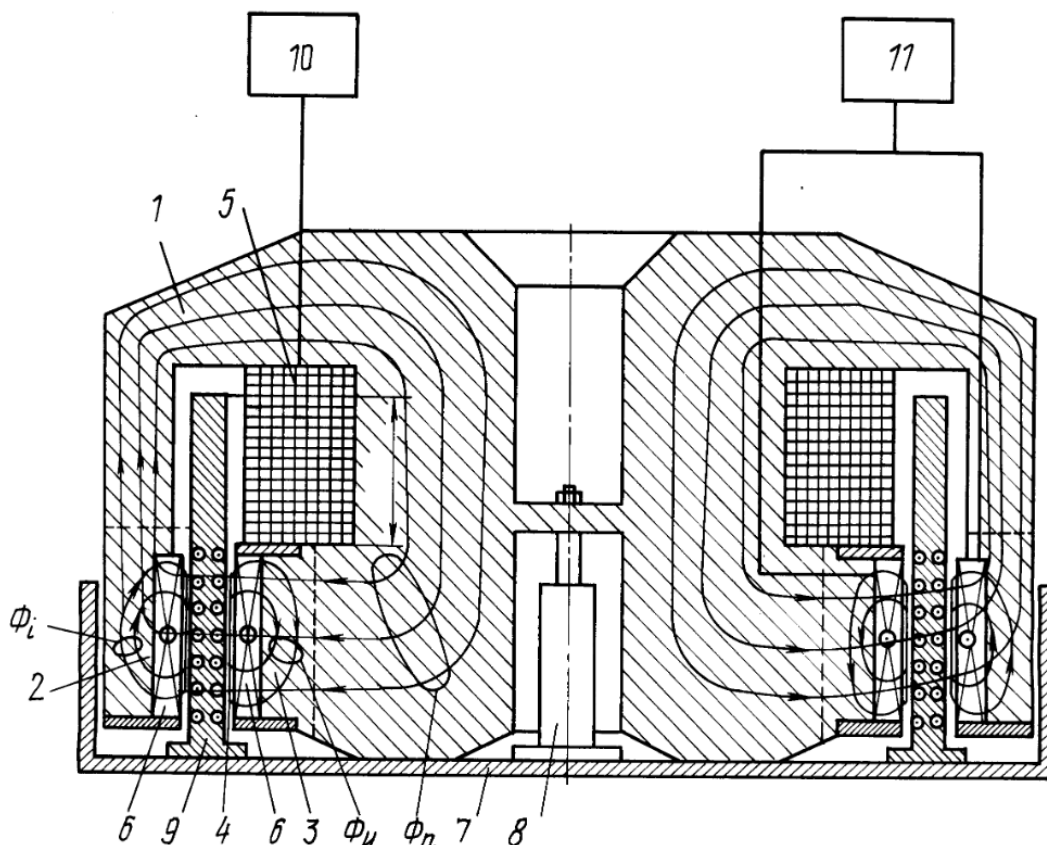


Рисунок 2 - Конструктивная схема источника сейсмических волн

Работа источника основана на создании постоянного магнитного потока Φ_p обмоткой возбуждения 5, пересекающей гильзу 9 в кольцевом зазоре. При подаче импульса тока от схемы 11 в импульсную обмотку 6 возникают импульсные потоки Φ_i , индуктирующие ток в гильзе, который препятствует проникновению этих потоков. Взаимодействие тока в гильзе и потока Φ_p генерирует электромагнитную силу P , передающуюся через плиту 7 на грунт, возбуждая сейсмические волны. Как показано на Рисунке 3, при импульсе 15 плита смещается вниз (кривая 16), а магнитопровод — вверх (кривая 17). После окончания импульса плита возвращается под действием упру-

гих сил грунта, а магнитопровод продолжает движение под влиянием инерции, пока не стабилизируется демпфером 8.

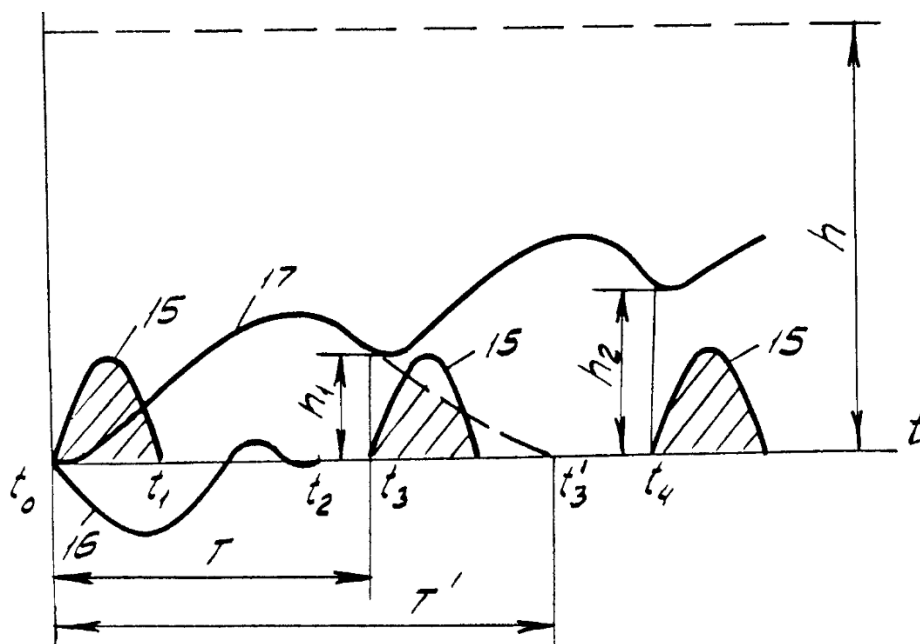


Рисунок 3 – Примерные временные диаграммы импульса силы, перемещений излучающей плиты и магнитопровода

Конструктивные особенности источника включают составную гильзу, состоящую из центральной ферромагнитной части 12 и боковых электропроводных гильз 13 и 14, что повышает механическую жесткость и снижает магнитное сопротивление. Полюса могут быть шихтованными из пластин электротехнической стали (Рисунок 4), что уменьшает вихревые потери и оптимизирует работу обмотки. Интервалы между импульсами (t_1, t_3 ; t_3, t_4) задаются системой управления, позволяя регулировать частоту повторения сигналов. Выступание гильзы над полюсами на величину h обеспечивает стабильность силы P независимо от положения магнитопровода, что повышает эффективность источника.

Преимущества конструкции заключаются в увеличении механической прочности и ресурса импульсной обмотки, размещенной в пазах полюсов (Рисунок 4), а также в снижении потребляемой мощности за счет оптимизации магнитного потока. Демпфер 8 предотвращает удары магнитопровода о

плиту, а гильза 9 может служить направляющей для соосного перемещения компонентов. Уменьшение периода повторения импульсов с T' до T увеличивает максимальную частоту сигналов, что существенно улучшает сейсмическую эффективность устройства, делая его перспективным для современных задач сейсморазведки.

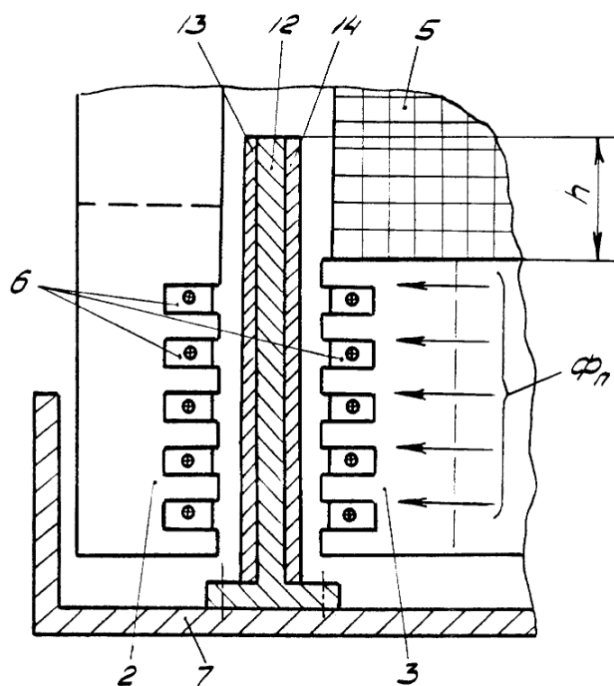


Рисунок 4 - Сечение воздушного зазора между полюсами магнитопровода с импульсной обмоткой

Конструкция, предложенная в патенте, направлена на повышение эффективности и надежности работы сейсмоисточника. Применение двухтактного электромагнита обеспечивает знакопеременное воздействие, что способствует более равномерному распределению энергии и снижению механического износа. Устройство для прижима плиты к грунту гарантирует стабильный контакт с поверхностью, что особенно важно при работе на неровных или рыхлых грунтах. Такая конфигурация позволяет использовать источник в различных геологических условиях, обеспечивая высокую точность и повторяемость сейсмических сигналов.

Согласно заданию объектом управления был выбран сейсмоисточник электромагнитного типа.

1.2 Обзор типовых решений систем управления на микроконтроллерах для управления силовыми системами питания

В области сейсморазведки, где точность, производительность и надежность играют ключевую роль, системы управления сейсмическими источниками становятся основой для достижения высоких результатов. Одной из передовых разработок в этой сфере является система Ultra-High Production Vibroseis (UHPV), созданная компанией Seismic Source Co [22]. Эта система представляет собой комплексное решение, объединяющее программное обеспечение SourceLink, аппаратные компоненты Universal Encoder 3 (UE3) и Force 3 (F3) Vibrator Controller, а также коммуникационные модули VibLink и NavLink.

Система UHPV разработана для обеспечения сверхвысокой производительности в условиях сложных сейсмических исследований, где требуется обработка большого объема данных в сжатые сроки. Основу системы составляют три ключевых компонента: программное обеспечение SourceLink, кодировщик Universal Encoder 3 и контроллер вибраторов Force 3. Дополнительно система включает коммуникационные решения VibLink и NavLink, которые обеспечивают бесперебойную связь и автономное управление вибраторами.

Программное обеспечение SourceLink выступает в роли центрального управляющего элемента, обеспечивая координацию всех процессов, включая управление экипажами, контроль качества данных (QC), обработку сообщений PSS (Pilot Sweep Signal) и PFS (Phase Feedback Signal), а также генерацию отчетов по итогам рабочего дня или проекта. SourceLink отличается интуитивно понятным интерфейсом, который упрощает контроль качества и позволяет операторам эффективно управлять большими флотами вибраторов.

Важной особенностью является поддержка функции отображения центра масс (COG), которая помогает оптимизировать расположение вибраторов для достижения максимальной точности данных.

Universal Encoder 3 (UE3), изображенный на Рисунке 5, выполняет функцию интерфейса между SourceLink и контроллерами Force 3, обеспечивая надежную передачу данных и синхронизацию. UE3 оснащен высокоточным GPS-модулем, который обеспечивает временную дисциплину с точностью до микросекунд, что критически важно для синхронизации вибраторов в сложных условиях. Устройство поддерживает до 16 флотов вибраторов на один UE3, что делает его универсальным решением для крупных сейсмических проектов. Кроме того, UE3 совместим с широким спектром радиосистем, включая аналоговые, цифровые и Ethernet-радио, что позволяет адаптировать систему под различные условия эксплуатации.



Рисунок 5 - Universal Encoder 3, входящий в систему UHPV

Контроллер Force 3 (Рисунок 6) является ядром управления вибраторами, обеспечивая точное выполнение свипов (вибрационных сигналов) даже в сложных геологических и климатических условиях. Force 3 оснащен совре-

менными аналого-цифровыми преобразователями (ADC), которые гарантируют высокое разрешение свипов (24 бита), а также встроенной памятью объемом 8 ГБ для автономной работы в условиях отсутствия радиосвязи. Контроллер поддерживает как интегрированный, так и автономный режимы работы, что делает его универсальным инструментом для различных сценариев сейсморазведки.



Рисунок 6 - Контроллер Force 3, входящий в систему UHPV

Система UHPV выделяется своей способностью обеспечивать сверхвысокую производительность, что подтверждается показателями более 50 000 выстрелов за 24-часовой рабочий день. Это достигается за счет ряда технических инноваций, которые делают систему уникальной в своем классе.

Во-первых, высокая степень автоматизации и автономности. Контроллеры Force 3 могут работать в автономном режиме, сохраняя данные о свипах и временных метках в условиях отсутствия радиосвязи. Это особенно важно в удаленных или труднодоступных районах, где традиционные системы управления могут быть ограничены. Автономный режим поддерживается

встроенной памятью и GPS-модулем, который обеспечивает точное позиционирование и синхронизацию.

Во-вторых, система поддерживает широкий спектр техник сейсмической аквизиции, включая Conventional Slip-Sweep, HFVS (ExxonMobil), ZenSeis (ConocoPhillips) и Variable Slip with Distance Interleaved. Это позволяет операторам адаптировать систему под конкретные геологические задачи, будь то разведка нефтегазовых месторождений или изучение сложных тектонических структур. Гибкость в переключении между техниками без необходимости перенастройки оборудования повышает производительность экипажей.

В-третьих, коммуникационная инфраструктура системы UHPV, основанная на VibLink и NavLink, решает проблему управления большими флотами вибраторов. Традиционные системы часто сталкиваются с коллизиями сообщений при увеличении числа вибраторов, что приводит к замедлению процессов. VibLink устраняет эту проблему за счет использования TDMA, обеспечивая быструю и надежную передачу данных. NavLink, в свою очередь, позволяет каждому вибратору самостоятельно принимать решения на основе заранее заданных правил, что снижает зависимость от центрального управления и ускоряет выполнение операций.

Кроме того, система UHPV демонстрирует высокую совместимость с другими компонентами Seismic Source Co., такими как Boom Box 3 (для взрывных источников) и Remote Trigger Module 3 (для механических импульсных источников). Это делает UHPV универсальной платформой, способной управлять не только вибраторами, но и другими типами сейсмических источников, включая динамитные заряды, пневматические пушки и весовые ударные устройства.

Следующее типовое решение, которое было рассмотрено, это система GDS-II, созданная компанией Geospace Technologies [3]. Эта система представляет собой универсальное решение для управления вибраторами и дру-

гими сейсмическими источниками, отличающееся высокой функциональностью, надежностью и поддержкой современных методов аквизиции данных.

Система GDS-II (Рисунок 7) разработана как многофункциональная платформа, способная выполнять задачи как кодировщика, так и декодировщика в одном устройстве. Такая универсальность позволяет использовать контроллер в различных ролях в зависимости от требований проекта, будь то управление одиночным вибратором, координация работы флота или интеграция с импульсными и динамитными источниками. Конструкция системы ориентирована на обеспечение высокой надежности и производительности, что достигается за счет сочетания аппаратных решений, передового программного обеспечения и продвинутых коммуникационных технологий.



Рисунок 7 – Система управления вибратором GDS-II

Одной из ключевых особенностей GDS-II является ее полная совместимость со всеми гидравлическими вибраторами, представленными на рынке. Это достигается благодаря автоматической калибровке, которая адаптирует систему к характеристикам каждого конкретного вибратора. Такой под-

ход минимизирует время на настройку и повышает точность генерации сигналов, что особенно важно при работе с разнородными парками оборудования. Встроенные вдвоенные акселерометры обеспечивают дополнительную надежность, позволяя системе контролировать параметры вибрации даже в условиях нештатных ситуаций, таких как выход из строя одного из датчиков.

