

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
Физико-механический институт

Высшая школа теоретической механики и математической физики

Работа допущена к защите

Директор ВШТМиМФ

Д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН

_____ А. М. Кривцов

«__» _____ 2023 г.

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА БАКАЛАВРА

**Моделирование тепловых процессов кондуктивного отвода тепла с
использованием капиллярных тепловых трубок по направлению
подготовки**

01.03.03 «Механика и математическое моделирование»

направленность

01.03.03_03 Математическое моделирование процессов нефтегазодобычи

Выполнил
студент гр. 5030103/90301

А.К. Симонов

Руководитель
Профессор ВШТМиМФ,
к.ф.-м.н.

С.А. Руколайне

Санкт-Петербург

2023

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПЕТРА ВЕЛИКОГО**

Физико-механический институт

Высшая школа теоретической механики и математической физики

УТВЕРЖДАЮ

Директор Высшей школы
теоретической механики и
математической физики

А. М. Кривцов

«__» 2022 г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студенту Симонову Алексею Константиновичу гр. 5030103/90301

1. Тема работы: Моделирование тепловых процессов кондуктивного отвода тепла с использованием тепловых трубок.
2. Срок сдачи студентом законченной работы: 05.06.2023
3. Исходные данные по работе: справочная литература, актуальные научные публикации по теме работы.
4. Содержание работы (перечень подлежащих разработке вопросов): разработка численного метода решения задачи, разработка экспериментального решения задачи, обработка и верификация результатов.
5. Перечень графического материала (с указанием обязательных чертежей): не предусмотрено.
6. Консультанты по работе: А.Б. Чирков, директор инженерно-технического центра ФГБУ НИИР-ЛОНИИР.
7. Дата выдачи задания: 27.02.2023

Руководитель ВКР: _____ С.А. Руколайне, профессор ВШТМиМФ, д. ф.-м. н.

Задание принял к исполнению: 27.02.2023

Студент: _____ А. К. Симонов

РЕФЕРАТ

На 40 с., 33 рисунков, 5 таблиц

ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ, ОХЛАЖДЕНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, УПРАВЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫМИ РЕЖИМАМИ, КАПИЛЛЯРНЫЕ ТЕПЛОВЫЕ ТРУБКИ, РАДИАТОР, ПРОЕКТИРОВАНИЕ, РАЗРАБОТКА, ТЕПЛОСЪЁМНИК, ПАССИВНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ

В данной работе рассматривается моделирование работы электронного радиоприбора. Необходимо спроектировать элементы охлаждающей системы, а также доработать конструкции радиаторов, имеющих в эксплуатации на данный момент. Провести моделирование нагревания прибора, снять тепловые показатели. Сравнить результаты моделирования с физическим экспериментом.

THE ABSTRACT

40 pages, 33 pictures, 5 tables

HEAT-RELEASING ELEMENT, COOLING, MATHEMATICAL MODELING, THERMAL MANAGEMENT, CAPILLARY HEAT PIPES, HEAT SINK, DESIGN, DEVELOPMENT, HEAT SINK, PASSIVE COOLING

This paper discusses the simulation of the operation of an electronic radio device. It is necessary to design the elements of the cooling system, as well as to refine the design of the radiators that are currently in operation. Carry out a simulation of the heating of the device, take thermal readings. Compare simulation results with physical experiment

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	7
1.1 Методы исследования сложных технических структур	7
1.2 Программное обеспечение проектирования	8
1.3 Способы борьбы с перегревом	10
ГЛАВА 2. ОБЗОР ИССЛЕДУЕМОГО УСТРОЙСТВА	13
2.1 Описание исследуемого устройства	13
2.2 Анализ конструктивных решений для обеспечения теплового режима ...	14
2.3 Анализ материалов для изготовления радиаторов	15
2.4 Обзор математической модели БМ-УМП-ЦОС	17
ГЛАВА 3. ОБЗОР ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ	21
3.1 Разработка корпуса и системы охлаждения БМ-УМП-ЦОС (БМ)	21
3.2 Выбор тепловых трубок	23
ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОРПУСА И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ БМ-УМП-ЦОС	26
4.1 Процесс создания тепловых трубок для охлаждения ПЛИС в Solidworks	26
4.2 Процесс создания крепления для тепловых трубок	27
4.3 Процесс доработки радиаторов	30
4.4 Крепление в сборе	31
ГЛАВА 5. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МОДЕЛИ	32
5.1 Входные данные	32
5.2 Результаты	35
ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БМ-УМП-ЦОС	37
6.1 Подготовка к эксперименту	37
6.2 Результаты эксперимента.....	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	41
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	42

ВВЕДЕНИЕ

Первые электронные устройства, работающие по принципу радиосвязи появились в конце 19 – го века. Всё начиналось с простых схем: колебательного контура, к которому подключены антенна, заземление, и детектора, выполняющего демодуляцию амплитудно – модулированного сигнала. В современном мире, количество устройств, работающих по принципу радиосвязи, невообразимо огромное: магнитофоны, телефоны, военные локаторы, различные системы связи, без которых трудно представить работу различных инфраструктур. Устройство современных приборов, использующихся для специализированных отраслей, кардинально отличаются от моделей 20-го века. Разработаны гораздо более сложные схемы, инновационные компоненты, требующие подробных расчётов и тестов от специалистов.

