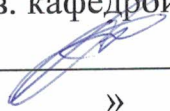


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика
Направленность (профиль) образовательной программы Ракетно-космическая техника

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Зав. кафедрой

 В.В. Соловьёв
« » 2025 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

на тему: Разработка бортовой системы малого космического аппарата стандарта
«CubeSat» для контроля за явлением контаминации

Исполнитель

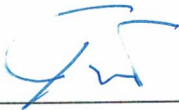
студент группы 1109-об1


(подпись, дата)

Е.И. Зубко

Руководитель

д-р техн. наук, профессор


(подпись, дата)

А.Д. Плутенко

Консультант

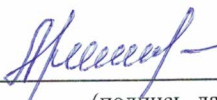
канд. физ.-мат. наук, доцент


(подпись, дата)

Д.В. Фомин

Консультант по БЖД

канд. тех. наук, доцент


(подпись, дата)

А.В. Козырь

Консультант


(подпись, дата)

К.А. Насуленко

Нормоконтроль

ст. преподаватель кафедры СиТРК


(подпись, дата)

М.А. Артеков

Благовещенск 2025

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
АМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(ФГБОУ ВО «АмГУ»)

Институт компьютерных и инженерных наук
Кафедра стартовые и технические ракетные комплексы
Направление подготовки 24.03.01 – Ракетные комплексы и космонавтика
Направленность (профиль) образовательной программы Ракетно-космическая техника

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой

 В.В. Соловьёв
« _____ » _____ 2025 г.

ЗАДАНИЕ

К выпускной квалификационной работе студента Зубко Евгения Ильича

1. Тема выпускной квалификационной работы: Разработка бортовой системы малого космического аппарата стандарта «CubeSat» для контроля за явлением контаминации

(утверждена приказом от 03.04.2025 № 878-уч)

2. Срок сдачи студентом законченной работы (проекта): 06.06.2025 года

3. Исходные данные к выпускной квалификационной работе: Научная литература, периодические знания, отчёты по практикам

4. Содержание выпускной квалификационной работы: Теоретические сведения о явлении контаминации и её влиянии; техническое задание к прибору для контроля за явлением контаминации; структурная схема прибора; результаты тестирования прототипов прибора; чертёж корпуса датчика; принципиальная и общая электрическая схема прибора для контроля за явлением контаминации

5. Перечень материалов приложения: Цель и задачи бакалаврской работы; принципиальная схема прибора для контроля за явлением контаминации; общая электрическая схема прибора для контроля за явлением контаминации; чертёж корпуса датчика; заключение бакалаврской работы

6. Консультанты по выпускной квалификационной работе: Фомин Д.В. канд. физ.-мат. наук, доцент, Козырь А.В. канд. тех. наук, доцент, Насуленко К.А.

7. Дата выдачи задания: 29.05.2025 года

Руководитель выпускной квалификационной работы: Плутенко Андрей Долиевич, профессор, д-р техн. наук

Задание принял к исполнению (дата): 29.05.2025г. Зубко Зубко Г.И.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 66 страниц, 21 источник, 26 рисунков, 3 таблицы и 2 приложения.

КОСМИЧЕСКИЙ АППАРАТ, БОРТОВАЯ СИСТЕМА,
КОНТАМИНАЦИЯ, ИЗМЕРЕНИЕ МАССЫ, CUBESAT,
ПЬЕЗОРЕЗОНАНСНЫЙ ДАТЧИК

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке бортовой системы контроля за явлением контаминации для малых космических аппаратов стандарта CubeSat. Проведён анализ влияния контаминации на оптические и электронные компоненты КА, обзор существующих методов её оценки, а также выбор пьезорезонансного метода как наиболее чувствительного и пригодного для миниатюрных систем. Разработано и испытано устройство, состоящее из измерительного кварцевого резонатора и аналитического модуля с микроконтроллерной обработкой сигнала. Представлены два прототипа прибора. Проведены натурные эксперименты в условиях сверхвысокого вакуума, подтверждающие чувствительность устройства к слоям порядка нескольких нанометров. Работа сопровождается описанием программного обеспечения, конструкторской документацией, экономическим обоснованием и разделом по технике безопасности. Результаты могут быть использованы при интеграции системы мониторинга чистоты в составе научных и прикладных миссий CubeSat.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	7
1 Теоретическая часть	9
1.1 Контаминации и её влияние на функциональные характеристики приборов космических аппаратов	9
1.2 Методы и приборы для изучения явления контаминации	12
1.3 Космические аппараты стандарта «CubeSat»	14
1.4 Системы автоматизированного проектирования для разработки прибора исследования контаминации	16
2 Практическая часть	18
2.1 Выбор САПР для разработки прибора регистрации явления контаминации	18
2.2 Разработка технического задания на бортовую систему контроля за явлением контаминации	21
2.3. Проектирование прибора для исследования явления контаминации	24
2.4 Результаты тестирования прототипа прибора	27
2.5 Внесение изменений в состав прибора по результатам тестирования	31
2.6 Технологическая карта проверка прибора	39
3 Экономическое обоснование	43
4 Безопасность и экологичность производства	45
4.1 Химический фактор и методы минимизации воздействия	46
4.2 Расчёт вентиляционной системы для рабочего помещения	47
Заключение	50
Библиографический список	52
Приложение А	55
Приложение Б	58

ОПРЕДЕЛЕНИЯ, ОБОЗНАЧЕНИЯ, СОКРАЩЕНИЯ

ДЗЗ – дистанционное зондирование земли;

КА – космический аппарат;

ПЛИС – программируемая логическая интегральная схема;

ПК – персональный компьютер;

САПР – система автоматизированного проектирования;

ТЗ – техническое задание;

RTC – часы реального времени (Real-Time Clock);

EEPROM – электрически стираемая программируемая память только для чтения;

MCU – микроконтроллер;

PCB – печатная плата (Printed Circuit Board);

UART – универсальный асинхронный приёмопередатчик;

CAN – контроллер локальной сети (Controller Area Network);

KiCad – свободное программное обеспечение для разработки электронных схем и разводки плат;

STM32 – микроконтроллер семейства ARM Cortex производства STMicroelectronics;

TML – потери массы (испарения) при термовакуумных испытаниях (Total Mass Loss);

Sycon – лабораторный измеритель осаждённой массы;

CubeSat – международный стандарт малых спутников;

GitVerse – Российская платформа для размещения программного кода и документации.

ВВЕДЕНИЕ

Бортовые системы контроля приборов осуществляющих ДЗЗ играют всё более важную роль в конструкции современных космических аппаратов, особенно в условиях миниатюризации и роста числа научных и прикладных миссий. Одной из актуальных задач при создании таких приборов, размещаемых в составе спутников, является защита чувствительных элементов от явления контаминации — процесса осаждения молекул и частиц на поверхности оборудования. Этот процесс способен вызывать деградацию оптических, механических и электронных характеристик систем, особенно в условиях длительных миссий или использования чувствительных измерительных модулей.

Контаминация представляет собой одну из скрытых, но значимых угроз надёжности функционирования космической техники. Особенно чувствительными к подобным воздействиям оказываются оптические приборы, например: спектрометры, камеры, звёздные датчики и др. Осевшие органические и неорганические молекулы способны изменять коэффициент отражения, поглощения или тепловые свойства материалов. В случае высокоточных научных экспериментов, даже ультратонкие плёнки контаминантов толщиной в несколько нанометров могут внести существенное искажение в показания приборов. При этом непосредственный мониторинг уровня контаминации в режиме реального времени на борту КА остаётся сложной задачей из-за громоздкости и энергозатратности применяемых систем.

Современные подходы к измерению контаминации включают оптические, масс-спектрометрические, термовесовые и пьезорезонансные методы. Последний вариант, благодаря своей высокой чувствительности, компактности, низкому энергопотреблению и технологичности, особенно привлекателен для малых космических аппаратов, таких как CubeSat. Именно CubeSat-платформы, благодаря своей модульности, дешевизне и доступности, всё активнее применяются в научных, образовательных и даже коммерческих задачах. Однако

ограниченные размеры и ресурс таких аппаратов требуют особого подхода к компоновке, энергопитанию и термостабилизации измерительной аппаратуры.

Настоящая работа направлена на разработку бортовой системы контроля контаминации для спутника стандарта CubeSat с использованием пьезорезонансного метода. В рамках работы проведён анализ существующих подходов к измерению степени загрязнения приборов, выполнено обоснование выбранного метода, а также спроектированы, собраны и испытаны два прототипа прибора. Работа включает также описание архитектуры разработки, особенности реализации программного обеспечения, результаты испытаний в условиях вакуума и рекомендации по возможной интеграции прибора в состав спутниковых платформ.

Таким образом, целью данной работы является разработка компактного, энергоэффективного и технологичного устройства для контроля за явлением контаминации внутри приборов спутников стандарта CubeSat. Задачи включают:

- провести анализ литературы и патентных источников;
- осуществить выбор принципа действия и компоненты;
- спроектировать и осуществить сборку устройства;
- провести проверку прибора в лабораторных условиях;
- выполнить подготовку конструкторской и программной документации.

1 ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

1.1 Контаминации и её влияние на функциональные характеристики приборов космических аппаратов

Контаминация в космических системах представляет собой процесс накопления тонких пленок сублимированных веществ на поверхностях приборов, используемых в условиях космического пространства. Незначительные по толщине слои контаминантов (иногда менее 20 нм) способны оказывать существенное воздействие на качество оптических изображений, точность измерений и долговечность компонентов. Даже незначительные изменения в свойствах поверхностей способны снизить эффективность оборудования, что критически влияет на научные результаты миссий [1].

Основными источниками контаминации являются процессы дегазации материалов, используемых при изготовлении космических аппаратов, а также воздействия, связанные с функционированием бортовых систем, таких как двигатели, системы терморегуляции и электроника. Под действием экстремальных условий, таких как вакуум, радиация и резкие перепады температур, материалы, включая полимерные, металлические и композитные, подвергаются дегазации. Выделяемые летучие соединения конденсируются на холодных поверхностях, образуя пленки, особенно эффективно осаждаясь благодаря наличию микрочастиц, которые служат точками начала образования и способствуют адгезии молекул. Внутренние процессы, возникающие в замкнутых объемах аппарата, могут дополнительно усиливать накопление загрязняющих веществ, особенно при наличии специфических условий эксплуатации, таких как смена температурных режимов или воздействие вибраций. Это приводит к тому, что даже при минимальном уровне выделения летучих соединений наблюдаются значительные изменения в свойствах поверхностей, влияющие на их оптические и электронные характеристики [2; 3].

Влияние явления на компоненты космического аппарата

Изменение оптических параметров является одним из наиболее критичных последствий контаминации. Осаждение тонких пленок может вызвать снижение светопропускания, изменение коэффициента отражения и возникновение дифракционных эффектов, что приводит к ухудшению контрастности изображений. Например, наблюдение появления ореолов вокруг ярких объектов свидетельствует о том, что даже незначительное осаждение может исказить форму точечного источника света и ухудшить передачу деталей [4]. Это явление особенно критично для камер и телескопов, где даже небольшое искажение распределения света может вызвать потерю от 30 % до 70 % яркости центрального пятна. [5]

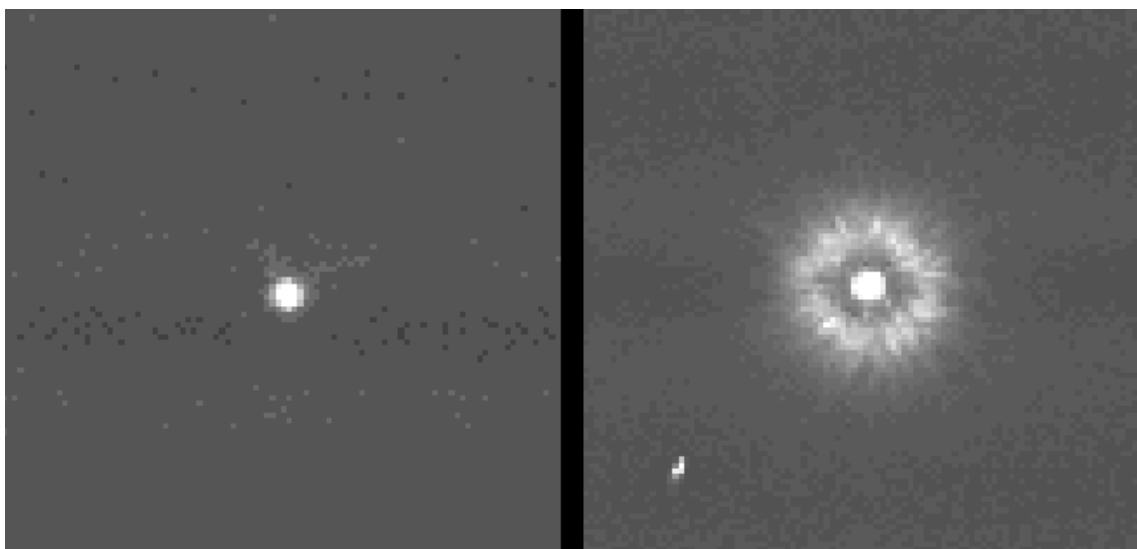


Рисунок 1.1 – Камера КА Кассини. Влияние контаминации на получаемые изображения

Помимо оптических систем, контаминация затрагивает и электронные, и механические элементы космических аппаратов. Осадки на платах, разъёмах и других контактах могут приводить к возникновению дополнительного электрического шума, нарушать устойчивость соединений и даже инициировать коррозионные процессы. В результате стабильность работы электронных схем может быть снижена, а параметры компонентов – изменены [6]. Механические узлы, в свою очередь, подвержены ускоренному износу из-за накопления частиц,

что может вызвать непредвиденные поломки и повлиять на надежность всей системы.

Анализ практики эксплуатации оптических систем на борту космических аппаратов, представленный в научной литературе, выявил общие тенденции ухудшения характеристик в результате накопления загрязнений. Отмечается, что даже при строгом соблюдении мер по обеспечению чистоты материалов, неизбежны процессы дегазации, способные негативно сказаться на оптических параметрах систем. В одном из источников подчёркивается, что структурные особенности тонкоплёночных материалов могут существенно изменяться под воздействием факторов космической среды, включая ультрафиолетовое излучение и вакуум, что, в свою очередь, влияет на их светопропускание и отражающую способность [11]. Приведённые данные подтверждают необходимость реализации комплексного контроля за уровнем контаминации на всех этапах, от проектирования до длительной эксплуатации космического аппарата.

Превентивные меры и стратегии минимизации загрязнений

Для уменьшения негативного влияния контаминации применяются различные превентивные меры. В числе таких методов – выбор материалов с низким уровнем выделения летучих веществ, проведение вакуумной дегазации компонентов, использование барьерных покрытий и внедрение специальных систем очистки. Современные технологии автоматизированного проектирования позволяют смоделировать процессы дегазации и оптимизировать конструкцию приборов таким образом, чтобы минимизировать риск накопления загрязняющих веществ [7]. Помимо этого, интеграция датчиков для мониторинга уровня загрязнения обеспечивает оперативное обнаружение отклонений и позволяет своевременно запускать процедуры дегазации, например, с использованием циклов нагрева, что позволяет частично компенсировать негативное воздействие контаминантов [9]. Один из подходов, применённый на ранних этапах эксплуатации, предусматривает периодическую очистку оптических элементов, что позволяет поддерживать их характеристики на

требуемом уровне даже при длительной эксплуатации в космических условиях [5].

Подводя итог, можно сказать, что воздействие контаминационных пленок охватывает широкий спектр факторов влияния, начиная от искажения оптических характеристик и заканчивая нарушением работы электронных цепей и ускоренным износом механических узлов. Совокупность экспериментальных данных и аналитических выводов указывает на то, что даже незначительное осаждение загрязняющих веществ способно привести к значительному ухудшению функциональных показателей приборов. Контролировать и минимизировать влияние таких процессов можно только посредством комплексного подхода, который включает тщательный выбор материалов, оптимизацию конструкции с помощью современных САПР, применение превентивных мер и интеграцию систем мониторинга в режиме реального времени. Такой подход позволяет не только поддерживать требуемые характеристики приборов, но и существенно повышает надежность и долговечность космических аппаратов, что является критически важным в условиях ограниченных ресурсов малых систем, например, CubeSat.

1.2 Методы и приборы для изучения явления контаминации

Изучение явления контаминации в космических аппаратах требует использования комплекса диагностических методов, позволяющих оценить как толщину слоёв загрязнителей, так и их влияние на ключевые характеристики приборов. В условиях космического вакуума и экстремальных температурных режимов применяются преимущественно оптические и пьезорезонансные методы, поскольку они обеспечивают высокую точность измерений и возможность работы в режиме реального времени.

Одним из первых подходов является применение оптической диагностики. Измерение параметров отражения, пропускания и рассеяния света позволяет оценить наличие тонких пленок на оптических элементах. Интерферометрические методы, основанные на анализе интерференционных карт, позволяют выявлять даже незначительные изменения в распределении

света, что особенно важно для контроля состояния камер и телескопов. Результаты испытаний показали, что осаждение загрязняющих веществ приводит к возникновению характерных ореолов и снижению яркости центрального пятна, что существенно ухудшает качество получаемых изображений [4, 5].

Наиболее предпочтительным методом для количественного контроля является пьезорезонансный метод. Принцип его работы заключается в измерении изменения резонансной частоты кварцевого резонатора под воздействием дополнительной массы осаждённых загрязнителей. Благодаря высокой чувствительности, этот метод позволяет определять толщину пленок в нанометровом диапазоне, что является критически важным для малых космических аппаратов с ограниченными ресурсами. Практические испытания продемонстрировали, что применение пьезорезонансных датчиков обеспечивает стабильный и точный мониторинг в реальном времени, позволяя своевременно принимать меры по снижению контаминации [9].

