

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники»

На правах рукописи



Осинцев Артем Викторович

**Автоматизированная система управления для тестирования радиоэлектронных средств
на температурные воздействия**

Специальность 2.3.3 – Автоматизация и управление
технологическими процессами и производствами

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
канд. техн. наук, Комнатнов Максим Евгеньевич

Томск 2022

Оглавление

Введение.....	5
1 Обзор применения вычислительных устройств в автоматизированных системах управления климатическими воздействиями.....	13
1.1 Автоматизированная система управления климатическими воздействиями.....	13
1.2 Аналитическая модель нагрева стенок ТЕМ-камеры.....	17
1.3 Исследования в климатической экранированной ТЕМ-камере.....	19
1.4 Устройства терморегуляторов для управления электропитанием термоэлектрического преобразователя.....	19
1.5 Синхронизация вычислительных устройств для группы управляемых объектов.....	21
1.5.1 Пятифазная широтно-импульсная модуляция.....	21
1.5.2 Операционная система реального времени в задачах управления климатической экранированной ТЕМ-камерой.....	21
1.5.3 Устройства терморегуляторов для управления электропитанием термоэлектрического преобразователя посредством программируемой логической интегральной схемы.....	23
1.5.4 Синхронизация группы микроконтроллеров.....	24
1.6 Диагностика и тестирование блоков вычислительных устройств.....	26
1.6.1 Обнаружение сбоев микроконтроллера с помощью анализа памяти при совместном климатическом и электромагнитном воздействии.....	26
1.6.2 Способ аппаратного и программного резервирования компонентов радиоэлектронных средств.....	27
1.7 Постановка цели и задач исследования.....	27
2 Модели автоматизированной системы управления климатическими воздействиями внутри испытательного контейнера.....	31
2.1 Структурно-функциональная модель автоматизации процессов контроля и регулирувания температуры поверхности ТЕМ-камеры.....	31
2.2 Концептуальная модель климатической экранированной камеры.....	34
2.3 Модель технологического процесса климатической экранированной камеры.....	35
2.4 Структура иерархии классов программного обеспечения климатической подсистемы.....	37
2.5 Структура связей компонентов климатической подсистемы.....	39
2.6 Основные результаты раздела.....	41

3	Способ и методы синхронизации разнотипных вычислительных устройств и многофазного управления группами термоэлектрических преобразователей.....	43
3.1	Метод синхронизации работы группы микроконтроллеров.....	43
3.2	Способ синхронизации группы микроконтроллеров	46
3.3	Способ управления электропитанием распределенных по поверхности ТЕМ-камеры термоэлектрических преобразователей.....	49
3.4	Основные результаты раздела.....	54
4	Алгоритмы и методы диагностики и тестирования блоков микроконтроллера.....	56
4.1	Алгоритм измерений устойчивости к импульсному и непрерывному воздействию на электронные компоненты.....	56
4.2	Методика измерения помехоустойчивости интегральных схем к воздействию электромагнитного импульса.....	59
4.3	Алгоритм тестирования вычислительных блоков микроконтроллера	64
4.4	Методы и алгоритмы восстановления и программной защиты вычислительных блоков микроконтроллера	68
4.5	Методы диагностики и резервирования вычислительных блоков микроконтроллера.....	73
4.5.1	Проверка состояния регистров микроконтроллера	74
4.5.2	Методы для выявления, анализа и исправления ошибок в энергонезависимой памяти микроконтроллера.....	76
4.5.3	Способ аппаратного и программного резервирования вычислительных блоков микроконтроллера.....	89
4.6	Алгоритм диагностики устройств и систем климатической экранированной камеры	92
4.7	Службы тестирования критически важных узлов и устройств климатической экранированной камеры	95
4.8	Основные результаты раздела.....	97
5	Реализация и тестирование методик и способов управления, контроля и диагностики элементов климатической экранированной камеры	99
5.1	Синхронизация группы микроконтроллеров	99
5.1.1	Реализация и отладка метода синхронизации.....	99
5.1.2	Тестирование метода синхронизации	102
5.2	Многофазное управление электропитанием термоэлектрических преобразователей.....	105

5.2.1	Многофазное управление на базе микроконтроллера	105
5.2.2	Многофазное управление на базе микроконтроллера с использованием операционной системы реального времени.....	108
5.2.3	Многофазное управление на базе программируемой логической интегральной схемы	111
5.3	Результаты тестирования многофазного управления группой термоэлектрических преобразователей.....	117
5.4	Модель искусственной нейронной сети на основе ПИД-регулятора.....	119
5.4.1	Обучение модели искусственной нейронной сети на основе классического ПИД-регулятора	119
5.4.2	Модель искусственной нейронной сети ПИД-регулятора.....	120
5.4.3	Лабораторный макет для обучения искусственной нейронной сети	122
5.5	Управление климатической экранированной камерой	123
5.5.1	Пульт управления климатической экранированной камерой.....	124
5.5.2	Модуль автоматизированного рабочего места оператора климатической экранированной камеры	125
5.6	Основные результаты раздела.....	127
	Заключение	129
	Список сокращений и условных обозначений	132
	Список литературы	134
	Приложение А (справочное) Результаты исследования помехоустойчивости микроконтроллера	140
	Приложение Б (справочное) Внедрение результатов исследования.....	153
	Приложение В (справочное) Основные индивидуальные достижения	158

Введение

Актуальность работы

Системы управления климатическими воздействиями применяются в различных отраслях жизнедеятельности человека. Например, подобные системы получили широкое применение в холодильных камерах, камерах тепло-холод, криокамерах шоковой заморозки и пр., в задачу которых входит поддержание заданной температуры помещенных в них объектов при помощи системы автоматического управления (САУ). Такие системы разрабатываются для общего и специального назначения и применяются в розничной торговле, различных отраслях промышленности, включая медицинскую, атомную и пр. Устройства на их основе применяются для продолжительного и долгосрочного сохранения свойств объектов чувствительных к изменению температуры, например, медицинских иммунобиологических препаратов (вакцин, сывороток и т.д.), требующих постоянного поддержания строго определённой температуры хранения и перевозки. В зависимости от назначения и области применения, САУ климатическими воздействиями устанавливают требования по поддержанию температуры и времени, за которое будет достигнута заданная температура внутри климатической камеры. Кроме того, с развитием инфокоммуникационных технологий, в частности энергоэффективных средств сетей передачи данных на дальние расстояния, развиваются методы и алгоритмы удаленного мониторинга и управления климатическими воздействиями внутри камер в режиме реального времени. Это привело к развитию гибридных промышленных аппаратно-программных комплексов (АПК) с внедрением в них автоматизированных систем управления (АСУ), в которых применяются методы предсказательной (предиктивной) аналитики для контроля производственных и технологических процессов.

Известно, что характеристики радиоэлектронных средств (РЭС) могут значительно зависеть от реальных условий их эксплуатации, в т.ч. от внешних климатических воздействий (температура и влажность воздуха, атмосферное давление). В этой связи, одним из этапов производства электронной компонентной базы (ЭКБ) является их испытание на климатические воздействия в специальных климатических камерах, для установления отклонений их параметров от номинальных значений. Как правило, для этих целей применяются климатические камеры для испытаний ЭКБ на климатические воздействия. Кроме того, ЭКБ испытывают на соответствие требованиям нормативных документов по электромагнитной совместимости (ЭМС) для обеспечения работоспособности РЭС. Например, измерения уровней помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем (ИС), являющихся неотъемлемой частью современных РЭС, проводят с использованием камер поперечных электромагнитных

волн (ТЕМ-камер). При этом гибридизация климатической камеры и ТЕМ-камеры позволит проводить исследования и испытания ЭКБ, в том числе ИС, на совместные климатические и электромагнитные воздействия. АСУ процессом измерения помехоэмиссии и помехоустойчивости ИС при климатическом воздействии будет способствовать развитию микроэлектроники, миниатюризации ЭКБ и РЭС, а также развитию новых методов и алгоритмов в области проектирования АСУ климатическими системами.

Развитие методов и алгоритмов АСУ с использованием камеры для совместных климатических и электромагнитных воздействий позволит создавать модели компонентов РЭС, с учетом их климатических параметров. Для этого целесообразно создание климатической экранированной камеры (КЭК) для измерения помехоэмиссии и помехоустойчивости ЭКБ при заданном климатическом воздействии. С её помощью можно будет проводить исследования ЭКБ и создавать их универсальные математические модели.

Таким образом, разработка аппаратно-программных средств системы управления КЭК, позволяющей регулировать температуру и влажность воздуха внутри замкнутого, геометрически сложного металлического испытательного контейнера в виде ТЕМ-камеры, без внесения внутрь его термоэлектрических преобразователей (ТЭП), является актуальной задачей. Это позволит, не изменяя параметров электромагнитного воздействия, эффективно поддерживать заданную температуру и влажность воздуха внутри ТЕМ-камеры.

Объектом исследования является комплекс аппаратно-программных средств системы управления, включая АСУ, контролирующую процесс регулирования параметров температуры и влажности воздуха в ТЕМ-камере.

Предметом исследования является разработка алгоритмов и методов регулирования многофазного электропитания ТЭП, а также способов управления, синхронизации и тестирования вычислительных устройств.

Степень разработанности темы

Теоретические обоснования и методы проектирования и тестирования АСУ приведены во множестве статей, пособий и книг, наиболее известными авторами которых являются В.М. Глушков, А.А. Ерофеев, Н.И. Жежера, А.И. Китов, А.А. Ляпунов, А.М. Ляпунов, Г. Найквист, Е.И. Юревич и др. В настоящее время, по мнению отечественных и зарубежных ученых, исследования процессов контроля и диагностики соответствуют переходному этапу от частичной к полной автоматизации этих процессов. Поэтому, наряду с созданием специализированных стендов для тестирования РЭС и разработки специализированного программного обеспечения (ПО), необходимо решение задач анализа состояния компонентов РЭС при совместном климатическом и электромагнитном воздействии, что позволит

существенно повысить глубину и точность причин возникновения сбоев РЭС, а также будет способствовать автоматизации выработки новых решений обеспечивающих стабильность и отказоустойчивость РЭС. Вклад в становление и развитие научной составляющей технической диагностики РЭС внесли: И.А. Биргер, Д.В. Гаскаров, А.В. Мозгалевский, П.П. Пархоменко, И.М. Синдеев, Е.С. Согомоян и др. В исследование помехоэмиссии, помехоустойчивости, а также комплексных испытаний на ЭМС РЭС значительный вклад внесли Л.Н. Кечиев, В.Ю. Кириллов, С.И. Комягин, Е.А. Рахаева, P. Alotto, M.L. Crawford, D. Pouhe, K. Malaric, M.I. Montrose, H.W. Ott, D. Pouhe и др.

Несмотря на полученные ранее результаты, необходимо совершенствование методов и устройств для испытаний РЭС на ЭМС, приближающих испытания к более реальным условиям эксплуатации РЭС, при которых каждый работающий блок или узел изделия создаёт вокруг себя не только электромагнитные, но и тепловые поля, которые влияют на работу исследуемого изделия. Поэтому важно испытывать РЭС на одновременное воздействие электромагнитного и теплового полей, имитируя реальные условия эксплуатации, что позволит выявить наиболее чувствительные компоненты и осуществить оценку их электромагнитной стойкости. Однако, совместные климатические и электромагнитные испытания РЭС, в частности ЭКБ, не проводятся, поскольку промышленностью не выпускаются устройства, позволяющие проводить подобные испытания.

Цель и задачи работы

Цель работы – разработать методы и способы управления, синхронизации и тестирования вычислительных устройств автоматизированных систем управления климатическими воздействиями внутри камеры поперечных электромагнитных волн.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить обзор применения вычислительных устройств в системах автоматизированного управления климатическими воздействиями.
2. Разработать модели автоматизированной системы управления климатическими воздействиями внутри испытательного контейнера климатической экранированной камеры.
3. Разработать метод и способы синхронизации работы группы разнотипных вычислительных устройств и многофазного управления группами термоэлектрических преобразователей.
4. Разработать методы и алгоритмы тестирования блоков микроконтроллера.
5. Программно реализовать методы и способы контроля, управления и тестирования элементов климатической экранированной камеры.

Научная новизна

1. Впервые разработана система автоматизированного контроля и управления температуры поверхности камеры поперечной электромагнитной волны. (Патент на изобретение).

2. Предложен новый способ управления синхронизацией группы микроконтроллеров, в том числе разнотипных, отличающийся использованием внешнего тактового генератора синхроимпульсов и их подсчетом каждым микроконтроллером независимо от тактовой частоты каждого из них. (Патент на изобретение).

3. Предложен способ контроля и регулирования температуры поверхности камеры поперечных электромагнитных волн, отличающийся многофазностью управления электропитанием расположенных на ней термоэлектрических преобразователей.

4. Разработаны методы автоматизированного тестирования блоков микроконтроллера и исправления ошибок в его энергонезависимой памяти, отличающиеся использованием аппаратных блоков при вычислении контрольной суммы области памяти, содержащей ошибку, и карты адресов памяти.

Теоретическая значимость

1. Систематизированы методы, способы и алгоритмы в составе единого подхода к проектированию климатических систем для испытательных устройств.

2. Изложен способ контроля температуры поверхности камеры поперечной электромагнитной волны, используя объектно-ориентированные модели.

3. Предложено развитие автоматизированных систем мониторинга и управления климатическими системами.

4. Изложен метод синхронизации группы разнотипных вычислительных устройств, выполняющих одну общую задачу.

Практическая значимость

1. Модели процессов автоматизации контроля и регулирования температуры климатической камеры и основанные на них алгоритмы и ПО внедрены в ФГБУЗ НКЦ ФМБА России, ООО «Инфоматикс», а также АО «ИСС» в рамках создания экранирующих конструкций элементов силовой шины электропитания космического аппарата и устройств, входящих в состав аппаратно-программного комплекса для её испытаний (3 акта внедрения).

2. Методы и алгоритмы контроля климатической системы, а также методы восстановления после сбоя и алгоритмы программной защиты микроконтроллера, разработаны и внедрены в ФГБУЗ НКЦ ФМБА России в рамках создания аппаратно-программного комплекса для мониторинга температуры промышленного холодильного оборудования.

3. Метод, позволяющий выявлять и исправлять сбои в работе микроконтроллеров посредством анализа памяти и аппаратного или программного резервирования их блоков, основанные на нем алгоритмы и ПО внедрены в ФГБУЗ НКЦ ФМБА России и ООО «Инфоматикс».

4. Методы и алгоритмы контроля и диагностики аппаратных блоков вычислительных устройств, основанные на них алгоритмы и ПО внедрены в ООО «Инфоматикс» и учебный процесс ФГБОУ ВО «ТУСУР» (акт внедрения).

5. Разработан универсальный способ синхронизации микроконтроллеров, позволяющий обеспечивать её без существенных изменений в электрической схеме РЭС.

6. Показана возможность использования многофазного управления группой термоэлектрических преобразователей на основе эффекта Пельтье, для контроля и удержания заданной температуры поверхности ТЕМ-камеры.

Методология и методы исследования. В работе применены аналитические методы, метод конечных разностей, натурные эксперименты и методы исследования цифровых систем автоматического управления.

Положения, выносимые на защиту

1. Разработанная система автоматизированного управления температурой на поверхности камеры поперечных электромагнитных волн позволяет учитывать специфику предметной области и способствует проектированию устройств для проведения испытаний радиоэлектронных средств на совместные климатические и электромагнитные воздействия. *(Соответствует п. 17. Разработка автоматизированных систем научных исследований.)*

2. Предложенный способ управления микроконтроллерами, в том числе разнотипными, позволяет синхронизировать выполнение ими общей задачи с точностью до одного такта синхроимпульса. *(Соответствует п. 6. Методы совместного проектирования организационно-технологических распределенных комплексов и систем управления ими.)*

3. Применение предложенного способа контроля и многофазного регулирования управлением посредством реверсивных преобразователей позволяет контролировать температуру каждого термоэлектрического модуля климатической системы с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$ и снизить среднюю мощность источника электропитания в зависимости от характеристик термоэлектрического преобразователя. *(Соответствует п. 6. Методы совместного проектирования организационно-технологических распределенных комплексов и систем управления ими.)*

4. Разработанные методы автоматизированного тестирования блоков микроконтроллера и исправления ошибок в его энергонезависимой памяти позволяют проводить комплексный

анализ его работы при совместных климатических и электромагнитных воздействиях. (Соответствует п. 11. Методы контроля, обеспечения достоверности, защиты и резервирования информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП, АСТПП и др.)

Достоверность результатов подтверждена корректным использованием унифицированного языка моделирования и теории управления, согласованностью результатов измерений и моделирования на основе численного и аналитических методов, применением поверенного современного измерительного оборудования, совпадением экспериментальных результатов, полученных с применением разных методик, апробацией теоретических и экспериментальных результатов на конференциях, публикацией статей в рецензируемых журналах, наличием патентов на изобретение, внедрением результатов работы.

Использование результатов исследований

1. ПНИ «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов» в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2014–2020 годы», проект RFMEFI57417X0172, 2017–2020 гг.

2. НИР «Выявление новых подходов к совершенствованию обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры и моделирования систем активного зрения роботов» в рамках базовой части государственного задания в сфере научной деятельности, проект № 8.9562.2017/БЧ, 2017–2019 гг.

3. НИР «Влияние температуры и влажности на взаимодействие рецепторов и источников электромагнитного излучения вблизи произвольно расположенных и частично замкнутых электромагнитных барьеров», грант РФФИ № 19-79-10162, 2019–2022 гг.

4. НИР «Комплекс фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости» в рамках конкурса научных проектов, выполняемых коллективами исследовательских центров и (или) научных лабораторий образовательных организаций высшего образования. Научно-исследовательская лаборатория фундаментальных исследований по электромагнитной совместимости (НИЛ ФИЭМС), проект FEWM-2020-0041, 2020–2021 гг.

Апробация результатов. Результаты позволили подготовить заявки и победить в конкурсах на назначение повышенной стипендии студентам за достижения в НИРС в 2015 и 2016 гг., повышенной государственной академической стипендии в 2016 г. и правительства РФ студентам и аспирантам по приоритетным направлениям в 2016 г.

Результаты докладывались на следующих конференциях: Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР», г. Томск, 2015, 2016, 2017 гг.; Межд. науч.-техн. и науч.-метод. конф. «Современные технологии в науке и

образовании СТНО-2016», г. Рязань, 2016 г.; 22-я Межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС)», г. Томск, 2016, 2021 гг.; Межд. науч.-практ. конф. «Электронные средства и системы управления», г. Томск, 2015, 2016, 2018, 2021 гг.; Int. conf. of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices, Эрлагол (Алтай), 2016, 2021 гг.; Int. siberian conf. on control and communications (SIBCON), г. Москва, 2016 г.; XI Int. IEEE Scientific and technical conf. «Dynamics of systems, mechanisms and machines», Омск, 2016 г.; IEEE Int. multi-conference on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON), г. Новосибирск, 2017 г., г. Томск, 2019 г.; Науч.-техн. конф. молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства», г. Томск, АО «НПЦ «Полнос», 2018 г.

Публикации. Результаты опубликованы в 40 работах (2 без соавторов):

Тип публикации	Количество
Статья в журнале из перечня ВАК	4
Доклады в трудах конференций индексируемых Web of Science/Scopus	8
Доклад в трудах международной конференции	19
Тезисы в трудах научно-технической конференции	2
Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ	4
Патент на изобретение	3
ИТОГО:	40

Личный вклад. Все результаты работы получены автором лично или при его непосредственном участии. Основной вклад автора заключается в разработке моделей, методов, способов управления и их программной реализации для синхронизации группы вычислительных устройств, автоматизированной системы управления электропитанием термоэлектрическими преобразователями, а также диагностики и тестирования элементов и устройств климатической экранированной камеры. Постановка цели и задач исследования, обработка и интерпретация результатов выполнены совместно с научным руководителем. Разработка аппаратной части КЭЖ выполнена совместно с Собко А.А. Отдельные результаты получены совместно с соавторами публикаций.

Структура и объем диссертации. В состав диссертации входят введение, 5 разделов, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 98 наименований и 3 приложения. Объем диссертации с приложениями – 180 с., в т.ч. 89 рисунков и 12 таблиц.

Краткое содержание работы. Во введении представлена краткая характеристика работы. В разделе 1 выполнен обзор особенностей вычислительных устройств и методов проектирования АСУ, применяемых в климатических системах, а также сформулированы цель и задачи исследования. В разделе 2 представлены модели объектов АСУ климатическими

воздействиями, разработанные используя унифицированный язык моделирования UML (Unified Model Language). В разделе 3 представлен новый метод синхронизации работы группы разнотипных вычислительных устройств для выполнения общей работы, вне зависимости от характеристик синхронизируемых устройств. Метод синхронизации использован при разработке способа и алгоритма многофазного управления группами ТЭП для терморегулирования поверхности ТЕМ-камеры, используемой в КЭК. В разделе 4 представлены разработанные методы и алгоритмы диагностики и тестирования различных вычислительных устройств. В разделе 5 приведены результаты апробации методик и способов управления, контроля и диагностики элементов КЭК. Представлены результаты использования предложенного метода синхронизации работы группы МК, а также результаты его работы для управления группой ТЭП в многофазном режиме. В заключении рассмотрены основные результаты работы, сформулированы рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы. В приложении А приведены результаты работы алгоритмов тестирования помехоустойчивости блоков МК к воздействию ЭМИ, возбуждаемого в ТЕМ-камере генератором сверхкороткого импульса (СКИ). В приложениях Б и В приведены копии четырёх актов внедрения, а также грамот и дипломов, полученных автором.

1 Обзор применения вычислительных устройств в автоматизированных системах управления климатическими воздействиями

В данном разделе представлены результаты обзора по применению вычислительных устройств в автоматизированных системах управления климатическими воздействиями.

1.1 Автоматизированная система управления климатическими воздействиями

Взаимодействие между управляющей и управляемой подсистемами образует автоматизированную систему управления (АСУ), которая поддерживает функционирование устройства. Подобное управление осуществляется в сложных автономных системах, в которых необходим постоянный контроль их параметров. В большинстве случаев подобные подсистемы построены на основе ПИД-регулятора, область применения которых достаточно широка. Так, они используются при балансировании [1], движении [2] и управлении работой [3] робототехнических комплексов, а также для поддержания их работоспособности в сложных климатических условиях [4]. При этом применение устройств терморегулирования для исследовательских целей отличается спецификой проектируемой АСУ. Например использование ПИД-регулятора сохраняет свою актуальность в области автоматического управления благодаря его простоте и легкости применения. Первый ПИД-регулятор был разработан Элмером Сперри для военно-морских сил США в 1910 году [5, 6], а в 1942 г. ученые Зиглер и Николсон впервые опубликовали работу, в которой предложили метод настройки параметров ПИД-регулятора [7]. Впоследствии этот метод [8] стал одним из наиболее известных методов для вычисления параметров ПИД-регулятора, проектирование которого считается наиболее сложной задачей при разработке САУ.

Развитие решений задач теории и управления вышло на новый уровень, образовав теорию автоматического управления. В общем виде, управляющий сигнал ПИД-регулятора вычисляется как

$$u(t) = K_p \times e(t) + K_i \int_0^T e(t) \times dt + K_d \times \frac{de}{dt}, \quad (1.1)$$

где K_p , K_i , K_d коэффициенты, оказывающие влияние на выходной сигнал ПИД-регулятора, e – ошибка в контуре управления с обратной связью.

Современные системы управления, в основе которых используется данный метод вычисления, регулирования постепенно развивались, пополняя накопленный опыт рядом модификаций как в устройстве самого ПИД-регулятора (последовательные и параллельные

корректирующие звенья, мягкие и жесткие корректирующие звенья, многомерные и каскадные регуляторы), так и в методах его настройки (вычисление коэффициентов звеньев регулятора).

Большинство САУ (порядка 90% всех используемых) на производстве регуляторов это ПИД-регуляторы [9]. Причиной столь высокой популярности является простота построения и промышленного использования, ясность функционирования, пригодность для решения большинства практических задач и низкая стоимость реализации. Среди ПИД-регуляторов 64% занимают одноконтурные регуляторы и 36% – многоконтурные. Контроллеры с обратной связью охватывают 85% всех применений, с прямой связью – 6%, а каскадно соединенные – 9%.

В настоящее время появляются новые области применения законов ПИД-регулирования. Одной из которых является силовая электроника. Большинство выпускаемых на текущий момент цифровых драйверов питания не являются универсальными и обладают рядом как физических, так и функциональных ограничений [10, 11]. Часто при проектировании АСУ в качестве цифрового вычислительного устройства (ВУ) используют микроконтроллеры (МК), системы на кристалле (СнК), цифровые сигнальные процессоры и программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) [12, 13]. Данный подход в проектировании АСУ позволяет независимо разрабатывать управляемую и регулируемую системы (аппаратную и программную части), что дает гибкость в управлении АСУ и стабильность её функционирования. Программная реализация АСУ позволяет с высокой точностью контролировать процесс управления с возможностью выбора режима работы (автоматический, автоматизированный), изменять параметры ПИД-регулятора, модифицировать программный код, расширять функционал и т.д. без изменения аппаратной части РЭС. Подобные системы разрабатываются для авиационной [14, 15] и космической отраслей, машиностроения, научно-исследовательской деятельности и др.

Изучением объектов разной физической природы, при помощи математических средств, выявляются свойства СУ и разрабатываются рекомендации по их проектированию. Подобные системы нашли применение в разработке общих принципов автоматического управления, а также методов анализа (исследования функционирования) и синтеза (выбора параметров) САУ техническими объектами [16].

Например, разработаны терморегуляторы для исследования оптических эффектов, возникающих в кристалле вследствие его нагрева [17], и для теплового воздействия на полупроводниковый диод, используемый в волоконно-оптической связи [18]. Также, подобные САУ с использованием ПИД-регуляторов совершенствуют [19] и применяют для климатических камер с большим числом управляемых элементов [20]. Однако применение подобных камер для исследования прецизионных РЭС, чувствительных к внешней электромагнитной обстановке,

нецелесообразно, поскольку во внутреннем испытательном пространстве камеры размещаются управляемые элементы, создающие электромагнитные помехи, при которых исследования или испытания могут быть некорректными. КЭК [21] избавлена от данного недостатка и позволяет проводить исследования и испытания на совместные климатические и электромагнитные воздействия и эмиссии в радиотехнике и биомедицине [4, 22, 23].

Одним из инструментов разработки и описания моделей ПО является унифицированный язык моделирования UML [24, 25]. Расширяемая концепция данного языка позволяет описать модели не только в области разработки ПО, но и в области системного анализа [26], моделирования технических и экономических систем, а также их динамики (стандарт-диалект System Model Language) [27]. Разрабатываемая КЭК [21–31] является новым и сложным устройством, сочетающим в себе различные ВУ: синхронизированную группу МК [32], микропроцессор Atmel [33], высокопроизводительный МК STM32F746 [34], графический сенсорный дисплей, распределенную систему сбора и обработки данных [35] и систему диагностики КЭК [36].

Все аналитические методы настройки регуляторов основаны на аппроксимации динамики объекта моделью 1-го или 2-го порядка с задержкой. Причиной этого является невозможность аналитического решения систем уравнений, используемых в моделях высокого порядка. С появлением высокопроизводительных ВУ широкое распространение получили методы оптимизации, которые являются гибким инструментом для настройки параметров регулятора, в т.ч. для моделей любой сложности, и позволяют учитывать нелинейность объекта управления (ОУ) и требования к робастности. После расчета коэффициентов регулятора (K_p , K_i , K_d) часто требуется его ручная подстройка для улучшения качества регулирования. Поэтому, задача автоматизации регулирования является актуальной. Выбор критерия качества регулирования зависит от варианта использования ПИД-регулятора. Например, поддержание постоянного значения заданного параметра (температуры и/или влажности), слежение за изменением уставки, программное управление и др.

На данный момент активно ведутся исследования в области разработки моделей искусственных нейронных сетей (ИНС), генетических алгоритмов, а также различных методов фильтрации данных при разработке современных АСУ. Известны системы, в которых используется несколько взаимно зависимых ОУ, контролируемых каскадом ПИД-регуляторов (рисунок 1.1). Данная система сложна в разработке и калибровке коэффициентов ПИД-регулятора, т.к. изменения одного ОУ могут приводить к колебаниям переходного процесса что, в свою очередь, приводит к формированию «неустойчивого» управляющего сигнала. Процесс расчета параметров работы ПИД-регулятора не учитывает всех факторов,

например, реальных условий эксплуатации, влияющих на работу ОУ. Помимо качественных характеристик, расчет каскада ПИД-регуляторов требователен к ресурсам ВУ, т.к. в процессе вычислений выполняется множество арифметических операций с числами с плавающей запятой. Выполнение данных операций, в частности, в МК, до недавнего времени, было затратной задачей из-за отсутствия в них аппаратного блока для вычислений с плавающей запятой. Однако в современных МК отсутствует этот недостаток, тактовая частота ядра МК обладает высокой производительностью. Также имеются МК с аппаратными блоками для работы ИНС. ИНС обладает рядом преимуществ: самоадаптивность методов, управляемых данными; универсальность аппроксиматора функций; адаптивность нелинейных моделей, за счет чего достигается гибкость при обучении на основе данных входа и выхода ОУ.

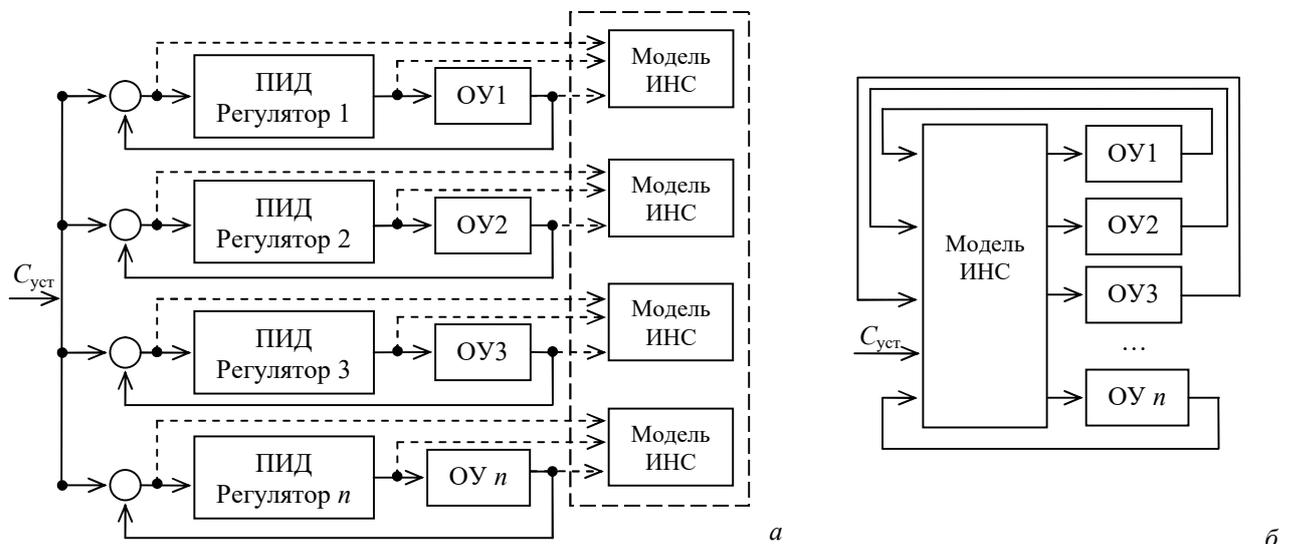


Рисунок 1.1 – Обучение набора моделей ИНС каскада ПИД-регуляторов (а), управления группой ОУ посредством обученной ИНС (б)

Ранее одним из ограничивающих факторов применения моделей ИНС в МК являлся большой размер обученной модели ИНС, что не позволяло её загрузить в память МК. Исследования в области оптимизации ИНС достигли высокого уровня компрессии (сжатия) модели, что позволило сократить размер модели в сотни раз, что позволило реализовать работу ИНС в МК. Многие МК не способны обрабатывать аналоговые сигналы с разрешением более 12 бит. Чувствительность сенсоров и датчиков также, в большинстве случаев, не превышает 12 бит. Поэтому нейроны, у которых значения весовых коэффициентов достаточно малы, можно удалить из модели ИНС. Кроме того, также удаляются связи между нейронами, которые обладают слабой связью (незначительным влиянием). В результате, размер сжатой модели ИНС может быть на порядок меньше это позволяет загрузить её в память ВУ без серьезных потерь качества работы ИНС в процессе выполнения задачи в МК.

1.2 Аналитическая модель нагрева стенок ТЕМ-камеры

Решение задачи поддержания заданного уровня температуры является распространенной задачей САУ и, во многом, зависит от характеристик и свойств конечного устройства. В самом простом случае, нагрев ТЭП происходит постоянно, а в момент превышения заданного уровня температуры питание ТЭП прерывается. С течением времени температура КЭЖ понижается ниже требуемого (установленного) уровня, после чего включает ТЭП и происходит быстрый нагрев поверхности ТЕМ-камеры. Поэтому на поверхности возникает перерегулирование САУ КЭЖ. Это не позволяет добиться стабилизации нагрева поверхности ТЕМ-камеры на определенном уровне. В результате система становится неустойчивой.

В зависимости от условий и требований в решении конкретной задачи наиболее важными могут являться следующие факторы:

1. Форма отклика на внешнее возмущение, обусловленное временем установления и перерегулирования, коэффициентом затухания и др.
2. Форма отклика на шумы измерений.
3. Форма отклика на сигнал уставки.
4. Робастность по отношению к разбросу параметров объекта управления.
5. Минимизация колебаний в управляемой системе.
6. Минимизация шумов измерений и др.

Использование большого числа ТЭП вносит дополнительные сложности в систему управления температурой, так как неравномерность нагрева и инерционные свойства всей системы, обусловлены дополнительным температурным градиентом. За счет того, что ТЭП находятся в непосредственной близости друг от друга, неизбежна ситуация приема/переноса тепла к/от ТЭП, расположенных поблизости. Решением данной задачи может служить программная реализация системы регулирования выходного управляющего сигнала широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для проверки качества процесса нагрева стенок ТЕМ-камеры и расчета распределения температуры по поверхности в однофазном и многофазном режимах используют оценки с использованием аналитических выражений.

Известна аналитическая модель для вычисления нагрева прямоугольной пластины с расположенной на ней четырьмя нагревателями ТЭП, основанная на решении краевой задачи методом конечных разностей [37, 38]. Так, определение стационарного распределения температуры прямоугольной пластины сводится к решению системы уравнений

$$\begin{cases} \Delta u = f, \\ u|_r = g, \end{cases} \quad (1.2)$$

где Δ – оператор Лапласа, u и r – граничные условия, g – значения температуры на границах стенки. Для аппроксимации используется конечно-разностная схема

$$-\frac{u_{i+1,j} - 2u_{i,j} + u_{i-1,j}}{h^2} - \frac{u_{i,j+1} - 2u_{i,j} + u_{i,j-1}}{h^2} = f_{i,j}, \quad (1.3)$$

где

$$i = 1, \dots, N-1, \quad j = 1, \dots, M-1.$$

Тогда

$$u_{i,j} = g_{i,j}, \quad \text{при } i=0, i=N, j=1, \dots, M-1; i=1, \dots, N-1, j=0, j=M. \quad (1.4)$$

При этом $f=0$ во всех узлах сетки, кроме тех, что расположены у источника тепла.

Предполагая, что пластина квадратная ($M=N$), а во всех граничных узлах сетки, расположенных по периметру пластины, температура однородна, решение может быть найдено методом сопряженных градиентов.

Пусть $u_{i,j}(0)$ – произвольное начальное приближение при $k=0$. Тогда начальная невязка определяется как

$$r_{i,j}^{(0)} = f_{i,j} + \left(u_{i+1,j}^{(0)} - 2u_{i,j}^{(0)} + u_{i-1,j}^{(0)} \right) + \left(u_{i,j+1}^{(0)} - 2u_{i,j}^{(0)} + u_{i,j-1}^{(0)} \right) \quad (1.5)$$

В начале помечается, что

$$p_{i,j}^{(0)} = r_{i,j}^{(0)}, \quad (1.6)$$

Где, i, j невязка, полученная при произвольном начальном приближении. Итерации организованы как

$$a_k = \frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} \left(r_{i,j}^{(k)} \right)^2}{\sum_{i,j=0}^{N-1} Ap_{i,j}^{(k)} p_{i,j}^{(k)}}, \quad (1.7)$$

$$\beta_k = \frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} \left(r_{i,j}^{(k+1)} \right)^2}{\sum_{i,j=0}^{N-1} \left(r_{i,j}^{(k)} \right)^2}, \quad (1.8)$$

$$r_{i,j}^{(k+1)} = r_{i,j}^{(k)} - a_k Ap_{i,j}^{(k)}, \quad (1.9)$$

$$Ap_{i,j}^{(k)} = -\left(p_{i+1,j}^{(k)} - 2p_{i,j}^{(k)} + p_{i-1,j}^{(k)} \right) - \left(p_{i,j+1}^{(k)} - 2p_{i,j}^{(k)} + p_{i,j-1}^{(k)} \right), \quad (1.10)$$

$$p_{i,j}^{(k+1)} = r_{i,j}^{(k+1)} + \beta_k p_{i,j}^{(k)}, \quad (1.11)$$

$$u_{i,j}^{(k+1)} = u_{i,j}^{(k)} + a_k p_{i,j}^{(k)}. \quad (1.12)$$

Вычисления прерываются при достижении заданной точности, определяемой по погрешности между решением на соседних итерациях, или при достижении максимального числа итераций.

1.3 Исследования в климатической экранированной ТЕМ-камере

Миниатюризация ВУ, применяемых при разработке различных РЭС, ведет к повышению плотности монтажа электронных компонентов, что обостряет проблему обеспечения ЭМС, например, при проектировании РЭС из-за влияния одних электронных компонентов на другие. Для решения подобных задач, особенно для критичных РЭС, применяют тщательное моделирование в заданном диапазоне параметров, например, эффективности экранирования в диапазоне частот, а также проводят натурные исследования и испытания. Так, для испытаний на ЭМС, в частности, для измерения помехоэмиссии и помехоустойчивости ИО к электромагнитному полю (ЭМП), применяют такие устройства как безэховая, реверберационная, ТЕМ- и ГТЕМ-камеры. ТЕМ-камера представляет собой СВЧ-устройство на основе линии передачи, с помощью которой возможно возбуждение ЭМП в широком диапазоне частот. С помощью ТЕМ-камер проводят испытания на ЭМС электронных компонентов и САУ РЭС. Они отличаются устройством, методами испытаний, функциональностью и габаритами. Основной задачей КЭК является возможность проведения комплекса взаимозависимых измерений для характеристик от различных источников воздействия, что позволяет проводить более полные испытания воздействующих факторов на ИО. Область применения данных устройств достаточно широка: от разработки помехоустойчивых и помехозащищенных электронных устройств до испытаний РЭС, применяемых в космической отрасли. Поэтому разработка гибридных устройств для испытаний на ЭМС сейчас является актуальной задачей.

КЭК представляет собой экранированный корпус, внутри которого расположена ТЕМ-камера, оборудованная климатической подсистемой, программными средствами обработки данных и связи с персональным компьютером (ПК). Контроль и удержание заданной температуры, внутри испытательного контейнера, реализуется двумя подсистемами термовоздушной и термоконтактной. Термовоздушная подсистема обеспечивает приток и циркуляцию воздуха через ТЕМ-камеру с заданной температурой и влажностью. Работа двух подсистем должна быть синхронизирована МК для создания климатических условий, близких к реальным условиям эксплуатации РЭС. По результатам вычислений [21] определено достаточное количество ТЭП и их характеристики, при которых удается достичь регулирование температуры в широком диапазоне от минус 55°C до плюс 150°C.

1.4 Устройства терморегуляторов для управления электропитанием термоэлектрического преобразователя

Термоэлектрические элементы на основе эффекта Пельтье нашли широкое применение в области производства климатических систем [39–41], а также, при терморегулировании СнК

[42], мощных полупроводниковых лазеров [43–45] и перестраиваемых СВЧ-генераторов [46]. Например, разработка специального терморегулятора на ТЭП позволила исследовать оптические эффекты в кристаллах при поддержании их стабильной заданной температуры [17], а терморегулятор, с использованием ТЭП, позволил повысить экономию электроэнергии в жилых помещениях [47]. Для управления ТЭП, расположенных на поверхности ТЕМ-камеры, необходим программный регулятор мощности, который управляет сигналом ШИМ средней электрической мощностью электропитания ТЭП посредством реверсивного преобразователя (РП). Поскольку ТЕМ-камера представляет собой сложный геометрический объект, одновременное включение 24 ТЭП, приводит к неравномерному нагреву, вследствие сжатия/расширения материала и изменения геометрии ТЕМ-камеры, что повлияет на распределение ЭМП в ТЕМ-камере, что недопустимо, поскольку будет отсутствовать возможность распространения поперечных электромагнитных волн в широком диапазоне частот с минимальным рассогласованием контрольно-измерительного тракта.

Одним из возможных вариантов решения данной задачи видится использование распределенной системы управления электропитанием, частным случаем которого является многофазное управление [19–21]. Подобная система электропитания используется, например, для контроля электропитания ядер процессора (ЦПУ) установленного на материнской плате, что позволяет оптимально распределить токи по драйверам, ключам и фильтрам электропитания процессора [22]. При этом алгоритмы управления подобных систем основываются на специализированных ПИД-регуляторах.

Применение ТЭП также актуально при разработке новых систем терморегулирования, в том числе для прецизионных РЭС. В задаче терморегулирования с использованием ТЭП, надо изменять амплитуду и направление протекания электрического тока, за счет изменения полярности напряжения электропитания на ТЭП. Для решения этой задачи может быть использована однофазная мостовая схема, состоящая из двух стоек с ключевыми элементами, также называемая схемой типа Н-мост [11, 12]. В данной схеме ток нагрузки в импульсе и паузе управляется транзисторами, чем обеспечивается возможность протекания тока в обоих направлениях. Известны РП электроэнергии [13-16], предназначенные для изменения направления постоянного тока сменой полярности напряжения. Например, в работе [16] описан реверсивный однофазный мостовой транзисторный преобразователь, позволяющий осуществлять реверсивный запуск и работу электродвигателя постоянного тока в обратном направлении, что позволяет расширить функциональные возможности электродвигателя, используя его реверсивный запуск и работу от одной мостовой схемы.

1.5 Синхронизация вычислительных устройств для группы управляемых объектов

В данном подразделе представлен обзор методов и способов синхронизации ВУ в системах автоматизированного управления климатическими воздействиями.

1.5.1 Пятифазная широтно-импульсная модуляция

Снижение нагрузки на источник питания и возможность поддержания температуры поверхности ТЕМ-камеры осуществляется программным способом, при помощи многофазного управления РП посредством сигналов ШИМ [48]. Использование многофазного регулятора сигнала ШИМ предъявляет дополнительные требования к терморегулятору такие, как малая инерционность и задержка сигналов управления, а также высокая вычислительная способность. В подобных системах существуют критически важные задачи, работа которых должна выполняться с более высоким приоритетом по отношению к остальным задачам, например, расчет параметров сигнала ШИМ, обработка команд оператора и т.д. При работе сигнала ШИМ в многофазном режиме на МК совместно с обработкой сторонних задач возникают случаи, когда один канал ШИМ начинает работу пока другой (активный) сигнал ШИМ еще не закончил свою работу. Это приводит к нестабильной работе, образуя пульсации по напряжению в источнике питания РП. Подобные задачи решаются использованием ВУ с операционной системой реального времени (ОСРВ) [49]. По своей структуре ОСРВ представляет из себя набор модулей, состоящих из нескольких компонентов: ядро ОС, диспетчер задач, менеджер памяти, порты, драйверы и библиотеки наиболее распространенных устройств, а также системные программные интерфейсы (API), служащие для облегчения проектирования интерфейса пользователя. Для разработки программного регулятора мощности, управляемого сигналами ШИМ полевыми транзисторами, питающими ТЭП, пока не известны исследования по внедрению многофазного управления питания ТЭП для снижения его нагрузки.

1.5.2 Операционная система реального времени в задачах управления климатической экранированной ТЕМ-камерой

В задачи ПО ТЕМ-камеры входит обслуживание и контроль работы большого числа различных ВУ и устройств: датчики температуры и тока, сенсорный дисплей и др., а также систем: обмен данными между группой ВУ, обмен данными КЭЖ с ПК, многофазное управление группой ТЭП, вычисление управляющих сигналов ПИД-регулятором [50]. Поскольку работа модулей, по большей части, происходит независимо друг от друга и с различной частотой вызовов во время работы терморегулятора, возникает необходимость выполнения большого числа задач, используя детерминирование по времени, дающего эффект псевдопараллелизма [51]. При этом задачи с наивысшим приоритетом должны выполняться в первую очередь.

При использовании многофазного управления питанием ТЭП сигналом ШИМ, возникает необходимость в дополнительном ПО. Управление ТЭП должно быть реализовано с высокой скоростью и детерминированием по времени, без влияния работы со стороны остальных модулей, исключая возможность варьирования длительности сигналов управления питанием ТЭП. Для достижения этих целей необходима ОСРВ. Она предназначена для организации удобного интерфейса при разработке и обеспечения интерфейса доступа к ресурсам ВУ, критичных по времени выполнения задач. Требования к работе ОСРВ, её защищенности и отказоустойчивости описываются в соответствующем стандарте ОСРВ, исходя из области применения (авиация, космические аппараты, робототехника, машиностроение, оборонная промышленность и др.). ОСРВ подразделяются на два типа: жесткого (*hard real-time*) и мягкого реального времени (*soft real-time*). К первому относятся системы, способные обеспечить выполнение задач за строго отведенное время, не имея возможности превысить период времени, отведенный на выполнение каждой задачи. В противном случае произойдет аварийная ситуация. В системах мягкого реального времени допускается незначительное отклонение от заданных временных рамок.

Большие различия в спецификациях ОСРВ и огромное число существующих МК выдвигают на передний план проблему стандартизации в области ОСРВ. Наиболее ранним и распространенным стандартом ОСРВ является стандарт POSIX (IEEE Portable Operating System Interface for Computer Environments, IEEE 1003.1) [52]. Первоначальный вариант стандарта POSIX выпущен в 1990 году и предназначался для UNIX-систем, первые версии которых появились в 70-х годах прошлого века. Спецификации POSIX определяют стандартный механизм взаимодействия прикладной программы и ОС и в настоящее время включают набор более чем из 30 стандартов. Для ОСРВ наиболее важными являются 7 (1003.1a, 1003.1b, 1003.1c, 1003.1d, 1003.1j, 1003.21, 1003.2h), но широкую поддержку в коммерческих ОСРВ получили первые 3. Наиболее популярными ОСРВ на текущий момент являются: FreeRTOS, scmRTOS, tinyOS, mRTOS, uc/OS и uRTOS. Краткая информация о параметрах данных ОСРВ представлена в таблице 1.1.

В плате управления терморегулятором КЭЖ используются МК ATmega 2560, в которых доступно 256 Кб ПЗУ и 8 Кб ОЗУ, что допускает возможность применения ОСРВ. Из таблицы 1.1 видно, что наиболее предпочтительными ОСРВ являются mRTOS и FreeRTOS [53]. Так, они удовлетворяют системным требованиям МК, используемого в терморегуляторе, Кроме того, эти ОСРВ обладают поддержкой крупных разработчиков встраиваемого ПО, что обеспечивает их качественную техническую поддержку.

Таблица 1.1 – Характеристики ОСРВ

ОСРВ	ОЗУ (Кбайт)	Лицензия	Язык	Среда разработки
FreeRTOS	4	Open-Source/ Модифицированная лицензия GPL	Си, ассемблер	Keil, IAR, GCC Rowley CrossWorks, Altera SoC EDS, Eclipse, MPLAB
scmRTOS	0,5	MIT	C++	Keil, IAR, GCC
tinyRTOS	0,5	GPLv3	nesC	Keil, IAR, GCC
mRTOS	4	Open-Source	Си	CodeVisionAVR
uc/OS	5	GPL с дополнением	Си	IAR, Keil, GCC
uRTOS	2	GPL с дополнением	Assembler	GCC, AVR Studio

Основной задачей в таких системах является своевременность выполнения обработки данных, а одним из основных требований к ОСРВ являются предсказуемость поведения при всех сценариях системной загрузки (одновременные прерывания и выполнение потоков) и детерминированность поведения системы при наихудших внешних условиях, что значительно отличается от требований к производительности и быстродействию универсальных ОС. Концепция многозадачности (псевдопараллелизм) является существенной для системы реального времени с одним процессором, приложения которой должны быть способны обрабатывать многочисленные внешние события, происходящие практически одновременно.

1.5.3 Устройства терморегуляторов для управления электропитанием термоэлектрического преобразователя посредством программируемой логической интегральной схемы

В настоящее время ведется активное развитие программируемых логических интегральных схем (ПЛИС) с различным набором аппаратных блоков и IP-ядер, предоставляемых компаниями разработчиков. Это позволяет реализовать вычислительную архитектуру любой сложности без ограничений, имеющихся в архитектуре МК или СнК. Поэтому, используя ПЛИС можно реализовать архитектуру терморегулятора с нужным числом сигналов ШИМ и параллельным вычислением управляющего сигнала в каскаде ПИД-регуляторов.

В общем виде модель САУ терморегулятора с обратной связью представлена на рисунке 1.2. В модели используются следующие обозначения $G(p)$ – управляемое устройство (УУ) и $C(p)$ – блок регулятора, t_{in} – заданная температура, которую должна достичь система регулирования, t_{out} – температура, полученная от ДТ (обратная связь), измеренная на поверхности контролируемого объекта, ε – ошибка температуры (разница между t_{in} и t_{out}), которую система должна регулировать и приближать значение к нулю, k – команда рабочего цикла, отправленная на вход УУ и рассчитанная с учетом коэффициентов.

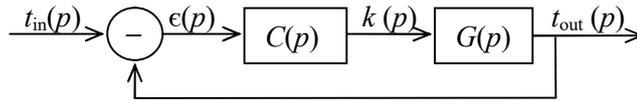


Рисунок 1.2 – Модель системы управления одним ТЭП

Корректор $C(p)$ непрерывно вычисляет по формуле (1.14) [54] преобразованная к виду (1.13) для расчета операций в ПИД-регулятора:

$$C(p) = k \frac{1 + \frac{p}{w_i}}{\frac{p}{w_i}} \times \frac{1 + \frac{p}{w_1}}{1 + \frac{p}{w_2}}, \quad (1.13)$$

где k – пропорциональный коэффициент, w_i – предел пульсации интегрального коэффициента, w_1 и w_2 – пределы пульсации дифференциальной составляющей.

Выражение (1.13) должно быть преобразовано в дискретный временной диапазон для продолжения работы. Изначально определена частота выборки f_s , при которой работает ПИД-регулятор в диапазоне частот от 100 Гц до 2 кГц. Далее в дискретном временном диапазоне рассматриваются переменные t_{in} , t_{out} , ε и k как значения, отобранные в f_s . Пусть $t_{in}(n)$, $t_{out}(n)$, $\varepsilon(n)$ и $k(n)$ значения для выборки n . Тогда, используя билинейное преобразование Тустина, получим Z -преобразования можно получить для $C(p)$

$$C(z) = \frac{\alpha z^{-2} + \beta z^{-1} + \gamma}{\alpha z^{-2} + \beta z^{-1} + 1}, \quad (1.14)$$

где α , β , γ , a и b – параметры, непосредственно определяемые через k , w_i , w_1 и w_2 . Используя обратное Z -преобразованием, получим

$$k(n) = \alpha \varepsilon(n-2) + \beta \varepsilon(n-1) + \gamma \varepsilon(n) - ak(n-2) - bk(n-1). \quad (1.15)$$

Уравнение (1.15) показывает, что новые выборки команды k могут быть вычислены из её предыдущей выборки и выборки ошибки ε с использованием 5 умножений и 4 сложений. Это конечная форма расчета, которая необходима для нахождения коэффициента управляющего воздействия на РП.

1.5.4 Синхронизация группы микроконтроллеров

Задачу жесткого распределения по времени работы сигналов ШИМ при запуске на одном МК можно решить, используя ОСРВ. Так, инструменты ОСРВ позволяют выставить приоритет каждой задаче и жестко контролировать временной период её решения. Однако возможность синхронизации работы группы МК средствами ОСРВ не предусмотрена. Применение МК в настоящее время достаточно широкая практика при проектировании РЭС во всех отраслях промышленности. Широкое распространение МК получили за счет большого

разнообразия модельного ряда вычислительных архитектур (8–32 разрядные), характеристик, миниатюрности, гибкости, за счет сочетания на одном кристалле функций процессорного и периферийных устройств, а также наличие различных интерфейсов связи (I²C, 1-Wire, RS-232, CAN, USB и др.). Использование, по меньшей мере, двух МК расширяет функциональность и повышает вычислительную способность РЭС, а также позволяет оперировать большим числом контролируемых устройств. Рост числа задач, возлагаемых на РЭС таких, как контроль большого числа разнесенных устройств, организация системы сбора и обработки данных и т.д., требует согласованности в выполняемых задачах одним МК (синхронизации) для решения общей задачи группой МК. При этом появляется необходимость выполнения согласованных действий группой МК с определенной периодичностью, в связи с чем, возникает задача синхронизации их работы. Синхронизация является ключевым моментом, при выполнении задач в реальном времени [55].

Общеизвестные методы синхронизации МК предполагают использование прецизионных кварцевых генераторов, при этом существуют методы синхронизации времени с использованием неточных CMOS-генераторов [56]. Проблема синхронизации довольно обширна [57], поскольку тактовые генераторы, используемые в распределенных местах, не являются абсолютно точными и не поддерживают точность реального времени [58]. Одним из известных способов синхронизации является применение общего внешнего тактового генератора (ВТГ) для каждого МК в группе. Подобный метод широко применяется [59, 60], однако имеет ряд недостатков таких, как: группа МК должна быть однотипной; работа группы МК возможна только на одной частоте; увеличение числа МК (более четырех), ведет к нестабильной работе МК из-за искажения формы тактируемого сигнала, в связи с трудностями по сохранению целостности сигнала. Отсутствие контроля синхронной работы и средств регулирования периода синхронной работы группы МК также вызывает ограничения по возможности применения существующих способов синхронизации. Возникает необходимость синхронизации работы группы МК разных производителей, работающих на разных системных частотах.

Использование нескольких МК в рамках решения общей задачи КЭЖ требует синхронизации выполнения системных команд. Например, синхронизировать работу сигналов ШИМ на 4 МК без пересечения фаз по интервалам времени. Из [61] известно устройство синхронизации множества МК распределенной тормозной системы автомобиля. Каждый из МК имеет внутренний тактовый генератор с возможностью его выборочного регулирования в зависимости от разности фаз между тактовыми импульсами и импульсами сигнала данных, чем осуществляется коррекция внутренней тактовой частоты МК по фазе. К недостаткам данного

способа можно отнести узконаправленное применение в автомобильной промышленности, где учитываются промышленные требования и специфичные характеристики, а также последовательный порядок включения МК. При этом генераторы тактовых импульсов всех синхронизируемых МК должны работать на одной частоте, иначе синхронизации МК не будет. Описанным способом не предусмотрены изменение порядка связи МК, модификация и расширяемость устройств синхронизации. Из [62] известно устройство для синхронизации управляющего (ведущего) и, по меньшей мере, одного управляемого (ведомого) устройств. Каждое из устройств содержит собственный генератор и МК. Управляемое устройство находится в режиме обмена данными с управляющим устройством через универсальную последовательную шину. Способ включает передачу сигналов команд с указанием частоты синхронизации от управляющего к управляемому устройству. Управляемое устройство, получив сигналы команд и указания по частоте синхронизации, вычисляет частоту своего локального генератора и перестраивает его. К недостаткам данного способа синхронизации можно отнести отсутствие совместной работы устройств над решением одной задачи, где требуется высокая точность синхронизации (~2 мкс) работы группы МК. Способ подходит для синхронизации системного времени между устройствами, без синхронизации работы самих устройств.

1.6 Диагностика и тестирование блоков вычислительных устройств

1.6.1 Обнаружение сбоев микроконтроллера с помощью анализа памяти при совместном климатическом и электромагнитном воздействии

Все современные МК содержат ПЗУ и ОЗУ [63]. Воздействие внешних электромагнитных помех может привести к изменению данных, которые содержат эти устройства. Так, повышенная восприимчивость к электромагнитным помехам может привести к неконтролируемому переключению транзисторов в регистрах памяти [64, 65]. Вследствие этого увеличивается вероятность возникновения битовых ошибок, что может приводить к нестабильной работе РЭС. Выделяют два вида отказов (сбоев) [66]:

1. Аппаратный сбой – проявление деградиационных процессов полупроводников ИС. В данном случае отсутствует возможность устранения неисправности в РЭС программными средствами. Восстановление происходит путем замены неисправной ИС.

