

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования (ФГБОУ ВО) «Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники» (ТУСУР).

Научный руководитель – Комнатнов Максим Евгеньевич,
кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГБОУ ВО «ТУСУР»

Официальные оппоненты: Горюнов Алексей Германович,
доктор технических наук, доцент, руководитель отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Национального исследовательского Томского политехнического университета

Иващенко Антон Владимирович,
доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник Научно-технического центра ПР 048 Федерального государственного бюджетного учреждения «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М.И. Кривошеева». Самарский филиал – «СОНИИР».

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет»

Защита состоится 28 декабря 2022 г. в 15 ч. 15 мин. на заседании диссертационного совета 24.2.415.02, созданного на базе ТУСУРа, по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина 40, каб. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ТУСУРа (г. Томск, ул. Красноармейская, 146) и на сайте ТУСУРа: <https://postgraduate.tusur.ru/urls/kc479x7k>.

Автореферат разослан «__» ноября 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук

Зайченко Татьяна Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Системы управления климатическими воздействиями применяются в различных отраслях. Например, они 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 посредством системы автоматического управления. 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. По мере развития цифровых технологий, также развиваются методы и алгоритмы удаленного мониторинга и управления климатическими воздействиями в режиме реального времени. Это привело к развитию гибридных промышленных аппаратно-программных комплексов (АПК) с их внедрением в многоуровневую структуру принятия решений. В результате формируются распределенные автоматизированные системы управления (АСУ), в которых применяются методы предсказательной (предиктивной) аналитики для контроля и управления производственными и технологическими процессами.

Известно, что характеристики радиоэлектронных средств (РЭС) зависят от 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 испытание на климатические воздействия в климатических камерах. Кроме того, ЭКБ испытывают на соответствие стандартам по электромагнитной совместимости (ЭМС) для исследования характеристик работы РЭС в сложной среде. Например, измерения уровней помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем (ИС), в т. ч. вычислительных устройств (ВУ) и микроконтроллеров (МК), являющихся неотъемлемой частью современных РЭС, проводят с использованием камеры поперечной электромагнитной волны (ТЕМ-камеры). При этом гибридизация климатической камеры и ТЕМ-камеры позволит проводить исследования и испытания ЭКБ, в т. ч. ИС, на совместные климатические и электромагнитные воздействия. Автоматизация процесса измерения уровней помехоэмиссии и помехоустойчивости ИС при климатическом воздействии будет способствовать развитию микроэлектроники и миниатюризации ЭКБ и РЭС.

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 термоэлектрических преобразователей (ТЭП), является актуальной задачей. Это позволит, не изменяя параметров электромагнитного воздействия, эффективно поддерживать заданную температуру и влажность воздуха внутри ТЕМ-камеры.

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 РЭС при совместных климатических и электромагнитных воздействиях, что позволит повысить точность определения причин возникновения сбоев в 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. Согомонян 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 блок или узел ЭКБ 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 работы – разработать методы и способы управления, синхронизации и тестирования вычислительных устройств автоматизирован-

ных систем управления климатическими воздействиями внутри камеры поперечных электромагнитных волн.

Для достижения этой цели необходимо решить следующие задачи:

1. Выполнить обзор применения ВУ в системах автоматического управления климатическими воздействиями.
2. Разработать модели АСУ климатическими воздействиями внутри испытательного контейнера КЭК.
3. Разработать метод и способы синхронизации работы группы разнотипных ВУ и многофазного управления группами ТЭП.
4. Разработать методы и алгоритмы тестирования блоков МК.
5. Программно реализовать методы и способы контроля, управления и тестирования элементов КЭК.

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.

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.

2. Предложенный способ управления микроконтроллерами, в том числе разнотипными, позволяет синхронизировать выполнение ими общей задачи с точностью до одного такта синхроимпульса.

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.

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.

Оригинальные результаты соотносятся с паспортом специальности 2.3.3 по п. 6 – методы совместного проектирования организационно-технологических распределенных комплексов и систем управления ими, п. 11 –

методы контроля, обеспечения достоверности, защиты и резервирования информационного и программного обеспечения АСУТП, АСУП, АСТПП и др. и п. 17 – разработка автоматизированных систем научных исследований.

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

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 РФФ № 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 электромех-ие системы и устройства», г. Томск, АО «НПЦ «Полюс», 2018 г.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 40 работ, из них 4 в журналах из перечня ВАК, 8 докладов в трудах конференций индексируемых в Scopus и Web of Science, 19 докладов в сборниках научных трудов и конференций, 2 тезисов в трудах научно-технической конференции. Также получено 3 патента на изобретение и 4 свидетельства о регистрации программ для ЭВМ. В автореферате приведен список из 21 публикации.

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.

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 ВУ, АСУ электропитанием термоэлектрическими преобразователями, а также диагностики и тестирования элементов и устройств КЭК. Постановка цели и задач исследования, обработка и интерпретация результатов выполнены совместно с научным руководителем. Разработка аппаратной части КЭК выполнена совместно с Собко А.А. Отдельные результаты получены совместно с соавторами публикаций.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлена общая характеристика работы.