Одной из главных проблем современной компьютерной техники является перегрев. Он может быть вызван плохой циркуляцией воздуха внутри самого устройства, большим энергопотреблением различных модулей и особенностями прибора. Разумеется, существуют и методы борьбы с перегревом, например, термопаста, вентиляторы, радиаторы и разные инженерные конструктивные решения. При температурах, больше допустимых, могут появиться сбои в работе устройства, а именно автоматическое снижение производительности, принудительная перезагрузка или отключение устройства, и худший сценарий – это разрушение микросхем, выход из строя модулей без возможности дальнейшего ремонта. Для обычного персонального компьютера это уже не проблема. При правильном уходе за техникой, подборе охлаждающей системы и правильной эксплуатации, перегрев практически исключен. Но есть случаи, когда сложностей с эксплуатацией быть не должно даже в самых критических ситуациях. Для этого можно рассмотреть оборудование из других отраслей. Трудно представить, чтобы в больнице во время операции, из-за перегрева начали отключаться приборы, или на военной базе, к примеру, выйдут из строя радио - локаторы. Поэтому профессиональное оборудование разрабатывают

более тщательным образом, испытывая в критических условиях, моделируя различные ситуации.

ГЛАВА 1. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Методы исследования сложных технических структур

В данной работе речь пойдёт о многофункциональном устройстве цифровой обработки сигнала. Существует много методов исследования сложных технических устройств по требуемым параметрам. В данном случае исследуется процесс переноса тепла.

Первый вариант – виртуальный. Создаётся точная виртуальная копия исходного прибора – математическая модель. Каждый смоделированный элемент из определённого материала, обладает всеми свойствами, что и настоящий предмет, аналогично и с размерами, они должны полностью совпадать с исходными. Каждый контакт и соединение задаётся в точности, как и в реальной жизни. Так же необходимо задать начальные и граничные условия: окружающая температура, состояние среды, атмосферное давление, начальную скорость и т.д. В качестве результата, на выходе могут быть отчёты и графики. Моделирование предоставляет возможность полностью проследить за изменениями с течением времени и сделать выводы о проделанной работе и её результатах.

Второй вариант – практический. Самый древний и наиболее распространённый. В какое бы время люди ни конструировали приборы, устройства, изобретения, оружие – всегда проводили испытания и тесты. Например, перед выпуском автомобиля проводят различные испытания по многим пунктам. Начиная проверкой силовых структур, заканчивая проверкой различных модулей, отвечающих за разные функции. На это тратится огромный бюджет и большое количество времени. В нашем случае, для тестирования прибора используют теплоизолированную камеру. На прибор вешают различные датчики, отслеживающие нужные показатели. В конце подводятся итоги, сравнивают результаты с математической моделью, находят разницу. Далее вносятся доработки, модель приводят к оптимальному виду.

При проектировании различных теплосиловых установок, следует учитывать процессы переноса теплоты. Часто эти процессы становятся определяющими при выборе конструкций, в которых осуществляется оптимальный тепловой режим. Для того чтобы конструкция работала надежно, необходимо предусмотреть меры, которые установили бы предел росту температуры. В противном случае нормальная работа таких установок может прекратиться, так как конструкционные материалы при нагревании теряют прочность и при определенной температуре разрушаются.

Последние лет 50, люди стараются разработать различные прототипы модели перед выпуском в серию или производством прибора. Макет или математическая модель должны полностью отображать свойства реального экземпляра, для более точных исследований. С финансовой точки зрения, наиболее выгодный вариант – разработка математической модели с помощью специального программного обеспечения для моделирования. Поэтому, лучше заплатить организации за разработку математической модели и ее исследование, чем создавать самим несколько моделей и проводить с ними термические испытания. Опять же, по такому принципу, сейчас работают все мировые производители.

1.2 Программное обеспечение проектирования

В данной работе рассматривается инженерная задача: необходимо воссоздать точную математическую модель данного устройства для изучения задачи теплообмена. Критическая рабочая температура компонентов платы управления равна 80 °С, поэтому требуется обеспечить своевременное охлаждение без установки дополнительных вентиляторов или использовать конструктивные решения.