Современные системы мониторинга часто интегрируют несколько диагностических подходов в единый комплекс. Так, комбинированное применение оптической диагностики и пьезорезонансного измерения позволяет не только контролировать толщину осаждённых пленок, но и оценивать их влияние на функциональные характеристики приборов. Использование компьютерных моделей для симуляции динамики осаждения в сочетании с данными, полученными от датчиков, обеспечивает возможность оперативного регулирования режимов работы прибора. Такая интеграция методов способствует повышению надёжности космических систем и позволяет минимизировать риск возникновения критических сбоев в работе оборудования [7, 3].

В итоге, обзор существующих методов диагностики явления контаминации показывает, что наиболее эффективным и перспективным является применение пьезорезонансных датчиков в сочетании с оптическими методами анализа. Это обеспечивает высокую точность, компактность приборов

и возможность непрерывного мониторинга в условиях космического вакуума. Комплексный подход к контролю за контаминацией позволяет своевременно выявлять и устранять негативное влияние загрязнений, что является ключевым условием для успешной эксплуатации космических аппаратов.

1.3 Космические аппараты стандарта «CubeSat»

В последние годы наблюдается активное использование малых космических аппаратов, стандарта CubeSat [10]. Эти аппараты получили широкое распространение благодаря малым срокам проектирования, низкой массы, возможности размещения в качестве попутной нагрузки, что делает их привлекательными как для образовательных, так и для исследовательских миссий. Особенности конструкции CubeSat, такие как ограниченный объём, масса и энергопотребление, накладывают массогабаритные и энергетические ограничения на приборы.

CubeSat представляют собой платформы, состоящие из модулей размером $10 \times 10 \times 10$ см, которые можно комбинировать для создания более сложных конфигураций. Благодаря модульной архитектуре, на одной платформе можно разместить различные функциональные блоки: системы питания, связь, управление, полезную нагрузку и приборы для контроля состояния оборудования. Эти аппараты позволяют проводить эксперименты в реальных условиях космического вакуума, что делает их идеальными для апробации новых методов диагностики, таких как пьезорезонансный метод.



Рисунок 1.2 – 3U спутники стандарта CubeSat. Слева направо: «ВДНХ-80», «Сократ», «АмурСат»

Особое внимание при разработке CubeSat уделяется выбору компактных и энергоэффективных приборов. Ограниченные размеры и масса требуют применения миниатюризированных датчиков, способных работать в условиях высоких температурных перепадов и радиационного воздействия. В связи с этим пьезорезонансные датчики становятся оптимальным решением, так как они не только удовлетворяют требованиям по компактности, но и обеспечивают высокую точность измерений при минимальном энергопотреблении. Их интеграция в платформу CubeSat позволяет осуществлять непрерывный мониторинг контаминационных процессов в реальном времени, что особенно важно для оперативного реагирования на изменения в состоянии оптики и электроники [9].

Обзор применяемых приборов показывает, что CubeSat используются для апробации различных методов диагностики загрязнений. Экспериментальные миссии с использованием CubeSat позволяют собрать данные о динамике процессов дегазации в условиях реального космического вакуума, что существенно дополняет лабораторные исследования. Применение таких аппаратов способствует не только подтверждению эффективности пьезорезонансного метода, но и позволяет оптимизировать дизайн приборов для будущих миссий. Благодаря быстрой разработке и относительно низкой стоимости запуска CubeSat могут использоваться для тестирования новых технологий в оперативном режиме, что ускоряет процесс внедрения инновационных решений в космическую технику [7].

Таким образом, изучение и внедрение методов мониторинга контаминации на платформах CubeSat является важным направлением современной космической техники. Преимущество таких аппаратов заключается в их универсальности, возможности проведения экспериментальных запусков и апробации новых технологических решений. Совокупность данных, полученных с использованием CubeSat, позволяет не только уточнить характеристики процессов дегазации, но и разрабатывать меры по их минимизации, что

существенно повышает долговечность и надёжность космических миссий, а также, благодаря апробации устройства на малом космическом аппарате обеспечивается проверка его функционирования в условиях реального космического полёта, что в дальнейшем открывает возможности для его адаптации и интеграции в состав более крупных и ресурсоёмких спутниковых платформ.

1.4 Системы автоматизированного проектирования для разработки прибора исследования контаминации

Разработка прибора для контроля контаминации требует использования современных САПР, которые позволяют моделировать как электронные, так и механические компоненты приборов. Применение таких систем способствует оптимизации конструкции, уменьшению массы и повышению надёжности конечного продукта.

При выборе САПР важно учитывать требования к точности моделирования, возможности симуляции электромагнитных и термических процессов, а также соответствие международным и отечественным стандартам. Использование бесплатных и экономически эффективных решений позволяет снизить затраты на разработку, что особенно актуально для образовательных и экспериментальных проектов, таких как CubeSat. Комплексное моделирование позволяет оптимизировать проект с точки зрения минимизации риска накопления контаминационных плёнок за счёт точного расчёта тепловых и механических нагрузок [2, 3].

Современные САПР позволяют объединять в единой платформе разработку электрических схем, трассировку печатных плат и моделирование механических конструкций. Такие системы, как KiCad для электротехнического проектирования и Компас-3D для создания механических моделей, обеспечивают высокую точность и позволяют учитывать все требования к конструкции прибора. Интеграция этих решений способствует снижению вероятности ошибок на стадии проектирования, а также ускоряет процесс

внесения изменений в конструктивное решение при необходимости корректировки параметров работы системы [7].

Использование систем автоматизированного проектирования позволяет не только оптимизировать конструкцию, но и провести всесторонний анализ воздействия внешних факторов, таких как вибрации, температурные колебания и воздействие радиации. Комплексное моделирование с применением САПР дает возможность заранее предсказать возможные проблемы, связанные с накоплением контаминационных пленок, и разработать соответствующие меры по их предотвращению. Применение таких инструментов позволяет также проводить симуляции работы приборов в реальных условиях космического пространства, что является залогом успешной эксплуатации космических аппаратов в течение длительного времени [8, 11].

С развитием технологий автоматизированное проектирование становится всё более интегрированным и ориентированным на мультидисциплинарные задачи. Применение гибких и масштабируемых САПР позволяет создавать приборы, способные адаптироваться к меняющимся условиям эксплуатации, а также обеспечивать высокую степень надежности за счёт комплексного анализа и оптимизации всех компонентов системы. Инновационные решения в области САПР позволяют разрабатывать приборы для мониторинга контаминации, которые могут автоматически корректировать свои параметры работы в ответ на изменения в окружающей среде, что открывает новые возможности для космических миссий [7; 8].

2 ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Практическая реализация проекта направлена на создание бортовой системы для контроля за явлением контаминации в спутниках стандарта CubeSat. Процесс охватывает следующие этапы: выбор систем автоматизированного проектирования, разработку технического задания, проектирование прибора, изготовление и тестирование прототипов, а также описание технологической карты эксперимента.

2.1 Выбор САПР для разработки прибора регистрации явления контаминации

Выбор САПР для разработки электрических схем и печатных плат начался с анализа требований проекта, специфики CubeSat и личного опыта работы с ПО. Основной задачей было создание компактной, энергоэффективной и надёжной системы контроля за явлением контаминации, что накладывало жёсткие ограничения на габариты платы (не более 90×93 мм) и точность трассировки. Первоначально рассматривались следующие варианты:

- KiCad (бесплатный, open-source);
- Altium Designer (профессиональный, платный);
- Eagle (платный, с ограниченной функциональностью в бесплатной версии);
- OrCAD (корпоративный, сложный в освоении).

На первом этапе была произведена оценка доступности и стоимости. Для студента бюджетного вуза ключевым фактором стало отсутствие стоимости ПО. KiCad и Eagle (с ограниченной функциональностью в бесплатной версии) подходили под это требование, но Eagle имеет ограничения, сильно усложняющие проектирование, что увеличит время разработки и качество самой разработки. KiCad, напротив, не имеет ограничений на функционал, что делает его более гибким инструментом.

На втором этапе была осуществлена проверка функциональности. Для проекта критичны:

1. поддержка многослойных плат (для миниатюризации);
2. автоматическая трассировка (для экономии времени);
3. проверка DRC (Design Rule Check) (для соответствия технологическим нормам);
4. экспорт в Gerber-формат (для производства);
5. поддержка ГОСТ;
6. интеграция с 3D-моделированием (для проверки сборки с механическими компонентами).

Таблица 2.1 – Сравнение САПР

Параметр	KiCAD	Altium Designer	EAGLE	ORCAD
Стоимость	Бесплатный	~5,000 у.е./год	~1,500 у.е./год (ограниченная бесплатная версия)	~7,000 у.е./год
Макс. слоёв платы	32	32	2 (в бесплатной) и 8 в полной	16
Автоматическая трассировка	FreeRouting (беспл.)	Встроенная	Только в платной	Встроенная
3D-визуализация	Встроенная	Встроенная	Ограниченная	Нет
Поддержка ГОСТ	Да	Нет	Нет	Частичная

Для проектирования механических компонентов системы контроля за явлением контаминации — корпусов датчиков, крепежных элементов и адаптеров — требовалось программное обеспечение, сочетающее точность 3D-моделирования и наличие у университета лицензии на программное обеспечение. На начальном этапе были рассмотрены несколько вариантов: Компас-3D, SolidWorks, Fusion 360 и AutoCAD. Каждая система имела свои преимущества, но ключевым фактором стала необходимость соответствия специфическим требованиям проекта, таким как интеграция с электронной частью и соблюдение ЕСКД.

Основными требованиями к САПР стали:

- параметрическое моделирование для быстрой адаптации габаритов под стандарт CubeSat. Например, толщина стенок корпуса должна была

варьироваться в диапазоне 1–2 мм для поддержания баланса между прочностью и массой;

- интеграция с KiCad через экспорт в форматы STEP, что критично для совместной работы над электронной и механической частями;
- поддержка ГОСТ и ЕСКД для оформления чертежей, включая указание допусков и шероховатости поверхностей;
- доступ к лицензионной версии в рамках университета.

Компас-3D был выбран благодаря уникальному сочетанию функциональности и доступности. Он предоставляет полный набор инструментов для локальной работы. Например, модуль параметрического проектирования позволил задать габариты корпуса через математические зависимости: при изменении длины основания автоматически пересчитывались размеры крепежных отверстий и толщина стенок. Это обеспечило точное соответствие требованиям CubeSat без ручного пересчёта.

Сравнение с аналогами:

- SolidWorks, несмотря на расширенные возможности симуляции, оказался недоступен из-за высокой стоимости лицензии (~4,000 у.е./год) и отсутствия поддержки ГОСТ;
- Fusion 360 имеет интерфейс, ориентированный на западные стандарты (ASME), что не соответствует требованиям российской документации;
- AutoCAD оказался непригоден для трёхмерного моделирования, так как ориентирован на 2D-чертежи.

Таким образом, выбор САПР для разработки бортовой системы для контроля за явлением контаминации стал важным этапом, определившим успех всего проекта. Для электронной части был выбран KiCad, а для механической — Компас-3D, что позволило достичь баланса между функциональностью, доступностью и соответствием стандартам.

KiCad оказался оптимальным решением для проектирования электронных схем и печатных плат благодаря сочетанию доступности и профессионального функционала.

Для механической части Компас-3D стал незаменимым инструментом благодаря параметрическому моделированию, которое позволило быстро адаптировать габариты корпуса под стандарты CubeSat. Поддержка ГОСТ и ЕСКД обеспечила корректное оформление чертежей, а бесплатная лицензия для студентов сделала разработку экономически выгодной.

Итоговый выбор САПР не только выполнил задачи миниатюризации, надёжности и низкой стоимости, но и подтвердил свою эффективность в условиях студенческого проекта. Эти инструменты задают эталон для образовательных и стартап-проектов в космической отрасли, где критичны скорость разработки, точность и соответствие международным стандартам.

2.2 Разработка технического задания на бортовую систему контроля за явлением контаминации

ТЗ является одним из ключевых документов на этапе подготовки проектных работ: оно формулирует цель, задачи и требования к создаваемому изделию. В соответствии с ГОСТ 15.016-2016 «Единая система конструкторской документации. Техническое задание», ТЗ должно содержать обоснование разработки, исходные данные, требования к техническим, эксплуатационным и конструктивно-технологическим характеристикам, а также перечень необходимых испытаний и документации.

В настоящем разделе сформулировано ТЗ на прибор для непрерывного измерения толщины слоёв контаминантов (толщиной от 10 нм) внутри приборов малого космического аппарата стандарта CubeSat. Устройство разрабатывается в рамках практической работы, с учётом распространённого стандарта плат РС/104 (90×96 мм) и доступных лабораторных ресурсов.

Цель разработки:

Создать компактную бортовую систему для непрерывного мониторинга толщины роста плёнок контаминантов на внутренних поверхностях приборов

CubeSat с высокой точностью, обеспечивающую хранение данных с временной меткой и передачу на бортовой компьютер с целью отправки на землю.

Исходные данные и ограничения:

- стандарт платы: PC/104 (габариты 90×96 мм, форма допускает различные модификации);
- диапазон измерений: от 10 нм до 100 нм и выше;
- режим работы: периодический сбор данных в течение всей миссии (с возможностью гибкой настройки периодов опроса);
- условия эксплуатации: вакуум до 10^{-5} Па, температура от -170 °C до +50 °C (ближний космос), вибрации от 20 Гц до 100 Гц;
- интерфейсы связи: универсальный модуль поддерживает UART и CAN.

Прибор должен обеспечивать:

- измерение сдвига резонансной частоты измерительного кварцевого резонатора с начальной частотой 6 МГц и расчёт толщины плёнки с помощью программного алгоритма по формуле:

$$\Delta h = \frac{2 f_0 \rho \cdot \Delta f}{S} \quad (2.1)$$

где Δh – изменение толщины осаждённого слоя;

Δf – изменение частоты резонатора;

f_0 – номинальная частота резонатора;

ρ – плотность осаждаемого материала;

S – площадь чувствительного элемента.

- параллельное измерение опорного и рабочего сигналов;
- хранение данных: энергонезависимая память объёмом 512 Кбит с временными метками RTC;
- связь: передача данных на бортовой компьютер по UART или CAN;

- энергопотребление: не более 1 Вт;
- масса и габариты: до 200 г, размер модуля $\leq 90 \times 96 \times 25$ мм;
- электромагнитная совместимость: уровень помех не выше -40 дБ для цифровых и ≤ -60 дБ для аналоговых цепей;
- надёжность: ресурс не менее 36 месяцев непрерывной работы без обслуживания.

Прибор должен сочетать высокую точность измерений, периодичность сбора данных, малые габариты и энергопотребление, а также универсальные интерфейсы UART и CAN.

Конструкция модуля должна обеспечивать:

- использование стандартного формата PC/104 для размещения в корпусе спутника стандарта CubeSat;
- материалы и покрытие: печатные платы из FR-4 с толщиной медного слоя ≥ 35 $\mu\text{м}$; компоненты с TML < 1 % для минимизации дегазации;
- трассировка: ширина дорожек $\geq 0,3$ мм, зазоры $\geq 0,2$ мм, соблюдение правил DRC; разделение аналоговых и цифровых зон экранирующими дорожками;
- монтаж и пайка: автоматическая SMD-пайка на заводе; ручная — для прототипа;
- оформление документации: чертежи и спецификации по ЕСКД (ГОСТ 2.301-68, ГОСТ 2.602-95).

Для приёмки изделия необходимо провести:

- функциональные испытания — проверка точности измерения Δf и расчёта Δh на эталонной пленке;
- термовакуумные испытания — работа в диапазоне от -170 °С до $+50$ °С при давлении до 10^{-5} Па;
- вибрационные испытания — вибрации от 20 Гц до 100 Гц.

По результатам разработки и испытаний должны быть оформлены:

- рабочие чертежи модуля и датчика, оформленные в соответствии с ЕСКД;
- спецификация комплектующих;
- протоколы испытаний (функциональные, термовакуумные, вибрационные);
- руководство по эксплуатации и техническому обслуживанию.

Таким образом, разработанное ТЗ, составленное в полном соответствии с ГОСТ 2.105-95, задаёт чёткие и измеримые требования к бортовой системе контроля за явлением контаминации. Оно учитывает специфику CubeSat-формата, особенности нанометровых измерений, ограничения по ресурсам и условиям космического применения. Дальнейшие этапы проектирования, изготовления и испытаний будут опираться на положения данного ТЗ.

2.3. Проектирование прибора для исследования явления контаминации

В рамках настоящей работы была выполнена предварительная проработка концепции устройства для натурного контроля контаминации внутри приборов малых космических аппаратов стандарта CubeSat, что впоследствии стало основой для подачи заявки на регистрацию интеллектуальной собственности в виде патента на изобретения «Блок полезной нагрузки для исследования явления контаминации внутри приборов спутников стандарта CubeSat» (RU 2803675 C1). На данном этапе были поставлены следующие задачи:

- отработать применимость пьезорезонансного метода для измерения толщины плёнок;
- проверить работоспособность базовых узлов системы (датчик, генераторы, смеситель, микроконтроллер, память, интерфейсы);
- выявить ключевые технические ограничения (точность, энергопотребление, габариты).

Результатом проектирования стал первый прототип, позволивший подтвердить функциональность прибора и его соответствие ряду требований, сформулированных в техническом задании. Ниже представлено его описание.

Основу концепции составляет разделение прибора на два функциональных модуля, соединённых коаксиальным кабелем:



Рисунок 2.1 – Структурная схема прототипа прибора

- **Пьезорезонансный модуль (П):** открытый кварцевый резонатор с частотой 6 МГц, размещённый непосредственно внутри корпуса исследуемого прибора, что обеспечивает прямой контакт осаждаемых контаминантов с чувствительным элементом;
- **Аналитический модуль (ПН):** форм-фактор PC/104 (90×96 мм), включающий:
 - измерительный генератор, подключенный к датчику;
 - эталонный генератор в герметичном корпусе;
 - смеситель на ОУ LM358 для первичной обработки сигналов;
 - микроконтроллер STM32F103C8T6;
 - энергонезависимая память объёмом 512 Кбит;
 - часы реального времени DS3231;
 - источник опорного напряжения;
 - интерфейсы UART и CAN для передачи данных.