В разделе 1 выполнен обзор компонентов и методов проектирования АСУ климатических систем для обеспечения контроля и управления процессом тестирования, диагностики и выявления рабочих параметров и характеристик РЭС, посредством АСУ с учетом взаимного электромагнитного влияния. Из обзора следует, что проектирование АСУ для обеспечения функционирования климатических камер непрерывно развивается и совершенствуется, как и область их применения, что вызывает потребность в разработке новых методов, способов контроля и управления ими. Обзор применения АСУ климатическими воздействиями показал, что существующие решения по автоматизации исследований климатического воздействия позволяют определить характеристики РЭС, как и ТЕМ-камеры позволяют оценить восприимчивость к внешнему ЭМП, но не позволяют обеспечить автоматизированное управление совместными климатическими и электромагнитными воздействиями на РЭС. Представлена актуальность разработки АСУ для проведения исследований совместных климатических и

электромагнитных воздействий на ИО, в частности ВУ, таких как, микроконтроллеры (МК), системы на кристалле (СнК), программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС) и др.

Раздел 2 посвящен декомпозиции КЭЖ на функциональные блоки, отвечающие за работу климатической подсистемы КЭЖ, такие как устройство управления (УУ), пульт управления (ПУ) оператора, реверсивный преобразователь (РП), объект управления (ОУ) (рисунок 1).

Выделенные блоки КЭЖ использовались в разработке модели технологического процесса тестирования РЭС в КЭЖ, а также в разработке АСУ для поддержания температуры поверхности ТЕМ-камеры. Это позволило сформировать жизненный цикл системы управления КЭЖ, в котором отражены главные задачи, требующие учета стандартов и спецификаций при разработке в области ЭМС. Спроектирована архитектура ПО КЭЖ, состоящая из модулей климатической подсистемы и инструментов человеко-машинного взаимодействия, в частности для контроля, управления и диагностики КЭЖ.