Коммуникационная инфраструктура GDS-II включает встроенный TDMA-радиомодем, работающий в реальном времени. Технология TDMA (Time Division Multiple Access) позволяет передавать данные в строго заданных временных окнах, исключая коллизии и обеспечивая стабильную связь даже при управлении большими флотами вибраторов. В дополнение к этому, система поддерживает голосовое радио, что упрощает координацию между операторами в полевых условиях. Встроенная радиосеть обеспечивает сбор данных о готовности группы вибраторов, расчет центра гравитации флота, передачу PSS (Pilot Sweep Signal) и раздачу RTCM-коррекций для GPS-приемников, что повышает точность позиционирования и синхронизации.

Система оснащена встроенным GPS-приемником, дополненным возможностью подключения внешнего GPS-модуля. Это обеспечивает микросекундную точность синхронизации, необходимую для выполнения сложных техник аквизиции, таких как ZenSeis или ISS/DSSS. Наличие двух USB-портов позволяет записывать сигналы вибратора (включая опорный сигнал, данные акселерометров, GPS и датчиков перемещения) и взаимодействовать с планшетным ПК для навигации, контроля качества и управления. Эти функции делают GDS-II не только системой управления, но и полноценным инструментом для мониторинга и анализа данных в реальном времени.

Программное обеспечение GDS-II является одним из главных преимуществ системы, предоставляя операторам интуитивный интерфейс и широкий набор функций для управления сейсмическими работами. Оно поддерживает несколько режимов работы, включая режим оператора станции, контроля качества и навигации, а также режимы «ведущий» и «ведомый» для разных станций. Это позволяет гибко распределять роли между контролле-

рами в зависимости от структуры проекта, будь то централизованное управление или распределенная сеть устройств.

Система совместима как с кабельными, так и с нодальными сейсмическими станциями, что делает ее универсальным решением для различных типов проектов. Поддержка многоязычного интерфейса упрощает использование GDS-II в международных командах, снижая барьеры для операторов из разных регионов. Одной из уникальных функций является адаптивный режим управления спектром сигнала, который позволяет оптимизировать параметры свипов в реальном времени в зависимости от геологических условий. Это особенно важно для работы в сложных средах, таких как мягкие грунты или регионы с высоким уровнем помех.

Программное обеспечение включает многооконный режим карты, позволяющий одновременно отображать данные для каждой группы вибраторов. Поддержка форматов SPS (SPS, RPS, XPS) и SP1, а также интеграция с Google KML, обеспечивает удобную работу с геопространственными данными. Карта отображает центр группы, выполненные пикеты и активные приемники, что упрощает навигацию и контроль за ходом работ. Функция выбора активного пикета и настройки для управления спил-свипом и ограничений по дистанции между группами вибраторов повышает точность выполнения операций и минимизирует риск перекрытия сигналов.

GDS-II поддерживает широкий спектр высокопроизводительных методов аквизиции, включая HFVS (ExxonMobil), Slip-Sweep (Shell), ZenSeis (ConocoPhillips) и ISS/DSSS (BP). Эти техники позволяют одновременно использовать несколько вибраторов, что значительно увеличивает производительность экипажей. Система способна обрабатывать до четырех одновременных пилот-сигналов на каждом энкодере, что обеспечивает гибкость при выполнении сложных сценариев. Запись данных на USB-накопитель включает опорный сигнал, ускорения реакционной массы и плиты, GPS-координаты, а также параметры датчиков перемещения и тока золотника, что делает GDS-II ценным инструментом для последующего анализа и контроля качества.

Система GDS-II отличается высокой надежностью и адаптивностью, что подтверждается ее техническими характеристиками. Контроллер имеет компактную конструкцию, дополненную навигационным планшетом с креплением в кабине вибратора, что упрощает управление в полевых условиях. Встроенный GPS-модуль с поддержкой RTCM-коррекций обеспечивает точность позиционирования, критически важную для выполнения высокопроизводительных техник. TDMA-радиомодем, работающий в реальном времени, гарантирует стабильную связь даже в условиях высокой нагрузки, что особенно актуально для проектов с большим числом вибраторов.

Сдвоенные акселерометры повышают надежность системы, позволяя продолжать работу при отказе одного из датчиков. Автоматическая калибровка под каждый вибратор минимизирует время на подготовку и обеспечивает оптимальные параметры генерации сигналов. Наличие двух USB-портов и внешней USB-памяти позволяет хранить большие объемы данных, включая полные записи свипов и параметры работы вибратора. Это делает GDS-II удобной для проектов, требующих детального анализа и документирования.

Система поддерживает работу не только с вибраторами, но и с импульсными и динамитными источниками, что расширяет ее область применения. Управление такими источниками осуществляется через отдельный режим TDMA-модема, что демонстрирует универсальность GDS-II. Поддержка различных языков в управляющем ПО и на дисплее контроллера упрощает взаимодействие с системой, особенно в многонациональных командах.

Одним из главных преимуществ GDS-II является ее способность работать в сложных условиях, включая пустыни, горные районы и арктические регионы. Надежная радиосеть и встроенный GPS-модуль обеспечивают стабильную работу даже при отсутствии внешней инфраструктуры. Функции контроля качества, такие как проверка параметров системы и их контрольных сумм, предотвращают несанкционированные изменения, что повышает надежность и безопасность эксплуатации.

Заключительным типовым решением системы управления была рассмотрена система Vib Pro HD (Рисунок 8), созданная компанией INOVA Geophysical [25]. Эта система представляет собой высокотехнологичное решение для управления вибраторами в сейсморазведке, обеспечивая точное выполнение свипов, минимизацию искажений и высокую производительность.

Система Vib Pro HD разработана для обеспечения высокой производительности и точности при выполнении сейсмических свипов в различных геологических и климатических условиях. Она представляет собой комплексное решение, включающее аппаратные компоненты, встроенное программное обеспечение и коммуникационные модули, которые совместно обеспечивают управление вибраторами и сбор данных. Основной акцент в конструкции системы сделан на повышение качества генерируемого сигнала, снижение гармонических искажений и адаптацию к разнообразным условиям эксплуатации.



Рисунок 8 – Система управления сейсмоисточником Vib Pro HD

Центральным элементом системы является контроллер Vib Pro HD, который выполняет функции как кодировщика, так и декодировщика. Это позволяет гибко конфигурировать устройство в зависимости от требований конкретного проекта, будь то управление отдельным вибратором или синхронизация целого флота. Контроллер оснащен мощным вычислительным модулем, который обеспечивает высокую точность управления и обработки данных в реальном времени. Увеличенная вычислительная мощность позволяет системе справляться с сложными задачами, такими как выполнение свипов с низкой частотой или в условиях высокой нагрузки.

Одной из ключевых особенностей Vib Pro HD является интеграция запатентованных технологий INOVA, таких как Harmonic Distortion Reduction (HDR) Control™ и Low Frequency Limit (LFL) Control™. Технология HDR Control использует нелинейные алгоритмы компенсации для минимизации гармонических искажений, что позволяет генерировать более чистый сигнал с высокой фундаментальной силой. Это особенно важно для повышения отношения сигнал/шум, что напрямую влияет на качество собираемых данных. Технология LFL Control оптимизирует выполнение низкочастотных линейных свипов, позволяя использовать короткие переходные участки (tapers) без превышения физических ограничений вибратора. Эти инновации делают Vib Pro HD уникальной системой, способной работать в условиях, где традиционные контроллеры сталкиваются с ограничениями.

Коммуникационная инфраструктура Vib Pro HD включает поддержку проводного и беспроводного Ethernet, а также динамическую TDMA (Time Division Multiple Access) радиосвязь, которая обеспечивает передачу данных без коллизий. Это позволяет эффективно управлять большими флотами вибраторов, минимизируя задержки и обеспечивая надежную синхронизацию. Система также поддерживает как аналоговые, так и цифровые радиосигналы, что делает ее совместимой с широким спектром оборудования и условий эксплуатации.

Система Vib Pro HD отличается высокими техническими характеристиками, которые делают ее подходящей для самых требовательных сейсмических проектов. Контроллер работает в широком диапазоне входного напряжения (9–36 В постоянного тока), что обеспечивает его надежность в полевых условиях с нестабильным питанием. Точность синхронизации времени старта составляет 120 микросекунд, что достигается за счет использования внешнего GPS-модуля, подключаемого через 9-контактный разъем. Это гарантирует высокую временную дисциплину, необходимую для синхронизации вибраторов в сложных техниках аквизиции.

Разрешение свипов составляет 24 бита, а частота дискретизации системы управления достигает 0,25 миллисекунд, что обеспечивает высокую точность воспроизведения сигнала. Встроенная память позволяет хранить до 32 различных свипов, а данные VSS (Vibrator Signature Signal) и PSS (Pilot Sweep Signal) записываются и хранятся непосредственно в контроллере. Для передачи данных предусмотрены интерфейсы USB, Ethernet и беспроводной доступ, что упрощает интеграцию с сейсмическими рекордерами и обработку информации в реальном времени.

Vib Pro HD поддерживает передовые техники высокопроизводительной сейсморазведки, включая ISS (Independent Simultaneous Sources), DSS (Distance Separated Simultaneous Sources) и DSSS (Distance Separated Simultaneous Sweeping). Эти методы позволяют одновременно использовать несколько вибраторов, что значительно увеличивает производительность экипажей. Система также включает режим низкой силы воздействия на грунт, предназначенный для работы в экологически чувствительных зонах, что демонстрирует ее адаптивность к современным требованиям экологической безопасности.

Физические характеристики Vib Pro HD также заслуживают внимания. Контроллер имеет компактные размеры (406 × 305 × 152 мм без амортизаторов) и вес 10 кг, что делает его удобным для транспортировки и установки на вибраторах. Отсутствие встроенных акселерометров и радиомодулей

(они поставляются отдельно) позволяет гибко настраивать систему под конкретные задачи, минимизируя затраты на ненужные компоненты.

В таблице 1 представлен сравнительный анализ трех выбранных аналогов устройств. Они оценивались по таким характеристикам, как архитектура и универсальность, технические характеристики, программное обеспечение и другие.

Таблица 1 – Сравнительный анализ выбранных аналогов систем управления сейсмоисточником

Критерий	Vib Pro HD (INOVA Geophysical)	GDS-II (Geospace Technologies)	Seismic Source Co. (Boom Box/Force 3)
Архитектура и универсальность	Контроллер с модульной конструкцией, без встроенных акселерометров и радиомодулей	Универсальная платформа с встроенными акселерометрами и поддержкой различных источников	Специализированные контроллеры, менее универсальны
Технические характеристики	24 бита, 0.25 мс, точность синхронизации 120 мкс, требует дополнительных компонентов	Высокая точность синхронизации, поддержка нескольких сигналов	Высокая точность синхронизации, 24 бита, компактные размеры
Коммуникационные возможности	Проводной и беспроводной Ethernet, поддержка радиосигналов	TDMA-радиосвязь, поддержка голосовой и радиосвязи	Простая радиосвязь, поддержка Ethernet
Совместимость	Совместимость с большинством рекордеров и вибраторов	Полная совместимость с вибраторами, кабельными и нодальными станциями	Ограниченная поддержка вибраторов и взрывных источников
Программное обеспечение	Интуитивный интерфейс, поддержка больших флотов	Многоязычный интерфейс, режимы контроля качества	Простой интерфейс, ограниченная поддержка многоязычности
Экологическая адаптивность	Минимизация экологического ущерба в сложных условиях	Адаптивность к сложным климатическим условиям	Адаптация к различным условиям, но без экологических режимов
Преимущества	Чистый сигнал, высокая производительность, совместимость с разным оборудованием	Универсальность, надежность, сложные техники аквизиции	Простота, надежность, экономичность

1.3 Обзор решений гальванической развязки для подачи сигналов управления от микроконтроллера и снятия сигналов обратной связи с силовых частей объекта управления

В современных системах управления, особенно в тех, что связаны с высоковольтными или высокомоощными исполнительными механизмами, чрезвычайно важно обеспечить электрическую изоляцию между логической частью (микроконтроллером или процессором) и силовой частью устройства. Такая изоляция, или гальваническая развязка, необходима для предотвращения проникновения импульсных помех, высокого напряжения или токов обратной ЭДС от силовой части к управляющей. В противном случае это может привести к выходу из строя чувствительных электронных компонентов, а также к ложному срабатыванию алгоритмов управления. Кроме того, гальваническая развязка обеспечивает безопасность персонала и соответствие требованиям электробезопасности [17]. Рассмотрим три основных метода реализации гальванической развязки в контексте передачи управляющих сигналов и снятия сигналов обратной связи: оптронные изоляторы (оптопары), цифровые изоляторы на основе трансформаторной или ёмкостной связи, а также трансформаторная развязка с использованием драйверов затвора для силовых транзисторов.

Первый подход, классический и до сих пор широко применяемый — это оптопары (Рисунок 9). Они состоят из светодиода и фототранзистора, размещённых в одном корпусе, при этом между входной и выходной частями нет электрической связи. При подаче управляющего сигнала на светодиод, он начинает излучать свет, который попадает на фототранзистор. Последний, в зависимости от интенсивности света, открывается и пропускает ток, формируя логическую единицу или ноль. Таким образом, сигнал "переносится" с одной стороны на другую без участия электрического контакта. Наиболее распространённые модели включают в себя такие компоненты, как PC817,

TLP521, TLP250, а также высокоскоростные оптроны, например, 6N137. Оптроны просты в применении, легко интегрируются в любые печатные платы, обладают высоким напряжением изоляции — до 5 кВ, и имеют широкий диапазон рабочих температур. Их основным преимуществом является доступность и низкая цена, а также хорошо изученные параметры. Однако у этого метода есть и значительные ограничения. Прежде всего — это сравнительно низкая скорость передачи сигнала: для дешёвых моделей она составляет порядка 10–50 кГц, в более дорогих — до нескольких мегагерц. Кроме того, в силу того, что в оптопаре используется светодиод, её характеристики могут со временем деградировать — из-за старения материала светодиода и изменения чувствительности фототранзистора [15]. Это требует учитывать температурный дрейф, а также планировать регулярные испытания системы на работоспособность. Тем не менее, в задачах управления медленными исполнительными элементами, таких как электромагнитные реле, соленоиды или транзисторы с низкой частотой переключения, оптопары по-прежнему являются надёжным и востребованным решением.