2. Программный сбой – неконтролируемое изменение внутреннего состояния регистров МК. Выполняется инициализация вычислительных блоков МК с возвратом к первоначальному состоянию после жесткого сброса (hard reset). В таком случае признаки сбоя в памяти МК устраняются. Одним из распространенных решений вызова жесткого сброса МК является

контролируемое событие посредством сторожевого таймера. Одним из методов обнаружения сбоев МК является детектирование изменений состояния в аппаратных блоках МК.

Процедура тестового контроля может проходить как эксперименты с «черным», «белым» или «серым ящиком» [67–71]. В качестве «черного ящика» с множеством входов и выходов может рассматриваться вся система КЭЖ или отдельный модуль, входящий в её состав. Корректность работы «черного ящика» должна устанавливаться путем подачи тестовых команд и наблюдения сигналов на выходе. В тех случаях, когда сигналы от «черного ящика» отличаются от предполагаемого результата, говорят о неточности работы или наличии ошибки. Ошибка может быть вызвана как неисправностью в аппаратной, так и в программной частях КЭЖ в виде некорректного состояния внутри «черного ящика».

1.6.2 Способ аппаратного и программного резервирования компонентов радиоэлектронных средств

Влияние внешних климатического и электромагнитного воздействий на МК приводит к изменениям и сбоям в работе его блоков. Известны различные подходы к реализации аппаратного и программного дублирования узлов МК и созданию на их основе отказоустойчивых систем, в т.ч. с поблочным резервированием и способностью к реконфигурации [72–76]. Для обеспечения высокой производительности и устойчивости к сбоям РЭС, особенно при эксплуатации в условиях «агрессивной» среды, применяют многоядерные МК. В них доступно независимое использование каждого ядра и предусмотрена возможность выполнения инструкций в параллельном режиме. Для повышения отказоустойчивости МК требуется выполнить исследования по обеспечению аппаратного и программного резервирования МК, позволяющего, в случае возникновения сбоя в одном из блоков МК, переключиться на резервное ядро, или запустить дублирующий МК для возобновления работы целевой функции.

1.7 Постановка цели и задач исследования

Из выполненного обзора следует, что проектирование АСУ на базе ВУ непрерывно развивается и усовершенствуется, а область применения АСУ постоянно расширяется, что вызывает потребность в разработке новых методов, способов, моделей и алгоритмов, способствующих реализации новых способов автоматизации систем контроля и управления ВУ, такими как МК, СнК и ПЛИС. Миниатюризация компонентной базы, повышение вычислительной мощности, снижение уровней энергопотребления, развитие полупроводниковой промышленности, в том числе переход производства на новый технологический процесс изготовления полупроводниковой электроники, привели к тому, что

необходимы новые методы, алгоритмы контроля и способы тестирования, диагностики и выявления рабочих параметров и характеристик компонентов АСУ с учетом взаимного электромагнитного влияния. Принято решение использовать распространенную модель ПИД-регулятора для расчета выходного сигнала управления ТЭП. Известны решения, применимые для управления термостатом в отопительных системах, однако целесообразно провести исследования по возможности управления большим числом независимых ТЭП с учетом инертности системы и минимальным градиентом температур, а также выполнить исследования по оптимизации расчетов за счет использования нескольких ПИД-регуляторов.

В терморегуляторе КЭК используется 5 МК ATmega 2560. Они контролируют работу всех систем КЭК. Поэтому с помощью КЭК можно проведение исследования и испытания объектов, представляющих собой отдельные компоненты или небольшие устройства в целом, на ЭМС с одновременным контролируемым воздействием климатических условий окружающей среды, например, испытаний на стойкость объектов к совместным контролируемым воздействиям электромагнитного и температурного полей внутри испытательного контейнера, измерений тепловых эмиссий при электромагнитном воздействии или измерения тепловых и электромагнитных эмиссий от ОИ, находящегося при заданном значении влажности воздуха внутри испытательного контейнера камеры. КЭК должна содержать комплекс программно-аппаратных средств, необходимых для управления процессом испытания и мониторинга как внешних воздействий на камеру, так и внутренних процессов, происходящих во внутреннем испытательном контейнере.

Особое внимание следует уделить разработке требований к методам диагностики и тестирования РЭС и ВУ при совместном климатическом и электромагнитном воздействии. Это повысит конструктивную сложность диагностического оборудования, а также требования к его функционалу и реализации. Этот процесс требует гибридизации различных АСУ, выполняющих общую работу. Усложнение процесса управления и увеличение числа выполняемых инструкций ВУ способствуют росту временных и вычислительных затрат на проектирование и тестирование РЭС и, как следствие, стоимости самого РЭС. Для снижения этих затрат требуется совершенствование известных методов проектирования АСУ и разработка новых способов контроля ВУ РЭС.

Существующие методы АСУ в основном предназначены для классических производственных задач с одним управляющим контуром, в которых отсутствуют требования к скорости вычисления управляющего сигнала, состоящей в строгой зависимости от эффективности работы параллельно функционирующих ВУ в рамках одной АСУ. При этом методы для выполнения тестирования и выявления ошибок и сбоев в процессе работы ВУ

таких, как МК и СнК, при совместном климатическом и электромагнитном воздействии, позволяющие выполнить комплексный анализ в реальном времени, пока не известны.

Из пункта 1.1 следует, что в настоящее время ведется активное развитие устройств для исследований параметров и характеристик компонентов РЭС, в частности, камер поперечной электромагнитной волны, или ТЕМ-камер. Однако на данный момент отсутствуют методы для исследования на совместные климатические и электромагнитные воздействия, основанные на использовании в камере поперечной электромагнитной волны климатической подсистемы, управляемой терморегулятором на базе ВУ.

Для моделирования АСУ терморегулятора обычно применяются различные модификации классического ПИД-регулятора. Большое число критичных задач, требовательных к точности и скорости выполнения, а также необходимость параллельного выполнения команд оператора приводят к необходимости использования ОСРВ. Однако, из-за ограниченного функционала и отсутствия систем самодиагностики и обработки исключительных ситуаций, из-за программного и/или аппаратного сбоев ОСРВ ведут себя непредсказуемо, что недопустимо в критичных РЭС. Поэтому актуальна разработка методов, алгоритмов и ПО для САУ на базе ОСРВ.

Из пункта 1.2 следует, что в настоящее время разработка сложных программно-аппаратных систем ведется посредством унифицированного языка моделирования (UML). В то же время, отсутствуют открытые (open source) модели для проектирования КЭК. Поскольку КЭК является оригинальным устройством для проведения совместных климатических и электромагнитных исследований, в том числе применимых в области биомедицины, требуется разработка оригинальных UML-моделей и архитектуры ПО.

Из пунктов 1.3.1–1.3.3 следует, что известные способы синхронизации ВУ обладают рядом недостатков и ограничений, что исключает возможность их применения для синхронизации группы разнотипных ВУ (МК, СнК, ПЛИС) с целью регулирования температуры поверхности ТЕМ-камеры. Инструменты, предоставляемые ОСРВ, позволяют решить задачу синхронизации многофазного управления ТЭП локально, (в рамках одного МК), но поскольку в терморегуляторе КЭК задействованы 5 МК, необходимо синхронизировать группу МК для общей работы всей КЭК. Из этого следует, что необходимо разработать способ, алгоритм и ПО для синхронизации работы группы МК.

Из пункта 1.3.5 следует, что применение данного регулятора позволит снизить нагрузку на источник питания в ~5 раз.

Из пункта 1.4 следует, что при внешнем воздействии на МК (СКИ, ЭСР, ЭМП) возможен выход из строя вычислительных блоков МК (память, АЦП, ЦАП, порты ввода-вывода), а также

всего МК. Сбой может быть исправлен программным сбросом МК (soft reset). Однако такой сбой трудно распознать в процессе функционирования МК. Частые повторы подобных сбоев могут привести к выходу из строя РЭС в целом. Поэтому наличие методов и алгоритмов распознавания сбоев в блоках МК способствуют своевременной диагностике и выявлению критичных ошибок в процессе работы РЭС.

Цель работы – разработать методы и способы управления, синхронизации и тестирования вычислительных устройств автоматизированных систем управления климатическими воздействиями внутри камеры поперечных электромагнитных волн.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить обзор применения вычислительных устройств в системах автоматизированного управления климатическими воздействиями.

2. Разработать модели автоматизированной системы управления климатическими воздействиями внутри испытательного контейнера климатической экранированной камеры.

3. Разработать метод и способы синхронизации работы группы разнотипных вычислительных устройств и многофазного управления группами термоэлектрических преобразователей.

4. Разработать методы и алгоритмы тестирования блоков микроконтроллера.

5. Программно реализовать методы и способы контроля, управления и тестирования элементов климатической экранированной камеры.

2 Модели автоматизированной системы управления климатическими воздействиями внутри испытательного контейнера

В данном разделе представлены результаты разработки модели АСУ и поддержания температуры поверхности ТЕМ-камеры. Представлен процесс проектирования ПО КЭЖ в соответствии с объектно-ориентированным подходом [77]. Описаны алгоритмы и функциональные блоки проектируемой КЭЖ. Спроектирована архитектура ПО камеры, состоящая из модулей контроля, управления и диагностики. Разработана концептуальная модель данных ТЕМ-камеры посредством унифицированного языка моделирования. Представлены UML-диаграммы прецедентов, деятельности, классов, компонентов, в том числе описана архитектура ПО посредством унифицированного языка моделирования UML.

2.1 Структурно-функциональная модель автоматизации процессов контроля и регулирования температуры поверхности ТЕМ-камеры

На начальном этапе проектирования архитектуры ПО выполнен объектно-ориентированный анализ разрабатываемой КЭЖ. Анализ позволил классифицировать и формализовать сведения обо всех аспектах, определяющих свойства разрабатываемой автоматизированной системы управления КЭЖ. Также анализ поспособствовал выявлению ошибок на раннем этапе проектирования ПО. Так, процесс автоматизации контроля и регулирования представлен в виде СУ с обратной связью. Объектно-ориентированная модель автоматизации процессов контроля и регулирования температуры основаны на функциональных блоках и компонентах, представленных в [77], и описаны в виде UML-диаграмм прецедентов, деятельности, классов и компонентов. Это позволяет представить процессы функционирования КЭЖ для исследования объектов РЭС на ЭМС, с возможностью проведения испытаний при контролируемом климатическом воздействии.

САУ температурой поверхности ТЕМ-камеры представляет собой объект, состоящий из нескольких подсистем, имеющих один общий замкнутый контур управления с обратной связью (рисунок 2.1). В качестве ВУ, используется МК, выполняющий обработку команд (G), введенных оператором. Также на МК поступают данные от прецизионных датчиков температуры (ДТ), расположенных на поверхности ТЕМ-камеры. Исполнительным устройством (ИУ) АСУ является реверсивный преобразователь (РП), который формирует управляющее воздействие (U) на объект управления в виде термоэлектрических преобразователей (ТЭП). Неконтролируемое возмущающее воздействие (F), оказываемое внешней средой на ТЕМ-камеру, вносит ошибку в процесс работы АСУ. Так, в качестве воздействия F могут выступать температура и влажность

воздуха в помещении, где расположена КЭК. Основной задачей ИУ является регулирование значения средней электрической мощности, подводимой к ОУ, относительно значений, рассчитанных ВУ на основе данных от ДТ. Группа из блоков ДТ, ВУ и ИУ формирует управляющее устройство (УУ), которое формирует необходимое воздействие на объект управления в виде ТЭП. Использование ТЭП позволяет задать требуемую температуру его поверхности при подведении к нему заданной средней электрической мощности воздействия. В результате, формируется новое температурное воздействие (X) позволяющее изменять температуру поверхности ТЕМ-камеры.

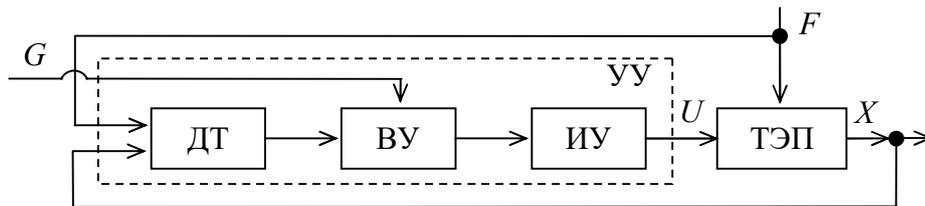


Рисунок 2.1 – Блок схема САУ процессами контроля и регулирования температуры поверхности ТЕМ-камеры

Выполнена функциональная декомпозиция элементов прототипа КЭК, позволившая выделить связи между внутренними компонентами их ограничения и требования к (функциональной) аппаратной и программной части КЭК. По результатам декомпозиции разработана структурно-функциональная модель АСУ процессами контроля и регулирования температуры поверхности ТЕМ-камеры (рисунок 2.2).

КЭК содержит САУ климатическими воздействиями внутри испытательного контейнера в виде ТЕМ-камеры и включает в себя внутреннюю и внешнюю подсистемы под управлением ВУ, с программной реализацией пропорционально интегрально-дифференциального регулятора и схемой контроля и регулирования температуры подсистем 20, а также интерфейсом для подключения внешнего персонального компьютера 25. В качестве устройства ввода-вывода информации используется пульт управления 3 (G) с графическим ВУ 17 и жидкокристаллическим индикатором 18, блоком кнопок и сенсорного управления 19. В процессе работы КЭК допускается неконтролируемое возмущающее воздействие (F), оказываемое внешней климатической обстановкой помещения (температура и влажность воздуха), резкое изменение которой может повлиять на результат исследований и испытаний в КЭК [21]. Во внешней подсистеме климатического воздействия объект управления в виде ТЭП располагается в модуле, каждый из которых располагается в сотах 28. Модуль в соте располагается между внешней поверхностью ТЕМ-камеры 13 и внутренней поверхностью оболочки экранирующего корпуса 29. Каждый модуль содержит ДТ, информация (X) с которых

поступает непосредственно в ВУ 16, а управление элементами ТЭП осуществляется МК через РП 30. Внешняя климатическая подсистема 15 содержит УУ и ТЭП и обеспечивает контроль и регулирование температуры поверхности ТЕМ-камеры.

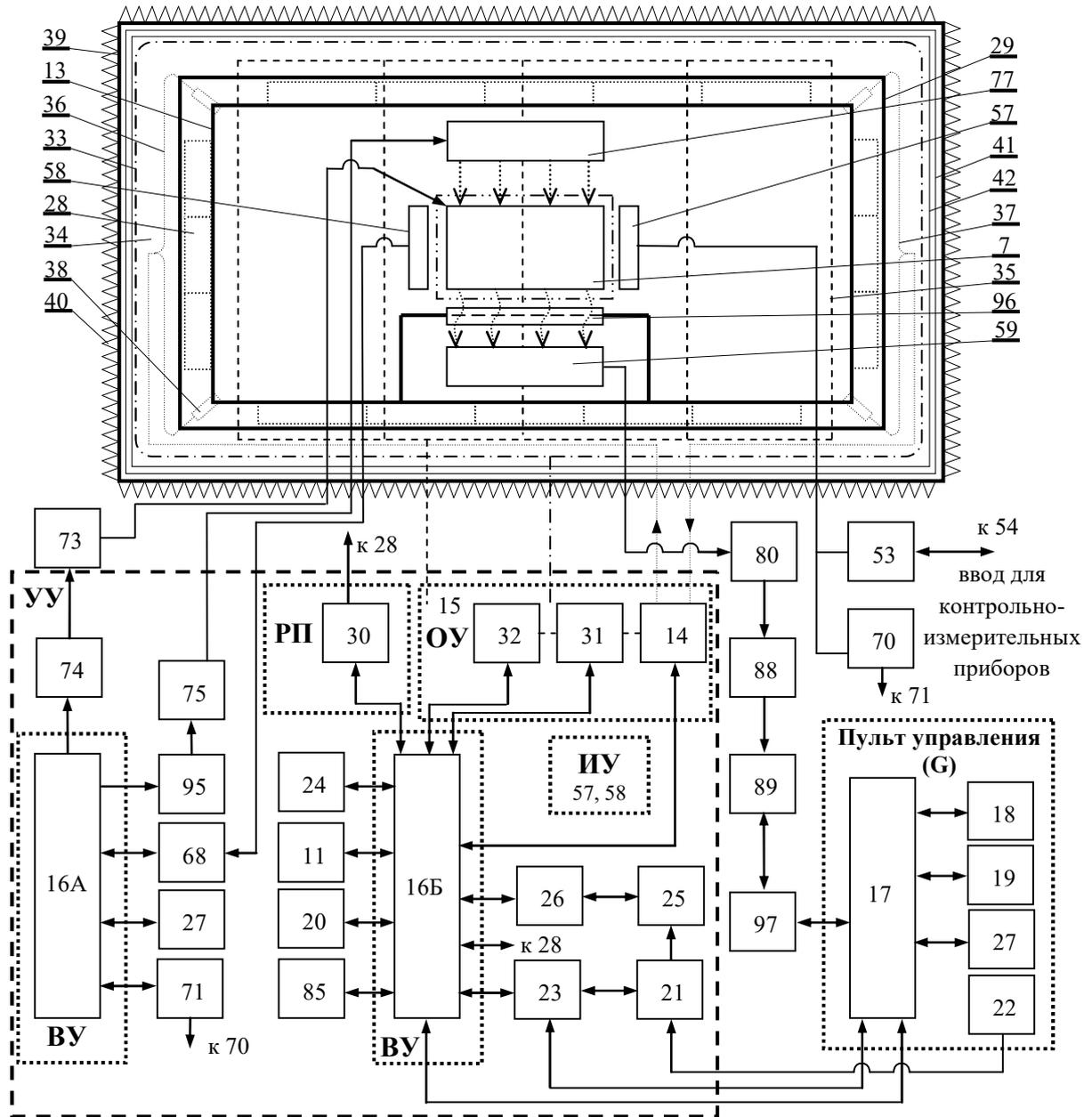


Рисунок 2.2 – Структурно-функциональная модель КЭК

Используя блок схему АСУ температуры поверхности ТЕМ-камеры (рисунок 2.1) в структурно-функциональной модели (рисунок 2.2) можно контролировать температуру поверхности ТЕМ-камеры.

Таким образом, разработан процесс автоматизации контроля и регулирования поверхности ТЕМ-камеры, расположенной внутри разрабатываемой КЭК.

2.2 Концептуальная модель климатической экранированной камеры

Разработка архитектуры ПО КЭК начата с создания её концептуальной модели. Главной задачей модели является определение функциональных требований и описание процессов функционирования и способов взаимодействия оператора с КЭК. Камера разрабатывается для проведения исследований и испытаний малогабаритных РЭС на совместные климатические и электромагнитные воздействия, результатом которых будут являться данные об объекте (излучаемые эмиссии или восприимчивость объекта при климатическом воздействии), поэтому диаграмма прецедентов КЭК содержит *оператора* и 7 прецедентов: *ввод данных*, *анализ объекта исследования*, *программа исследования*, *совместные воздействия*, *климатическое воздействие*, *электромагнитное воздействие*, *результат исследования* (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3 – UML-диаграмма прецедентов КЭК

Оператор проводит анализ исследуемого объекта, в процессе которого определяет критерии (время воздействия, диапазон частот и уровни амплитуд напряженности электрического поля, а также диапазон температур и влажности) для проведения исследования и испытания на совместное климатическое и электромагнитное воздействие. Прецеденты *климатическое воздействие* и *электромагнитное воздействие* являются расширениями прецедента *совместные воздействия*, который передаёт данные прецеденту *результат исследования*. Из переданных данных прецедентом *результат исследования* формируется отчет для *оператора*.

2.3 Модель технологического процесса климатической экранированной камеры

Разработана модель технологического процесса в виде обобщенной UML-диаграммы деятельности (рисунок 2.4), отражающая взаимодействие процессов контроля и регулирования температуры поверхности ТЕМ-камеры и изменение внутреннего состояния при различных сценариях работы структурно-функциональной модели КЭК. В ней отражены ключевые моменты функционирования КЭК, отсутствие которых может привести к её неработоспособности. *Включение КЭК* отражает действие оператора, которое инициирует процесс *запуск и инициализация системы КЭК*. На этом этапе запускаются алгоритмы проверки, калибровки и настройки систем, обеспечивающих работу КЭК. Процесс *самодиагностика систем КЭК* выполняет набор функциональных тестов для проверки объектов управления и устройств (ТЭП, ДТ, датчиков тока и т.д.) перед началом работы КЭК. В случае обнаружения аппаратных ошибок или программного сбоя в процессе теста, результат поступает в блок *обработка ошибок* для регистрации ошибок и вывода соответствующего сообщения оператору. При положительном результате, управление переходит в блок *ввод данных*, в котором выставляются диапазоны влажности, температуры, времени, напряженности электрического поля и режим работы КЭК. Далее управление передается в *процесс воздействия в КЭК*. На этом этапе выполняется основная задача КЭК, а именно: происходят климатическое и/или электромагнитное воздействия на объект исследования. Все данные с датчиков и служб записываются в соответствующий файл для дальнейшей обработки. По истечении заданного времени воздействия, а также, если не возникло ситуаций, повлекших преждевременный вызов процесса *остановка процесса воздействия*, выполняется процесс *завершение воздействия*. Основываясь на обработанных результатах, полученных на этапе *процесс воздействия в КЭК*, вызывается процесс *отчет*, в котором формируется итоговый результат, содержащий параметры климатического и/или электромагнитного воздействия на исследуемый объект, размещенный в КЭК.

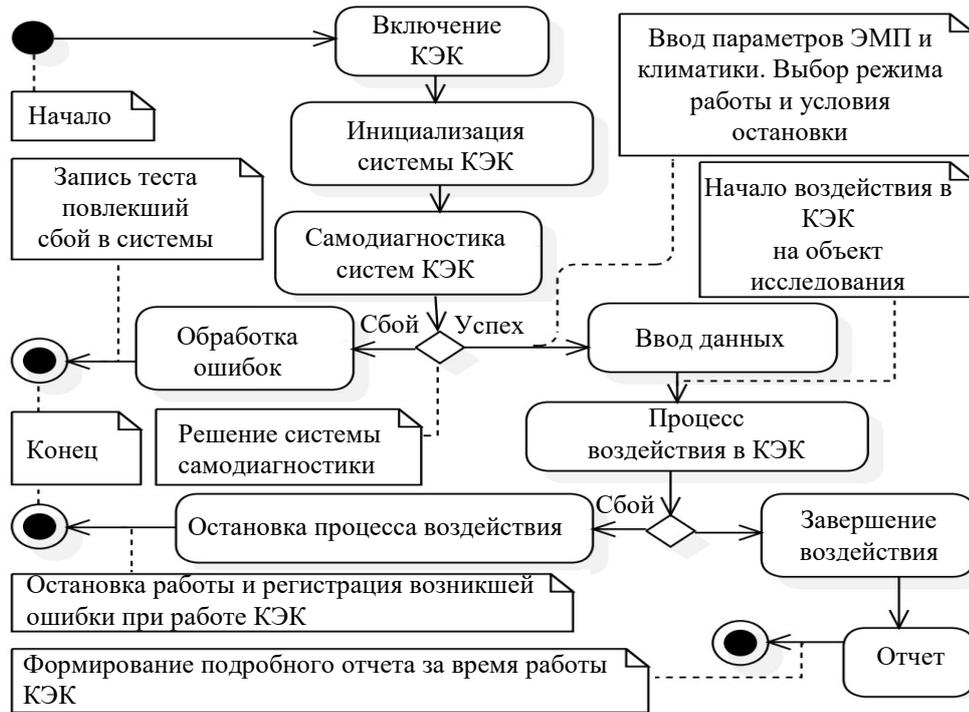


Рисунок 2.4 – Обобщенная UML-диаграмма деятельности КЭК

Разработана расширенная UML-диаграмма деятельности КЭК (рисунок 2.5), которая состоит из связей трех компонентов: *Control panel*, *Master* и *Climatic control*, расположенных на разных ВУ, процессы которых взаимодействуют между собой, выполняя определенную часть обработки информации при работе КЭК. Блоки *Master* и *Climatic control* контролируют процесс синхронизации работы группы МК, выполняющих многофазное управление электропитанием ТЭП посредством ШИМ сигналов. Блок *Climatic control*, у которого входными данными являются команды управления от блока *Master*, предназначен для функционирования климатической подсистемы КЭК. Блок *Master* контролирует процессы опроса датчиков тока и температуры. Основываясь на данных из этих трёх блоков, ПИД-регулятор выполняет расчет управляющего сигнала для ТЭП. Обратная связь в виде *показания температуры, влажности и потребляемого тока*, которые в дальнейшем необходимы для обработки и отображения в ПО оператора КЭК, поступают в компонент *сбор и обработка данных*, расположенный в блоке *Master*. При помощи блока *Control panel* происходит управление КЭК, используя сенсорный индикатор с графическим интерфейсом. Этот блок представлен в виде инструментов ввода/вывода данных и служебной информации. Оценка вычислительной сложности, используя известные аналитические методы, позволит оптимизировать и распределить нагрузку между ВУ аппаратного уровня, что облегчит разработку архитектуры ПО КЭК.

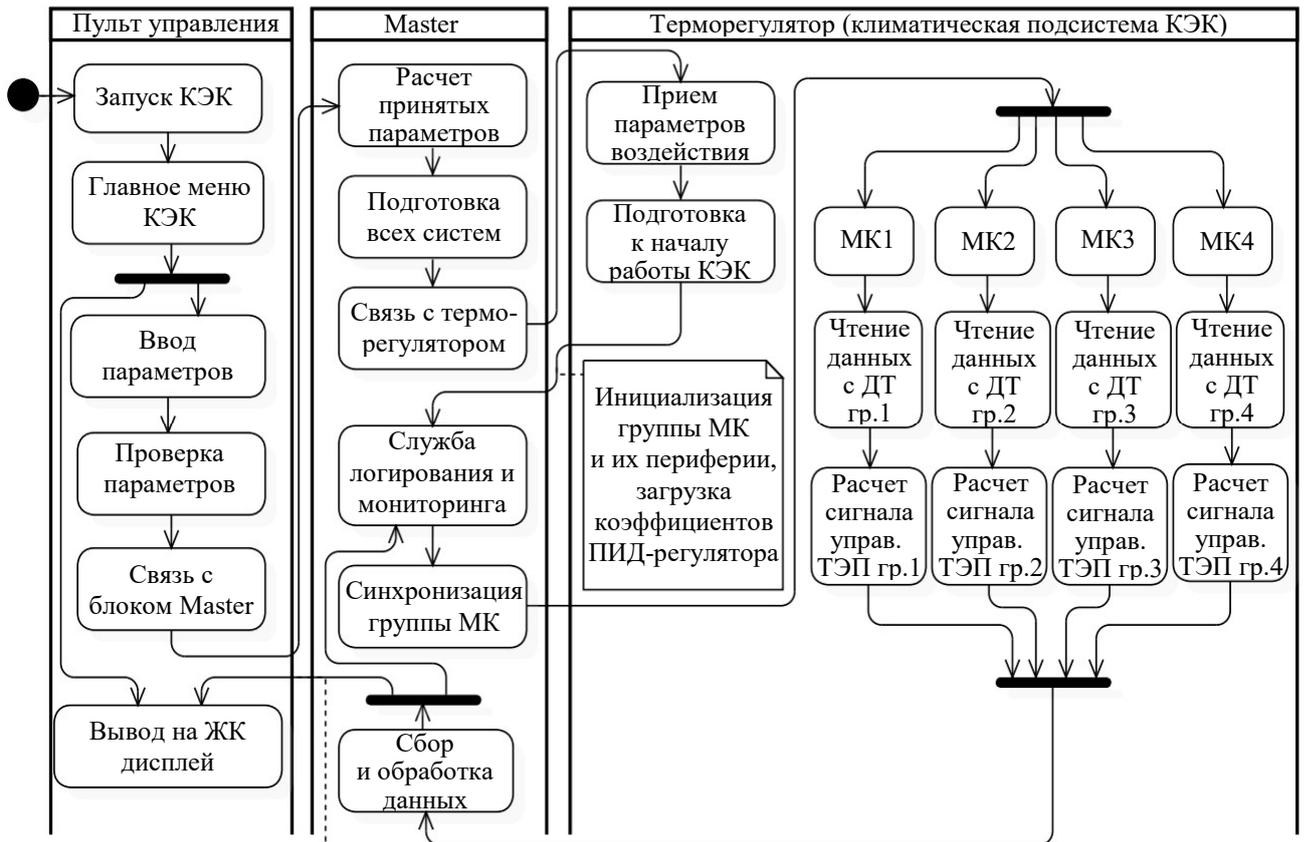


Рисунок 2.5 – Расширенная диаграмма деятельности КЭЖ

В расширенную UML-диаграмму деятельности можно вносить модификации проектируемой архитектуры ПО КЭЖ. Это позволит оценивать вычислительную нагрузку климатической подсистемы для дальнейшего совершенствования аппаратной части (архитектура МК, число портов ввода/вывода, периферия) КЭЖ.

2.4 Структура иерархии классов программного обеспечения климатической подсистемы

В процессе проектирования ПО КЭЖ построена детализированная UML-диаграмма классов (рисунок 2.6), отражающая периферию, основные методы и интерфейсы взаимодействия вычислительных модулей (МК и СМК). Основными классами в диаграмме являются: *Hardware*, *Slave microcontroller*, *Master microcontroller*, *Control panel*, *Control board*, *Interface*. Данные классы отвечают за выполнение определенных задач и могут обмениваться данными через интерфейсы с другими классами посредством определенных функций.

Класс *Hardware* описывает аппаратную часть вычислительных модулей с периферией и является расширением для классов *Control board*, *Master microcontroller* и *Slave microcontroller*, которые наследуют его атрибуты и методы с объявленным модификатором доступа *public*. В атрибутах класса *Hardware* отражена информация о системной частоте вычислительного модуля (*System Clock*) и числе программируемых выводов общего назначения (*GPIO*), выводов, поддерживающих режим работы ШИМ (*PWM*), таймеров (*Timers*), аналого-цифровых

преобразователей (*ADC*), цифро-аналоговых преобразователей (*DAC*), интерфейсов обмена данных (*Interface*). Методы, реализованные в классе *Hardware*, выполняют инициализацию аппаратных компонентов, перечисленных в атрибутах. Также реализованы методы *Get u Set*, посредством которых выполняется управление и чтение состояния атрибутов класса *Hardware*.

Класс *Interface* связывается отношением *композиция* с классами *Slave microcontroller*, *Master microcontroller* и *Control panel*. В результате, атрибуты и методы класса *Interface* доступны только во время работы связанных с ним классов и не могут существовать после удаления объекта, с которым он состоит в отношении композиции. Атрибуты класса *Interface* отражают общую информацию об интерфейсах, имеющихся в МК и СМК в составе КЭК.

Обобщающим классом является *Control board*, содержащий: *Master microcontroller*, атрибуты всех МК и терморегулятора. Классы *Master microcontroller* и *Slave microcontroller* связаны отношением композиции с классом *Control board*. Данный класс обладает атрибутами *Master ID*, *status* и *error flag*. Атрибут *Master ID* содержит идентификационный номер, который используется всеми ВУ КЭК в качестве адреса для подписи сообщений, предназначенных для класса *Master microcontroller*. Атрибут *status* служит для отображения текущего состояния УУ, например, в случае возникновения сбоя в этот атрибут будет помещен код ошибки *error flag*. Система диагностики КЭК, определив изменение флага *error flag*, выполняет аварийное завершение работы КЭК и выдает сообщение об ошибке, соответствующее атрибуту *status*. Метод *command* предназначен для выполнения команд, принятых от класса *Master microcontroller*.

Класс *Control panel* состоит из атрибутов и методов управления КЭК, образуя человеко-машинный интерфейс. В качестве интерфейса ввода/вывода используется ЖК дисплей с сенсорной панелью (*touchscreen*), на котором отображается графический интерфейс ПО. Атрибуты *Display*, *High*, *Width*, *Button* и *Widget* предназначены для графического ПО. В них содержится ширина и высота дисплея, функциональное назначение кнопок и виджеты, входящие в набор базовых компонентов Qt Creator, который применяется при проектировании графического интерфейса ПО *Control panel*. Метод *View menu* выводит главное меню на экран пульта управления КЭК. В нем реализованы элементы навигации по вкладкам и пунктам ПО пульта управления КЭК.

Для получения различной информации в процессе работы КЭК реализованы методы, название которых начинается с префикса *Get**. Они запрашивают информацию у экземпляра класса и в качестве результата возвращают информацию (значения температуры и влажности, режим работы КЭК, параметры ШИМ-сигнала и др.) в определенном формате. Для изменения параметров КЭК реализованы методы, название которых начинается с префикса *Set**.

Например, для установки диапазонов температуры и влажности воздуха в КЭК следует использовать методы *SetTemp()* и *SetHumidity()*. Все операции класса *Control panel*, влияющие на параметры воздействия в КЭК, передаются в экземпляр класса *Master microcontroller*, в котором изначально происходит регистрация принятых данных, а также их обработка и проверка. После того как прошла их обработка и проверка, методы класса *Master microcontroller* передают данные в терморегулятор, расположенный в классе *Control board*.

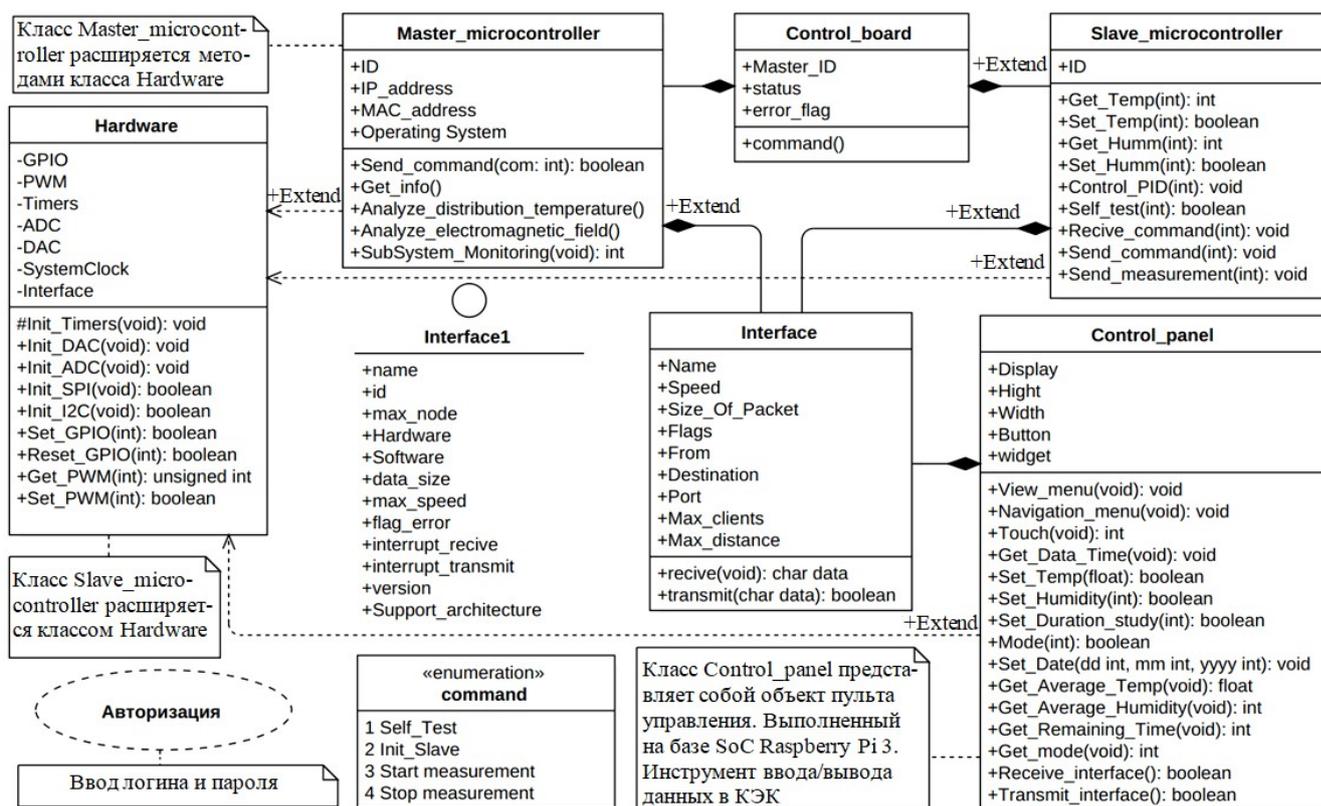


Рисунок 2.6 – UML-диаграмма классов ПО климатической подсистемы

В процессе проектирования ПО КЭК число диаграмм классов может быть значительным. Так, на рисунке 2.6 представлена только основная часть ПО КЭК, в которой не учитывается специализированное ПО оператора КЭК, а также ПО автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора для работы с КЭК на ПК.

2.5 Структура связей компонентов климатической подсистемы

Основываясь на диаграммах прецедентов и классов, разработана UML-диаграмма компонентов КЭК (рисунок 2.7). Диаграмма описывает особенности физического представления климатической подсистемы КЭК позволяет максимально точно определить её архитектуру, установить зависимости между программными компонентами: исходный, бинарный и исполняемый коды, внешние библиотеки, стороннее ПО, аппаратные (I^2C , USART, Ethernet) и программные (API, сокет, протоколы) интерфейсы передачи данных.

Диаграмма компонентов позволяет оценить масштабы проектируемой системы, выделить основные компоненты и способы их объединения, в частности, согласовать интерфейсы между пакетами и компонентами, а также их зависимости. Основными узлами (*node*) диаграммы компонентов являются *персональный компьютер*, *пульт управления*, *Master* и *терморегулятор*. К узлу *персональный компьютер* относится компонент *АРМ оператора*, который включает такие элементы, как среда разработки *Qt framework* и *внешние библиотеки*, используемые в процессе разработки ПО.

В узел *пульт управления* входят компоненты *ЖК-дисплей*, *сенсорная панель*, *ОСРВ mRTOS*. В совокупности они образуют законченное устройство пульта управления КЭК. В состав компонента *АРМ оператора* входят *внешние библиотеки* и *Qt framework*.

Компонент *ОС Linux Yocto* представляет собой встраиваемую операционную систему (ОС), функционирующую в СнК. В состав ОС входят компоненты *Qt framework* для разработки графического приложения пульта управления КЭК. С компонентами *ЖК-дисплей* и *сенсорная панель* связь осуществляется по интерфейсам *ITouch* и *ILCD* соответственно.

Компонент *ОСРВ группы МК* представляет собой группу МК в составе узла *терморегулятор*. Управление МК осуществляется посредством *ОСРВ mRTOS*, которая имеет интерфейсы I^2C и *PWM* для работы с датчиками тока, температуры и влажности воздуха. Управление климатической подсистемой в КЭК осуществляется компонентами *ПИД-регулятор* и *синхронизация МК*. В узел *терморегулятор* входит компонент *вспомогательная система*, в задачу которого входит контроль температуры (*IIWire*) отсека блоков питания КЭК, управление охлаждением (*ICooler*) и управление 4 двигателями, выполняющими функцию открытия/закрытия двери КЭК (*IPWM*).

Компонент *система диагностики* выполняет проверку корректности работы элементов КЭК в фоновом режиме работы. При обнаружении отклонения контролируемых параметров от установленной нормы система проводит анализ для классификации степени угрозы сбою. В случае если отклонение незначительно и не приведёт к критическому сбою работы КЭК, то система исправляет ошибку. При этом если система распознает критическую ошибку, то производится запись возникшей ошибки в лог-файл и автоматически прекращается работа КЭК. Данный компонент относится к узлам *ОС Linux Yocto* и *ОСРВ группы МК*, поскольку эти узлы являются наиболее критичными в работе КЭК.

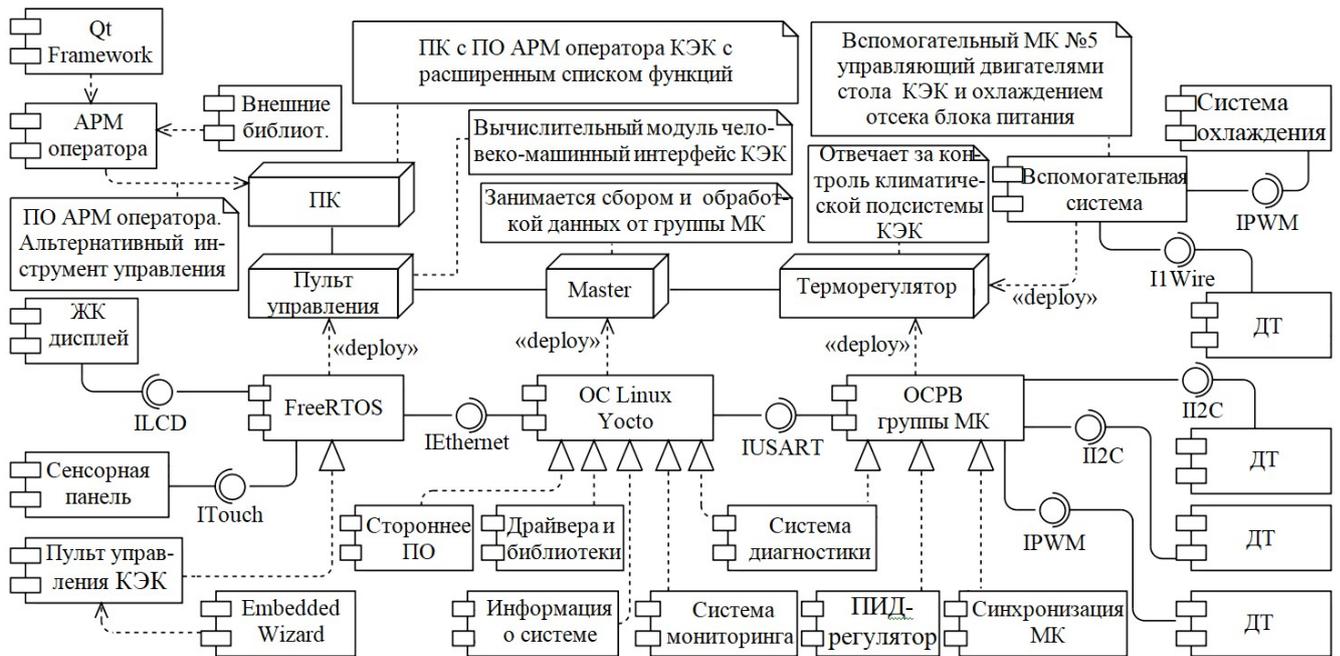


Рисунок 2.7 – UML-диаграмма компонентов КЭК

В результате, диаграмма компонентов дает подробное представление о составе и особенностях функционирования КЭК, а также уточняет интерфейсы связи и зависимости компонентов. Для облегчения процесса разработки и приведения программного кода к единому стандарту, используя шаблоны проектирования, можно избежать большинства распространенных ошибок (логические ошибки, ошибки совместимости, ошибки интеграции и представления данных в КЭК) при разработке ПО.

2.6 Основные результаты раздела

Выполнена функциональная декомпозиция КЭК и разработана архитектура её ПО согласно правилам унифицированного языка моделирования UML. Разработана структурно-функциональная модель системы управления процессом контроля и регулирования температуры поверхности ТЕМ-камеры, позволяющая выделить связи между внутренними компонентами и их ограничения, а также выработать требования к функциональной аппаратной и программной частям КЭК.

Предложена оригинальная объектно-ориентированная модель АСУ температурой поверхности ТЕМ-камеры. Разработаны UML-диаграммы прецедентов, деятельности, классов и компонентов, позволяющие представить КЭК с позиции инженера, архитектора ПО, разработчика, руководителя, менеджера проекта.

Разработанная диаграмма компонентов предоставляет подробное описание устройства и функционирования КЭК, уточняет интерфейсы связи и зависимости компонентов. С целью облегчения процесса разработки и приведения программного кода к единому стандарту

использованы шаблоны проектирования, позволяющие избежать ошибок в процессе разработки ПО.

Подробное описание деталей UML-диаграмм может быть использовано при составлении аппаратной и программной документации КЭЖ для контроля, управления и диагностики КЭЖ.

3 Способ и методы синхронизации разнотипных вычислительных устройств и многофазного управления группами термоэлектрических преобразователей

В данном разделе представлены метод синхронизации группы разнотипных ВУ (МК, СнК, ПЛИС и др.) посредством внешнего тактового генератора (ВТГ). На основе метода предложен способ выполнения общей работы синхронизируемыми устройствами, вне зависимости от их характеристик (тактовая частота ядра, размер памяти и др.) [28, 78, 31]. Разработаны алгоритм, способ и методы на их основе многофазного управления группами ТЭП для терморегулирования поверхности ТЕМ-камеры, входящей в состав КЭК [79].

3.1 Метод синхронизации работы группы микроконтроллеров

Разработана система синхронизации МК терморегулятора (рисунок 3.1) [80]. Её основным отличием является использование ВТГ. В общем случае ВТГ реализован в виде микросхемы часов реального времени (ЧРВ).

Принцип работы основан на формировании синхроимпульсов для группы МК от ЧРВ. В случае если тактовая частота одного из группы МК отличается, то это не влияет на результат работы группы МК, поскольку каждый МК выполняет собственный подсчет принятых синхроимпульсов от ЧРВ. Например, если один МК работает на частоте 8 МГц, а другой МК на частоте 16 МГц, то срабатывает прерывание за один период времени. При этом значение счетчика для первого МК должно быть вдвое меньше чем у второго, что позволяет настроить определенный период срабатывания прерывания в группе МК.

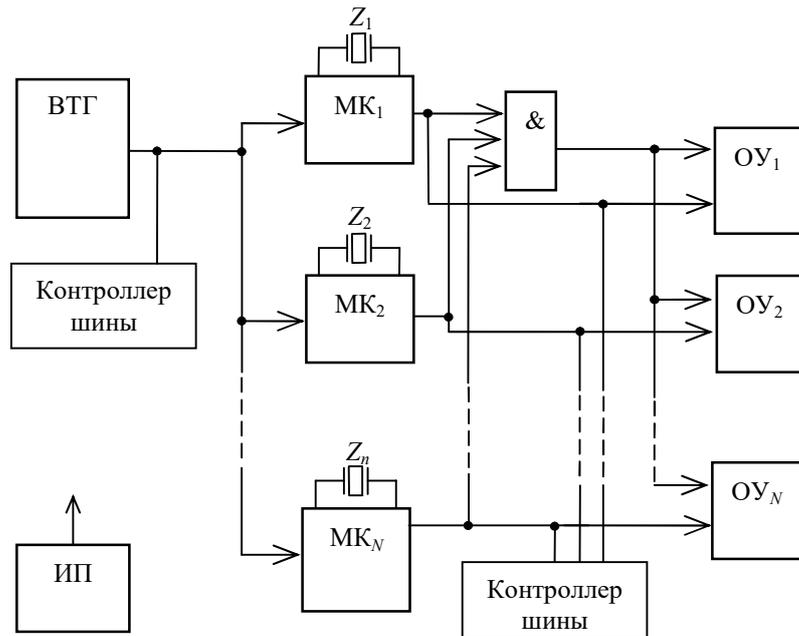


Рисунок 3.1 – Общая схема синхронизации группы МК

При достижении определенного значения счетчика подсчета импульсов (определяющего длительность периода) начинается выполнение «полезной работы». Однако сигнал подтверждения от логического элемента «И» поступит на ОУ только после того, как будут получены сигналы готовности от всех МК, принадлежащих группе. Синхроимпульсы поступают в МК от прецизионной интегральной схемы (ИС) ЧРВ. Например, от ИС ЧРВ DS3231, которая представляет собой часовой термокомпенсированный кварцевый генератор, настроенный на частоту 32,768 кГц, управляемый по интерфейсу I²C.

Разработанная система синхронизации применена в работе КЭК [21, 81, 82] для эффективного управления температурой поверхности ТЕМ-камеры. Управляющие ШИМ сигналы рассчитываются четырьмя МК (ATmega2560) на плате терморегулятора, что позволяет задавать температуру каждой стороны ТЕМ-камеры посредством множества ДТ и обеспечивать своевременные переключения пяти фаз питания 60 ТЭП [83]. Структурная схема платы терморегулятора (рисунок 3.2) состоит из 4 МК ATmega2560, ТЭП, ДТ, реверсивных преобразователей (РП) и аппаратно-программных средств синхронизации (ЧРВ, логический элемент «И»).

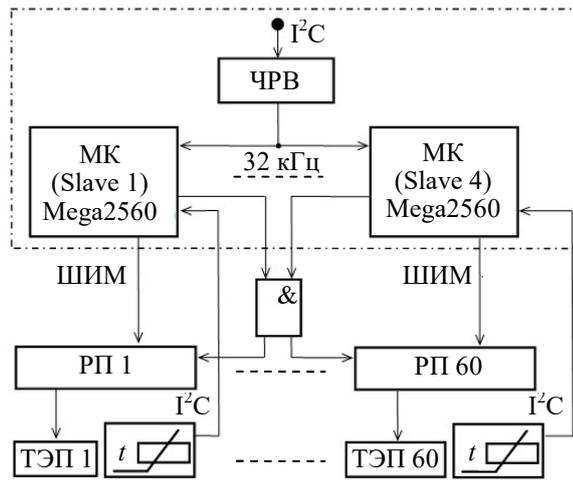


Рисунок 3.2 – Структурная схема синхронизации МК в терморегуляторе КЭК

Проверка работы синхронизации группы МК выполнена в среде моделирования MATLAB Simulink. Построена модель (рисунок 3.3) схемы синхронизации терморегулятора и выполнено её моделирование (рисунок 3.4).

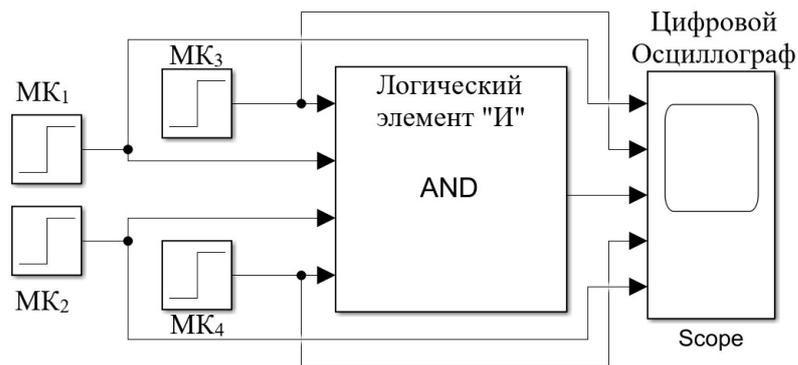


Рисунок 3.3 – Модель синхронизации 4 МК в среде моделирования MATLAB Simulink

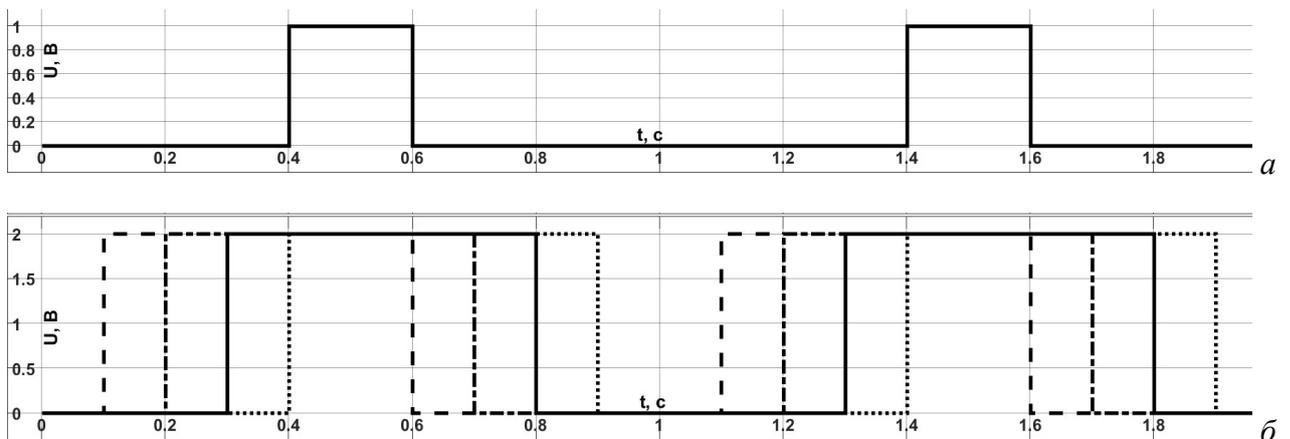


Рисунок 3.4 – Результат моделирования по модели из рисунка 3.3: работы логического элемента «И» (а) и синхронной работы 4 ШИМ каналов (б)

Из рисунка 3.4 видно, что длительность каждого сигнала ШИМ составляет 0,5 с, и зависит от его конфигурации (частоты, скважности, времени между первым и последним импульсами), что подтверждает синхронизацию группы МК при достижении условий для общей работы.

3.2 Способ синхронизации группы микроконтроллеров

На основе метода из п. 3.1 синхронизации разработан способ синхронизации, заключающийся в следующем. Каждый n -й МК работает на собственной частоте $f_{МКn}$, заданной внутренним или внешним тактовым генератором от внутреннего или внешнего кварцевого резонатора (Z_n). Частота $f_{ВТГ}$ задается из условия $f_{ВТГ} < f_{МКn}$, т.к. МК должен подсчитывать число сигналов синхронизации от ВТГ (рисунок 3.5). На выходе ВТГ, в качестве которого используется микросхема ЧРВ, устанавливается заданная частота прямоугольных (тактовых) импульсов $f_{ВТГ}$, которые поступают на один из входов порта каждого МК. При этом вход МК должен поддерживать обработку внешних прерываний, т.к. функция обработки внешних прерываний ведет подсчет сигналов синхронизации ($S_{СИН}$). В каждом МК реализован счетчик $S_{СИН}$. Как только $S_{СИН}$ достигает заданного значения, установленного ранее, происходит вызов внешнего прерывания. В результате, все МК ведут один подсчет импульсов от ВТГ. При этом значения счетчиков $S_{СИН}$, синхронизируемых МК, будут равны.

При срабатывании внешнего прерывания МК вызывается функция, соответствующая данному прерыванию и выполняющая увеличение счетчика принятых сигналов $S_{СИН}$ от ВТГ в памяти МК. В результате, происходит подсчет принятых сигналов синхронизации от ВТГ каждым МК в группе. Как только переменная счетчика в памяти МК, отвечающая за подсчет сигналов синхронизации (рисунок 3.6), достигнет заданного значения, срабатывает отвечающее за начало синхронной работы внутреннее прерывание МК, которое сбрасывает счетчики всех других МК синхронизируемой группы ($S_{МК1} - S_{МК4}$).