Прибор работает по следующему принципу: изменение массы датчика вследствие осаждения контаминантов приводит к смещению его резонансной частоты. Сравнение сигналов измерительного и эталонного генераторов в смесителе даёт разностный сигнал, оцифровываемый микроконтроллером. По формуле (2.1) рассчитывается толщина пленки.

2.3.2 Выбор компонентов и их обоснование

Кварцевый резонатор как чувствительный элемент. В соответствии с техническим заданием и концепцией, чувствительным элементом выступает открытый кварцевый резонатор с частотой 6 МГц и площадью рабочего электродного покрытия 1,5 см². Такая конфигурация обеспечивает оптимальный баланс между чувствительностью и технологичностью изготовления.

Эталонный генератор использует аналогичный резонатор, помещённый в герметичный корпус, что обеспечивает стабильность опорного сигнала и снижает влияние внешних факторов (температура, микровибрации).

Смеситель реализован с использованием операционного усилителя LM358. Это позволило получить разностный сигнал без значительных дополнительных помех. Для подавления высокочастотных составляющих применена RC-фильтрация.

В качестве микроконтроллера выбран STM32F103C8T6 с тактовой частотой 36 МГц. Он обеспечивает необходимую вычислительную производительность и поддержку периферийных интерфейсов.

Энергонезависимая память объёмом 512 Кбит предназначена для хранения результатов измерений за весь период работы. Для привязки данных ко времени используется модуль DS3231 с высокой точностью.

Источник опорного напряжения (стабильность ± 1 мВ) обеспечивает корректную работу аналоговых и цифровых узлов схемы.

Разводка платы и компоновка

Плата первой версии была выполнена в редакторе KiCad с соблюдением стандартного формата РС/104 (90×96 мм). Использовалась двухслойная структура, соответствующая базовым рекомендациям стандарта IPC-2221[19]:

- ширина дорожек $\geq 0,3$ мм;
- зазоры между дорожками $\geq 0,2$ мм;
- экранирование аналоговых участков (генераторы, смеситель) от цифровых (микроконтроллер, память) с помощью земляных полигонов.

Компоненты размещены компактно: резонаторы располагаются в центре, микроконтроллер и память – ближе к краю для упрощения отладки, часы реального времени и источник опорного напряжения – вблизи входов питания. Монтаж платы производился вручную с использованием паяльной станции.

Для прототипа прибора была оформлена базовая документация:

- принципиальная электрическая схема (в редакторе KiCad);
- схема печатной платы (Gerber-файлы);
- эскиз корпуса (2D-чертёж).

Разработка полной рабочей конструкторской документации по ЕСКД не производилась, что обосновано экспериментальным характером устройства.

Таким образом проектирование первого прототипа прибора позволило апробировать возможность использования кварцевого резонатора в условиях малой размерности прибора с учётом выбранных компонентов. Разработанная схема прибора позволила зарегистрировать права на интеллектуальную собственность. Полученные результаты легли в основу дальнейшего технического совершенствования конструкции, что подробно рассматривается в разделе 2.5.

2.4 Результаты тестирования прототипа прибора

В данном разделе подробно рассматривается этап проектной реализации и предварительного функционального тестирования первой версии прибора, разработанного для натурного контроля за явлением контаминации в условиях эксплуатации малых космических аппаратов. Указанный этап является важной вехой в общем цикле разработки, так как позволяет не только оценить соответствие первоначальных проектных решений поставленным задачам, но и выявить потенциальные слабые места схемотехнической реализации, требующие последующей оптимизации. Испытания опытного образца также

позволяют оценить корректность взаимодействия всех подсистем прибора, включая узлы генерации, обработки, регистрации и передачи измерительной информации. Полученные результаты легли в основу дальнейших этапов совершенствования прибора и формировали основу для второго прототипа.

Работы по изготовлению и сборке опытного образца проводились в условиях лаборатории физики поверхности научно образовательного центра имени К.Э. Циолковского с использованием стандартного набора САПР-средств и ручного паяльного инструмента, и включали в себя:

- Проектирование печатной платы было выполнено в среде KiCad. Была выбрана компоновка, соответствующая формату РС/104 (90×96 мм), что обеспечивало совместимость прибора с распространённой архитектурой CubeSat. В проекте соблюдены минимальные технологические нормы: ширина сигнальных дорожек не менее 0,3 мм, зазоры, между сигнальными дорожками, не менее 0,2 мм, наличие сквозных и переходных отверстий, а также экранирующих полигонов земли в зоне аналоговых цепей;

- Плата выполнена по двухслойной технологии, что является разумным компромиссом между стоимостью изготовления и возможностью гибкой разводки сложной схемы. Gerber-файлы были отправлены на производство. Срок изготовления составил 7 календарных дней;

- Монтаж компонентов осуществлялся вручную, с применением паяльной станции, микроскопа и инструментария для поверхностного монтажа. Основные функциональные элементы: микроконтроллер STM32F103C8T6, кварцевый резонатор 6 МГц, энергонезависимая память объёмом 512 Кбит, часы реального времени DS3231, а также прецизионный источник опорного напряжения;

- Особое внимание при монтаже уделялось аналоговой части схемы: стабилизации питания и минимизации паразитных помех в чувствительных узлах прибора. Размещение компонентов на плате подчинялось требованиям к минимизации длины аналоговых соединений и облегчению отладки цифровой части;

- На фотографии (рисунок 2.2) представлен внешний вид собранного прототипа, соответствующего требованиям технического задания.

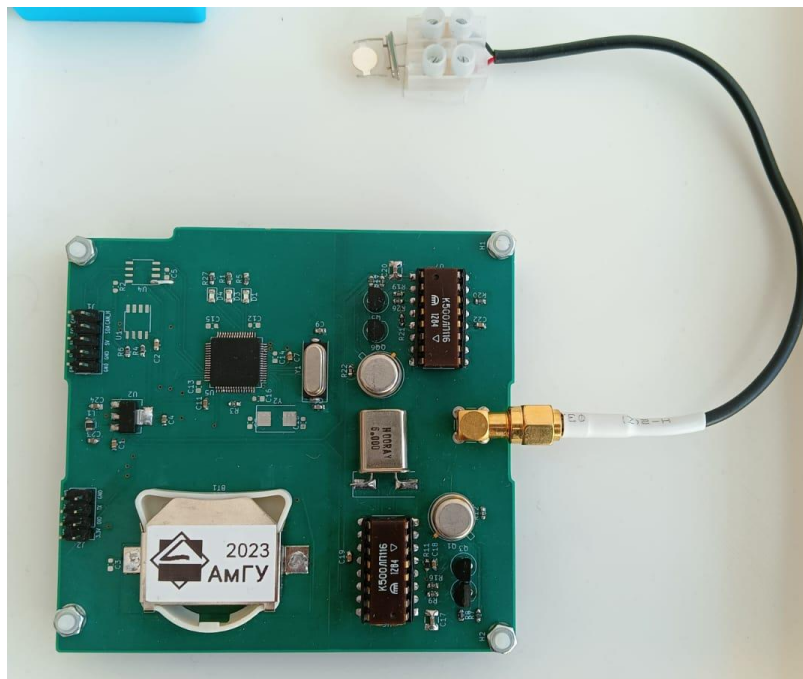


Рисунок 2.2 – Внешний вид собранного прототипа прибора

- В процессе тестирования плата подключалась к лабораторному источнику питания, обеспечивающему стабильное напряжение 5 В. Связь с компьютером, осуществлялась посредством интерфейса USB–UART. Программное обеспечение для отладки фиксировало полученные с платы диагностические сообщения.

Первичная проверка работоспособности узлов

Функциональная проверка прототипа предусматривала проведение серии диагностических тестов, направленных на оценку работоспособности и взаимодействия отдельных подсистем. Проведение указанных тестов было необходимо для подтверждения правильности выбора схемотехнических решений и для выявления потенциальных проблем ещё до проведения лабораторных испытаний.

На первом этапе была выполнена проверка функциональности EEPROM, запись в память 100 последовательных байт и последующее считывание с

контролем соответствия. Результаты подтвердили корректность записи, чтения и адресации;

Встроенные часы реального времени DS3231 синхронизировались через CAN-интерфейс.

Для обмена с внешними устройствами применялся UART на скорости 115 200 бит/с. Тестирование включало передачу диагностических сообщений с текущим временем и значениями измерений. Потерь и искажений не наблюдалось.

Для проведения частотных измерений использовались два канала: к одному из них подключался измерительный пьезорезонансный датчик, ко второму — эталонный находящийся в закрытом корпусе. Частоты с двух каналов поступали на смеситель, где вычитались и полученное значение записывалось в память и передавалось в ПК.

Полученные данные были представлены в виде временного ряда и визуализированы на графике (рисунок 2.3).

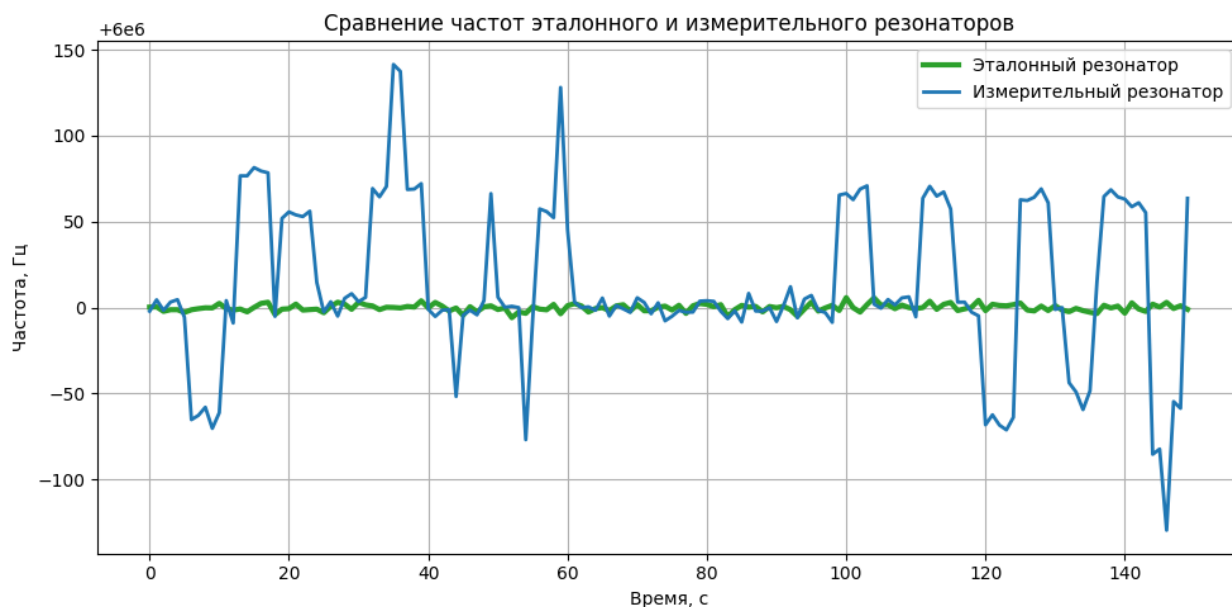


Рисунок 2.3 – Графики частоты эталонного и измерительного генераторов в состоянии покоя

На графике представлены результаты регистрации частоты с двух независимых источников сигнала:

– эталонный генератор (зелёная линия) демонстрирует стабильность ± 2 Гц, что подтверждает его пригодность для высокоточной компенсации дрейфа;

– измерительный генератор (синяя линия), подключённый к открытому резонатору, демонстрирует более высокую вариативность, связанную с воздействием внешней среды и особенностями схемотехники.

Данный результат стал важным доказательством необходимости усовершенствования схемы регистрации в следующих версиях устройства.

Результаты этапа изготовления и первичной проверки прототипа прибора позволяют сделать следующие обоснованные выводы:

- подтверждена функциональность всех цифровых узлов схемы, включая микроконтроллер, память, RTC и коммуникационные интерфейсы;
- проведённая регистрация частоты показала, что эталонный генератор обеспечивает необходимую стабильность, в то время как измерительный канал демонстрирует заметные скачки частоты, требующие дальнейшей проработки;
- зафиксированная динамика изменения частоты свидетельствует о чувствительности канала измерений и потенциальной пригодности метода для оценки толщины осаждаемых плёнок;
- полученные результаты использованы при формировании архитектуры второго прототипа, в котором устранены выявленные недостатки и реализованы улучшенные схемотехнические решения.

Таким образом, опыт создания и проверки первого прототипа стал важнейшим звеном в процессе разработки и послужил основой для дальнейших инженерных решений, обеспечивающих надёжную и точную работу прибора в условиях космического применения.

2.5 Внесение изменений в состав прибора по результатам тестирования

В ходе тестирования первого прототипа прибора (глава 2.4) была зафиксирована необходимость комплексной доработки конструкции с целью устранения ограничений, выявленных на ранних этапах. Это позволило перейти

от лабораторного образца к версии прибора, пригодной для длительной автономной работы в составе малых космических аппаратов. Основные усилия были сосредоточены на повышении точности измерений, устойчивости к внешним воздействиям и интеграции в стандартные архитектуры CubeSat. По результатам разработок была получена охранный грамота на полезную модель (RU 2803675 C1), отражающая состав и функциональные особенности устройства.

В настоящем разделе приведено описание внесённых изменений в схемотехническое решение, конструктивное исполнение и программное обеспечение, а также представлены результаты измерений и приёмо-сдаточных испытаний.

Состав аппаратных доработок

В основу второго прототипа положен тот же базовый принцип измерения частоты пьезоэлектрического резонатора с последующим расчётом толщины осаждаемой плёнки, однако его аппаратная реализация была существенно переработана. Основные изменения коснулись следующих узлов:

- Введён программируемый логический интегральный модуль (ПЛИС) Lattice iCE40UP5K с тактовой частотой 72 МГц. Использование ПЛИС позволило реализовать аппаратную обработку высокочастотных сигналов с повышенной точностью;
- Микроконтроллер STM32F103 был заменён на STM32F407VGT6 с архитектурой Cortex-M4, обеспечивающий более высокий уровень интеграции и производительности;
- Переработана разводка печатной платы. Особое внимание уделено экранированию чувствительных участков, разделению аналоговой и цифровой зон, а также минимизации паразитных наводок;
- Проведена замена ряда компонентов на малогазовыделяющие аналоги с уровнем TML менее 1%, что соответствует требованиям для работы в герметичных отсеках космических аппаратов.

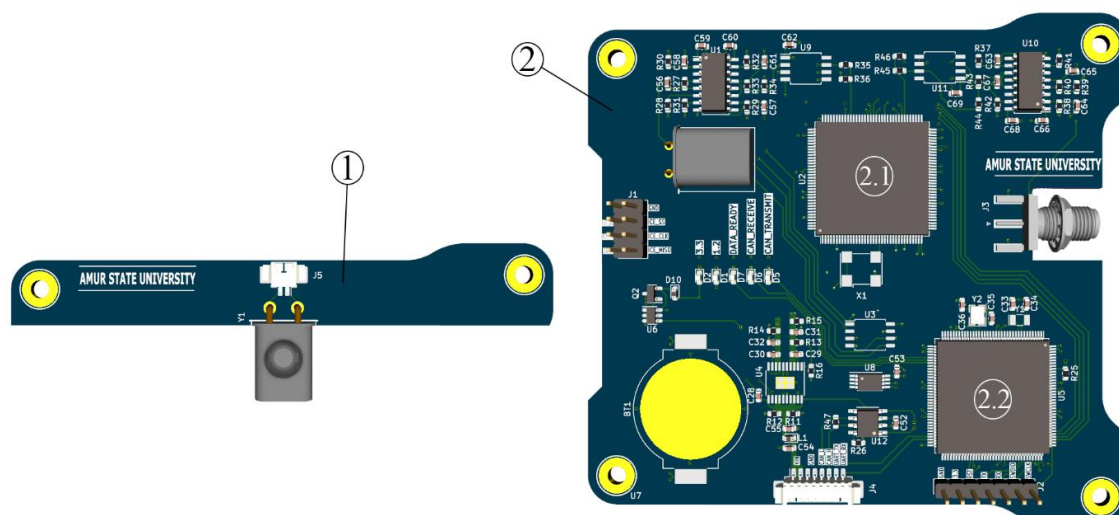


Рисунок 2.4 – 3D-модель второй версии прибора для контроля за явлением контаминации: модуль пьезорезонансного датчика (1) и аналитический модуль (2)

В составе второго прототипа реализованы как измерительный, так и эталонный кварцевые резонаторы. Сигналы от обоих поступают в ПЛИС, где происходит независимое считывание количества импульсов за заданный интервал. Сравнение частот осуществляется на уровне микроконтроллера, что обеспечивает отказоустойчивость в случае деградации одного из каналов.

Вибродинамические испытания

Так как кварцевый резонатор представляет собой тонкую пластинку кристалла кварца с двумя металлическими полосками-контактами. Ввиду использования резонатора без защитного корпуса, существует вероятность его повреждения или разрушения под воздействием вибраций, возникающих при выведении космического аппарата ракетой-носителем. В связи с этим проведение вибродинамических испытаний кварцевого резонатора, является актуальной задачей.

Для проведения вибродинамических испытаний, был использован вибростенд ВИКАМ 35/14 [15] создающий синусоидальные вибрации в вертикальной плоскости. В соответствии с требованиями стандарта ECSS-E-ST-10-03C, вибродинамические испытания должны проводится в трёх взаимно

ортогональных плоскостях. Для выполнения данного требования, были спроектированы и изготовлены оснастки из ABS пластика (рисунок 2.5) с заполнением 85%. Оснастки проектировались таким образом, чтобы их остаточная деформация была близка к нулю, тем самым, обеспечивалось воспроизведение всех воздействий, оказываемых на объект исследования через оснастку.