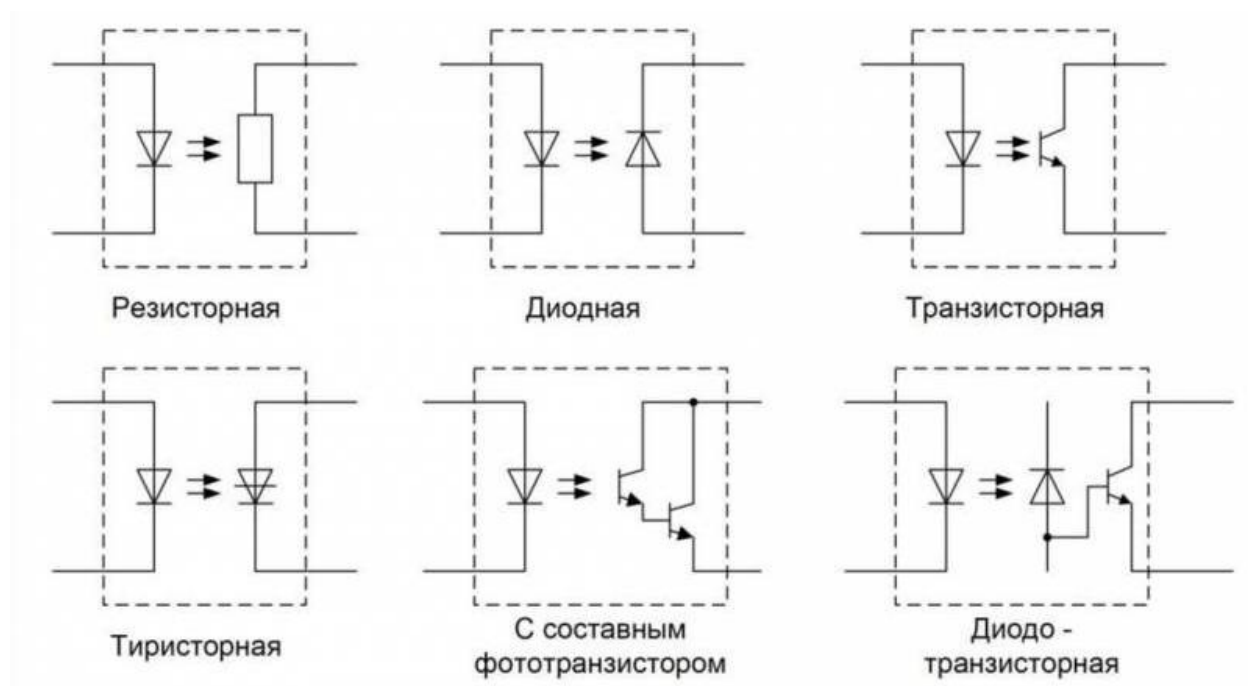


Рисунок 9 – Схематическое изображение различных типов оптопар

Второй подход, более современный и технически совершенный — это цифровые изоляторы (Рисунок 10), основанные на передаче сигнала через внутренний высокочастотный трансформатор или ёмкостную связь. Эти компоненты обычно представляют собой интегральные схемы, внутри которых реализован модуль кодирования, передающий сигнал от входа к выходу без электрического соединения [24]. Среди известных моделей можно назвать компоненты серий ADuM1201, ISO7221 и Si86xx. Преимущество этого подхода — высокая скорость передачи информации: некоторые изоляторы обеспечивают работу на частотах до 150 Мбит/с, что в десятки и сотни раз превосходит возможности оптронов. Кроме того, цифровые изоляторы не подвержены деградации по оптическим причинам, что делает их более надёжными в долгосрочной эксплуатации. Их энергопотребление также существенно ниже, особенно в энергосберегающих режимах, а конструкция может включать дополнительные полезные функции, например, защита от обрыва сигнала, внутренний "watchdog", поддержка двунаправленных каналов и различные варианты логики. Из недостатков стоит отметить их стоимость — они обычно в 2–3 раза дороже стандартных оптронов, а также чувствительность к паразитным емкостям и неправильному размещению на плате: трассировка земли и питания должна быть выполнена строго по рекомендациям производителя [24]. Тем не менее, цифровые изоляторы становятся всё более популярными, особенно в задачах высокоскоростной передачи данных — например, в интерфейсах SPI, UART, CAN, I2C, а также для управления транзисторами в импульсных режимах.

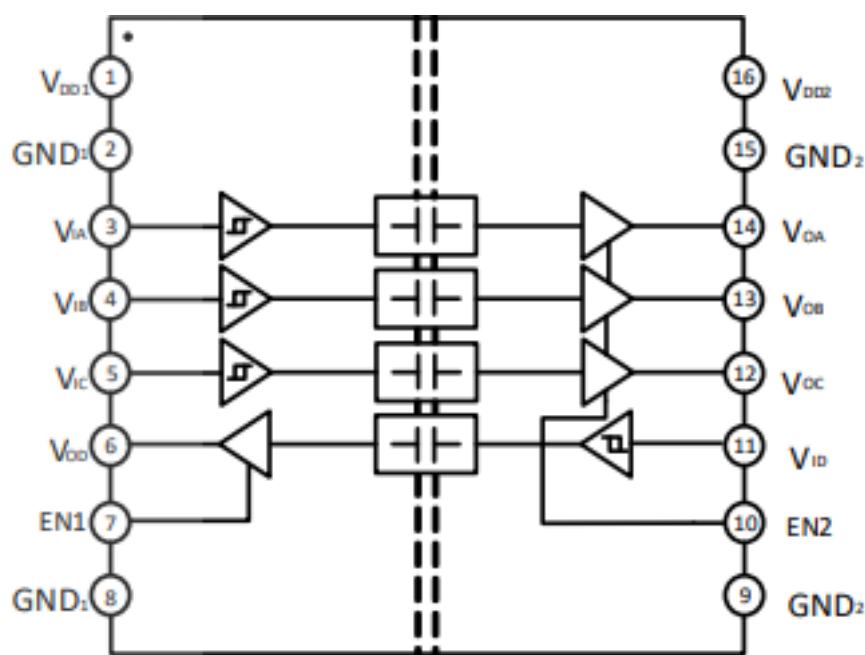


Рисунок 10 – Функциональная схема цифрового изолятора

Третий подход, применяемый в основном в силовой электронике и при управлении мощными ключами (MOSFET, IGBT), — это гальваническая развязка на базе трансформаторов и драйверов затвора. В этом случае управляющий сигнал от микроконтроллера преобразуется в высокочастотный импульс, передаётся через специальный импульсный трансформатор на силовую часть схемы, где через драйвер формируется нужный фронт сигнала для открытия или закрытия силового транзистора. Примером подобной реализации может быть использование драйвера IR2110 или аналогичных, с дополнительной развязкой питания для "высокой" и "низкой" стороны [10]. Этот метод обеспечивает отличную развязку как по сигналу, так и по питанию. Он позволяет управлять транзисторами, находящимися на "плавающем" потенциале, и не требует соединения между логической и силовой землёй. Преимуществом трансформаторной развязки является очень высокая устойчивость к электромагнитным помехам, способность работать при больших уровнях напряжения (до сотен вольт и выше), а также возможность "разнести" управляющую и силовую части на значительное расстояние [14]. Главным ограничением здесь является сложность: такая система требует генера-

ции ШИМ-сигналов высокой частоты, согласования импедансов, обеспечения надёжного питания для драйверов и настройки параметров трансформатора [17]. Это делает её менее удобной для простых проектов, однако незаменимой в преобразователях, импульсных источниках питания, электроприводах и инверторах. Сравнительный анализ выбранных решений гальванической развязки представлен в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительный анализ выбранных решений гальванической развязки

Характеристика	Оптопара (PC817 и аналоги)	Цифровой изолятор (ADuM, ISO)	Трансформатор + драйвер (IR2110)
Тип сигнала	Аналог/Цифровой	Только цифровой	Импульсный (ШИМ)
Напряжение развязки	до 5000 В	до 5000 В	до 5000 В и выше
Скорость передачи	10 кГц – 1 МГц	до 150 Мбит/с	до 1 МГц (зависит от схемы)
Помехоустойчивость	Средняя	Высокая	Очень высокая
Стоимость	Низкая	Средняя/высокая	Средняя (при массовом производстве)
Поддержка двунаправленного сигнала	Нет	Да (некоторые модели)	Частично
Необходимость внешнего питания	Нет	Иногда (если с питанием развязки)	Да (силовая сторона)

2 Разработка системы управления

2.1 Анализ объекта управления. Выделение необходимых каналов управления и обратной связи

Объектом управления в рамках данной работы является индукционно-динамический сейсмоисточник, предназначенный для генерации механических колебаний определённой частоты и амплитуды, используемых в инженерной сейсморазведке. Принцип действия основан на взаимодействии электромагнитного поля с подвижной массой, вызывающим её колебания и, как следствие, генерацию сейсмических волн в грунте.

Современные сейсмоисточники данного типа обладают высокой надёжностью, мобильностью и возможностью тонкой настройки параметров возбуждения. Их применение особенно актуально при проведении неразрушающего контроля и инженерно-геофизических изысканий в черте города, где применение взрывчатых источников невозможно или ограничено [2].

С точки зрения автоматизированной системы управления, сейсмоисточник представляет собой механизм с электромагнитным возбуждением, управление которым осуществляется посредством микроконтроллера. Основными параметрами, подлежащими регулированию и мониторингу, были выявлены: частота и амплитуда колебаний; время возбуждения; текущий ток и напряжение на обмотке; температура исполнительных элементов; диагностические сигналы (аварийные режимы, перегрев и др.) [7].

Таким образом, система управления должна включать каналы как прямого воздействия (управления), так и обратной связи, обеспечивающей замкнутый цикл контроля.

В первую очередь необходим канал, управляющий запуском и остановкой возбуждения. Это цифровой тип сигнала (GPIO). Далее требуется канал, задающий необходимую частоту вибраций. Тип сигнала, проходящий по этому каналу, цифровой или ШИМ. Также необходим канал, задающий ам-

плитуду возбуждения. По нему определяется сила тока в обмотке возбуждения. Тип сигнала – ЦАП или ШИМ. Также необходимо иметь возможность выбирать режим работы, загружать профиль возбуждения. Для этого необходим канал с типом сигнала UART или RS-485 [23].

В качестве каналов обратной связи необходимы следующие каналы. Во-первых, канал, контролирующий силу тока в исполнительной обмотке сигналом аналогового типа. Во-вторых, канал, контролирующий уровень питания на обмотке сигналом аналогового типа. В-третьих, канал, обеспечивающий защиту от перегрева, позволяющий отключать систему при перегреве корпуса или обмотки. Сигнал данного канала, также, аналоговый. В-четвертых, необходимо иметь возможность получать подтверждение выполнения команды, проверять частоту и факт возбуждения. Для этого требуется канал с сигналом цифрового типа, энкодер. В-пятых, требуется канал для сбора диагностических данных [7].

На основании выделенных каналов были разработаны технические требования к микроконтроллеру для системы управления сейсмоисточником индукционно-динамического типа: наличие цифровых GPIO для управления исполнительными сигналами; наличие аналоговых входов с разрешением не менее 12 бит; наличие ШИМ-выходов с частотной модуляцией; наличие встроенного ЦАП (или возможность программной реализации); поддержка интерфейса UART/RS-485 для связи с удалёнными устройствами и диагностики; наличие таймеров и систем обработки прерываний для точного формирования сигнала.

Исходя из определенных каналов управления и обратной связи на анализ было выбрано 3 микроконтроллера.

Первым рассматривается микроконтроллер STM32F103C8T6 (Рисунок 11). С точки зрения электромагнитной совместимости данный микроконтроллер проявляет себя достаточно устойчиво в полевых условиях при условии минимального соблюдения правил компоновки схемы. Его внутренняя архитектура и тактовая частота 72 МГц позволяют уверенно использо-

вать устройство вблизи мощных катушек возбуждения, особенно если обмотка и контроллер физически разнесены. Тем не менее, отсутствие встроенного ЦАП потребует подключения внешних цифро-аналоговых преобразователей по SPI или применения RC-фильтров с ШИМ, что увеличивает число аналоговых трактов и снижает помехозащищённость. Любая длинная аналоговая линия вблизи силовых кабелей требует экранирования и развязки. С точки зрения ресурсоёмкости реализации, STM32F103 — это самый простой и экономически доступный вариант. Под него существует обширная поддержка библиотек HAL и LL, множество примеров и документации [23]. Тем не менее, необходимость внешнего ЦАП, а также ограничения по точности ШИМ (особенно при генерации синусоидальных сигналов возбуждения) делают его менее удобным при построении высокоточных систем.



Рисунок 11 – Микроконтроллер STM32F103C8T6

Следующим был рассмотрен микроконтроллер STM32F303CCT6 (Рисунок 12). Данный микроконтроллер обладает значительно лучшей архитектурой с точки зрения ЭМС. У него оптимизированы аналоговые цепи, имеются встроенные двухканальные ЦАП 12 бит, несколько прецизионных АЦП

с возможностью синхронизации и обработки в реальном времени. Благодаря высокой точности и возможности полной цифровой фильтрации сигналов внутри МК снижается потребность в длинных аналоговых линиях, а значит и риск наводок от внешнего силового оборудования [23]. Встроенные ЦАП обеспечивают стабильный аналоговый сигнал без необходимости внешнего преобразователя, что особенно важно в условиях высоких ЭМП. Ресурсоёмкость реализации на STM32F303 несколько выше: требуется более сложная настройка аналоговых модулей, таймеров и DMA-режимов. Однако благодаря высокой степени интеграции и наличию всех необходимых функций внутри одного кристалла система получается максимально компактной и устойчивой. Данный микроконтроллер требует продвинутого уровня проектирования, но взамен предоставляет высочайшую точность и устойчивость к промышленным помехам. Это идеальный выбор для систем, где точность возбуждения и надёжность являются критичными.



Рисунок 12 – Микроконтроллер STM32F303CCT6

Последним был рассмотрен микроконтроллер ESP32 (Рисунок 13). ESP32 является очень производительным, но наименее защищённым в плане ЭМС среди рассмотренных решений. Высокая тактовая частота (240 МГц), встроенные радиомодули (Wi-Fi, Bluetooth), а также особенности питания (высокие броски тока, чувствительность к шуму по питанию) делают его уязвимым к наводкам, особенно в условиях мощных импульсов в обмотках сейсмоисточника [19]. Наличие радиочастотных трактов требует строгого экранирования и физического отделения от силовых компонентов. Даже при хорошей компоновке схемы велика вероятность сбоев при работе вблизи индукционно-динамических узлов возбуждения. Реализация системы на ESP32 требует значительных усилий: необходимо продумывать архитектуру питания, защита GPIO, использование стабилизаторов с низким уровнем пульсаций, развязка аналоговых цепей и качественное заземление. При этом программная часть на ESP32 сложна из-за двухъядерной архитектуры и Real-Time FreeRTOS-среды. Учитывая также 8-битные ЦАП, получаем ограничения по качеству аналогового возбуждения. Основной плюс ESP32 — в возможности организации беспроводной телеметрии, но он может быть использован только в менее "агрессивной" с точки зрения ЭМП среде или в качестве вспомогательного модуля [8].