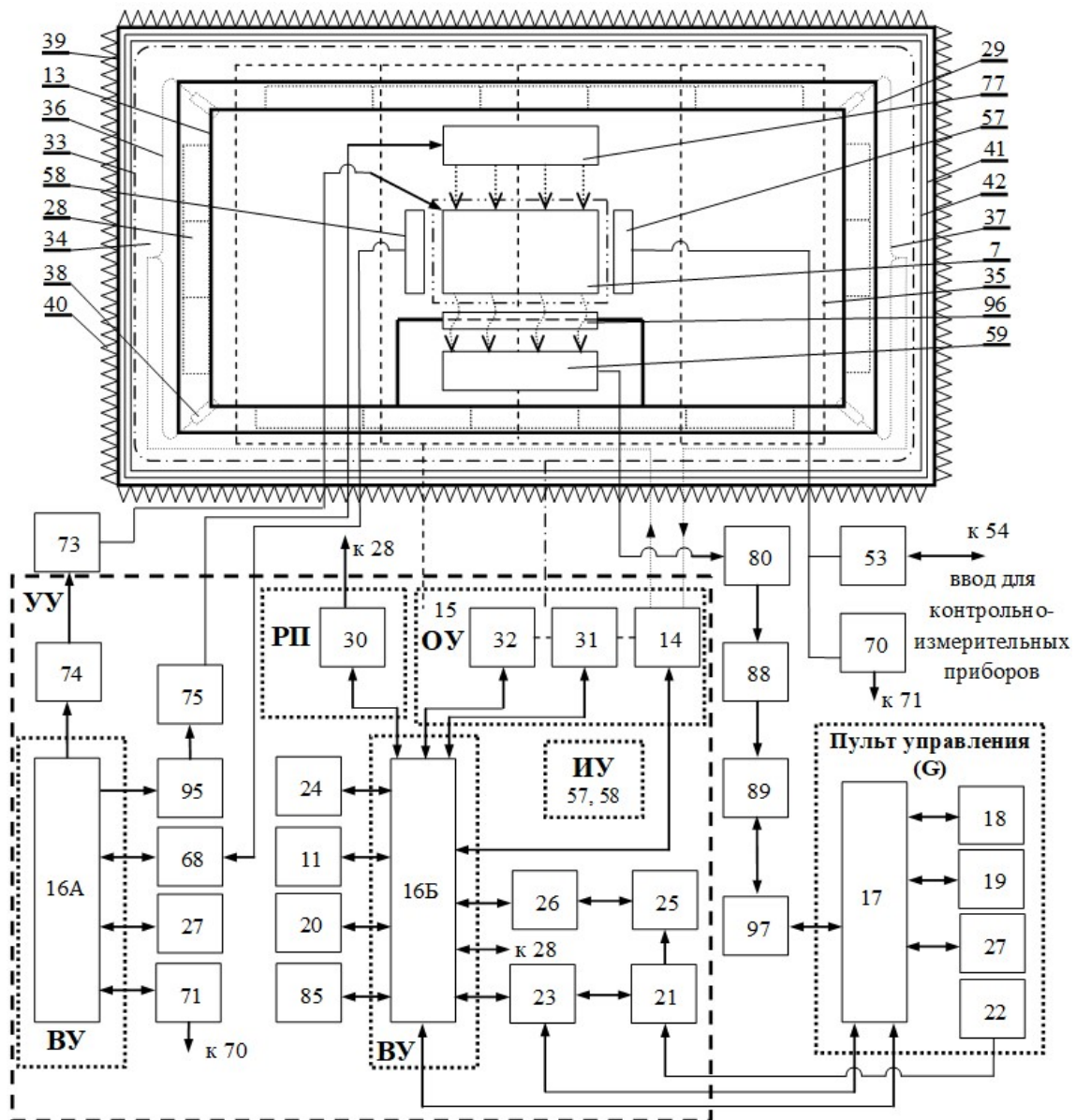


Рисунок 1 – Структура КЭЖ

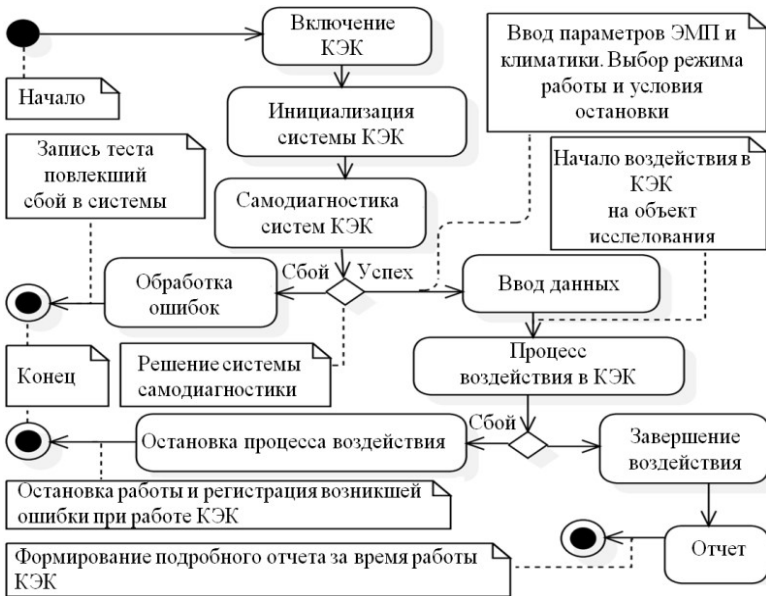


Рисунок 2 – Обобщенная диаграмма деятельности КЭЖ

Представлены UML-диаграммы прецедентов, деятельности (рисунок 2), классов, компонентов (рисунок 3). Диаграмма компонентов отображает связь программных и аппаратных блоков КЭЖ, что позволяет с высокой степенью контролировать процесс разработки АСУ КЭЖ, вносить модификации и управлять зависимостями компонентов.

В разделе 3 представлен метод синхронизации группы разнотипных ВУ посредством внешнего тактового генератора (ВТГ). Метод 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. Использование предложенного способа синхронизации в работе над терморегулятором КЭЖ позволило добиться синхронного управления группами ТЭП для терморегулирования поверхности ТЕМ-камеры посредством сигналов широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

На основе способа разработаны 2 метода синхронизации с ведущим МК «Master-Slave» и без него «Slave-Slave» (рисунок 4). Новизна способа синхронизации заключается в следующем. Алгоритм синхронизации разнотипных ВУ

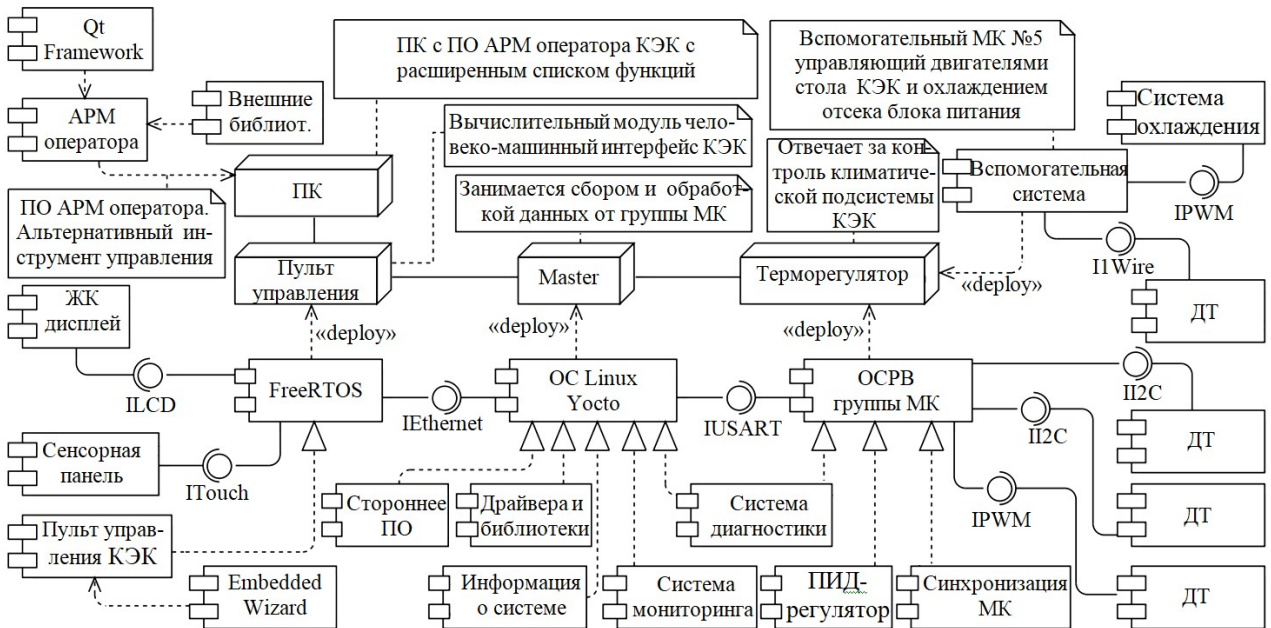


Рисунок 3 – UML-диаграмма компонентов КЭЖ

позволяет без внедрения в РЭС дополнительных аппаратных средств управления и контроля процесса работы обеспечить синхронизацию, с возможностью обработки внешних аппаратных прерываний. Применение ВТГ в качестве источника сигналов синхронизации группы разнотипных ВУ позволяет регулировать частоту синхроимпульсов. Способ масштабирования синхронизируемой группы ВУ позволяет увеличить группу синхронизируемых ВУ без внесения аппаратно-программных изменений.