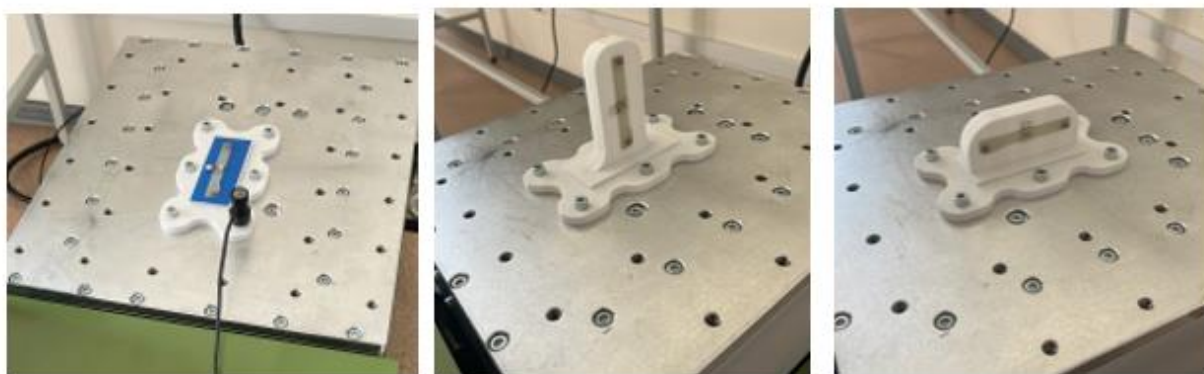


Рисунок 2.5 – Оснастки для закрепления кварцевого резонатора в трёх взаимно ортогональных плоскостях

В соответствии с требованиями стандарта ECSS-E-ST-10-03C, вибродинамические испытания проводились в диапазоне частот от 20 Гц до 80 Гц, с максимальным ускорением установленным на уровне 10g. Изменение частоты составило 0,5 окт/мин [16, 17]. На рисунке 3 представлены графики протокола испытаний.

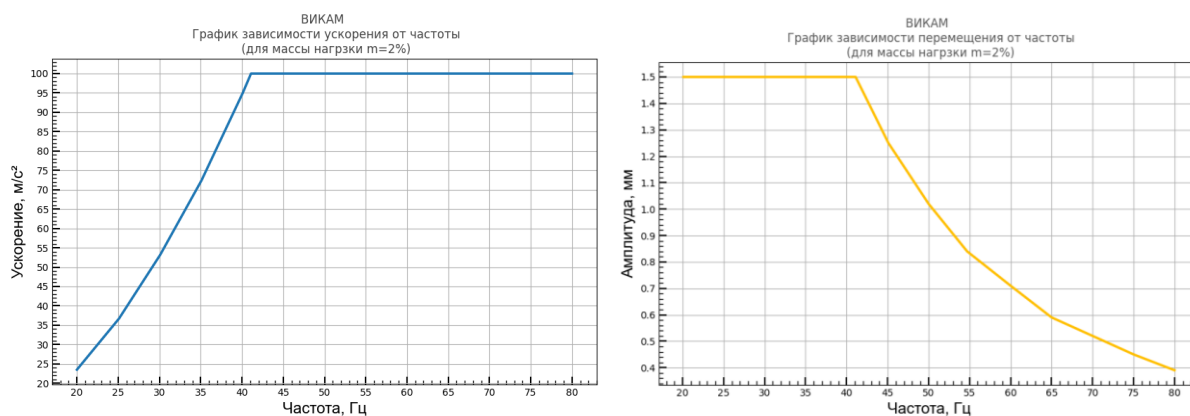


Рисунок 2.6 – Графики протокола испытаний

В результате проведения вибродинамических испытаний не было выявлено резонансных частот. Визуальный осмотр показал отсутствие у кварцевого резонатора видимых повреждений или дефектов, вызванных вибрационными нагрузками. Кроме того, последующее, после испытаний, подключение резонатора в электрическую цепь прибора "Меридиан-Амур" подтвердило его полную работоспособность, что свидетельствует о надёжности конструкции для использования в космических условиях.

Конструкция корпуса пьезорезонансного модуля

В рамках второго этапа разработки была также реализована конструкция специализированного корпуса, предназначенного для размещения измерительного кварцевого резонатора внутри приборов исследуемого космического аппарата. Корпус проектировался как отдельная компонентная единица, обеспечивающая совместимость с форм-фактором CubeSat и с учётом условий эксплуатации в термовакуумной среде.

Модель выполнена из сплава латуни марки Л80, обеспечивающего высокую теплопроводность и устойчивость к деградации в условиях длительного воздействия низкого давления, вибраций и температурных колебаний. Геометрия корпуса предусматривает прочное фиксирование к основанию прибора и надёжную механическую защиту резонатора, при этом не препятствуя осаждению контаминантов на чувствительный элемент.

Параметры:

- габариты: $23 \times 22 \times 10$ мм;
- масса в сборе: не более 15 г;
- температурный диапазон эксплуатации: $-170...+50$ °С.

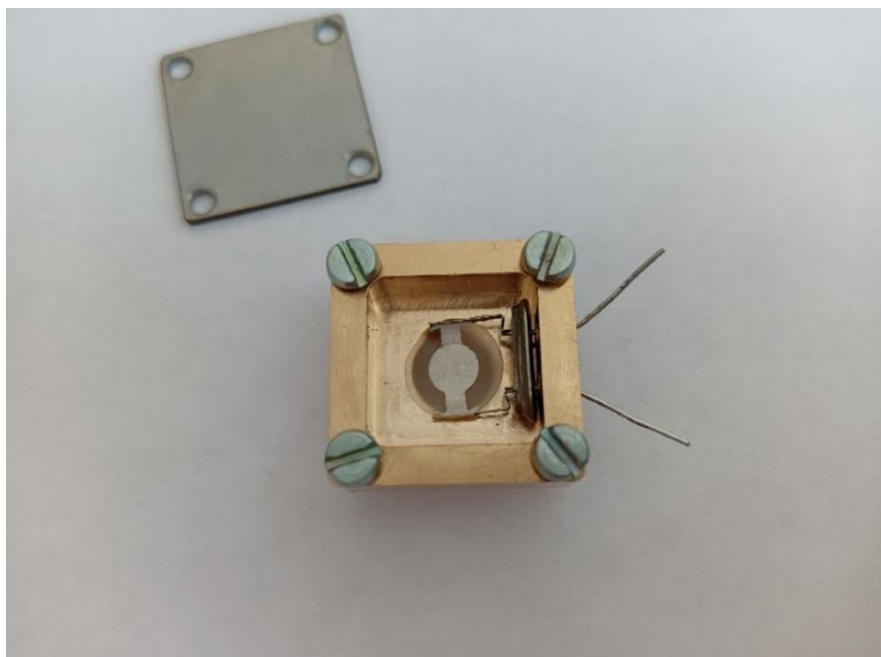


Рисунок 2.7 – Корпус с размещённым внутри датчиком

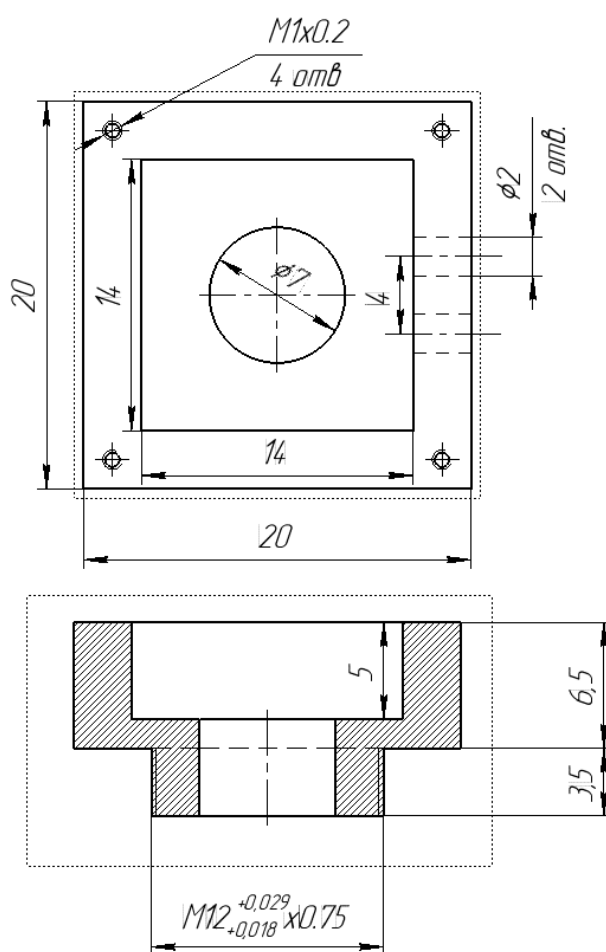


Рисунок 2.8 – Размеры корпуса датчика

Программные изменения

Программное обеспечение претерпело изменения. На стороне ПЛИС реализована параллельная обработка сигналов от двух генераторов с использованием счётчиков на 40 бит. Переход на аппаратный подсчёт импульсов позволил устранить резкие изменения частоты, ранее наблюдавшееся при программной обработке.

Микроконтроллер теперь работает в режиме приоритетной обработки данных: по окончании каждого измерительного интервала происходит считывание значения, его коррекция по таблице температурной компенсации и запись в энергонезависимую память с одновременной передачей по интерфейсу CAN.

Для снижения энергопотребления реализована динамическая перестройка тактовых частот и отключение периферийных модулей в периоды ожидания.

Исходный код зарегистрирован в составе официальной программы для ЭВМ, а также размещён в репозитории GitVerse [13, 14].

Прототип прибора была подвергнута ряду испытаний, соответствующих нормативам ГОСТ 30630.0.0–99 и методическим рекомендациям Роскосмоса по квалификации малых КА. В частности, проведены:

- термические испытания в диапазоне температур от -170 до $+50$ °С;
- вакуумные испытания при давлении не выше 10^{-5} Па;
- вибрационные испытания в диапазоне частот от 20 до 100 Гц;
- проверка устойчивости к электромагнитным помехам.

Результаты подтвердили стабильность работы во всех режимах. Частота эталонного резонатора демонстрировала отклонение не более ± 1 Гц. На графике ниже отображены значения частот обоих генераторов, полученные в ходе повторного тестирования:

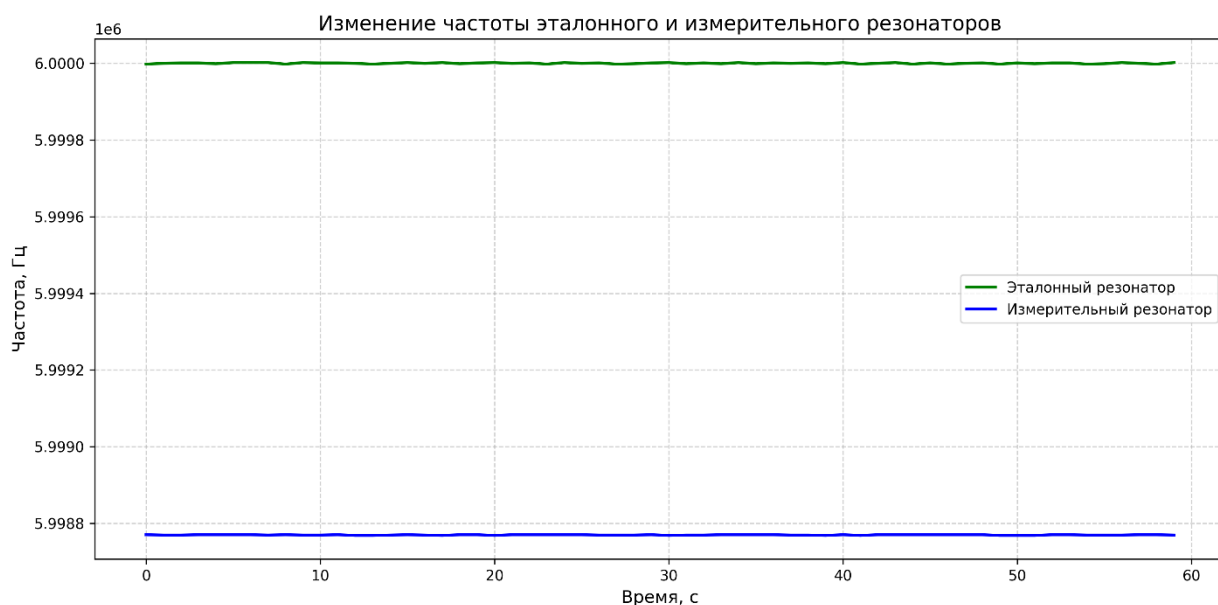


Рисунок 2.9 – График изменения частоты эталонного и измерительного датчика

Таким образом, проведенная доработка конструкции прибора и создание второго прототипа обеспечили достижение всех целевых показателей, сформулированных в техническом задании. Прототип обладает высокой точностью (погрешность измерения частоты ± 1 Гц), низким уровнем собственных шумов, а также конструктивной совместимостью с архитектурой малых спутников.

Отдельного внимания заслуживает созданный корпус чувствительного элемента, обладающий высокой технологичностью и универсальностью интеграции. Программное обеспечение адаптировано к условиям автономной эксплуатации и выполнено с соблюдением всех требований к структуре, читаемости и документированию кода.

На основании проведенных испытаний можно сделать вывод о готовности прибора к дальнейшему внедрению в реальную миссию и о целесообразности его серийного воспроизводства с минимальными доработками.

Исходные данные и программное обеспечение размещены в открытом репозитории [14], и включены в комплект рабочей конструкторской документации, приведенной в приложении.

2.6 Технологическая карта проверка прибора

Для количественной оценки чувствительности прибора и проверки работоспособности измерительного канала в условиях, имитирующих натурное осаждение контаминантов, было проведено тестирование с использованием специализированного вакуумного оборудования. В данном подпункте описывается структура эксперимента, применённая методика, используемое оборудование и зафиксированные результаты.

Целью экспериментального исследования являлась регистрация изменения частоты колебаний пьезоэлектрического резонатора в процессе осаждения плёнки металлического магния в условиях высоковакуумной среды. Основной задачей было подтверждение способности прибора регистрировать изменение массы на чувствительной поверхности на уровне, соответствующем толщине плёнки менее 10 нм. Дополнительно проводилось сравнение данных, полученных с экспериментального образца прибора, с результатами промышленного лабораторного измерителя толщины осаждённого слоя — прибора Sycon.

Для проведения испытаний применялась сверхвысоковакуумная система на базе камеры производства Varian, обеспечивающая давление не выше 10^{-7} Па. Внутри камеры размещалась металлическая танталовая трубка с микроотверстием, в которую был загружен порошкообразный магний высокой чистоты. При пропуске тока на трубку происходил её нагрев, вызывающий испарение магния. Испарение через прокол в трубке обеспечивало осаждение на поверхность чувствительного элемента.

Пьезоэлектрический резонатор (6 МГц) размещался внутри вакуумной камеры на изолированной платформе, при этом вся остальная часть прибора (включая аналого-цифровую электронику и контроллер) находилась вне камеры. Электрическое соединение между резонатором и основной платой осуществлялось посредством высокочастотного коаксиального кабеля, выведенного наружу через гермоввод.