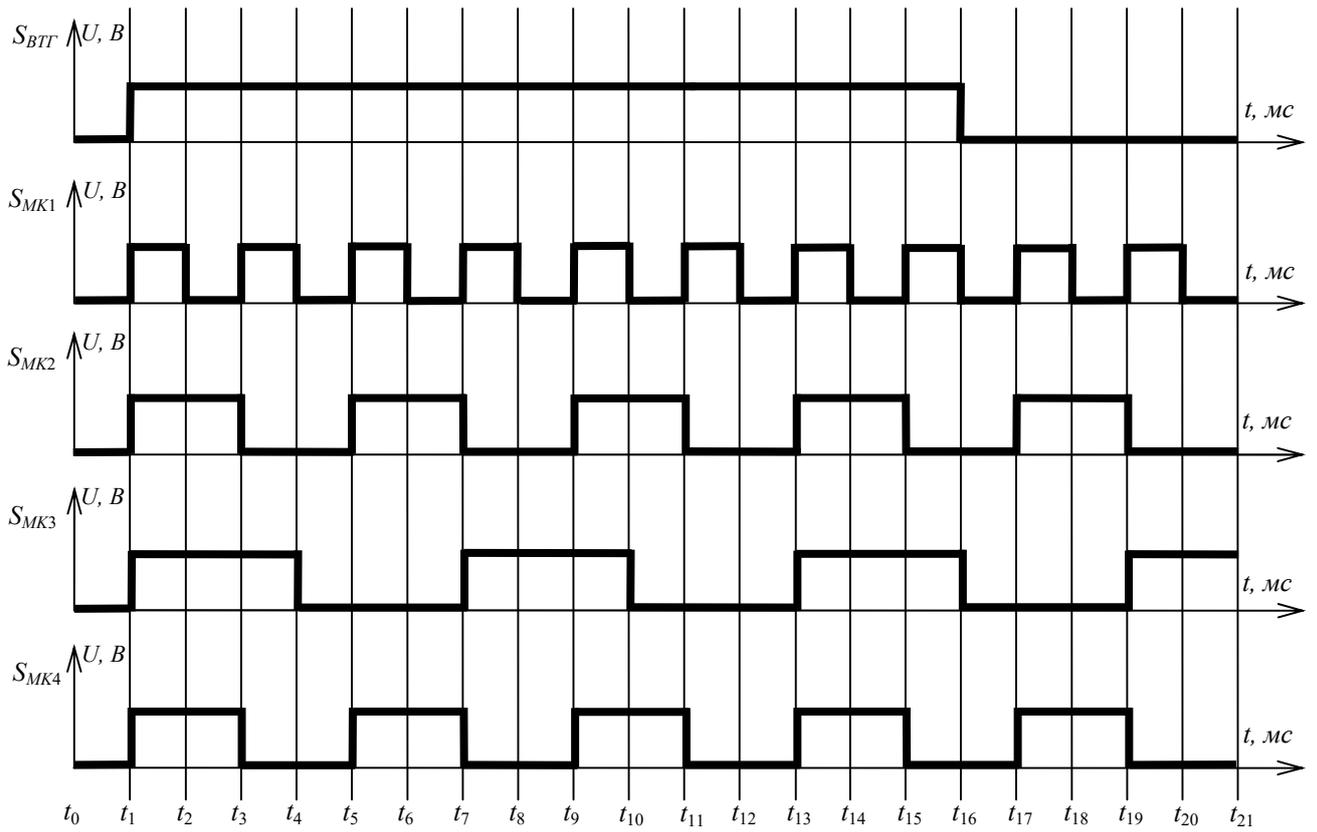
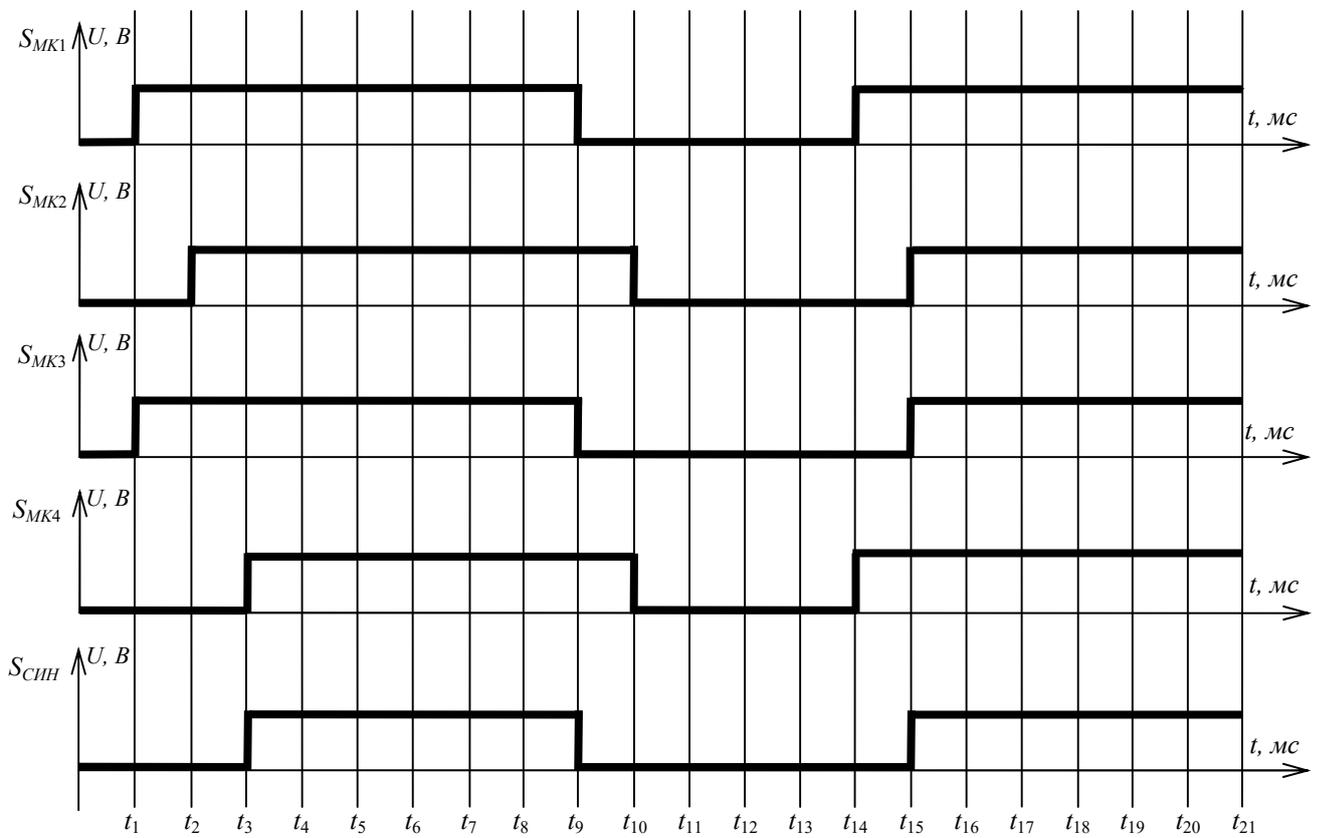


Рисунок 3.5 – Демонстрация подсчета сигналов синхронизации группой МК

Рисунок 3.6 – Временная диаграмма тактовых импульсов ВТГ S_{BTT} и четырех МК (S_{MK1} – S_{MK4})

Событие $S_{\text{син}}$ в момент времени t_3 означает, что все МК готовы к синхронной работе, поскольку в данный момент времени поступил последний сигнал синхронной работы от $S_{\text{МК4}}$. При этом последовательно выполняются следующие команды: обнуление счетчика СМК и запуск счетчика синхронной работы группы МК с продолжительностью момента времени с t_3 по t_9 . Счетчик синхронной работы может быть реализован аппаратным таймером МК либо программно в памяти МК. В момент (t_9), когда хотя бы один МК из группы завершает свою работу, происходит окончание синхронной работы (рассинхронизация группы МК): выход из функции синхронной работы группы МК; сброс значения счетчика периода синхронной работы; переход к подсчету сигналов синхронизации. Так, из рисунка 3.6 видно, что $S_{\text{МК1}}$ и $S_{\text{МК3}}$ начали и завершили работу одновременно, в то время как другие МК еще продолжали выполнять работу. Учитывая, что все МК могут работать на разных системных частотах, а подсчет сигналов синхронизации осуществляется каждым МК, начало синхронной работы для каждого МК может отличаться на период времени (t_s), которым является промежуток времени между готовностью первого и последнего МК в группе. Программная реализация предложенного способа синхронизации также может работать по схеме Master-Slave (рисунок 3.7а). Схема подразумевает присутствие в системе ведущего устройства, в задачу которого входит контроль и управление процессом синхронизации (включить/выключить сигнал синхронизации ВТГ и изменить частоту генерации сигнала синхронизации ВТГ, выполнять программный и/или аппаратный сброс синхронизируемых МК и т.д.). Перечисленные операции выполняются за счет прямого обращения Master к ВТГ посредством интерфейса передачи данных, используя вывод CMD (рисунок 3.7а). В результате, использование схемы синхронизации Master-Slave предоставляет дополнительные инструменты, позволяющие гибко настраивать синхронизацию.

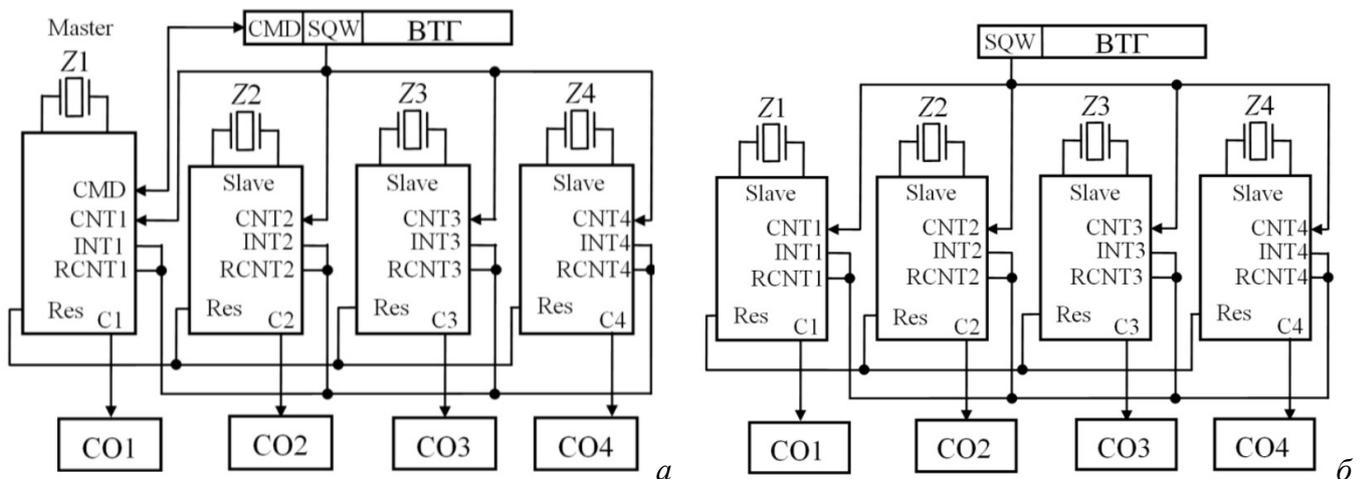


Рисунок 3.7 – Структурные схемы устройства синхронизации МК:

Master-Slave (а) и Slave-Slave (б)

Схема Slave-Slave (рисунок 3.7б) предполагает отсутствие ведущего устройства. В данном случае все синхронизируемые МК в равной степени принимают участие при выполнении общей работы. Настройка ВТГ осуществляется перед началом работы. Каждый МК принимает сигнал синхронизации, поступающий на выводы МК CNT_n от вывода SQW ВТГ. Все МК ведут подсчет принятых сигналов, и, как только значение счетчика достигнет заданного числа, вывод $RCNT_n$ инвертирует логическое состояние сигнала. Данный вывод изменяет свой логический уровень тем самым, генерируя внешнее прерывание на выводе INT_n у всех синхронизируемых МК. Функция обработки внешнего прерывания выполняет сброс счетчика сигналов синхронизации. Тогда первый МК, у которого счетчик синхросигналов достигает заданного числа, вызывает прерывание INT_n у всех МК для сброса счетчика CNT_n . Это позволяет избежать накопления ошибки подсчета сигналов синхронизации каждым МК. В случае возникновения аппаратного или программного сбоя в одном или нескольких МК, все они способны повторно синхронизироваться за счет внешнего прерывания. Возможен аппаратный сброс всех МК. Так, при срабатывании сброса (*Reset*) в одном МК, все остальные МК синхронизируемой группы перезагружаются. Данная опция применима в случае возникновения программного сбоя в одном из МК. В случае возникновения аппаратного сбоя МК, в зависимости от причины (характера) сбоя, МК может самостоятельно выполнить сброс (*Reset*). Если этого не произойдет, то ведущий МК (Master) выполняет аппаратный сброс всех синхронизируемых МК. Поскольку все МК имеют линию (шину) сброса (*Res*), то при срабатывании перезагрузки (*Reset*) у одного МК, остальные МК в группе также выполняют операцию сброса (*Reset*). На выводах C_n МК генерируются сигналы ШИМ, скважность которых каждый МК регулирует самостоятельно.

3.3 Способ управления электропитанием распределенных по поверхности ТЕМ-камеры термоэлектрических преобразователей

В соответствие с размерами ТЭП ($40 \times 40 \text{ мм}^2$), на одной из четырёх сторон каждой пирамидальной части ТЕМ-камеры с высотой испытуемого объекта 20 мм [83], возможно разместить по одному ТЭП (*A* и *F*), в центральной прямоугольной части 4 ТЭП (*B-E*) (рисунок 3.8). При одновременном включении всех ТЭП с одинаковым уровнем мощности достичь равномерного нагрева поверхности ТЕМ-камеры не удастся, поскольку на каждый ТЭП приходится различная площадь поверхности стенок ТЕМ-камеры. Кроме того, и на каждую группу ТЭП, расположенных на пирамидальных и центральной частях, приходится различные объёмы внутри ТЕМ-камеры, с общим максимальным объёмом $3,5 \text{ дм}^3$ [83]. В результате, для равномерного нагрева/охлаждения всей поверхности ТЕМ-камеры и её внутреннего объёма, надо рассчитывать управляющий сигнал ШИМ для каждого ТЭП (*A-F*) в отдельности, исходя из эффективности терморегуляции частей поверхности, находящихся под ТЭП на

пирамидальных и прямоугольных частях камеры. Поскольку классический ПИД-регулятор рассчитывает сигнал управления только одного ТЭП, для управления группой ТЭП и контроля температуры поверхности ТЕМ-камеры, разработан алгоритм распределенной системы регулирования (управления) электропитания ТЭП, учитывающий обратные связи от ДТ.

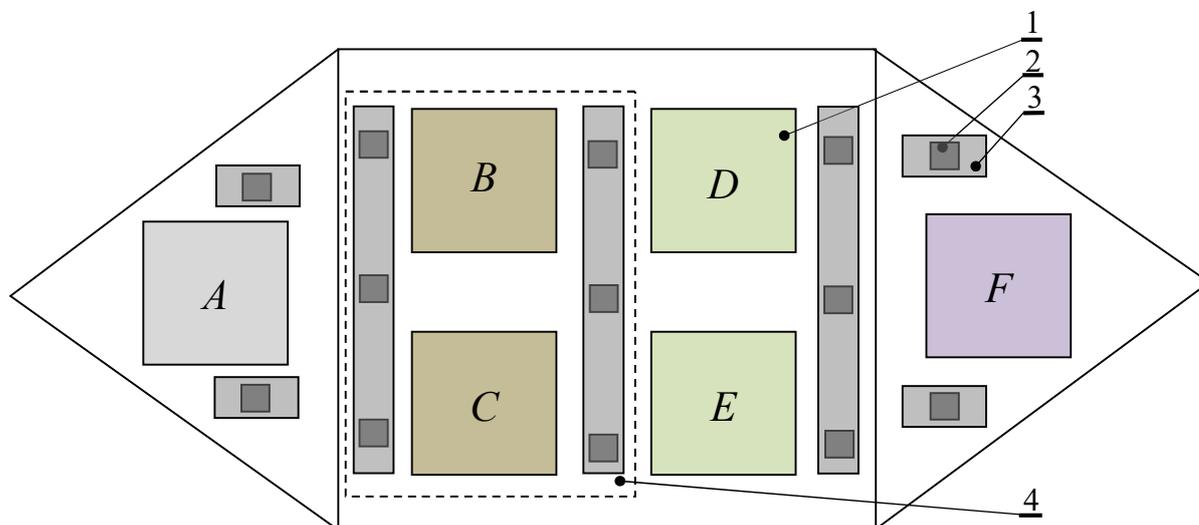


Рисунок 3.8 – Схема размещения ТЭП и ДТ на поверхности ТЕМ-камеры:

1 – ТЭП, 2 – ДТ, 3 – ПП ДТ, 4 – группа ТЭП в момент работы одной фазы

Разработанный алгоритм и операции, участвующие в процессе работы распределенной системы регулирования (рисунок 3.9), позволяют контролировать температуру поверхности ТЕМ-камеры [84]. Ядром алгоритма является АСУ с обратной связью в виде программной реализации функций ПИД-регулятора, в котором происходит расчет коэффициента заполнения (скважности) сигнала ШИМ, управляющего ТЭП, через РП. На первом шаге алгоритм выполняются: инициализация программных структур; загрузка данных из энергонезависимой памяти, в частности, коэффициентов ПИД-регулятора, счетчиков, констант; инициализацию ДТ. На втором шаге происходят опрос ДТ и запись результата в массив *temp_read*. Далее блок ПИД-регулятора обрабатывает массив данных о температуре и заполняет массив *PID_result*, содержащий *Sig* «коэффициент» сигнала управления ТЭП. После того как расчеты в блоке ПИД-регулятора выполнены, происходит подготовка к началу работы в режиме многофазности регулирования температуры поверхности ТЕМ-камеры посредством группы ТЭП, а именно: настройка и распределение ТЭП в группы (число групп соответствует количеству фаз), загрузка параметров работы многофазности, определяющих длительность работы каждой фазы, порядок работы фаз, условия начала и окончания работы фазы питания. Весь процесс работы климатического регулирования ТЕМ-камеры отслеживается и контролируется. Состояние системы отслеживается с целью выявления ошибок и сбоев, которые оказывают влияние на результаты измерений, а в критичном случае могут привести к возникновению аварийной

ситуации. В случае регистрации ошибки, в зависимости от её классификации, принимается решение о прекращении работы климатической подсистемы КЭК, либо (если это незначительная ошибка, возникшая единожды за все время работы) работа подсистемы продолжается. При этом информация об этом инциденте демонстрируется оператору.

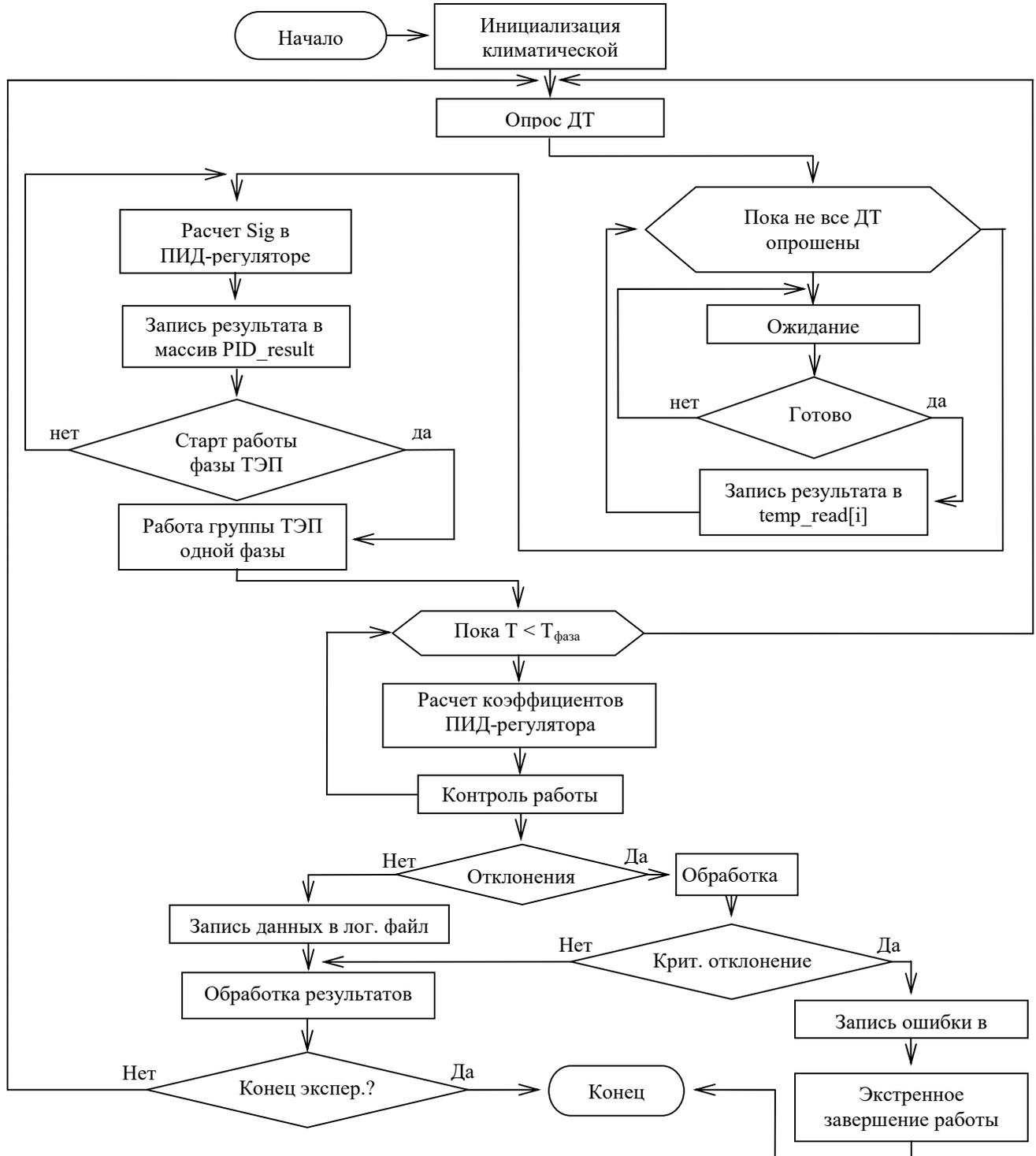


Рисунок 3.9 – Алгоритм контроля температуры климатической подсистемой КЭК

(* – блоки распределенной системы регулирования)

На основе (1.2)–(1.12) разработан алгоритм (рисунок 3.10), позволяющий оценить тепловое рассеяние по поверхности прямоугольной пластины, имитирующей одну из стенок ТЕМ-камеры. Алгоритм позволяет вычислить температурное рассеяние 4 ТЭП, расположенных на одной стороне ТЕМ-камеры, в однофазном и многофазном режимах работы ТЭП. В результате, можно промоделировать включение ТЭП в разные моменты времени и оценить их среднюю выделяемую электрическую мощность. Работа алгоритма (рисунок 3.10) заключается в следующем. Изначально происходит «Инициализация параметров», где задаются глобальные параметры, такие как начальная температура, размер и теплопроводность пластины, количество, размеры и координаты нагревателей, а также температура каждого нагревателя. В программе предусмотрен режим отображения новых и полученных ранее результатов. При выборе, получение новых результатов, создается сетка и проводится выбор однофазного или многофазного режима работы. После выбора режима работы нагревателей, решается краевая задача методом конечных разностей по (1.2)–(1.12). Контур многофазного режима работы отображён пунктирной линией, а однофазного – сплошной.

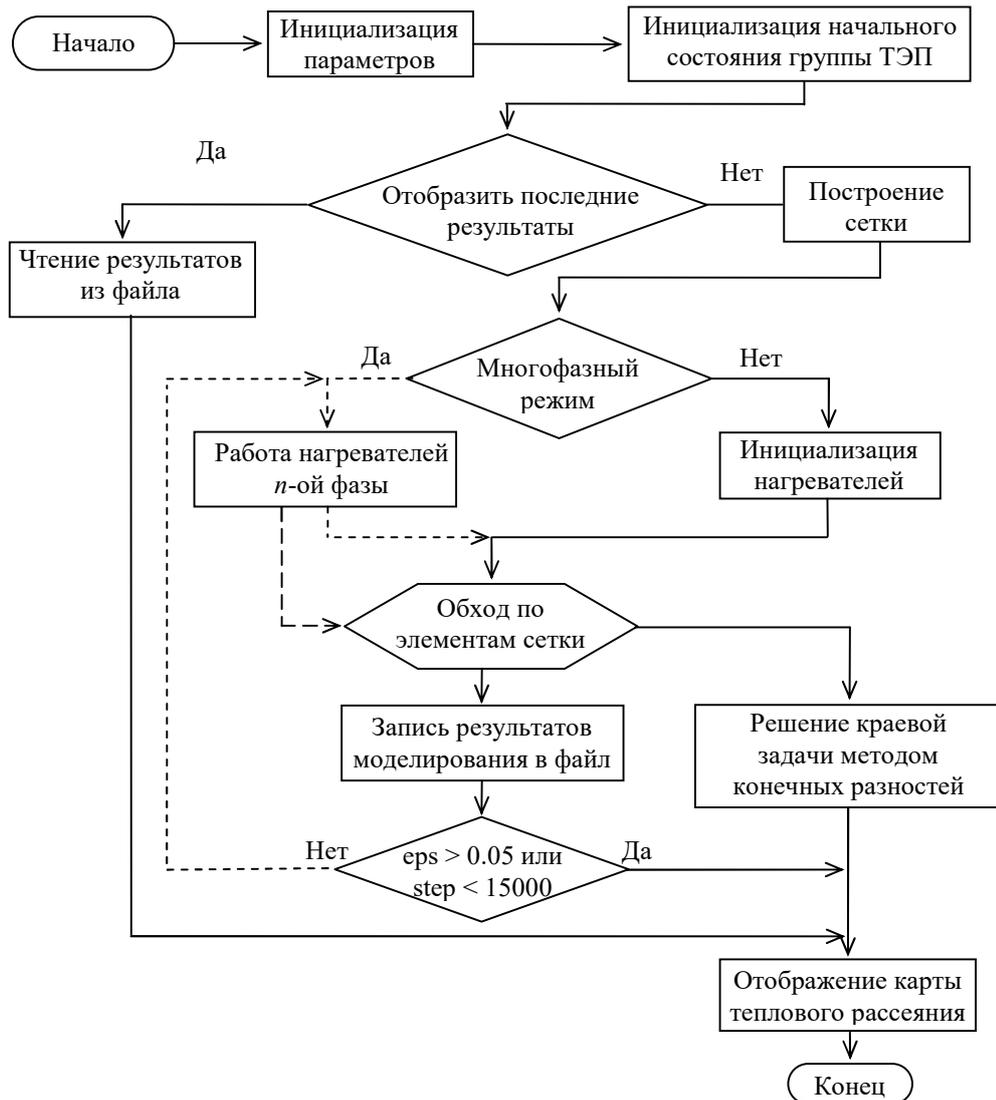


Рисунок 3.10 – Алгоритм вычисления теплового рассеяния пластины с использованием многофазного (----) и однофазного (—) режимов работы

При выборе многофазного режима нагрева пластины происходит поочередная работа каждого нагревателя с длительностью воздействия, определенной на этапе «Инициализации параметров». Блок алгоритма «Работа нагревателей n -й фазы» выполняет операцию, имитирующую нагрев при текущей фазе электропитания нагревателя по отношению к нагреву при вычисленной фазе в группе на предыдущей итерации работы блока «Решение краевой задачи». После окончания вычислений, полученные результаты записываются в файл для последующей обработки. После обработки происходит отображение карты теплового рассеяния пластины. Используя данный алгоритм, создано ПО, позволяющее выполнить моделирование нагрева прямоугольной пластины несколькими нагревателями в однофазном и многофазном режимах работы.

Результаты моделирование при помощи разработанного ПО представлены на рисунке 3.11. Результат нагрева медной пластины от 4 ТЭП при однофазном и 4-фазном режимах работы

приведены на рисунке 3.11. При моделировании в однофазном режиме число итераций составило 156, а при многофазном 15000.

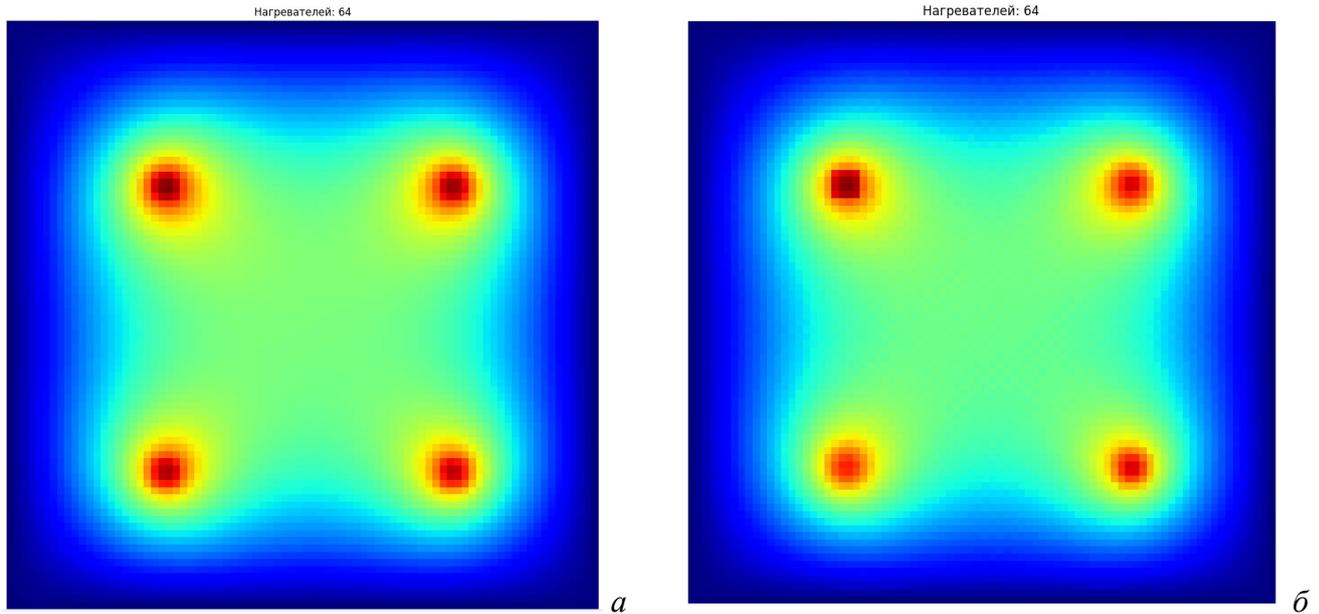


Рисунок 3.11 – Результаты моделирования в однофазном (а) и 4-фазном (б) режимах работы нагревателей

Из результатов имитационного моделирования видно, что при работе 4 ТЭП в однофазном режиме происходит более высокая скорость нагрева пластины по сравнению с многофазным режимом. При этом, в многофазном режиме обеспечивается наилучшее удержание и контроль температуры поверхности, а также обеспечивается равномерный нагрев пластины с разностью температур (Δt), не превышающей $\pm 0,5^\circ\text{C}$. В результате, разработанное ПО может быть использовано при расчёте градиента температур поверхности ТЕМ-камеры, в зависимости от числа нагревателей, их мощностей, размеров и координат расположения, а также с возможностью выбора однофазного или многофазного режимов работы. Данное ПО также может быть использовано для визуализации процесса нагрева/охлаждения поверхности ТЕМ-камеры с отображением градиента температур, в зависимости от данных, полученных от каждого ДТ в режиме реального времени.

3.4 Основные результаты раздела

Разработан способ синхронизации, позволяющий выполнять общую задачу группой МК и/или СнК, не связанных между собой общим интерфейсом связи. Способ синхронизации МК позволяет реализовать контроль длительности периода синхронной работы группы МК, выполняя общую работу в разных режимах: синхронно, асинхронно и попеременно. Результат удается достичь за счет использования ВТГ каждым МК, подсчета каждым МК сигналов синхронизации (синхроимпульсов) от ВТГ и настройки таймеров/счетчиков МК. Также данный

способ позволяет выполнять общую задачу группой МК, используя минимальные аппаратные средства, и применим к готовым устройствам в виде отдельных модулей. Универсальность способа заключается в том, что допускается синхронизировать работу как МК, так и СнК различных производителей и тем самым добиться гибкой настройки синхронизации. Использование предложенного способа синхронизации в работе над терморегулятором КЭК позволило добиться синхронного управления ТЭП посредством сигналов ШИМ, с заданным временем периода синхронной работы. Новизна способа синхронизации группы разнотипных ВУ (МК, ПЛИС, СнК, SoM) заключается в следующем:

1. Разработан алгоритм синхронизации, отличающийся возможностью синхронизации разнотипных ВУ без необходимости внедрения в РЭС дополнительных аппаратных средств управления и контроля процесса работы синхронизации.

2. Применение ВТГ в качестве источника сигналов синхронизации группы разнотипных ВУ отличается от известных способов реализации возможностью регулирования частоты импульсов синхронизации.

3. Разработан алгоритм обработки сигналов синхронизации ВУ, отличающийся обработкой внешних аппаратных прерываний.

4. Предложен способ масштабирования синхронизируемой группы ВУ, отличающийся отсутствием необходимости внесения аппаратно-программных изменений в остальные ВУ синхронизируемой группы.

4 Алгоритмы и методы диагностики и тестирования блоков микроконтроллера

В данном разделе представлены результаты разработки алгоритмов и методов диагностики и тестирования внутренних блоков МК [85], а также алгоритмов их восстановления и программной защиты в случае возникновения сбоев в процессе работы МК КЭЖ. Кроме того, разработана служба ОСРВ для тестирования критически важных узлов КЭЖ в режиме многозадачности, позволяющая выполнять их контроль работы в режиме реального времени, за счет реализации обратной связи от ОУ с наивысшим приоритетом [82]. Разработан метод и предложены способы его программной реализации для выявления и исправления ошибок данных в памяти МК на основе аппаратного подсчета контрольной суммы (КС), который позволяет распознавать ошибки в памяти МК [86].

приведены результаты воздействия ЭМИ на ИС в виде МК. Представлены результаты разработки алгоритмов измерений, дополняющие ранее разработанную методику измерения, а также результаты воздействия ЭМИ на отечественный и зарубежный МК в климатически заданной среде. Описаны 2 тестовые программы с различным использованием периферии и конфигурации МК. Разработана методика комбинированных тестов для исследования изменений в вычислительных блоках МК после различных воздействий ЭМИ на МК. Выполнено воздействие ЭМИ на МК при заданном климатическом воздействии.

4.1 Алгоритм измерений устойчивости к импульсному и непрерывному воздействию на электронные компоненты

Разработаны алгоритмы, дополняющие ранее разработанную методику измерения. Используя данные алгоритмы, возможно проведение измерений помехоустойчивости ИС к импульсному и непрерывному воздействию при помощи генератора СКИ, имитатора ЭСР или ВГС.

Алгоритм проведения измерения помехоустойчивости ИС при воздействии генератором СКИ (рисунок 4.2) основан на следующих этапах. Первым этапом при измерении устойчивости к воздействию генератором СКИ (рисунок 4.1а) при помощи ТЕМ-камеры, в соответствии с международным стандартом IEC61000-4-2 [87] является настройка измерительной установки, которая включает сборку и калибровку измерительных устройств. Далее производится размещение ПП с ИС в апертуре ТЕМ-камеры. Вторым этапом является настройка системы мониторинга, используемой для проверки корректности функционирования ИС. Выполняется проверка работоспособности тестовой программы ИС с применением необходимых средств отладки. Третьим этапом является настройка амплитуды и частоты последовательности

импульсов на выходе генератора СКИ. Перед началом измерения проводится повторная проверка работоспособности ИО. После подачи воздействия проводят оценку корректности работы ИС. При выявлении изменений в работе ИС выполняется оценка его деградиционных изменений. Определяются изменения работы тестовых программ путем проверки состояние регистров: выводов общего назначения, сторожевого таймера, частоты тактирования ядра МК и контрольной суммы всей памяти, а также отдельно каждого в ней объекта. Выполняются измерения помехоустойчивости при различных амплитудах СКИ в диапазоне от 700 В до 1000 В, с частотой последовательности импульсов 20 Гц и различной ориентацией ПП относительно апертуры ТЕМ-камеры. При испытаниях на помехоустойчивость к воздействию ЭСР в алгоритме изменяется устройство «генератор СКИ» на «имитатор ЭСР». Проводится настройка его амплитуды и частоты последовательности импульсов, в диапазоне амплитуд от 1 кВ до 10 кВ с частотой последовательности импульсов 20 Гц (рисунок 4.1б).



Рисунок 4.1 – Внешние виды генератора СКИ «FID Technology» (а)
и имитатора ЭСР «ONYX30» (б)

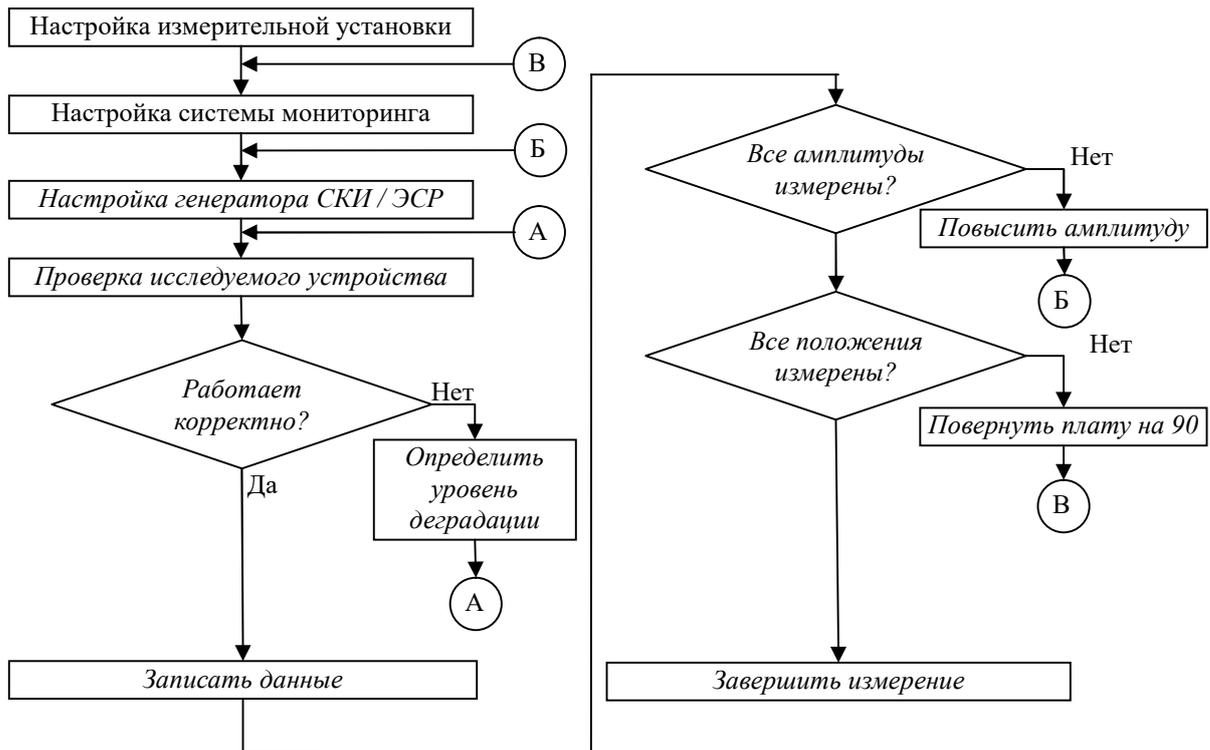


Рисунок 4.2 – Алгоритм измерения помехоустойчивости ИС к СКИ ЭМИ возбуждаемого генератором СКИ или имитатором ЭСР

Алгоритм проведения измерений помехоустойчивости ИС в ТЕМ-камере при воздействии гармоническим сигналом на её вход представлен на рисунке 4.3. Первым этапом измеряется помехоустойчивость при гармоническом воздействии в соответствии с требованиями стандарта [88]. Вторым этапом настраивается система мониторинга для проверки качества функционирования ИС. Выполняется проверка работоспособности тестовой программы с использованием средств отладки ИС. Третьим этапом настраиваются параметры генератора сигналов. Частота сигнала выбирается согласно типу модуляции в заданном диапазоне частот (таблица 4.1). Амплитуда выходного сигнала устанавливается в диапазоне от -20 дБм до $+20$ дБм. Перед началом измерения проводится проверка работоспособности ИС. Далее выполняется настройка модуляции и подведение выходного сигнала на радиочастотный выход. После подачи воздействия выполняется оценка корректности функционирования ИС. В случае выявления изменений в работе ИС выполняется оценка деградационных изменений ИС и ошибки в работе ее тестовой программы. Измерения помехоустойчивости выполняются при различных амплитудах, частотах сигнала и различной ориентации ПП относительно апертуры ТЕМ-камеры.

Таблица 4.1 – Диапазоны частот и режимы генератора

Режим работы генератора	Диапазон частот	
	150 кГц – 800 МГц	800 МГц – 3000 МГц
Непрерывный режим	+	
Амплитудная модуляция	+	–
Импульсная модуляция	–	+

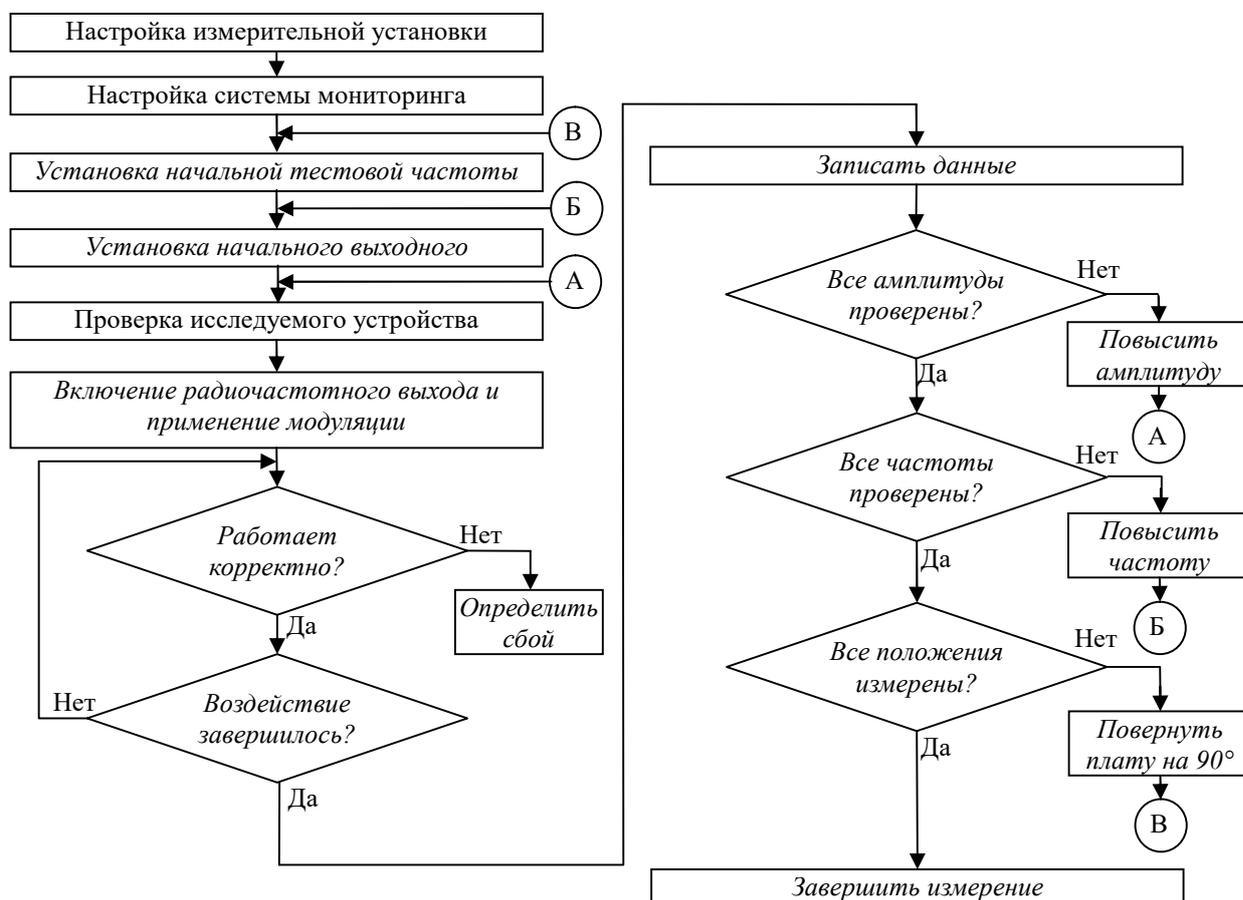


Рисунок 4.3 – Алгоритм измерения помехоустойчивости ИС при гармоническом воздействии

Таким образом, разработаны алгоритмы проведения измерений помехоустойчивости ИС при воздействии СКИ и гармонических ЭМИ.

4.2 Методика измерения помехоустойчивости интегральных схем к воздействию электромагнитного импульса

Разработана методика измерения помехоустойчивости ИС при воздействии ЭМИ на отечественный (K1986BE92QI) и зарубежный (STM32F103C8T6) МК на базе ядра ARM Cortex-M3. Разработаны 2 тестовые программы, задействующие различные функциональные блоки МК.

Выполнено исследование устойчивости ИС при гармоническом воздействии. Гармонический сигнал от внешнего генератора сигналов (ВГС) подавался на вход петлевой

антенны с диаметром проводника 20 мм. Антенна подводилась к исследуемому МК на расстояние 5 мм (рисунок 4.4). Измерения проводились в диапазонах частот из таблицы 4.1. В качестве воздействия выбран АМ сигнал с частотой 72 МГц и амплитудой 11 В (+20 дБм). Процедура измерения помехоустойчивости к воздействию гармонического ЭМИ состоит из 6 этапов: загрузка тестовой программы в МК; запись тестовых данных в флеш-память МК; считывание дампа памяти МК до воздействия ЭМИ, воздействие ЭМИ на МК; считывание дампа памяти МК после воздействия ЭМИ, анализ результатов дампа памяти МК до и после воздействия ЭМИ.

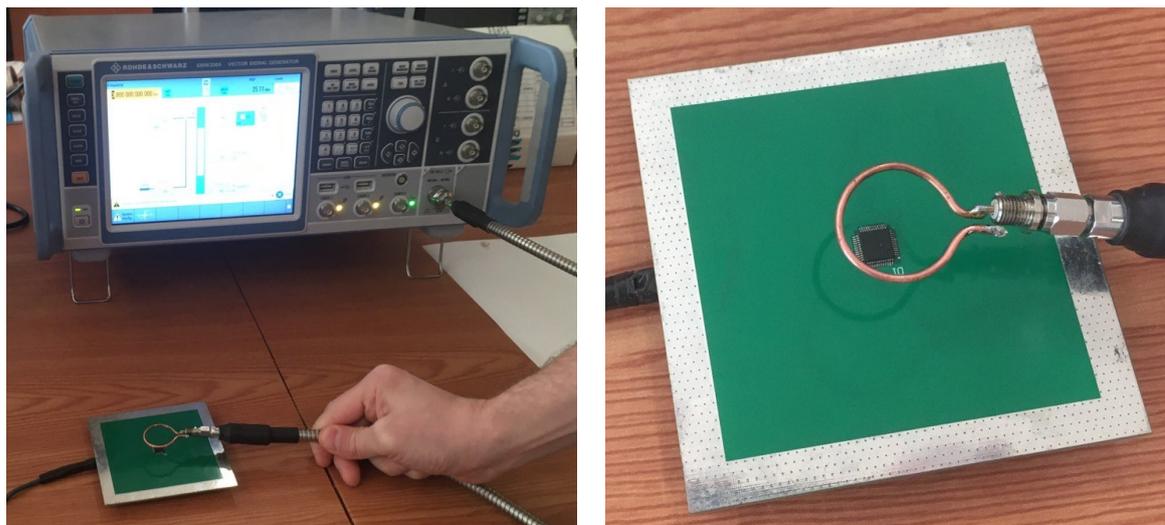


Рисунок 4.4 – Измерение помехоустойчивости ИС при воздействии гармонического ЭМИ

Описание первого теста МК STM32F103C8T6. В качестве основной работы МК выполнялось изменение состояния вывода 13 порта «С» с интервалом 1 с. Системная частота ядра МК настроена на частоту 8 МГц от внутреннего тактового генератора. Запись данных в флеш-память выполнялась с 1 по 64 страницу посредством ПО «STM32 ST Utility» [92]. Данные представляли собой чередующиеся последовательности логических 1 и 0 с интервалом 0x400 байт. Первое изменение в флеш-памяти зафиксировано при воздействии АМ-сигнала с частотой 3,8 ГГц и амплитудой 11 В (20дБм). После воздействия, выгружен дамп флеш-памяти и выполнено сравнение с дампом памяти до воздействия. Результаты анализа представлены на рисунке 4.5. После воздействия на МК, регистры памяти, в которой находились инструкции тестовой программы, полностью изменились (состояние лог. 0). Также выявлено изменение значений, записанных в флеш-память МК (рисунок 4.5в, г). Всего дамп памяти состоял из 65536 байт, 34704 из которых изменили свое состояние, что составляет 52% от общего объёма всей флеш-памяти МК.

Анализ ошибок в программной части осуществлялся с помощью специализированного ПО «STM32CubeProgrammer» для программирования продуктов STM32 [89]. Оно

предоставляет эффективные инструменты для чтения, записи и проверки памяти устройства как через интерфейс отладки (JTAG и SWD), так и через интерфейс загрузчика (UART, USB DFU, I²C, SPI и CAN), а также позволяет изменять и загружать ключи конфигурации.

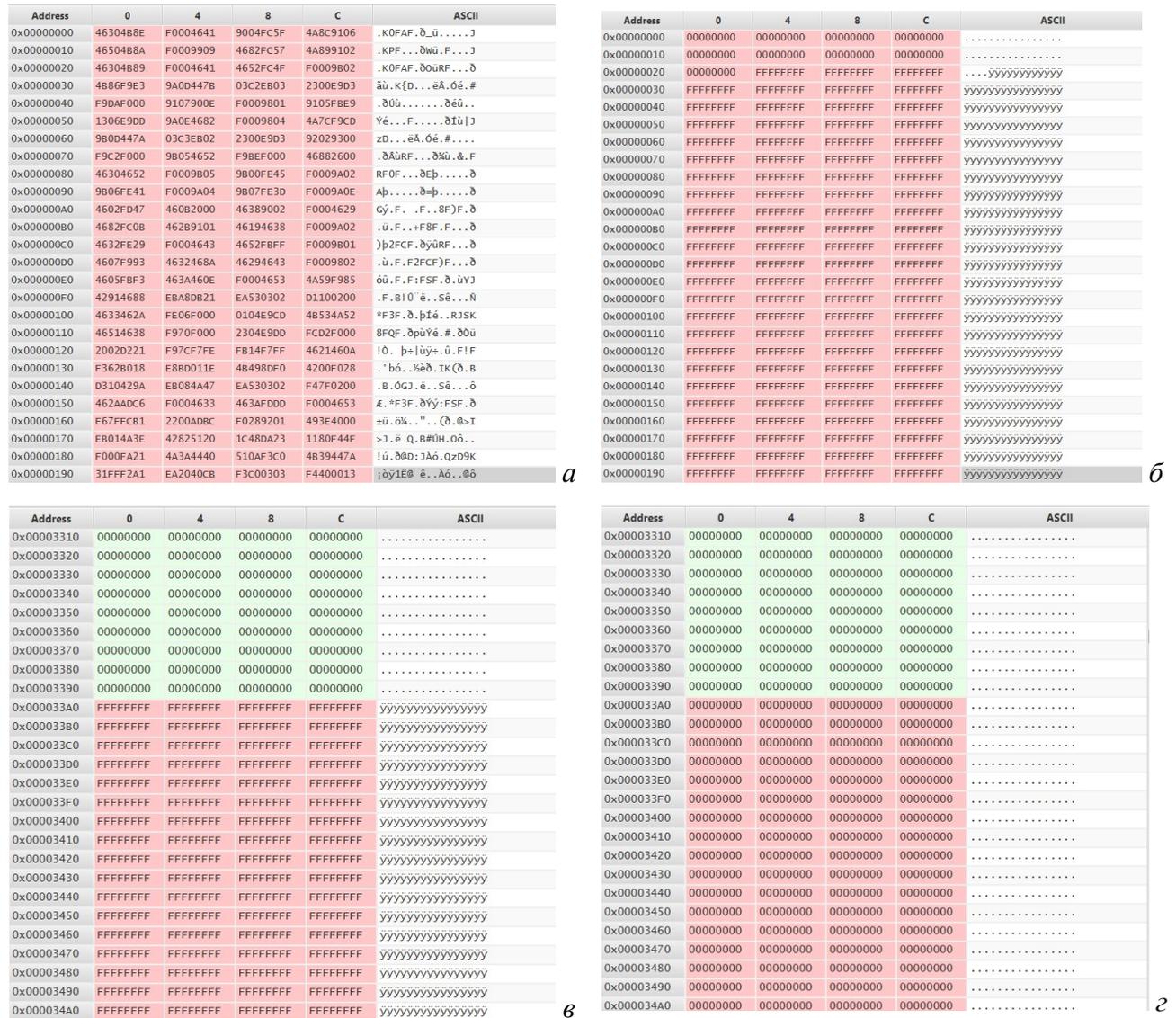


Рисунок 4.5 – Фрагменты адресных пространств флеш-памяти МК STM32F103 до (а, в) и после (б, г) воздействия гармонического ЭМИ от петлевой антенны

Второй тест для МК STM32F103C8T6 происходил при тактировании ядра МК 72 МГц от внутреннего тактового генератора с таймерами 2 (PA6, PA7) и 3 (PB0, PB1), сконфигурированных в режиме генерации сигнала ШИМ с частотой 9 кГц. В качестве тестовых данных на страницы 1–64 флеш-памяти, записан массив символов размером 900 байт. Изменение во флеш-памяти было зафиксировано при воздействии АМ сигнала с частотой 72 МГц и амплитудой 11 В (20 дБм). После воздействия выгружена флеш-память и выполнено сравнение с дампом флеш-памяти до воздействия. Сравнение представлено на рисунке 4.6. Как видно из рисунка 4.6а после воздействия тестовая программа практически не изменилась, так

как изменения которые происходили (рисунке 4.6б), является следствием работы сигнал ШИМ, поскольку значение регистра у таймера постоянно меняется для генерации ШИМ сигнала с частотой 9 кГц. При этом записанный массив данных во флеш-памяти изменился только на 14 странице (рисунок 4.6в, г). При этом остальное адресное пространство не изменялось (рисунок 4.6 д, е). Всего отслеживаемых данных было 64 кБайт из которых 4% изменили свое значение. Следовательно, 4% адресного пространства устройства изменило свое состояние вследствие воздействия ЭМИ.

Таким образом, результаты анализа дампов памяти до и после воздействия внешнего ЭМИ на МК показали эффективность разработанного метода (Приложение А). Представлено описание работы тестовых программ и конфигурация аппаратной части МК. Выявлены различия в дампах памяти до и после воздействия ЭМИ на тестируемые МК, при различных способах обращения к памяти МК. Воздействие ЭМИ на МК STM32F103C8T6 возбуждаемого петлевой антенной сигналом от ВГС с частотой 3,8 ГГц и амплитудой 11 В (20дБм), при тактировании МК от внутреннего тактового генератора с частотой 8 МГц изменило состояние 52% регистров флеш-памяти МК (в процессе работы МК обращение к данным во флеш-памяти МК не выполнялось). Однако, во втором тесте, при аналогичном воздействии на МК с тактированием от внутреннего тактового генератора с частотой 72 МГц, изменения были зафиксированы лишь в 4% от общего объема флеш-памяти. Таким образом, при применении данных тестов необходимо учитывать продолжительность времени и мощности воздействия ЭМИ, что позволит получить более детальное представление об восприимчивости к ЭМИ различных блоков МК.

4.3 Алгоритм тестирования вычислительных блоков микроконтроллера

Разработан метод диагностики (выявления изменений функционирования) МК при совместном климатическом и электромагнитном воздействии и алгоритм тестирования этих блоков, основанный на проверке состояния данных в памяти МК. Тестирование включает проверку портов ввода/вывода, интерфейсов передачи данных (рисунок 4.7).

В тестовой программе системная частота и тактирование блоков периферии МК были неизменными, время нарастания сигнала порта ввода/вывода составляло около 100 нс. Первый анализ результатов проверки данных в памяти МК до и после воздействия ЭМИ в широком диапазоне частот выявил изменения первоначального состояния регистров МК, в особенности участков «основной программы», флеш-памяти и блоков периферии. В процессе тестирования зафиксированы сбои работы таймеров, а также неконтролируемое срабатывание программного перезапуска МК. Поэтому, для установления связей и определения внешнего воздействия на каждый блок МК, требуется выполнение комбинированных тестов, в которые входят программа с тестовой задачей, конфигурация периферии МК и параметры воздействия ЭМИ. Подробные результаты испытаний МК в климатической камере представлены в приложении А.