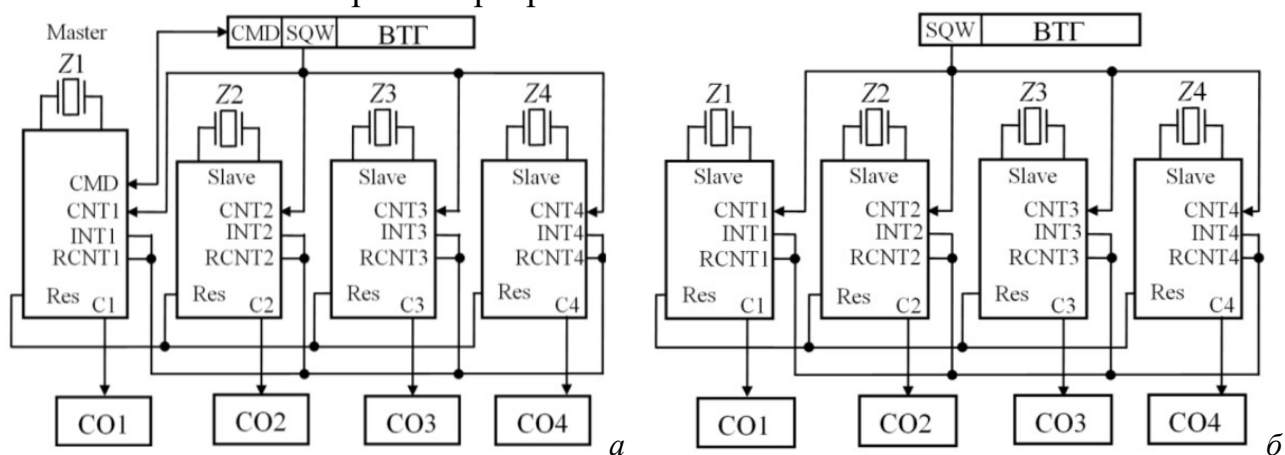


Рисунок 4 – Методы синхронизации Master-Slave (а) и Slave-Slave (б)

Раздел 4 посвящен разработке методов и алгоритмов диагностики и тестирования РЭС на совместные климатические и электромагнитные воздействия, в частности внутренних блоков ВУ. Известно, что при изменении климатических условий, характеристики (энергопотребление, уровень эмиссий и др.) работы МК меняются. Для их исследований разработан метод диагностики, который содержит набор комбинированных тестов МК, основанный на проверке данных в памяти МК. Состояние каждого блока МК отражается в его адресном пространстве. Его можно прочитать, используя отладочный интерфейс (SWD, JTAG), и вычислить контрольную сумму (КС). В случае изменения КС блока МК в процессе тестирования, фиксируется климатическое и электромагнитное воздействие на МК. Универсальный алгоритм работы комбинированного тестирования МК представлен на рисунке 5. На основе подсчета КС разработан метод и предложены алгоритмы его программной реализации для выявления и исправления ошибок в памяти МК на основе аппаратного подсчета КС, который позволяет распознавать ошибки в памяти МК. Разработаны 2 способа детектирования повреждений в памяти МК (с восстановлением и без). Использование предложенных методов и алгоритмов позволяет повысить надежность и отказоустойчивость разрабатываемого устройства, а также сократить время поиска неисправности в ПО МК. При разработке РЭС с МК активно используются операционные системы реального времени (ОСРВ), позволяющие автоматизировать большинство задач и повысить надежность устройства. Использование ОСРВ позволяет стабилизировать работу терморегулятора КЭК, снизить время отклика системы и выполнить в первую очередь задачи, имеющие более высокий приоритет. Разработаны алгоритмы тестирования КЭК и служба мониторинга ОСРВ, позволяющие обеспечить контроль работы систем КЭК.

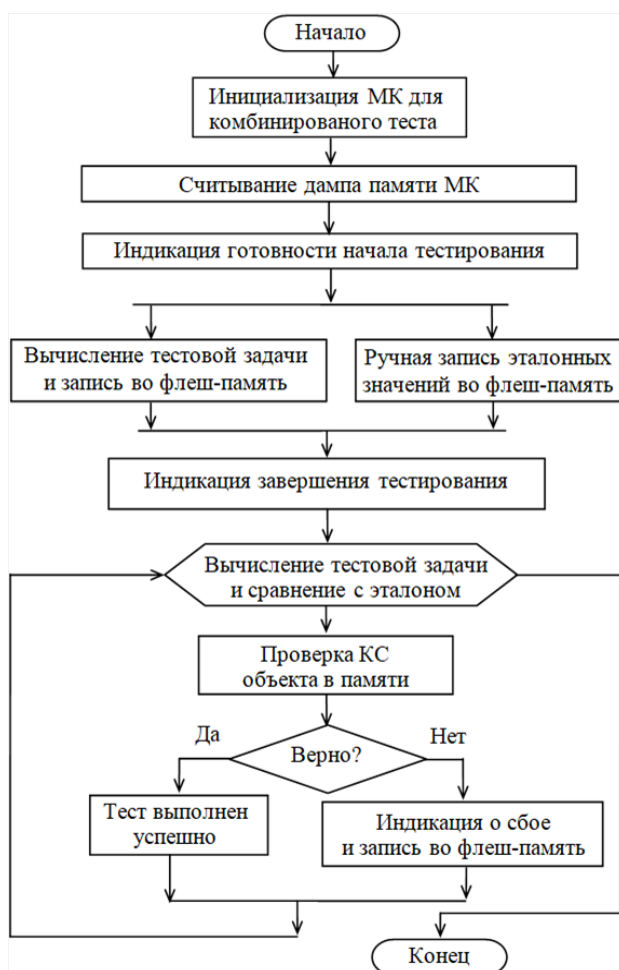


Рисунок 5 – Универсальный алгоритм проверки вычислительных блоков МК

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.