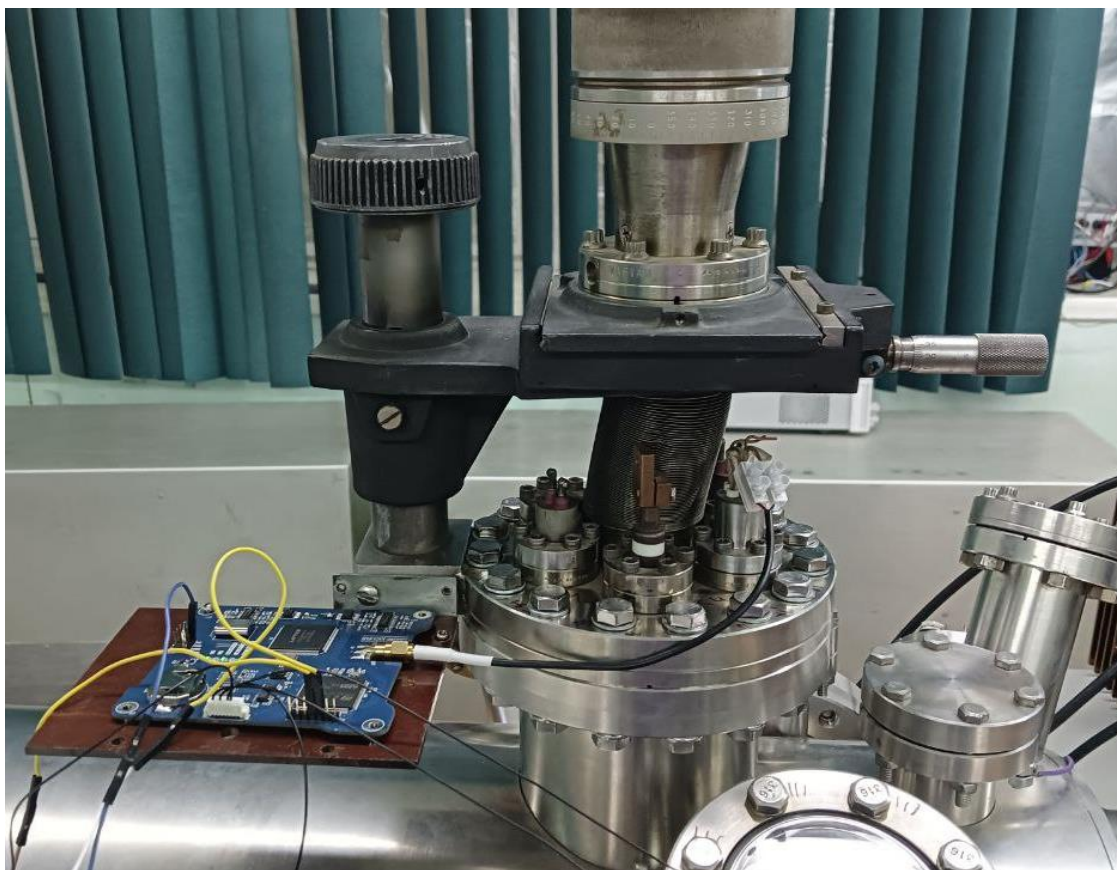


Рисунок 2.10 – На фотографии СВВ-камера с прибором в процессе тестирования

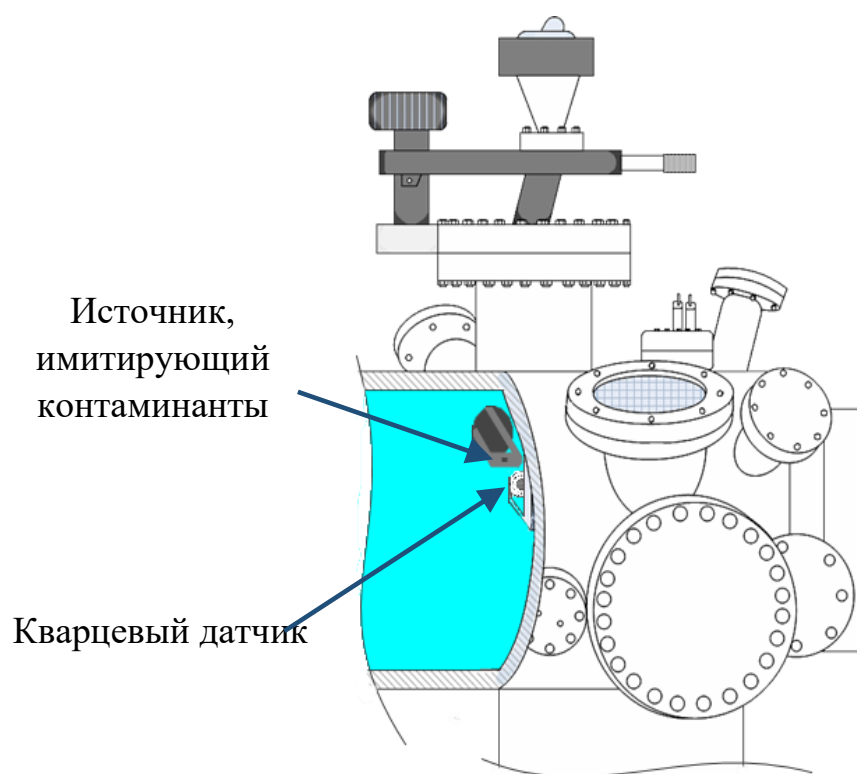


Рисунок 2.11 – Схема экспериментальной установки

Полный цикл эксперимента включал три стадии:

- этап подготовки (подготовка и стабилизация);
- этап испарения (включение нагрева танталовой трубки);
- этап охлаждения (естественное снижение температуры после остановки испарения).

Таблица 2.2 – Временные параметры этапов

Этап	Длительность, с	Описание действий
Подготовка	≈ 150	Стабилизация резонатора, запуск регистрации
Осаждение магния	≈ 100	Включение нагрева, испарение и осаждение на кварц
Остывание	≈ 500	Постепенное охлаждение и стабилизация частоты

Частота резонатора регистрировалась непрерывно с шагом 1 с. Измерения передавались на внешний ПК в режиме реального времени через UART-интерфейс и сохранялись в текстовом формате. Обработка данных производилась после завершения эксперимента средствами Python и matplotlib.

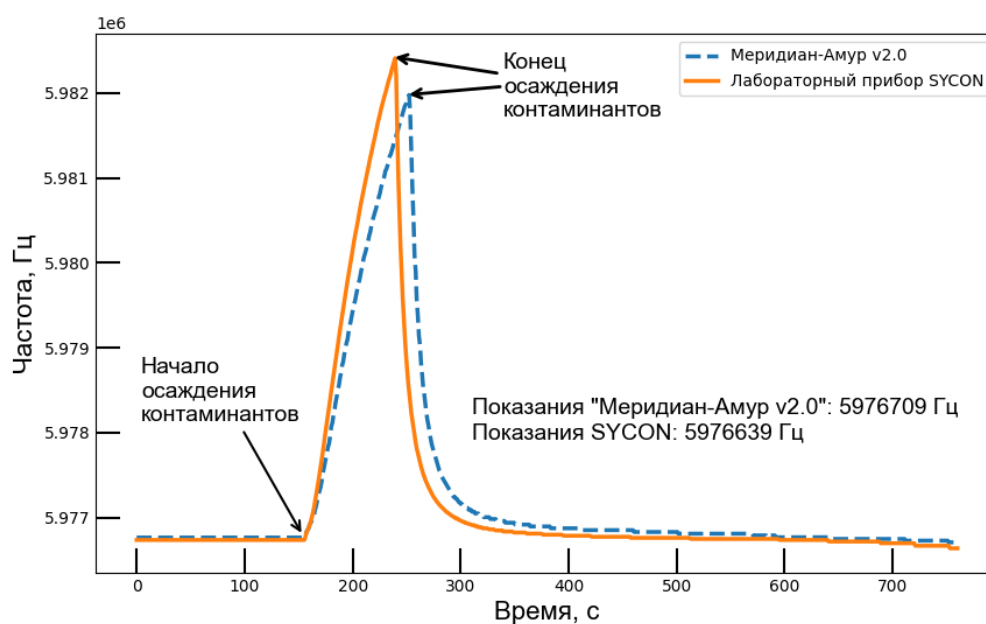


Рисунок 2.12 – Графики частоты измерительного резонатора при осаждении загрязнителей

На графике отчётливо фиксируется типичная форма изменения частоты, резкий подъём, вызванный локальным нагревом кварца во время осаждения, за которым следует спад, соответствующий фазе охлаждения. Конечное значение частоты, как правило, несколько ниже первоначального, что объясняется накоплением массы осевшего материала.

Для обеспечения повторяемости испытаний, аналогичный эксперимент проводился повторно с идентичной последовательностью этапов. Сравнение результатов двух запусков показало воспроизводимость формы графика, идентичность продолжительности всех фаз и схожесть итоговых значений смещения частоты.

В качестве контрольного прибора для оценки толщины плёнки применялся промышленный лабораторный прибор Sycon. Максимальное расхождение между значением, зарегистрированным прибором данной разработки, и показаниями Sycon не превысило 70 Гц, что соответствует допустимому отклонению и подтверждает функциональную пригодность прибора к натурной регистрации процессов контаминации.

Проведённое тестирование подтвердило возможность регистрации процесса осаждения нанометровых плёнок с использованием устройства собственной разработки. Зафиксированная динамика частоты свидетельствует о высокой чувствительности схемы измерений. Полученные результаты имеют сопоставимую точность с лабораторным промышленным оборудованием и подтверждают правильность выбранных архитектурных решений.

3 ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ

Данная дипломная работа посвящена разработке компактного прибора для контроля за явлением контаминации в составе малых космических аппаратов стандарта CubeSat. Устройство рассчитано на работу в составе универсальных служебных платформ и может быть адаптировано к различным типам спутников. Одним из ключевых аспектов инженерной реализации прибора является его экономическая целесообразность и технологическая реализуемость в условиях единичного и малосерийного производства.

В соответствии с требованиями ГОСТ 15.301-2016 «Система разработки и постановки продукции на производство. Продукция производственно-технического назначения. Порядок разработки и постановки продукции на производство» и ГОСТ 14.004-83 «Технологическая подготовка производства. Термины и определения основных понятий», расчёт стоимости изготовления прибора включает в себя следующие категории затрат: прямые (материалы, комплектующие, труд), косвенные (накладные расходы), прибыль, а также налог на добавленную стоимость (НДС).

Прямые затраты охватывают фактическую стоимость всех компонентов, необходимых для сборки одного прибора. Общая сумма по этой статье, включая стоимость изготовления печатной платы составила 56038 у.е. Оплата труда производственного персонала включает затраты на инженера-схемотехника, программиста, инженера-испытателя, техника-сборщика и руководителя проекта. В расчётах принята совокупная величина 190000 у.е., исходя из средней месячной нагрузки на каждого специалиста. На сумму оплаты труда начисляется НДФЛ по ставке 13 %, что составило 24700 у.е.

Накладные расходы принимаются в размере 40 % от суммы прямых затрат. В данную категорию входят аренда производственных помещений, амортизация оборудования, электроэнергия, программное обеспечение, услуги вспомогательного персонала и иные организационные затраты. Общая сумма косвенных расходов составила 108280 у.е.

Согласно ГОСТ 15.301-2016, для оценки экономической эффективности при единичном изготовлении прибора закладывается плановая прибыль в пределах 5–15 % от полной себестоимости. В данной работе принята средняя величина — 10 %, что составляет 37899 у.е.

Дополнительно, на основании главы 21 НК РФ, на полную стоимость изделия с прибылью начисляется НДС по ставке 20 %, что эквивалентно 83375 у.е. Итоговая структура затрат представлена в таблице.

Таблица 3.1 – Итоговая структура затрат на изготовление одного прибора.

Статья затрат	Сумма, у.е.
Электронные компоненты и материалы	56038
Оплата труда специалистов	190000
НДФЛ	24700
Накладные расходы (40 % от прямых затрат)	108280
Плановая прибыль (10 % от суммы прямых и накладных)	37898
НДС (20 % от суммы с прибылью)	83375
Полная стоимость изготовления опытного прибора	500291

Таким образом, расчётная стоимость изготовления одного прибора с учётом всех обязательных отчислений и организационных затрат составляет 500291 у.е. Представленная калькуляция выполнена в соответствии с актуальными нормативными документами и может служить ориентиром при планировании серийного выпуска или внедрении прибора в рамках служебных платформ космических аппаратов. Структура затрат отражает технологическую специфику изделия и соответствует стандартной структуре себестоимости в сфере приборостроения.

4 БЕЗОПАСНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧНОСТЬ ПРОИЗВОДСТВА

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке бортовой системы малого космического аппарата стандарта «CubeSat» для контроля за явлением контаминации.

При разработке, сборке и тестировании прибора возможны физические и химические опасные вредные факторы, которые воздействуют на людей, что может привести к несчастным случаям среди них можно:

- Механическое травмирование – острые кромки деталей и инструментов;
- Вибрационное воздействие – отлёт закреплённых образцов при испытаниях на вибростенде;
- Ожоги – контакты с нагретыми поверхностями паяльной станции и нагревательными элементами;
- Электрический шок – работа с источниками питания и паяльными станциями;
- Статический разряд – накопление и разряд статического электричества на электронных компонентах;
- Химическое отравление – пары и аэрозоли флюса, расплавленного припоя;
- Пожар – искрение и брызги расплавленного припоя при пайке;
- Эргономические риски – длительное неудобное положение и повторяющиеся движения рук;
- Экологическая опасность – несанкционированный сброс химических отходов и отработанных флюсов;
- Загрязнение воздуха – накопление взвешенных частиц и летучих органических соединений без эффективной вентиляции.

На мой взгляд, наиболее критичным среди перечисленных является химический фактор, поскольку пары и аэрозоли активных компонентов флюса и

припой формируются на каждом этапе монтажа электронных узлов и способны накапливаться в воздухе рабочей зоны. При этом, минимизация влияния химического фактора требует более комплексного подхода в отличии от остальных факторов.

4.1 Химический фактор и методы минимизации воздействия

При пайке и очистке печатных плат образуются высококонцентрированные летучие органические соединения (ЛОС) спиртовых и канифольных флюсов, хлористый фтор и хлористый цинк, а также мелкодисперсные частицы припоя с содержанием свинца и сурьмы. Согласно ГОСТ 12.1.005-88 «Воздух рабочей зоны. Общие требования» ПДК ЛОС флюсов не должна превышать 0,5 мг/м³, свинца и его неорганических соединений – 0,1 мг/м³; при отсутствии эффективной систем вентиляции эти значения быстро превышаются, что может вызывать хронический бронхит, раздражение слизистых и нейротоксические реакции.

Основываясь на требованиях ГОСТ 12.4.021-75 «Системы вентиляции и кондиционирования воздуха производственных помещений», в рабочем помещении предусматривается комбинированная вентиляция: локальное вытяжное устройство над паяльной станцией должно улавливать 75–90 % вредных эмиссий непосредственно у источника, а общая приточно-вытяжная система — разбавлять остаточные концентрации до уровней не выше ПДК. Согласно СНиП 41-01-2003 (СП 60.13330.2012), воздухообмен в верхней зоне лаборатории должен быть не менее однократного объёма в час, а фильтры для притока класса F7 выбираются по ГОСТ 30494-96 для механической очистки воздуха от частиц размером от 0,3 до 10 мкм. Вытяжной воздух проходит через мешочно-картриджные и угольные кассеты по ГОСТ 12.1.044-89 «Средства коллективной защиты», обеспечивающие не менее 80% улавливания аэрозолей и органических паров.

Также согласно ГОСТ 12.0.230-2007 «Общие принципы управления охраной труда», непрерывная работа у паяльной станции ограничивается 45 минутами с обязательным 15-минутным перерывом, при этом инженер обязан

проходить регулярный инструктаж и контролировать концентрации портативным газоанализатором не реже одного раза за смену. Для защиты органов дыхания и кожи инженер использует респиратор класса A1P2 по ГОСТ 12.4.103-83, нитриловые перчатки по ГОСТ 20010-93 и защитные очки с боковой защитой по ГОСТ 12.4.183-94.

В соответствии с ГОСТ 17.2.3.02-78 «Отходы производства и потребления» отработанные флюсы и промывочные растворы собирают в герметичные ёмкости и передают специализированным организациям для утилизации. Организация рабочего места ведётся согласно ГОСТ 12.2.007.0-75 «Организация рабочих мест. Общие эргономические требования» — локальные отсосы и оборудование располагаются таким образом, чтобы минимизировать физическое напряжение инженера и обеспечить максимально эффективное удаление вредных выбросов.

Комплекс этих мер обеспечивает поддержание концентраций вредных веществ ниже ПДК и создаёт основу для последующего расчёта вентиляционной системы в рабочем помещении.

4.2 Расчёт вентиляционной системы для рабочего помещения

Для снижения воздействия химического фактора рассчитаем вентиляционную систему; за основу возьмём помещение размерами: 5 м × 7 м × 2,7 м. Выберем комбинированную схему: общая приточно-вытяжная вентиляция плюс локальный отсос над паяльной станцией.

- Согласно СНиП 41-01-2003 (СП 60.13330.2012), для помещений с вредными парами и аэрозолями рекомендуется воздухообмен от 3 до 6 об/ч. Мы принимаем $n = 5$ 1/ч, чтобы обеспечить запас по сравнению с нормативным минимумом и учесть возможную неоднородность распределения загрязнений.

- Для расчёт общего расхода воздуха применяем формулу:

$$Q_{\text{общ}} = V \cdot n = 94,5 \text{ м}^3 \cdot 5 \frac{1}{\text{ч}} = 472,5 \text{ м}^3 / \text{ч} \quad (4.1)$$

Полученный показатель учитывает разбавление остатков паров до концентраций не выше ПДК по ГОСТ 12.1.005-88.

- Расчёт местной вентиляции

По ГОСТ 12.4.021-75 локальный отсос должен перехватывать не менее 80 % эмиссии в зоне образования. Захватная скорость на границе зоны — 0,4...0,6 м/с. Зона захвата принимает форму призмы 0,2 × 0,6 м (на 600 мм над рабочей поверхностью). Тогда:

$$Q_{\text{лок}} = v \cdot S \cdot 3600 = 0,5 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 0,12 \text{ м}^2 \cdot 3600 \frac{\text{с}}{\text{ч}} = 216 \text{ м}^3 / \text{ч} \quad (4.2)$$

- Суммарный расход:

$$Q_{\text{общий}} = Q_{\text{общ}} + Q_{\text{лок}} = 472,5 + 216 = 688,5 \text{ м}^3 / \text{ч} \quad (4.3)$$

- Подбор оборудования:

Приточный вентилятор: 480 м³/ч с фильтрами F7 (ГОСТ 30494-96).

Вытяжной вентилятор: 690 м³/ч, включая локальный отсос (216 м³/ч) и общую систему (≈472,5 м³/ч).

Фильтрация: мешочно-картриджные и угольные кассеты по ГОСТ 12.1.044-89.

- Инженерно-технические требования

- Давление в каналах $\Delta P \leq 250$ Па на секцию.
- Уровень шума ≤ 65 дБ на рабочей зоне (СП 60.13330.2012).

- Эксплуатация и контроль

- Ежеквартальная проверка расхода анемометром.
- Очистка фильтров не реже одного раза в квартал.
- Соответствие эргономическим нормам (ГОСТ 12.2.007.0-75).

Таким образом проведён анализ потенциальных опасностей при разработке, сборке и испытаниях бортовой системы CubeSat, выделен наиболее

критичный — химический фактор, обусловленный парами флюса и аэрозолей припоя, и обоснованы нормативно-технические методы его минимизации (локальные отсосы, общая приточно-вытяжная вентиляция, фильтры, СИЗ, организационные регламенты и утилизация отходов). На основе объёма мастерской ($5 \times 7 \times 2,7$ м) выполнен расчёт схемы вентиляции с суммарным расходом воздуха ≈ 690 м³/ч, что гарантирует поддержание концентраций вредных веществ ниже ПДК и создаёт инженерную основу для безопасного производства и тестирования разработанной системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения выпускной квалификационной работы была проведена теоретическая и практическая проработка задачи разработки бортовой системы контроля за явлением контаминации для малых космических аппаратов стандарта CubeSat.