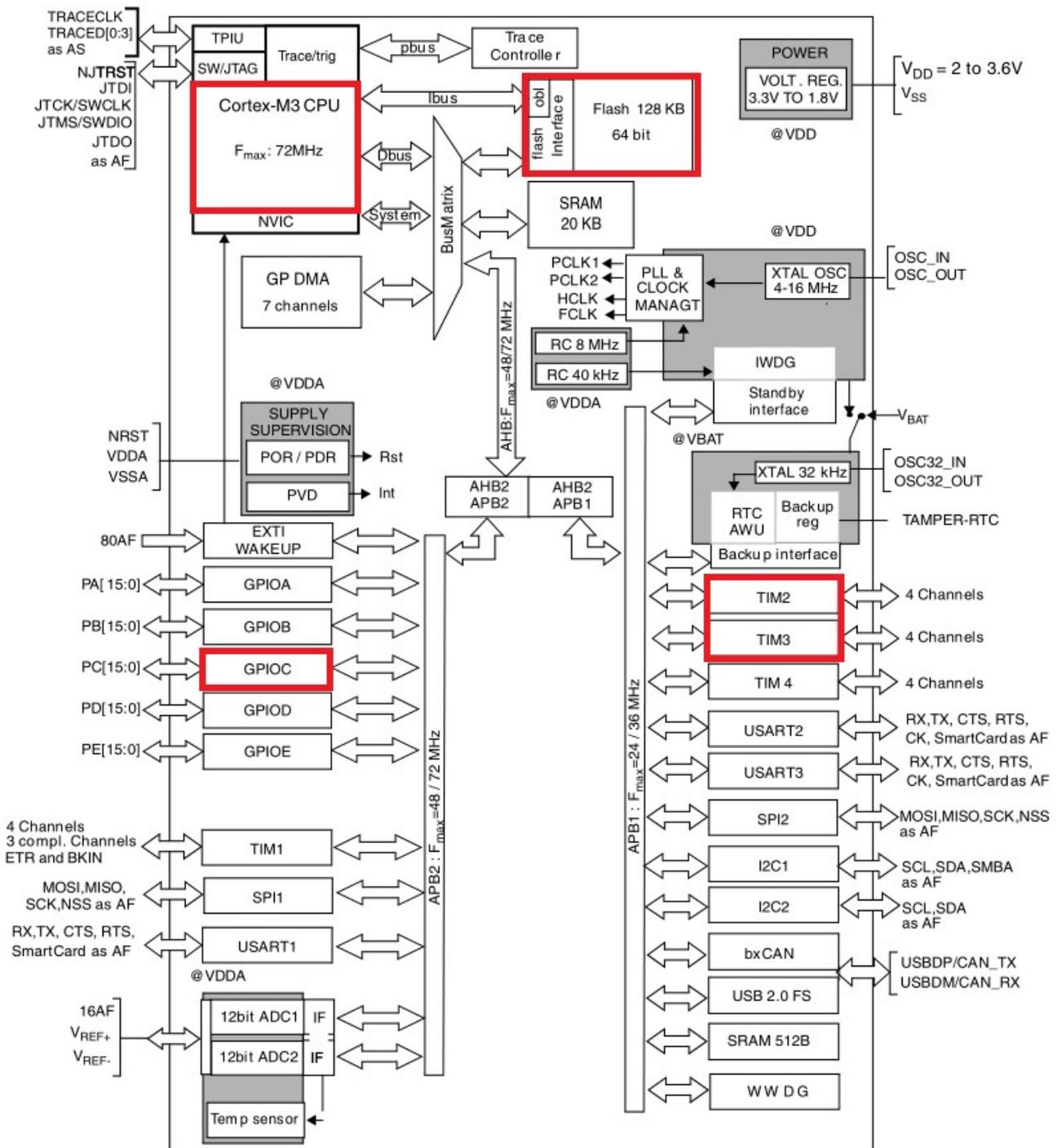


Рисунок 4.7 – Внутренние блоки и регистры МК STM32F103C8E6

Помимо использования различных вариантов конфигурации МК и тестовых задач, следует учитывать климатическое воздействие, которое оказывает влияние на уровни помехоэмиссии и помехоустойчивости МК. Для учёта климатического воздействия разработан универсальный алгоритм проверки работоспособности блоков МК (рисунок 4.8).



Рисунок 4.8 – Универсальный алгоритм проверки работоспособности вычислительных блоков МК

Основной задачей алгоритма является приведение к общему виду комбинаций тестов и обеспечение распознавания изменений данных в памяти МК. На первом шаге «Инициализация МК для комбинированного теста» выполняется конфигурация блоков МК, необходимых для проведения теста. При этом тактирование остальных незадействованных блоков отключается. Затем, посредством отладочного порта (SWD, JTAG), выполняется считывание данных в памяти МК. Далее выполняется отображение индикации, сигнализирующей о готовности МК к началу теста. Поскольку во время проведения теста (внешнего воздействия) от МК отключается всё внешнее оборудование (отладчик, программатор и интерфейсы связи) и отсутствует возможность наблюдать за изменениями в вычислительных процессах в режиме реального времени, на измерительной ПП предусмотрены светодиоды для визуального отображения состояния МК.

После этого МК циклично выполняет основную программу. Во время тестирования выполняется работа блока АЛУ, в котором выполняется вычисление числа π и сравнение полученного значения с эталонным. Поскольку число π является вещественным, то для его записи во флеш-память МК надо выполнить разложение на целочисленные составляющие: мантиссу, экспоненту и знак. Это реализовано двумя способами, отличающимися разницей в длине мантиссы. Значения, полученные первым способом, были записаны в диапазоне адресов флеш-памяти с 0x8007C00 по 0x80013B40, а вторым с 0x80019400 по 0x8001F720 (рисунок 4.9).

Address	0	4	8	C
0x08007C00	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C10	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C20	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C30	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C40	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C50	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C60	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C70	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C80	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF

a

Address	0	4	8	C
0x08019400	00442D1A	FFFFFFFF	000000A8	FFFFFFFF
0x08019410	00442D1A	FFFFFFFF	000000A8	FFFFFFFF
0x08019420	00442D1A	FFFFFFFF	000000A8	FFFFFFFF
0x08019430	00442D1A	FFFFFFFF	000000A8	FFFFFFFF
0x08019440	00442D1A	FFFFFFFF	000000A8	FFFFFFFF
0x08019450	00442D1A	FFFFFFFF	000000A8	FFFFFFFF
0x08019460	00442D1A	FFFFFFFF	000000A8	FFFFFFFF
0x08019470	00442D1A	FFFFFFFF	000000A8	FFFFFFFF
0x08019480	00442D1A	FFFFFFFF	000000A8	FFFFFFFF

б

Рисунок 4.9 – Мантиссы и порядки числа π ,
вычисленные первым (*a*) и вторым (*б*) методами

Для полноты исследования тесты запускались при различной системной частоте МК. Система тактирования МК является сложным инструментом, контролирующим тактирование внутренних систем и каждого блока периферии. Например, для повышения системной частоты ядра МК используется блок фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ). Для контроля большого числа параметров при тестировании разработана структура ПО для автоматизации процесса испытания, обработки и хранения результатов тестов МК (рисунок 4.10). ПО позволяет организовать модульное тестирование блоков МК, учитывая специфику их реализации и функционирования в процессе выполнения тестовой задачи.

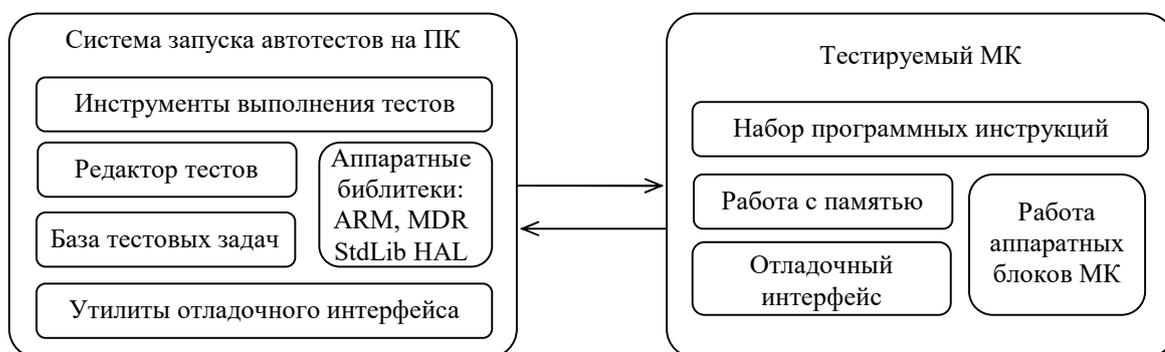


Рисунок 4.10 – Структура ПО для управления процессом тестирования МК

Использование комбинированных тестов в составе ПО реализуется набором методик, описывающих требования к выполнению тестовых задач и критерии оценки результатов. На

основе разработанных алгоритма тестирования блоков МК и методики из п. 1.6 разработан набор задач для выполнения комбинированных тестов МК (таблица 4.2).

Таблица 4.2 – Описания блоков МК и тестовых задач

Блок МК	Тестовая задача
АЛУ (f_{clk})	Вычисление числа π методом Грегори-Лейбница [90].
Таймеры	Работа таймеров №2, 3 в режиме формирования сигналов ШИМ с частотой 9 кГц
Порты ввода/вывода	Работа портов ввода/вывода в режиме чтения входного сигнала в быстром режиме
АЦП	Работа АЦП №1 в режиме обработки внутренних каналов с датчиков температуры и напряжения
УАПП (UART)	Работа УАПП №1 в асинхронном режиме передачи данных

Таким образом, разработаны комбинации тестовых задач при изменении системной частоты МК и различных параметров внешних воздействий. Это позволило сформировать объемную выборку тестов с различными конфигурациями периферии МК (Приложение А).

4.4 Методы и алгоритмы восстановления и программной защиты вычислительных блоков микроконтроллера

Разработаны универсальные методы и алгоритмы быстрого восстановления контекста рабочего процесса ПО МК при возникновении сбоев (таблица 4.3). Непреднамеренные сбросы, сбой счетчика программы (Stack Point) и прерывания являются наиболее распространенными причинами отказов МК. В случае возникновения сбоя, можно использовать внутреннюю ПЗУ или энергонезависимую память (ЭСПЗУ), в качестве эффективного способа хранения параметров рабочего процесса, контекста выполняемых задач МК и восстановления последнего состояния МК до сбоя.

Таблица 4.3 – Методы автоматического восстановления ПО МК

Метод	Преимущество	Недостаток	Реализация
Локальный контроль посредством сторожевого таймера	Управление технологическим процессом критичных последовательных блоков	Необходимость в расчёте точного времени выполнения задачи	Проверка времени выполнения последовательности задач с помощью сторожевого таймера
Определение источников сброса	Быстрое восстановление после сброса вызванного сбоем	Нет	Регистр сброса в ядре МК или данные из ОЗУ для обнаружения различных источников сброса
Сохранение контекста приложения в ОЗУ, ПЗУ или ЭСПЗУ	Сохранение параметров приложения, обеспечение возобновления выполнения критических задач в случае сбоев МК	Необходимость использования ресурсов процессора МК	Хранение параметров/объектов ПО в ОЗУ, ПЗУ или ЭСПЗУ для восстановления последнего состояния (контекста) перед сбоем МК

Запуск самотестирования МК производится на этапе инициализации в качестве первой проверки основных блоков после запуска/сброса МК. Это выполняется путем принудительного перехода вектора сброса к адресу начальной загрузки МК, в котором расположены инструкции

самотестирования. Структура блока тестов (рисунок 4.11) состоит из самотестирования запуска процессора, запуска тестов сторожевого таймера, проверки КС ПЗУ, проверки памяти ОЗУ, запуска тестов системы тактирования, контроля процесса выполнения задач МК. В случае успешного выполнения всех этапов самотестирования, продолжается инициализация МК, после чего управление передается в основной цикл работы МК. Иначе выполняется обработка возникшей ошибки и МК прекращает свою работу.

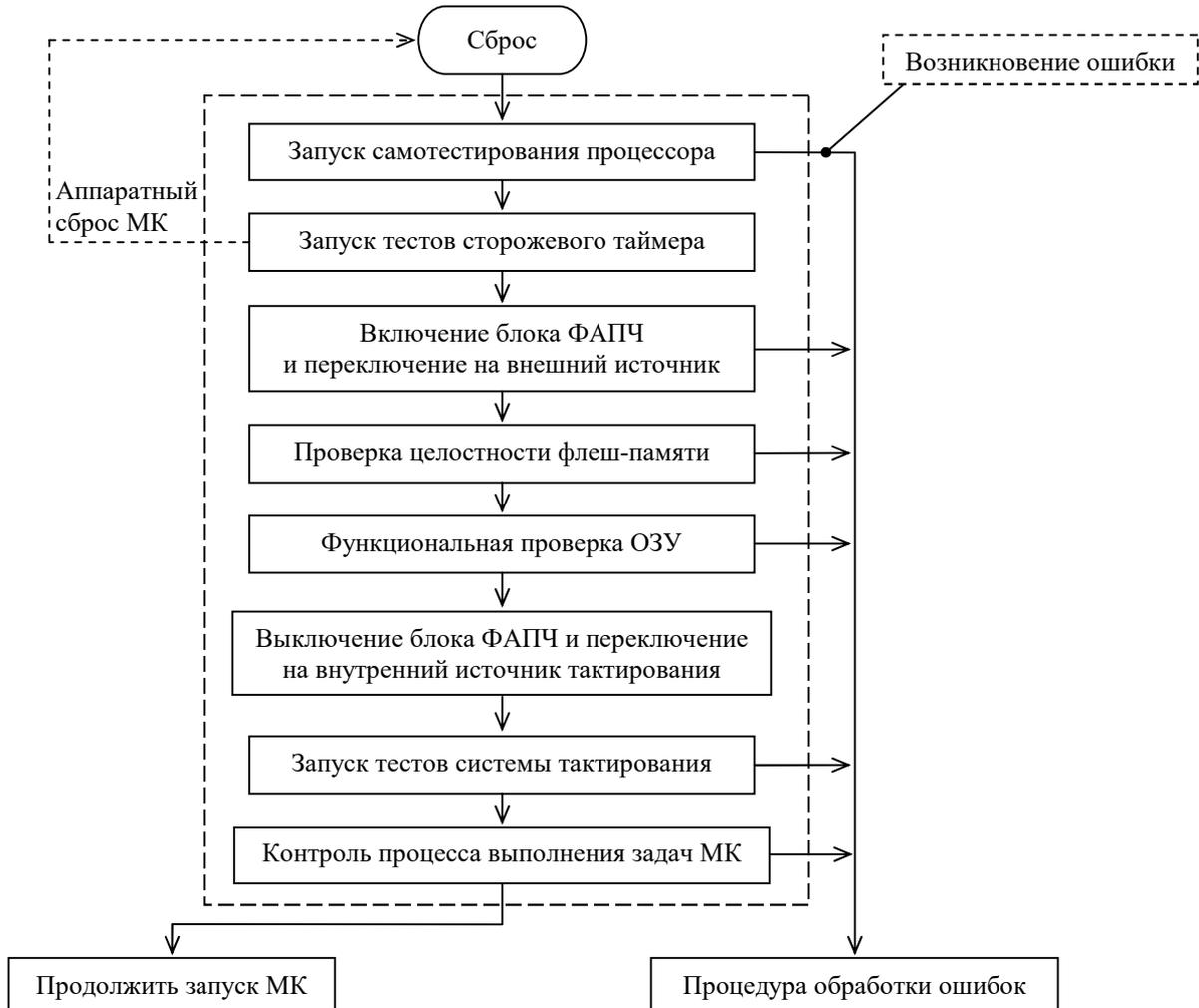


Рисунок 4.11 – Структурная схема самотестирования МК

При запуске самотестирования ядра МК в служебных регистрах проверяются статусные флаги, регистры конфигурации и указатели стека команд на их верное функционирование. Структура блока самотестирования ядра МК представлена на рисунке 4.12.



Рисунок 4.12 – Структурная схема самотестирования процессора МК

Большинство операций МК выполняется за заданное число тактов, предусмотренное архитектурой ядра МК. Впоследствии сбоя или программной ошибки возможно переполнение стека либо ошибочное изменение в регистрах управления МК. Это может служить причиной зависания МК или нарушения таймингов в процессе его работы. Сторожевой таймер способен отследить время выполнения отдельных подпрограмм и, в случае возникновения аномалий, либо быстро отреагировать до окончания подсчета сторожевого таймера и выполнить немедленный сброс МК, либо перейти к процедуре восстановления ПО МК. Алгоритм проверки длительности работы подпрограмм, посредством сторожевого таймера, представлен на рисунке 4.13.

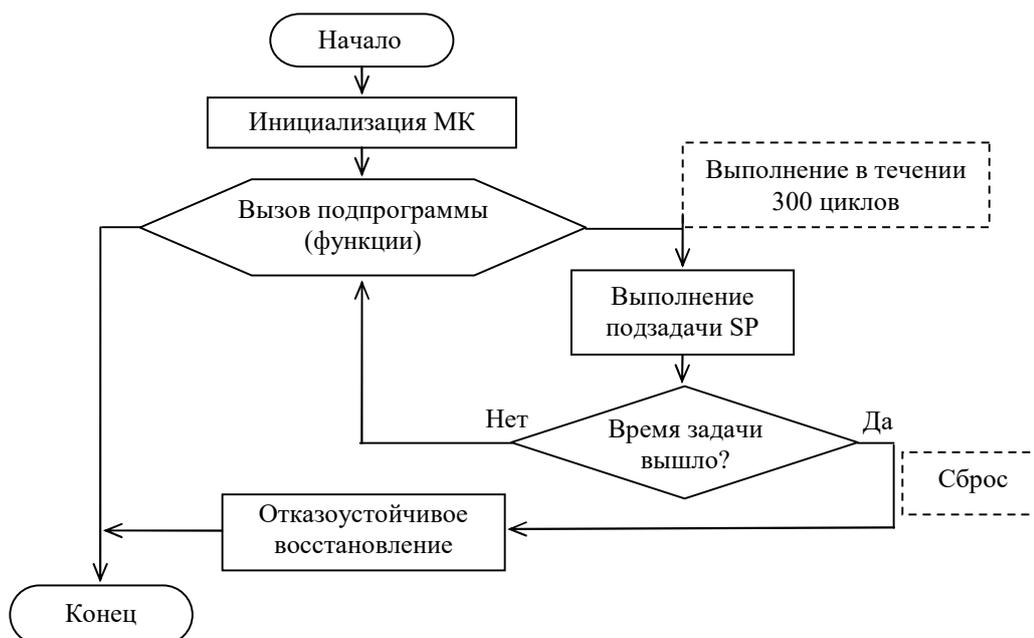


Рисунок 4.13 – Алгоритм работы сторожевого таймера

Существует несколько возможных внутренних источников сброса: *LVD* (детектор низкого напряжения) или сторожевой сброс, *Power On Reset (POR)* – сброс питания при включении) горячий сброс (паразитный или внешний сброс после низкого состояния контакта сброса). Источник сброса помечается в регистре сброса, а информация сохраняется до тех пор, пока напряжение питания подаётся на МК. Наиболее распространенной причиной сбоев МК являются «паразитные сбросы». Для их обнаружения надо иметь определённые инструменты управления. Разработанный алгоритм обнаружения источника сброса представлен на рисунке 4.14.

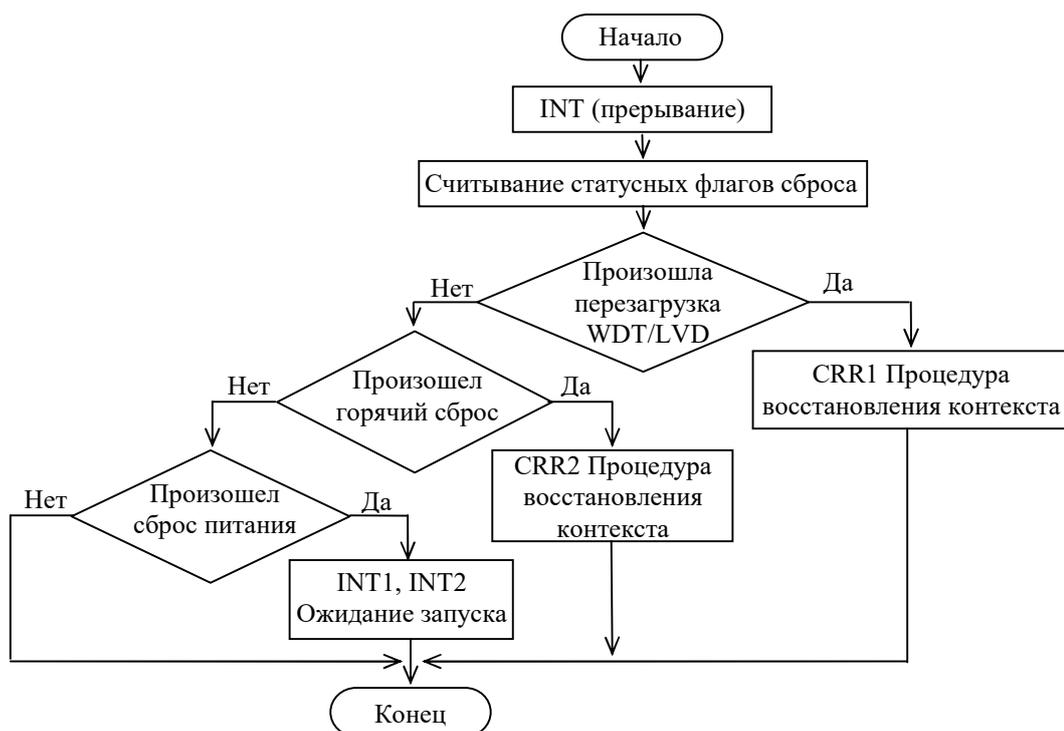


Рисунок 4.14 – Алгоритм определение источника сброса

Разработан алгоритм самотестирования источников тактирования и ЧРВ (рисунок 4.15). Блок ЧРВ предназначен для точного определения временных интервалов (в формате чч:мм:сс). Для его тактирования в большинстве МК предусмотрен внешний кварцевый резонатор (КР) с частотой 32,768 кГц. Данный формат времени используется в журналах логирования (лог-файл), системах мониторинга и при управлении программируемыми логическими контроллерами для указания временных интервалов различных операций (начало выполнения, окончание, длительность паузы и т.д.). Блок-схема алгоритма тестирования ЧРВ показана на рисунке 4.15. Первым шагом запускается внутренний источник тактовых импульсов низкой частоты (*LSI*). На следующем шаге запускается внешний высокоскоростной источник тактирования (*HSE*). Процессор в это время продолжает работать от внутреннего высокоскоростного источника синхронизации (*HSI*). Далее системный таймер (*SysTick*) запускается от *HSI*, в то время как блок ЧРВ работает от *LSI*. Выполняется один цикл переполнения *SysTick*. Число периодов *LSI*, подсчитанных в этом цикле, дает значение коэффициента *HSI* (число импульсов *HSI* в интервале, соответствующему одному периоду *LSI*). Вычисленный коэффициент *HSI* хранится в качестве эталона для следующих измерений во время выполнения теста.

На следующем этапе *HSE* выступает в качестве нового источника синхронизации для таймера *SysTick*. При этом выполняется сброс счетчика цикла системного таймера *SysTick*. Число периодов *LSI*, подсчитанных в этом цикле, дает отношение *HSE* (число импульсов *HSE* в интервале, соответствующему одному периоду *LSI*). Затем вычисляется значение *HSE* из

известного *HSI* и оценивается их отношение (коэффициент отклонения). Если вычисленное значение *HSE* отклоняется от его номинального значения менее чем на $\pm 25\%$, то источник тактовой частоты процессора немедленно переключается обратно на *HSI* и возвращается в состояние сбоя *HSE*. Иначе тест завершается успешно. В любом случае, после завершения тестирования, источник тактирования системной частоты процессора переключается обратно на источник *HSI* по умолчанию.

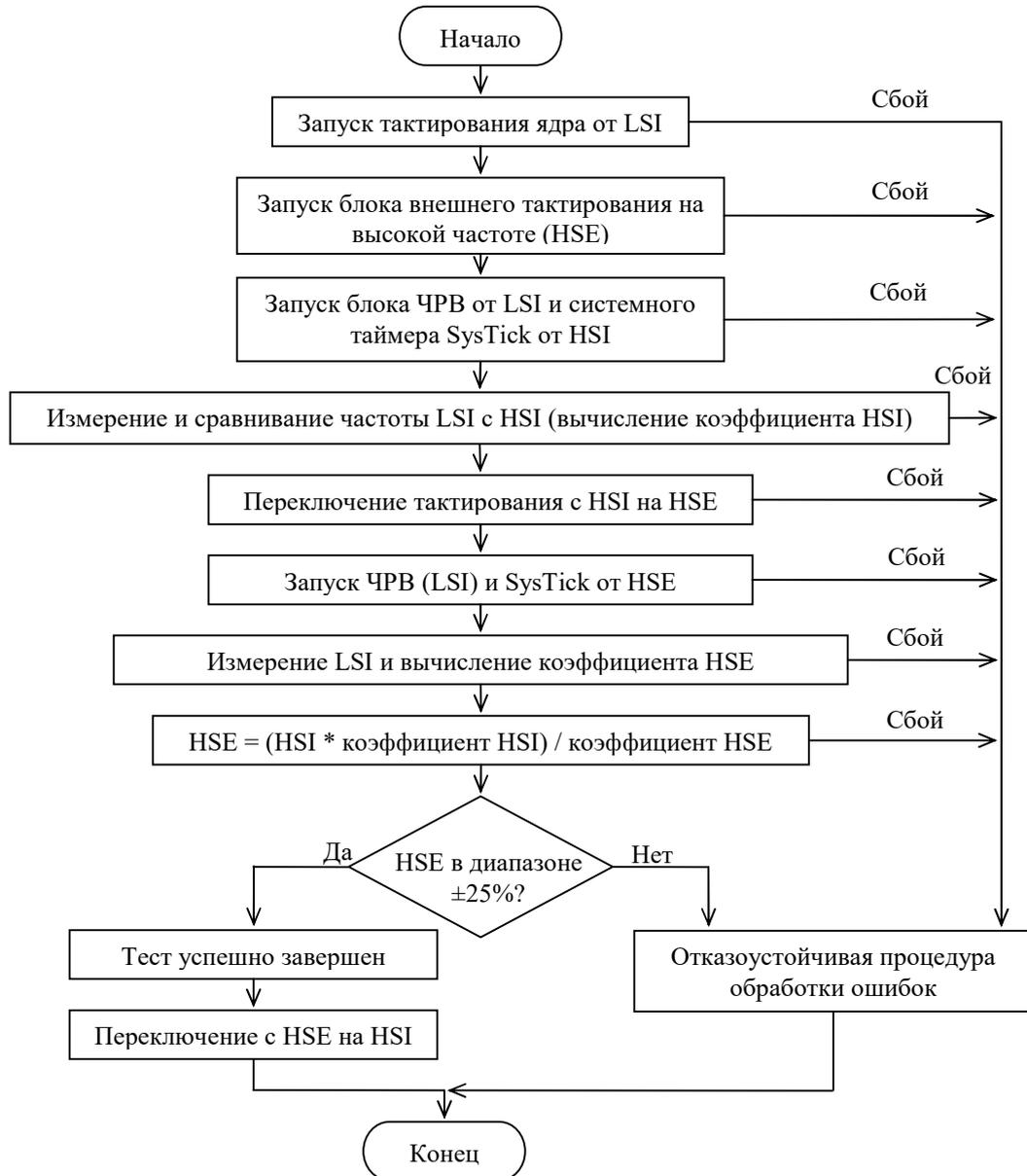


Рисунок 4.15 – Алгоритм самотестирования источников тактирования

4.5 Методы диагностики и резервирования вычислительных блоков микроконтроллера

Разработан метод выявления и исправления ошибок данных в памяти МК на основе аппаратного подсчета КС [86]. В основу метода заложена работа аппаратного блока хеш-функции для подсчета КС полезных данных. На основе метода предложен способ исправления

ошибочных битов памяти различных ВУ. Способ основан на алгоритме детектирования и исправления ошибок, позволяющем восстановить данные в памяти МК посредством вычисления их КС и организации хранения данных в виде структуры. Это позволяет распознать, где произошла ошибка и исправить ошибки памяти. Реализация алгоритма проверки данных в виде системного процесса ОСРВ позволила автоматизировать процесс поиска ошибок в фоновом режиме и определить причину возникновения сбоя. Программная реализация метода детектирования и исправления ошибок без изменения аппаратной части может быть применена при эксплуатации РЭС содержащих любое ВУ, в сложных условиях.

4.5.1 Проверка состояния регистров микроконтроллера

Для охвата тестами большинства блоков МК выявления их наиболее уязвимых и восприимчивых к внешнему воздействию, а также для определения источника или причины возникновения ошибок разработан комплекс тестовых задач. Стоит отметить, что выбранные для тестирования блоки МК используются в большинстве современных РЭС (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Задачи для тестирования блоков МК

Блок МК	Описание тестовой задачи
АЛУ	Циклическое выполнение арифметических операций
Область памяти (ПЗУ, ОЗУ, ЭСППЗУ)	1. Выполнение операций записи в память с последующим чтением и проверкой записанных данных. 2. Выполнение подсчета КС данных во всей области памяти.
Таймеры	1. Выполнение прямого и обратного счета таймерами. 2. Работа таймеров в режиме ШИМ. 3. Работа таймеров с использованием прерываний. 4. Использование системного таймера SysTick для выполнения задач с определенной периодичностью.
Интерфейсы передачи данных	1. Прием и передача данных по интерфейсу UART с проверкой данных посредством вычисленных КС. 2. Прием и передача данных по интерфейсу I ² C с проверкой данных посредством вычисленных КС.
АЦП	Проверка корректности функционирования АЦП посредством чтения аналогового сигнала регулярных и инжекторных каналов.
ЦАП	Генерация аналогового сигнала и проверка его корректности.
ПДП	Использование инструментов прямого доступа к памяти для организации передачи данных по UART, SPI, I ² C и др. в обход центрального процессора или АЛУ МК.
Порты ввода-вывода	Изменение состояний выводов МК по набору заранее сформированных тестовых масок для 8-, 16-, 32-битных портов. Контроль соответствия заданному состоянию регистров тестируемого порта ввода-вывода МК. Циклическое выполнение битовых операций над числами: сдвиг вправо, сдвиг влево, чтение и запись бита.
Прерывания	Контроль выполнения прерываний в блоках МК, а также мониторинг выполнения соответствующих функций прерывания.

Признаком нарушения работы МК являются неконтролируемые и непредвиденные изменения в процессе тестирования. В процессе работы отслеживаются следующие параметры: время выполнения программного кода; амплитуда воздействующей электромагнитной помехи; состояние выводов общего назначения (GPIO); работа сторожевого таймера (контроль зависания ядра МК); частота тактирования ядра МК; КС всей памяти и отдельно каждого в ней блока. Полученные данные во многом зависят от задействованных библиотек, версии компилятора, использованных ключей оптимизации кода, операций с плавающей точкой и работы блока прямого доступа к памяти (ПДП).

Измерительная печатная плата (ПП), соответствующая нормативным документам [91] по измерению излучаемых эмиссий и устойчивости к излучению ИС в ТЕМ-камере, представлена на рисунке 4.16.

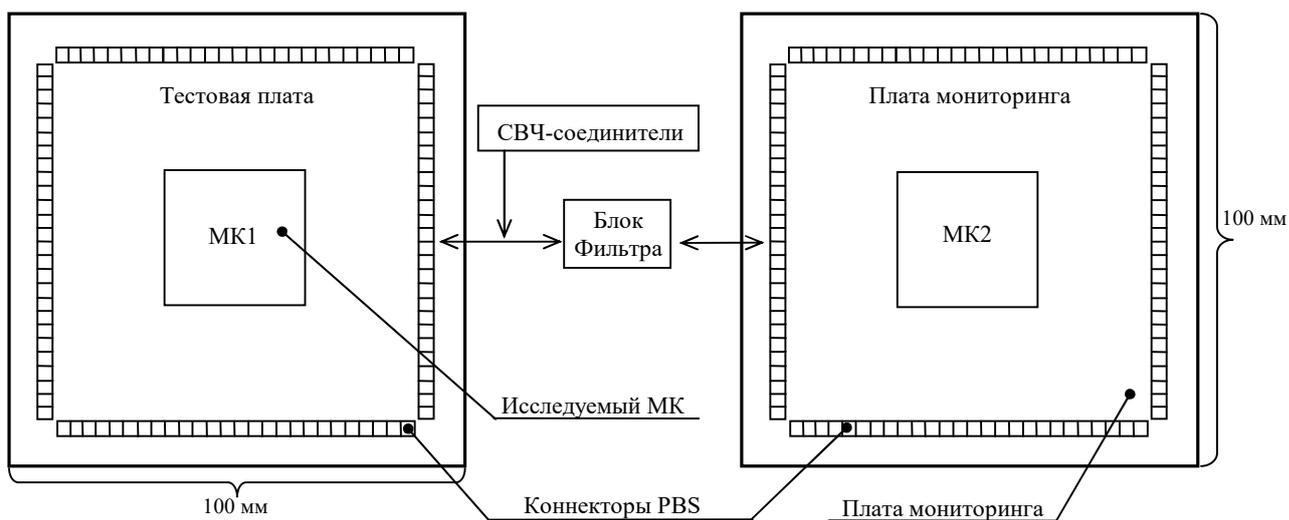


Рисунок 4.16 – Схема соединения ПП мониторинга с тестовой ПП

На одной стороне ПП находится измеряемый МК, а все необходимые компоненты, включая различные соединители для питания и программатора, расположены на обратной стороне ПП.

Необходимые компоненты для контроля параметров МК1 располагаются на устройстве мониторинга, которое содержит МК2 для контроля работы алгоритмов и записи данных с результатами тестов. Измерение состоит из 3 этапов:

1. Мониторинг параметров выполнения тестовых задач, задействующих исследуемые блоки МК, без внешнего воздействия, необходим для того чтобы получить эталонные значения параметров, по которым будет выполняться сравнение (до и после воздействия на МК).

2. Выполнение тестовых задач с внешним климатическим и электромагнитным воздействием на МК1. Осуществляется МК2, расположенным на устройстве мониторинга, который в режиме реального времени фиксирует состояние исследуемого МК1, расположенного на измерительной ПП. Фиксация состояний происходит посредством соответствующего интерфейса передачи данных. Принятые данные МК2 передаются на ПК для обработки и анализа результатов.

3. В процессе обработки полученных данных, результаты работы тестовых блоков МК на этапах 1 и 2 сравниваются и фиксируются их отклонения из-за совместного климатического и электромагнитного воздействия на исследуемый МК1.

4.5.2 Методы для выявления, анализа и исправления ошибок в энергонезависимой памяти микроконтроллера

Разработаны методы для анализа данным флеш-памяти МК при ручном и программном обращении к ним, а также для выявления и исправления ошибок в энергонезависимой памяти

МК. Приведены способы реализации предложенных методов без и с возможностью восстановления данных и без неё.

4.5.2.1 Метод анализа дампа флеш-памяти микроконтроллера при ручном и программном обращении к его данным

Разработан метод анализа данных памяти МК изменений при воздействии на него внешнего ЭМП. В методе используются два способа обращения к данным флеш-памяти: ручной и программный. В процессе разработки тестовых программ надо учитывать ряд факторов, определяющих работу МК. Например, если основная программа МК автоматически выполняет запись тестовых данных во флеш-память МК, то возникает ситуация, при которой корректность записи данных не гарантируется. При перезапуске работы эти данные могут быть изменены на этапе инициализации МК.

Использованы два способа работы с флеш-памятью МК. В первом, программа МК должна содержать программные инструменты обращения к флеш-памяти МК. Редактирование и проверка КС памяти выполняется функцией в прошивке МК в 2 этапа. Первый этап – загрузка прошивки с записью тестовых данных во флеш-память МК. Второй этап – загрузка прошивки в память МК без выполнения обращений (чтение/запись) к флеш-памяти МК. Во втором способе используются только вычислительные операции без взаимодействия с флеш-памятью. Выполняется загрузка прошивки в память МК, в которой отсутствуют функции обращения к флеш-памяти.

В качестве основной программы использована следующая тестовая задача. Тестовые данные в виде массива символов размером 900 байт записаны во флеш-память с 1 по 64 страницы, используя разработанную функцию (рисунок 4.17). Тактирование ядра МК осуществлялось на частоте 72 МГц. При формировании сигнала ШИМ с частотой 9 кГц использованы таймеры 2 (PA6, PA7) и 3 (PB0, PB1).

```
FlashWriteData(uint32_t StartPageAddress, flash_data *Data)
{
    FLASH_Unlock();
    FLASH_ErasePage(StartPageAddress);
    while(!(FLASH->SR & FLASH_SR_EOP))
        FLASH_ProgramWord((uint32_t)StartPageAddress,
            *Data);
    FLASH_Lock;
}
```

Рисунок 4.17 – Функция записи данных во флеш-память МК

Обращение к флеш-памяти МК выполнялось посредством специализированного ПО STM32 ST Utility [92] (рисунок 4.18). После загрузки в МК прошивки с тестовой задачей, выполнялось подключение к ПК посредством аппаратного отладочного комплекта ST-Link/v2 по интерфейсу SWD (serial wire debugger) для загрузки тестовых данных во флеш-память МК.

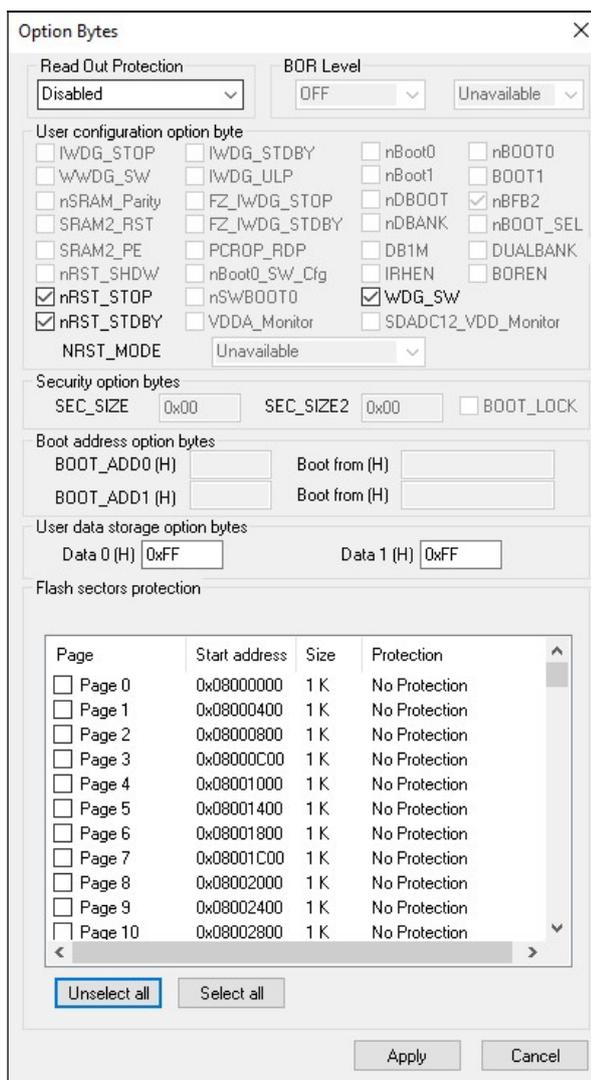


Рисунок 4.19 – Настройка флеш-памяти STM32 ST Utility

В отечественных МК 1986VE91T и K1986QI2 предусмотрены регистры аварийного сохранения данных в батарейном домене, предназначенные для долгосрочного хранения данных в 14 32-х разрядных регистрах, что позволяет хранить информацию не только в основной флеш-памяти МК (отсутствует в STM32F103x). Поэтому в тестах при внешнем климатическом и электромагнитном воздействии выполнялся анализ только основной флеш-памяти МК.

Таким образом, разработана методика проведения анализа влияния внешнего ЭМП на блоки МК посредством детектирования изменений данных в памяти до и после его воздействия на МК. Разработана функция записи данных в флеш-память МК STM32F103x. Разработан способ тестирования памяти МК при внешнем климатическом и электромагнитном воздействии на МК. Способ включает функции вычисления числа π в основном цикле программы и сравнения с эталонным значением во флеш-памяти МК, что позволяет автоматически сообщать о первом детектировании неисправности. С помощью разработанной методики получены

результаты исследования влияния совместного внешнего климатического и электромагнитного воздействия на МК K1986BE92Q1 и STM32F103C8T6.

4.5.2.2 Метод выявления и исправления ошибок в энергонезависимой памяти микроконтроллера

Предложен метод выявления и исправления ошибок в энергонезависимой памяти МК, который основан на проверке корректности данных в ПЗУ МК. Метод использует полезные данные; КС ПЗУ МК; КС данных; объект структуры; резервную копию объекта структуры; служебную структуру/дескриптор. Ниже поясняется каждый вид.

К *полезным данным* относится информация, которая длительное время хранится в ПЗУ и используется в процессе работы РЭС, например, калибровочные коэффициенты, параметры режима работы, результаты работы РЭС, диагностическая информация и др.

КС *данных* вычисляется одним из аппаратных блоков МК (SHA, CRC, MD5 и др.).

Объект структуры является составным типом данных, предназначенным для хранения полезных данных и их КС в полях структуры (рисунок 4.20).

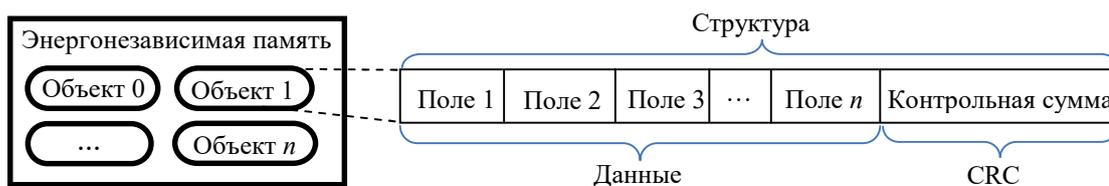


Рисунок 4.20 – Хранение структуры данных объектов в энергонезависимой памяти МК

Резервная копия объекта структуры представляет собой копию исходной структуры, предназначенную для восстановления данных в случае повреждения информации в ПЗУ.

КС ПЗУ МК вычисляется одним из аппаратных блоков МК для вычисления КС всей информации, находящейся в ПЗУ МК, после окончания формирования всех объектов структур и подсчета их КС. КС энергонезависимой памяти МК обновляется каждый раз при выполнении операции записи в память либо при изменении данных в ПЗУ. Она находится в поле служебной структуры и является эталоном (контрольным значением) в процессе сравнения с вычисленной КС ПЗУ.

Служебная структура содержит информацию обо всех объектах структур с данными: название структуры; адрес в памяти; число выявленных ошибок; число успешных восстановлений; число исправленных битов; число выполненных циклов чтения/записи. При каждом изменении данных в ПЗУ информация в служебной структуре обновляется. В результате, она содержит актуальную информацию об изменениях и состоянии данных в ПЗУ.

Предложенный метод предусматривает различные варианты реализации, в зависимости от решаемой задачи. Это влияет на организацию связей между данными, представленными выше.

В общем виде метод состоит из этапов, представленных в обобщенном алгоритме на рисунке 4.21.

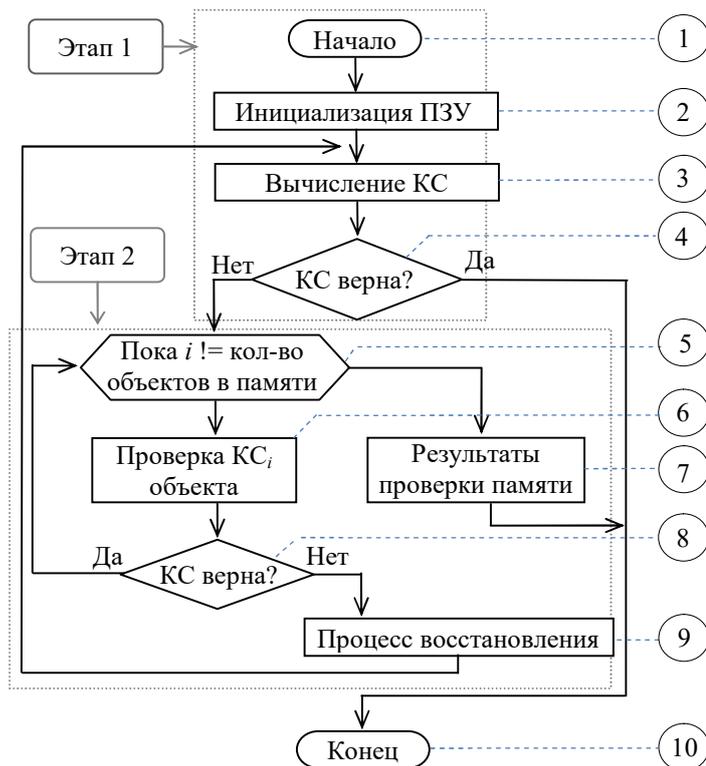


Рисунок 4.21 – Обобщенный алгоритм выявления и исправления ошибок данных в ПЗУ

В основу алгоритма проверки памяти заложен метод избыточного кодирования для вычисления КС. Также кодирование отличается простотой реализации и обладает гибкостью расчета (длины результата) КС для МК с 8-, 16-, 32- и 64-битной вычислительными архитектурами.

Работа алгоритма состоит из двух этапов. На этапе 1 выполняется вычисление текущей КС ПЗУ и её сравнение с эталонным значением КС из энергонезависимой памяти МК. Если оба значения КС идентичны, то проверка заканчивается. Иначе алгоритм переходит к этапу 2 проверки данных. Этап 2 заключается в поиске ошибок КС в объектах структурах, находящихся в ПЗУ, и их резервных копиях. Информация о последних берется из служебной структуры.

Проверка блоков памяти выполняется посредством подсчета КС каждого объекта памяти (рисунок 4.20). При достижении последнего блока, значение КС сравнивается с эталонным. Если вычисленное и эталонное значения КС различаются, запускается процесс восстановления памяти. Возможен вариант, при котором КС всей памяти будет отличаться от эталонной, но ни в одном объекте не будут найдены ошибки. Это означает, что изменения коснулись свободных ячеек памяти, которые в данный момент не используются.

Процесс проверки данных в ПЗУ в случае аппаратного или программного сбоя в результате воздействия ЭМП состоит из 5 этапов, реализованных в обобщенном алгоритме:

1. Формирование объектов структур данных, включая запись их КС в служебное поле структуры.

2. Подсчет КС всего ПЗУ и выполнение циклической проверки КС.

3. Выявление ошибки КС всего ПЗУ и проверка всех объектов с целью локализации адреса объекта в ПЗУ, в котором возник сбой.

4. Восстановление данных поврежденного объекта из резервной копии посредством исправления битов ПЗУ, содержащих ошибку.

5. Повторная проверка КС всего ПЗУ, с целью подтверждения исправления ошибок.

Поля структуры содержат данные, а их КС находится в служебном поле структуры. После того как все данные помещены в структуры и созданы их резервные копии, вычисляется КС всей энергонезависимой памяти, которая хранится в служебной структуре или дескрипторе вместе с информацией о числе структур и их физических адресах в памяти. КС всей памяти – это эталонное значение, с которым сравнивается вычисленное значение КС памяти в процессе проверки. Оно позволяет достаточно быстро определить наличие ошибок в памяти, т.к. в случае изменения хотя бы одного из битов памяти, гарантированно изменится и их КС.

В случае несовпадения вычисленного значением с эталонным, полученным на этапе изменения данных в памяти, вызывается процесс проверки КС данных, хранящихся в структурах. В случае обнаружения несовпадения КС в одной или более структур, выполняется сверка КС данных со значением, записанным в поле структуры, а также со значением КС резервной копии (данных и КС в служебном поле структуры). Если объект имеет корректную КС данных, и совпадающую со значением КС из служебного поля структуры, то эти данные считаются корректными и используются в качестве маски для сверки битов в памяти поврежденной структуры. При этом отличающиеся биты в поврежденной структуре будут изменены, после чего выполняется повторное вычисление КС всей памяти. Если ошибка обнаружена только в одной структуре, то вычисленная КС совпадет с эталонным значением КС из служебной структуры.

При формировании полей структуры рекомендуется использовать выравнивание данных для экономии памяти. Структуры могут хранить данные различного объема. При этом рекомендуется ограничить максимальный размер структуры 10 процентами памяти для оптимизации процесса вычисления КС и снижения вероятности появления большого числа ошибок в одной структуре. Обобщенный алгоритм может применяться как для обнаружения, так и для исправления ошибок памяти.

4.5.2.3 Метод детектирования сбоев микроконтроллера на основе анализа памяти

Разработана методика детектирования сбоев МК посредством анализа и сравнения дампа его памяти до и после воздействия внешнего ЭМП. Она заключается в следующем. После включения электропитания, МК выполняет опрос периферийных устройств и первичную настройку программы. Далее управление переходит в основной рабочий цикл, в котором выполняется работа основной программы МК. В процессе работы общее состояние периферийных устройств и служебных регистров МК отражается в адресном пространстве его памяти (рисунок 4.22). Выполняя анализ состояния вычислительных блоков и переходных процессов в режиме реального времени, можно выявить нарушения работы МК, вплоть до его отдельно взятого блока памяти.

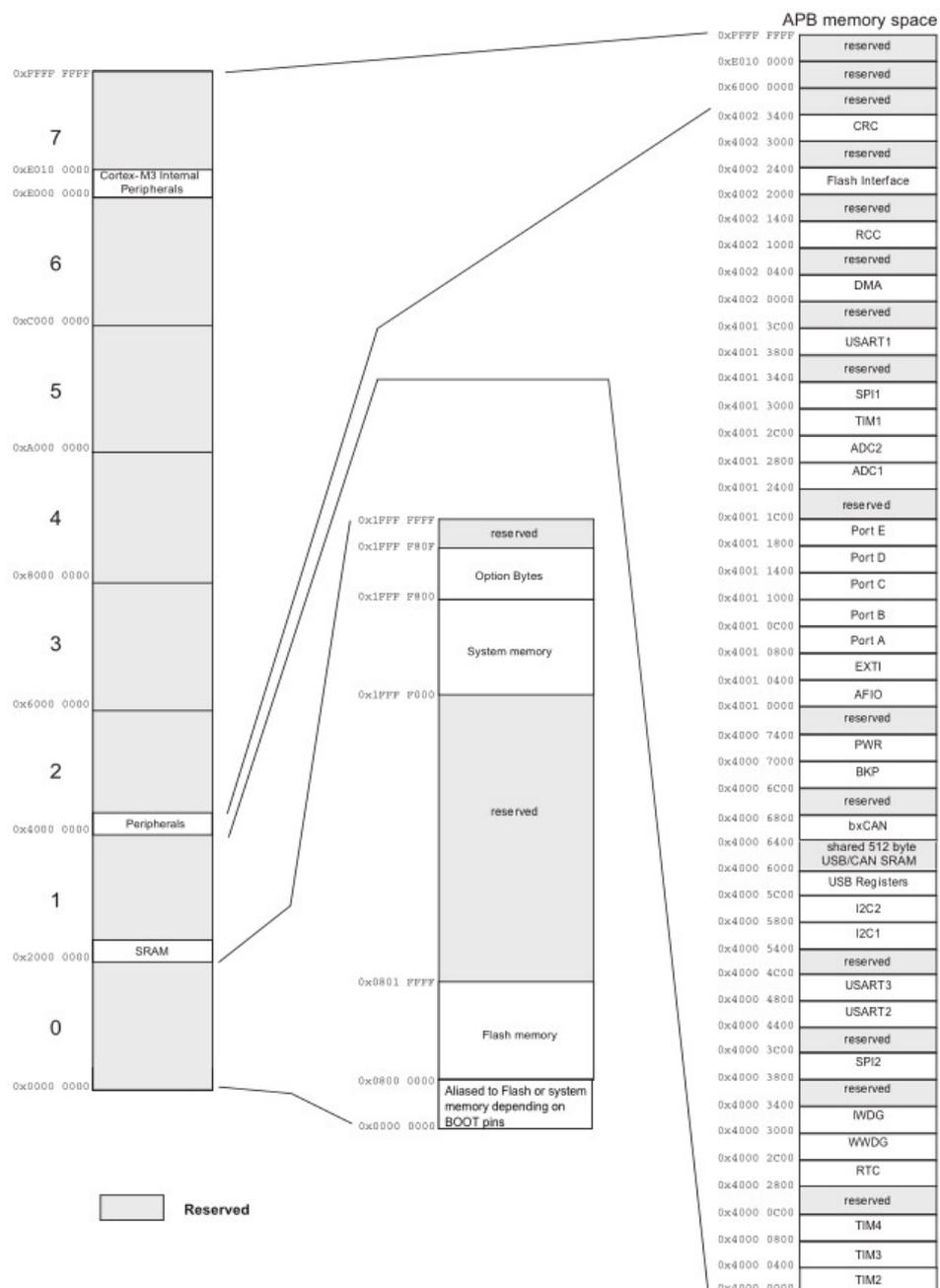


Рисунок 4.22 – Адресное пространство блоков памяти МК STM32F103

Анализируя адресное пространство тестового МК (рисунок 4.22), можно оценить КС данных памяти в процессе воздействия внешнего ЭМП и с высокой вероятностью определить, какие блоки периферии наиболее восприимчивы к воздействию ЭМП.

Разработан комплекс тестовых задач для обеспечения покрытия тестами большинства блоков МК и выявления наиболее уязвимых из них к внешним климатическим и электромагнитным воздействиям. Выбранные для тестирования блоки МК используются в подавляющем большинстве РЭС, содержащих МК (таблица 4.5). В качестве тестируемых МК использовались STM32F103 и K1986BE91T.

Таблица 4.5 – Тестовые задачи для определения сбоев в МК

Блок МК	Описание тестовой задачи
АЛУ	Циклическое выполнение арифметических операций. Циклическое выполнение битовых операций над числами: сдвиг вправо, сдвиг влево, чтение и запись бита. Проверка корректности результатов вычислений. Сравнение с заранее вычисленными (эталонными) значениями.
Область памяти (ПЗУ, ОЗУ, ЭСППЗУ)	Выполнение операций запись/чтение и проверка данных. Выполнение подсчета КС данных всей области памяти.
Таймер	Выполнение прямого и обратного счета таймерами. Проверка корректности результатов. Работа таймеров в режиме ШИМ. Работа таймеров с использованием прерываний. Использование системного таймера SysTick для задач с заданной периодичностью (мкс, мс, с).
Интерфейсы	Прием и передача данных по интерфейсу UART с проверкой данных посредством контрольной суммы (блок CRC). Прием и передача данных по интерфейсу I ² C с проверкой данных посредством контрольной суммы (блок CRC).
АЦП	Проверка корректности результатов функционирования АЦП посредством обработки аналогового сигнала, с использованием регулярных/инжекторных каналов.
ЦАП	Генерация формы аналогового сигнала и проверка его на корректность, а также сравнение с эталонным значением.
DMA (ПДП)	Использование инструментов ПДП для организации передачи данных по UART, SPI, I ² C и др., в обход центрального процессора или АЛУ МК.
Порты ввода-вывода	Контролируемое изменение состояний выводов МК по набору заранее сформированных тестовых масок для 8-, 16-, 32-битных портов. Контроль соответствия заданному состоянию регистров тестируемого порта ввода-вывода МК.
Прерывания	Контроль выполнения прерываний МК, и мониторинг выполнения соответствующих функций обработки прерываний.

Сформированы основные требования к тестовой программе МК:

1. Центральное процессорное устройство МК должно быть настроено на выполнение сложных вычислительных задач при взаимодействии с флеш-памятью, внутренними шинами адресов и данных.

2. Тестовая задача должна обеспечивать средства индикации процесса выполнения задач. (Например, переключение состояния порта при выявлении некорректного функционирования МК).

3. Тестовая задача должна включать и задействовать различные конфигурации функциональных блоков МК.

4. Перед началом и после окончания теста МК должны выполняться считывания данных памяти. (Анализ состояния памяти до и после теста позволяет оценить восприимчивость блоков МК к различным видам внешнего воздействия на него.).

Процесс тестирования МК состоит из нескольких этапов, выполняемых с постепенным увеличением числа активных блоков, частоты работы ядра и периферии, а также сложности и числа выполняемых ядром МК арифметических операций.

4.5.2.4 Реализация метода без восстановления данных

Полезная информация хранится в памяти, используя объекты в виде структуры (рисунок 4.23). Её поля содержат данные различных типов. В одном из полей хранится вычисленная КС данных.

```
struct_eeprom_data{
    float param_1;
    float param_2;
    int param_3;
    char name_object1[44];
    char name_object2[45];
    char name_object3[45];
    uint16_treg = 0;
    uint32_tcrc = 0;
};
```

Рисунок 4.23 – Структура для хранения тестовых данных

КС будет гарантировать целостность данных в случае сбоя или неконтролируемого сброса системы. В процессе запуска устройства вычисляется КС всей памяти. В случае если текущее вычисленное значение КС отличается от ранее вычисленного, то регистрируется сбой в памяти и выполняется проверка всех данных, находящихся в энергонезависимой памяти МК. Если данные во всех структурах совпадают с соответствующими КС, то это означает, что сбой в

памяти не повредил данные, а изменения коснулись адресов свободной памяти. Если ячейка памяти не повреждена (физически), то данный вид ошибок поддается восстановлению путем сброса всех разрядов неиспользуемой памяти. В результате данной операции, повторный подсчет КС всей памяти будет совпадать с вычисленным ранее значением. В случае повреждения ячейки памяти требуется исключить операции с поврежденным блоком памяти, пометив данный блок в «карте памяти» ОСРВ и обновив КС данных.

4.5.2.5 Реализация метода восстановления данных

Программное разделение на 2 раздела ПЗУ и расположение в нем исходных структур (S_1 , S_2 , S_3) и их резервных копий (cS_1 , cS_2 , cS_3) представлено на рисунке 4.24. В каждом разделе имеется свой дескриптор сегмента (DS), который выполняет функцию *служебной структуры*, содержащей информацию о числе сегментов памяти, числе структур, их адреса и КС. Благодаря использованию зеркалирования данных (двусторонняя синхронизация данных в памяти МК) возможно восстановить информацию в том случае, если повреждения не затронули области памяти резервного и резервируемого разделов памяти. В таком случае анализируется информация DS всех разделов и сравнивается с данными из их структур. Объекты, у которых вычисленная КС не совпадает со значениями КС из полей структуры, инвертируются (биты, в которых выявлены несоответствия). В результате, сохраняется ресурс чтений/записи из ячеек памяти, т.к. число циклов чтений/записи в памяти ограничено.