Предложены методика и алгоритмы тестирования и диагностики климатической подсистемы КЭЖ, 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. Разработанные комбинированные тесты выявили изменения в памяти МК при внешнем электромагнитном воздействии на МК, что подтверждает эффективность разработанного метода. Тестовая ПП с

MKSTM32F103C8T6 в процессе тестирования представлена на рисунке 6. Также, были изготовлены тестовые ПП с отечественными МК Миландр 1986BE91Т и 1986BE92QI и выполнены тесты блоков МК при климатических и электромагнитных воздействиях. Результаты тестов выявили изменения уровня помехоэмиссии в зависимости от температуры и тактовой частоты ядра МК. Зафиксировано повреждение данных во флеш-памяти МК путем подсчета КС памяти аппаратным блоком МК. Используя информацию из резервной области памяти, можно восстановить данные без необходимости их перезаписи.

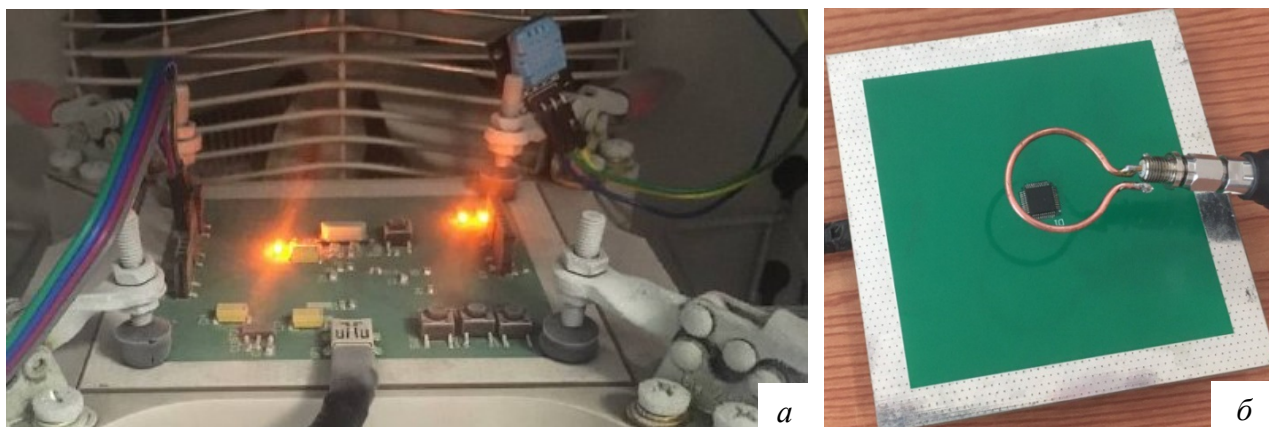


Рисунок 6 – Температурное (а) и электромагнитное (б) воздействия на МК

В разделе 5 представлены результаты апробации методов и способов, представленных в 2–4 разделах: способ синхронизации группы МК; метод многофазного управления электропитанием группой ТЭП с использованием группы МК, связанных посредством ОСРВ и с использованием ПЛИС.

Разработана ПП с 5 МК ATmega2560 для апробации разработанных методов и алгоритмов (рисунок 7). Реализован код программы для синхронизации группы ВУ с различной вычислительной архитектурой (AVR, Xtensa) и частотой работы ядра (8–240 МГц). В результате получены осциллограммы стабильной синхронной работы сигналов ШИМ (рисунок 8). Выявлено, что при значительном изменении (в 15 раз) частоты период работы СнК Tensilica LX6 с большей производительностью оказался на 1,5 мс продолжительнее периода работы МК, работающих на более низкой частоте (ATmega). Это вызвано высокой частотой работы СнК. Данный способ синхронизации можно применять к уже готовым устройствам в виде программного модуля.

Разработан ПУ КЭК и ПО автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора КЭК, позволяющие расширить возможности управления КЭК и обра-

ботки информации, полученной в ходе работы КЭК; анализировать записи службы диагностики и результаты тестов с целью определения причин возникновения сбоев в работе КЭК (рисунок 9).

Разработанные алгоритмы обладают достаточной универсальностью и могут быть применены в критически важных системах, например, при проектировании системы контроля и управления электропитанием космического аппарата.

Разработаны 4- и 5-фазные регуляторы сигналов ШИМ терморегулятора КЭК. Проведено моделирование работы 5-фазного регулятора и разработано ПО для МК ATmega 2560 в котором, управление каждой фазой осуществляется отдельным аппаратным таймером МК. На рисунке 10 представлены осциллограммы амплитуд импульсов тока, протекающего через 2 ЭП в разных фазах. Таким образом, применение данного регулятора