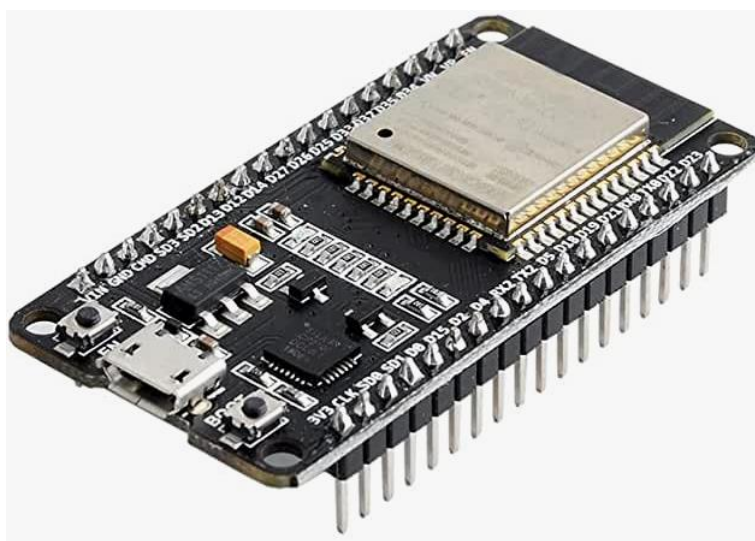


Рисунок 13 – Микропроцессорный модуль ESP32

Учитывая полный спектр факторов, влияющих на выбор микроконтроллера, от количества и типа необходимых каналов управления и обратной связи до устойчивости к электромагнитным помехам, а также технической и экономической реализуемости проекта, был выбран микроконтроллер STM32F303CCT6. Данный микроконтроллер обеспечивает высокую точность и устойчивость при работе в агрессивной электромагнитной среде, характерной для мощных индукционно-динамических устройств. Он оснащён всеми необходимыми встроенными средствами для реализации точной системы возбуждения и обратной связи. STM32F303 легко интегрируется в систему: вся периферия доступна внутри одного чипа, и не требуется дополнительных ЦАП или интерфейсных расширений. Это упрощает конструкцию, снижает количество внешних соединений и, как следствие, повышает надёжность. Он также хорошо масштабируется, если в будущем потребуется усложнить алгоритм возбуждения, ресурсов будет достаточно.

2.2 Построение структурной схемы системы управления

На рисунке 14 представлена структурная схема системы управления сейсмоисточником индукционно-динамического типа. Основные компоненты системы включают дисплей для визуализации данных, микроконтроллер для управления процессами, датчики и кнопки для взаимодействия с оператором. Также в схему входят элементы питания устройства, детектор напряжения для контроля энергопотребления и дискретный вход для обработки сигналов.

Дополнительные модули, такие как проводной и беспроводной интерфейсы, обеспечивают гибкость подключения и коммуникации. Оптопары используются для обвязки силовых выходов и генерации импульса на обмотку сейсмоисточника. Термистор, датчик тока и измерительный модуль на основе операционного усилителя позволяют точно контролировать темпера-

турные и электрические параметры системы, обеспечивая её стабильную и надёжную работу.

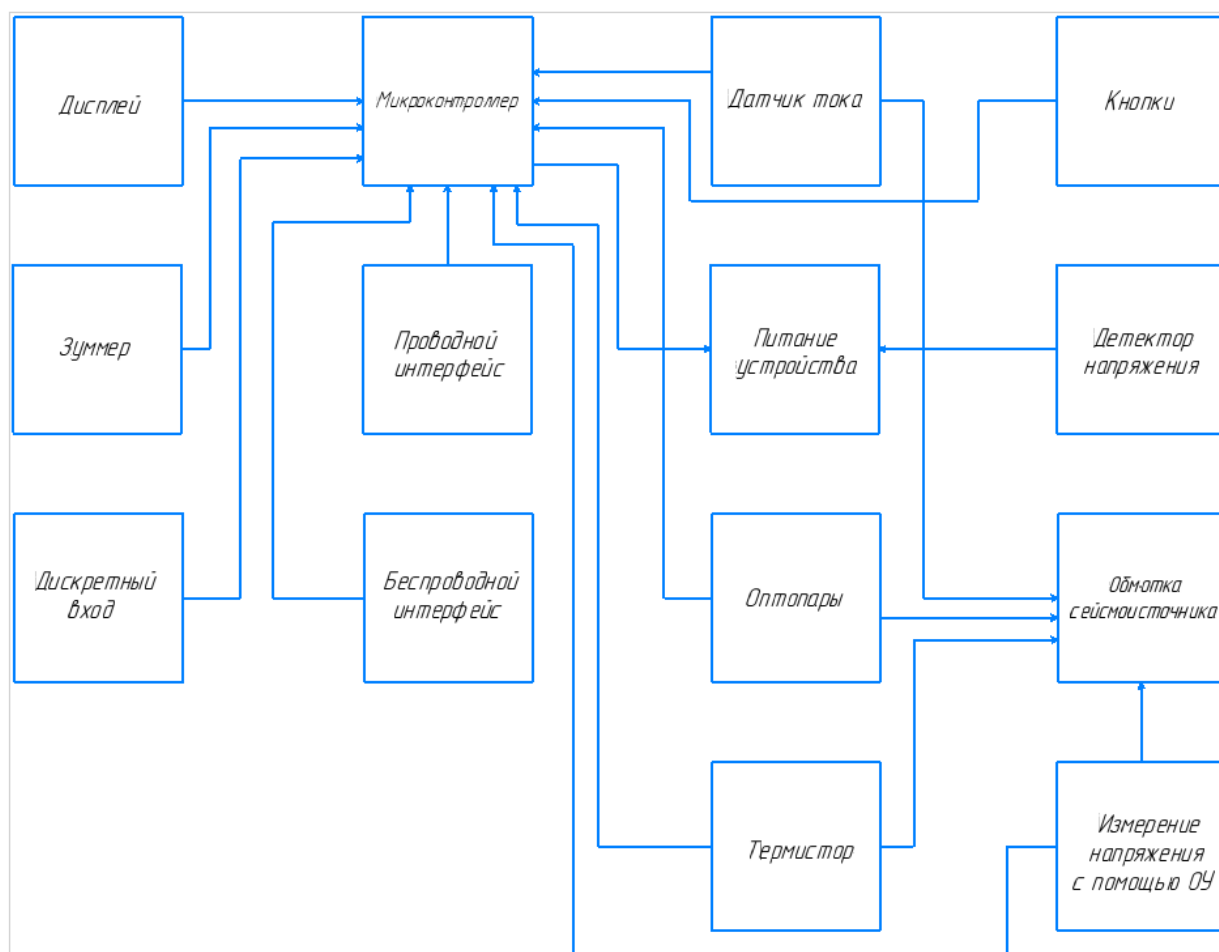


Рисунок 14 – Структурная схема системы управления сейсмоисточником

2.3 Разработка алгоритма управления и построение его блок-схемы

Алгоритм управления сейсмоисточником индукционно-динамического типа включает в себя несколько последовательных этапов, направленных на обеспечение точного формирования сигнала возбуждения, мониторинг параметров системы, а также защиту от возможных аварийных ситуаций. В процессе выполнения алгоритма выполняется настройка периферийных модулей микроконтроллера, сбор данных с датчиков, обработка команд и генерация управляющих сигналов. Все этапы работы системы

отображены в виде упрощенной блок-схемы, представленной на рисунке 15, которая наглядно демонстрирует последовательность операций и взаимодействие ключевых компонентов системы [1].

Алгоритм управления сейсмоисточником индукционно-динамического типа, построенный на базе микроконтроллера STM32F303CCT6, начинается с инициализации системы (блок 1). Этот этап включает настройку всех необходимых периферийных модулей, таких как таймеры, преобразователи (АЦП и ЦАП), порты ввода-вывода, UART-интерфейс и другие узлы. Таймеры конфигурируются для формирования импульсов с возможностью управления скважностью и частотой ШИМ-сигналов. АЦП настраиваются для синхронного сбора данных с датчиков тока, напряжения и температуры, а ЦАП — для генерации амплитудных уровней сигнала возбуждения, если требуется аналоговая форма сигнала. UART-интерфейс настраивается для двусторонней связи, через который осуществляется прием команд и передача телеметрии.

После инициализации система переходит в режим ожидания команды запуска, как показано в блоках 3 и 4. В этом состоянии микроконтроллер проверяет наличие команды запуска. Источник команды может быть аппаратным (кнопка, провод, реле) или поступить через UART-интерфейс. Параллельно с этим осуществляется проверка состояния системы: уровня питания (блок 2), температуры силовых компонентов, сигнала с датчика тока в обмотке возбуждения (блок 5). Если обнаружено отклонение от допустимых диапазонов, система блокирует запуск и формирует ошибку (блок 6).

При поступлении валидной команды запуска и удовлетворительных внутренних параметрах система инициирует подготовку к возбуждению (блок 7). На этом этапе устанавливаются параметры сигнала возбуждения, такие как амплитуда, длительность, форма сигнала и частота следования. Если возбуждение реализуется через ШИМ, то конфигурируется скважность сигнала. Микроконтроллер управляет ЦАП для подачи аналогового сигнала на усилитель мощности или драйвер силовых ключей.

Далее, при запуске возбуждения, активируются драйверы силовых ключей, и на обмотку возбуждения подается сформированный сигнал, как показано в блоке 7. Управление возбуждением может включать плавное нарастание и спад сигнала, что важно при работе с резонансными системами.

Во время возбуждения микроконтроллер продолжает мониторинг ключевых параметров, таких как ток через обмотку возбуждения, чтобы отслеживать режим насыщения, повышение тока, короткие замыкания и другие аварийные ситуации (блок 8). Для этого используются встроенные АЦП, работающие в режиме DMA или с прерываниями для непрерывного сбора данных. При превышении пороговых значений система немедленно отключает подачу сигнала возбуждения, деактивируя силовые ключи и фиксируя ошибку в памяти или передавая ее через UART.

После завершения возбуждения система переходит в фазу стабилизации (блок 9). В этом режиме продолжается сбор данных, анализируется остаточный ток в цепи возбуждения, проверяется температура силовых компонентов, оценивается состояние источника питания. При аномальных значениях (например, превышение температуры) система блокирует следующие возбуждения до восстановления нормальных параметров.

Параллельно с фазой стабилизации микроконтроллер формирует и отправляет телеметрию (пакет данных), включающий измеренные параметры и статус выполнения. Этот пакет передается через UART для мониторинга. При необходимости реализуется протокол подтверждения, позволяющий контроллеру или оператору принять решение о разрешении следующего запуска.

После завершения всех этапов алгоритм возвращается в исходное состояние ожидания команды. Если поступает новая команда, и все условия безопасности соблюдены, процесс запуска повторяется.

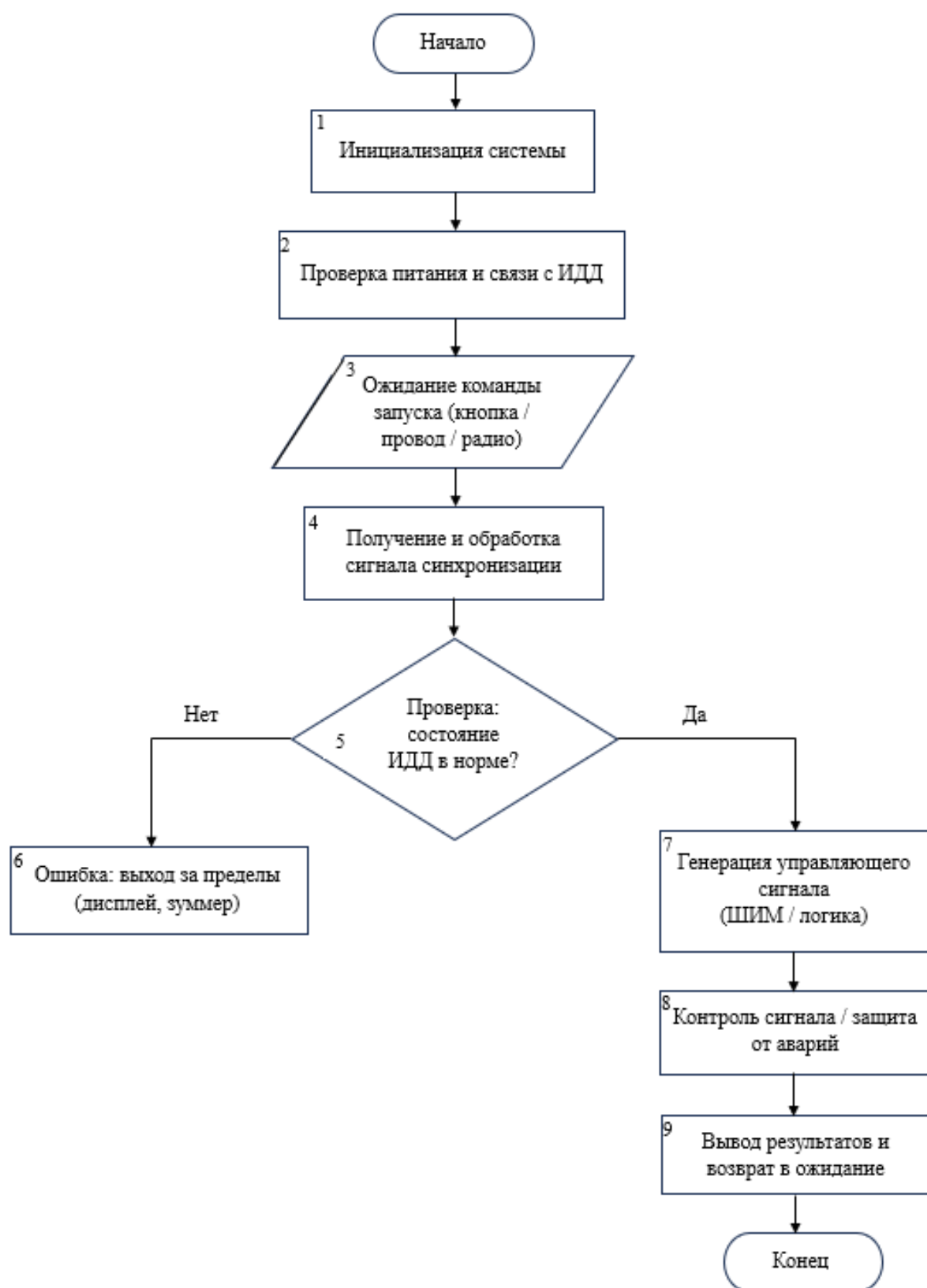


Рисунок 15 – Блок-схема алгоритма управления

2.4 Разработка схемы электрической принципиальной системы управления сейсмоисточником

Разработка принципиальной электрической схемы универсального роботизированного манипулятора проводилась в программе Altium Designer, в режиме Schematic с редактором компонентов.

Для системы управления сейсмоисточником был выбран микроконтроллер STM32F303CCT6. Он удовлетворяет все условия, оговорённые в задании. Сперва была разработана схема обвязки выбранного микроконтроллера STM32F303CCT6 (Рисунок 16). Технические характеристики STM32F303CCT6 представлены в таблице 3 [11].

Таблица 3 – Технические характеристики STM32F303CCT6

Параметр	Значение
Ширина шины данных	32-бит
Тактовая частота, МГц	72
Количество входов/выходов	37
Объем памяти, кбайт	256
Тип памяти	flash
Объем RAM	40k x 8
Встроенные интерфейсы	can, i2c, irda, lin, spi, uart, usb
Встроенная периферия	dma, i2s, por, pwm, wdt
Напряжение питания, В	2...3,6
Рабочая температура, °C	-40...+85
Вес, г	1,4

Для вывода информации был выбран графический LCD-дисплей на чипе ST7920 [12]. Для этого была разработана обвязка (Рисунок 17), представляющая собой подключение дисплея LCD-ST7920 (технические характеристики представлены в таблице 4) с использованием транзисторного переключателя и регулируемого стабилизатора напряжения. Источник питания +5 В подключен через транзистор BC847A с резистором к выходу, который управляет питанием дисплея. Земля (GND) соединена с общей точкой схемы.