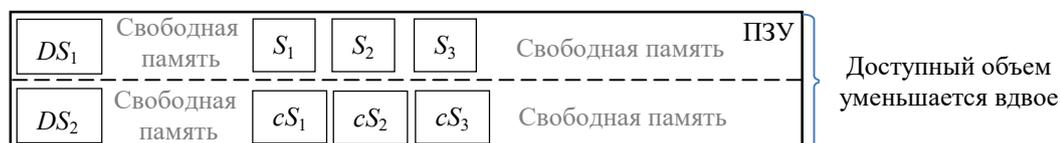


Рисунок 4.24 – Дублирование данных в общей памяти МК

В таблице 4.6 представлены комбинации возможных вариантов ошибок в памяти при зеркалировании данных. Например, вариант 1 сообщает о повреждениях, затронувших «Данные объекта n » (A), а вариант 2 – «Данные объекта» (A) и «CRC объекта» (B). Среди этих комбинаций следует выделить наиболее критичные, при которых отсутствует возможность восстановления данных. Так, к ним относятся ошибки, возникшие в трех и более областях памяти (данные объекта (A), CRC объекта (B), копия данных объекта (C), CRC копии данных объекта (D)). При этом не исключены повреждения данных в других блоках памяти. Данный способ позволяет выполнить проверку всех данных в памяти, значительно сократив время по сравнению с проверкой отдельных наборов данных. Серьезным недостатком способа является необходимость пересчета КС при изменении данных в каком-либо блоке памяти.

Таблица 4.6 – Комбинации вариантов выявления ошибок в памяти МК

Ошибка	A	B	C	D
A	1	2	3	4
B	–	6	7	8
C	–	–	11	12
D	–	–	–	16

4.5.2.6 Реализация метода в операционной системе реального времени

Возможности различных вычислительных модулей в настоящее время позволяют запускать программный код под управлением ОСРВ, что в значительной степени упрощает процесс разработки конечного устройства. ОСРВ способна контролировать все служебные процессы и пользовательские задачи, регистрировать ошибки, используя режим псевдо-многозадачности. Системная «Служба диагностики» с инструментами восстановления данных совместно с «Менеджером памяти» может контролировать целостность памяти, выполняя её проверку в фоновом режиме. Большинство ОСРВ распространяются в открытом доступе, предоставляя возможность внедрения стороннего кода в их состав. В результате, использование в ОСРВ предложенного метода диагностики и восстановления памяти позволит автоматизировать эти процессы. Посредством аппаратного блока ПДП «Менеджер памяти» может обращаться к данным в обход центрального процессора ВУ. Это позволяет избежать дополнительной нагрузки на МК за счет периодического обращения к памяти ОСРВ.

Контроль состояния и целостности объектов в памяти выполняет служба ОСРВ «Менеджер памяти» (рисунок 4.25). Виртуальный дескриптор выполняет контроль за доступом к объектам памяти.

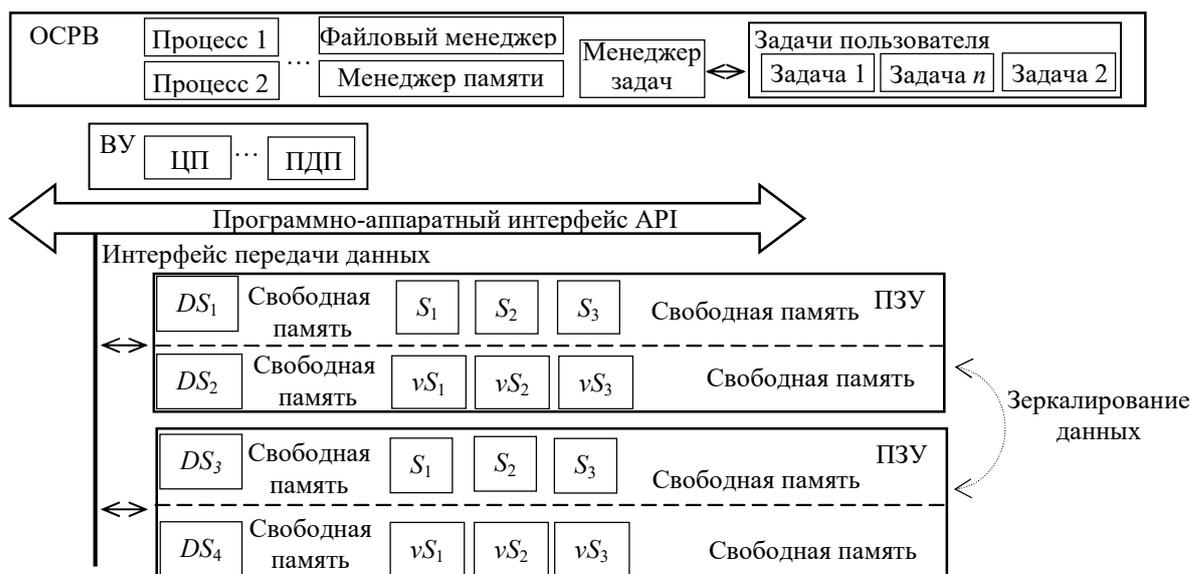


Рисунок 4.25 – Организация контроля состояния целостности памяти средствами «Менеджера памяти» ОСРВ

При такой организации ОСРВ, исключается проблема множественного доступа к данным в памяти, т.к. «менеджер памяти» предоставляет доступ к ним активным процессам и содержит информацию о числе объектов в памяти, их адресах и КС. Кроме того, в случае сброса, ОСРВ проверяет целостность данных посредством службы «Менеджера памяти», функционирующего в фоновом режиме.

4.5.2.7 Тестирование метода выявления и исправления ошибок данных в памяти микроконтроллера

Разработан программный код и выполнено тестирование разработанного метода выявления и исправления ошибок в энергонезависимой памяти МК. Работа тестовой программы выполнялась на МК АТМega 2560 в соответствии с алгоритмом, представленным на рисунке 4.21. Структура данных, используемая в тестовой программе, представлена на рисунке 4.26. В структуре для хранения тестовых данных предусмотрены поля *param_1*, *param_2*, *param_3*, *name_object1*, *name_object2* и *name_object3*.

```
struct eeprom_data{
    float param_1 = 1.1984;
    float param_2 = 2.451;
    int param_3 = 8035;
    char name_object1[44];
    char name_object2[45];
    char name_object3[45];
    uint16_t reg = 0;
    uint32_t crc = 0;
};
```

Рисунок 4.26 – Структура для хранения тестовых данных

Результат работы тестовой программы представлен в таблице 4.7. Стоит отметить, что в МК АТmega 2560 отсутствует аппаратный блок вычисления КС, поэтому для её расчета использован метод циклического избыточного кодирования.

Таблица 4.7 – Результаты работы программы для выявления ошибок в ПЗУ

Сообщения тестовой программы	Описание этапа работы
Clear EEPROM (CRC): 7DCF4209 CRC Obj1 = FB41D96C CRC Obj2 = 236B8F9B CRC Obj3 = 2365DD94	Шаг 1. Вычисление КС методом циклического избыточного кода (CRC) всей ЭСППЗУ МК и трёх структур с тестовыми данными.
After write three structures to EEPROM (CRC): CB227FA0 11111111	Шаг 2. Вычисление КС всей памяти ЭСППЗУ после записи в неё трёх структур. Выводится случайно выбранной ячейки памяти из диапазона адресов, в которых расположены тестовые структуры данных.
Error entered in byte #190 bit #7 New state bit #0 01111111	Шаг 3. В выбранную случайным образом ячейку памяти №190 вносится ошибка в бит 7.
ERROR CRC EEPROM! ERROR EEPROM CRC IN OBJECT # 1	Шаг 4. Алгоритм распознал изменение КС данных в памяти и выявил ошибку в КС объекта 1.
EEPROM (CRC): 7DCF4209 CRC Obj1 = FB41D96C CRC Obj2 = 236B8F9B CRC Obj3 = 2365DD94	Шаг 5. Восстановление ошибочного бита объекта 1, в котором была выявлена ошибка. После успешного восстановления отображается информация с КС всей памяти и объектов, хранящихся в ней.

4.5.3 Способ аппаратного и программного резервирования вычислительных блоков микроконтроллера

Представлен способ аппаратного и программного резервирования МК, позволяющий в случае возникновения сбоя в одном из блоков МК переключиться на резервное ядро или запустить дублирующий МК для возобновления работы целевой функции, что повышает отказоустойчивость МК при его эксплуатации.

Программное резервирование состоит из методов и алгоритмов, способных в случае сбоя в МК восстановить его рабочее состояние посредством различных программных решений. Результаты тестов демонстрируют высокую чувствительность системы тактирования ядра МК и блоков периферии при изменении частоты системного генератора, и частом вызове функций чтения/записи флеш-памяти МК из основной программы. Так, изменения в памяти МК при воздействии внешнего ЭМП зафиксированы лишь на некоторых тактовых частотах МК. В результате, при распознавании ошибки в процессе работы МК, часть ошибок может быть исправлена посредством изменения конфигурации системы тактирования блоков МК.

Структурная схема программного резервирования блоков МК представлена на рисунке 4.27. Реализация резервирования во многом зависит от параметров и характеристик МК. Способ предполагает программное разделение адресного пространства ОЗУ ($ОЗУ_1$ и $ОЗУ_2$) и ПЗУ ($ПЗУ_1$ и $ПЗУ_2$) на равные части (рисунок 4.27а). Контроль за состоянием памяти осуществляет «Блок мониторинга», в котором содержатся функции тестирования и служебная информация с адресами основных и резервных блоков МК. При выявлении ошибок в памяти, например, посредством вычисления КС, которые не удастся устранить, с помощью обновления данных из

резервной копии, прекращается использование «поврежденных» участков памяти «основной программой», а вычислительный процесс переключается на резервные части памяти (рисунок 4.27б).

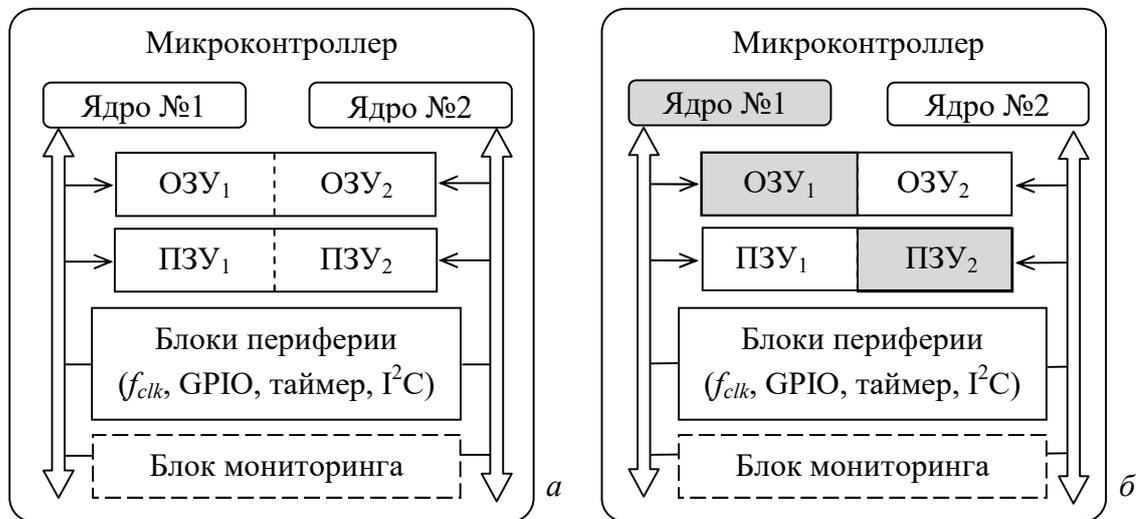


Рисунок 4.27 – Структуры программного резервирования (а) и частичного сбоя в блоках МК (б)

Когда программное резервирование и/или изменение конфигурации блоков МК неспособны устранить сбой, используется аппаратное резервирование. Оно представляет собой конструкторское решение с внедрением дополнительных ИС, дублирующих функционал активных блоков МК в РЭС.

Для демонстрации работоспособности предложенного способа проведено воздействие внешнего ЭМП на отечественный МК 1986BE92QI и его зарубежный аналог МК STM32F103C8T6 (подробно в разд. 5). В результате воздействия было зафиксировано значительное изменение данных во флеш-памяти МК (52%). Это привело к потере данных без возможности их восстановления, используя только программные средства. Поэтому использовано аппаратное резервирование с внедрением дублирующих ИС (резервных), способных выполнять вычислительную задачу в случае возникновения критического сбоя в процессе работы основного блока.

Разработана структура аппаратного резервирования МК включающая 2 МК (основной и резервный), внешние ИС (память/периферия/интерфейс) и «блок мониторинга» для передачи команд посредством специализированной «шины управления» резервными устройствами (рисунок 4.28).

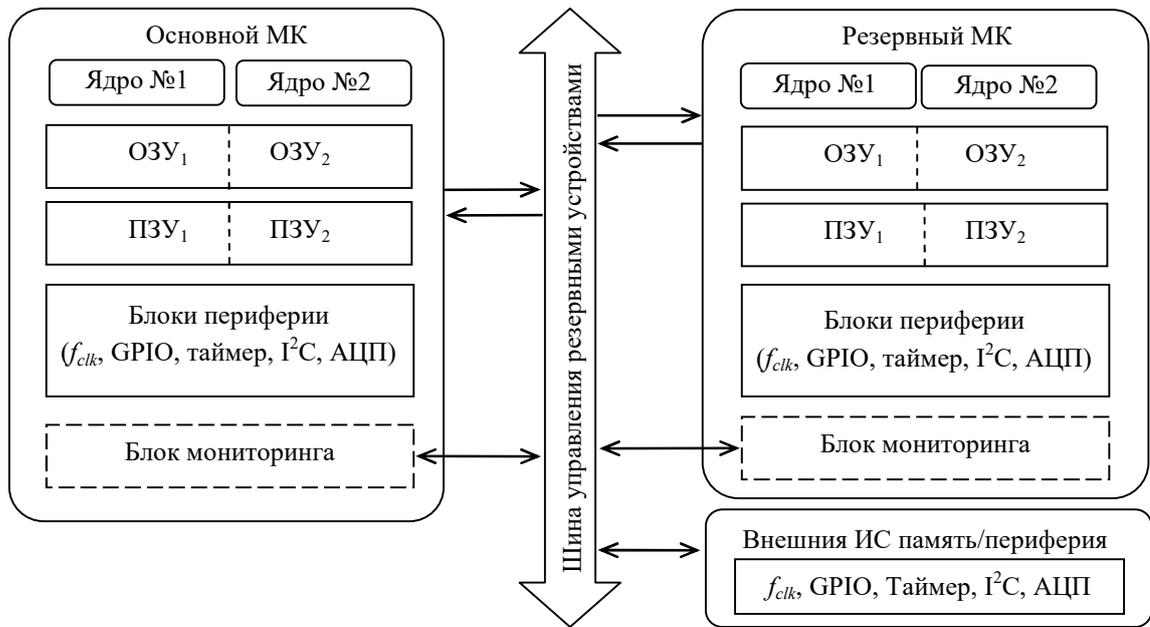


Рисунок 4.28 – Структура аппаратного резервирования МК

Блок мониторинга может быть представлен в виде системной службы ОСРВ, выполняющих проверку состояния блоков МК в фоновом режиме и анализирующей данные регистров памяти. Если использование ОСРВ не предусмотрено, то функции блока мониторинга могут располагаться в модифицированном загрузчике МК. Тогда, процесс выполнения проверки блоков МК обеспечивается на этапе запуска МК, а при выявлении сбоя вызывается системное прерывание для программного сброса МК (*soft reset*).

Выполнены тестовые исследования, которые выявили изменения регистров системы тактирования и таймера. Эти изменения могут служить причиной сбоя в работе МК. Реализованная функция контроля тактирования посредством прерывания в сторожевом таймере (Data Watchpoint and Trace unit) МК позволяет контролировать работу системы тактирования МК и в случае нарушения работы счетчика, выполнить программный сброс МК, после чего происходит запуск тестов «Блока мониторинга» из раздела загрузчика. Помимо реагирования на изменения в работе системы тактирования, сторожевой таймер способен отреагировать на зависания МК, когда указатель в стеке команд образует неконтролируемые циклические операции в ядре МК.

Использование программного резервирования не требует изменения номинальных значений электронных компонентов РЭС и использования дополнительного оборудования. Однако, в случае аппаратного (физического) повреждения МК, программное резервирование не позволяет восстановить работоспособность МК.

Таким образом, внедрение и использование аппаратного и/или программного резервирования позволяет повысить отказоустойчивость МК и снизить риски выхода его из строя от внешнего климатического и электромагнитного воздействия.

4.6 Алгоритм диагностики устройств и систем климатической экранированной камеры

Для оптимального использования службы диагностики ОСРВ и тестирования модулей КЭК, выполнена декомпозиция структуры КЭК (рисунок 4.29), что позволило провести рефакторинг объектно-ориентированной модели ПО КЭК (разд. 2) и выработать концепцию функционирования [93]. Результатом рефакторинга, являются структурированные алгоритмы, и снижение вероятности возникновения ошибок в процессе разработки и функционирования КЭК.

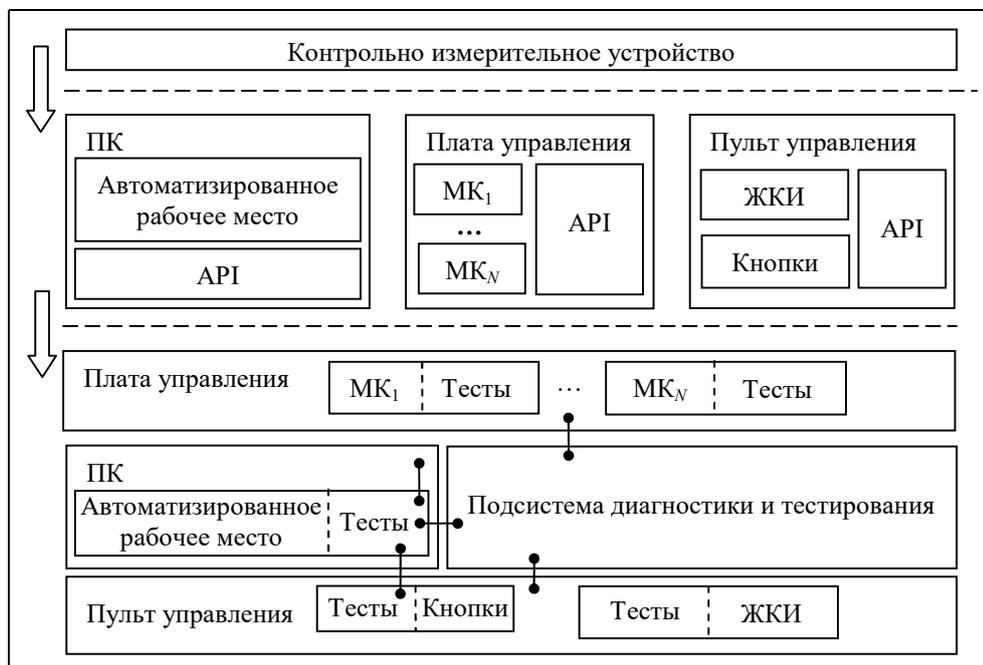


Рисунок 4.29 – Декомпозиция функциональной структуры ПО КЭК

Из рисунка 4.29 видно, что декомпозиция структуры ПО КЭК позволила выделить самостоятельные модули: «Автоматизированное рабочее место»; «Плата управления» ($МК_1$ – $МК_N$); «Пульт управления» (LCD, Keys); «Подсистема диагностики и тестирования». Каждый модуль представлен как набор функционально законченных блоков, выполняющих определенные задачи. Выполнена разработка групп тестов, для проведения различной «глубины» тестирования.

Первичное тестирование предполагает проверку основных элементов и устройств КЭК (ДТ, влажности, ЭМП, связь с периферийными устройствами) и выполняется перед каждым включением КЭК. Выборочное тестирование позволяет оператору посредством АРМ сформировать и выполнить произвольный набор тестов и проверить корректность взаимодействия программных модулей. Полное тестирование предполагает выполнение

комплексного тестирования всех узлов КЭЖ, в том числе калибровку ДТ, измерения влажности воздуха и др. Все функции рабочего режима выполняются на протяжении заданного промежутка времени. Так, изменяются параметры влажности и температуры в заданных пределах. Решение о запуске необходимого теста принимается оператором посредством ПО АРМ на ПК.

Для проверки корректности полученных данных с различных датчиков в ходе работы КЭЖ, разработан алгоритм первичного тестирования (рисунок 4.30). Алгоритм выполняет опрос всех датчиков по их адресам и считывает показания каждого. Результатом выполнения алгоритма является инициализация всех узлов и устройств КЭЖ. После опроса всех узлов и устройств отправляется сообщение на АРМ оператора и в «Control panel». Также в задачу первичного тестирования входит проверка исходных данных (параметров работы КЭЖ), введенных пользователем, а также проверка всех заполненных полей корректными значениями. Например, проверка ввода значения температуры в зоне размещения испытуемого объекта из диапазона от минус 50°C до 150°C.

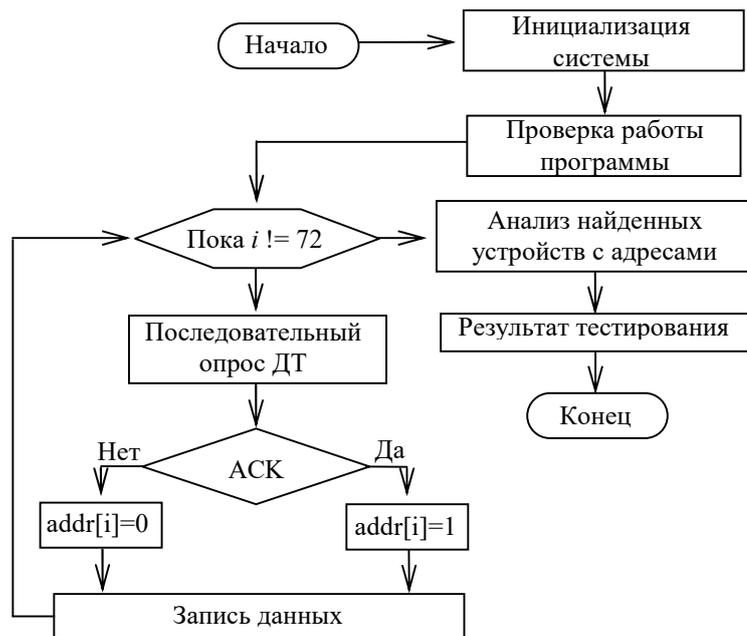


Рисунок 4.30 – Алгоритм предварительного тестирования системы КЭЖ

Поскольку одной из основных задач КЭЖ является контроль и удержание заданной температуры и влажности воздуха внутри ТЕМ-камеры, решение этой задачи выполняется каждым МК на плате управления. Тестирование работы данного модуля состоит в проверке значений датчиков температуры и влажности. В случае если показания одного ДТ сильно отличаются от остальных, то это воспринимается как сбой в работе КЭЖ. Для выявления подобных сбоев разработан алгоритм функционального тестирования климатической подсистемы КЭЖ (рисунок 4.31). В блоке «Процесс мониторинга» происходит контроль за

отклонением основных параметров КЭЖ. В случае превышения заданного отклонения происходит регистрация данного события (запись в лог-файл). При длительной работе ДТ возможны единичные сбои в показаниях. Это ошибочные данные, причинами появления которых могут служить высокая температура, электромагнитные помехи, высокая скорость считывания данных, или выход из строя датчика. Алгоритм воспринимает их как ошибочные и повторяет запрос на считывание данных. При этом регистрируются все ошибочные данные с датчиков. Однако если ошибочные данные повторяются в короткий промежуток времени, то система диагностики предупредит оператора КЭЖ о возникшей неполадке и остановит работу КЭЖ. Оператору в ПО АРМ доступен файл отчета, в котором содержится информация о сбое: адрес «проблемного» датчика и последние поступившие с него данные; время возникновения сбоя; и другая служебная информация.

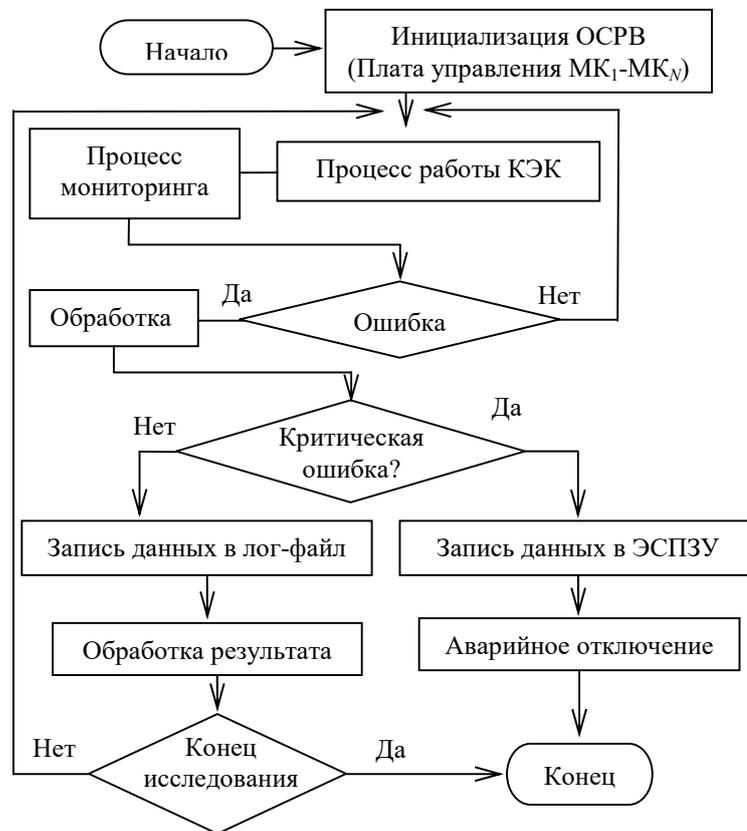


Рисунок 4.31 –Алгоритм функционального тестирования климатической подсистемы КЭЖ

Блок-схема алгоритма мониторинга датчиков представлена на примере датчика тока (рисунок 4.32) [94]. Так, измерения токов РП и ТЭП происходит в 3 этапа: инициализация; опрос датчиков тока; передача измеренных значений в ПК. Процесс инициализации состоит из настройки таймеров МК и объявления объектов экземпляра класса датчиков тока, четырех массивов для хранения результата опроса датчиков и времени, а также калибровки датчиков тока согласно методике [95]. Результаты последовательного опроса датчиков тока и вызова

функции *times* записываются в массивы, объявленные на этапе инициализации. В случае возникновения ошибки при чтении данных от одного из датчиков тока, программа прекращает работу и код ошибки передается в ПК. Передача данных, хранящихся в четырех массивах, осуществляется через последовательный интерфейс UART.

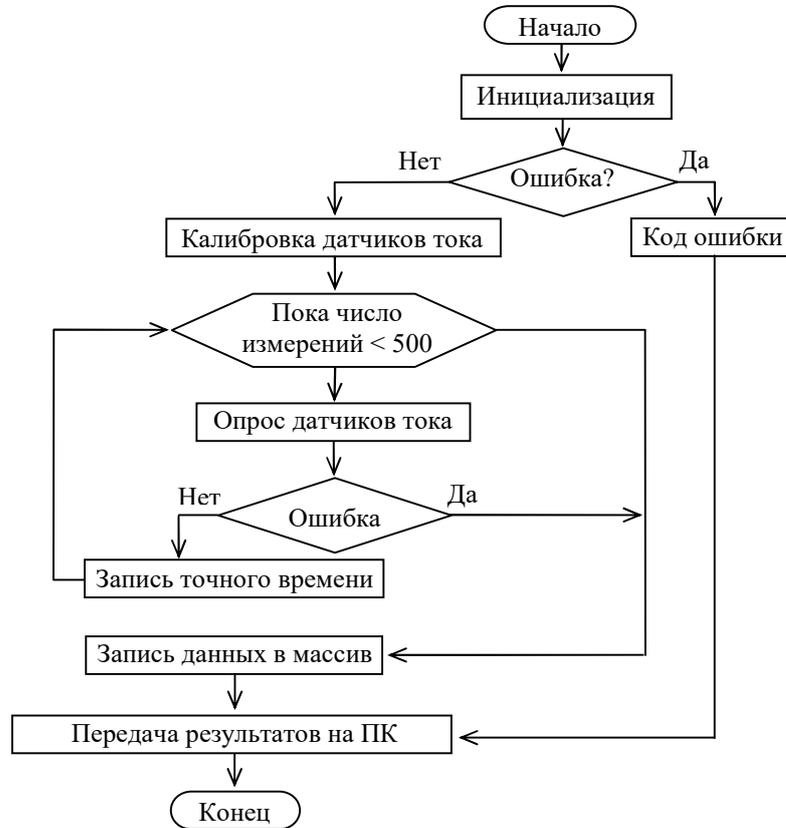


Рисунок 4.32 – Алгоритм мониторинга датчиков тока климатической подсистемы КЭЖ

4.7 Службы тестирования критически важных узлов и устройств климатической экранированной камеры

Для корректного функционирования различных критически важных узлов и устройств КЭЖ, должна быть предусмотрена возможность их тестирования до момента работы оператора с КЭЖ. Поскольку в качестве управляющей платформы на плате управления (МК₁–МК_N) используется ОСРВ, разработана служба тестирования, входящая в состав ОСРВ в качестве системной службы (рисунок 4.33). В отличие от задач (1 – N), служба ОСРВ может напрямую обращаться к ядру и другим службам ОСРВ. Также она способна работать в фоновом режиме с наивысшим приоритетом, в то время как выполняемые ею задачи контролируются диспетчером задач. Служба мониторинга ОСРВ предоставляет программный интерфейс приложениям АРМ оператора и функциям тестирования для оперативного вмешательства на произошедшие события, такие как: критический сбой; ошибка в процессе работы КЭЖ; отключение питания КЭЖ и др. Скорость реагирования важна для сохранения данных в памяти, регистрации сбоев и

своевременного выполнения комплекса мер по экстренному завершению работы КЭЖ. К событиям приводящим к экстренному завершению работы КЭЖ относятся: открытие дверей с испытуемым объектом; отключение напряжения питания РП и др. В результате, служба мониторинга является главным инструментом контроля состояния КЭЖ, принимающим и обрабатывающим информацию по внутреннему протоколу ОСРВ от различных устройств, реализованных в виде задач 1 – N (рисунок 4.33). Основными функциями службы мониторинга ОСРВ являются опрос состояния устройств, принятие решений в случае возникновения сбоя, хранение лог-файла, передача сообщений в прикладную программу на ПК и изменение конфигураций тестов и параметров периферийных устройств.

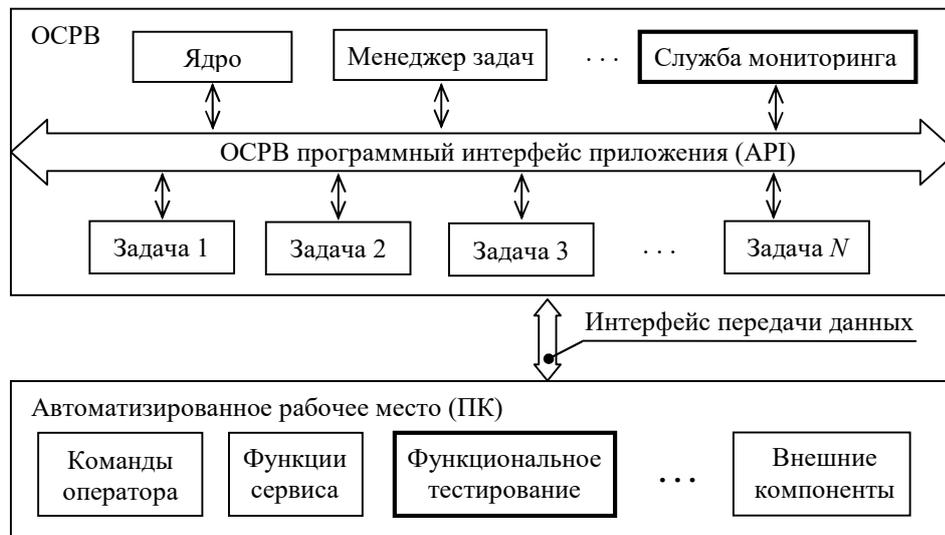


Рисунок 4.33 – Служба мониторинга КЭЖ входящих в составе ОСРВ

Работа службы мониторинга происходит в фоновом режиме, что позволяет ей функционировать независимо от других задач ОСРВ с высоким приоритетом. Служба вызывается по внутреннему прерыванию, что при возникновении сбоя позволяет ОСРВ отреагировать за минимальное время. Служба мониторинга проводит контроль диапазона параметров элементов, узлов и устройств. В случае возникновения сбоя в работе КЭЖ выполняет строго определенный порядок действий.

В задачи службы мониторинга входят проверки вводимой информации пользователем, работоспособности силовой части КЭЖ (анализ информации с датчиков тока и напряжения), подсистем КЭЖ (анализ информации с датчиков температуры и влажности КЭЖ), функционирования кнопок и сенсорного дисплея пульта управления; интерфейса связи между ВУ (МК, пульт управления, ПК) и формирование отчетов о проведенном тестировании КЭЖ.

Таким образом, служба мониторинга ОСРВ позволяет установить при выполнении какой именно задачи произошел сбой и определить его причину. Если тестирование при запуске КЭЖ

нацелено на проверку аппаратных средств, то служба мониторинга распознает программный сбой и ошибки в данных и управляющих сигналах, тем самым обеспечивая комплексного анализ состояния КЭК.

4.8 Основные результаты раздела

Предложены методика и алгоритмы тестирования и диагностики климатической подсистемы КЭК, позволяющие снизить риск возникновения сбоев в процессе её работы, повысить эффективность её функционирования и достоверность полученных результатов в процессе исследования компонентов и узлов РЭС на ЭМС.

Предложенные методы и разработанные алгоритмы восстановления и программной защиты памяти МК позволяют определить факт повреждения данных и восстановить их посредством «зеркалирования». Использование предложенных методов и алгоритмов позволяет повысить надежность и отказоустойчивость разрабатываемого устройства, а также позволит сократить время поиска неисправности в ПО МК.

Представлены комбинированные тесты для выявления сбоев в блоках МК. При их использовании выявлены изменения в памяти МК, что подтверждает эффективность разработанного метода тестирования посредством анализа данных МК.

Представлена служба тестирования ОСРВ, которая позволяет установить при выполнении какой именно задачи произошел сбой и определить, что послужило его причиной. Проведен рефакторинг ПО КЭК, что позволило структурировать (согласовать) алгоритмы тестирования и снизить вероятность возникновения ошибок. Это обеспечивает высокий уровень покрытия тестов и возможность комплексного анализа состояния КЭК.

Представлен способ восстановления данных флеш-памяти МК из резервной копии, расположенной в общей памяти МК, при использовании внешней ИС. Представлен способ выявления ошибок памяти МК посредством вычисления КС. Предложены и разработаны программное детектирование сбоев МК посредством разделения блоков и управления состоянием его памяти средствами ОСРВ. Разработан способ аппаратного и программного резервирования МК критичных РЭС с возможностью восстановлению их работы в случае сбоев.

Использование ОСРВ позволяет стабилизировать работу терморегулятора, снизить время отклика системы и выполнять в первую очередь задачи, имеющие более высокий приоритет. Разработаны алгоритмы тестирования КЭК и служба мониторинга ОСРВ, позволяющие обеспечить контроль работы систем КЭК.

Предложены методика и алгоритмы диагностики, мониторинга функционирования ОСРВ, позволяющие выявлять сбои в запущенной задаче ОСРВ и определять их причины. Высокий

уровень покрытия тестов и возможность комплексного анализа состояния КЭЖ обеспечивается проверкой аппаратных средств службой мониторинга, которая распознаёт программный сбой и ошибки в данных и управляющих сигналах.

Примечательно, что разработанная служба мониторинга может быть применена в критически важных системах, например, в системах контроля и управления блоками электропитания космического аппарата. Разработано ПО АРМ, позволяющее анализировать записи службы диагностики и результатов тестов, для определения причины возникновения сбоя в работе КЭЖ.

5 Реализация и тестирование методик и способов управления, контроля и диагностики элементов климатической экранированной камеры

В данном разделе представлены результаты предложенного способа синхронизации группы МК с разными архитектурами управления и функционирующих на разных системных частотах, с возможностью контроля их синхронной работы с общим периодом [28, 31]. Представлены результаты разработки трех методов управления многофазным управлением электропитанием групп ТЭП [79], отличающиеся способами их реализации с использованием одного МК [83], группы МК, связанных посредством ОСРВ [36] и с использованием ПЛИС [96]. Выполнено сравнение и выбор оптимального метода для её применения в терморегуляторе климатической подсистемы КЭК.

Представлена модель управления нагревом ТЭП посредством обученной модели ИНС ПИД-регулятора, позволяющая ускорить расчеты и сформировать качественный сигнал управления ТЭП в процессе регулирования температуры КЭК. Разработан пульт и модуль управления КЭК.

5.1 Синхронизация группы микроконтроллеров

5.1.1 Реализация и отладка метода синхронизации

Синхронизация работы группы МК помимо аппаратной части во многом зависит от системной частоты МК, числа выполняемых задач (синхронно/асинхронно) и длительности периода синхронной работы. Задача синхронизации сводится к минимизации времени срабатывания между первым и последним МК, объявивших о готовности к синхронной работе.

Разработано ПО «Симулятор синхронизации группы МК» [97] для измерения интервалов времени с момента начала работы до момента готовности к синхронной работе каждого МК, позволяющее оценить реальное время синхронной работы по разработанному способу синхронизации (разд. 3). Главное окно ПО с графическими элементами управления представлено на рисунке 5.1. Функции симулятора разделены на два блока. В первом блоке происходит вычисление числа синхроимпульсов для каждого МК (рисунок 5.1а), и во втором выполняется симуляция работы группы МК (рисунок 5.1б). Симулятор позволяет вычислить период (временной интервал) синхронной работы группы МК. В процессе работы симулятора ведётся логирование (регистрация) переходных состояний и временных интервалов между сигналами, что позволяет анализировать результаты вычислений для оптимизации синхронной работы группы МК.

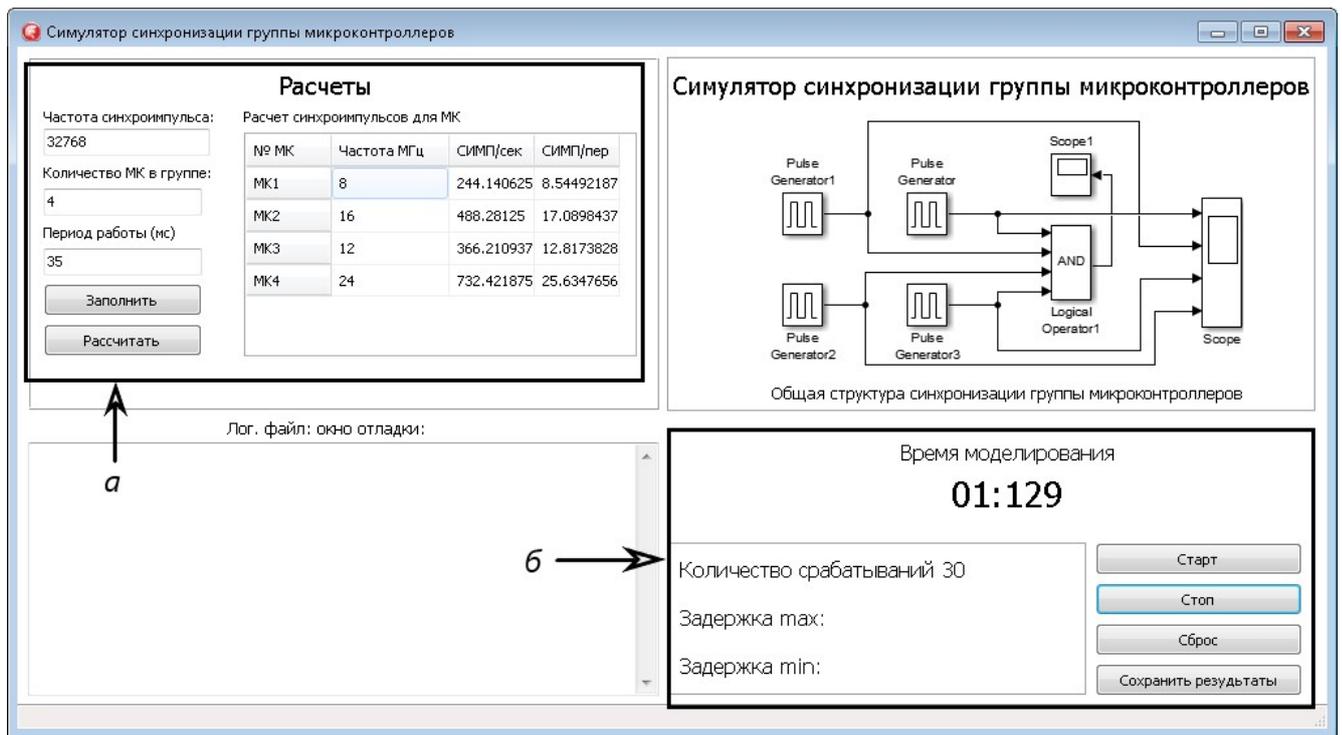


Рисунок 5.1 – Симулятор синхронизации группы МК: блок вычисления коэффициентов (а) и результаты моделирования синхронной работы группы МК (б)

Вычисление временных интервалов для группы МК происходит с момента запуска симулятора, позволяющего верифицировать и оптимизировать алгоритм без необходимости разработки программного кода МК, и сократить время разработки РЭС. В качестве исходных данных вводится длительность периода синхронной работы (мс), тактовая частота и число МК в группе. Вычисление оптимального числа синхроимпульсов в секунду (СИМП/с) для каждого МК происходит, основываясь на частотах ВТГ и МК.

Рассчитанное число синхроимпульсов за указанный период синхронной работы (СИМП/пер) используется счетчиком МК для определения момента начала общей работы вызовом внутреннего прерывания и поднятием флага «старт» в коде МК. Запуск работы симулятора позволяет проверить вычисленные значения коэффициентов. Это позволяет контролировать длительность синхронной работы группы МК, выполняющих общую работу.

На основе полученных результатов симуляции ведется регистрация данных для каждого МК: подсчет принятых синхросигналов, время начала и окончания общей работы, максимальное и минимальное число СИМП/пер с начала периода и заканчивая последним МК синхронизируемой группы, число срабатываний синхронной работы. Основываясь на полученных данных, в симуляторе формируется файл отчета, содержащий информацию о работе МК за период симуляции. Полученные данные можно сохранить в файл на ПК (с расширением *.txt). Для этого предусмотрена кнопка «сохранить результаты». Это позволяет

выполнить подробный анализ результатов вычислений для оптимизации синхронной работы группы МК. При этом симулятор ограничен в возможностях и не может выполнять работу с точностью, сопоставимой с реальным МК, поскольку набор команд ПК и МК различаются по архитектуре, скорости выполнения и ряду других характеристик. Кроме того, невозможно предусмотреть все факторы работы кода в МК. Помимо реализации алгоритма синхронизации в МК есть другие функции и задачи, которые могут влиять на результат его работы. Эффективно управлять (распределять) ресурсами МК способны операционные системы жесткого реального времени, в которых управление задачами МК осуществляется планировщиком (диспетчером задач), главным назначением которого является выделение равных интервалов времени и ресурсов МК для задач в соответствии их приоритету и контроль длительности синхронной работы группы МК.

Разработан алгоритм работы каждого МК в группе (рисунок 5.2). Предложенная система синхронизации была использована в работе над платой терморегулятора КЭК для эффективного управления температурой поверхности ТЕМ-камеры при синхронной работе 4 МК. Способ использован для обеспечения синхронного нагрева, контроля длительности работы группы ТЭП, принадлежащих одной фазе, и своевременного (согласованного) переключения управления между фазами питания.

В качестве ВТГ синхроимпульсов использована ИС прецизионных ЧРВ DS3231. Схема имеет два выхода с тактовым сигналом. Первый генерирует сигнал с частотой 32,768 кГц, а второй позволяет генерировать сигнал из диапазона частот 1 Гц–8,192 кГц. Выход ЧРВ с частотой сигнала 32,768 кГц подключен к группе МК («Порт А»), поддерживающих обработку внешних прерываний. Структурная схема платы терморегулятора (рисунок 3.2) включает 4 МК ATmega2560, ТЭП, ДТ и аппаратно-программные средства синхронизации (ЧРВ, логический элемент «И»). Тестирование кода МК выполнено в САПР Proteus Design Suite [98].



Рисунок 5.2 – Алгоритм работы каждого МК в группе

5.1.2 Тестирование метода синхронизации

Разработаны алгоритм и ПО для синхронизации группы МК по схеме «Master-Slave» для реализации способа из подраздела 3.2. На первом этапе работы алгоритма выполняется процесс инициализации (объявление переменных, инициализация счетчика сигналов синхронизации, настройка внешнего прерывания). В процессе настройки внешнего прерывания задается адрес ВТГ на шине I²C и выполняется настройка частоты синхронизации ведущим МК (Master). При успешной инициализации, каждый МК подсчитывает число синхроимпульсов от ВТГ. При достижении требуемого числа начинается синхронная работа МК.

Для апробации алгоритма разработан макет устройства синхронизации группы МК, выполняющих синхронную работу по управлению ТЭП посредством сигналов ШИМ. При окончании периода синхронной работы, когда счетчик сигналов синхронизации достигнет

заданного числа синхроимпульсов, на выводе $RCNT_n$ МК инвертируется сигнал логического уровня. Это вызывает прерывания у всех МК синхронизируемой группы. Тестирование предложенного способа синхронизации выполнено на устройстве с двумя МК компании Atmel и двумя СМК от компании Espressif Systems. МК и СМК спроектированы на разной архитектуре и функционируют на разных системных частотах (таблица 5.1). В качестве ВТГ использована ИС ЧРВ DS3231, которая имеет вывод SQW/INT, поддерживающий тактирование на разных частотах (1 Гц – 8,192 кГц), и отдельный вывод с частотой сигнала 32,768 кГц.

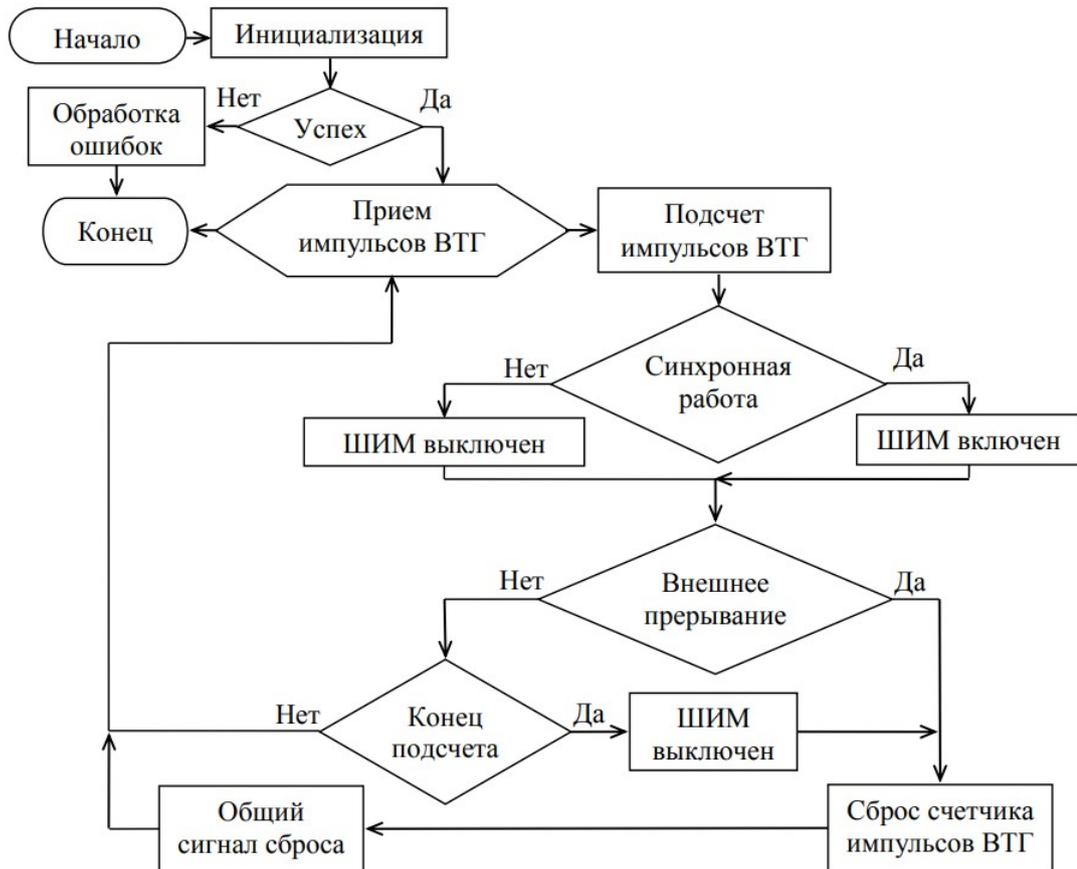


Рисунок 5.3 – Алгоритм синхронизации МК по схеме «Master-Slave»

Таблица 5.1 – Синхронизируемые МК и СМК с разной разрядностью и системными частотами

МК	Разрядность (бит)	Системная частота (МГц)
ATmega328	8	8
ATmega2560	8	16
Espressif Tensilica L106	32	40
Espressif Tensilica LX6	32	240

Выполнено измерение выходных сигналов ШИМ МК при помощи двухканального осциллографа Keysight EDUX 1002G. Проведено сравнение выходных сигналов МК ATmega2560 и СМК Tensilica L106 и LX6 с выходным сигналом ATmega328 (Рисунок 5.4). Из рисунка видно, что МК ATmega328 и ATmega2560 согласованно начинают и заканчивают

общую задачу в течение заданного промежутка времени. Аналогично сравнивались СнК Tensilica L106 и LX6 с МК ATmega328. При этом МК ATmega328 первым начал выполнять задачу (завершил подсчёт сигналов синхронизации ВТГ) (рисунок 5.5а), а решение об окончании времени работы принято МК ATmega2560, о чём свидетельствует сокращение длительности последнего импульса на выходе ATmega328 (рисунок 5.5б).

На рисунке 5.6а показано как СнК Tensilica LX6 выполняет инструкцию, отличную от выполненной ATmega328. В частности, сигнал ШИМ на выходе Tensilica LX6 имеет более высокую частоту и больший коэффициент заполнения.

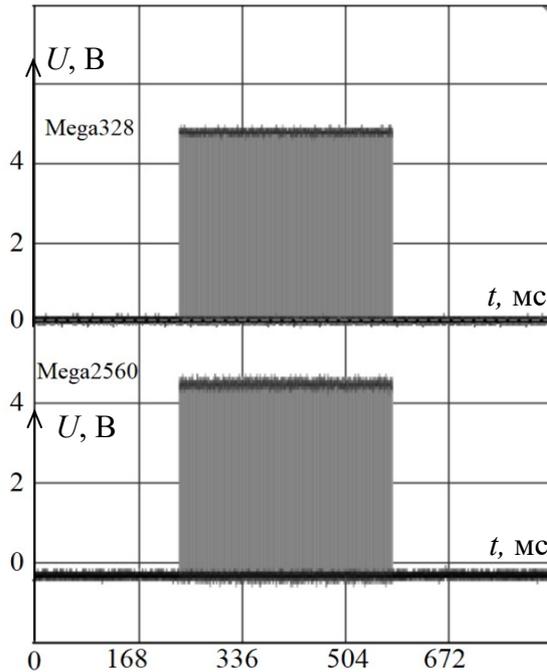


Рисунок 5.4 – Осциллограммы выходного напряжения при синхронной работе МК ATmega328 и ATmega2560

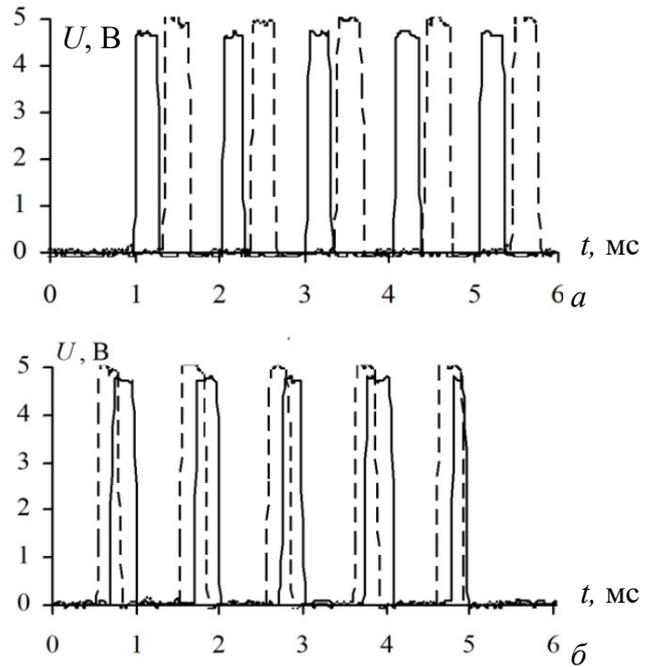


Рисунок 5.5 – Выходной сигнал ATmega2560 (- - -) и ATmega328(—) при начале (а) и окончании (б) синхронной работы

Выявлено, что период работы СнК с большей производительностью оказался на $\sim 1,5$ мс продолжительнее (рисунок 5.6б) периода работы остальных МК, работающих на более низкой частоте (ATmega328 и ATmega2560). Это вызвано тем, что более производительный СнК успевает обработать большее число машинных инструкций и раньше заканчивает подсчёт сигналов синхронизации, а также первым выдаёт команду на завершение периода синхронной работы.

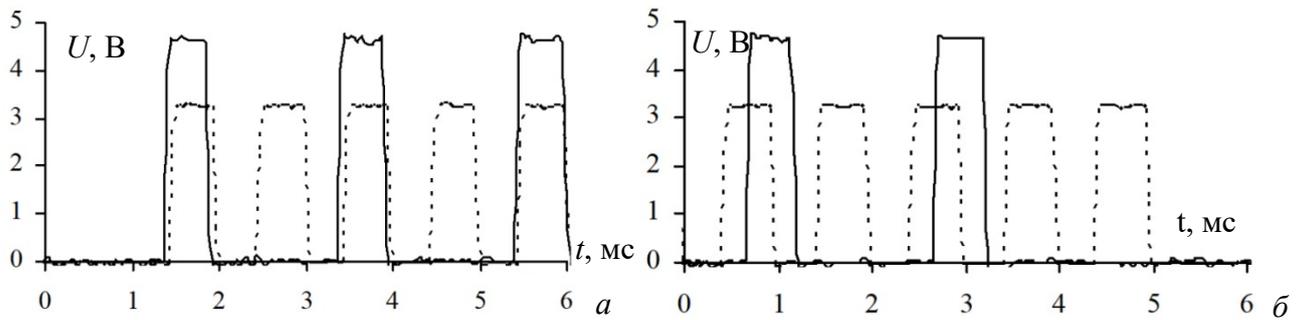


Рисунок 5.6 – Выходной сигнал ШИМ: начало (а) и окончание (б) синхронной работы для СнК Tensilica LX6 (- - -) и МК ATmega328(—)

Поскольку выходной сигнал ШИМ ATmega328 имеет вдвое больший период, последний импульс не успевает появиться, что приводит к подобному результату. Таким образом, результаты тестов показали эффективность разработанного способа синхронизации.

5.2 Многофазное управление электропитанием термоэлектрических преобразователей

5.2.1 Многофазное управление на базе микроконтроллера

Используя разработанный алгоритм (раздел 3, рисунок 3.9) и многофазное управление электропитанием ТЭП, разработан терморегулятор, входящий в климатическую подсистему КЭЖ. Управление электропитанием ТЭП происходит посредством сигналов ШИМ от МК через РП, позволяющий регулировать средний ток, протекающий через каждый ТЭП. В терморегуляторе реализован многофазный режим (5 фаз) управления электропитанием ТЭП (рисунок 5.7). В МК предусмотрены режимы работы «быстрый ШИМ» и «ШИМ с точной фазой», от выбора которых зависит форма управляющего сигнала ШИМ.