SolidWorks является программным обеспечением (ПО) для трехмерного проектирования и моделирования. Оно позволяет инженерам и дизайнерам быстро создавать и редактировать сложные модели, ускоряя процесс

проектирования и сокращая ошибки. SolidWorks предоставляет широкий спектр инструментов и функций для решения различных задач, от простых деталей до более сложных сборок. Оно используется в разных отраслях, таких как автомобильная промышленность, аэрокосмическое проектирование, судостроение, электроника и многие другие. ПО обеспечивает эффективное проектирование и совместную работу над проектами, что делает его одним из наиболее популярных инструментов в проектировании и моделировании.

Решение проблемы опытным путем требует много материальных и временных затрат, но можно использовать широкие возможности компьютерных программ, например, пакет SolidWorks Flow Simulation. В работе по алгоритмам трехмерного твердотельного моделирования была построена модель модуля цифровой обработки сигнала. В пакете SolidWorks Flow Simulation выполнено численное решение сопряженной задачи теплообмена, основной целью которой является изучение степени нагрева различных модулей, а также, эффективности охлаждающей системы. Solidworks Flow Simulation - компьютерная программа для численного моделирования потоков жидкостей и газов в системах различных конфигураций. Эта программа позволяет создавать виртуальную модель объекта, проводить анализ его свойств и определять основные характеристики потока внутри него. Использование Solidworks flow simulation позволяет ускорить процесс проектирования и снизить количество итераций в ходе физических экспериментов, что в свою очередь позволяет сократить затраты на исследования и повысить эффективность производственного процесса.

Разработка новых конструкций вычислительных систем с высокой производительностью требует создания эффективных систем охлаждения для электронных компонентов, включая процессоры с повышенной степенью интеграции и большой тактовой частотой. В этой связи большое значение имеет математическое моделирование процессов теплопереноса в электронных устройствах и элементах с целью определения оптимальных условий их охлаждения. Для обеспечения допустимой температуры нагрева процессоров,

которая для современных типов процессоров может составлять от средней величины 65°C до максимально допустимой величины 100°C , используются пассивные системы охлаждения с установкой радиаторов и активные с применением вентиляторов, тепловых труб, термоэлектрических систем.

1.3 Способы борьбы с перегревом

Теплопроводность – физическое свойство материала, характеризующее способность вещества проводить тепло. Она определяет скорость передачи теплоты через вещество. Величина теплопроводности зависит от ряда факторов, таких как температура, плотность материала, его состав и структура. Теплопроводность является важным параметром при проектировании и оценке качества теплоизоляционных материалов, а также при расчетах тепловых потоков в различных устройствах и механизмах. Единицей измерения теплопроводности в Международной системе единиц (СИ) является ватт на метр на кельвин ($\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$). В основе теории теплопроводности лежит закон Фурье [3], связывающий перенос тепла внутри тела с температурным состоянием в непосредственной близости от рассматриваемого места – выражается следующим образом:

$$dQ/dt = -\lambda F \cdot dt/dl,$$

где: dQ/dt – скорость перехода тепла (количество тепла за единицу времени); F – площадь сечения, нормального к направлению теплового потока; dt/dl – изменение температуры в направлении теплового потока. λ – теплопроводность материала.

Кондуктивный отвод тепла - процесс передачи тепла от более теплого к теплему телу путем прямого контакта между ними. Обычно он происходит в твердых телах или между твердым телом и жидкостью. Этот тип передачи тепла происходит благодаря движению молекул твердого тела, которые передают тепло молекулам более холодного тела. Для улучшения кондуктивного отвода

тепла часто используются материалы с высокой теплопроводностью, такие как медь или алюминий.

Для интенсификации охлаждения радиоэлектронных компонентов используются, например, пластинчатые, ребристые, штыревые радиаторы различных типоразмеров. В устройствах, в которых требуется рассеивать большие мощности до нескольких сотен ватт, требуется принудительное воздушное охлаждение. Перспективным направлением повышения эффективности охлаждения полупроводниковых и микроэлектронных компонентов является применение в качестве радиатора пенометалла с открытыми порами, например, на основе алюминиевого сплава.

В настоящее время тепловые трубки широко применяются в конструкциях процессорного охлаждения. Они позволяют не только эффективно переносить тепло от теплосъемника вентилятора к радиатору, но и распределять его по всему объему радиатора, что способствует хорошему рассеиванию теплоты в окружающее пространство. Как известно, процесс передачи тепла в трубке создается за счет находящейся внутри легкокипящей жидкости, которая испаряется на горячем конце трубки и конденсируется на холодном. Чтобы жидкость закипала при более низких температурах в трубке создается пониженное давление. Трубки должны быть герметичны. В качестве жидкости можно применять воду.