Контраст регулируется через подстроечный резистор 3296Р, подключенный к +5 В через конденсатор 100 нФ для фильтрации.

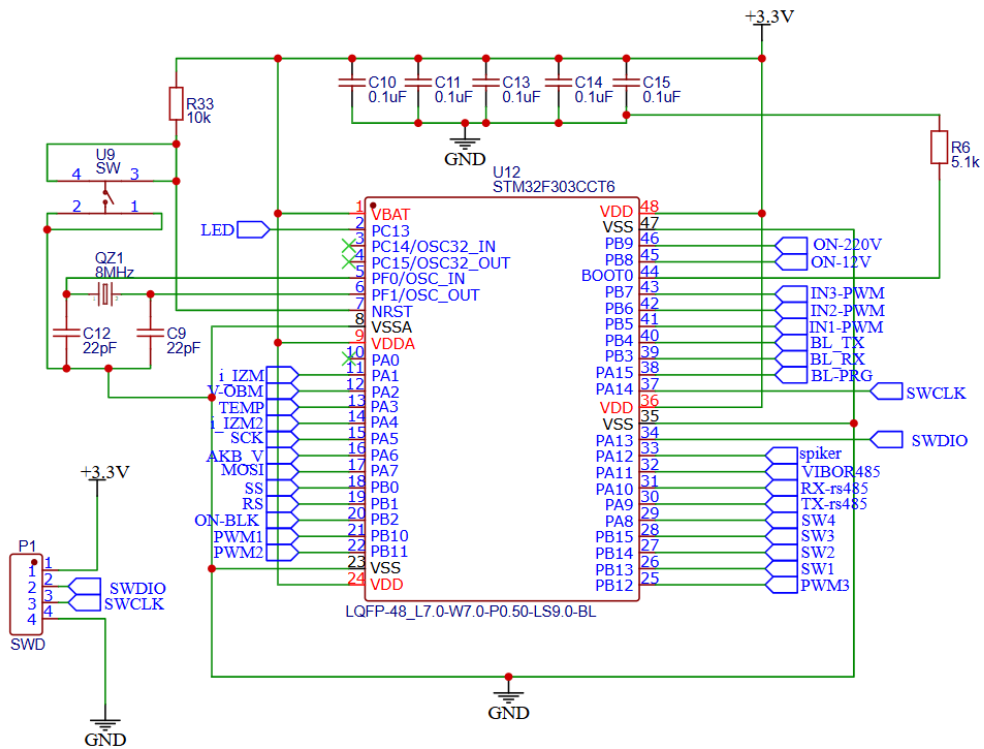


Рисунок 16 – Схема обвязки микроконтроллера STM32F303CCT6

Таблица 4 – Технические характеристики LCD-ST7920

Параметр	Значение
Напряжение питания модуля, В	4,5 ... 5,5
Напряжение питания подсветки В	3 ... 3,6
Рабочая температура, °С	-20 ... +70
Ток потребляемый модулем, мА	до 5
Ток потребляемый подсветкой, мА	до 60
Размер пикселей дисплея, мм	0,48 x 0,48
Шаг пикселей дисплея, мм	0,52 x 0,52
Вес, г	76

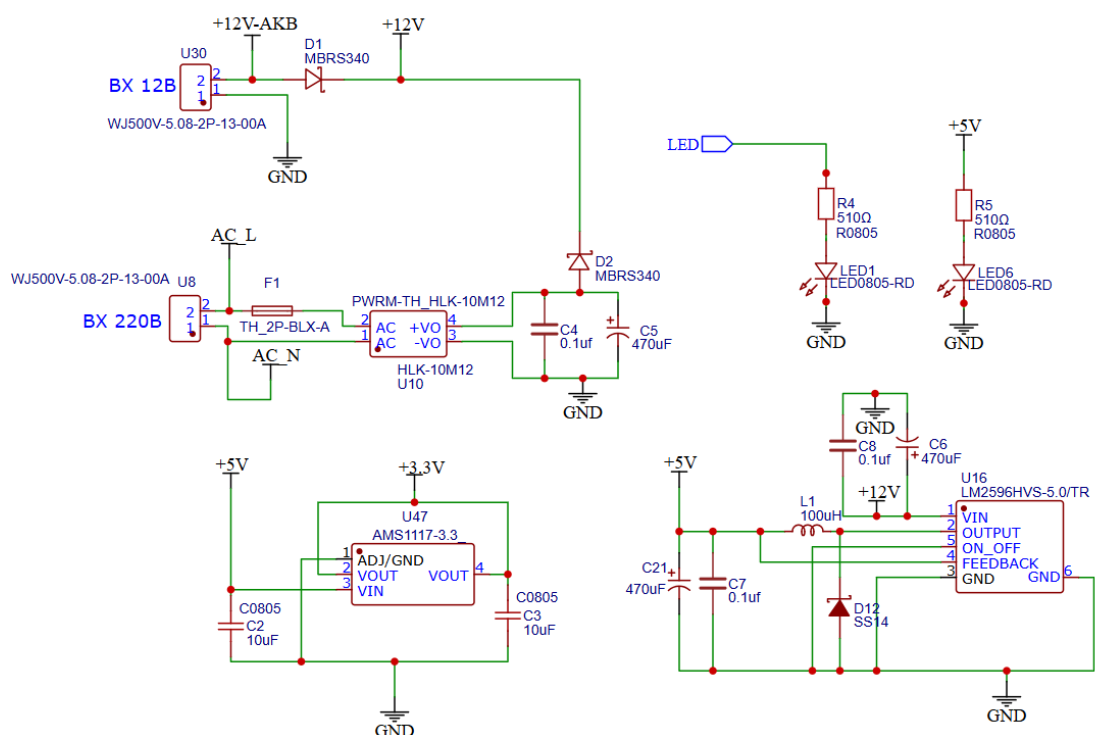


Рисунок 18 – Схема блока питания устройства от 220 В и от 12 В

Таблица 5 – Технические характеристики AMS1117-3,3

Параметр	Значение
Полярность	Положительная
Выходное напряжение, В	3,3
Максимальный ток нагрузки, А	0,8
Падение напряжения при I _{вых} , В	1,1
Максимальное входное напряжение, В	15
Рабочая температура, °C	-40...+125
Вес, г	0,39

Таблица 6 – Технические характеристики LM2596HVS-5,0

Параметр	Значение
Входное напряжение (Мин), В	7
Входное напряжение (Макс), В	57
Выходное напряжение (Мин/Фикс), В	5
Выходной ток, А	3
Частота переключения, кГц	150
Рабочая температура, °C	-40...+125
Вес, г	3

Проводной интерфейс для передачи информации RS-485 был реализован с использованием микросхемы ISO3082DW для гальванической развязки и преобразователя напряжения B0505S-1W. Источник +3.3 В подключается к ISO3082DW через конденсаторы для фильтрации [6]. Выходы микросхемы подключены к диодам SM712 для защиты от перенапряжения, а затем к линии RS-485. Источник +5 В через преобразователь B0505S-1W обеспечивает изолированное напряжение VCC2 для питания второй стороны микросхемы, с фильтрацией через конденсаторы. Технические характеристики микросхемы ISO3082DW представлены в таблице 7. Схема обвязки проводного интерфейса RS485 представлена на рисунке 19.

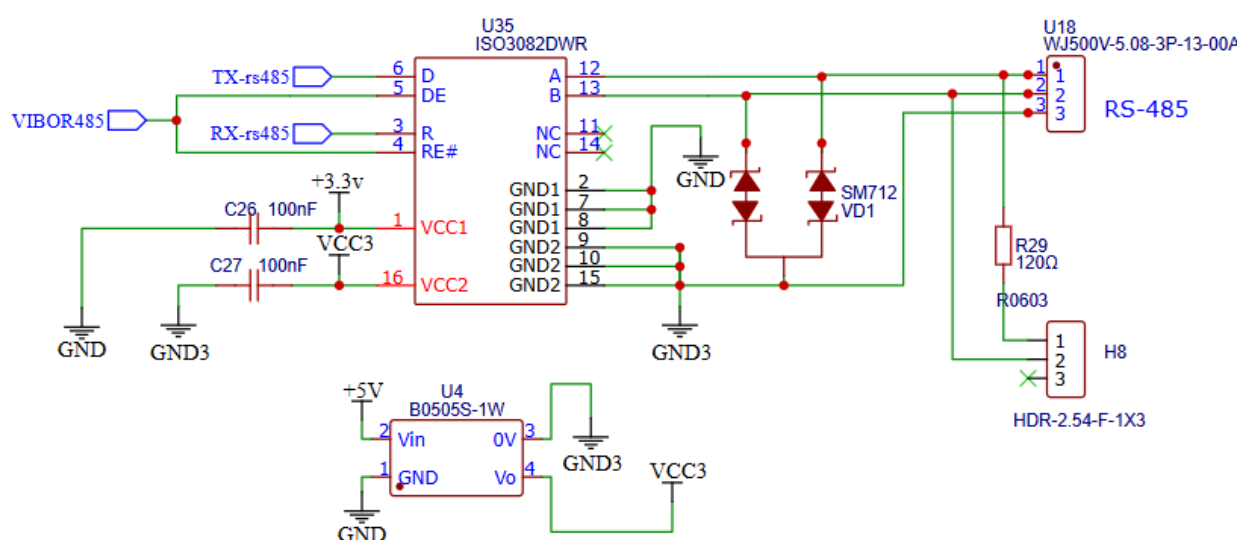


Рисунок 19 – Схема обвязки проводного интерфейса RS485

Таблица 7 – Технические характеристики ISO3082DW

Параметр	Значение
Количество каналов	3
Конфигурация каналов (прямые/обратные)	2/1
Полярность	однонаправленная
Количество каналов	3
Скорость передачи данных, кб/с	200
Напряжение питания, В	3,15...3,45; 4,75...5,25
Рабочая температура, °C	-40...+85
Вес, г	0,8

Беспроводная связь была реализована с помощью подключения модуля Bluetooth HC-06 для обеспечения беспроводной последовательной связи [20]. Схема подключения модуля изображена на рисунке 20. Технические характеристики модуля представлены в таблице 8. Модуль питается от +3,3 В через конденсатор. Светодиоды индицируют состояние модуля. Разъем BL-PRG используется для программирования и отладки модуля, обеспечивая доступ к основным линиям.

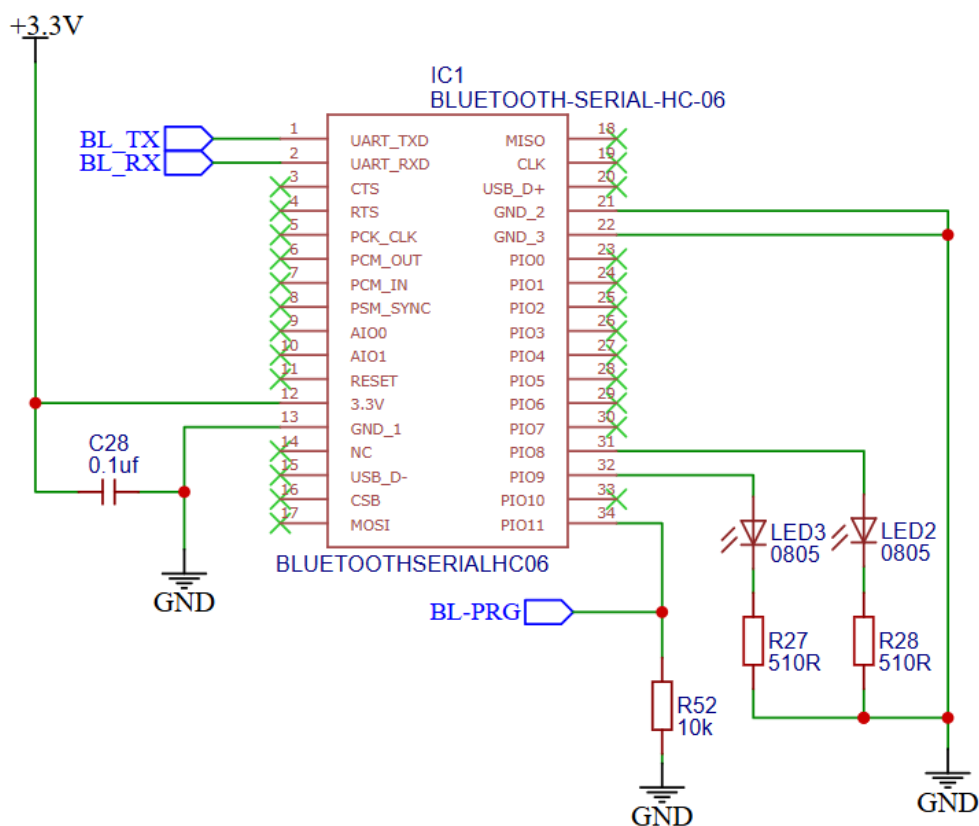


Рисунок 20 – Схема подключения Bluetooth HC-06

Таблица 8 – Технические характеристики Bluetooth HC-06

Параметр	Значение
Дальность связи, м	30
Напряжение питания, В	3,3...6
Скорость передачи данных, бод	1200 - 1382400
Потребляемый ток, мА	10
Рабочая частота, ГГц	2,4...2,48
Вес, г	6

Схема управления силовым электромагнитом сейсмоисточника (Рисунок 21) представляет собой управляемый переключатель с использованием транзисторной оптопары TLP290(GB-TPSE) и MOSFET AU1RF18BSTR для управления питанием [13]. Технические характеристики транзисторной оптопары TLP290(GB-TPSE) представлены в таблице 9. Источник +12 В подключен через резистор 100 Ом к транзистору, а сигнал через диод Шоттки MBR3S40 и резистор 10 кОм поступает на базу транзистора. Выходной сигнал с транзистора через резистор 10 кОм управляет затвором MOSFET, который пропускает +12 В на выход. Транзисторная оптопара TLP290(GB-TPSE) также применяется в схеме для получения обратной связи с силовых выходов. Детектор напряжения 220 В и детектор 12 В на АКБ, так же реализованы с помощью транзисторных оптопар TLP290(GB-TPSE). Схема обвязки обратной связи с силовых выходов представлена на Рисунке 22.