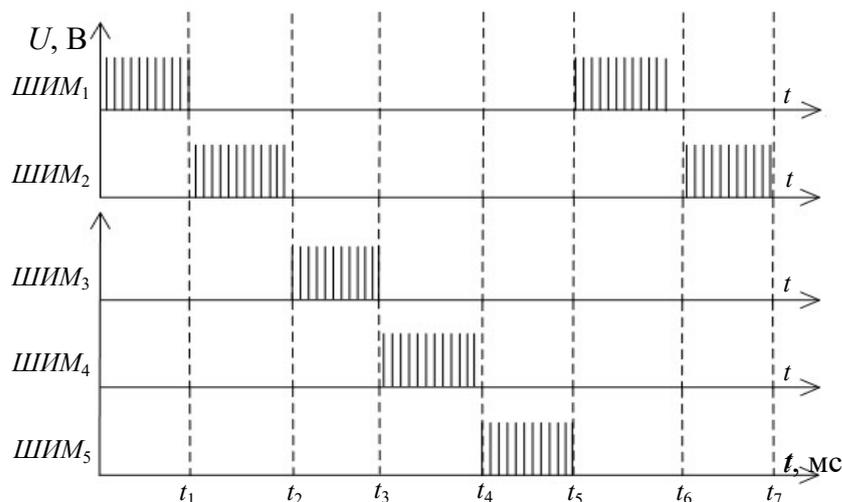


Рисунок 5.7 – Временная диаграмма пятифазного сигнала ШИМ

Для импульсных источников электропитания лучше подходит режим работы «ШИМ с точной фазой», поскольку во время изменения скважности сигнала ШИМ не происходит сдвига фазы, которую нельзя контролировать в режиме «быстрый ШИМ» (рисунок 5.8). При этом максимальная частота сигнала ШИМ снижается вдвое за счет особенности работы счетчика в режиме «ШИМ с точной фазой». Так, в режиме «быстрый ШИМ» счетчик сбрасывается при совпадении его значения с регистром сравнения таймера, а в режиме «ШИМ точной фазы» счетчик работает до совпадения с регистром сравнения таймера, и только потом проводит обратный отсчет.

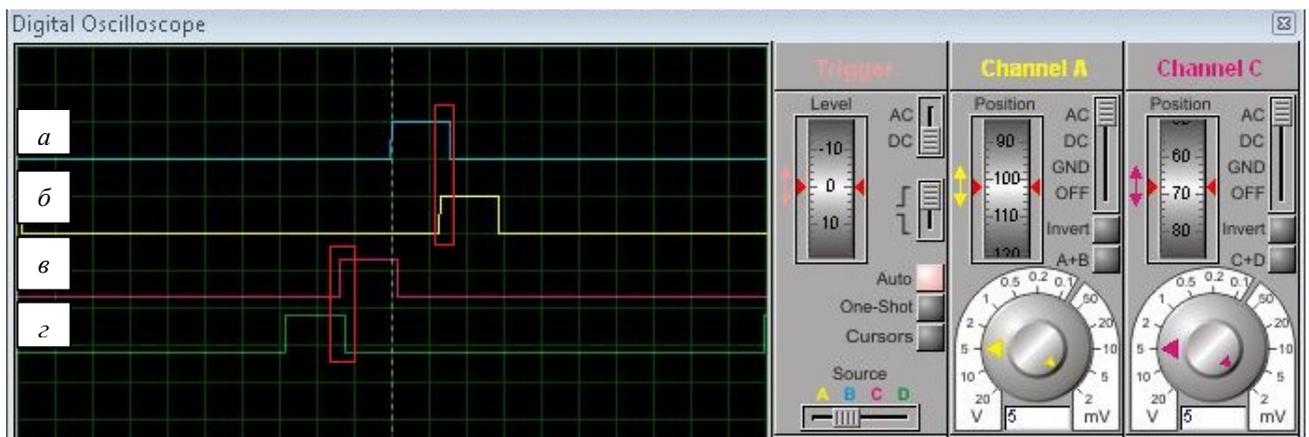


Рисунок 5.8 – Сдвиг фаз сигналов ШИМ: канал б начинает работу во время работы канала а, а канал в начинает работу во время работы канала г

МК ATmega 2560 обладает 5 аппаратными таймерами, что позволяет настроить управление каждым таймером от отдельной фазы. В МК ATmega2560 два 8-разрядных и три 16-разрядных таймера, которые позволяют задать счетчик таймера равным 65535. Для представления общего периода работы всех сигналов ШИМ. Частота ШИМ сигнала в режиме коррекции фазы рассчитывается как:

$$f_{oc\text{nxPCPWM}} = \frac{f_{clk\ I/O}}{N \times 510}, \quad (5.1)$$

где $f_{clk\ I/O}$ – рабочая частота МК, N – коэффициент делителя частоты сигнала ШИМ, который может принимать значения 1, 8, 64, 256 и 1024.

В терморегуляторе все МК работают на частоте 16 МГц, а коэффициент делителя равен 1. В результате, сигнал ШИМ терморегулятора работает на частоте 31,372 кГц. Для моделирования 5-фазного сигнала ШИМ разработана программа на языке Си. Настройки таймера *Timer1* представлены на рисунке 5.9.

```
TCCR1A=(1<<COM1A1) | (0<<COM1A0) | (0<<COM1B1) | (0<<COM1B0) | (0<<COM1C1) |
(0<<COM1C0) | (1<<WGM11) | (1<<WGM10);
TCCR1B=(0<<ICNC1) | (0<<ICES1) | (0<<WGM13) | (0<<WGM12) | (0<<CS12) | (0<<CS11) |
(1<<CS10);
```

```

TCNT1H=0x00;
TCNT1L=0xFF;
OCR1AH=0x00;
OCR1AL=0x7F;

```

Рисунок 5.9 – Листинг настройки таймера *Timer1*

Для обеспечения работы 5-фазного сигнала ШИМ все таймеры МК сконфигурированы в режиме «точной фазы» с верхним счетчиком равным 1023. Для тактирования выбран внешний кварцевый резонатор 16 МГц. Время периода таймера 127,88 нс. В качестве управляющего сигнала в таймерах использованы «каналы А». После распределения максимального числа тактов между пятью таймерами, время работы каждого таймера уменьшилось до 204 тактов, которое является максимальным периодом работы каждого таймера. Начальные значения счетчиков таймеров приведены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Начальные значения счетчиков таймеров

Номер таймера	1	2	3	4	5
Начальное значение	0x00	0xCC	0x198	0x264	0x330

Создан макет терморегулятора, содержащий 4 МК ATmega2560, ЖКИ WINSTAR WH1604b, 64 ДТ МАХ31725 и 60 ТЭП. Управление ТЭП осуществляется при помощи РП, управляемых сигналами ШИМ при помощи алгоритма ПИД-регулятора в МК. Структурная схема терморегулятора приведена на рисунке 5.10.

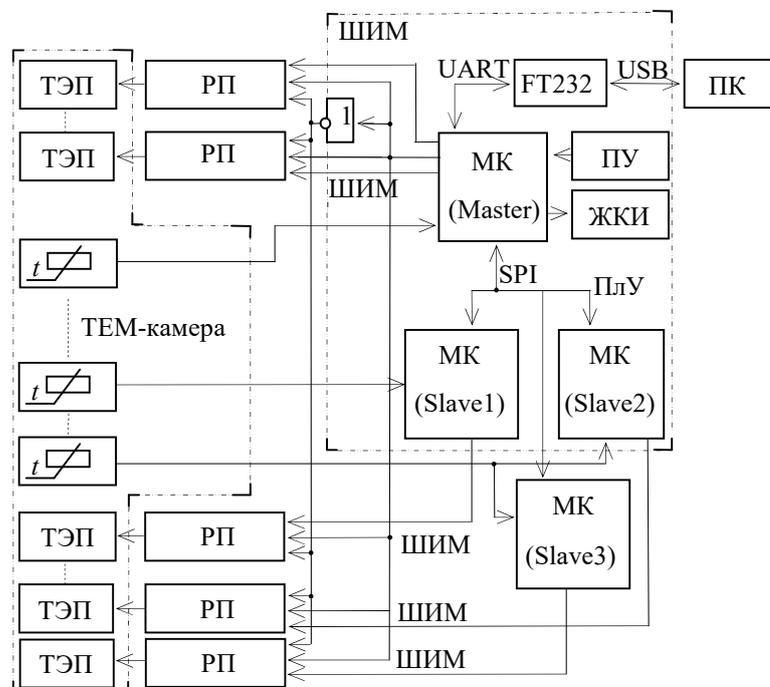


Рисунок 5.10 – Структурная схема терморегулятора

5.2.2 Многофазное управление на базе микроконтроллера с использованием операционной системы реального времени

Время обработки каждой задачи МК различно и зависит от объема входных данных и числа функций. Это может являться причиной появления в ПО критических участков, в результате появления которых возрастает загруженность системы и время обработки задач может быть увеличено, что повлияет на качество работы терморегулятора, а именно: на время расчета управляющего сигнала ШИМ. Кроме того, качество работы терморегулятора во многом зависит от используемого МК, скорости опроса ДТ и их числа и др. Для многофазного управления большим числом ТЭП, в ПО надо с высоким приоритетом, по отношению к остальным, задачам считывать и обрабатывать данные с ДТ, а также проводить расчет сигнала управления используя алгоритм ПИД-регулятора. Поэтому в ПО терморегулятора добавлена ОСРВ (рисунок 5.11).

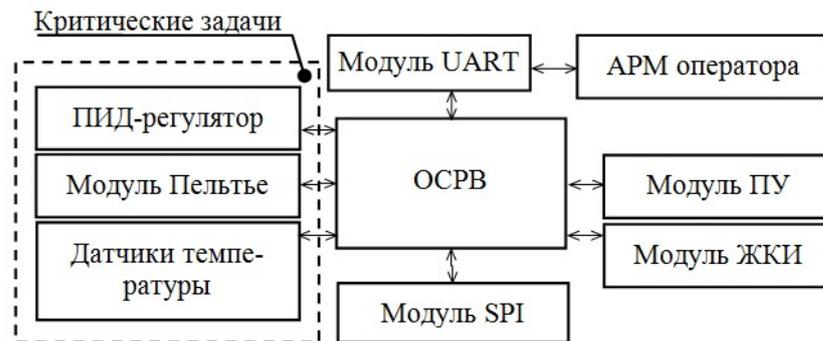


Рисунок 5.11 – Структура ПО терморегулятора с добавленной ОСРВ

В ОСРВ любая задача объявлена в виде процедуры, с содержащей приоритет задачи и её статус (рисунок 5.12). Работа каждого модуля терморегулятора объявлена в виде задач ОСРВ, что способствует быстрому выполнению критических задач терморегулятора. К таким задачам относятся опрос ДТ, расчет ПИД-регулятором сигнала ШИМ и контроль продолжительности работы (нагрев/охлаждение) ТЭП в определенной фазе. При этом механизм, контролирующий переключение (нагрев/охлаждение) ТЭП, исключает возможность работы более одной фазы питания за один период времени.

```

1 void create_task(void(*t)(), char pri, enum StateTask|st)
2 {
3     if(init_tasks >= MAXTASKS) return;
4     save_reg(t, tasks[init_tasks].cpu_state);
5     tasks[init_tasks].pri = pri;
6     tasks[init_tasks].current_pri = pri;
7     tasks[init_tasks++].st = st;
8 }

```

Рисунок 5.12 – Листинг процедуры создания задачи

Используя разработанную схему терморегулятора (рисунок 5.10) и доработанную структуру ПО, разработан и создан лабораторный макет терморегулятора с двумя РП и ТЭП, работающий с пятифазным сигналом ШИМ (рисунок 5.13). Управление аппаратным таймером в ОСРВ реализовано в виде задачи. Отсчет периода времени эквивалентный единице времени работы устройства, позволяет достичь минимального временного интервала ~ 20 мкс при тактовой частоте ядра МК 16 МГц. При этом часть системного времени тратится на нужды ОСРВ (диспетчер задач, система обработки прерываний, управление памятью), что может привести к снижению производительности системы из-за частого переключения между задачами. Реализовано 8 тестовых задач, создающих эффект загруженности системы, для получения результатов, максимально приближенных к режиму работы КЭЖ. Время выполнения и число функций для каждой задачи различались. Влияние оператора при работе терморегулятора учитывалось нажатием на кнопки, которые имитировали вызов и навигацию по основным и вспомогательным пунктам меню, а также изменением коэффициентов в ПИД-регуляторе и значений температуры. Результаты выполнения тестовых задач показали удовлетворительную работу терморегулятора с ОСРВ (рисунок 5.13).

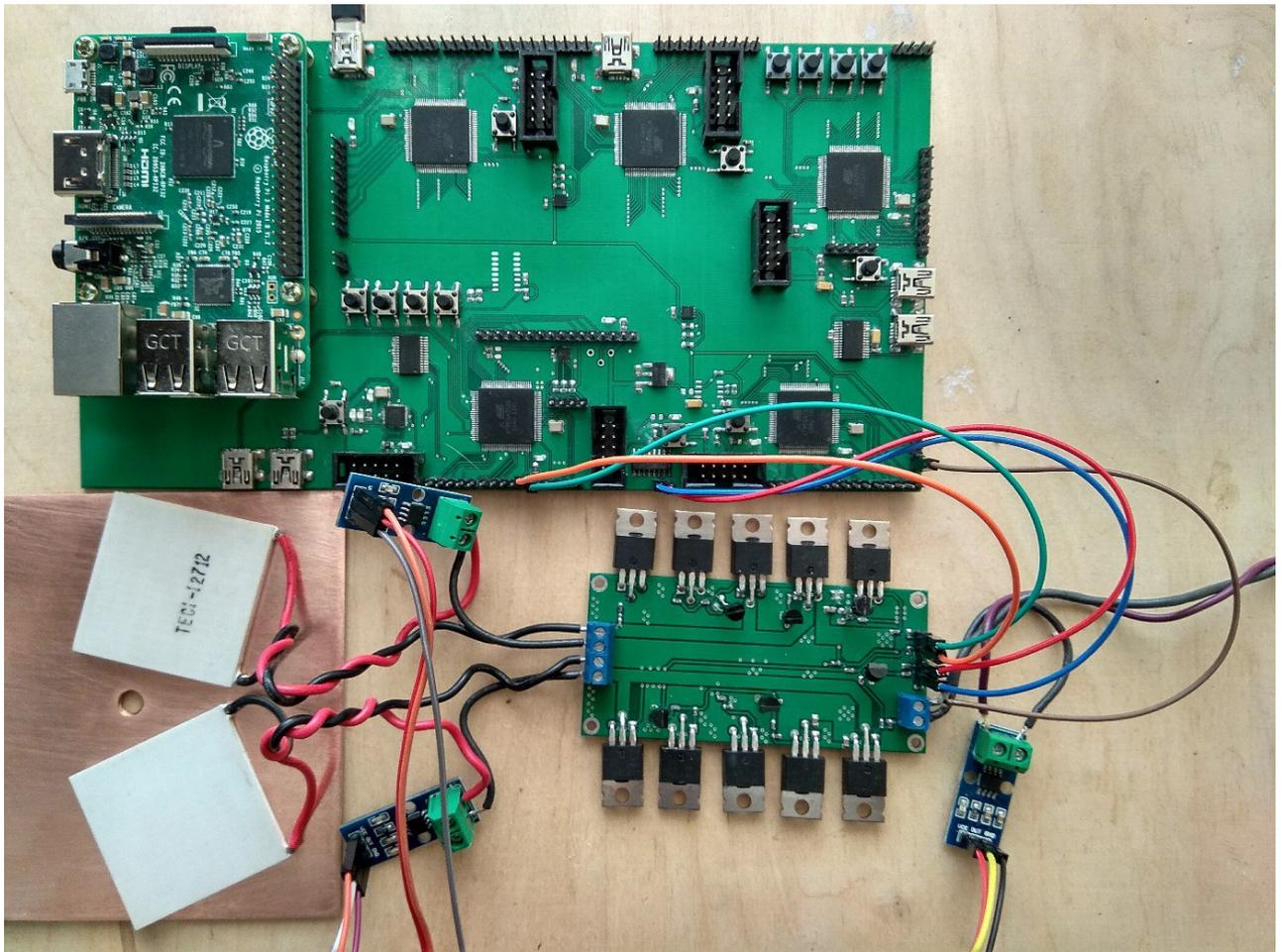


Рисунок 5.13 – Вид лабораторного макета терморегулятора с двумя РП и ТЭП

Выполнены экспериментальные исследования работы многофазного управления сигналами ШИМ в ОСРВ. Проведено сравнение работы алгоритма многофазного управления ТЭП с многозадачной ОСРВ *mRTOS* и без неё. Получена стабильность работы с хорошей частотой отклика ОСРВ при решении поставленных задач. В качестве результатов тестирования приведены осциллограммы работы терморегулятора, на которых видна стабильность управляющих импульсов сигнала ШИМ (рисунки 5.14а, 5.14б), тактирования ОСРВ (рисунок 5.14в) и отсутствие работы более одного ШИМ сигнала в один такт системного времени (рисунок 5.14). Периоды двух каналов ШИМ равны по длительности и периоду сигнала (рисунок 5.15).

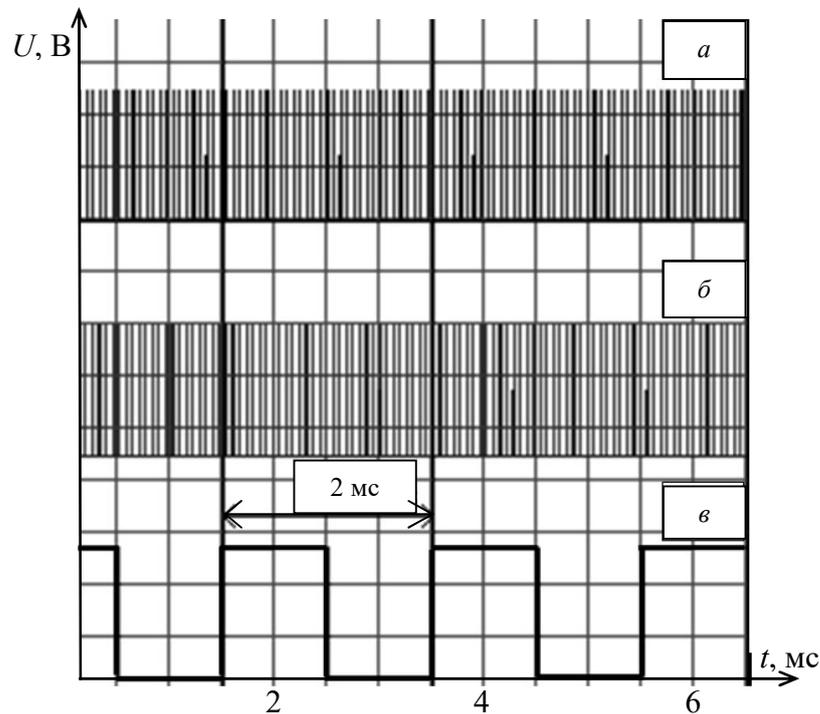


Рисунок 5.14 – Сигналы ШИМ (а, б) и тактовый сигнал ОСРВ (в)

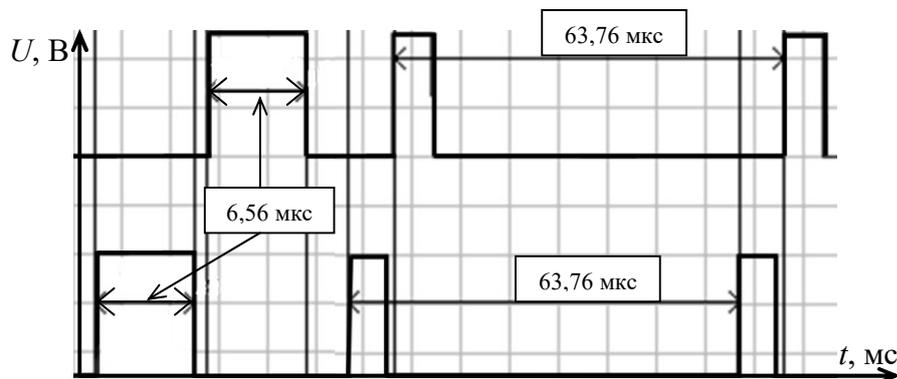


Рисунок 5.15 – Временные интервалы двух каналов ШИМ

На временных диаграммах работы терморегулятора без использования ОСРВ (рисунок 5.16) замечено рассогласование фаз работы ШИМ. Так, длительности периода работы каналов различаются на 3 мкс, что отрицательно сказывается на работе терморегулятора. Это

снижает стабильность работы и может привести к непредсказуемым последствиям поведения всей системы. Поэтому для устранения подобных ошибок в работе ШИМ, при разработке КЭК применялась ОСРВ, для выполнения многозадачности.

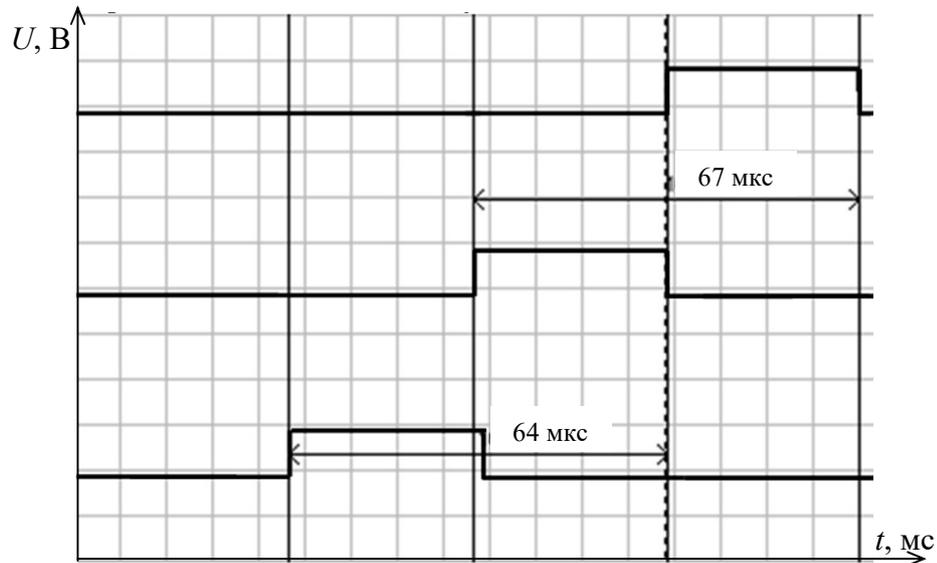


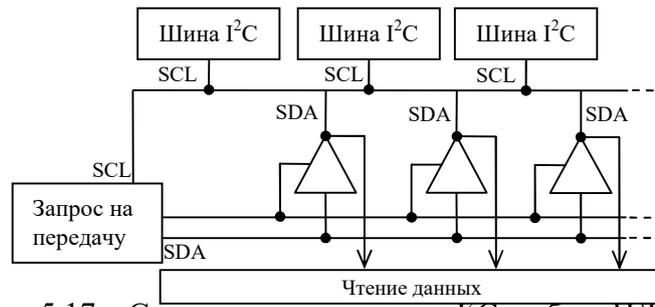
Рисунок 5.16 – Два канала сигналов ШИМ без использования ОСРВ

5.2.3 Многофазное управление на базе программируемой логической интегральной схемы

Здесь приведены предлагаемые программные решения для управления ТЭП, основанные на использовании МК в качестве ВУ. Так, использование ПЛИС в качестве ВУ для терморегулятора позволяет сформировать гибкую вычислительную архитектуру, связанную с ограничением аппаратной платформы МК и способную оптимально решить поставленные задачи.

Разработан терморегулятор для КЭК на базе ПЛИС. Выполнена реализация интерфейса I²C для взаимодействия с ДТ. Адреса ДТ задаются аппаратно посредством подключением контактов ДТ к источнику питания или общему проводу. Это позволяет использовать до 32 различных адресов ДТ на шине I²C.

Использованы 2 шины I²C для считывания данных с 52 ДТ с максимальной частотой шины 400 кГц (125 мкс на один ДТ). На рисунке 5.17 представлена структура опроса ДТ с использованием контроллера I²C.

Рисунок 5.17 – Структура контроллера I²C на базе ПЛИС

Для управления операциями над данными (чтение/запись) разработано логическое ядро ПЛИС для вычисления коэффициентов ПИД-регулятора на базе умножителей [18×18] бит. Используя 4 множителя и логические элементы (регистры и lookur таблицы) разработан множитель-накопитель, размером [36×36] бит и емкостью 72 бита. Структура полученного АЛУ представлена на рисунке 5.18. Это логическое ядро позволяет проводить суммирование по (1.15) для вычисления сигнала управления ТЭП.

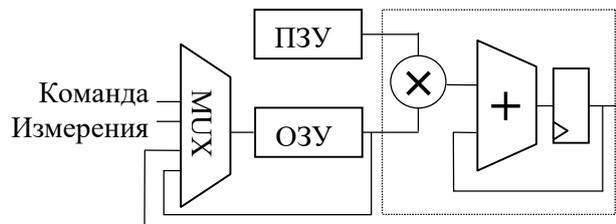


Рисунок 5.18 – 36-разрядное ядро в АЛУ с областями памяти для ОЗУ и ПЗУ

На первом входе АЛУ размещён блок ПЗУ, предназначены для чтения и содержащий 128 слов по 36 бит. ПЗУ хранит параметры α , β , γ , a и b из (1.15) для каждого ТЭП (5×24). Итого 120 значений и 8 специальных значений в конце. На втором входе АЛУ размещён блок ОЗУ, содержащий также 128 слов по 36 бит. В нем хранятся переменные $\varepsilon_{(n-2)}$, $\varepsilon_{(n-1)}$, $\varepsilon_{(n)}$, $k_{(n-2)}$, $k_{(n-1)}$ для каждого ТЭП. Вход этого блока управляется 4 канальным мультиплексором (MUX), на первый канал которого поступают данные с выхода ОЗУ, а именно управляющие адреса. Это позволяет копировать значения из ОЗУ. На второй канал поступают данные с выхода всего АЛУ. Третий канал входа данных измеренной температуры с контроллера шины I²C. Четвертый канал – вход для задания значений температуры на поверхности ТЕМ-камеры.

Для вычисления температуры поверхности ТЕМ-камеры, создаваемой одним ТЭП, надо рассчитать среднее значение для температурных измерений ДТ. Измерения температуры контроллером шины I²C хранятся в памяти данных *TEMP_MEM*. Затем в эту память записываются данные, которые подключены к третьему входу мультиплексора. Контролируя адрес считывания *TEMP_MEM*, ядро может получить доступ к данным температуры,

измеренной ранее. Поскольку ПЛИС работает на частоте 50 МГц, один проход алгоритма ПИД-регулятора длится 480 нс, а 24 прохода примерно 12 мкс.

Разработан контроллер терморегулятора КЭК, задачами которого является контроль и управление процессами вычисления сигнала для ОУ, опрос ДТ, передача данных в УУ и др. (Рисунок 5.19). В центре контроллера находится блок памяти *PROG_MEM*, который хранит все его функции (опрос ДТ, вычисление ПИД-регулятора и др.).

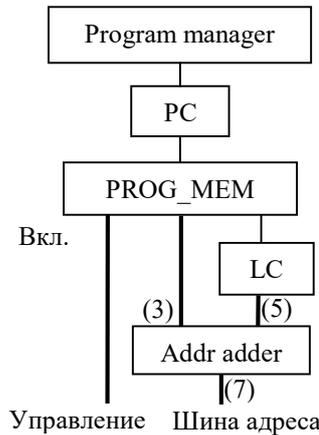


Рисунок 5.19 – Структура контроллера терморегулятора КЭК

Каждое слово памяти – это инструкция, которая непосредственно состоит из управляющих архитектурой сигналов, за исключением адресной шины. Адресная 7-битная шина, управляющая операциями чтения и записи адресных данных (7 бит достаточно для обращения к 128 словам ПЗУ/ОЗУ), определяется 3 сигналами, поступающими от *PROG_MEM* и 5 сигналами, поступающими от 5-битного счетчика с именем *LC*, включающегося сигналом от *PROG_MEM*. Работа 24 подсистем управляется программным счетчиком *LC*, который управляется модулем под названием *Program manager*.

Разработан внешний интерфейс UART для взаимодействия с ПЛИС, необходимый для отладки терморегулятора, мониторинга его работы, запуска и остановки работы ПЛИС и установки температурного режима терморегулятора. Для передачи данных из ОЗУ ПЛИС на ПК используется модуль UART.

В результате, используя одну и ту же архитектуру, имеется возможность отправлять любые данные, которые могут потребоваться в процессе работы или отладки терморегулятора КЭК. Для тестирования разработаны программы управления ТЭП. Процесс выполнения тестовых задач, выполняемые синхронно (параллельно) с работой генератора сигналов ШИМ для управления группой ТЭП в многофазном режиме, представлены на рисунке 5.20, а блок-схема этих задач – на рисунке 5.21. Результаты тестов показали, что сначала, запускается контроллер I^2C для опроса 52 ДТ. Далее, запускается программа ПИД-регулятора, для вычисления скважности управляющего сигнала ШИМ, а после этого система ожидает окончания работы

активной фазы группы сигналов ШИМ, чтобы начать следующей фазу работы. Параллельно работе генератора сигналов ШИМ выполняется процесс передачи данных 52 измерений температуры выполненных на предыдущем цикле опроса ДТ по интерфейсу UART.



Рисунок 5.20 – Временная диаграмма выполнения тестовых задач

Поскольку внутренние задачи работают быстрее, чем контроллер I^2C , программа обладает достаточным запасом по времени, чтобы отправить имеющиеся результаты измерений, прежде чем они будут перезаписаны. После этого другая программа посылает 24 команды предыдущего цикла работы ПИД-регулятора, считывая их из ОЗУ (рисунки 5.21, 5.22). Для достижения этого, надо соблюдать некоторые временные ограничения. Так, считывание данных ДТ и расчет ПИД-регулятора должны быть закончены до окончания цикла работы ШИМ, иначе это продлит период работы группы сигналов ШИМ одной из фаз. Программы передачи данных должны завершить работу до окончания считывания ДТ, иначе команда вычисления сигнала управления ПИД-регулятора (функционального блока) не сможет вовремя начать работу.

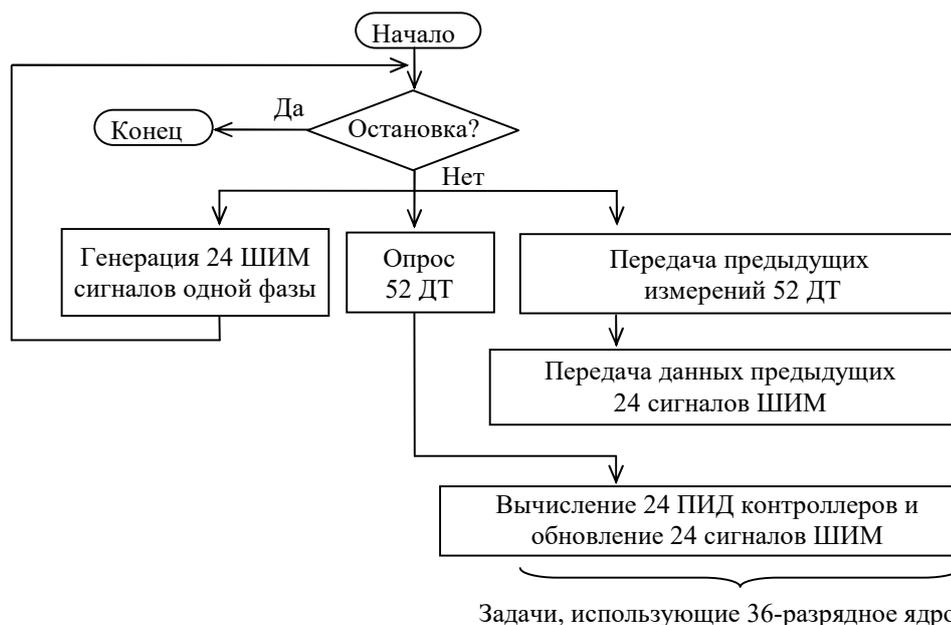


Рисунок 5.21 – Блок-схема задач, выполняемых за один период работы ШИМ

Для подтверждения выполненных расчетов выполнены экспериментальные измерения уровней сигналов ПЛИС, (рисунок 5.22). Измерения по I²C проводились на максимальной частоте 2 кГц. Полный цикл начинался в момент времени t_0 и заканчивается – t_7 ($t_7 - t_0 = 500$ мкс). Первые 4 сигнала это сигналы ШИМ одной из фаз. Сигнал «флаг запуска программы» указывает, когда программа запущена. При t_0 первая программа начинает опрашивать ДТ, а при t_2 она заканчивает работу. При этом начинает работать вторая программа до момента времени t_4 . Это отражено на сигнале UART TX, используемом для отправки значений данных. При этом UART активен только в то время, когда эти две программы работают. В это же время опрашиваются ДТ начиная с t_0 и заканчивая в t_5 (операции считывания видны из сигналов I²C SCL и SDA). Также видны переходы между 3 процессами в t_1 и t_3 на сигнале I²C SCL (небольшой белый зазор). Как только эта задача выполнена (в момент времени t_5), начинается третья программа, в которой вычисляются значения для 24 ПИД-регуляторов (сигнал «флаг запуска программы»). Она заканчивает работу в момент времени t_6 . После этого выполняются требуемые расчеты, а система ждет окончания цикла генерации сигналов ШИМ, чтобы начать новый цикл. Время между t_6 и t_7 100 мкс является условно свободным, при котором система может работать с рабочей частотой около 2,5 кГц. На более низких частотах система также работает достаточно точно, однако увеличивается продолжительность свободного времени. Ограничивающими факторами являются внешняя коммуникация по I²C и UART (рисунок 5.22). Установлено что расчет ПИД-регулятора занимает 2,5% рабочего периода при частоте 2 кГц, I²C – 75% и UART – 45%. Это указывает то, что система может выполнять в процессе работы поставленные задачи терморегулятора на частоте 2 кГц, а также присутствует возможность реализации дополнительных задач, поскольку все тайминги согласуются с теоретическими расчетами, представленными на рисунке 5.22. Результаты использования регистров ПЛИС сведены в таблице 5.3.

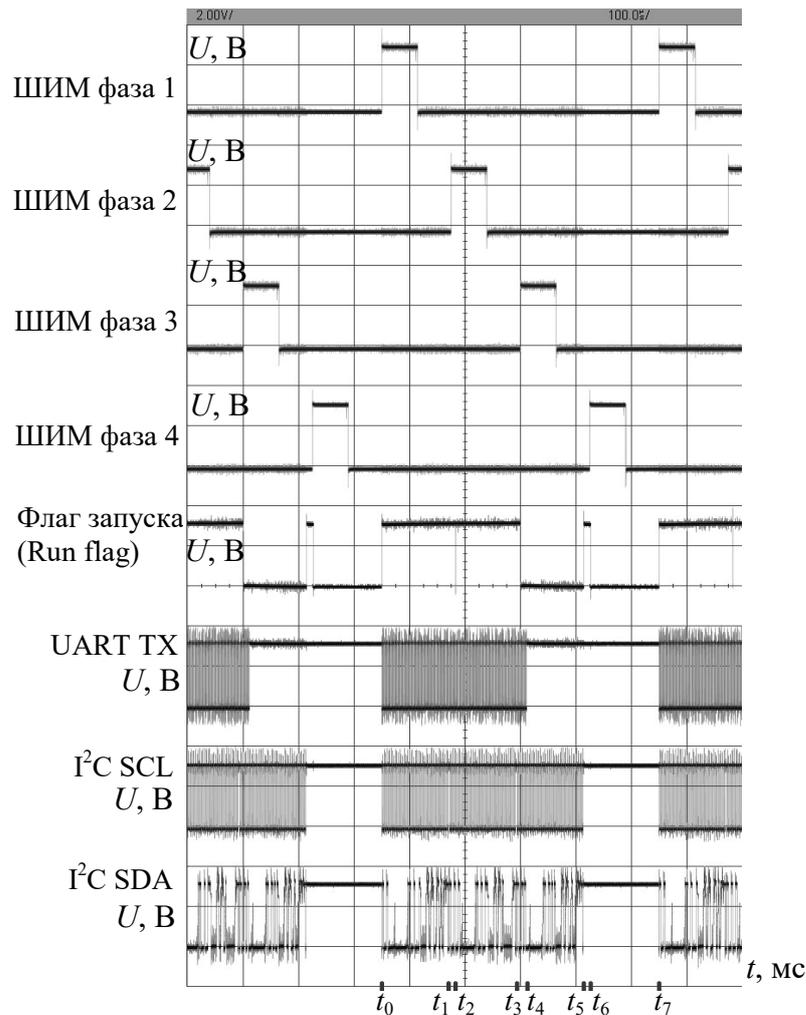


Рисунок 5.22 – Измеренные осциллографом сигналы на ПЛИС

Терморегулятор разработан на языке Verilog для ПЛИС EP2C5T144C8 с тактовой частотой 50 МГц, с задействованными 1600 логическими элементами, в том числе около 1000 регистров и 1350 4-входных таблиц поиска (LUT4), 16 Кбит памяти и 4 встроенных множителя [18×18]. Использование ресурсов каждого блока системы представлено в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Использование ресурсов ПЛИС блоками разработанной системы терморегулятора

Модуль ПЛИС	LUT4	Регистры (кол-во ед.)
АЛУ	172	55
Мультиплексор MUX	93	0
Генератор ШИМ	501	453
Контроллер I ² C	316	309
UART RX/TX	152	165
Прочие блоки	99	27
Итого	1333	1009

Самыми объемными частями разработанного терморегулятора являются генератор сигналов ШИМ и контроллер I²C, которые используют 60% LUT и 75% доступных регистров на тестовой ПЛИС. Это связано с тем, что разработанная архитектура использует, в основном, память и мультиплексоры, которые реализованы в ПЛИС не задействует базовые логические

элементы. Данная система была протестирована с помощью группы ТЭП и ДТ. В процессе тестирования получены коэффициенты для ПИД-регулятора, позволяющие контролировать температуру с точностью до $0,1^{\circ}\text{C}$, что достаточно для их применения в терморегуляторе КЭК.

5.3 Результаты тестирования многофазного управления группой термоэлектрических преобразователей

Проведено тестирование многофазного управления группой ТЭП РП. Измерены амплитудные и временные характеристики тока ТЭП и РП в следующих режимах работы: управление двумя ТЭП без сдвига и с частичным сдвигом фаз, управление одним ТЭП и управление двумя ТЭП с полным сдвигом фаз. В качестве управляющего сигнала использован сигнал ШИМ частотой 242,7 Гц, коэффициентом заполнения 40%, длительностью импульса 1,62 мс и временем между импульсами 2,51 мс. На рисунке 5.23а показаны осциллограммы импульсов тока через ТЭП и суммарного тока РП в режиме работы двух ТЭП без фазового сдвига.

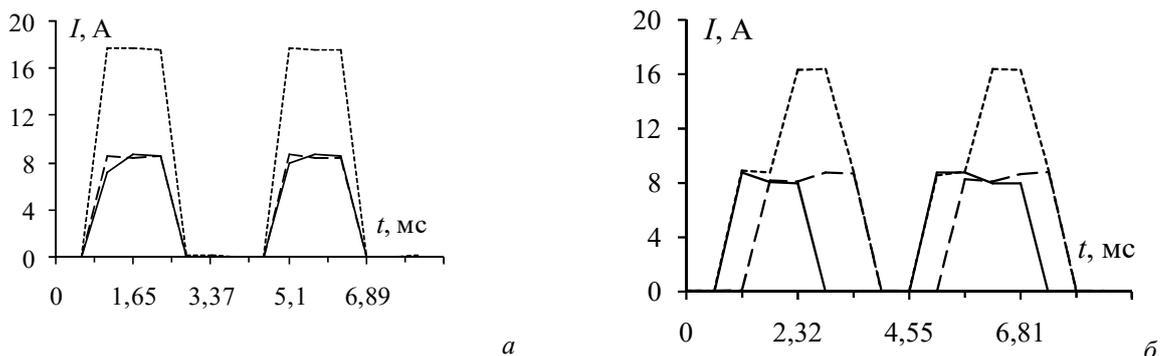


Рисунок 5.23 – Измеренные осциллограммы импульсов тока через ТЭП1 (—), ТЭП2 (---), и суммарного тока питания РП (- - -) в режимах работы:

a – без сдвига фаз, *б* – со сдвигом фазы 45°

Импульсные токи каждого ТЭП достигают значений $I_1=I_2=8,65\text{ A}$ (рисунок 5.23а). При этом суммарный ток (рисунок 5.23б), потребляемый РП с двумя ТЭП, достигает значение $I_3=17,74\text{ A}$ (использован блок питания с максимальным выходным током 17,74 А). Разность токов в 440 мА делится по 220 мА на каждый РП и рассеивается в виде тепла на радиаторах.

При разнесении двух управляющих сигналов по времени на 0,9 мс суммарный ток потребления РП с ТЭП достигает $I_3=16,36\text{ A}$ (рисунок 5.24). При этом уровни импульсов тока ТЭП достигают значений $I_1=I_2=8,75\text{ A}$, но только в моменты времени работы одного ТЭП. Во время работы двух ТЭП значения токов I_1 и I_2 уменьшаются до 8 А.

В режиме работы одного ТЭП, ток через него достигает значения 9,6 А (рисунок 5.24а), при этом суммарный ток при работе двух ТЭП без сдвига управляющего сигнала может достигать 20 А.

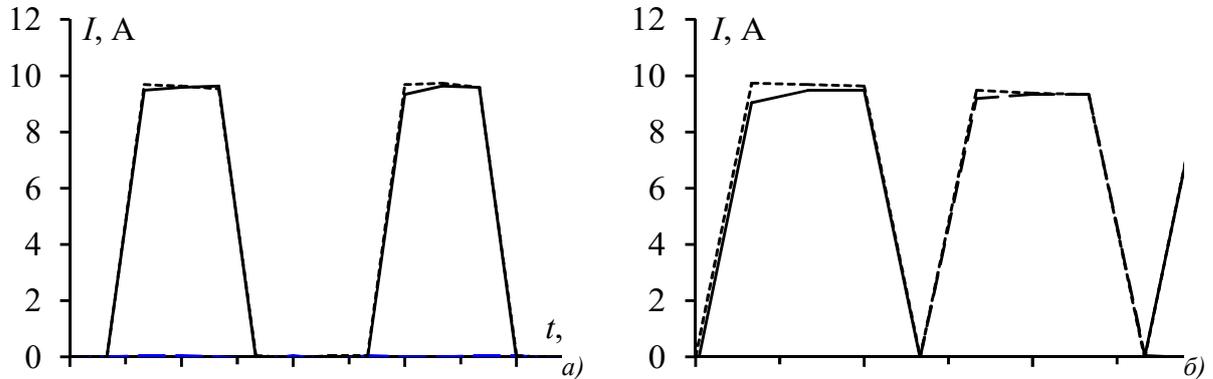


Рисунок 5.24 – Импульсы токов при скважности 40% на ТЭП1 (—), ТЭП2 (---) и суммарный ток питания РП (- - -) в режимах работы: а – одного ТЭП, б – со сдвигом фазы 90°

При разнесении управляющих сигналов во времени на 2 мс обеспечивается полный (90°) сдвиг фазы электропитания для одного из ТЭП (рисунок 5.24б). В результате, можно снизить суммарный потребляемый ток от источника питания до $I_3=9,7$ А и повысить токи, протекающие через ТЭП, до значения $I_1=I_2=9,55$ А.

Многофазное питание также реализовано для четырех ТЭП с управлением сигналами ШИМ и сдвигом фазы 90°. Суммарный ток потребления РП с ТЭП (I_3) не превышает значения 10,12 А (рисунок 5.25).

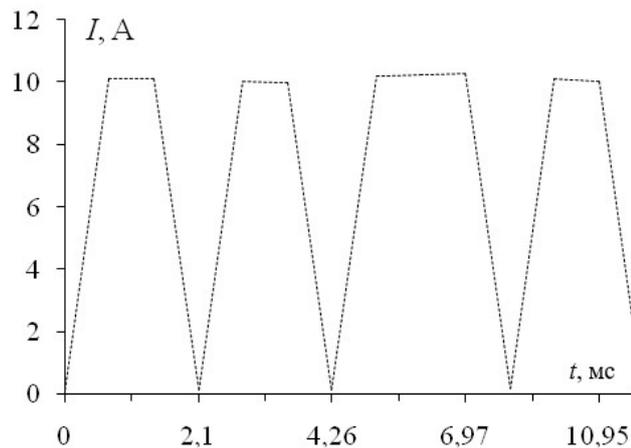


Рисунок 5.25 – Суммарный ток питания РП при скважности 20% в четырехфазном режиме работы группы ТЭП

Частота управляющего сигнала для четырехфазного электропитания ТЭП выбрана равной 121,2 Гц (зависит от числа фаз и коэффициента N) при скважности 20% со сдвигом относительно первого 2,06 мс, 4,13 мс, и 6,18 мс соответственно.

5.4 Модель искусственной нейронной сети на основе ПИД-регулятора

В данном подразделе представлены результаты разработки модели ИНС для управления каскадными ПИД-регуляторами в терморегуляторе КЭК. Показан процесс обучения модели ИНС на основе классического ПИД-регулятора, что необходимо для оптимального выбора коэффициентов регулирования в терморегуляторе.

5.4.1 Обучение модели искусственной нейронной сети на основе классического ПИД-регулятора

Процесс обучения модели ИНС выполнен на данных, полученных с макета терморегулятора с программной реализацией двух идентичных ПИД-регуляторов. Входной слой состоит из 6 параметров и 6 нейронов, а в качестве активационной функции использована нелинейная функция «*relu*» – $A(x) = \max(0, x)$. Входные параметры: температура уставки; данные с ДТ; сигналы управления; коэффициенты ПИД-регулятора (K_p , K_i , K_d). Внутренний скрытый слой состоит из двух слоев по 6 нейронов в каждом (рисунок 5.26). Используя данную модель можно обучить каскад моделей ИНС, которые смогут эффективно регулировать процесс управления ОУ (рисунок 1.1). Одним из критериев качества при проектировании модели ИНС является «чистота тренировочных данных». Для подготовки и выборки данных использована модель ПИД-регулятора. Записывались входные и выходные данные ПИД-регулятора, соответствующие вычисленным коэффициентам K_p , K_i , K_d .

```
model.add(Dense(6, activation='relu', input_dim=6))
model.add(Dense(6, activation='sigmoid')
model.add(Dense(6, activation='sigmoid'))
model.add(Dense(6, activation='softmax'))
model.add(Dense(1, activation='relu'))
```

Рисунок 5.26 – Листинг описания слоев модели ИНС в Keras

Объем памяти (ОЗУ, ПЗУ) МК ограничен и редко достигает 1 Мб. В то время как размер обученной модели ИНС, в зависимости от вида модели, числа слоёв и нейронов, может достигать десятки и даже сотни Мб. Для того чтобы уменьшить размер модели ИНС выполняем её компрессия (рисунок 5.27).

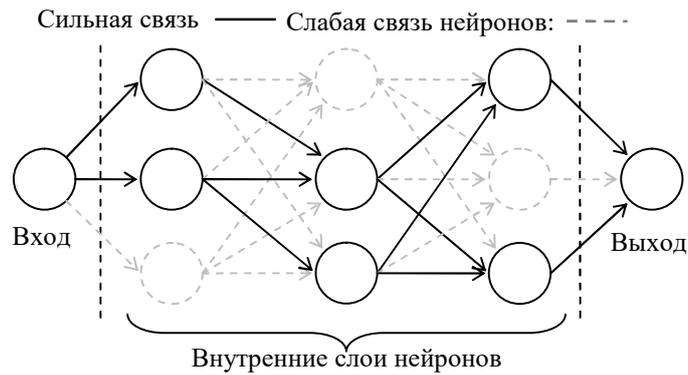


Рисунок 5.27 – Процесс компрессии модели ИНС

Компрессия данных выполнена путем исключения нейронов со слабыми связями и низкими весовыми коэффициентами. Результатом компрессии являлось уменьшение размера модели ИНС для загрузки в МК. Однако, использование компрессии может приводить к частичному ухудшению работы ИНС, тем не менее, потери в точности незначительны, т.к. многие периферийные блоки МК, датчики и сенсорные устройства обладают ограниченными точностью работы и разрешающей способностью (разрядности АЦП, ЦАП, таймера и др.).

5.4.2 Модель искусственной нейронной сети ПИД-регулятора

Модель ИНС (рисунок 5.28) относится к типу моделей с прямой связью (Feedforward Neural Network, FNN). В зависимости от типа решаемой задачи входной слой может состоять из одного или более нейронов. Каждый внутренний слой состоит из нескольких нейронов. Количество слоев и число нейронов в них, подбирается экспериментальным путем в зависимости от решаемой задачи.

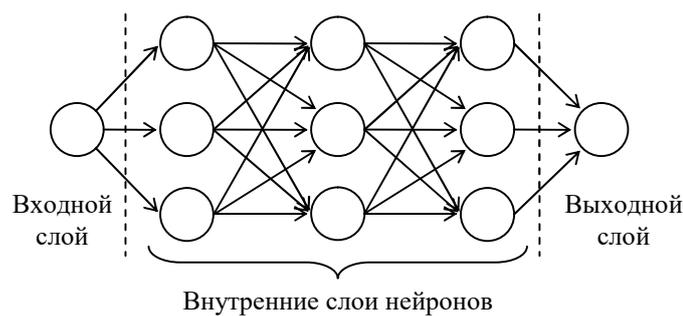


Рисунок 5.28 – Структура ИНС

Разработана и обучена модель ИНС для управления терморегулятором (рисунок 5.29). Первый (входной) слой ИНС состоит из 4 нейронов, в которые подаются значения коэффициентов ПИД-регулятора (K_p , K_i , K_d) и сигнал уставки температуры ($C_{уставки}$). В качестве активационной функции входного слоя выбрана функция сигмоид

$$\sigma(x) = \frac{1}{(1 + e^{-x})} \quad (5.2)$$

Внутренний слой модели ИНС состоит из 4-х слоев, по 5 нейронов в каждом. Выходной слой состоит из одного нейрона, содержащего результат (управляющий сигнал, регулирующий напряжение РП или сильноточных компонентов).

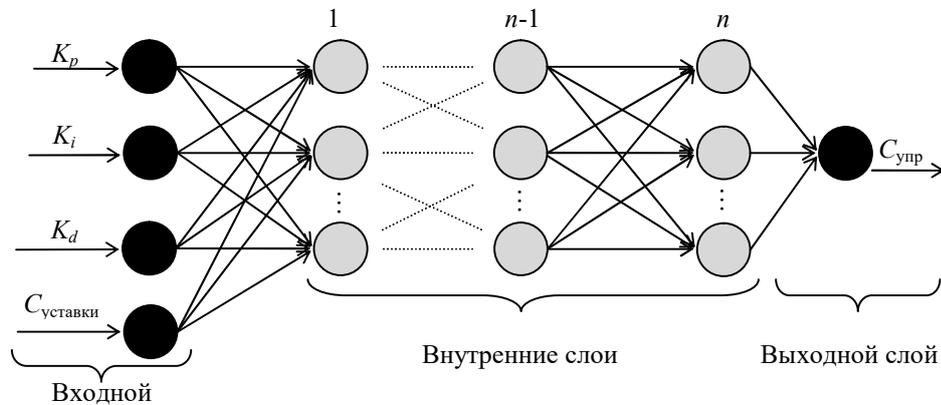


Рисунок 5.29 – Модель ИНС для обучения ПИД-регулятора

Число внутренних слоев и их размера подбирались экспериментально, из-за отсутствия общепринятого метода расчета. В результате, выходной слой состоит из одного нейрона, на выходе которого сформирован результат сигнала управления. За основу контроля терморегулятора была взята классическая схема управления ПИД-регулятора. Широкое распространение получило применение ИНС для задачи корректировки его коэффициентов (рисунок 5.30).

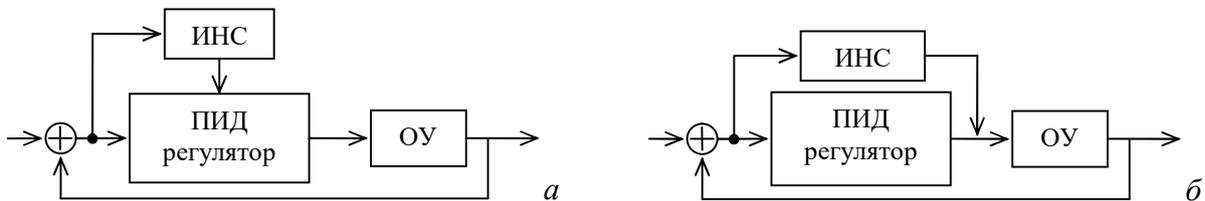


Рисунок 5.30 – Корректировки коэффициентов ПИД регулятора (а) и управляющего сигнала (б)

На вход ИНС поступает сигнал уставки (требуемая температура). На выходном слое находятся скорректированные коэффициенты K_p , K_i , K_d , которые используются ПИД-регулятором при вычислении управляющего сигнала (рисунок 5.29). За счет этого удастся достичь лучших характеристик управления, по сравнению с результатом классического ПИД-регулятора.

Собран тестовый стенд, который состоит из трех ДТ и двух нагревательных элементов. Два ДТ располагаются на поверхности нагревательных элементов, один из которых фиксирует температуру окружающей среды. Во время работы стенда учитываются: длительность времени выхода на заданный уровень температуры и разность температур ($\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$) ДТ.

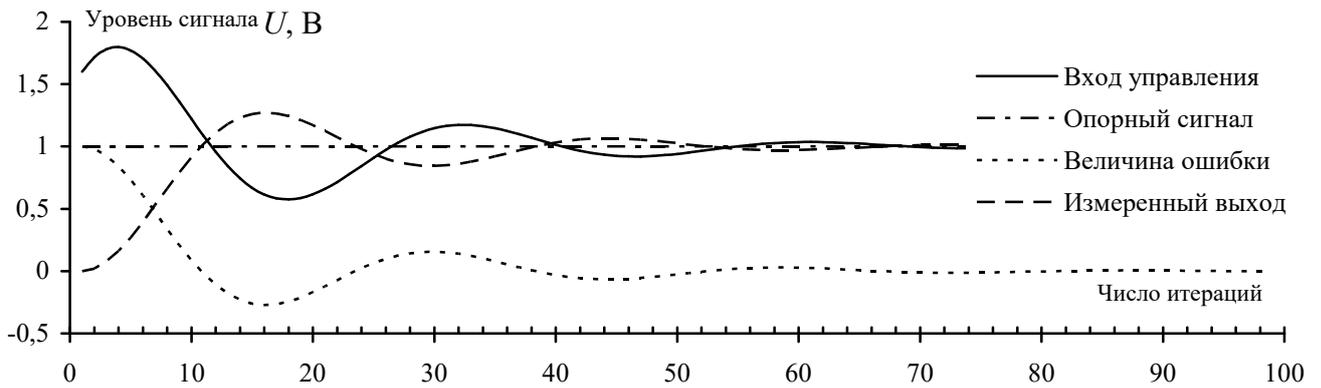


Рисунок 5.31 – Моделирование процесса управления ПИД-регулятора в Matlab Simulink

Данный стенд использован для обучения модели ИНС на данных, вырабатываемых ПИД-регулятором (рисунок 5.32а). В результате, при успешном обучении ИНС можно заменить блок ПИД-регулятора, для увеличения скорости регулирования и улучшения контроля работы системы (рисунок 5.32б).

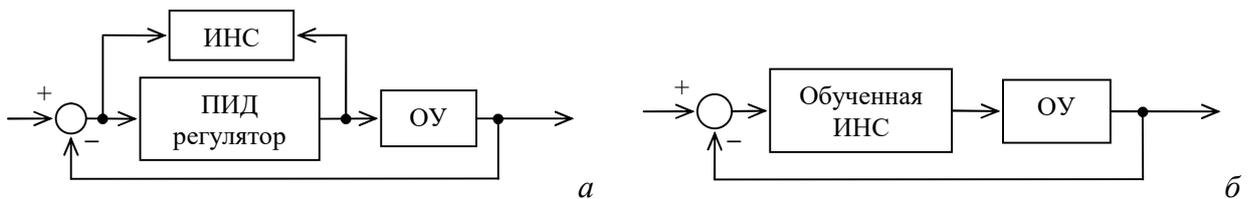


Рисунок 5.32 – Обучение ИНС данными ПИД-регулятора (а),
управление ОУ обученной ИНС (б)

5.4.3 Лабораторный макет для обучения искусственной нейронной сети

Разработан лабораторный макет ПИД-регулятора, (рисунок 5.33). Он состоит из двух нагревательных элементов (транзисторы КТ817), прикрепленных к радиаторам, и 3 ДТ МАХ31725. Датчики отслеживают изменения температуры двух радиаторов, а третий измеряет температуру воздуха (рисунок 5.34). Лабораторный макет использован для генерации данных в процессе обучения модели ИНС ПИД-регулятора и тестирования качества ее обучения. Проверка качества обучения состояла в том, что после обучения модели ИНС выполнялась оценка сравнения качества управляющего сигнала.