Принцип работы системы охлаждения заключается в непосредственной передаче тепла от нагревающегося компонента на радиатор за счёт теплопроводности материала или с помощью тепловых трубок (или их разновидностей, таких, как термосифон и испарительная камера). Радиатор излучает тепло в окружающее пространство тепловым излучением и передаёт тепло окружающему воздуху, что вызывает естественную конвекцию. Пассивное воздушное охлаждение центрального и графического процессоров в электронных устройствах требует применения специальных (и довольно больших) радиаторов с высокой эффективностью отвода тепла при низкой

скорости проходящего воздушного потока и применяется для построения бесшумного персонального компьютера. Особенно большую поверхность имеют радиаторы, специально созданные для работы без вентилятора, что позволяет значительно снизить шум компьютера.

ГЛАВА 2. ОБЗОР ИССЛЕДУЕМОГО УСТРОЙСТВА

2.1 Описание исследуемого устройства

В данной работе речь пойдёт об универсальном устройстве цифровой обработки сигнала (БМ-УМП-ЦОС) (рис.1). Рассматриваются два основных тепловыделяющих модуля: базовый одноплатный компьютер (БОК или СОМ – модуль) и FPGA kintex ultra scale xkcu 060 (ПЛИС). Данные элементы отличаются повышенным энергопотреблением и имеют риск перегрева. В состав прибора так же входят элементы системы охлаждения: тепловые трубки, радиаторы, теплосъёмники и т.д.



Рис.1 Модель устройства в Solidworks

2.2 Анализ конструктивных решений для обеспечения теплового режима

В настоящем разделе рассматривались следующие вопросы:

- эффективность применения корпусно-радиаторных решений в настольном исполнении;
- материалы, используемые при производстве радиаторов.

Для выбора характеристик и геометрии корпусных деталей были изучены различные конструкции радиаторов для отвода тепла от мощных полупроводниковых элементов. На рисунке 2 показаны конструкции наиболее часто используемых радиаторов.

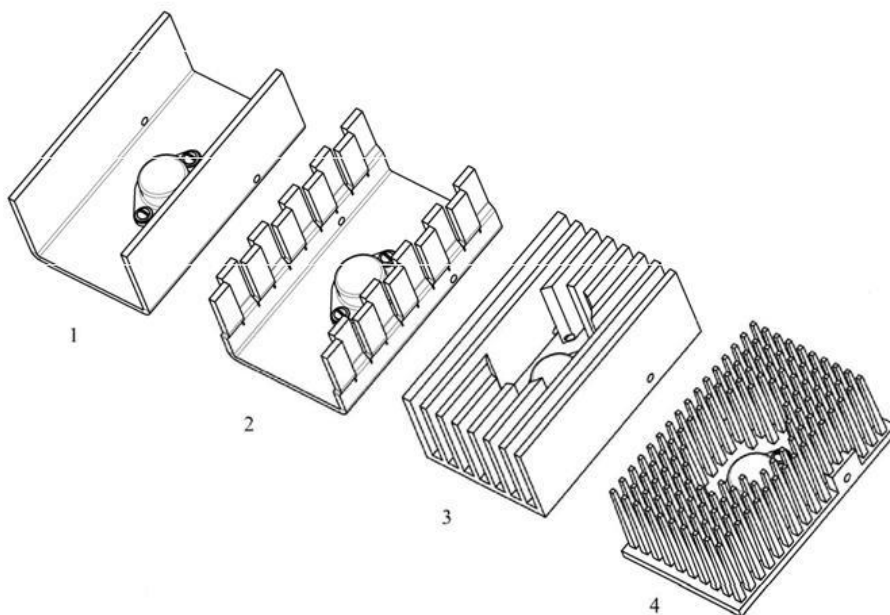


Рис. 2 1, 2 – пластинчатые, 3 – оребренный, 4 – игольчатый

Простейшим является пластинчатый радиатор [6]. Площадь его поверхности равна сумме площадей двух сторон. Из-за относительно малой площади теплоотводящей поверхности пластинчатый радиатор целесообразно применять при небольших мощностях рассеивания.

Оребренный радиатор – обычно цельнолитой, либо фрезерованный, может быть с односторонним или двухсторонним оребрением. Двухстороннее

оребрение позволяет увеличить площадь поверхности теплообмена. Площадь поверхности такого теплоотвода равна сумме площадей поверхности всех пластин и сумме площади поверхности основного тела радиатора.

Самым эффективным является штыревой (или игольчатый) радиатор. При минимальном объеме такой радиатор имеет максимальную эффективную площадь рассеивания тепла. Площадь поверхности такого теплоотвода равна сумме площадей каждого штырька и площади основного тела.[1]

Материалом для радиаторов обычно служит алюминий и его сплавы. Лучшей эффективностью обладают теплоотводы, выполненные из меди, но при прочих равных условиях масса и стоимость таких радиаторов выше, чем у алюминиевых.