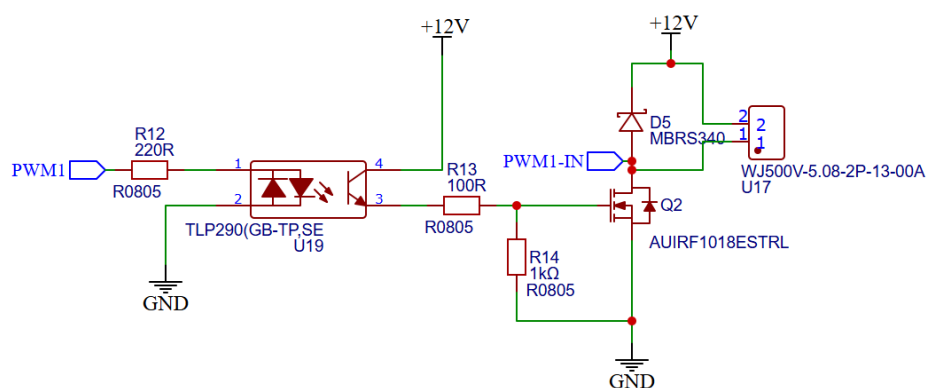


Рисунок 21 – Схема управления силовым электромагнитом сейсмоисточника

Таблица 9 – Технические характеристики TLP290(GB-TPSE)

Параметр	Значение
Напряжение изоляции (RMS), В	3750
Коэффициент передачи по току (Min), %	100
Коэффициент передачи по току (Max), %	400
Тип входа	AC, DC
Тип выхода	Транзистор
Напряжение выхода, В	80
Выходной ток на канал, мА	50
Рабочая температура, °C	-55...+110
Вес, г	0,05

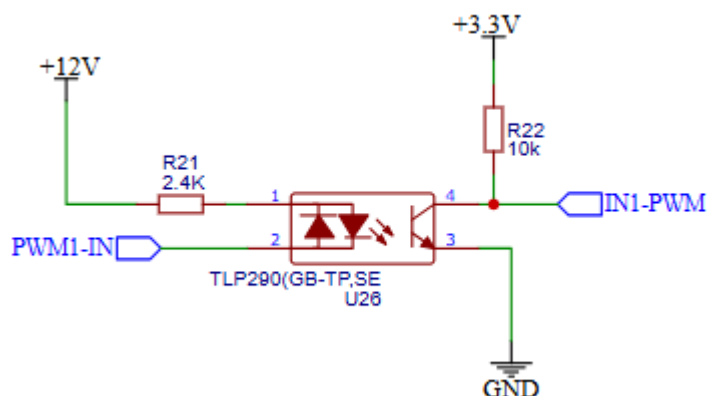


Рисунок 22 – Схема обвязки обратной связи с силовых выходов

Измерение температуры на обмотке сейсмоисточника реализовано с помощью термистора NTC 100K B3950 и операционного усилителя LM358BGR4. Термистор подключается напрямую в клемму. Схема обвязки входа измерения температуры с помощью термистора указана на рисунке 23.

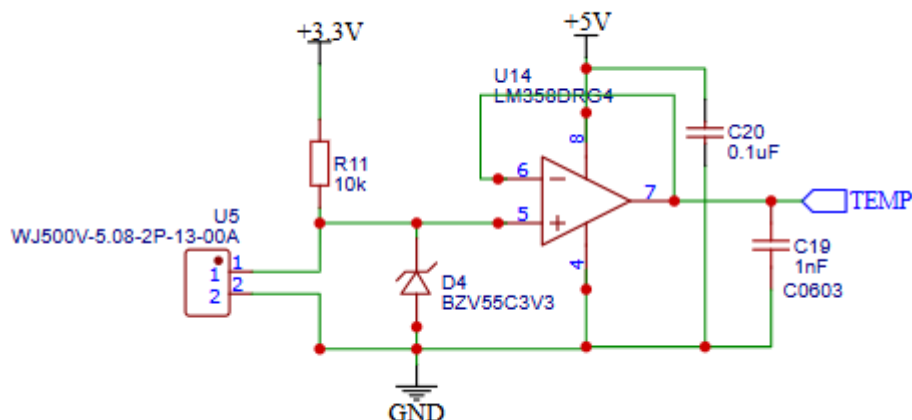


Рисунок 23 – Обвязка входа измерения температуры

Для контроля тока на обмотке был реализован измерительный узел с использованием датчика тока ACS712ELCTR-05B для определения силы тока. Датчик питается от +5 В, подключенного к выводу VCC. Схема обвязки входа измерения тока на датчике представлена на рисунке 24. Технические характеристики датчика тока ACS712ELCTR-05B рассмотрены в таблице 10.

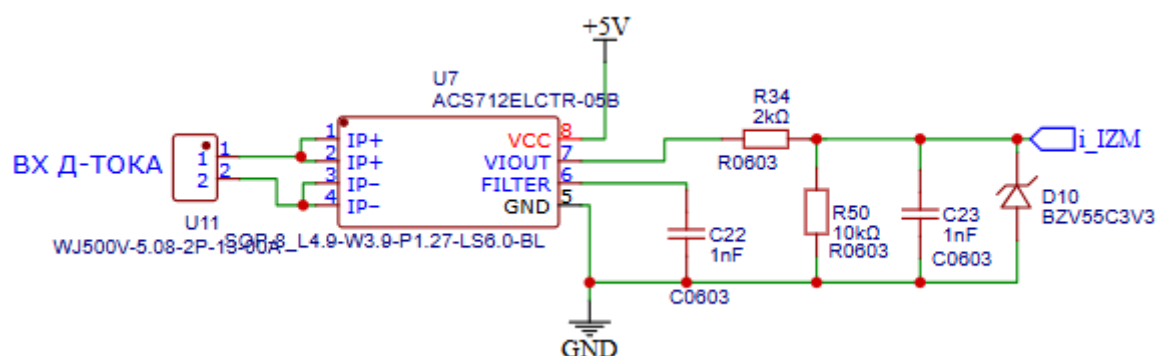


Рисунок 24 – Обвязка входа измерения тока на датчике ACS712ELCTR-05B

Таблица 10 – Технические характеристики ACS712ELCTR-05B

Параметр	Значение
Минимальное рабочее напряжение питания, В	4,5
Максимальное рабочее напряжение питания, В	5,5
Число контактов	8
Чувствительность, мВ/А	185
Рабочая температура, °C	-40...+85
Вес, г	0,1

Измерение напряжения на обмотке сейсмоисточника реализовано с использованием операционного усилителя LM358MX/NOPB. Источник +3.3 В питает усилитель, а входной сигнал AC+ и AC- от разъема через диодный мост DB107S и конденсатор поступает на инвертирующий вход. Резистор и конденсатор образуют цепь обратной связи. Выходной сигнал формируется и доступен на выходе VOBM, с фильтрацией через конденсатор. Схема обвязки входа измерения напряжения на обмотке сейсмоисточника указана на рисунке 25. Технические характеристики операционного усилителя LM358 представлены в таблице 11.

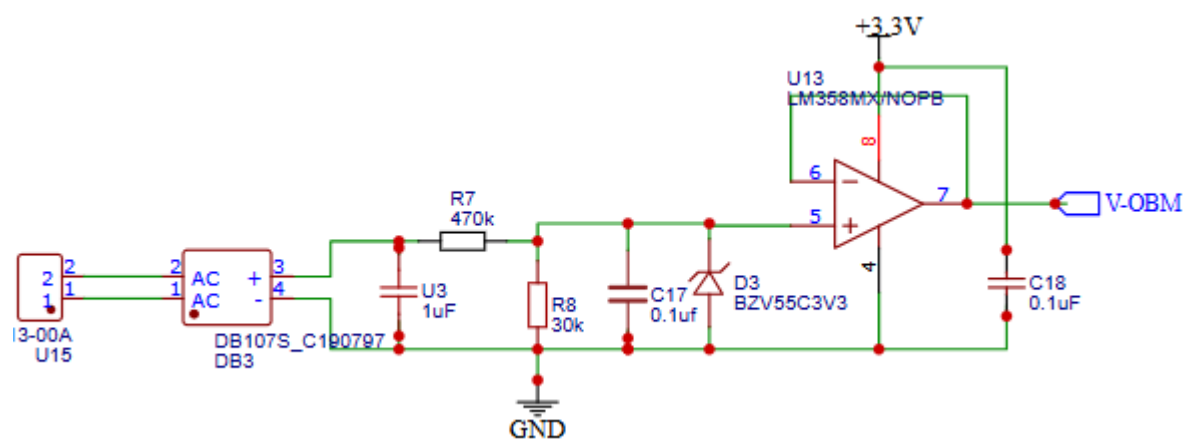


Рисунок 25 – Схема обвязки входа измерения напряжения на обмотке сейсмоисточника

Таблица 11 – Технические характеристики LM358

Параметр	Значение
Напряжение питания (однополярный режим), В	3...32
Напряжение питания (двухполярный режим), В	1,5...16
Полоса пропускания, МГц	1
Выходной ток (источник), мА	20
Выходной ток (сток), мА	10
Рабочая температура, °C	-40...+85
Вес, г	0,3

3 Разработка управляющей программы для микроконтроллера

Разработка управляющей программы для микроконтроллера STM32F303CCT6 представляет собой центральный этап создания системы управления работой сейсмоисточника. Программа была полностью разработана на языке C++ с учетом специфики аппаратной части, изображенной на схеме ЭЗ. Особое внимание уделено процессам подключения дисплея к микроконтроллеру для обеспечения визуализации данных, а также интеграции оптопар, генерирующих сигналы для обмотки сейсмоисточника, что является критическим элементом реализации функциональности системы.

При разработке управляющей программы сперва было реализовано подключение графического дисплея к микроконтроллеру. Код программы представлен в Листинге 1.

Листинг 1

```
#include "main.h"

// Дескриптор SPI
SPI_HandleTypeDef hspi1;

// Определение пинов
#define LCD_BLK_Pin GPIO_PIN_2
#define LCD_BLK_Port GPIOB
#define LCD_RS_Pin GPIO_PIN_1
#define LCD_RS_Port GPIOB
#define LCD_SS_Pin GPIO_PIN_0
#define LCD_SS_Port GPIOB

// Команды ST7920
#define LCD_FUNCTIONSET 0x30
#define LCD_DISPLAYCONTROL 0x08
#define LCD_DISPLAYON 0x04
#define LCD_SETYADDR 0x80
```

```

#define LCD_SETXADDR 0x80

void SystemClock_Config(void);
static void MX_GPIO_Init(void);
static void MX_SPI1_Init(void);
void LCD_Init(void);
void LCD_SendCommand(uint8_t cmd);
void LCD_SendData(uint8_t data);
void LCD_DrawTestPattern(void);
int main(void)
{
    HAL_Init();
    SystemClock_Config();
    MX_GPIO_Init();
    MX_SPI1_Init();
    LCD_Init();
    LCD_DrawTestPattern();
    while (1)
    {
        // Основной цикл
    }
}

void SystemClock_Config(void)
{
    RCC_OscInitTypeDef RCC_OscInitStruct = {0};
    RCC_ClkInitTypeDef RCC_ClkInitStruct = {0};
    RCC_OscInitStruct.OscillatorType = RCC_OSCILLATORTYPE_HSI;
    RCC_OscInitStruct.HSIState = RCC_HSI_ON;
    RCC_OscInitStruct.HSICalibrationValue =
RCC_HSICALIBRATION_DEFAULT;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLState = RCC_PLL_ON;
    RCC_OscInitStruct.PLL.PLLSource = RCC_PLLSOURCE_HSI;

```

```

RCC_OscInitStruct.PLL.PLLMUL = RCC_PLL_MUL9;
HAL_RCC_OscConfig(&RCC_OscInitStruct);
RCC_ClkInitStruct.ClockType =
RCC_ClkInitStruct.SYSCLKSource = RCC_SYSCLKSOURCE_PLLCLK;
RCC_ClkInitStruct.AHBCLKDivider = RCC_SYSCLK_DIV1;
RCC_ClkInitStruct.APB1CLKDivider = RCC_HCLK_DIV2;
RCC_ClkInitStruct.APB2CLKDivider = RCC_HCLK_DIV1;
HAL_RCC_ClockConfig(&RCC_ClkInitStruct, FLASH_LATENCY_2);
}
static void MX_GPIO_Init(void)
{
    GPIO_InitTypeDef GPIO_InitStruct = {0};
    __HAL_RCC_GPIOA_CLK_ENABLE();
    __HAL_RCC_GPIOB_CLK_ENABLE();
    // Настройка пинов PB2 (BLK), PB1 (RS), PB0 (SS)
    GPIO_InitStruct.Pin = LCD_BLK_Pin | LCD_RS_Pin | LCD_SS_Pin;
    GPIO_InitStruct.Mode = GPIO_MODE_OUTPUT_PP;
    GPIO_InitStruct.Pull = GPIO_NOPULL;
    GPIO_InitStruct.Speed = GPIO_SPEED_FREQ_HIGH;
    HAL_GPIO_Init(GPIOB, &GPIO_InitStruct);
    // Начальное состояние
    HAL_GPIO_WritePin(LCD_BLK_Port, LCD_BLK_Pin, GPIO_PIN_SET); //
    Подсветка включена
    HAL_GPIO_WritePin(LCD_RS_Port, LCD_RS_Pin, GPIO_PIN_RESET);
    HAL_GPIO_WritePin(LCD_SS_Port, LCD_SS_Pin, GPIO_PIN_SET); // SS не
    активен
}
static void MX_SPI1_Init(void)
{

```

```

hspi1.Instance = SPI1;
hspi1.Init.Mode = SPI_MODE_MASTER;
hspi1.Init.Direction = SPI_DIRECTION_2LINES;
hspi1.Init.DataSize = SPI_DATASIZE_8BIT;
hspi1.Init.CLKPolarity = SPI_POLARITY_LOW;
hspi1.Init.CLKPhase = SPI_PHASE_1EDGE;
hspi1.Init.NSS = SPI_NSS_SOFT;
hspi1.Init.BaudRatePrescaler = SPI_BAUDRATEPRESCALER_16;
hspi1.Init.FirstBit = SPI_FIRSTBIT_MSB;
hspi1.Init.TIMode = SPI_TIMODE_DISABLE;
hspi1.Init.CRCCalculation = SPI_CRCCALCULATION_DISABLE;
HAL_SPI_Init(&hspi1);
}

void LCD_Init(void)
{
    HAL_Delay(100); // Задержка для стабилизации
    HAL_GPIO_WritePin(LCD_SS_Port, LCD_SS_Pin, GPIO_PIN_RESET); // Ак-
    тивируем SS

    // Инициализация в графическом режиме
    LCD_SendCommand(LCD_FUNCTIONSET); // Базовый набор функций
    HAL_Delay(1);
    LCD_SendCommand(LCD_FUNCTIONSET | 0x04); // Расширенный набор
    HAL_Delay(1);
    LCD_SendCommand(0x02); // Графический режим
    HAL_Delay(1);
    LCD_SendCommand(LCD_DISPLAYCONTROL | LCD_DISPLAYON); //
    Включение дисплея
    HAL_Delay(1);

```

```

    HAL_GPIO_WritePin(LCD_SS_Port, LCD_SS_Pin, GPIO_PIN_SET); // Деак-
    тивируем SS
}

void LCD_SendCommand(uint8_t cmd)
{
    HAL_GPIO_WritePin(LCD_RS_Port, LCD_RS_Pin, GPIO_PIN_RESET); //
    Команда

    uint8_t data[3] = {0xF8, (cmd & 0xF0), ((cmd << 4) & 0xF0)}; // Формат
    ST7920

    HAL_SPI_Transmit(&hspi1, data, 3, 100);
}

void LCD_SendData(uint8_t data)
{
    HAL_GPIO_WritePin(LCD_RS_Port, LCD_RS_Pin, GPIO_PIN_SET); // Дан-
    ные

    uint8_t data_buf[3] = {0xFA, (data & 0xF0), ((data << 4) & 0xF0)}; // Формат
    ST7920

    HAL_SPI_Transmit(&hspi1, data_buf, 3, 100);
}

void LCD_DrawTestPattern(void)
{
    HAL_GPIO_WritePin(LCD_SS_Port, LCD_SS_Pin, GPIO_PIN_RESET); // Ак-
    тивируем SS

    HAL_GPIO_WritePin(LCD_SS_Port, LCD_SS_Pin, GPIO_PIN_SET); // Деак-
    тивируем SS
}

void Error_Handler(void)
{
    while (1);
}

```

Выводы микроконтроллера STM32F303CCT6, используемые для подключения LCD-дисплея ST7920, выполняют следующие функции:

- PB2 (ON-BLK): управляет подсветкой дисплея. Если подать на этот вывод сигнал, подсветка включается, и экран светится. Если отключить — подсветка гаснет.
- PB1 (RS): выбирает, что отправляется на дисплей: команда (например, настройка режима) или данные (например, пиксели для изображения). Когда RS "низкий" — отправляется команда, когда "высокий" — данные.
- PA5 (SCK): это тактовый сигнал для интерфейса SPI. Он задает ритм, с которым данные передаются на дисплей, синхронизируя микроконтроллер и дисплей.
- PA7 (MOSI): Линия передачи данных от микроконтроллера к дисплею. По этому выводу отправляются команды и данные (например, что рисовать на экране).
- PB0 (SS): активирует дисплей для общения. Когда SS "низкий", дисплей "слушает" команды и данные от микроконтроллера. Когда "высокий" — дисплей игнорирует сигналы.