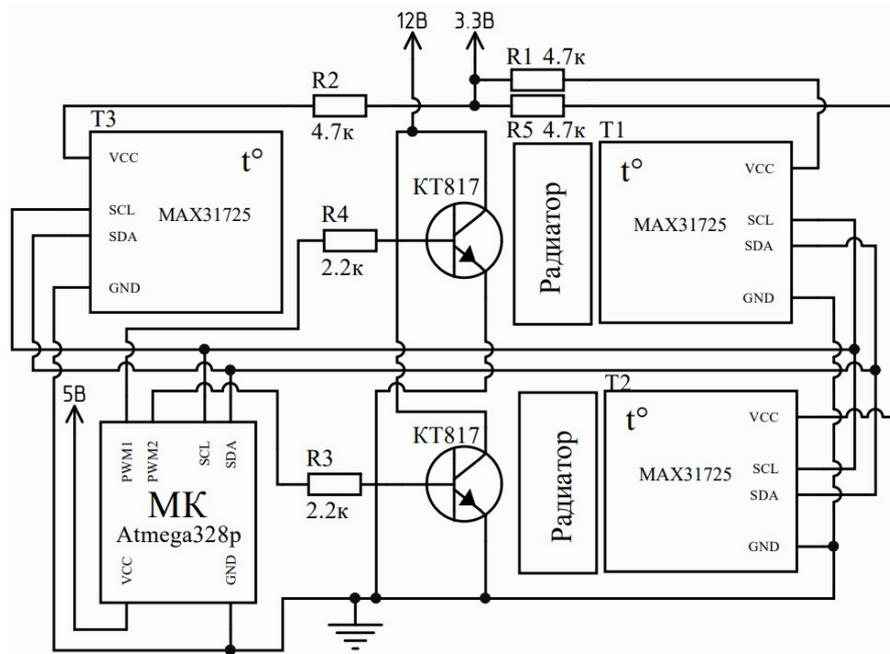


Рисунок 5.33 – Схема лабораторного макета ПИД-регулятора

Работа ПИД-регулятора после оптимизации параметров (K_p , K_i , K_d) в системе моделирования Matlab дали различные результаты сигналы управления двух идентичных нагревателей (транзистор KT817), закрепленных к радиатору.

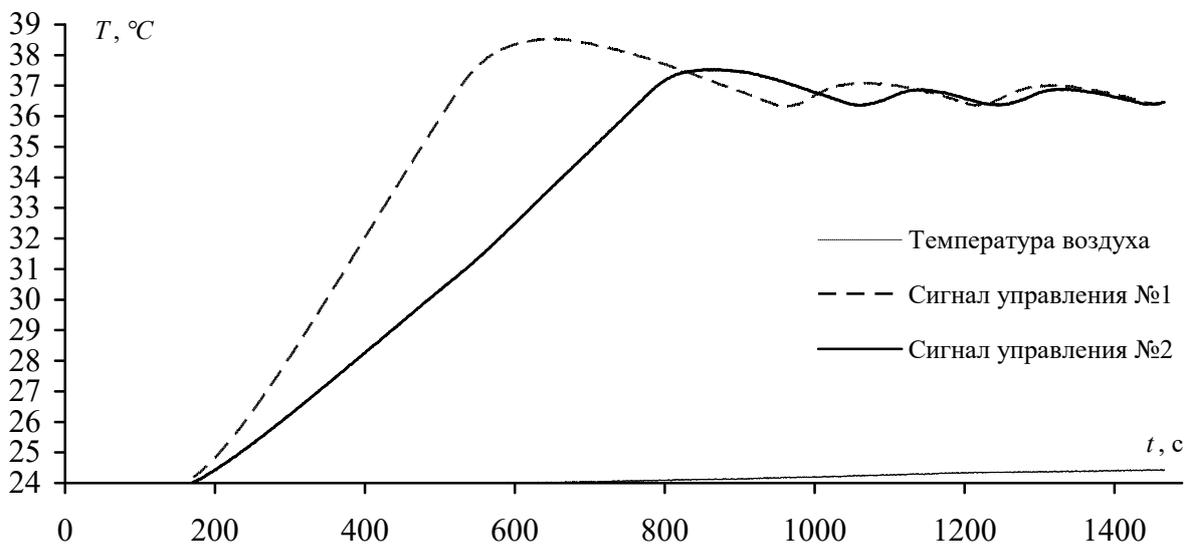


Рисунок 5.34 – Временные характеристики работы двух ПИД-регуляторов с дискретным сигналом управления 8 бит при одинаковых коэффициентах регулирования

5.5 Управление климатической экранированной камерой

В данном подразделе представлены результаты разработки устройства управления КЭК.

5.5.1 Пульт управления климатической экранированной камерой

Пульт управления (ПУ) представляет собой устройство ввода/вывода информации для оператора КЭК. Посредством ПУ оператор контролирует процесс проведения исследования в КЭК. Основной задачей ПУ является визуализация нагрева/охлаждения ТЕМ-камеры в КЭК за счет обработки информации со множества датчиков. ПУ КЭК состоит из блока кнопок и ЖКИ с сенсорной панелью. При включении КЭК на ЖКИ отображается главное меню. Переход по пунктам меню осуществляется посредством кнопок. По нажатию кнопок, в зависимости от текущего уровня меню, системой должна произойти обработка этого события. В качестве инструмента разработки графического интерфейса пользователя использован кроссплатформенный фреймворк Qt. Передача данных (раздел 2) от УУ к ПУ происходит посредством интерфейса UART. Для построения графического интерфейса (кнопки, вкладки, индикаторы и т.д.) и улучшения разделения логики приложения от отображения в презентационной логике использован шаблон проектирования Model-View-Presenter (MVP), что позволило разработать логику приложения ПУ независимо от графического представления.

В главном окне ПУ отображаются данные о текущей температуре и влажности ТЕМ-камеры (рисунок 5.35). Интерфейс главного окна программы содержит 3 вкладки меню: главный экран (рисунок 5.35а), регулирование уровня температуры (рисунок 5.35б), регулирование коэффициента влажности (рисунок 5.35в). Реализованы функции отображения и корректирования температуры и коэффициента влажности ТЕМ-камеры. Для этого, следует выбрать соответствующую вкладку меню ПУ и ввести требуемое значение температуры. Более точная её настройка с шагом 0,1 осуществляется двумя кнопками (рисунок 5.35а). Изменения вступают в силу после нажатия на кнопку «применить» (рисунок 5.35б).

Помимо функций отображения служебной информации, ЖКИ служит средством отображения сообщений службы диагностики. Так, при возникновении ошибки или критической ситуации на ЖКИ отобразится служебное информационное сообщение.

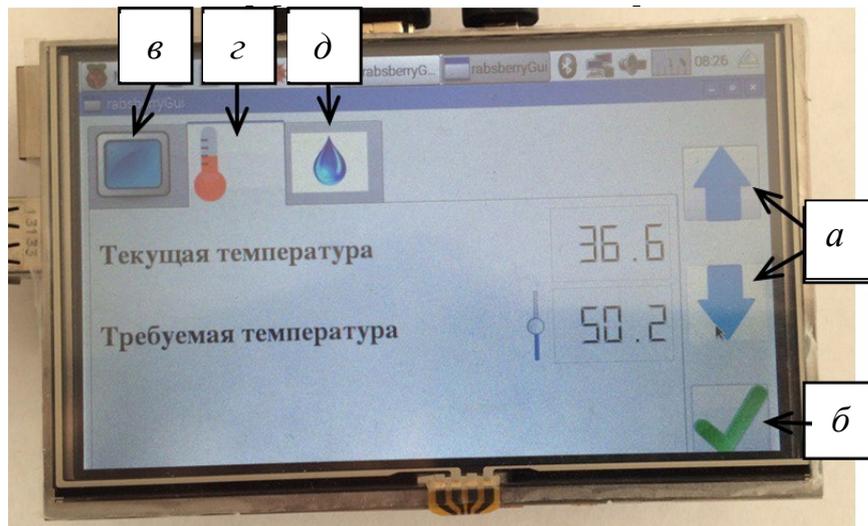


Рисунок 5.35 – Окно настройки температуры на ПУ и её компоненты (а-д)

5.5.2 Модуль автоматизированного рабочего места оператора климатической экранированной камеры

Модуль автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора КЭК – это ПО оператора, установленное на ПК, выполняющее функции ввода/вывода данных (рисунок 5.36).

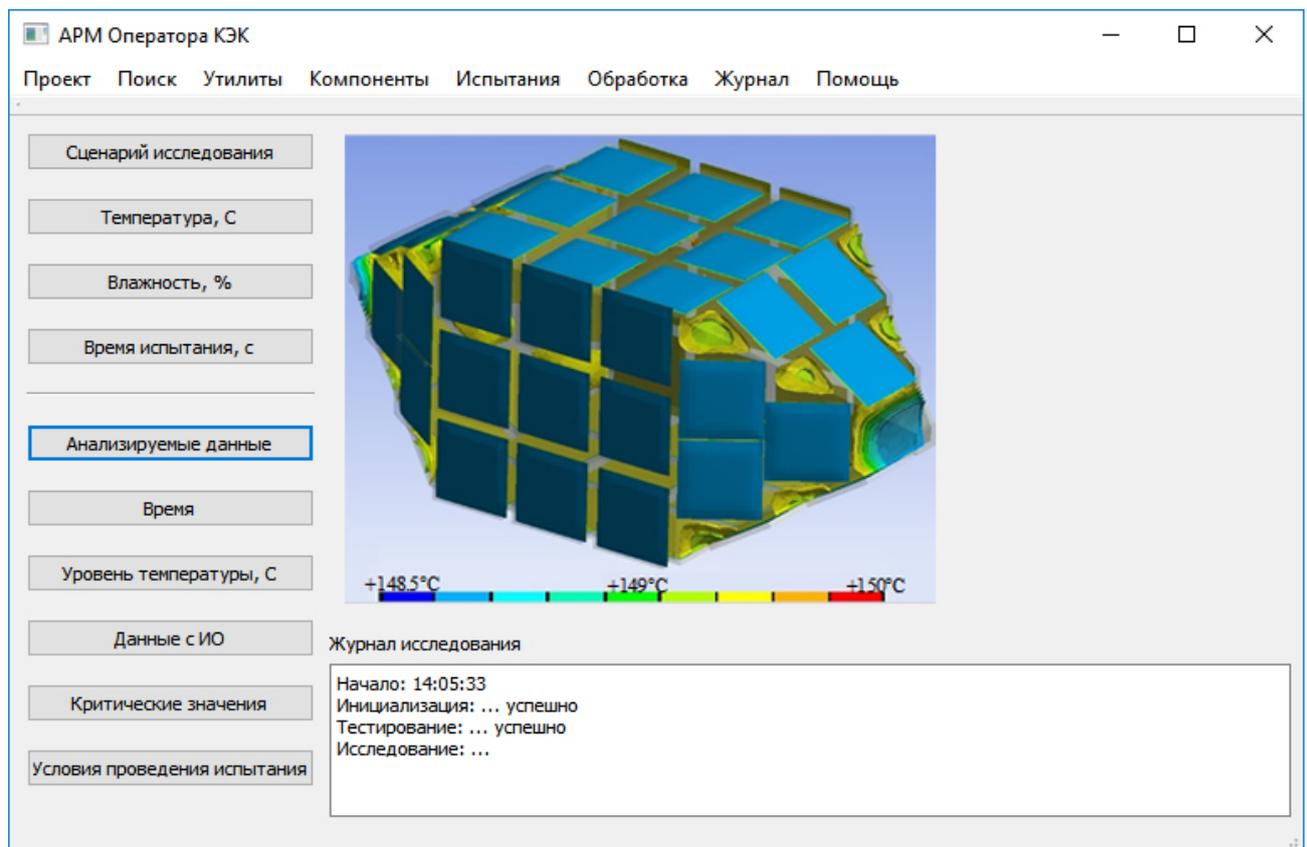


Рисунок 5.36 – Интерфейс АРМ оператора КЭК

Получение данных от КЭК, а именно: показания датчиков температуры и влажности, показатели испытуемого объекта. Также в функции модуля «АРМ оператора» входят: ведение

статистики по эксперименту; обработка полученной информации; архивирование данных; формирование отчетов; анализ данных; журналирование действий оператора; обработка исключительных ситуаций; кэширование данных во время работы.

Разработка ПО для КЭК требует тщательного проектирования архитектуры ПО, создания алгоритмов и их реализации. Это объясняется спецификой аппаратной части КЭК и используемым интерфейсам передачи данных внутри системы и за ее пределами. Эта специфика выражены в ограничениях, накладываемых на аппаратное и программное обеспечение (таблица 5.4). АРМ оператора служит, в большей степени, для анализа и исследования результатов, полученных в ходе эксперимента. Кроме того, он может выполнять все операции модуля ПУ (задавать температуру, опрашивать датчики, проводить тесты ТЕМ-камеры и др.).

Таблица 5.4 – Программно-аппаратные ограничения КЭК

Название	Накладываемое ограничение
Память МК	Размер доступной программируемой памяти в МК ATmega2560 – 256 кб.
Интерфейс I ² C	Максимальное число устройств на линии –127.
Порты ШИМ	Количество портов МК с аппаратной поддержкой ШИМ – 15.
Частота МК	Частота работы МК – 16 МГц.
UART	аппаратных интерфейсов UART – 3.
Библиотеки	Библиотеки для работы с ЖКИ, датчиками температуры и влажности.
Шина данных	В разработке применяется 8-ми разрядный МК, значит, за 1 такт работы можно адресовать 256 бит информации.
Среда разработки	Разработка программного обеспечения под МК с архитектурой AVR поддерживается средой Atmel Studio, CodevisionAVR и WinAVR

Помимо этого, это ПО способно импортировать данные в программный комплекс для исследования задач ЭМС с целью их более глубокого анализа и оценки полученных результатов. Так, передаются следующие данные:

1. Уровень температуры. (Имеет функцию выставления требуемого уровня температуры поверхности ТЕМ-камеры посредством передачи соответствующей команды в ПУ).
2. Уровень влажности. (Имеет функцию выставления требуемого уровня влажности внутри ТЕМ-камеры посредством передачи соответствующей команды в ПУ).
3. Время длительности эксперимента. (Обладает возможностью проведения эксперимента, ограниченного по времени. Функция задает определенное время, на протяжении которого будет проходить эксперимент. Это обеспечивается посредством передачи соответствующей команды в ПУ).

4. Служебная информация. (Лог-файл эксперимента; ошибки; показания с ДТ и датчиков влажности; коэффициенты управляющих сигналов; время длительности эксперимента; служебные команды).

5.6 Основные результаты раздела

Предложен способ синхронизации группы ВУ, который позволил реализовать работу терморегулятора КЭК, за счет синхронного управления группой ТЭП посредством сигналов ШИМ от группы ВУ с заданным временем периода синхронной работы, а также стабилизировать нагрузку источника электропитания ТЭП. На основе способа разработано ПО «Симулятор синхронной работы группы МК», позволяющий вычислить значения коэффициентов таймеров счетчиков МК, а также проверить вычисленные значения в симуляторе, за счет чего реализуются различные режимы синхронизации группы ВУ. Разработаны алгоритм и тестовый код программы для синхронизации ВУ с различной вычислительной архитектурой (AVR, Xtensa) и частотой работы ядра (8–240 МГц). Результатом синхронной работы является стабильность фазы сигналов ШИМ. Выявлено, что при значительном изменении (в 15 раз) частоты период работы СнК с большей производительностью оказался на 1,5 мс продолжительнее периода работы остальных МК, работающих на более низкой частоте (ATmega328 и ATmega2560). Это вызвано производительностью СнК, за счет которой он успевает обработать большее число машинных инструкций при синхронизации. Данный способ синхронизации можно применять к уже готовым устройствам в виде программного модуля, или модифицировав РЭС.

Разработан четырех- и пятифазный контроллер сигналов ШИМ терморегулятора КЭК. Проведено моделирование работы пятифазного регулятора. Применение данного регулятора при управлении электропитанием ТЭП позволило снизить нагрузку на источник питания в 5 раз, исключая возможность наложения фаз. Разработанный модуль терморегулятора КЭК на базе ПЛИС EP2C5T144C8 способен генерировать 24 сигнала ШИМ с одинаковой частотой различными рабочими циклами и вариативным числом фаз. Это позволяет контролировать работу каждого из 24 ТЭП, распределенных по 4 фазам, уменьшает максимальное пиковое потребление тока ТЭП и нагрузку на источник электропитания КЭК. Разработанная аппаратная архитектура на языке Verilog для ПЛИС способна эффективно (~500 нс) рассчитывать блоки ПИД-регулятора. Алгоритм и спроектированная вычислительная архитектура позволяют регулировать параметры ПИД-регулятора для лучшего контроля распределения температуры по поверхности ТЕМ-камеры. Разработана система аппаратного терморегулятора, которая позволяет контролировать температуру с точностью до 0,1 °С и может быть адаптирована для других АСУ, в которых используется несколько ПИД-регуляторов.

Разработаны метод и алгоритм для распределенной системы автономного регулирования электропитания ТЭП, поддерживающие многофазный режим работы ТЭП в группах, разнесенных по времени. Показана возможность применения многофазного электропитания ТЭП за счет разнесения работы каждого ТЭП по времени, обеспечивая в каждый момент времени нагрузку на источник электропитания не более средней мощности одного ТЭП. Разработанный терморегулятор позволяет прецизионно поддерживать заданную температуру во внутреннем объеме ТЕМ-камеры.

Разработана модель ИНС для вычисления сигналов управления, способная заменить классический ПИД-регулятор для управления климатической подсистемой КЭЖ. Эффективность ИНС заключается в высокой скорости вычисления и гибкости управления ОУ. Для обучения модели ИНС разработан лабораторный макет терморегулятора с программным ПИД-регулятором, управляющим ТЭП, который вычисляет оптимальные коэффициенты ПИД-регулятора, применяемые в процессе обучения модели ИНС.

Разработан модуль АРМ оператора КЭЖ, позволяющий расширить возможности управления и обработки информации, полученной в ходе работы КЭЖ. Реализованы различные функции по обработке и преобразованию полученных данных в интерактивной форме. ПО АРМ позволяет анализировать записи службы диагностики и результаты тестов для определения причин возникновения сбоев в работе КЭЖ. Алгоритмы обладают достаточной универсальностью и могут быть применены в критически важных системах, например, при проектировании системы контроля и управления электропитанием космического аппарата.

Таким образом, внедрение и использование предложенных способов, методов и алгоритмов для быстрого восстановления контекста рабочего процесса МК позволят повысить надежность и отказоустойчивость разрабатываемых АСУ с использованием МК, а также сократить время поиска неисправности в ПО МК.

Заключение

При проведении диссертационного исследования решена задача проектирования АСУ для тестирования РЭС на совместные климатические и электромагнитные воздействия, для этого разработаны компоненты АСУ КЭК (АРМ-оператора, пульт управления, служба мониторинга, система тестирования ЭКБ), а также способы, методы и алгоритмы, позволяющие выполнить комплексный анализ состояния внутренних блоков ВУ и восстановления его рабочего состояния (данные, периферия, параметры тактирования и др.) после сбоя.

Основные результаты

1. Предложены оригинальные объектно-ориентированные модели АСУ температурой поверхности ТЕМ-камеры, позволяющие проводить совместные климатические и электромагнитные исследования РЭС в КЭК. Модель представлена в виде UML-диаграмм и подробно описывает устройство и функционирование КЭК, уточняя интерфейсы связи и зависимости между компонентами, что позволяет представить КЭК с позиции инженера, архитектора ПО, разработчика, руководителя, менеджера проекта.

2. Предложен новый способ синхронизации группы ВУ, отличающийся возможностью его использования для синхронизации разнотипных ВУ, использующих различные тактовые частоты для выполнения общей задачи. Способ позволяет выполнять общую задачу группой МК, используя минимальные аппаратные средства, и применим к готовым устройствам в виде отдельного модуля или модификации схемы устройства РЭС. Универсальность способа заключается в возможности синхронизации работы как МК, так и СнК различных производителей и гибкой настройки синхронизации. Разработан «Симулятор синхронной работы группы МК», позволяющий гибко настраивать синхронизацию группы ВУ на основе МК и СнК. Использование предложенного способа синхронизации в работе над терморегулятором КЭК позволило добиться синхронного управления ТЭП посредством сигналов ШИМ с заданным временем периода синхронной работы.

3. Предложены метод и алгоритмы тестирования и диагностики климатической подсистемы КЭК, позволяющие снизить риск возникновения сбоев в процессе её работы, а также повысить эффективность функционирования и достоверность полученных результатов в процессе исследования компонентов и узлов РЭС на ЭМС в ней. Представлена служба тестирования ОСРВ, позволяющая установить задачу при которой произошел сбой и определить, что послужило его причиной. Предложен метод восстановления и программной защиты памяти МК, позволяющий определить факт повреждения данных и восстановить их посредством «зеркалирования». Представлен способ восстановления данных флеш-памяти МК

из резервной копии, расположенной в общей памяти МК, и внешней ИС памяти. Представлен способ выявления ошибок памяти МК посредством вычисления КС. Разработан способ аппаратного и программного резервирования ИС в критичных РЭС с возможностью восстановления их работы после сбоя. Разработано программное детектирование сбоев МК посредством разделения блоков памяти и управления состоянием памяти средствами ОСРВ. Представлены комбинированные тесты для выявления сбоев в блоках МК, которые позволили выявить изменения в памяти МК и показали эффективность разработанного метода его тестирования посредством анализа данных памяти. Использование предложенных методов и алгоритмов быстрого восстановления контекста рабочего процесса МК позволяет повысить надежность и отказоустойчивость разрабатываемых АСУ с использованием МК, а также сократить время поиска неисправности в ПО МК.

4. Разработан лабораторный макет терморегулятора КЭК. Показана возможность достижения заданных температур (от 2°C до 125°C). Многофазное управление в макете посредством ОСРВ позволяет стабилизировать работу терморегулятора, снизив время отклика системы, за счет выполнения в первую очередь задач, имеющих высокие приоритеты. Модуль терморегулятора КЭК на базе ПЛИС позволяет контролировать работу каждого из 24 ТЭП, распределенных по 4 фазам, а также уменьшает максимальное пиковое потребление тока ТЭП и нагрузку на источник электропитания КЭК. Разработанная аппаратная архитектура способна выполнять различные булевы операции, за счет которых достигается эффективное время (~ 500 нс) расчета блоков ПИД-регулятора, что позволяет регулировать параметры ПИД-регулятора каждого ТЭП для улучшенного контроля распределения температуры по поверхности ТЕМ-камеры. Представлена система для контроля температуры поверхности ТЕМ-камеры в КЭК, с точностью до 0,1 °С, которая может быть адаптирована для других систем управления, выполняющих вычисления посредством ПИД-регулятора. Разработана модель ИНС для вычисления сигналов управления, способная заменить классический ПИД-регулятор для управления климатической подсистемой КЭК, и повысить эффективность ПИД-регулятора, за счет высокой скорости вычисления и гибкого управления ОУ.

5. По результатам выполненных исследований опубликовано 4 (2 ВАК по паспорту специальности) статьи в журналах, входящих в перечень ВАК, 8 статей в изданиях, индексируемых международными базами Web of Science и Scopus, и 21 доклад в трудах международных конференций (в том числе 3 без соавторов). Также получено 3 патента на изобретение и 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. Результаты исследований использованы при выполнении ряда НИР, в учебном процессе радиотехнического факультета ФГБОУ ВО ТУСУР, а также на предприятиях АО «ИСС» (г. Железногорск), Томском НИИ

курортологии и физиотерапии ФГБОУ «Сибирский федеральный научно клинический центр Федерального медико-биологического агентства» (г. Томск), а также в ООО «Инфоматикс», что подтверждает их практическую значимость.

Таким образом, поставленные задачи выполнены, а цель диссертационной работы достигнута. При этом решена задача, имеющая важное значение для развития технических наук в рамках областей исследований, соответствующих пунктам: 6 (Методы совместного проектирования организационно-технологических распределенных комплексов и систем управления ими), 11 (Методы контроля, обеспечения достоверности, защиты и резервирования информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП, АСПП и др.) и 17 (Разработка автоматизированных систем научных исследований) паспорта специальности «Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами».

Рекомендации по использованию результатов исследования

Предложенные методы, а также разработанные на их основе вычислительные алгоритмы и ПО целесообразно применять для предварительной оценки соответствия РЭС стандартам ЭМС на ранних этапах её проектирования. При этом для подтверждения результатов этой оценки, а также для детального исследования влияния внешнего климатического и электромагнитного воздействия на МК можно использовать разработанные алгоритмы тестирования внутренних блоков МК. Для повышения надежности хранения данных в энергонезависимой памяти могут использоваться способ аппаратного и программного резервирования вычислительных блоков МК. Описанные в работе подходы к проектированию АСУ и РЭС также могут использоваться в рамках образовательного процесса высших учебных заведений, в программах переподготовки инженеров-разработчиков РЭС, а также в качестве основы для дальнейших исследований.

Перспективы дальнейшей разработки темы

В перспективе целесообразна разработка методов диагностики и тестирования вычислительных блоков, широко распространенных при проектировании РЭС ВУ (МК, СнК, ПЛИС), которые не были рассмотрены в данной работе. Кроме того, перспективны исследования влияния компоновки элементов РЭС на ПП, а также исследования, направленные на исследования в области повышения помехозащиты ВУ, за счет использования разработанных методов и алгоритмов диагностики ВУ. В перспективе целесообразно создание системы управления автоматизированным тестированием РЭС с использованием моделей ИНС. Наконец, в части дальнейшего совершенствования разработанного устройства терморегулятора КЭК, целесообразно рассмотреть другие возможные варианты реализации климатической подсистемы КЭК, например, ПИД-регулятор на основе ПЛИС с использованием цифровых фильтров сигнала управления и моделей ИНС.

Список сокращений и условных обозначений

API	Application program interface
ТЕМ	Transverse electromagnetic modes
UML	Unified model language
АЛУ	Арифметико-логическое устройство
АПК	Аппаратно-программный комплекс
АРМ	Автоматизированное рабочее место
АСУ	Автоматизированная система управления
АЦП	Аналогово-цифровой преобразователь
ВУ	Вычислительное устройство
ВТГ	Внешний тактовый генератор
ДТ	Датчик температуры
ЖКИ	Жидкокристаллический индикатор
ИНС	Искусственная нейронная сеть
ИО	Исследуемый объект
ИС	Интегральная схема
КС	Контрольная сумма
КЭК	Климатическая экранированная камера
МК	Микроконтроллер
МП	Микропроцессор
ОЗУ	Оперативное запоминающее устройство
ОС	Операционная система
ОСРВ	Операционная система реального времени
ОУ	Объект управления
ПДП	Прямой доступ к памяти
ПЗУ	Постоянное запоминающее устройство
ПК	Персональный компьютер
ПЛИС	Программируемая логическая интегральная схема
ПО	Программное обеспечение
ПП	Печатная плата
ПУ	Пульт управления
РП	Реверсивный преобразователь
РЭС	Радиоэлектронное средство

САУ	Система автоматического управления
СнК	Система на кристалле
СКИ	Сверхкороткий импульс
СУ	Система управления
ТЭП	Термоэлектрический преобразователь
УАПЧ	Универсальный асинхронных приемопередатчик
УУ	Устройство управления
ФАПЧ	Фазовая автоподстройка частоты
ЦАП	Цифро-аналоговый преобразователь
ЧРВ	Часы реального времени
ШИМ	Широтно-импульсная модуляция
ЭМИ	Электромагнитный импульс
ЭКБ	Электронная компонентная база
ЭМП	Электромагнитное поле
ЭМС	Электромагнитная совместимость
ЭСПЗУ	электрически стираемое постоянное запоминающее устройство
ЭСР	Электростатический разряд

Список литературы

1. Pratama D. Tilt set-point correction system for balancing robot using PID controller // D. Pratama, F. Ardilla, E.H. Binugroho, D. Pramadihanto // 2015 Int. Conf. on Control, Electronics, Renewable Energy and Communications (ICCEREC), pp.129–135, 2015.
2. Jafarov E.M. A New Variable Structure PID-controller design for robot manipulators // E.M. Jafarov, M.N.A. Parlakci, Y. Istefanopulos / IEEE Trans. on Control System Technology, Vol. 13. – 2005. – P. 122–130.
3. Prasetio B.H. Ensemble Kalman filter and PID controller implementation on self balancing robot. 2015 Int. Electronics Symp. (IES). – 2015. – P. 105–109.
4. Dienot M. Thermal-electromagnetic susceptibility behaviors of PWM patterns used in control electronic circuit // M. Dienot, E. Batista, I. Ramos / Proc. of the 10th In. Workshop on the Electromagn. Compat. of Integrated Circuits (EMC Compo), Edinburgh. – 2015. – P. 190–195.
5. Åström K.J. Control: a perspective // K.J. Åström, P.R. Cumar / Automatica 50(1). – 2014. – P. 3–43.
6. Bennett S. The past of pid controllers. Annual Reviews in Control. – 2001. – P. 43–53.
7. Ho M. Towards a MRI-compatible meso-scale SMA-actuated robot using PWM control // M. Ho, J.P. Desai / Conference on Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob). 3rd IEEE RAS and EMBS International. – 2010. – P. 361–366.
8. Ziegler J.G. Optimum settings for automatic controllers // J.G. Ziegler, N.B. Nichols / Trans. ASME. – 1942. Vol. 64. – P. 759–768.
9. Astrom K.J. Advanced PID control // K.J. Astrom, T. Hagglund // ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006, 460 p.
10. The Patent Office - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gb.espacenet.com>. (дата обращения: 05.01.2017).
11. Бровка Н. Применение специализированных микропроцессоров для построения схем контроля и защиты литий-ионных и литий-полимерных аккумуляторных батарей // Н. Бровка, О. Янченко / Компоненты и технологии. – № 3. – 2007. – С. 1–4.
12. Ромадина И. Микросхемы ШИМ-контроллеров ON Semi для сетевых источников питания / Компоненты и технологии. – № 7. – 2010. – С. 1–7.
13. Tajuddin M.F.N. State Space Averaging Technique of Power Converter with Digital PID Controller // M.F.N. Tajuddin, N.A. Rahim, I. Daut, B. Ismail, M.F. Mohammed / TENCON 2009, IEEE Region 10 Conference. – 2009. – P. 1–6.
14. Jain R.V. Implementation of a PID control PWM Module on Altera DE0 Kit Using FPGA // R.V. Jain, M.V. Aware, A.S. Junghare / Conference on Control, Measurement and Instrumentation (CMI), 2016 IEEE First International. – 2016. – P. 1–5.
15. Cho B.H. Modeling and analysis of spacecraft power systems // B.H. Cho, F.C. Lee / Power electronics specialists conference, 1985 IEEE. – 1985. – P. 523–534.
16. Юревич Е.И. Теория автоматического управления / Учеб. для вузов по спец. "Автоматика и телемеханика" / Е.И. Юревич. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергия, 1975. – 416 с.
17. Дубровин А.Н. Терморегулятор для исследований температурных зависимостей оптических эффектов в кристаллах // А.Н. Дубровин, А.Е. Мандель, С.М. Шандаров / Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 4. – С. 156–158.
18. Cong M. Design of temperature controller for laser diode based on DSP and Fuzzy-PID control // M. Cong, W. Xu, Y. Wang / 2010 Int. Conf. on Electrical and Control Engineering. – 2010. – P. 786–789.
19. Yang M. The Research of Tension Control System in Web Press Based on the Fuzzy Adaptive PID Controller // M. Yang, S. Zhang / 2014 IEEE 9th Conf. on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – 2014. – P. 1204–1208.

20. Sivaraj S.N. Multivariable control in a multi input multi output climatic chamber to establish climatic comfort inside the chamber. 2015 Int. Conf. on Electrical, Electronics, Signals, Communication and Optimization (EESCO). – 2015. – P. 1–5.
21. Пат. № 2558706 РФ. Климатическая экранированная камера. / М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов (РФ). – № 2014103639; заявл. 03.02.2014. опубл. 08.07.2015, Бюл. № 22.
22. Комнатнов М.Е. Камера для совместных климатических и электромагнитных испытаний электронных компонентов // М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов / Техника радиосвязи. – 2014. – № 3(23). – С. 84–91.
23. Komnatnov M.E. Environmental Shielded TEM Chamber for Biomedical Testing // М.Е. Komnatnov, T.R. Gazizov / Proc. of the IEEE MTT-S Int. Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO), London, December. – 2014. – P. 1–4.
24. Rumbaugh J. UML. The unified modelling language reference manual // J. Rumbaugh, I. Jacobson, G. Booch. / – 2nd Ed. – Boston, Pearson Higher Education. – 2006. – 736 p.
25. Рамбо Дж. UML 2.0. Объектно-ориентированное моделирование и разработка // Дж. Рамбо, М. Блаха / – СПб.: Питер. – 2007. – 545 с.
26. Фаулер М. UML, основы: краткое руководство по стандартному языку объектного моделирования. – СПб.: Питер, Символ-Плюс. – 2018. – 312 с.
27. SysML distilled a brief guide to the systems modeling language / Delligatti L. – Addison-Wesley Professional. – 2014. – 304 p.
28. Пат. № 2674878 РФ. Устройство синхронизации микроконтроллеров / А.А. Собко, А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, М.П. Сухоруков. – Заявка № 2017117125. Заявл.: 16.05.2017; опубл.: 13.12.18.
29. Комнатнов М.Е. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях // М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов / Доклады ТУСУР. – 2014. – № 4. – С. 39–45.
30. Komnatnov M.E. Environmental Shielded TEM Chamber for Biomedical Testing // М.Е. Komnatnov, T.R. Gazizov / Proc. of IEEE International Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-Bio 2014). – 2014. – P. 64–68.
31. Osintsev A.V. Method for synchronizing a group of heterogeneous microcontrollers with time control of synchronous work // A.V. Osintsev, A.A. Sobko, M.E. Komnatnov / Proc. of IEEE 2017 International multi-conference on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk. – 2017. – P. 305–308.
32. Техническая документация на Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V Microchip Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: http://www.atmel.com/images/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf (дата обращения: 05.06.2019).
33. Техническая документация на SAMA5D4 Series SAMA5D41 /42/43/44 // Microchip Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/60001525a.pdf> (дата обращения: 01.06.2019).
34. Техническая документация на STM32F746xx STMicroelectronics. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/DM00166116.pdf> (дата обращения: 01.06.2019).
35. Осинцев А.В. Система сбора и обработки данных климатической экранированной ТЕМ-камеры // А.В. Осинцев, А.А. Собко, М.Е. Комнатнов / Современные проблемы радиоэлектроники. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т. – 2016. – С. 315–319.
36. Osintsev A.V. Diagnostic Service by Means of a Real-Time Operating System for Environmental Shielded TEM-chamber // A.V. Osintsev, A.A. Sobko, M.E. Komnatnov, M.P. Sukhorukov, Y.A. Shinyakov / Proc. of IEEE 2017 International multi-conference on engineering, computer and information sciences. – Novosibirsk. – 2017. – P. 301–304.

37. Касьянов Е.Ю. О решении задачи Дирихле для некоторых многомерных областей методом воспроизводящих ядер // Е.Ю. Касьянов, А.В. Копаев / Известия вузов. Математика. – 1991. – №6. – С. 17–20.
38. Алгазин О.Д. Решение смешанной краевой задачи для уравнения Лапласа в многомерном бесконечном слое // О.Д. Алгазин, А.В. Копаев / Вестник МГТУ им. Н.Э.Баумана. Сер. Естественные науки. – 2015. – №1. – С. 3–13.
39. Schilling A. Heat flowing from cold to hot without external intervention by using a “thermal inductor” // A. Schilling, X. Zhang, O. Bossen / Science advances. – № 4. – 2019. – P. 1–8.
40. Elsheikh M.H. A review on thermoelectric renewable energy: Principle parameters that affect their performance // M.H. Elsheikh, D.A. Shnawah, M.F.M. Sabri, S.B.M. Said, M.H. Hassan, M.B.A. Bashir, M. Mohamad / Renew. Sustain. Energy Rev. – 2014. – Vol. № 30. – P. 337–355.
41. Chen J. Enhanced efficiency of thermoelectric generator by optimizing mechanical and electrical structures // J. Chen, K. Li, C. Liu, M. Li, Y. Lv, L. Jia, S. Jiang / Energies. – 2017. – Vol. № 10. – No. 9. – P. 1–15.
42. Kim S. A thin film thermoelectric cooler for Chip on-Board assembly // S. Kim, H. Lee, N. Kim, J. Yoo / IEICE Electronics Express. – 2010. – Vol. № 7. – No 21. – P. 1615–1621.
43. LD temperature control based on TMS320F2812 // W.D. Zou, Q. Ye, H.H. Xie, L.Z. Zhao / Infrared and Laser Engineering. – 2008. – Vol. 37. № 4. – P. 642–645.
44. Xie H. LD temperature control system based on PWM comparison amplifier // H. Xie, W.D. Zou, C.H. Huang / Chinese Journal of Scientific Instrument. – 2009. – Vol. 30. – № 7. – P. 1530–1534.
45. Li J. High power laser constant temperature control system // J. Li, X. Xu, J. Zhang, X. Wang, J. Cao / IEEE International conference on mechatronics and automation (Takamatsu, Japan, 6–9 August 2017). – Takamatsu. – 2017. – P. 1–5.
46. Zhou F. Tunable photonic microwave signal generation based on TEC temperature controller // F. Zhou, R.G. Wang, Z.B. JiZ, L. Zhao / Journal of Optoelectronics Laser. – 2014. – Vol. 25. – № 9. – P. 1691–1694.
47. Sun X. Performance of a thermoelectric cooling system integrated with a gravity-assisted heat pipe for cooling electronics // X. Sun, L. Zhang, S. Liao / Applied Thermal Engineering. – 2017. – Vol. 116. – P. 433–444.
48. Осинцев А.В. Обзор операционных систем реального времени // А.В. Осинцев, А.А. Собко / Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – Томск. – 2016. – С. 319–321.
49. Fischer H., et al. The COMPASS Data Acquisition System // IEEE Trans. Nuclear Science. – Vol. 49. – 2002. – P. 443–447.
50. Осинцев А.В. Программное обеспечение терморегулятора климатической экранированной ТЕМ-камеры. // А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов / Электронные средства и системы управления: Материалы докладов XI Международной научно-практической конференции: В2 ч. – Ч. 2. – Томск: В-Спектрум. – 2015. – С. 55–59.
51. Таненбаум Э., Бос Х. Современные операционные системы. 4-е изд. - СПб.: Питер, 2015. Серия «Классика computer science» – 1120 с.
52. Cho B.H. Modeling and analysis of spacecraft power systems // B.H. Cho, F.C. Lee / IEEE Transactions on Power Electronics (Vol. 3. Issue: 1, Jan 1988). – 1985. –P. 44–54.
53. FreeRTOS™ Real-time operating system for microcontrollers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.freertos.org/> (дата обращения: 01.06.2022).
54. El-sharif I. Design of discrete-time PID controller // I. El-sharif, F. Hareb, A. Zerek / International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT'14). – 2014. –P. 1–6.
55. Terraneo F. FLOPSYNC-2: efficient monotonic clock synchronisation // F. Terraneo, L. Rinaldi, M. Maggio, A.V. Papadopoulos, A. Leva / IEEE Symp. Real-Time Systems (RTSS 2014). – 2014. – P. 1–4.

56. Boyle J. DiStiNCT: Synchronizing Nodes with Imprecise Timers in Distributed Wireless Sensor Networks // J. Boyle, J. Reeve, A. Weddell / IEEE Trans. on Industrial Informatics. – Iss. 99. – 2017. – P. 1–9.
57. Lamport L. Time, clocks, and the ordering of events in a distributed system / Comm. of ACM. Vol. 21. – Iss. 7. – 1978. – P. 558–565.
58. Probert R.L. Relative-clock-based specification and test result analysis of distributed systems // R.L. Probert, H. Yu, K. Saleh / Conference on Computers and Communications, 1992. Conference Proceedings., Eleventh Annual International Phoenix. 1–3 Apr. Scottsdale, AZ, USA. – 1992. – P. 687–694.
59. Phang S.K. Autonomous Mini-UAV for indoor flight with embedded on-board vision processing as navigation system // S.K. Phang, J.J. Ong, T.C.R. Yeo, B.M. Chen, T.H. Lee / IEEE Region 8 International Conference on Computational Technologies in Electrical and Electronics Engineering (SIBIRCON). – 2010. – Russia. – P. 722–727.
60. Yurkevich V.D. Active Exoskeleton Tracking Control System // International Conference on Biomedical Engineering and Computational Technologies (SIBIRCON), 2015. 28–30 Oct. 2015. – Novosibirsk. – Russia. – P. 124–129.
61. US6697956B1 Method and apparatus for phrase synchronizing a plurality of microcontrollers of a distributed microcontroller network in a brake-by-wire automobile braking system
62. Пат. US 20120005517 A1, G06F 1/08. 21.08.2009.
63. Григорьев Е.В. Воздействие импульсных электромагнитных полей на микросхемы АЦП и ЦАП // Е.В. Григорьев, В.В. Старостенко, Е.П. Таран, Д.А. Унжаков / Радиоэлектроника и информатика. – 2007. – № 4. – С. 22–24.
64. Ахрамович Л.Н. Воздействие импульсных электромагнитных полей на интегральные микросхемы памяти // Л.Н. Ахрамович, М.П. Грибский, Е.В. Григорьев, С.А. Зуев, В.В. Старостенко, Г.И. Чурюмов / Радиоэлектроника и информатика. – 2006. – № 4. – С. 15–17.
65. Яньков А.И. Методы обеспечения сбоеустойчивости к одиночным событиям в процессе проектирования для микропроцессоров K1830BE32УМ и 1830BE32У // А.И. Яньков, В.А. Смерек, В.П. Крюков, В.К. Зольников / Моделирование систем и процессов. – 2012. – № 1. – С. 92–95.
66. Чекмарев С.А. Технология инъектирования сбоев для тестирования сбоеустойчивости микропроцессоров, предназначенных к использованию в бортовой аппаратуре космических аппаратов // С.А. Чекмарев, В.Х. Ханов, А.С. Тимохович / Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. – 2016. – Т. 17. – № 3. – С. 768–781.
67. Kukulj S. Selection and prioritization of test cases by combining white-box and black-box testing methods // S. Kukulj, V. Marinkovic, M. Popovic / 3rd Eastern European Regional Conf. on the Eng. of Computer Based Systems (ECBS-EERC). Budapest, Hungary. – 2013. – P. 1–4.
68. Mumtaz A.K. Analysis of black box software testing techniques: A case study // A.K. Mumtaz, M. Sadiq / Int. Conf. and Workshop on Current Trends in Information Techn. (CTIT), Dubai, United Arab Emirates. – 2011. – P. 1–5.
69. Givel L.M. Use of Runtime Enforcement for the Test of Real-time Systems // L.M. Givel, M. Brun / IEEE 17th Int. Conf. on High Performance Computing and Communic. (HPCC), 7th Int. Symp. on Cyberspace Safety and Security (CSS), 12th Int. Conf. on Embedded Software and Systems (ICCESS), New York, USA. – 2015. – P. 1–7.
70. Pardo J. Robustness study of an embedded operating system for industrial applications // J. Pardo, J.C. Campelo, J.J. Serrano / Proc. of the 28th Annual Int. Comp. Software and Applic. Conf.(COMPSAC), Hong Kong, China. – 2004. – P. 1–2.
71. Paula A. A Black-Box Identification Method for Automated Discrete-Event Systems // A. Paula, L.M. Ernesto, J.J. Lesage / IEEE Trans. on Automation Science and Engineering, – Vol. 14, Iss. 3., – 2017. – P. 1321–1336.

72. Муха Ар.А. Резервированные микроконтроллеры и системы на их основе / Ар.А. Муха, А.В. Федухин // Математические машины и системы, №1. – 2019. – С. 152-163.
73. Kulkarni G. Dual Microcontroller Redundancy System for Critical Applications / G. Kulkarni, B.R. Jadhwar // 2013 International Conference on Machine Intelligence and Research Advancement. – 2013. – P. 353–355.
74. Cardarilli G.C. Design of a fault tolerant solid state mass memory // G.C. Cardarilli, A. Leandri, P. Marinucci, M. Ottavi, S. Pontarelli, M. Re, A. Salsano / Published in IEEE Transactions on Reliability. – 2003. – Vol. 52. – no. 4. – P. 476–491.
75. Kim M.H. Experimental Performance Evaluation of Smoothing Predictive Redundancy Using Embedded Microcontroller Unit / M.H. Kim, S. Lee, K.C. Lee // Published in IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2011. – Vol. 58. – no. 3. – P. 784–791.
76. Quinn H. Robust Duplication With Comparison Methods in Microcontrollers / H. Quinn, Z. Baker, T. Fairbanks, J.L. Tripp, G. Duran // Published in IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2017. – Vol. 64, – no. 1. – P. 338–345.
77. Осинцев А.В. Объектно-ориентированный анализ алгоритма управления и проектирование архитектуры программного обеспечения для климатической экранированной ТЕМ-камеры // А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов / Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники 2(22). – 2019. – С. 83–89.
78. Собко А.А. Способ синхронизации группы разнотипных микроконтроллеров с управлением временем синхронной работы / А.А. Собко, А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов, Т. Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – №3. – С. 51–63.
79. Собко А.А. Методика управления группой элементов Пельтье посредством реверсивных преобразователей с дополнительным ключом управления электропитанием для климатической ТЕМ-камеры // А.А. Собко, А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов / Системы управления, связи и безопасности. – 2019. – №4. – С. 323–341.
80. Осинцев А.В. Синхронизация группы микроконтроллеров // А.В. Осинцев, А.А. Собко, М.Е. Комнатнов / Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2017». – Ч. 3. В-Спектр 2017. 10–12 мая, г. Томск. – 2017. – С. 74–77.
81. Комнатнов М.Е. Плата управления терморегулятором климатической экранированной ТЕМ-камеры // М.Е. Комнатнов, А.А. Собко, А.В. Осинцев / Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». – 2016. – С. 330–333.
82. Osintsev A.V. Software under control of a real-time operating system for environmental shielded TEM-chamber // A.V. Osintsev, A.A. Sobko, M.E. Komnatnov / 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices. – 2016. – P. 159–163.
83. Осинцев А.В. Пятифазная широтно-импульсная модуляция терморегулятора // А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов, А.А. Собко, А.В. Демаков / Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016: сб. тр. между-нар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. – Том. 1. – 2016. – С. 27–30.
84. Осинцев А.В. Имитационная модель для вычисления температуры стенок ТЕМ-камеры. 22-я Межд. науч.-практ. конф. «Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири (СИБРЕСУРС-27-2021)». – Томск. – 2021. – С. 140–145.
85. Осинцев А.В. Разработка системы диагностики малых космических аппаратов класса CubeSat / Тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства». – 2018. – С. 26–28.
86. Осинцев А.В., Комнатнов М.Е. Метод выявления и исправления ошибок данных в памяти микроконтроллера на основе аппаратного подсчета контрольной суммы / А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов // Доклады ТУСУР. – 2022. – Т. 25, № 1. – С. 70–78.

87. ГОСТ Р 51317.4.2-2010 (МЭК 61000-4-2:2008) Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний. – 2010. – 26 с.
88. International Electrotechnical Commission et al. IEC 62132-2, Measurement of Electromagnetic Immunity Part 2: Measurement of Radiated Immunity, TEM Cell and Wideband TEM Cell Method. IEC 62132-2. – 2010.
89. STM32CubeProgrammer software for all STM32 (электронный доступ: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeprog.html>)
90. The Gregory-Leibniz Series [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://crypto.stanford.edu/pbc/notes/pi/glseries.html> (дата обращения 6.10.2021).
91. IEC 62132-4–2006. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity 150 kHz to 1 GHz – Part 4: Direct RF power injection method.
92. STM32 ST-LINK utility [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.st.com/en/development-tools/stsw-link004.html> (дата обращения 6.10.2021).
93. Osintsev A.V Diagnostic Service by Means of a Real-Time Operating System for Environmental Shielded TEM-chamber / A.V. Osintsev, A.A. Sobko, M.E. Komnatnov, M.P. Sukhorukov, Y.A. Shinyakov // 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – 2017. – P. 301–304.
94. Осинцев А.В. Разработка кроссплатформенной библиотеки для прецизионного цифрового датчика MAX31725 / А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов // Материалы двенадцатой международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления», Томск, 16–18 ноября 2016: В-Спектр, 2016. – Т. 1. – С. 227–229.
95. ACS712 Fully Integrated, Hall-Effect-Based Linear Current Sensor IC with 2.1 kVRMS Isolation and a Low-Resistance Current Conductor. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://datasheetspdf.com/pdf-file/570845/AllegroMicroSystems/ACS712/1> (дата обращения 18.03.2021).
96. Dubreuil V. Designing Multiple PID Controllers Based on an FPGA for Controlling the Temperature of TEM-cell Surfaces // V. Dubreuil, A.V. Osintsev / 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). – P. 1–5.
97. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2017617018. Симулятор синхронизации группы микроконтроллеров. Авторы: Осинцев А.В., Газизов Т.Р., Комнатнов М.Е, Собко А.А., Сухоруков М.П. Заявка №2017613710. Дата поступления 24 апреля 2017 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 июня 2017 г.
98. САПР Proteus Design Suite [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://labcenter.s3.amazonaws.com/downloads/Tutorials.pdf> (дата обращения 18.07.2022).

Приложение А
(справочное)

Результаты исследования помехоустойчивости микроконтроллера

Выполнен анализ помехоустойчивости МК STM32F103C8T6 и 1986BE92QI к воздействию СКИ в uTEM-камере (таблица А.1). Воздействие ЭМИ осуществлялось в uTEM-камере при климатическом воздействии. Общее число проведённых измерений и соответствующие им параметры воздействий сведены в таблицу А.1.

Таблица А.1 – Условия проведения измерений МК

Воздействие	Амплитуда, кВ	$T, ^\circ\text{C}$	Частота МК, МГц	Число тестов	Число измерений
СКИ	0,7; 0,85	23	5	6	60
ЭСР	1, 3, 7	23	5	6	90
СКИ с климат. воздействием	0,7; 0,85	-50, +105	5	6	120
ЭСР с климат. воздействием	1, 3, 7	-50, +105	5	6	180

Анализ проводился при программном обращении к флеш-памяти. Частота повторения импульсов выбрана равной 1 кГц с продолжительностью итогового воздействия 30 с. В результате выполнения 60 тестов обнаружены два изменения в работе устройства. Так, при работе второй тестовой программы при воздействии СКИ с амплитудой 0,7 кВ выявлено изменение в памяти, соответствующее расположению основной программы тестовых данных (рисунок А.1).

Address	0	4	8	C
0x08000510	0208EA22	0908EA23	0870F247	0208EA22
0x08000520	0E60F246	0308EA29	090EEB03	3833F243
0x08000530	EA2B4472	F8AC0308	8002A000	9000F8A1
0x08000540	32344A18	1D128014	1D128014	1D128014
0x08000550	803B8014	F2408803	43134204	88088003
0x08000560	80084310	0000F8BC	0070F020	0000F8AC
0x08000570	F0208830	80300080	F04069A8	61A8000C
0x08000580	68014809	41AAF021	412AF041	48076001
0x08000590	F0216801	F0410155	600101AA	8FF0E8BD
0x080005A0	40021000	40000400	40010800	40010C00
0x080005B0	EA500049	BF1820C1	0D4A2004	F040BF18
0x080005C0	F2400001	EBB272FF	BF085F51	0002F040
0x080005D0	BF082801	47702005	41F0E92D	EB001E4F
0x080005E0	460401C7	0100E9D1	461E4615	0206F037
0x080005F0	462AD00D	F0014633	1E7FF8BB	03C7E804
0x08000600	2300E9D3	FE4CF000	0206F037	2F02D1F1
0x08000610	2F04D025	2F06D013	E88DBF18	462A81F0
0x08000620	F0014633	E9D4F8A5	F000230A	462AFE39
0x08000630	F0014633	E9D4F89D	F0002308	462AFE31

a

Address	0	4	8	C
0x08000510	0208EA22	0908EA23	0870F247	0208EA22
0x08000520	0E60F246	0308EA29	090EEB03	3833F243
0x08000530	EA2B4472	F8AC0308	8002A000	9000F8A1
0x08000540	32344A18	1D128014	1D128014	1D128014
0x08000550	803B8014	F2408803	43134204	88088003
0x08000560	80084310	0000F8BC	0070F020	0000F8AC
0x08000570	F0208830	80300080	F04069A8	61A8000C
0x08000580	68014809	41AAF021	412AF041	48076001
0x08000590	F0216801	F0410155	600101AA	8FF0E8BD
0x080005A0	40021000	40000400	40010800	40010C00
0x080005B0	F7FFB510	F7FFFF15	481FFF6B	F2418801
0x080005C0	43111211	481C8001	88013820	0101F041
0x080005D0	49198001	3114200A	1D098008	1D098008
0x080005E0	1D098008	49158008	4A156988	000CF000
0x080005F0	69C86050	0001F040	F04F61C8	040822E0
0x08000600	0100F8C2	F6400080	8502620F	62FAF44F
0x08000610	698A8582	0210F042	490A618A	F442684A
0x08000620	604A1280	F0418981	81810101	F0418801
0x08000630	80010101	0000BD10	40000420	40021000

б

Address	0	4	8	C
0x08007D20	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D30	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D40	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D50	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D60	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D70	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D80	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D90	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007DA0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007DB0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007DC0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007DD0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007DE0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007DF0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007E00	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007E10	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007E20	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007E30	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007E40	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF

в

Address	0	4	8	C
0x08007D20	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D30	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D40	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D50	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D60	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D70	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D80	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D90	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007DA0	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007DB0	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007DC0	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007DD0	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007DE0	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007DF0	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007E00	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007E10	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007E20	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007E30	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007E40	000BFBF6	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF

г

Рисунок А.1 – Фрагменты адресного пространства флеш-памяти МК STM32F103C8T6 для второй тестовой программы до (а, в) и после (б, г) воздействия СКИ

При амплитуде 1 кВ во время выполнения второй тестовой комбинации, на системной частоте 72 МГц выявлен программный сбой МК (рисунок А.2). В результате тестируемый МК прекратил реагировать на команды по интерфейсам JTAG, SWD и UART от отладочного комплекта ST Link/v2. Повторное выполнение теста привело к аналогичному выходу из рабочего состояния тестируемого МК.

```

Log
12:56:52 : Error: ST-LINK error (DEV_TARGET_HELD_UNDER_RESET)
12:56:57 : ST-LINK SN : 36FF70064B46323622520643
12:56:57 : ST-LINK FW : V2J38S7
12:56:57 : Board : --
12:56:57 : Voltage : 0.49V
12:56:57 : Error: No STM32 target found!
12:57:00 : ST-LINK SN : 36FF70064B46323622520643
12:57:00 : ST-LINK FW : V2J38S7
12:57:00 : Board : --
12:57:00 : Voltage : 1.57V
12:57:02 : Error: ST-LINK error (DEV_TARGET_HELD_UNDER_RESET)
12:58:15 : ST-LINK error (DEV_CONNECT_ERR)
12:58:15 : Error: Problem occured while trying to connect
12:59:09 : ST-LINK error (DEV_CONNECT_ERR)
12:59:09 : Error: Problem occured while trying to connect
12:59:15 : ST-LINK error (DEV_CONNECT_ERR)
12:59:15 : Error: Problem occured while trying to connect
12:59:29 : ST-LINK error (DEV_CONNECT_ERR)
12:59:29 : Error: Problem occured while trying to connect
12:59:36 : ST-LINK error (DEV_CONNECT_ERR)
12:59:36 : Error: Problem occured while trying to connect

```

Рисунок А.2 – Отображение ошибки определения МК STM32F103C8T6 в STM32CubeProgrammer после воздействия СКИ амплитудой 1 кВ

Результаты дополнительных исследований по воздействию СКИ на МК STM32F103C8T6 и 1986BE92QI отображены в таблицах А.2 и А.3 соответственно.

Таблица А.2 – Результаты тестирования МК STM32F103C8T6 на помехоустойчивость

Тест	Частота тактирования ядра МК				
	8 МГц	16 МГц	32 МГц	64 МГц	72 МГц
АЛУ	–	–	–	–	–
АЛУ, таймер	+	–	–	–	+
АЛУ, таймер, порты	–	–	–	–	–
АЛУ, порты, UART	–	–	–	–	–
АЛУ, порты, АЦП	–	–	–	–	–
АЛУ, таймер, порты, UART, АЦП	–	–	–	–	–

Таблица А.3 – Результаты тестирования МК 1986BE92QI на помехоустойчивость

№	Тест	Частота тактирования ядра МК				
		8 МГц	16 МГц	32 МГц	64 МГц	72 МГц
1	АЛУ	–	–	–	–	–
2	АЛУ, таймер	–	–	–	–	–
3	АЛУ, таймер, порты	–	–	–	–	–
4	АЛУ, порты, UART	–	–	–	–	–
5	АЛУ, порты, АЦП	–	–	–	–	–
6	АЛУ, таймер, порты, UART, АЦП	–	–	–	–	–

Таким образом, выполнено воздействие СКИ на МК STM32F103C8T6 (таблица А.2) и 1986BE92QI (таблица А.3). Наблюдались изменения в работе МК STM32F103C8T6

работающего на системных частотах 8 и 72 МГц. Наиболее уязвимыми функциональными блоками для данного МК оказались АЛУ и таймеры. Для отечественного МК 1986BE92QI не было выявлено каких-либо изменений при работе МК и на данном этапе уязвимые блоки неопределенны.