Для изолирования прибора от радиатора – применяются различные изоляционные прокладки. В качестве материала для прокладок используют слюду, различные пленки из пластмассы, керамику.

На основе проведенного анализа можно сделать следующие выводы:

- игольчатый радиатор самый эффективный, но сложен в изготовлении и имеет высокую стоимость;
- пластинчатый радиатор прост в изготовлении, но является менее эффективным в смысле теплоотвода.

Исходя из перечисленных выше свойств и качеств радиаторов, наиболее подходящей оказалась технология оребрения для корпуса БМ-УМП-ЦОС.

2.3 Анализ материалов для изготовления радиаторов

Радиаторы из алюминия [4] стали популярны из-за ряда преимуществ по сравнению с радиаторами из других материалов (например, чугуна или стали):

1. Легкость. Алюминиевые радиаторы гораздо легче своих аналогов из других материалов, что упрощает их транспортировку и монтаж.

2. Прочность. Алюминий является достаточно прочным и долговечным материалом, который способен выдерживать высокие температуры и давление, типичные для систем отопления.
3. Высокая теплопроводность. Алюминиевые радиаторы имеют высокую теплопроводность, что позволяет быстрее и эффективнее нагревать помещение.
4. Устойчивость к коррозии. Алюминий не подвержен коррозии в условиях высокой влажности и температурных колебаний.
5. Экологичность. Алюминий является перерабатываемым материалом, что важно с точки зрения экологии и возможности повторного использования.

Из-за этих преимуществ алюминиевые радиаторы часто используются в системах отопления как в жилых, так и в промышленных помещениях.

Выбор материала для изготовления радиатора был между АД31 и АМц - два легких алюминиевых сплава, используемых в машиностроении, авиации и других отраслях промышленности.

Основные отличия АД31 от АМц:

1. Состав сплава: АД31 содержит примерно 80% алюминия, 1% меди, 0,6% магния и 0,5% железа, а АМц - примерно 92% алюминия, 1% кремния, 1% меди и 0,5% железа.
2. Механические свойства: АМц имеет более высокую прочность, твердость и устойчивость к коррозии, чем АД31.
3. Свойства обрабатываемости: АД31 более легковесный и легче обрабатывается, чем АМц, что делает его пригодным для использования в отраслях, где требуется высокая производительность и эффективность.
4. Стоимость: стоимость АД31 обычно ниже, чем у АМц, что делает его более доступным для некоторых предприятий.

5. Теплопроводность АД31 и АМц зависит от температуры окружающей среды и может быть разной для разных состояний материала. Однако, в общем случае, теплопроводность АМц выше, чем у АД31. При повышении температуры теплопроводность АМц снижается быстрее, чем у АД31. Например, при температуре в 150 градусов Цельсия теплопроводность АД31 составляет около 130 Вт/(м·К), а у АМц - около 75 Вт/(м·К). Таким образом, если необходимо обеспечить высокую теплопроводность при высоких температурах, то лучше выбрать АД31.

В целом, выбор между АД31 и АМц зависит от требований конкретного проекта и сферы применения. Если необходима более высокая прочность и устойчивость к коррозии, то предпочтение стоит отдать АМц. Если же важна обрабатываемость и стоимость, то АД31 будет более подходящим вариантом.

Проанализировав текущий рынок алюминиевых сплавов, был выбран сплав АД31 для изготовления корпуса устройства.

2.4 Обзор математической модели БМ-УМП-ЦОС

С помощью программы SolidWorks были созданы трехмерные модели всех модулей данного устройства, впоследствии проведена сборка. Каждый модуль и мельчайшая деталь спроектированы по заданным размерам, и выбранным материалам.