В первой главе выполнен всесторонний обзор природы контаминации в условиях космического вакуума, её влияния на оптические и электронные компоненты приборов и анализ существующих методов диагностики — оптический, масс-спектрометрический и пьезорезонансный. Выявлены преимущества и ограничения каждого подхода по критериям чувствительности, габаритов, энергопотребления и технологичности реализации в формате CubeSat.

Во второй главе обоснован выбор пьезорезонансного метода как наиболее оптимального для миниатюрных бортовых систем. Проведены расчёты массогабаритных и энергетических характеристик прибора, разработана структурная схема и определён состав функциональных модулей. На базе требований PC/104 спроектированы и собраны два прототипа. Проведены первичные лабораторные испытания. По результатам первой серии тестов реализована доработка аппаратной части: введён ПЛИС для предварительной цифровой обработки сигналов, заменён STM32 на более мощную серию F4, улучшено экранирование и применены малогазовыделяющие компоненты. Итоговый второй прототип успешно прошёл термовакuumные и вибродинамические испытания по нормативам ECSS (давление до 10^{-5} Па, температура $-170...+50$ °C, вибрации от 20 Гц до 100 Гц с ускорением до 10 g) и подтвердил стабильность работы. Цикл тестов в сверхвысоковакуумной камере с осаждением магния на пьезорезонатор показал совпадение показаний с промышленным прибором Sycon в пределах допустимых погрешностей, что подтверждает высокую точность и повторяемость измерений.

В третьей главе проведён экономический анализ материалов и оценены трудозатраты на производство устройства. Показано, что предложенное решение обладает низкой материалоёмкостью и умеренными производственными затратами, что делает его конкурентоспособным при малосерийном выпуске в составе стандартных CubeSat-платформ.

Таким образом, разработанная бортовая система мониторинга контаминации отвечает заявленным целям и задачам: она компактная, энергоэффективная и технологична, обеспечивает чувствительность на уровне плёнок толщиной в единицы нанометров и готова к интеграции в научные и прикладные космические миссии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Фомин, Д. В. Изучение явления контаминации на малых космических аппаратах / Д. В. Фомин, И. О. Шолыгин, Е. И. Зубко // Научное приборостроение. – 2024. – Т. 34, № 2. – С. 44-53. – EDN NXJUTI.
- 2 А. И. Акишин. Воздействие собственной внешней атмосферы на материалы космических аппаратов // Перспективные материалы, 2007, № 2, с. 14–22.
- 3 А. Б. Надзирадзе, В. В. Шапошников, В. А. Смирнов и др. Выбор критерия и учет состава загрязнения при оценке воздействия свободной атмосферы на космические аппараты // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета, 2007, № 4, с. 91–94.
- 4 А. А. Чиров. Влияние плёнок рабочего тела ЭРД на оптические характеристики приборов // Космические исследования, 2014, № 3, с. 248–256.
- 5 Cassini camera contamination anomaly: experiences and lessons learned // AIAA, 2006.
- 6 В. А. Данилкин. Собственная внешняя атмосфера космических аппаратов и её влияние на параметры радиосигналов // Теплофизика и аэромеханика, 2008, № 1, с. 75–78.
- 7 Е. В. Калашников, С. Н. Калашникова, К. А. Томеев. Исследование свойств поверхностей при загрязнении // Журнал технической физики, 2014, том 84, № 2, с. 83–91.
- 8 А. Е. Голых, Д. В. Фомин. Поворотный комплекс для проведения вибродинамических испытаний наноспутников // Известия высших учебных заведений, 2023, том 66, № 6, с. 472–482.
- 9 И. В. Киселов, В. В. Сысоев, Е. И. Киселов. Способ измерения толщины тонких плёнок и картография топографии поверхности // Патент RU2641639C2, 2018.

10 CubeSat Design Specification [Электронный ресурс] / California Polytechnic State University. – Режим доступа: <https://www.cubesat.org/s/CubeSat-Design-Specification-Rev-13.pdf> – Дата обращения: 29.05.2025.

11 RU 2803675 C1. Блок полезной нагрузки для исследования явления контаминации внутри приборов спутников стандарта CubeSat // Фомин Д. В., Зубко Е. И и др. пат. № 2803675 Российская Федерация. № 2023114767; заявл. 06.06.2023; опубл. 19.09.2023.

12 RU 231665 Бортовая система спутника стандарта CubeSat для контроля за явлением контаминации // Полезная модель №231665, 05.02.2025 Бюл. № 4, Фомин Д.В., Зубко Е.И.

13 Программа для ЭВМ «Программа для прибора “Меридиан-Амур”, устанавливаемого на малые космические аппараты стандарта “CubeSat”». Рег. № 202468944; заявл. 12.09.2024; рег. 17.09.2024 / Зубко Е. И., Фомин Д. В.

14 Зубко Е. И. Репозиторий с исходным кодом проекта «Meridian-Amur» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gitverse.ru/Yarupalo/Meridian-Amur> – Дата обращения: 17.04.2025.

15. Технология тонких пленок (справочник) / Пер. с англ. под ред. Л. Майселла, Р. Глэнга. М.: Сов. радио, Т. 2, 1977. 768 с.

15. Электромеханический вибрационный стенд ВИКАМ-35/14 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://technoprism.ru/catalog/proizvodstvo-ispytaniya-oborudovaniya/ispytatelnye-stendyvikam/elektromekhanicheskiy-vibratsionnyy-stend-vikam-35/> . – Дата обращения: 17.04.2025.

16. Европейский стандарт проведения наземных испытаний аэрокосмической техники [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.abbottaerospace.com/downloads/ecss-e-st-10-03c-space-engineering-testing/> – Дата обращения: 21.05.2025.

17. Технический бюллетень центра инженерии и безопасности НАСА № 15-03 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.nasa.gov/wp->

content/uploads/2015/04/nesc-tb-15-03-best-practices-for-use-of-sine-vibration-testing.pdf – Дата обращения: 22.05.2025.

18. Космический аппарат “Маяк”. Программа и методика испытаний на статическую и вибродинамическую прочность. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.your-sector-of-space.org/gallery/.pdf> – Дата обращения: 29.05.2025.

19. IPC-2221. Generic Standard on Printed Board Design [Электронный ресурс] / IPC. — Режим доступа: [https://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A\(L\).pdf](https://www-eng.lbl.gov/~shuman/NEXT/CURRENT_DESIGN/TP/MATERIALS/IPC-2221A(L).pdf) – Дата обращения: 29.05.2025.

20. Кузин С.В., Богачев С.А., Кириченко А.С. Особенности разработки и использования аппаратуры для проведения космических экспериментов в ВУФ-диапазоне спектра // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2023. № 12. С. 31–38.

21. Технология тонких пленок (справочник) / Пер. с англ. под ред. Л. Майселла, Р. Глэнга. М.: Сов. радио, Т. 2, 1977. 768 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