Исследование помехоустойчивости МК к воздействию ЭМИ, возбуждаемого в uTEM-камере имитатором ЭСР

Выполнено исследование помехоустойчивости МК к воздействию ЭМИ, возбуждаемого в uTEM-камере имитатором ЭСР. Амплитуды импульсов выбраны равными 1, 3 и 7 кВ с частотой повторения импульсов 1 Гц и продолжительностью воздействия 3 с. Анализ результатов после воздействия на МК STM32F103C8T6 (таблица А.4) и 1986BE92QI (таблица А.5) показал, что данный тип воздействия не нарушает работы МК и изменения во флеш-памяти МК не происходит.

Таблица А.4 – Результаты тестирования МК STM32F103C8T6 на помехоустойчивость

№	Тест	Частота тактирования ядра МК				
		8 МГц	16 МГц	32 МГц	64 МГц	72 МГц
1	АЛУ	–	–	–	–	–
2	АЛУ, таймер	–	–	–	–	–
3	АЛУ, таймер, порты	–	–	–	–	–
4	АЛУ, порты, UART	–	–	–	–	–
5	АЛУ, порты, АЦП	–	–	–	–	–
6	АЛУ, таймер, порты, UART, АЦП	–	–	–	–	–

Таблица А.5 – Результаты тестирования МК 1986BE92QI на помехоустойчивость

№	Тест	Частота тактирования ядра МК				
		8 МГц	16 МГц	32 МГц	64 МГц	72 МГц
1	АЛУ	–	–	–	–	–
2	АЛУ, таймер	–	–	–	–	–
3	АЛУ, таймер, порты	–	–	–	–	–
4	АЛУ, порты, UART	–	–	–	–	–
5	АЛУ, порты, АЦП	–	–	–	–	–
6	АЛУ, таймер, порты, UART, АЦП	–	–	–	–	–

Исследование помехоустойчивости МК при совместном климатическом и электромагнитном воздействии

Выполнены исследования оценки помехоустойчивости МК при совместном климатическом и электромагнитном воздействии. На основе предыдущих результатов по воздействию СКИ и ЭСР разработаны аналогичные тесты для совместного климатического и электромагнитного воздействия на МК STM32F103C8T6 и 1986BE92QI. Исследования выполнены при размещении uTEM-камеры с исследуемым МК, датчиками

температуры DS18B20 и влажности DHT11 внутри камеры тепло-холод ESPEC SU-262. Температура внутри камеры тепло-холод изменялась от минус 50°C до +105°C. Верхняя граница диапазона температур (+105°C) выбрана из технической документации на МК (максимальная рабочая температура). Влажность внутри камеры тепло-холод изменялась естественно при её нагреве или охлаждении и при температуре минус 50°C составляла 95%, а при температуре +105°C минус 25%.

Исследование помехоустойчивости МК к воздействию ЭМИ, возбуждаемого в uTEM-камере генератором СКИ, и изменении климатических условий

Выполнено исследование помехоустойчивости МК STM32F103C8T6 (рисунок А.3) к воздействию ЭМИ, возбуждаемого в uTEM-камере генератором СКИ, в диапазоне температур от минус 50°C до 105°C. Использован сигнал от генератора СКИ амплитудой 0,7 кВ и 0,85 кВ, с частотой повторения импульсов 1 кГц и продолжительностью воздействия 30 с.

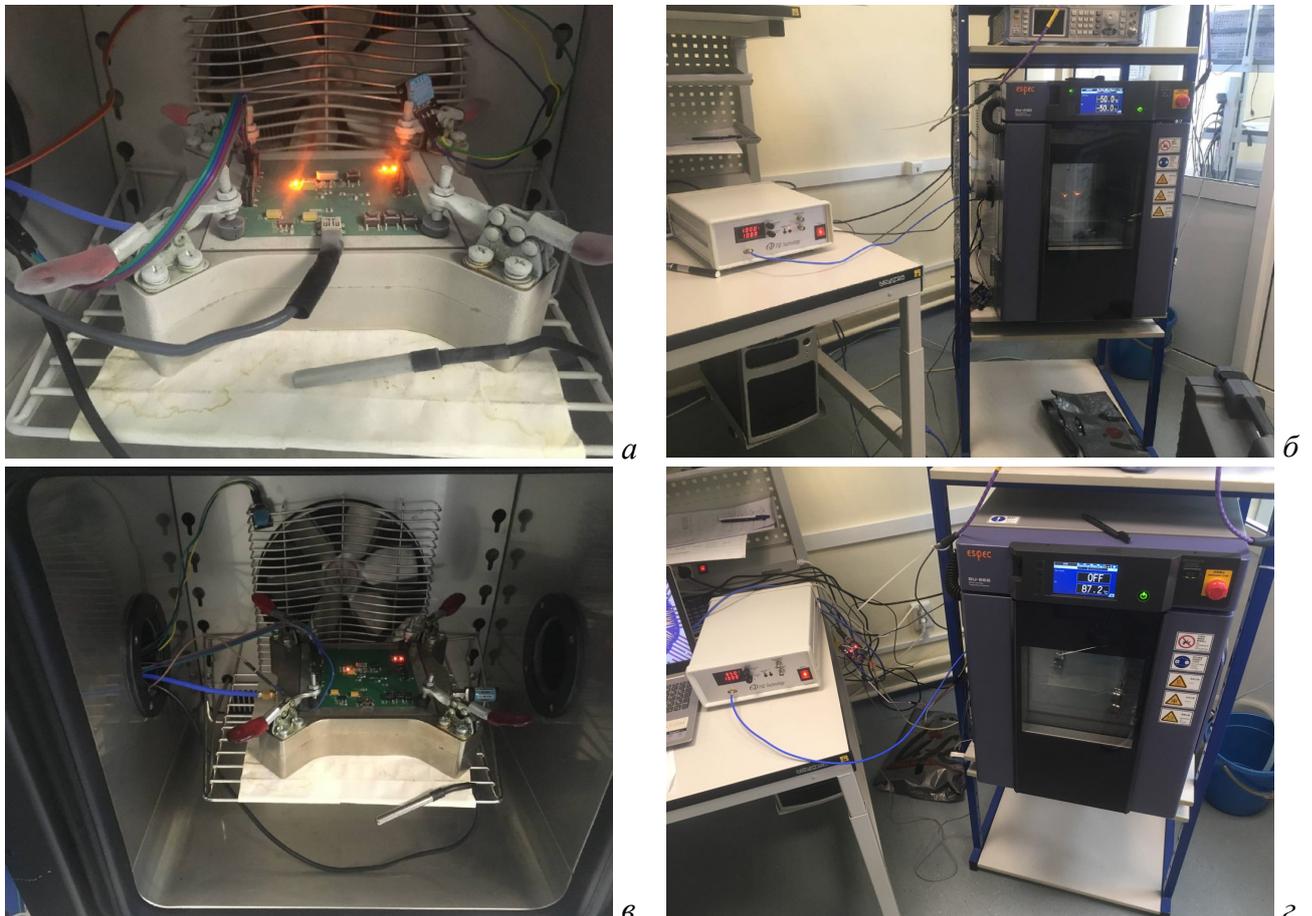


Рисунок А.3 – Размещение uTEM-камеры и измерительной ПП с МК STM32F103C8E6 в камере тепло-холод (а, в), подача воздействия с генератора СКИ (б, г)

Из анализа результатов испытаний следует, что при температуре +105°C и после воздействия СКИ амплитудой 0,85 кВ произошло изменение состояния флеш-памяти МК в процессе выполнения тестовой программы №6 (таблица А.2). При работе исследуемого МК на системной частоте 16 МГц выявлено повреждение 69% данных в флеш-памяти, содержащей

основную программу МК, однако данные, хранящиеся в адресном пространстве 0x8000C700–0x801F400 не изменились (рисунок А.4). При последующем изменении температуры МК состояние его флеш-памяти осталось прежним.

Address	0	4	8	C
0x08000D40	F0014633	E9D4F88F	F0002308	462AFDF7
0x08000D50	F0014633	E9D4F887	F0002306	462AFDEF
0x08000D60	F0014633	E9D4F87F	F0002304	462AFDE7
0x08000D70	F0014633	E9D4F877	F0002302	462AFDDF
0x08000D80	F0014633	E9D4F86F	E8BD2300	F00041F0
0x08000D90	0000BDD5	46132200	49014610	BE8AF000
0x08000DA0	3FF00000	BDCAF000	46132200	46114610
0x08000DB0	BE80F000	3201F240	F04F2000	F00141E0
0x08000DC0	0000BDA6	20004A02	F0010711	0000BDA0
0x08000DD0	FFFFFFD01	280A3830	2001D201	20004770
0x08000DE0	00004770	F000B570	460DFFEA	46224604
0x08000DF0	2000462B	F0004907	4622F86D	F001462B
0x08000E00	E8BDF831	46024070	2000460B	F0004902
0x08000E10	0000BE51	40140000	40300000	F000B570
0x08000E20	460DFfce	46224604	2000462B	F0004907
0x08000E30	4622F851	F001462B	E8BDF815	46024070
0x08000E40	2000460B	F0004902	0000BE35	406DE000
0x08000E50	40100000	F7FF2000	E92DFEE9	260047F0
0x08000E60	F2422001	46B07910	46354634	28004607

а

Address	0	4	8	C
0x08000D40	F0014633	E9D4F891	F0002308	462AFDF9
0x08000D50	F0014633	E9D4F889	F0002306	462AFDF1
0x08000D60	F0014633	E9D4F881	F0002304	462AFDE9
0x08000D70	F0014633	E9D4F879	F0002302	462AFDE1
0x08000D80	F0014633	E9D4F871	E8BD2300	F00041F0
0x08000D90	0000BDD7	46132200	49014610	BE8CF000
0x08000DA0	3FF00000	BDCCF000	46132200	46114610
0x08000DB0	BE82F000	3201F240	F04F2000	F00141E0
0x08000DC0	0000BDA8	20004A02	F0010711	0000BDA2
0x08000DD0	FFFFFFD01	280A3830	2001D201	20004770
0x08000DE0	00004770	F000B570	460DFFEc	46224604
0x08000DF0	2000462B	F0004907	4622F86F	F001462B
0x08000E00	E8BDF833	46024070	2000460B	F0004902
0x08000E10	0000BE53	40140000	40300000	F000B570
0x08000E20	460DFFD0	46224604	2000462B	F0004907
0x08000E30	4622F853	F001462B	E8BDF817	46024070
0x08000E40	2000460B	F0004902	0000BE37	406DE000
0x08000E50	40100000	2000F44F	FEE8F7FF	47F0E92D
0x08000E60	20012600	7910F242	46344680	46074635

б

Address	0	4	8	C
0x08007C00	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C10	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C20	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C30	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C40	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C50	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C60	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C70	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C80	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C90	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007CA0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007CB0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007CC0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007CD0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007CE0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007CF0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D00	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D10	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D20	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF

в

Address	0	4	8	C
0x08007C00	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C10	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C20	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C30	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C40	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C50	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C60	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C70	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C80	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007C90	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007CA0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007CB0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007CC0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007CD0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007CE0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007CF0	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D00	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D10	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF
0x08007D20	0077D79D	FFFFFFFF	00000002	FFFFFFFF

г

Рисунок А.4 – Фрагменты адресного пространства «основной программы» (а, б) и записанных данных (в, г) в флеш-памяти МК STM32F103C8T6 до (а, в) и после (б, г) воздействия СКИ при температуре +105°C и влажности воздуха 25%

Аналогичным образом выполнено исследование помехоустойчивости МК 1986BE92Q1 (рисунок А.5).

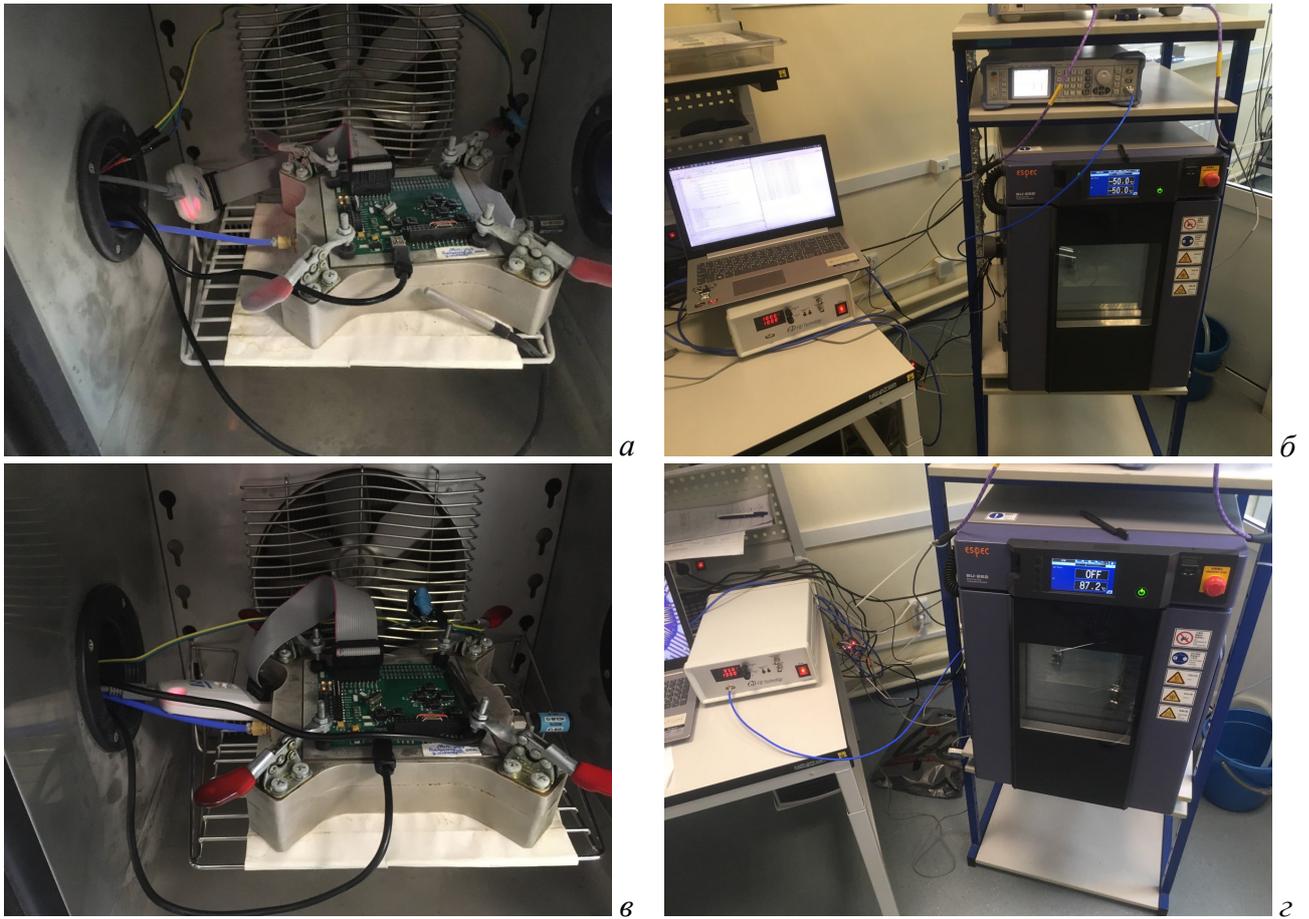


Рисунок А.5 – Размещение uTEM-камеры и измерительной ПП с МК 1986BE92QI в камере тепло-холод (а, в), подача воздействия с генератора СКИ (б, з)

Анализ результатов после воздействия СКИ на МК 1986BE92QI при различных температурах не выявил изменений в его флеш-памяти (рисунок А.6).

Property	Value	Property	Value
REG_00	0x0077D79D	REG_00	0x0077D79D
REG_01	0x00000002	REG_01	0x00000002
REG_02	0x0077D79D	REG_02	0x0077D79D
REG_03	0x00000002	REG_03	0x00000002
REG_04	0x0077D79D	REG_04	0x0077D79D
REG_05	0x00000002	REG_05	0x00000002
REG_06	0x0077D79D	REG_06	0x0077D79D
REG_07	0x00000002	REG_07	0x00000002
REG_08	0x0077D79D	REG_08	0x0077D79D
REG_09	0x00000002	REG_09	0x00000002
REG_0A	0x0077D79D	REG_0A	0x0077D79D
REG_0B	0x00000002	REG_0B	0x00000002
REG_0C	0x0077D79D	REG_0C	0x0077D79D
REG_0D	0x00000002	REG_0D	0x00000002

Рисунок А.6 – Сравнение регистров аварийного сохранения для МК 1986BE92QI до (а) и после (б) воздействия СКИ

Результаты дополнительно проведённых исследований по устойчивости к воздействию СКИ на МК STM32F103C8T6 и 1986BE92QI приведены в таблице А.6 и А.7 соответственно.

Таблица А.6 – Результаты тестов воздействия внешнего СКИ в температурном диапазоне от минус 50°С до 105°С на МК STM32F103C8T6

№	Тест	Частота тактирования ядра МК				
		8 МГц	16 МГц	32 МГц	64 МГц	72 МГц
1	АЛУ	–	–	–	–	–
2	АЛУ, таймер	–	–	–	–	–
3	АЛУ, таймер, порты	–	–	–	–	–
4	АЛУ, порты, UART	–	–	–	–	–
5	АЛУ, порты, АЦП	–	–	–	–	–
6	АЛУ, таймер, порты, UART, АЦП	–	Изменения при T=+105°С	–	–	–

Таблица А.7 – Результаты тестов влияния внешнего СКИ в температурном диапазоне от минус 50°С до 105°С на МК 1986BE92Q1

№	Тест	Частота тактирования ядра МК				
		8 МГц	16 МГц	32 МГц	64 МГц	72 МГц
1	АЛУ	–	–	–	–	–
2	АЛУ, таймер	–	–	–	–	–
3	АЛУ, таймер, порты	–	–	–	–	–
4	АЛУ, порты, UART	–	–	–	–	–
5	АЛУ, порты, АЦП	–	–	–	–	–
6	АЛУ, таймер, порты, UART, АЦП	–	–	–	–	–

Из результатов проведенных совместных климатических и электромагнитных воздействий на группу МК видно, что изменение в МК STM32F103C8T6 происходит для тестовой программы №6 и при температуре +105°С, в то время как для МК 1986BE92Q1 изменений в работе выявлено не было.

Исследование помехоустойчивости МК к воздействию ЭСР при изменении климатических условий

Выполнено исследование помехоустойчивости МК STM32F103C8T6 при совместном климатическом и электромагнитном воздействии в виде ЭСР в ТЕМ-камере (рисунок А.7). Амплитуда ЭСР выбрана равной 1, 3 и 7 кВ с частотой повторения импульсов 1 Гц и длительностью воздействия 3 секунд. Измерения выполнены в диапазоне температур от минус 50°С до +105°С.

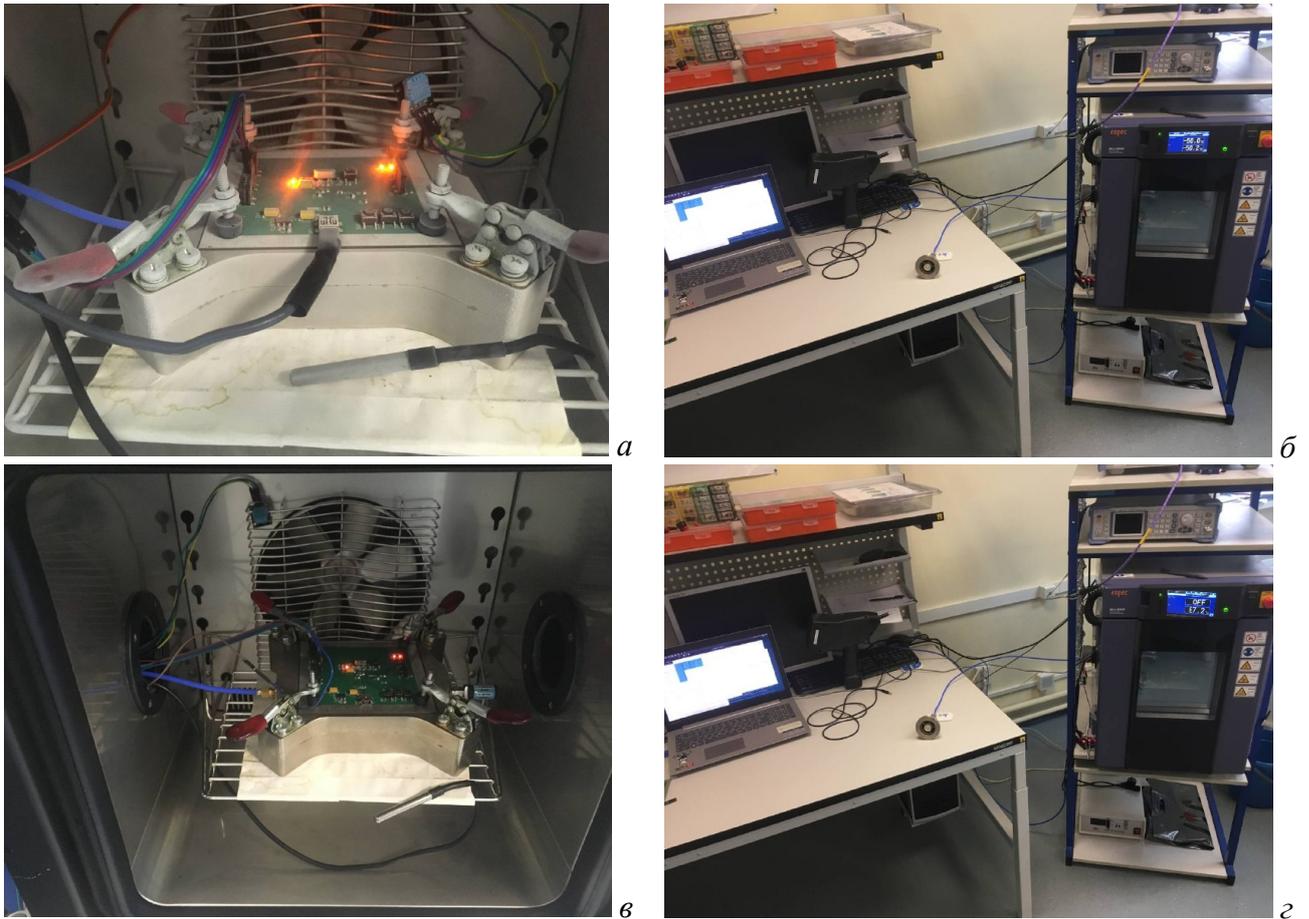


Рисунок А.7 – Размещение uTEM-камеры и измерительной ПП с МК STM32F103C6T8 в камере тепло-холод (а, в), подача воздействия с имитатора ЭСР (б, з)

Анализ результатов выполненного 180 раз тестирования МК STM32F103C8T6 не выявил изменений в работе исследуемого МК (рисунок А.8).

Address	0	4	8	C
0x08000000	2000670	08000191	08000199	0800019B
0x08000010	0800019D	0800019F	080001A1	00000000
0x08000020	00000000	00000000	00000000	080001A3
0x08000030	080001A5	00000000	080001A7	08000929
0x08000040	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x08000050	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x08000060	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x08000070	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x08000080	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x08000090	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x080000A0	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x080000B0	0800098D	080001AB	080001AB	080001AB
0x080000C0	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x080000D0	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x080000E0	080001AB	080001AB	080001AB	F802F000
0x080000F0	F83FF000	E89A00A	44820C00	F1AA4483
0x08000100	45DA0701	F000D101	F2AFF834	E8BA0E09
0x08000110	F013000F	BF180F01	F0431AFB	47180301
0x08000120	00002970	00002990	BF243A10	C178C878

Address	0	4	8	C
0x08000000	2000670	08000191	08000199	0800019B
0x08000010	0800019D	0800019F	080001A1	00000000
0x08000020	00000000	00000000	00000000	080001A3
0x08000030	080001A5	00000000	080001A7	08000929
0x08000040	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x08000050	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x08000060	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x08000070	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x08000080	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x08000090	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x080000A0	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x080000B0	0800098D	080001AB	080001AB	080001AB
0x080000C0	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x080000D0	080001AB	080001AB	080001AB	080001AB
0x080000E0	080001AB	080001AB	080001AB	F802F000
0x080000F0	F83FF000	E89A00A	44820C00	F1AA4483
0x08000100	45DA0701	F000D101	F2AFF834	E8BA0E09
0x08000110	F013000F	BF180F01	F0431AFB	47180301
0x08000120	00002970	00002990	BF243A10	C178C878

Рисунок А.8 – Фрагменты адресного пространства флеш-памяти МК STM32F103C8E6 до (а) и после (б) воздействия ЭСР

Аналогичным образом проведено тестирование МК 1986BE92QI (рисунок А.9).

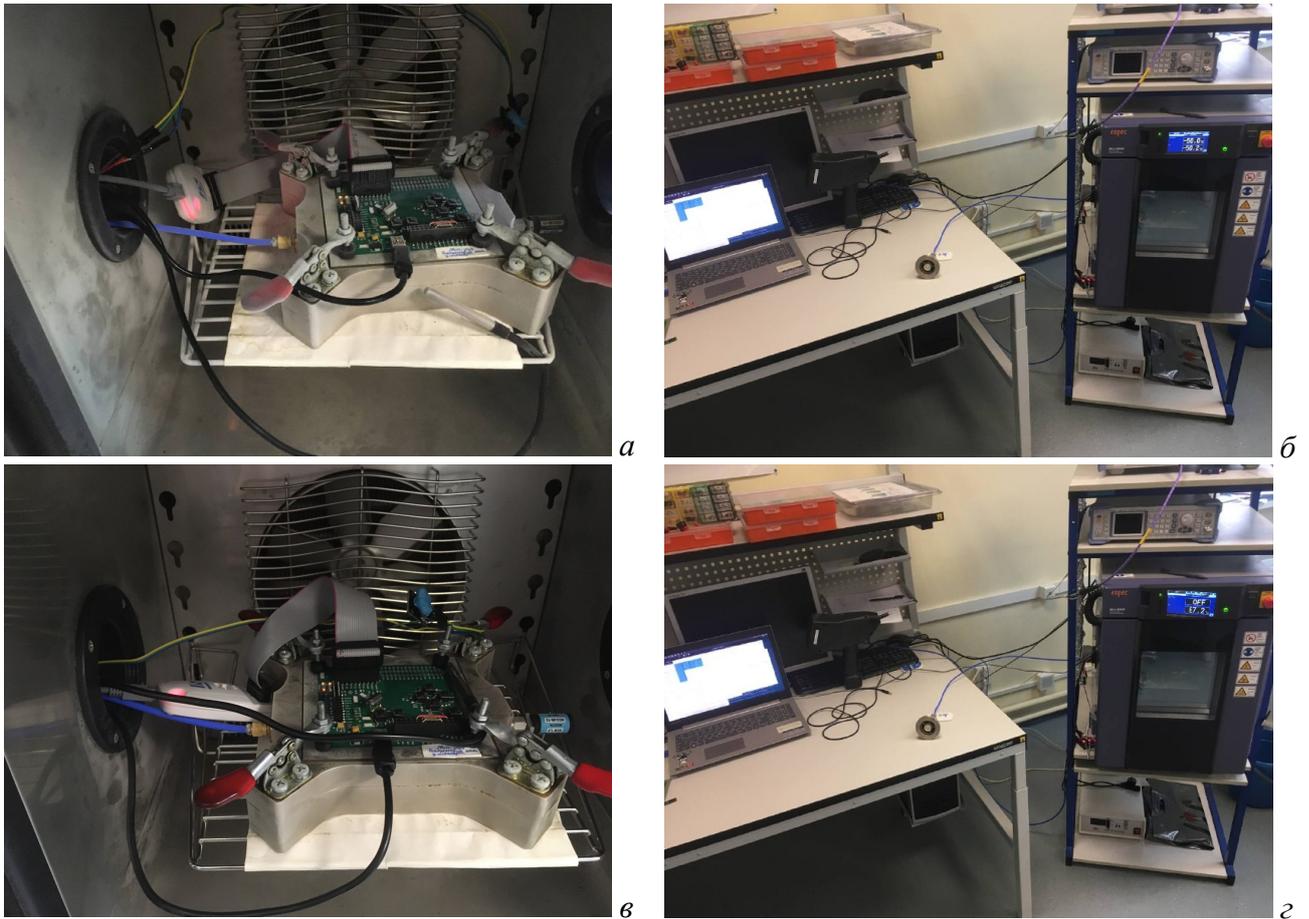


Рисунок А.9 – Размещение uTEM-камеры и измерительной ПП с МК 1986BE91Т в камере тепло-холод (а, в), подача воздействия с имитатора ЭСР (б, г)

Зафиксировано изменение во всех регистрах аварийного сохранения МК 1986BE92QI при температуре минус 50°C после воздействия ЭСР с максимальной амплитудой напряжения 1 кВ при выполнении тестовой программы №5 на системной частоте МК 72 МГц (рисунок А.10).

Property	Value
REG_00	0x0077D79D
REG_01	0x00000002
REG_02	0x0077D79D
REG_03	0x00000002
REG_04	0x0077D79D
REG_05	0x00000002
REG_06	0x0077D79D
REG_07	0x00000002
REG_08	0x0077D79D
REG_09	0x00000002

Property	Value
REG_00	0
REG_01	0
REG_02	0x00000004
REG_03	0
REG_04	0x00080000
REG_05	0
REG_06	0
REG_07	0x02000000
REG_08	0x20000000
REG_09	0

Рисунок А.10 – Фрагменты регистров аварийного сохранения при выполнении тестовой программы №5 на системной частоте МК 72 МГц до (а) и после воздействия ЭСР (б) при температуре минус 50°C

Анализ результатов теста показал полное изменение в регистрах аварийного сохранения (рисунок А.11).

Property	Value
REG_00	0x0077D79D
REG_01	0x00000002
REG_02	0x0077D79D
REG_03	0x00000002
REG_04	0x0077D79D
REG_05	0x00000002
REG_06	0x0077D79D
REG_07	0x00000002
REG_08	0x0077D79D
REG_09	0x00000002

a

Property	Value
REG_00	0x0077D79D
REG_01	0x00000002
REG_02	0x0077D78D
REG_03	0x00000002
REG_04	0x0077D79D
REG_05	0x00000002
REG_06	0x0077D79D
REG_07	0x00000002
REG_08	0x0077D79D
REG_09	0x00000002

б

Рисунок А.11 – Фрагменты регистров аварийного сохранения при работе тестовой программы №5 на системной частоте МК 64 МГц до (*a*) и после воздействия ЭСР (*б*) при температуре минус 50°C

Также было зафиксировано изменение всех значений регистров аварийного сохранения МК 1986BE92QI при температуре минус 50°C для тестовой программы №6, системной частоты МК 72 МГц и амплитуды воздействия 1 кВ (рисунок А.12).

Property	Value
REG_00	0x0077D79D
REG_01	0x00000002
REG_02	0x0077D79D
REG_03	0x00000002
REG_04	0x0077D79D
REG_05	0x00000002
REG_06	0x0077D79D
REG_07	0x00000002
REG_08	0x0077D79D
REG_09	0x00000002

a

Property	Value
REG_00	0
REG_01	0
REG_02	0x00000004
REG_03	0
REG_04	0x00080000
REG_05	0
REG_06	0
REG_07	0x02000000
REG_08	0x20000000
REG_09	0

б

Рисунок А.12 – Фрагменты регистров аварийного сохранения МК 1986BE92QI при работе тестовой программы №6 на системной частоте 72 МГц до (*a*) и после (*б*) воздействия ЭСР при температуре 105°C

Анализ результатов работы тестовой комбинации №6 при системной частоте МК 8 МГц, температуре 105°C и амплитуде 7 кВ, зафиксировано изменение всех значений в регистрах аварийного сохранения МК 1986BE92QI (рисунок А.13).

Property	Value	Property	Value
REG_00	0x0077D79D	REG_00	0
REG_01	0x00000002	REG_01	0
REG_02	0x0077D79D	REG_02	0x00000004
REG_03	0x00000002	REG_03	0
REG_04	0x0077D79D	REG_04	0x00080000
REG_05	0x00000002	REG_05	0
REG_06	0x0077D79D	REG_06	0
REG_07	0x00000002	REG_07	0x02000000
REG_08	0x0077D79D	REG_08	0x20000000
REG_09	0x00000002	REG_09	0

Рисунок А.13 – Фрагменты регистров аварийного сохранения МК 1986BE92QI при работе тестовой программы №6 на частоте 8 МГц до (а) и после (б) воздействия ЭСР при температуре 105°С

При выполнении других тестов зафиксировано изменений в регистрах аварийного сохранения не было (таблица А.9).

Таблица А.8 – Результаты тестов воздействия ЭСР на МК STM32F103C8T6 в температурном диапазоне от минус 50°С до 105°С

№	Тест	Частота тактирования ядра МК				
		8 МГц	16 МГц	32 МГц	64 МГц	72 МГц
1	АЛУ	–	–	–	–	–
2	АЛУ, таймер	–	–	–	–	–
3	АЛУ, таймер, порты	–	–	–	–	–
4	АЛУ, порты, UART	–	–	–	–	–
5	АЛУ, порты, АЦП	–	–	–	–	–
6	АЛУ, таймер, порты, UART, АЦП	–	–	–	–	–

Таблица А.9 – Результаты тестов воздействия ЭСР на МК 1986BE92QI в температурном диапазоне от минус 50°С до 105°С

№	Тест	Частота тактирования ядра МК				
		8 МГц	16 МГц	32 МГц	64 МГц	72 МГц
1	АЛУ	–	–	–	–	–
2	АЛУ, таймер	–	–	–	–	–
3	АЛУ, таймер, порты	–	–	–	–	–
4	АЛУ, порты, UART	–	–	–	–	–
5	АЛУ, порты, АЦП	–	–	–	–50°С	–50°С
6	АЛУ, таймер, порты, UART, АЦП	+105°С	–	–	–	+105°С

Таким образом, выполнен ряд комбинированных тестов МК 1986BE92QI (таблица А.8) и его аналога STM32F103C8T6 (таблица А.9). Анализ результатов тестов выявил изменения в дампах флеш-памяти до и после электромагнитного воздействия на МК. Выполнены экспериментальные исследования влияния совместного климатического и электромагнитного

воздействия на помехоустойчивость МК. Совместное климатическое и электромагнитное воздействие СКИ на МК STM32F103C8T6 привело к изменениям флеш-памяти в большем количестве тестов, чем в стандартных испытаниях на помехоустойчивость. Результаты совместных испытаний МК 1986BE92QI на воздействие ЭСР показывают, что наиболее чувствительными функциональными блоками МК в области отрицательных температур являются АЛУ, порты ввода/вывода и АЦП. При температуре 105°C изменения в памяти МК выявлены при испытаниях, в которых были задействованы все функциональные блоки МК.

Приложение Б
(справочное)

Внедрение результатов исследования



Акционерное общество
«ИНФОРМАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ»
имени академика М.Ф. Решетнёва»



ул. Ленина, д. 52, г. Железногорск, ЗАТО Железногорск, Красноярский край, Российская Федерация, 662972
Тел. (3919) 76-40-02, 72-24-39, Факс (3919) 72-26-35, 75-61-46, e-mail: office@iss-reshetnev.ru, http://www.iss-reshetnev.ru
ОГРН 1082452000290, ИНН 2452034898

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального конструктора
по электрическому проектированию и
системам управления КА акционерного
общества «Информационные
спутниковые системы» имени академика
М.Ф. Решетнева (АО «ИСС»),
председатель секции №2 НТС, к.т.н.
доцент



С.Г. Кочура

2021 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
Осинцева Артема Викторовича

Комиссия в составе:

- главного конструктора - начальника отделения проектирования и испытаний РЭА АО «ИСС», к.т.н. В.Н. Школьного;
- начальника отдела АО «ИСС», к.т.н. С.Б. Сунцова;
- начальника сектора АО «ИСС» М.М. Иванова

составила настоящий акт, подтверждающий факт использования в АО «ИСС» следующих результатов диссертационной работы А.В. Осинцева: модели процессов автоматизации контроля и регулирования температуры климатической камеры, входящей в состав аппаратно-программного комплекса (АПК) для синтеза и испытаний оптимальной сети высоковольтного электропитания (ОСВЭ) космических аппаратов (КА);

комплекса программных средств для климатической экранированной камеры, входящих в состав АПК для синтеза и испытаний ОСВЭ КА.

Эти результаты отражены в отчетах по этапам 1, 2 и 3 о прикладных научных исследованиях по проекту «Теоретические и экспериментальные исследования по синтезу оптимальной сети высоковольтного электропитания для космических аппаратов», выполненному в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014–2020 годы», соглашение о предоставлении субсидии от 26.09.2017 г. №14.574.21.0172.

Указанные результаты позволили разработать прототип АПК для синтеза и испытаний ОСВЭ КА, а также подготовить новый проект «Разработка математических моделей, технологий, методик и аппаратно-программных средств для обеспечения электромагнитной совместимости цепей электропитания перспективных космических аппаратов», включенный в Комплексный план исследований КНТП «Глобальные информационные спутниковые системы».

Главный конструктор - начальник
отделения проектирования и испытаний
РЭА АО «ИСС», к.т.н.



В.Н. Школьный

Начальник отдела АО «ИСС», к.т.н.



С.Б. Сунцов

Начальник сектора АО «ИСС»



М.М. Иванов

УТВЕРЖДАЮ
 Директор филиала «Томский
 научно-исследовательский институт
 курортологии и физиотерапии Федерального
 государственного бюджетного учреждения
 «Сибирский федеральный
 научно-клинический центр Федерального
 медико-биологического агентства»



к.м.н. А.А. Зайцев

2021 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
 Осинцева Артема Викторовича

Настоящим актом подтверждается факт использования в рамках выполнения составной части научно-исследовательской работы «Методы и алгоритмы программно-аппаратного комплекса автоматизации контроля и испытаний радиоэлектронных средств на совместные климатические и электромагнитные воздействия» по договору № 2-445-Т от 8 декабря 2020 г. между Томским научно исследовательским институтом курортологии и физиотерапии Федерального государственного бюджетного учреждения «Сибирский федеральный научно клинический центр Федерального медико- биологического агентства» (далее Филиал ТНИИКиФ ФГБУ СибФНКЦ ФМБА России) и «ООО Город IT» результатов диссертационной работы А.В. Осинцева:

1. Модель процесса автоматизации контроля и регулирования температуры в разработке аппаратно-программного комплекса для мониторинга температуры промышленного холодильного оборудования;
2. Метод восстановления и алгоритмов программной защиты микроконтроллера в случае возникновения сбоев под воздействием мощного внешнего электромагнитного поля либо сверхкороткого импульса;
3. Методы и алгоритмы контроля климатической системы для отслеживания ошибок и формирования отчетов об ошибках, при изменении температуры в промышленном холодильном оборудовании.

Руководитель научно-исследовательской
 лаборатории Филиала ТНИИКиФ ФГБУ
 СибФНКЦ ФМБА России, к.м.н.

В.Я. Эскин



УТВЕРЖДАЮ
 Директор ООО «Инфоматикс»
 В.В. Мохов
 «3» октября 2022 г.

АКТ

о внедрении (использовании) результатов диссертационной работы
 Осинцева Артема Викторовича

Настоящим актом подтверждается факт использования в рамках выполнения составной части научно-исследовательской работы «Автоматизированная система управления для тестирования радиоэлектронных средств на температурные воздействия» результатов диссертационной работы А.В. Осинцева:

1. Методы и алгоритмы контроля и диагностики аппаратных блоков вычислительных устройств применительно к задаче мониторинга состояния узлов и агрегатов общественного транспорта;

2. Метод позволяющий выявлять и исправлять сбои в работе вычислительных устройств посредством анализа памяти и аппаратного или программного резервирования их блоков применительно к задаче разработки отказоустойчивого программного обеспечения узлов и агрегатов общественного транспорта;

3. Методы и алгоритмы автоматизированной системы управления климатической подсистемой, применительно к задаче разработки программного обеспечения автоматизированной системы управления отслеживания сбоев и формирования отчетов об ошибках, при изменении климата в общественном транспорте.

Директор ООО «Инфоматикс»



В.В. Мохов



«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по учебной работе ТУСУРа

к.т.н., доцент

Сенченко П.В.

«__» _____ 2021 г.

АКТ

внедрения в учебный процесс результатов диссертационной работы

Осинцева Артема Викторовича

Мы, нижеподписавшиеся, заместитель заведующего кафедрой телевидения и управления (ТУ) по научной работе, д.т.н. Куксенко С.П. и заместитель заведующего кафедрой ТУ по учебной работе Бусыгина А.В. настоящим актом подтверждаем факт внедрения в учебный процесс кафедры ТУ ТУСУРа следующих результатов диссертационной работы Осинцева А.В.:

1. Алгоритмы автоматического контроля и регулирования температуры использованы в 2018–2019 и учебном году при проведении лабораторных работ по дисциплине «Информационные технологии» для студентов бакалавриата радиотехнического факультета (РТФ) ТУСУРа, обучающихся по направлениям подготовки «Радиотехника».

2. Методика, алгоритмы тестирования и диагностики климатической подсистемы использованы в 2019–2020 учебном году при проведении лабораторных работ по дисциплине «Программирование микроконтроллеров», «Пакеты прикладных программ радиоэлектронных систем», «Пакеты прикладных программ инфокоммуникационных систем» для студентов бакалавриата и магистратуры РТФ ТУСУРа, обучающихся по направлениям подготовки «Радиотехника» и «Инфокоммуникационные технологии».

3. Метод синхронизации группы вычислительных устройств использованы в 2020–2022 учебных годах при проведении лабораторных работ по дисциплинам «Программирование микроконтроллеров» и «Программирование сигнальных процессоров» для студентов бакалавриата РТФ ТУСУРа, обучающихся по направлениям подготовки «Радиотехника».

4. Объектно-ориентированные модели системы контроля температуры для проведения совместных климатических и электромагнитных исследований на электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств использованы в 2019–2020 учебном году при проведении «ГПО ТУ-1503» проект: «Разработка устройств для испытаний на ЭМС» для студентов бакалавриата РТФ ТУСУРа, обучающихся по направлениям подготовки «Радиотехника».

Заместитель заведующего каф. ТУ по научной работе, д.т.н.

/ С.П. Куксенко

Заместитель заведующего каф. ТУ по учебной работе

/ А.В. Бусыгина

**Приложение В
(справочное)**

Основные индивидуальные достижения

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2728325

**АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ
СИНТЕЗА И ИСПЫТАНИЙ ОПТИМАЛЬНОЙ СЕТИ
ВЫСОКОВОЛЬТНОГО ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2019140938
Приоритет изобретения 09 декабря 2019 г.
Дата государственной регистрации в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 29 июля 2020 г.
Срок действия исключительного права на изобретение истекает 09 декабря 2039 г.

Руководитель Федеральной службы по интеллектуальной собственности

 Г.П. Ивлиев



Авторы: *Комнатнов Максим Евгеньевич (RU), Куксенко Сергей Петрович (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU), Демаков Александр Витальевич (RU), Осинцев Артём Викторович (RU), Собко Александр Александрович (RU), Иванов Антон Андреевич (RU), Квасников Алексей Андреевич (RU)*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2627985

**КАМЕРА ДЛЯ СОВМЕСТНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ И
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА
БИОЛОГИЧЕСКИЙ ОБЪЕКТ**

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (РУ)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № 2015141198

Приоритет изобретения **28 сентября 2015 г.**

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации **14 августа 2017 г.**

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает **28 сентября 2035 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев



Авторы: *Комнатнов Максим Евгеньевич (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU), Бусыгина Анна Владимировна (RU), Собко Александр Александрович (RU), Осинцев Артем Викторович (RU), Матвеевко Ольга Альбертовна (RU)*

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2674878

УСТРОЙСТВО СИНХРОНИЗАЦИИ
МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники" (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *Собко Александр Александрович (RU), Осинцев Артем Викторович (RU), Комнатное Максим Евгеньевич (RU), Газизов Тальгат Рашитович (RU), Сухоруков Максим Петрович (RU)*

Заявка № 2017117125

Приоритет изобретения 16 мая 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 13 декабря 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 16 мая 2037 г.



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2016662520

TALGAT 2016

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью «ТАЛГАТ» (RU)*

Авторы: *см. на обороте*

Заявка № **2016619296**

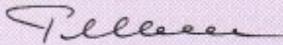
Дата поступления **01 сентября 2016 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **14 ноября 2016 г.**



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 *Г.П. Ивалиев*

Авторы: Газизов Тальгат Рашитович (RU), Мелкозеров Александр Олегович (RU), Газизов Тимур Тальгатович (RU), Куксенко Сергей Петрович (RU), Заблоцкий Александр Михайлович (RU), Газизов Руслан Рифатович (RU), Салов Василий Константинович (RU), Лежнин Евгений Владимирович (RU), Орлов Павел Евгеньевич (RU), Суровцев Роман Сергеевич (RU), Комнатнов Максим Евгеньевич (RU), Ахунوف Роман Раисович (RU), Газизов Рустам Рифатович (RU), Газизов Александр Тальгатович (RU), Веселовский Александр Владимирович (KZ), Квасников Алексей Андреевич (RU), Носов Александр Вячеславович (KZ), Белоусов Антон Олегович (KZ), Буичкин Евгений Николаевич (KZ), Лесков Андрей Николаевич (RU), Демаков Александр Витальевич (RU), Лемешко Ксения Андреевна (RU), Собко Александр Александрович (KZ), Осинцев Артем Викторович (KZ), Калимулин Илья Фидаильевич (RU)

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018660595

Симулятор климатической экранированной камеры

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (RU)*

Авторы: *Осинцев Артем Викторович (KZ), Комнатнов Максим Евгеньевич (RU), Собко Александр Александрович (KZ), Газизов Тальгат Рашитович (RU)*

Заявка № **2018617322**

Дата поступления **13 июля 2018 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **27 августа 2018 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2017617018

«Симулятор синхронизации группы микроконтроллеров»

Правообладатель: **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР) (RU)**

Авторы: **Осинцев Артем Викторович (KZ), Газизов Тальгат Рашитович (RU), Комнатнов Максим Евгеньевич (RU), Собко Александр Александрович (KZ), Сухоруков Максим Петрович (RU)**

Заявка № **2017613710**

Дата поступления **24 апреля 2017 г.**

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ **21 июня 2017 г.**



Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2018611481

TALGAT 2017

Правообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью «ТАЛГАТ» (RU)*

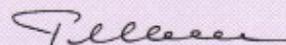
Авторы: *см. на обороте*

Заявка № **2017663209**

Дата поступления **13 декабря 2017 г.**

Дата государственной регистрации
в Реестре программ для ЭВМ **02 февраля 2018 г.**

*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

 **Г.П. Ивлиев**



Авторы: *Газизов Тальгат Рашитович (RU), Мелкозеров Александр Олегович (RU), Газизов Тимур Тальгатович (RU), Куксенко Сергей Петрович (RU), Заболоцкий Александр Михайлович (RU), Газизов Руслан Рифатович (RU), Бусыгина Анна Владимировна (RU), Лежнин Евгений Владимирович (RU), Орлов Павел Евгеньевич (RU), Суровцев Роман Сергеевич (RU), Комнатнов Максим Евгеньевич (RU), Ахунов Роман Раисович (RU), Газизов Рустам Рифатович (RU), Газизов Александр Тальгатович (RU), Хажибеков Роман Русланович (KZ), Квасников Алексей Андреевич (RU), Носов Александр Вячеславович (KZ), Белоусов Антон Олегович (KZ), Тернов Станислав Анатольевич (KZ), Сагиева Индира Ериковна (KZ), Демаков Александр Витальевич (RU), Осинцев Артем Викторович (KZ), Собко Александр Александрович (KZ)*

Samsung
Innovation
Campus



IT Academy

IV Межвузовский конкурс выпускных проектов

IT Академии Samsung

ДИПЛОМ

НОМИНАЦИЯ

«Интернет вещей»

1 место

**Осинцев Артем
Викторович**

Сергей Викторович Певнев

директор по корпоративным проектам и
взаимодействию с государственными
органами власти Samsung Electronics



Together for Tomorrow!
Enabling People

9 ноября 2021 г.
г. Москва



ФГБОУ ВО СибГМУ Минздрава России

ДИПЛОМ

ЗА 3 МЕСТО

Во Всероссийском конкурсе научно-технологических проектов

ТЕХНОЛОГИИ УМНОЙ КЛИНИКИ

«МОНИТОР ХОЛОДА»

ОСИНЦЕВ АРТЕМ ВИКТОРОВИЧ

О.С. ФЕДОРОВА

Проректор по научной работе
и последипломной
подготовке



29 НОЯБРЯ 2021 Г.





**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**



ДИПЛОМ

II степени

НАГРАЖДАЕТСЯ

*А. В. Осипцев, А. М. Заболотский,
М. Е. Комнатков*

за лучший доклад на секции 12 «Электромагнитная совместимость радиоэлектронной аппаратуры» XI Международной научно-практической конференции «Электронные средства и системы управления»

Ректор ТУСУР
д.т.н., профессор



И. М. Шуланов

Томск – 2015



9th November 2021

Artem Osintsev
Russia

Dear Artem,

Congratulations on being named a Country/Region Award Winner at the Intel® AI Global Impact Festival 2021 in the AI Enthusiasts category for the age group over 18 years for the idea - AI project for IoT.

Your award includes:

- A prize of USD 1,500
- An Intel certificate

We will contact you separately with more details.

The first edition of the festival was aimed to provide next-generation technologists, future developers, student innovators an opportunity to celebrate AI as a technology superpower, learn more AI skills and showcase their AI innovations.

We hope that the festival was an enriching experience, and you will continue to innovate and build human-centric responsible AI solutions.

We wish you all the best for your future endeavors.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Christin Eisenschmid".

Christin Eisenschmid
Vice President
Global Government Affairs
Intel Corporation

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Dawn Jones".

Dawn Jones
Chief Diversity & Inclusion Officer &
Vice President of Social Impact
Intel Corporation



**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ**



ДИПЛОМ

III степени

НАГРАЖДАЕТСЯ

А. В. Осинцев

за лучший доклад на секции 12 «Электромагнитная совместимость
радиоэлектронной аппаратуры»
XII Международной научно-практической конференции «Электронные
средства и системы управления»

Председатель конференции,
ректор ТСУСР
д.т.н., профессор



А.А. Шелупанов

Томск – 2016

Национальный исследовательский Томский государственный университет
 Российский фонд фундаментальных исследований
 Радиофизический факультет ТГУ
 Лаборатория терагерцовых исследований ТГУ
 ЦКП «Центр радиофизических измерений, диагностики
 и исследования параметров природных и искусственных материалов» ТГУ



ДИПЛОМ

Четвёртой Международной выставки
 «Радиофизика и электроника»
 выдан

(с вручением памятного знака)

Осинцеву Артему Викторовичу

и

Комнатнову Максиму Евгеньевичу

(Томский государственный университет систем
 управления и радиоэлектроники)

за лучшую разработку

«Управление роботом в сложной среде»

Председатель Программного комитета,
 проректор по учебной работе ТГУ

г.Томск
 6-10 октября
 2015 г.



В.В. Дёмин



ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО КОСМИЧЕСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ "РОСКОСМОС"
 Акционерное общество
 "Научно-производственный центр "Поллюс"



ДИПЛОМ

НАГРАЖДАЕТСЯ

Осинцев Артем Викторович

ТУСУР

за доклад

*«Разработка системы диагностики малых
 космических аппаратов класса CubeSat»*

представленный на научно-технической конференции молодых специалистов
 "Электронные и электромеханические системы и устройства"

Генеральный директор
 АО "НПЦ "Поллюс"



С.А. Русановский

Томск-2018



МЕЖДУНАРОДНЫЙ
ИНЖЕНЕРНЫЙ ЧЕМПИОНАТ
CASE-IN

ПРИ ПОДДЕРЖКЕ



МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

БЛАГОДАРСТВЕННОЕ ПИСЬМО

от имени

Министерства энергетики Российской Федерации
выражаю благодарность

Осинцеву Артему

Викторовичу

за поддержку и активное участие в проекте
«МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ЧЕМПИОНАТ «CASE-IN».
СТУДЕНЧЕСКАЯ ЛИГА»

Заместитель Министра энергетики
Российской Федерации

А.Б. ЯНОВСКИЙ

2019 год



ФОНД
ПРЕЗИДЕНТСКИХ
ГРАНТОВ

**Рост
UP** 2015

Открытая выставка научных достижений молодых ученых

ТУСУР | TUSUR
UNIVERSITY
Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

Сертификат участия

награждается
проект

Новый метод защиты
робототехнических узлов
и компонентов, основанный
на модальной фильтрации

Руководитель проекта: Т. Р. Газизов, д.т.н., заведующий
кафедрой ТУ, ТУСУР

Участники проекта: А.В. Осинцев, А.М. Заболоцкий,
М.Е. Комнатнов



Ректор ТУСУРа

А. А. Шелупанов



ДИПЛОМ ЭКСПЕРТА

IV открытый отборочный чемпионат
Национального исследовательского
Томского государственного университета

по компетенции
Изготовление прототипов

Осинцев

Артем Викторович

г. Томск

23.09.2020 г. - 01.10.2020 г.

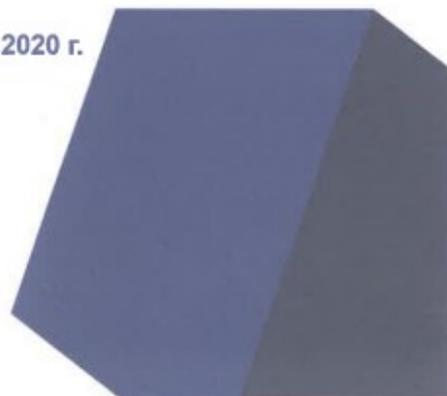


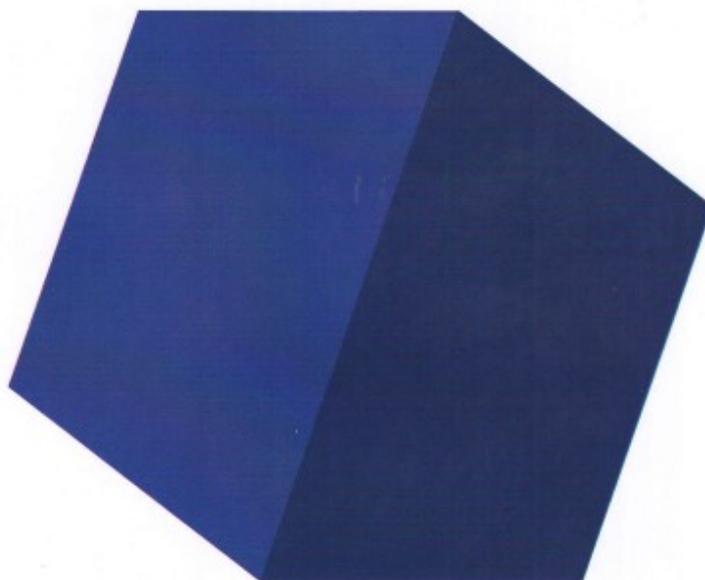
Е.В. Луков

Председатель оргкомитета,
проректор по образовательной
деятельности ТГУ

А.Е. Петелин

Руководитель дирекции
чемпионата, директор
центра Ворлдскиллс ТГУ





СЕРТИФИКАТ ЭКСПЕРТА

вручается

Осинцеву Артему Викторовичу

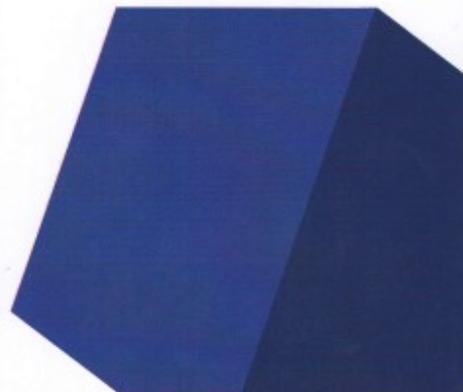
за работу экспертом на II Вузовском открытом отборочном чемпионате
Томского государственного университета по компетенции
«Изготовление прототипов»

г. Томск

10–15 мая 2018 г.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "V.V. Demin".

В.В. Дёмин,
Председатель оргкомитета,
проректор по учебной работе



CERTIFICATE OF PARTICIPATION

THIS IS TO CERTIFY THAT

Osintsov Artem

HAS PARTICIPATED IN THE

2019 International MultiConference on Engineering,
Computer and Information Sciences (SIBIRCON)

21-27 Oct. 2019



Grigori R. Khazankin
Secretary-Treasurer of IEEE Russia Siberia Section
Scientific secretary of the Conference