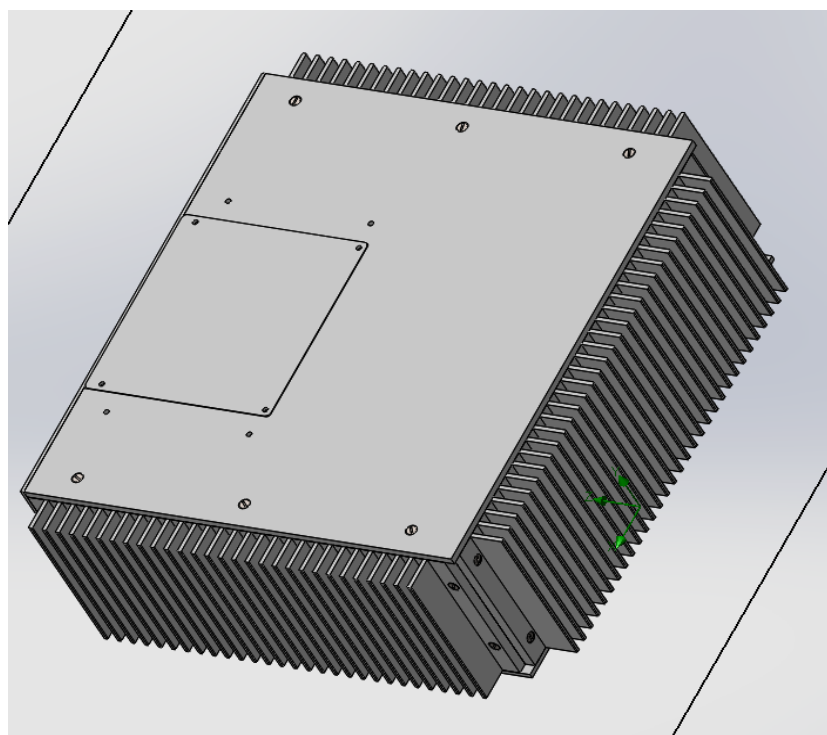


Рис. 3 Корпус устройства

Устройство конструктивно состоит из: DSP – модуль, FMC ADC, COM-модуль, а также алюминиевого корпуса.

На рисунке 3 изображён корпус устройства. Боковые грани корпуса выполнены ребристыми для повышения площади рассеивания тепловой энергии. Так же у прибора должен быть свой IP— это международные стандарты защиты электрического и электротехнического оборудования от потенциально опасного воздействия окружающей среды.

На рисунках представлена внутренняя компоновка «Системы цифровой обработки сигналов». На одной стороне FMC ADC (рис. 4), на второй стороне установлен COM-модуль (рис. 5). На рисунке 6 показано расположение модулей внутри устройства, каждый элемент которого был выполнен, соответствуя чертежам.