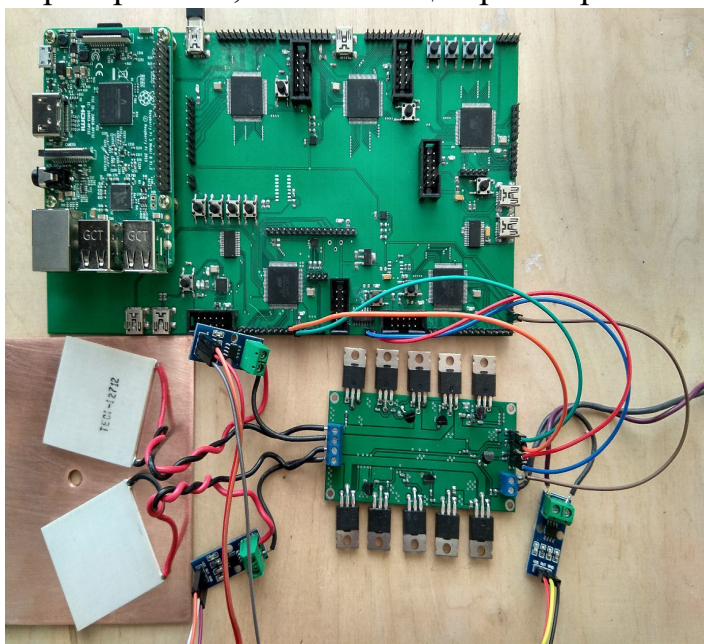


Рисунок 7 – Тестовая ПП управления КЭК

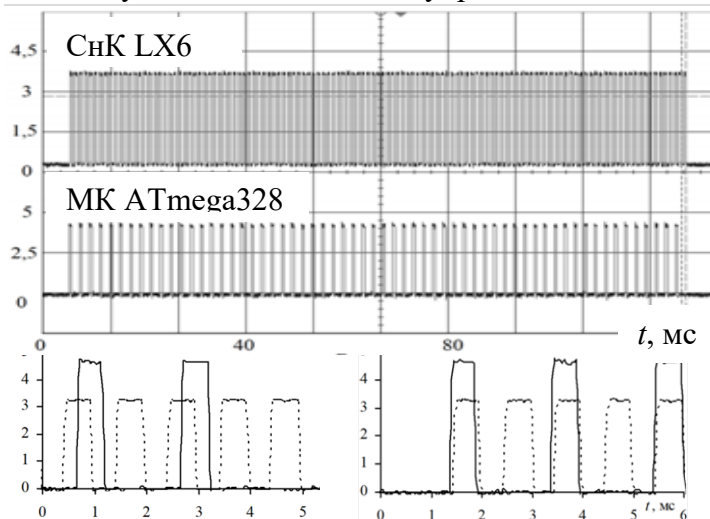


Рисунок 8 – Осциллограмма синхронизации МК

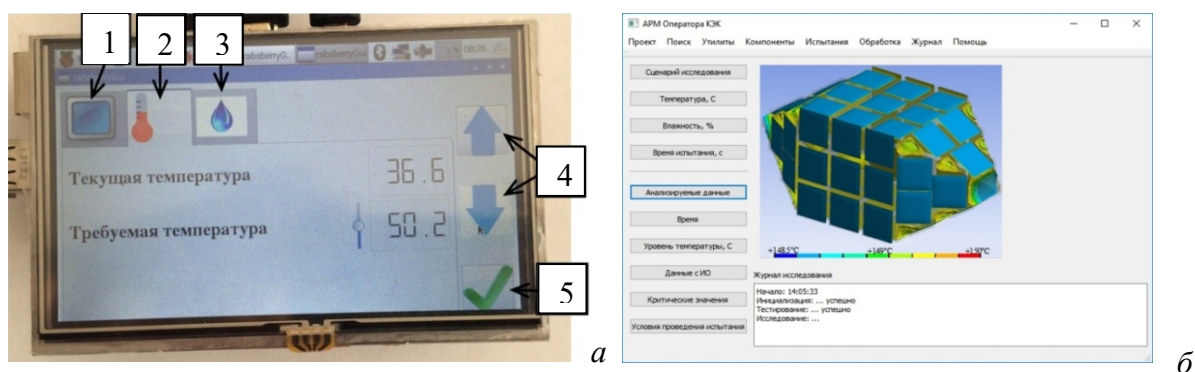


Рисунок 9 – ПУ КЭК (а) и АРМ оператора КЭК (б)

при управлении электропитанием ТЭП может снизить среднюю нагрузку на источник питания в 5 раз, исключая возможность наложения фаз.

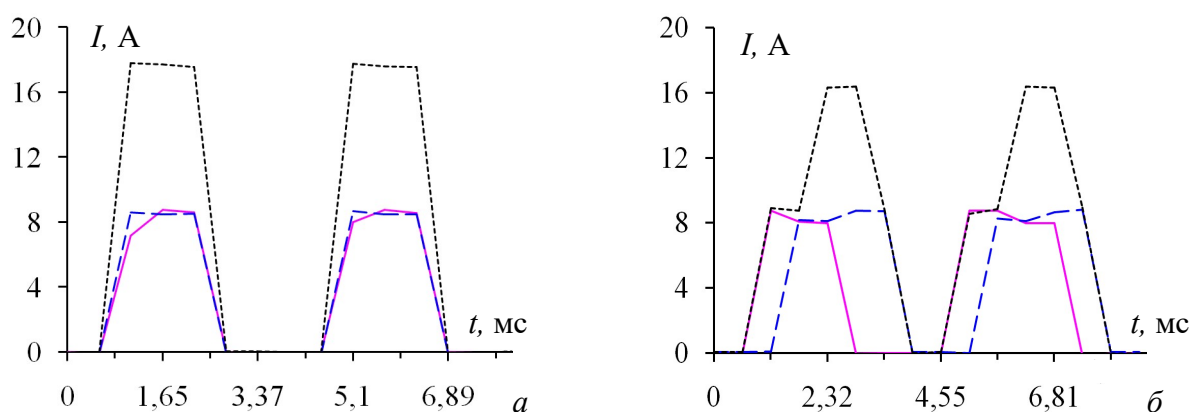


Рисунок 10 – Осциллограмма тока через ЭП1 (—), ЭП2 (---), и суммарный ток РП (- - -) без сдвига (а) и со сдвигом 45° (б) фазы