Следующим шагом было подключение обвязки силовых выходов на 12 В, с использованием оптопар TLP290. Код программы, реализующий данную функцию, представлен в Листинге 2.

Листинг 2

```
#include "stm32f3xx.h"

void configurePWM(void) {
    // Включение тактирования для GPIO B
    RCC->AHBENR |= RCC_AHBENR_GPIOBEN;
    // Настройка PB5, PB6, PB7 как выходы для PWM-IN
```



```

GPIOB->MODER      &=      ~(GPIO_MODER_MODER5      |
GPIO_MODER_MODER6 | GPIO_MODER_MODER7);

GPIOB->MODER      |=      (GPIO_MODER_MODER5_1      |
GPIO_MODER_MODER6_1 | GPIO_MODER_MODER7_1); // Альтернативная
функция

GPIOB->AFR[0] |= (2 << (5 * 4)) | (2 << (6 * 4)) | (2 << (7 * 4)); // AF2 для
TIM3

// Настройка PB10, PB11, PB12 как выходы для PWM

GPIOB->MODER      &=      ~(GPIO_MODER_MODER10      |
GPIO_MODER_MODER11 | GPIO_MODER_MODER12);

GPIOB->MODER      |=      (GPIO_MODER_MODER10_1      |
GPIO_MODER_MODER11_1 | GPIO_MODER_MODER12_1); // Альтерна-
тивная функция

GPIOB->AFR[1] |= (2 << ((10 % 8) * 4)) | (2 << ((11 % 8) * 4)) | (2 << ((12 %
8) * 4)); // AF2 для TIM2

// Включение тактирования для TIM2 и TIM3
RCC->APB1ENR |= RCC_APB1ENR_TIM2EN | RCC_APB1ENR_TIM3EN;

// Настройка TIM2 для PB10, PB11, PB12
TIM2->PSC = 0; // Предделитель
TIM2->ARR = 1000; // Авто-перезагрузка (частота)
TIM2->CCR1 = 500; // Скважность для PB10
TIM2->CCR2 = 500; // Скважность для PB11
TIM2->CCR3 = 500; // Скважность для PB12
TIM2->CCMR1 |= (TIM_CCMR1_OC1M_2 | TIM_CCMR1_OC1M_1) |
(TIM_CCMR1_OC2M_2 | TIM_CCMR1_OC2M_1); // PWM Mode 1
TIM2->CCMR2 |= (TIM_CCMR2_OC3M_2 | TIM_CCMR2_OC3M_1); //
PWM Mode 1
TIM2->CCER      |=      TIM_CCER_CC1E      |      TIM_CCER_CC2E      |
TIM_CCER_CC3E; // Включение каналов
TIM2->CR1 |= TIM_CR1_CEN; // Включение таймера

```

```

// Настройка TIM3 для PB5, PB6, PB7
TIM3->PSC = 0; // Предделитель
TIM3->ARR = 1000; // Авто-перезагрузка (частота)
TIM3->CCR1 = 500; // Скважность для PB5
TIM3->CCR2 = 500; // Скважность для PB6
TIM3->CCR3 = 500; // Скважность для PB7
TIM3->CCMR1 |= (TIM_CCMR1_OC1M_2 | TIM_CCMR1_OC1M_1) |
(TIM_CCMR1_OC2M_2 | TIM_CCMR1_OC2M_1); // PWM Mode 1
TIM3->CCMR2 |= (TIM_CCMR2_OC3M_2 | TIM_CCMR2_OC3M_1); //
PWM Mode 1
TIM3->CCER |= TIM_CCER_CC1E | TIM_CCER_CC2E |
TIM_CCER_CC3E; // Включение каналов
TIM3->CR1 |= TIM_CR1_CEN; // Включение таймера
}

int main(void) {
    configurePWM();
    while (1) {
        // Основной цикл, можно добавить управление скважностью
        for (uint32_t i = 0; i < 1000; i++) {
            TIM2->CCR1 = i; // Изменение скважности для PB10
            TIM2->CCR2 = i; // Изменение скважности для PB11
            TIM2->CCR3 = i; // Изменение скважности для PB12
            TIM3->CCR1 = i; // Изменение скважности для PB5
            TIM3->CCR2 = i; // Изменение скважности для PB6
            TIM3->CCR3 = i; // Изменение скважности для PB7
            for (volatile uint32_t j = 0; j < 10000; j++); // Задержка
        }
    }
}

```

Далее описаны роли выводов микроконтроллера STM32F303CCT6 используемые для подключения обвязки силовых выходов на 12 В.

PB10 (вывод 21, PWM1): используется как выход для генерации PWM-сигнала (канал 1 таймера TIM2). Этот сигнал управляет первым силовым выходом (PWM1), передавая импульсы через оптопару для обмотки источника.

PB11 (вывод 22, PWM2): выход для PWM-сигнала (канал 2 таймера TIM2), управляющий вторым силовым выходом (PWM2). Аналогично используется для передачи импульсов.

PB12 (вывод 25, PWM3): выход для PWM-сигнала (канал 3 таймера TIM2), управляющий третьим силовым выходом (PWM3). Применяется для третьего канала импульсов.

PB5 (вывод 41, PWM1-IN): входной сигнал для первого канала (PWM1-IN), который принимает обратную связь или синхронизацию от силового выхода, связанного с PB10, через оптопару.

PB6 (вывод 42, PWM2-IN): входной сигнал для второго канала (PWM2-IN), обеспечивающий обратную связь или синхронизацию от выхода, связанного с PB11.

PB7 (вывод 43, PWM3-IN): входной сигнал для третьего канала (PWM3-IN), принимающий обратную связь или синхронизацию от выхода, связанного с PB12.

Таким образом, выводы PB10, PB11 и PB12 генерируют PWM-сигналы для управления силовыми выходами, а PB5, PB6 и PB7 используются для приема входных сигналов (обратной связи или синхронизации) от этих выходов через обвязку с оптопарами.

4 Разработка печатной платы системы управления

Для реализации системы управления индукционно-динамическим сейсмоисточником была выполнена трассировка печатной платы (ПП) с учетом технических требований к компактности, надежности и электромагнитной совместимости. Процесс трассировки проводился в среде САПР Altium Designer, что позволило оптимизировать размещение компонентов и дорожек, а также подготовить производственные файлы [16].

На этапе проектирования топологии платы был выбран двухслойный вариант конструкции, что обеспечило разделение силовых и сигнальных цепей для минимизации помех от индукционных катушек. Основные принципы разводки включали:

- Оптимизация расположения компонентов: силовые элементы размещены вблизи краев платы для улучшения теплоотвода, а микроконтроллер и элементы обработки сигналов — в центральной части для минимизации длины сигнальных линий.

- Ширина дорожек и переходные отверстия: для силовых цепей, обеспечивающих управление индукционными катушками, использовались дорожки увеличенной ширины, что позволило снизить сопротивление и нагрев. Переходные отверстия (via) оптимизированы для обеспечения надежного соединения между слоями.

- Учет электромагнитной совместимости (ЭМС): сигнальные дорожки разведены с учетом минимального пересечения с силовыми цепями, а для подавления помех применены фильтры и экранирование.

Итоговая схема разводки печатной платы системы управления индукционно-динамическим сейсмоисточником приведена на рисунке 26. Изображение демонстрирует детализированное расположение силовых и сигнальных цепей, включая подключение индукционных катушек, микроконтроллера и интерфейсов ввода-вывода. Разноцветные дорожки (красные, синие, зеленые) обозначают различные слои и типы соединений, что обеспечивает ви-

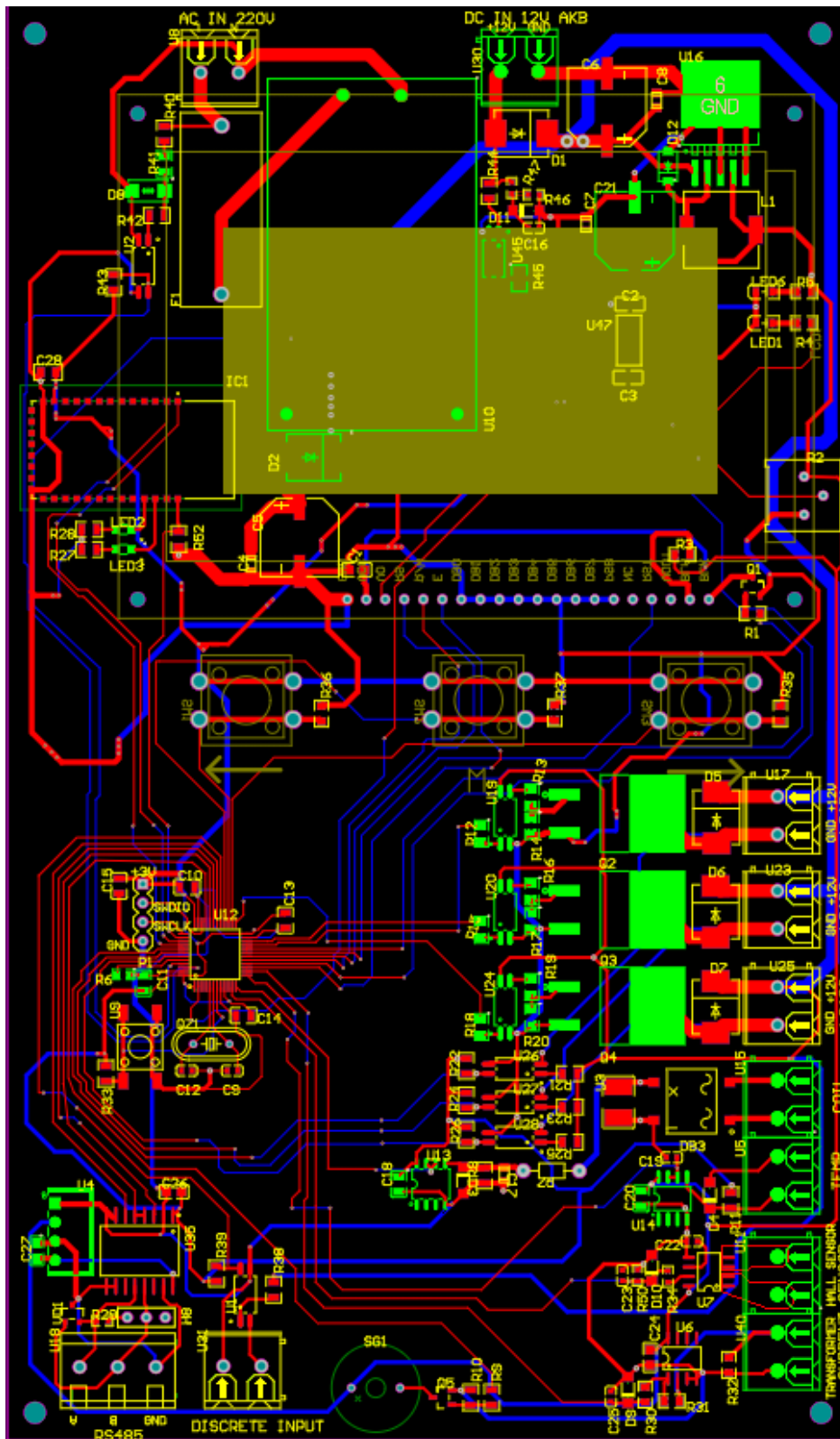


Рисунок 26 – Итоговая схема разводки печатной платы

После завершения трассировки была проведена проверка проекта с использованием инструментов САПР. Выявленные ошибки, например, недостаточное расстояние между дорожками, были устранены путем корректировки топологии. На рисунке 27 представлена топология печатной платы системы управления индукционно-динамическим сейсмоисточником, показывающая обе стороны платы: верхнюю и нижнюю.

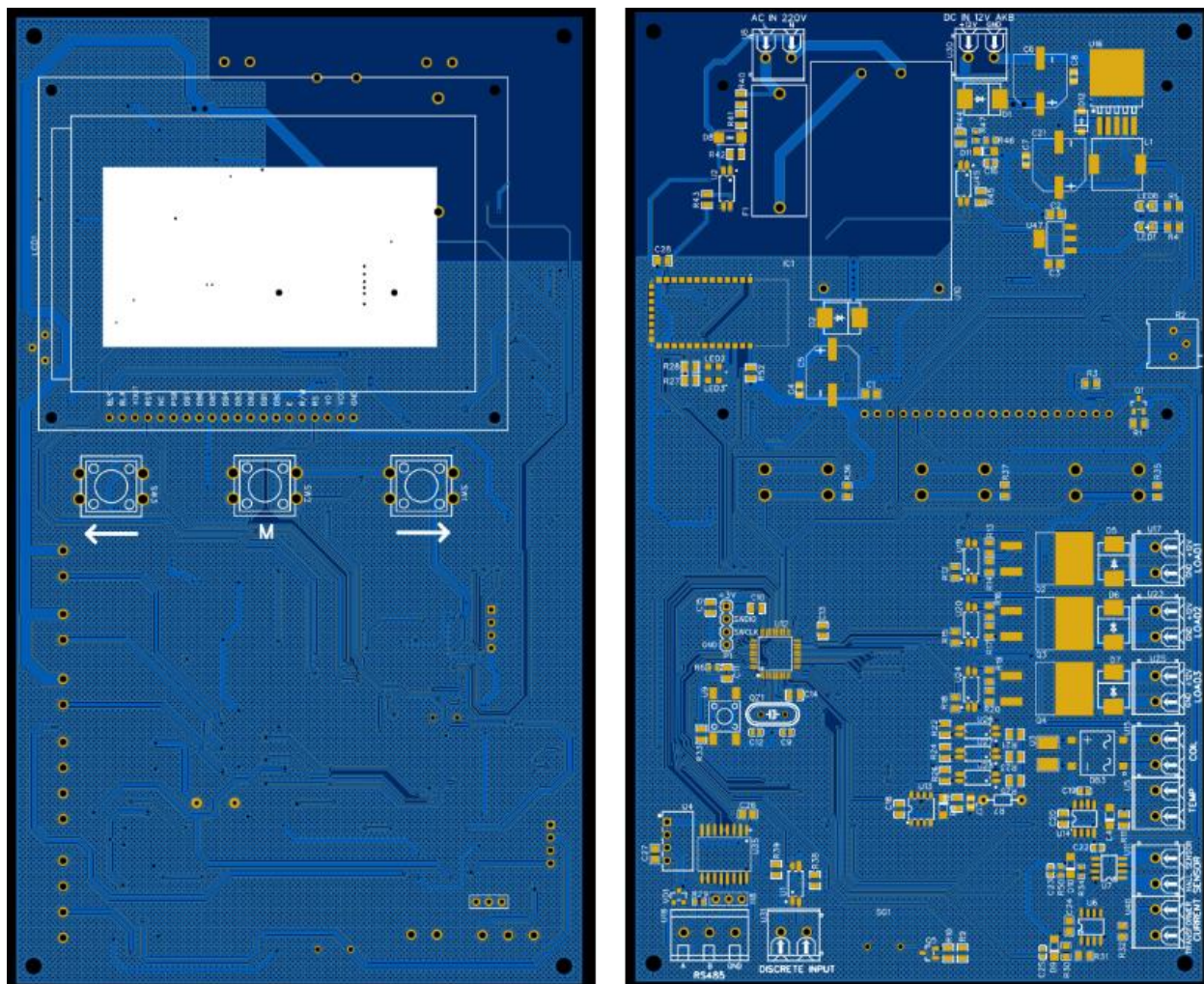


Рисунок 27 – Топология печатной платы сверху и снизу

На основе разработанной топологии были сформированы производственные файлы, включая Gerber-файлы и файл сверловки. Эти файлы содержат полную информацию о структуре платы, включая слои, дорожки, паяльные маски и шелкографию. Пример Gerber-файлов представлен на рисунке 28.