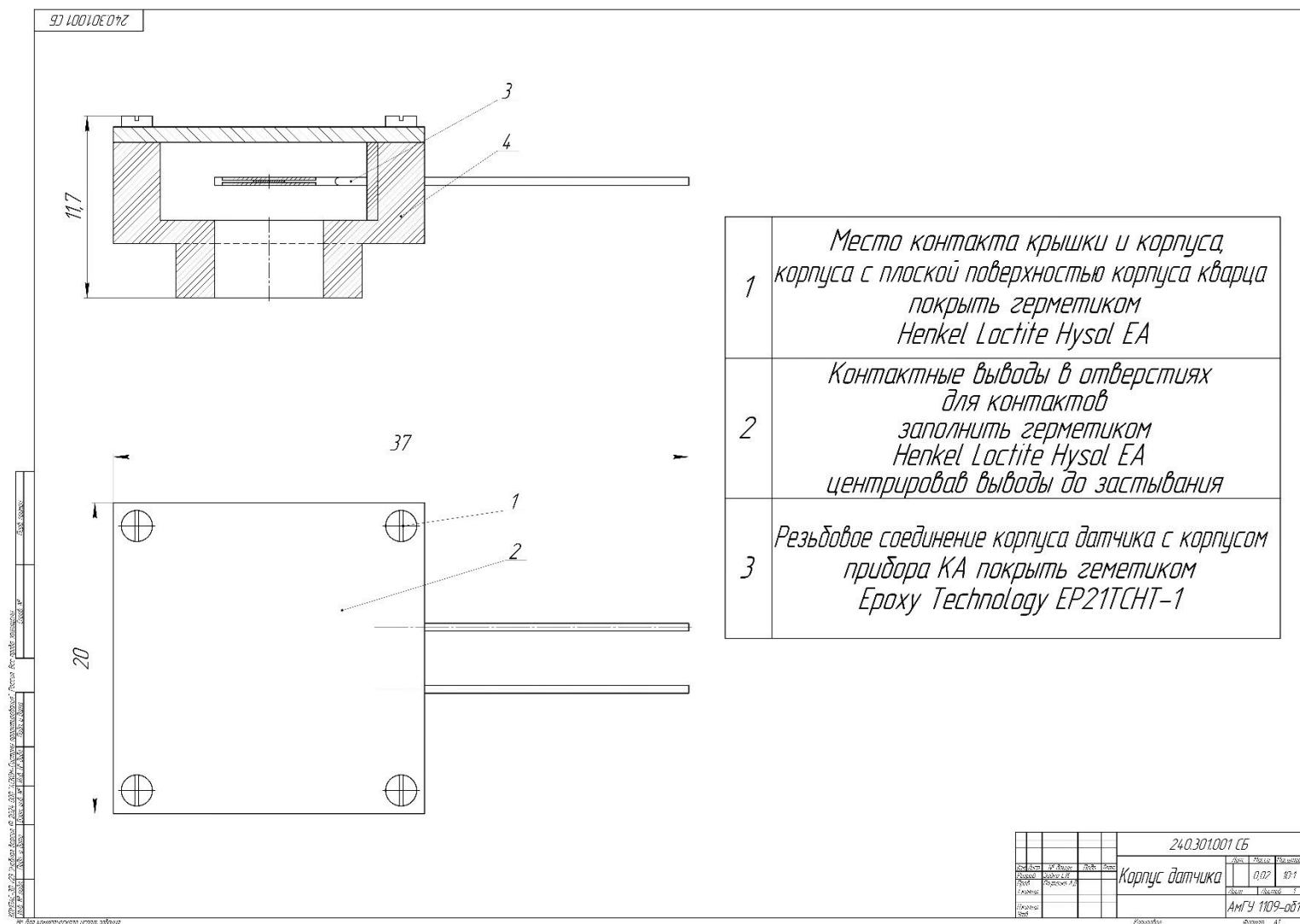


Рисунок А.1 – Корпус датчика

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

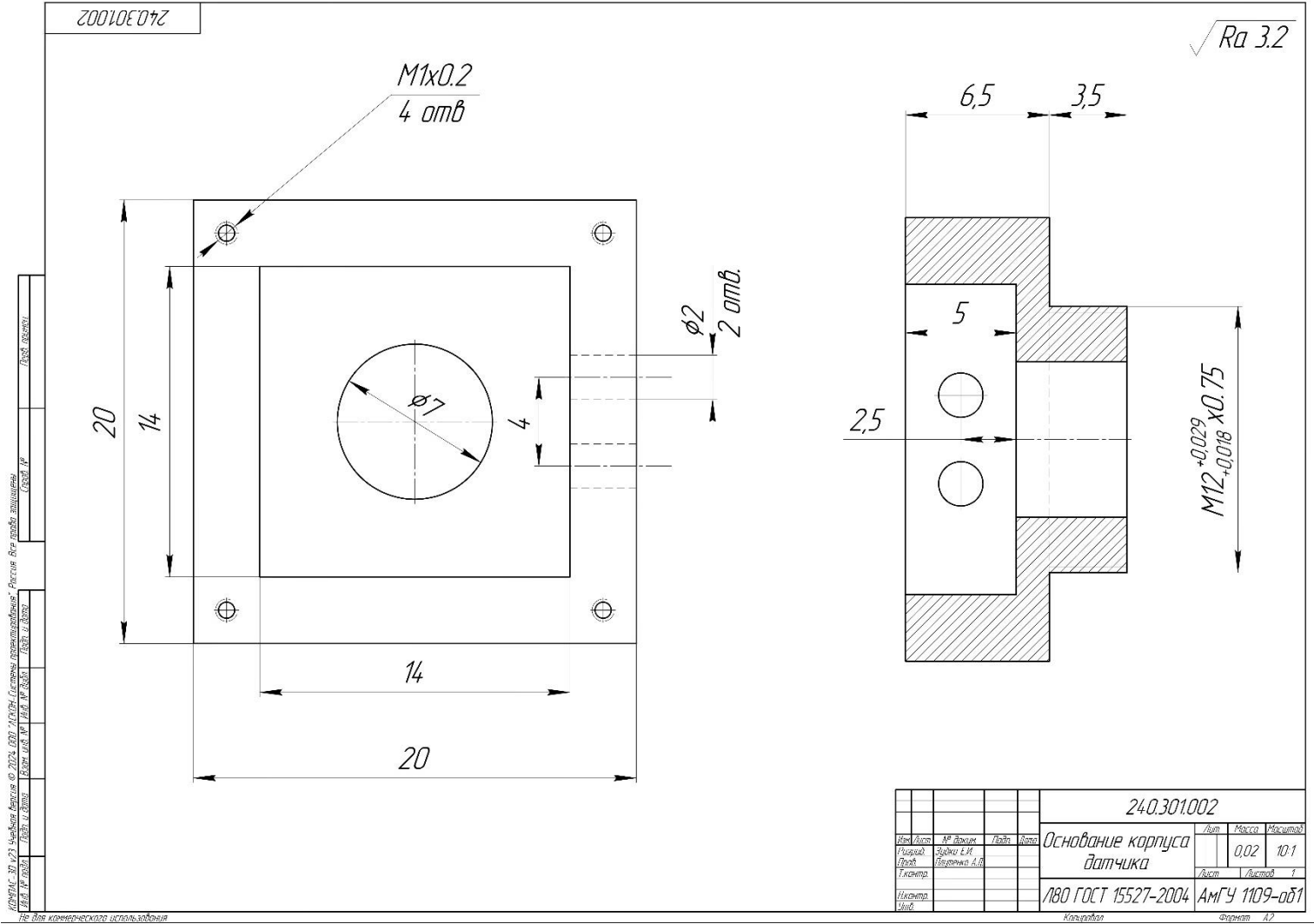


Рисунок А.2 – Основание корпуса датчика

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ А

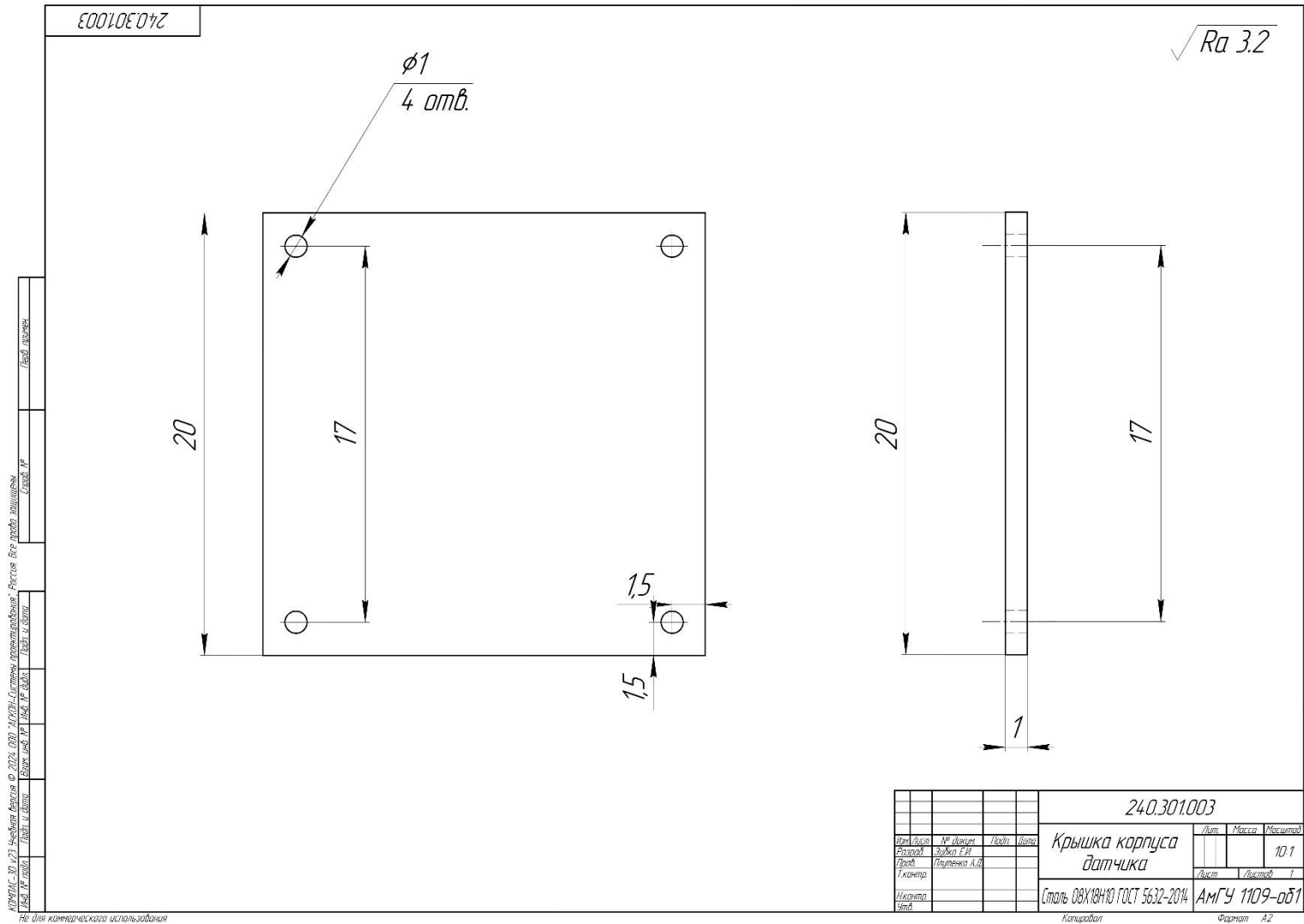


Рисунок А.3 – Крышка корпуса датчика

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

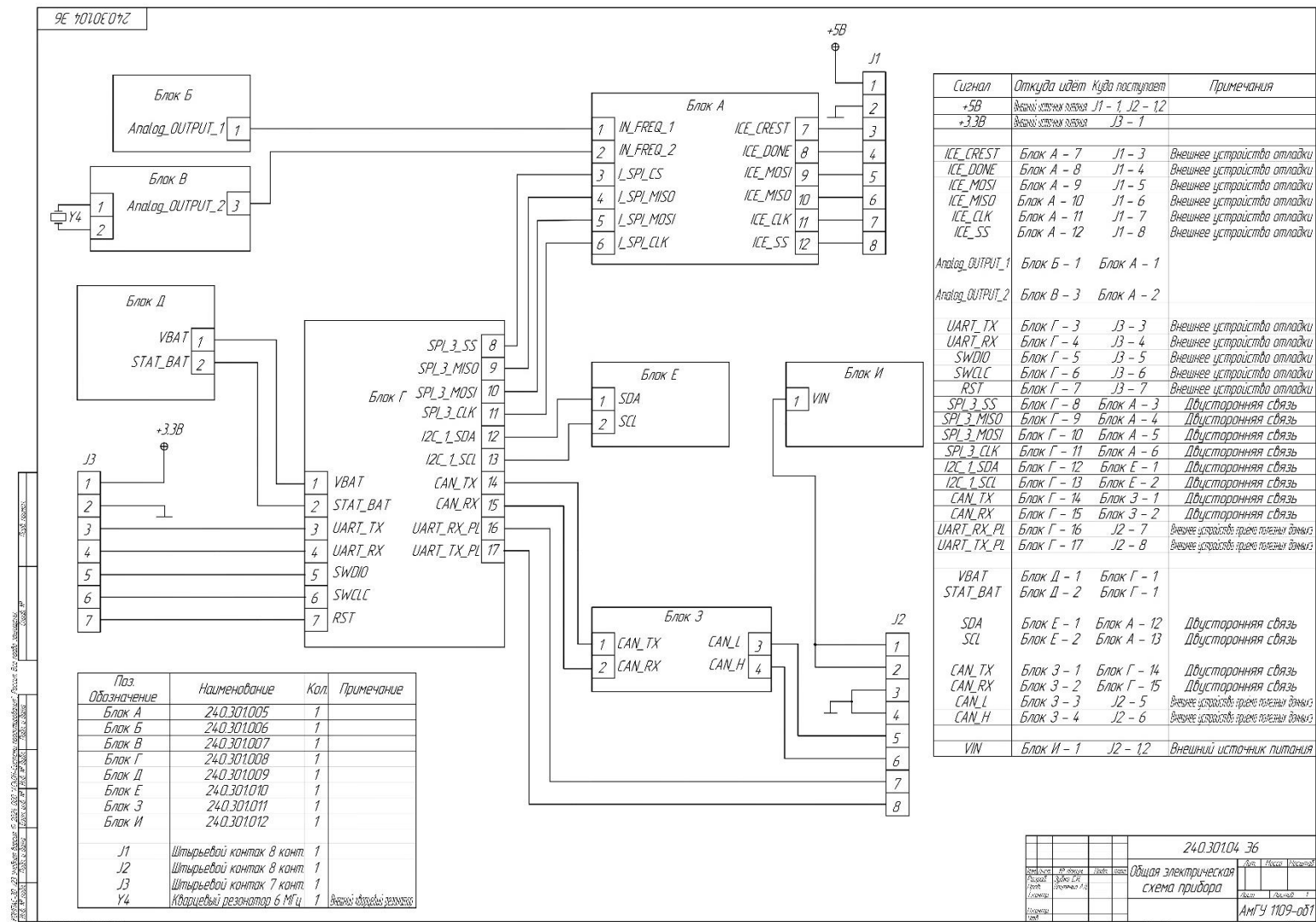


Рисунок Б.1 – Общая электрическая схема прибора

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

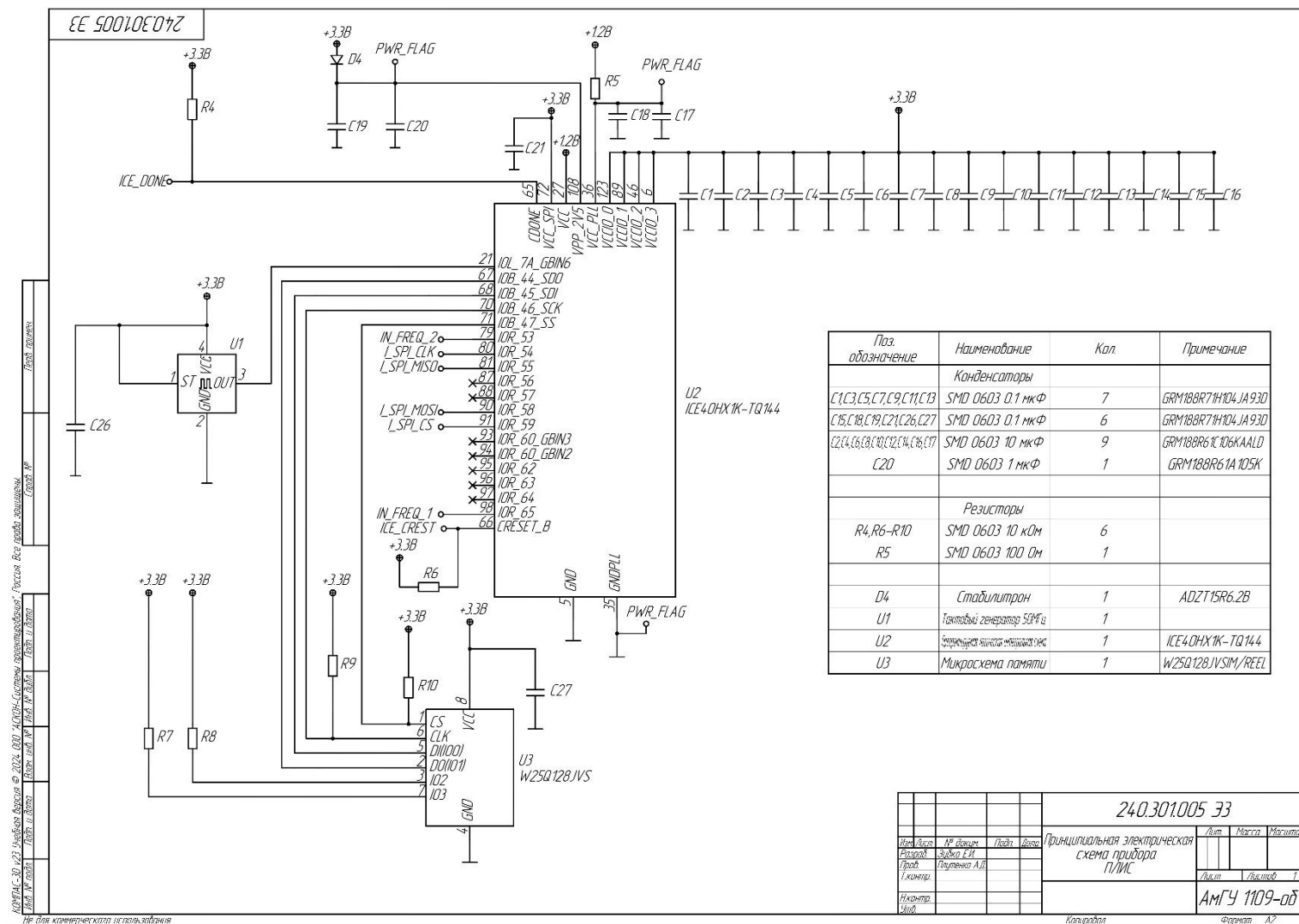


Рисунок Б.2 – Принципиальная электрическая схема прибора. ПЛИС

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

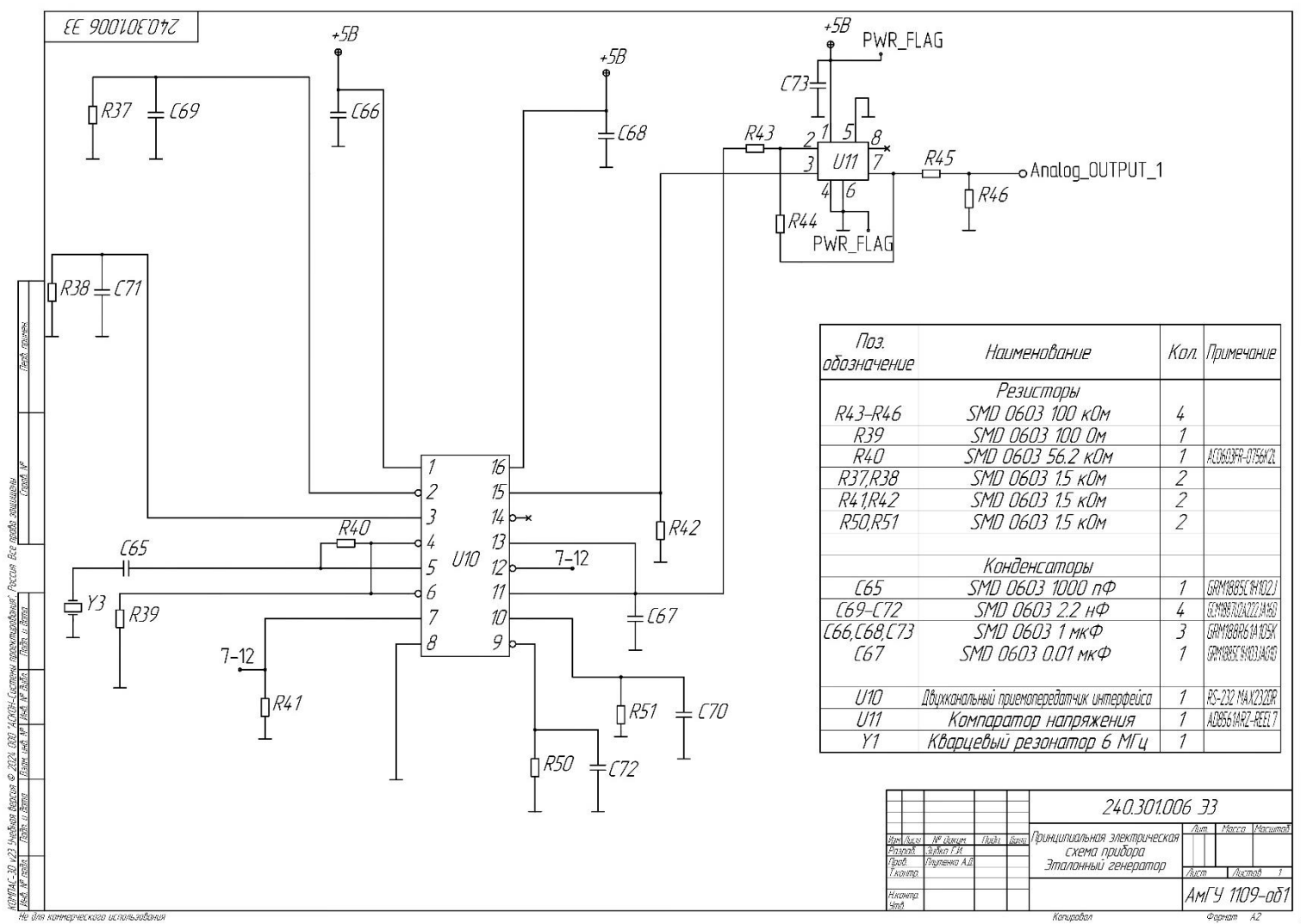


Рисунок Б.3 – Принципиальная электрическая схема прибора. Эталонный генератор

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

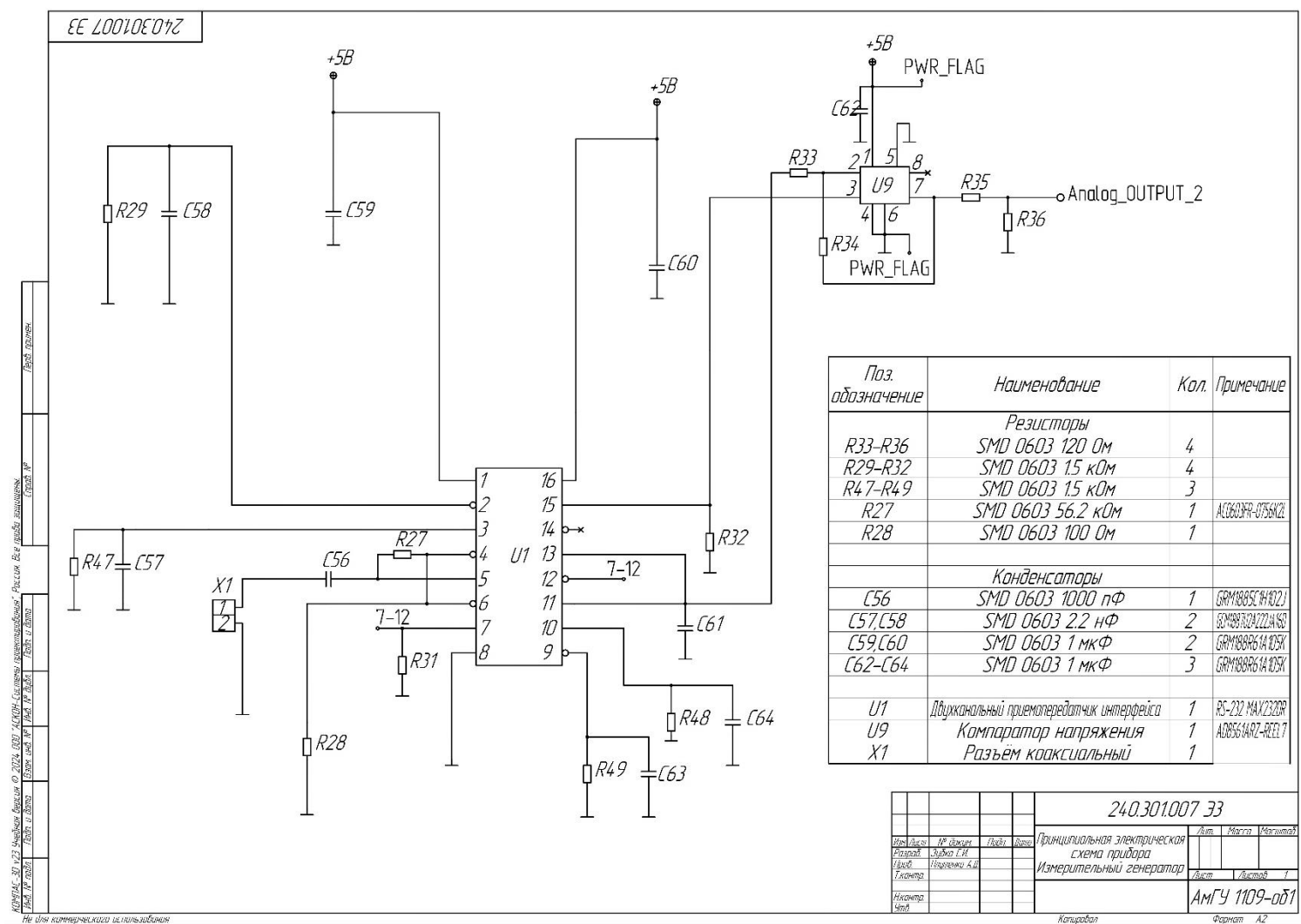


Рисунок Б.4 – Принципиальная электрическая схема прибора. Измерительный генератор