Также, терморегулятор 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 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 температуру поверхности ТЕМ-камеры с точностью до $0,1^\circ\text{C}$ и они могут быть адаптированы для других климатических АСУ. Для расчета параметров синхронизации каждого МК синхронизируемой группы на основе их системных частот и ВТГ разработано ПО, которое позволяет вычислять значения коэффициентов таймеров счетчиков МК и проверять вычисленные значения в симуляторе для реализации различных режимов синхронизации (рисунок 11).

Разработаны комбинированные тесты, позволившие установить, что умножение частоты тактового генератора исследуемого МК приводит к возникновению пиковых значений помехоэмиссии на 3 и 4 гармониках от основной частоты тактирования МК и увеличению её максимального уровня с 11 до 29 дБ. Это оказывает влияние на восприимчивость МК и снижает уровень его помехоустойчивости при использовании как внешнего, так и внутреннего кварцевых резонаторов (рисунок 12).

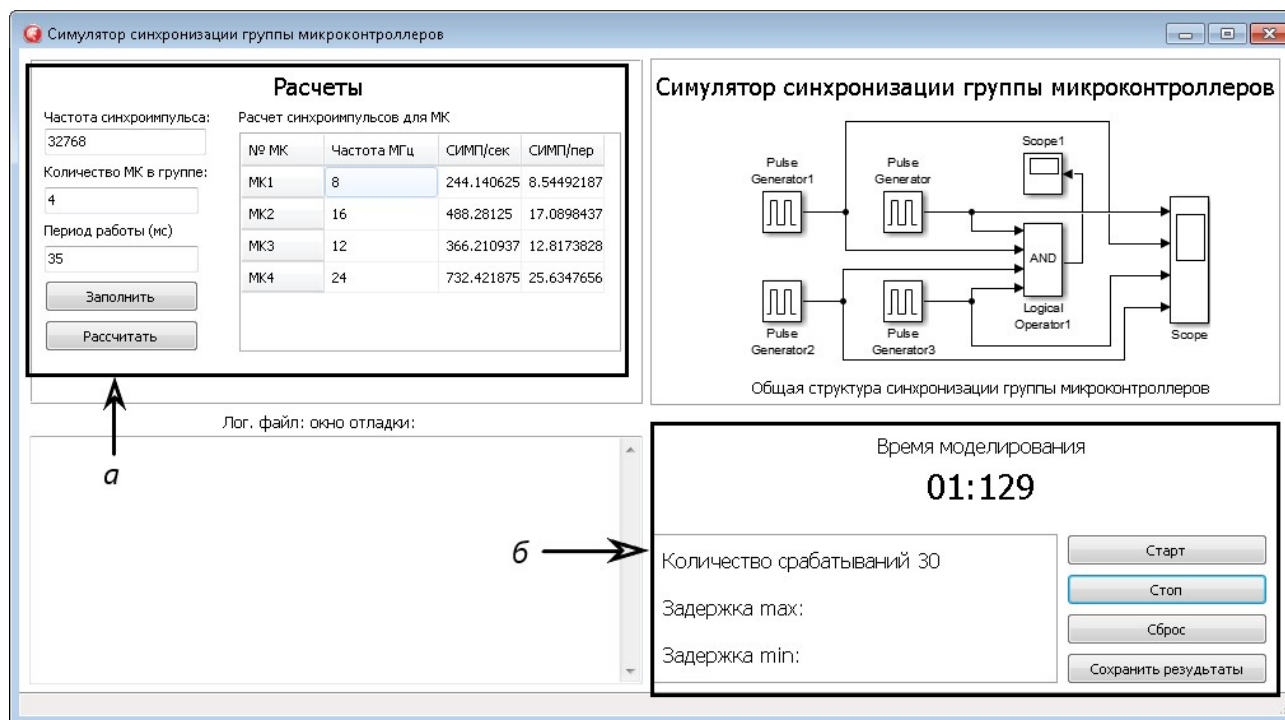


Рисунок 11 – Симулятор синхронизации группы МК: блоки расчета (а) и моделирования (б)

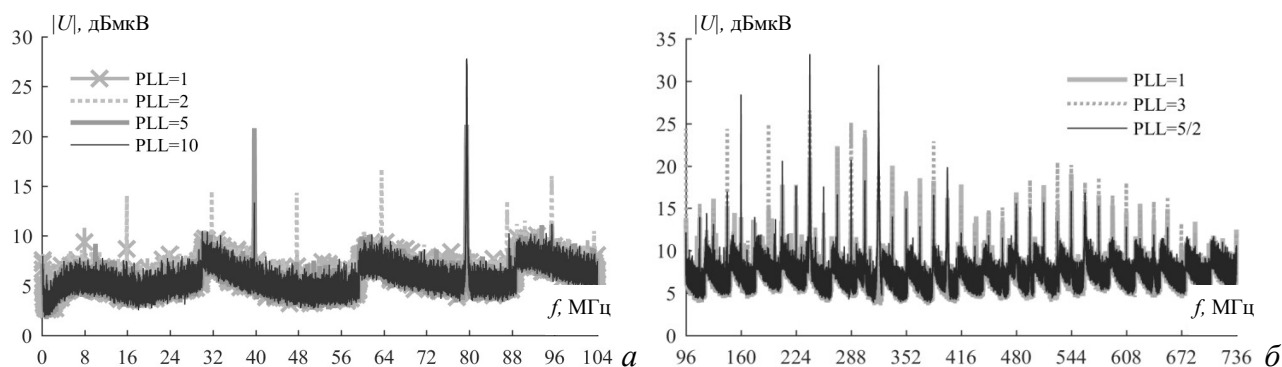


Рисунок 12 – Частотные зависимости напряжения ШИМ-сигнала U при увеличении множителя частоты генератора PLL и тактировании МК от генератора с внутренним (а) и внешним (б) кварцевыми резонаторами