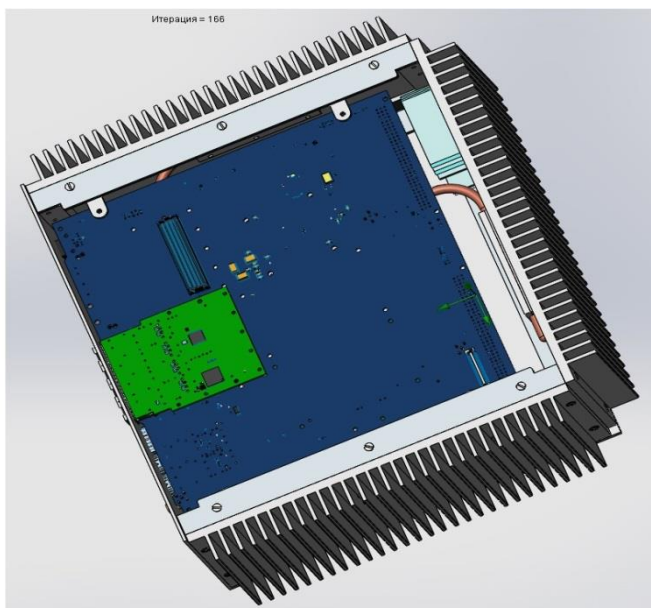


Рис. 4 FMC ADC плата

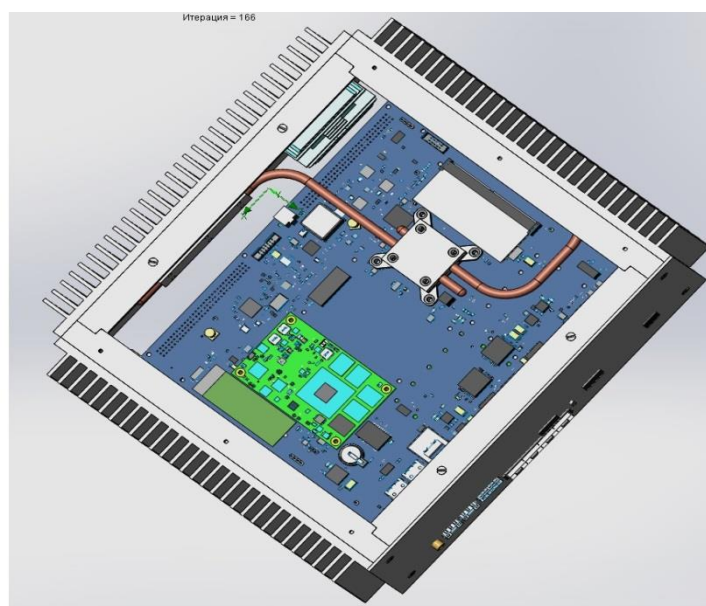


Рис. 5 COM модуль плата

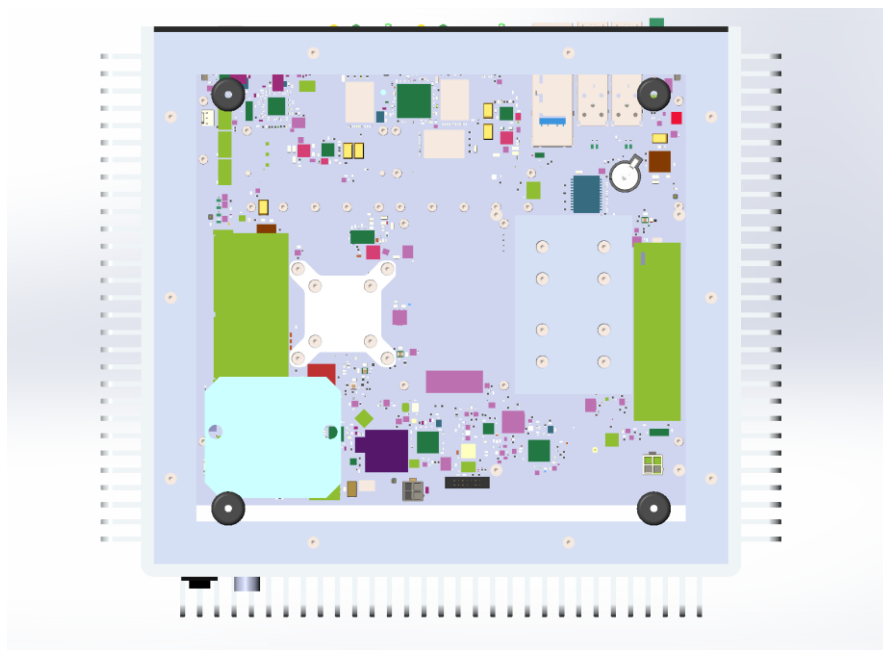


Рис. 6 Компоновка модулей под крышкой устройства

ГЛАВА 3. ОБЗОР ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ

3.1 Разработка корпуса и системы охлаждения БМ-УМП-ЦОС (БМ)

В разработанной ранее модели прибора необходимо было спроектировать систему охлаждения и радиаторы. По техническому заданию (ТЗ), разрабатывалась система пассивного охлаждения, то есть без использования внешних элементов охлаждения. Устройство должно удовлетворять международным требованиям защиты от проникновения пыли и влаги, то есть должна быть снижена возможность проникновения пыли внутрь корпуса изделия, а также, полная защита от прикосновения к токоведущим частям оборудования и защита от водяных потоков с любого направления. Поэтому корпус должен быть герметичен и охлаждаться за счёт внутренних элементов.

В данном устройстве есть два модуля, которые имеют риск перегрева при больших нагрузках, именно к ним необходимо разработать отвод тепла. Первый это - FPGA kintex ultra scale xkcu 060 (рис 7).

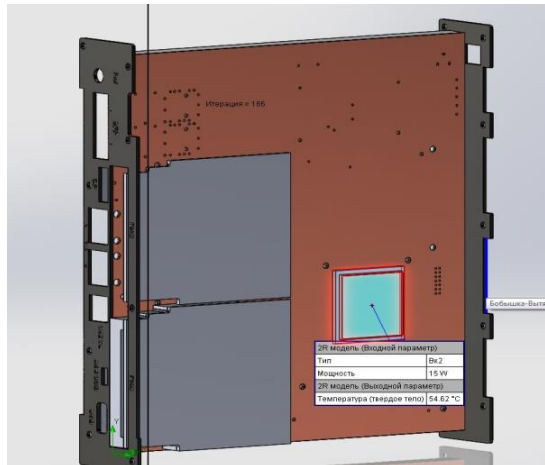


Рис. 7 ПЛИС Kintex UltraScale

Второй элемент с высокой степенью нагрева это – базовый одноплатный компьютер COME-mEL10 J6426 4G/32G (рис. 8).

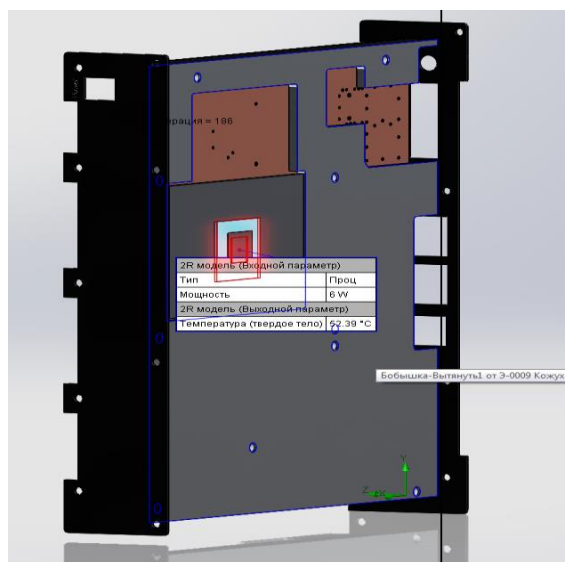


Рис. 8 СОМ-модуль

Таблица 1. Выделяемая мощность рассматриваемых элементов (данные от производителя модулей)