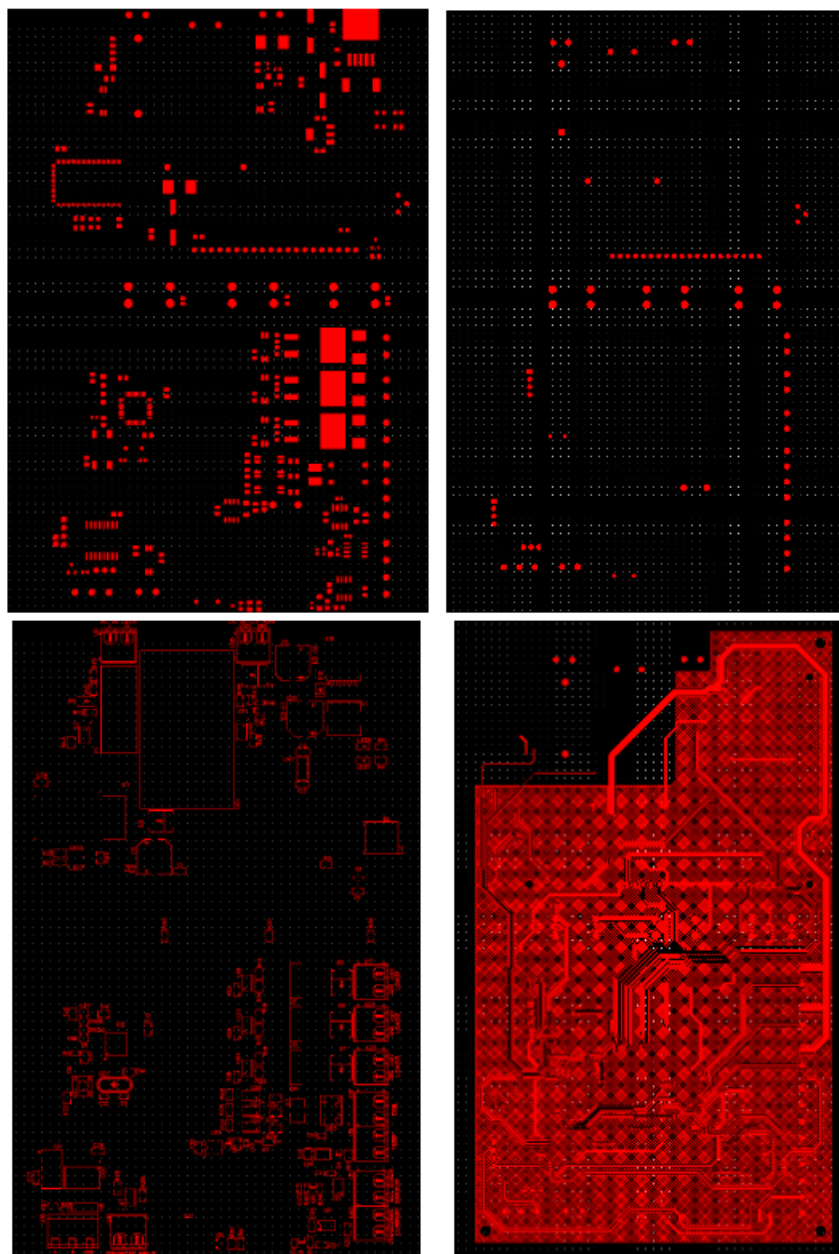


Рисунок 28 – Пример Gerber-файлов

Для визуализации сборки платы был создан сборочный чертеж, который включает расположение компонентов с их обозначениями и ориентацией, изображенный на рисунке 29. Изображение демонстрирует детализированную разметку посадочных мест для микросхем, резисторов, конденсаторов и диодов, а также разъемы для внешних подключений и монтажные отверстия. Центральная часть платы выделена для размещения силовых или дополнительных модулей, в то время как нижняя секция включает ряды разъемов, обеспечивающих интеграцию с периферийными устройствами.

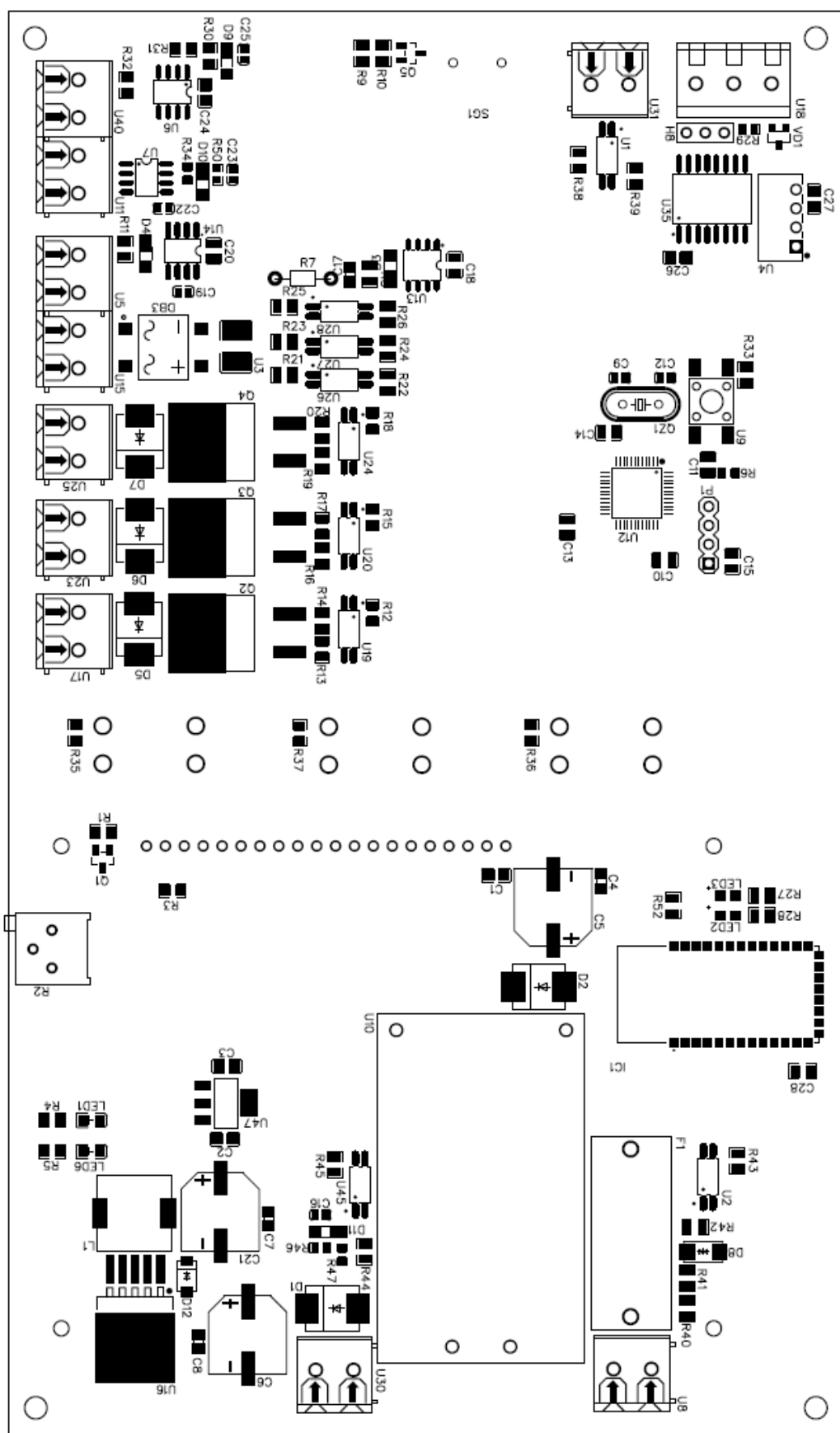


Рисунок 29 – Сборочный чертеж печатной платы

Заключение

В рамках выпускной квалификационной работы была разработана система управления индукционно-динамическим сейсмоисточником, предназначенная для обеспечения точного формирования сейсмических волн. Работа охватила полный цикл проектирования, включая анализ существующих решений, разработку аппаратной частей, а также подготовку производственной документации.

На первом этапе проведен обзор рынка сейсмоисточников и систем управления, что позволило выделить ключевые требования к разрабатываемой системе. Особое внимание уделено индукционно-динамическим сейсмоисточникам. Анализ типовых решений систем управления на базе микроконтроллеров и методов гальванической развязки подтвердил выбор микроконтроллера STM32F303CCT6 как оптимального решения благодаря его высокой точности, устойчивости к электромагнитным помехам и наличию встроенных периферийных модулей.

На этапе разработки системы управления была создана структурная схема, включающая каналы управления и обратной связи, разработан алгоритм управления с учетом этапов инициализации, мониторинга и генерации сигналов. Принципиальная электрическая схема обеспечила интеграцию микроконтроллера, дисплея, силовых элементов, датчиков и интерфейсов связи (RS-485, Bluetooth).

Разработана двухслойная печатная плата с учетом требований электромагнитной совместимости, оптимизирована трассировка силовых и сигнальных цепей. Сформированы Gerber-файлы и сборочный чертеж, обеспечивающие готовность к производству.

Итогом работы стала полноценная система управления, обеспечивающая высокую точность, надежность и экологическую безопасность при использовании сейсмоисточника.

Список используемых источников

1. Бахарев Н.П. Анализ динамики и разработка импульсного источника сейсмических колебаний с индукционно-динамическим приводом для геологоразведочных работ: диссертация. — М.: [б. и.], 2018. — 187 с.
2. Боганик Г.Н., Гурвич И.И. Сейсморазведка: Учебник для вузов. — М.: Геоинформмарк, 2016. — 745 с.
3. ГСД-2 [Электронный ресурс] URL: http://gds.nppspeggeo.ru/ru/products/gds_vcs/ (дата обращения: 10.06.2025)
4. Ивашин В.В., Кудинов А.К., Симкин С.А. Источник сейсмических волн: пат. RU 2028646 С1 Российская Федерация. № 4939488/25; заявл. 29.05.1991; опубл. 09.02.1995.
5. Ивашин В.В., Позднов М.В., Прядилов А.В. Наземный электромагнитный вибрационный сейсмоисточник: пат. RU 2253136 С1 Российская Федерация. № 2004105659/28; заявл. 25.02.2004; опубл. 27.05.2005. — Бюл. № 15.
6. Интерфейс RS485 [Электронный ресурс] URL: <https://electronics.stackexchange.com/questions/442754/pic18f26j50-serial-communications-over-rs485-link/442765> (дата обращения: 05.06.2025)
7. Ключарёв А.А., Кочин К.А., Фоменкова А.А. Программирование микроконтроллеров STM32: Учебное пособие. — СПб.: ГУАП, 2023. — 196 с.
8. Козлов А.В., Шавров С.А. Микроэлектронные устройства управления и автоматизации. — СПб.: Лань, 2018. — 384 с.
9. Линейный стабилизатор напряжения AMS1117-3.3 [Электронный ресурс] URL: https://elrus.ru/catalog/elektronnye_komponenty/mikroskhemy/upravlenie_pitaniem/ams1117_3_3/?ysclid=mc2gf52kes836775808 (дата обращения: 09.06.2025)

10. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. — М.: Техносфера, 2005. — 672 с.
11. Микроконтроллер STM32F303CCT6 [Электронный ресурс] URL: <https://www.chipdip.ru/product/stm32f303cct6-2> (дата обращения: 13.06.2025)
12. Модуль дисплея LCD ST7920 [Электронный ресурс] URL: <https://www.chipdip.ru/product0/8015824773> (дата обращения: 02.06.2025)
13. Оптопара с транзисторным выходом [Электронный ресурс] URL: <https://www.promelec.ru/product/337086/?ysclid=mc2gllfafy590040679> (дата обращения: 01.06.2025)
14. Розанов Ю.К. Силовая электроника: Учебник для вузов. — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 632 с.
15. Семенов Б.Ю. Силовая электроника: от простого к сложному. — М.: Солон-Пресс, 2014. — 416 с.
16. Суходольский В.Ю. Altium Designer: сквозное проектирование функциональных узлов РЭС на печатных платах: учебное пособие. — 3-е изд. — Санкт-Петербург: BHV-СПб, 2022. — 592 с.
17. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники. — М.: Техносфера, 2011. — 672 с.
18. Шнеерсон М.Б., Грозденский В.А., Ваншельбойм Б.Г., Жуков А.П., Майоров В.В. Установки для возбуждения упругих колебаний в наземной невзрывной сейсморазвездке. — М.: ВИЭМС, 1985. — 47 с.
19. Basso C.P. Switch-Mode Power Supplies: SPICE Simulations and Practical Designs. — 2nd Edition. — McGraw-Hill Education, 2014. — 912 p.
20. Bluetooth HC-06 [Электронный ресурс] URL: <https://duino.ru/bluetooth-modul-hc-06.html/> (дата обращения: 11.06.2025)
21. DC-DC Converter LM2596HVS [Электронный ресурс] URL: <https://www.platan.ru/cgi-bin/query.pl?id=2015707129> (дата обращения: 15.06.2025)

22. Force-III – Seismic Source Co [Электронный ресурс] URL: <https://seismicsource.com/html/products/sourcecontrol/force3> (дата обращения: 04.06.2025)

23. Martin T. The Insider's Guide to the STM32 ARM-Based Microcontroller. — Hitex (UK) Ltd., 2014. — 117 p.

24. Rashid M.H. Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications. — 4th Edition. — Pearson, 2013. — 1024 p.

25. VibPro HD – INOVA [Электронный ресурс] URL: <https://www.inovageo.com/ru/products/vib-pro-hd> (дата обращения: 07.06.2025)