Таким образом, внедрение и использование предложенных способов, методов и алгоритмов позволят повысить надежность и отказоустойчивость РЭС на базе МК.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты

1. Предложены оригинальные объектно-ориентированные модели АСУ температурой поверхности ТЕМ-камеры, позволяющие проводить совместные климатические и электромагнитные исследования РЭС в КЭЖ. Модель представлена в виде UML-диаграмм и подробно описывает устройство и функционирование КЭЖ, уточняя интерфейсы связи и зависимости между компонентами, что позволяет представить КЭЖ 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 КЭЖ, 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 КЭЖ 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 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.

Рекомендации по использованию результатов исследования

Предложенные методы, а также разработанные на их основе вычислительные алгоритмы и ПО, можно применять для предварительной оценки соответствия РЭС на 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.

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.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в периодических изданиях ВАК

1. **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 ТУСУР. – 2019. – Т. 22, № 2. – С. 83–89.

2. **Осинцев А.В.** 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.

3. 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.

4. 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.

Публикации в периодических изданиях, включенных в базу Scopus

5. **Osintsev A.V.** Temperature Controller for External Surface of Waveguide / **A.V. Osintsev**, A.A. Sobko, M.E. Komnatnov // International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON 2016), May 12–14, 2016, Moscow, Russia, pp. 1–4.

6. **Osintsev A.V.** Multiphase power supply when inverting currents for group of Peltier elements / **A.V. Osintsev**, A.A. Sobko, M.E. Komnatnov // Journal of physics: conference series [Electronic resources]. 2018. – Vol. 1015, No. 5. – P. 1–6.

7. **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.

8. **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.

9. **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.

10. 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.

11. Demakov A.V. Command Console of Environmental Shielded TEM chamber / A.V. Demakov, M.E. Komnatnov, **A.V. Osintsev** // SIBIRCON 2017. 2017 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON).

12. Demakov A.V. Influence of the Microcontroller's clock generator on its Radiated Emissions / A.V. Demakov, V.A. Semenjuk, **A.V. Osintsev** // 22th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, Erlagol, Altai, 30 June – 4 July. – 2021. – P. 1–5.

Публикации в трудах отечественных конференций

13. **Осинцев А.В.** Анализ производительности микроконтроллеров с ядром Cortex-M3 / **А.В. Осинцев**, М.Е. Комнатнов // XI всероссийская научно-

техническая конференция: проблемы разработки перспективных микро- и наноэлектронных систем - МЭС-2022. ИППМ РАН. – С. 123–128.

14. **Осинцев А.В.** Разработка системы диагностики малых космических аппаратов класса CubeSat. Тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства». – Томск, Россия, 12–13 апреля, 2018. – С. 26–28.

15. **Осинцев А.В.** Использование отечественных сверхбольших интегральных схем в бортовой аппаратуре малых космических аппаратов. Тезисы докладов научно-технической конференции молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства». – Томск, Россия, 12–13 апреля, 2018. – С. 29–31.

16. Собко А.А. Макет печатной платы для испытания на электромагнитную совместимость микроконтроллера 1986VE91T / А.А. Собко, **А.В. Осинцев**, М.Е. Комнатнов // Межд. науч.-техн. конф. студ., асп. и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2017». – Ч. 3 В-Спектр2017. – 2017. – С. 87–89.

Патенты на изобретения

17. Патент РФ на изобретение № 2627985. Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р., Бусыгина А.В., Собко А.А., **Осинцев А.В.**, Матвеев О.А. Камера для совместных климатических и электромагнитных воздействий на биологический объект. Заявка № 2015141198. Приоритет изобретения 28.09.2015. Опубликовано: 14.08.2017. Бюл. №23

18. Патент РФ на изобретение №2674878. Устройство синхронизации микроконтроллеров. А.А. Собко, **А.В. Осинцев**, М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов, М.П. Сухоруков. Заявка №2017117125. Приоритет изобретения 16.05.2017. Опубликовано: 13.12.2018. Бюл. №35

19. Патент на изобретение №2728325 РФ. Аппаратно-программный комплекс для синтеза и испытаний оптимальной сети высоковольтного электропитания. Комнатнов М.Е., С.П. Куксенко, Т.Р. Газизов, А.В. Демаков, **А.В. Осинцев**, А.А. Собко, А.А. Иванов, А.А. Квасников. Приоритет изобретения 09.12.2019. Опубликовано: 29.07.2020. Бюл. №22.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ

20. 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.

21. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2018660595. Симулятор климатической экранированной камеры. Авторы: **Осинцев А.В.**, Комнатнов М.Е., Собко А.А., Газизов Т.Р. Заявка №2018617322. Дата поступления 13 июля 2018 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 27.08.2018 г.