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

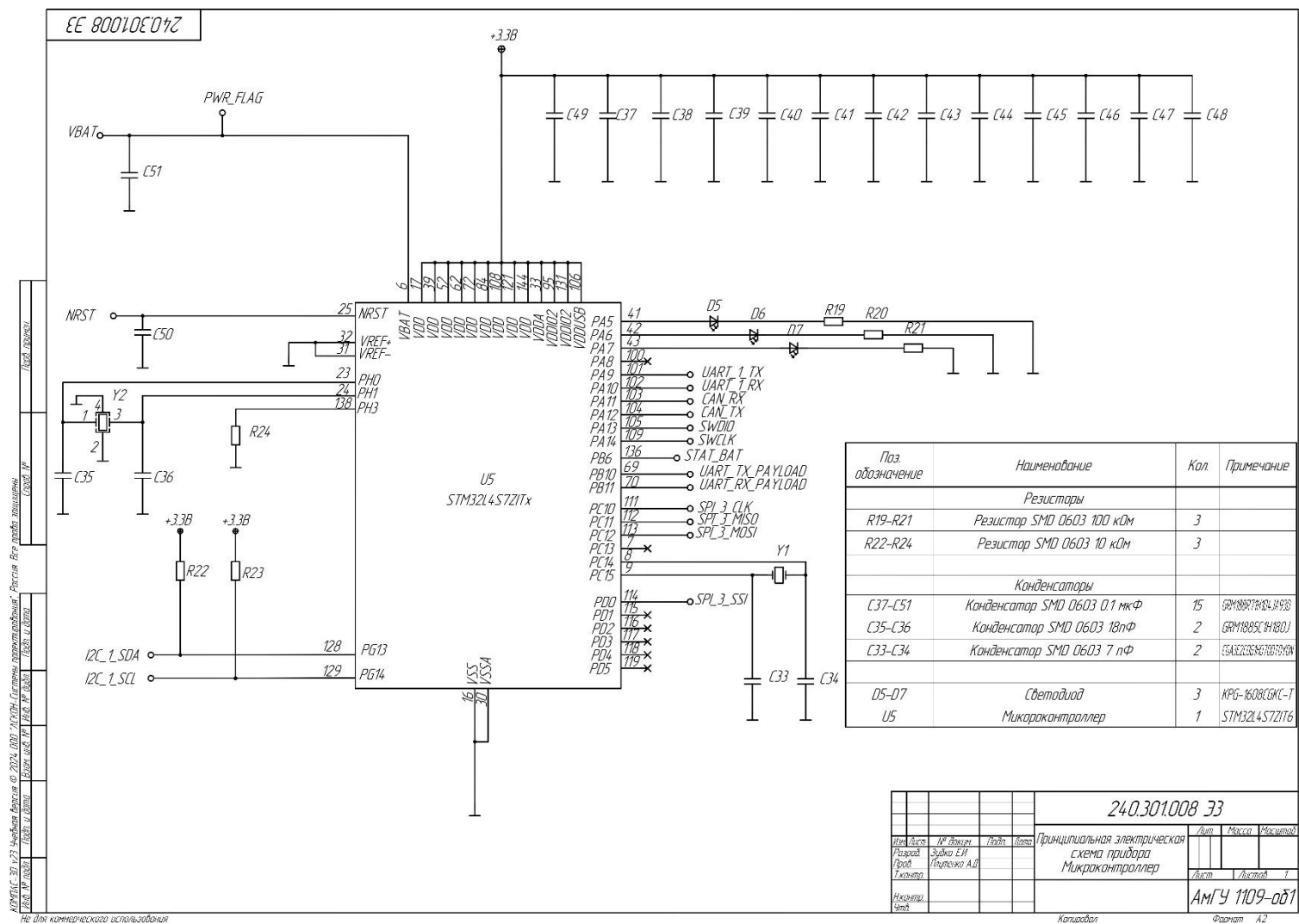


Рисунок Б.5 – Принципиальная электрическая схема прибора. Микроконтроллер

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

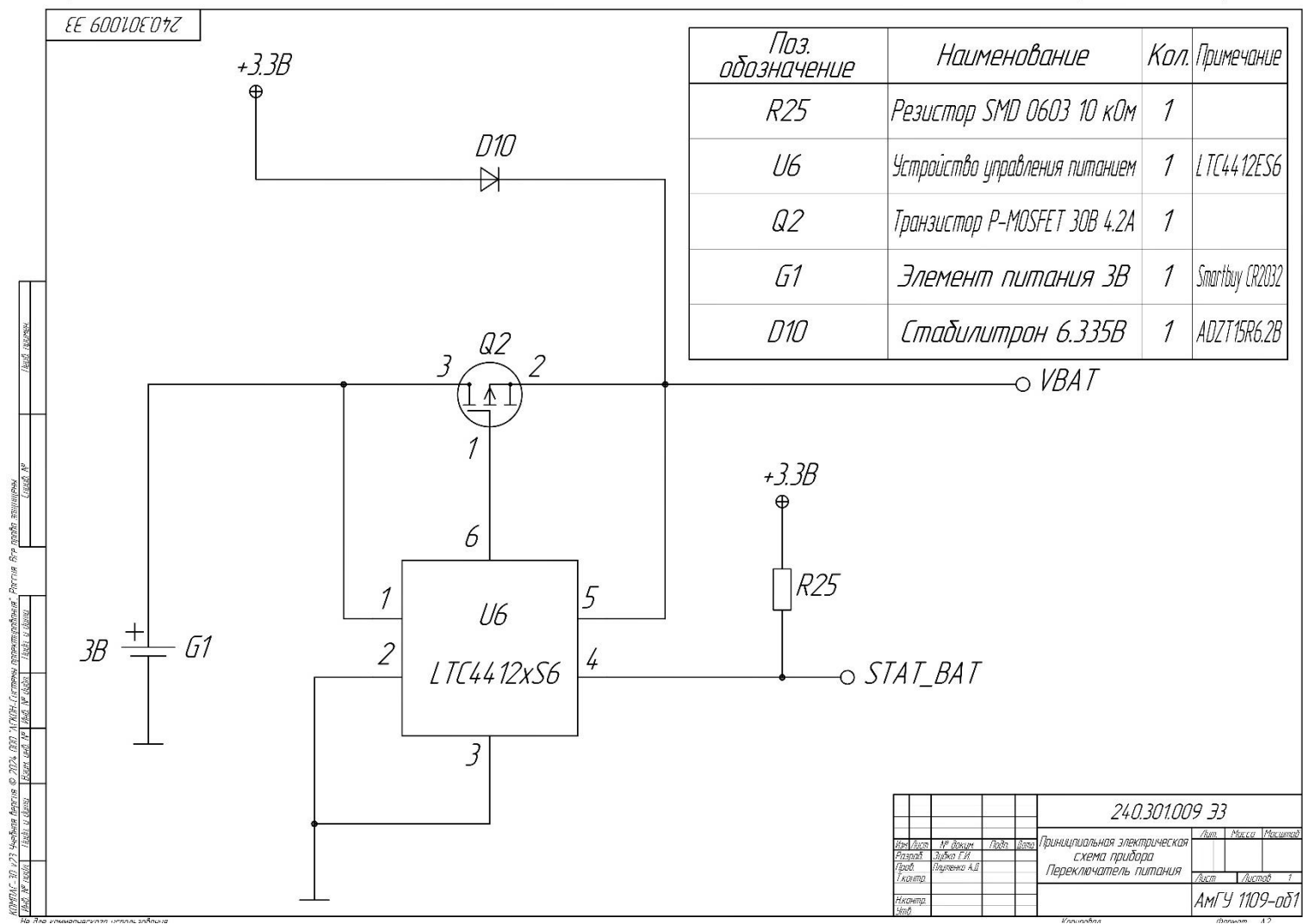
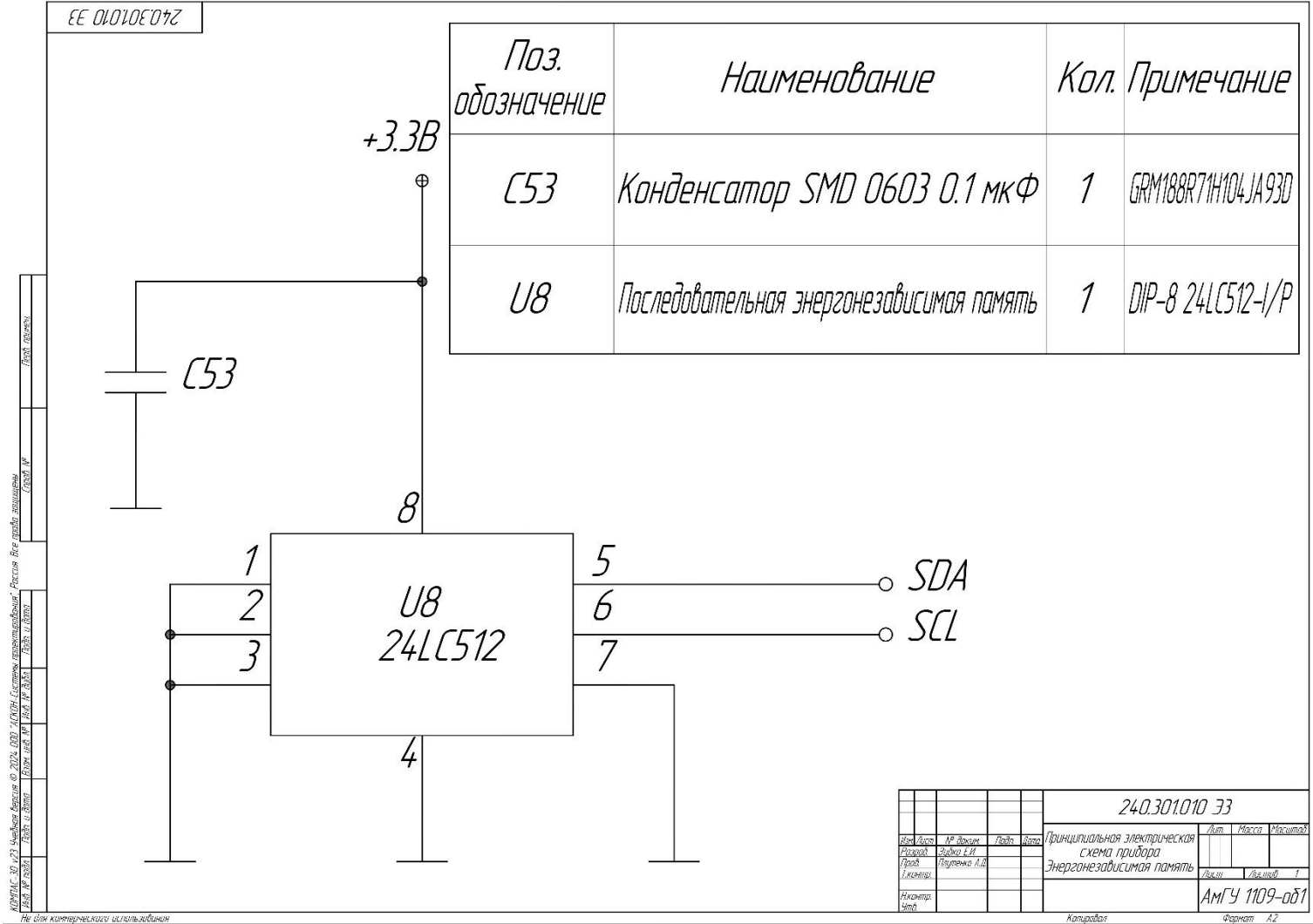


Рисунок Б.6 – Принципиальная электрическая схема прибора. Переключатель питания

Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б



Продолжение ПРИЛОЖЕНИЯ Б

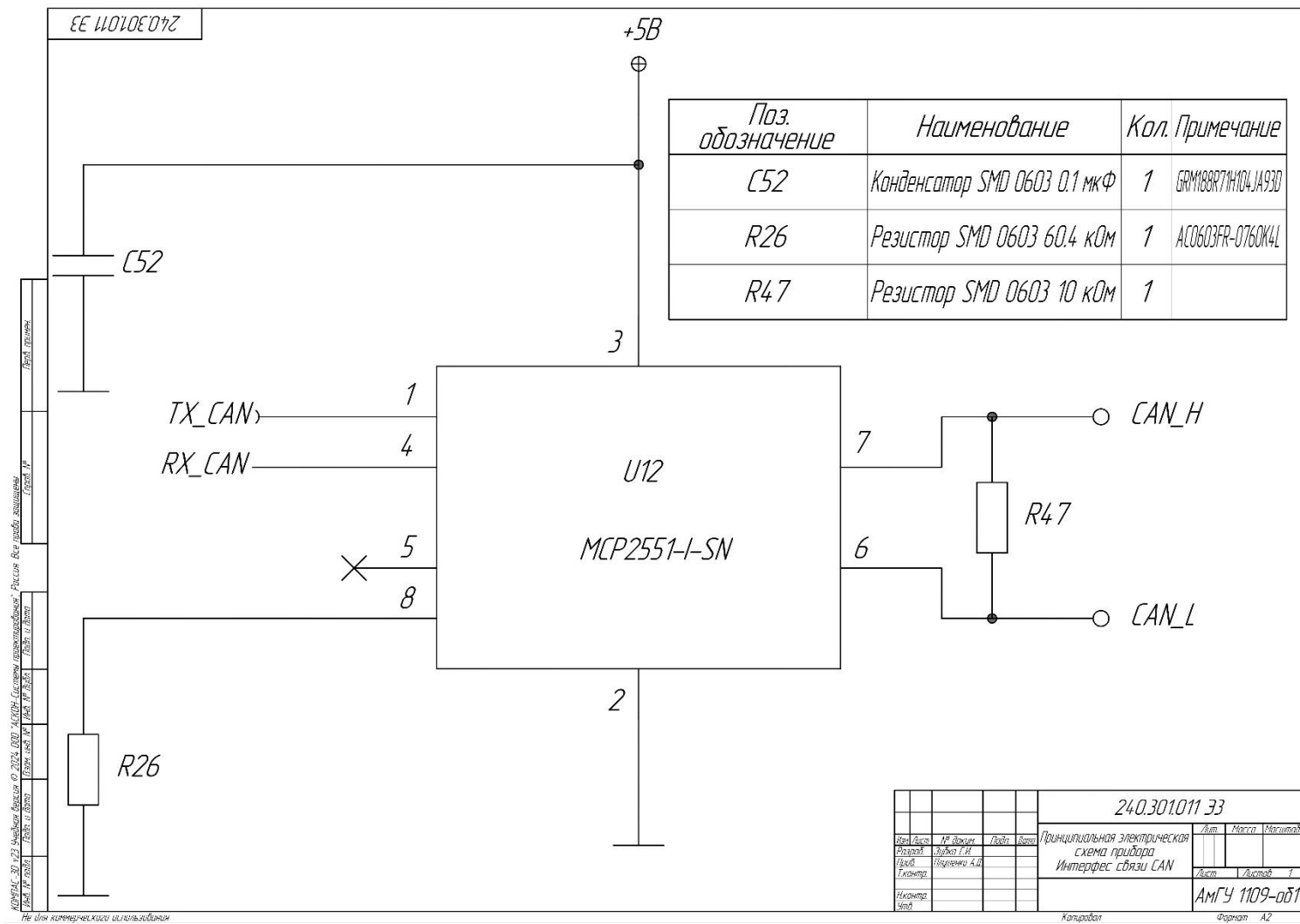


Рисунок Б.8 – Принципиальная электрическая схема прибора. Интерфейс связи CAN

ПРОДОЛЖЕНИЕ ПРИЛОЖЕНИЯ Б

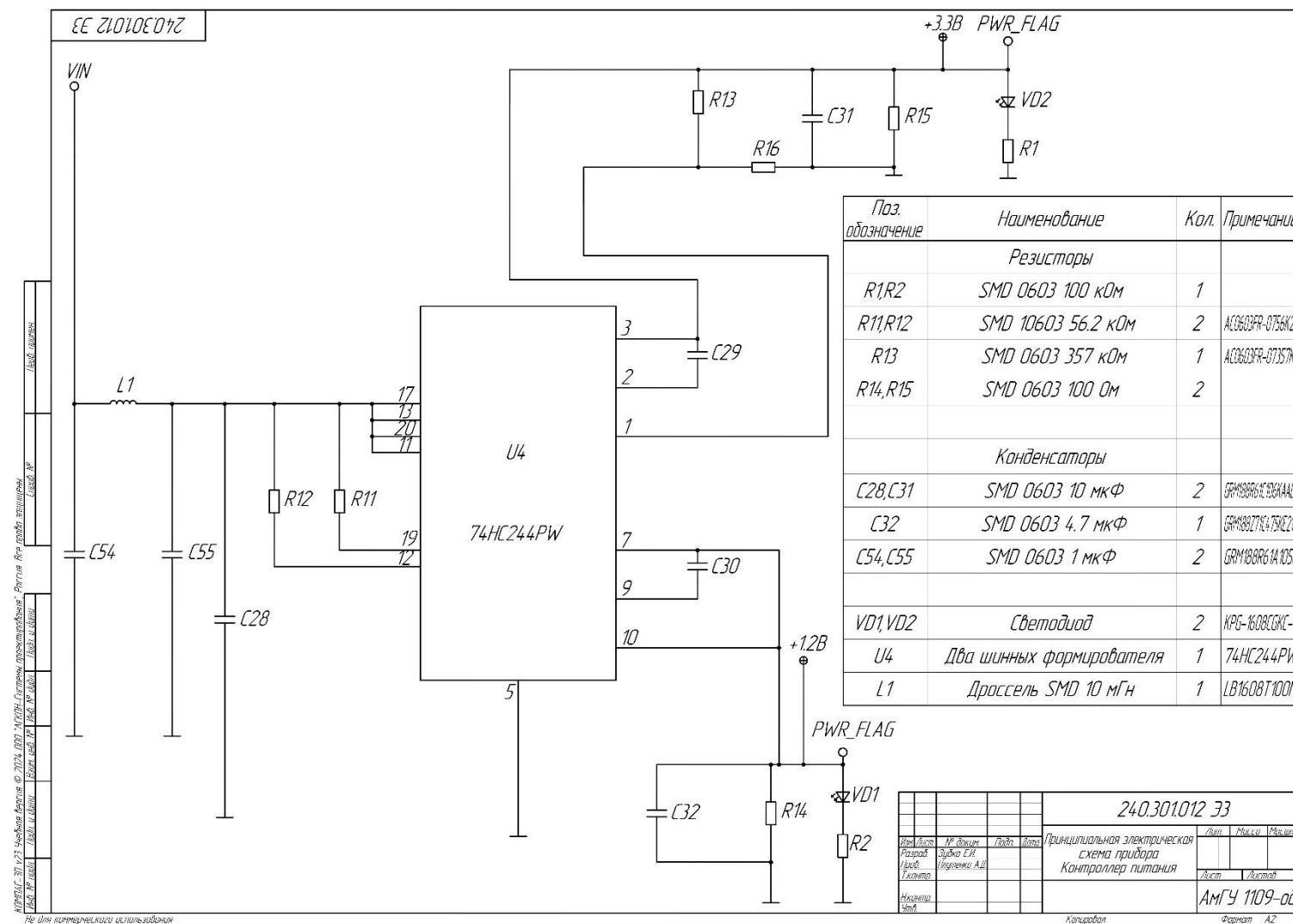


Рисунок Б.9— Принципиальная электрическая схема прибора. Контроллер питания