Наименование	Выделяемая мощность, Вт
Плис	45
СОМ-модуль	15

По ТЗ необходимо, чтобы основные модули работали в максимально нагруженном режиме, при этом их температура не поднималась до предела допустимого значения. В качестве охлаждающего элемента необходимо использовать капиллярные тепловые трубки. Они подбирались по параметрам мощности исходных модулей. Из таблицы 1 видно, что для ПЛИС необходимо две тепловые трубки, потому что одна тепловая трубка с диаметром поперечного сечения 6 мм рассчитана на модуль, мощностью 25вт, для СОМ-модуля достаточно будет одной трубки. Информация была взята с сайта поставщика систем охлаждения (рисунок 9), так же были даны рекомендации по

проектированию медных трубок, указанные в главе 3.2. Далее было выявлено месторасположение и определена траектория тепловых трубок.

Задача усложняется заданными условиями, а именно положением элементов системы охлаждения. Необходимо чтобы был свободным доступ к SSD накопителю и разъему питания, то есть была возможность производить сервис платы без демонтажа элементов охлаждающей системы. Для каждого тепловыделяющего модуля проектировалось крепление для тепловых трубок, а также модернизировались боковые грани, для повышения площади рассеивания тепловой энергии путём подведения к ним тепловых трубок.

3.2 Выбор тепловых трубок



Рис. 9 Интерфейс сайта с медными трубками

Артикул	макс. отводимая мощность Q_{max}, W	Температурное сопротивление $R_T, ^\circ C/W$
TM6-200	45	0,02...0,04
TM6-250	38	0,02...0,04
TM6-300	32	0,02...0,04
TM6-350	26	0,02...0,04

Рис. 10 Классификация медных трубок (сайт поставщика)

Основные технические характеристики тепловых трубок (информация взята с сайта поставщика): внешний диаметр - 6мм, толщина стенки: 0,3мм, материал стенки – медь, максимально допустимая температура, не приводящая к разрушению: 200° С.

Трубки охлаждения делают из меди потому, что медь является хорошим проводником [4]. Она имеет высокую теплопроводность и способность быстро распределять тепло, что позволяет эффективно охлаждать материалы. Также медь является коррозионностойким материалом, что позволяет использовать трубки из меди для передачи различных охлаждающих жидкостей без риска повреждения материала. Медь может легко выдерживать высокие температуры и давления.[4]

Процесс проектирования медных трубок усложняют ограничения на гибкость самих изделий. Градус изгиба должен быть не более критичного значения, указанного для конкретного образца. При неправильном проектировании данного элемента системы охлаждения, возможен излом детали при изгибе или потеря профильных функций медной трубки.

При разработке элементов системы охлаждения следует особое внимание уделить обеспечению надежного теплового контакта между источником тепла и тепловыми трубками. Придать трубке требуемую форму можно при помощи ручного трубогиба; следует избегать сильных деформаций трубок, так как это ведет к повреждению капиллярного покрытия внутренней поверхности и снижению эффективности теплопередачи. Для трубок сечением 6мм рекомендованный минимальный радиус изгиба составляет 18мм.

Задачу усложняла необходимость в разработке соединения медных трубок с боковыми задними частями корпуса (радиаторами). Далее для этого случая будет приведено решение с использованием оптимальных вариантов.

Теплосъемники должны быть изготовлены из материалов с хорошей теплопроводностью и прочностью, а также с определенными размерами и формой, для удобной установки на ПЛИС.

ГЛАВА 4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОРПУСА И СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ БМ-УМП-ЦОС

4.1 Процесс создания тепловых трубок для охлаждения ПЛИС в Solidworks

При проектировании медных трубок для охлаждения ПЛИС были использованы необходимые характеристики и данные. Элементы рассчитывались для охлаждения модулей не более, чем на 26 Вт (см. рис 10).

В программе Solidworks было создано кольцеобразное сечение, внутренний радиус которого 2.5мм, внешний 3мм (рис. 12). Одна трубка отходит к правой стенке (рис. 12), вторая к задней. (рис. 13) Радиус изгиба должен быть не более 18 мм. Далее по просчитанной траектории вытягиваем (с помощью инструмента вытянуть) до нужной нам длины [2], на концы добавляем скругление 3 мм. Трубки для ПЛИС будут разной формы, одна уходит на правую сторону корпуса радиатора, вторая – на заднюю. По такому же принципу проектировалась трубка для СОМ – модуля (рис.14).



Рис. 11 Медная трубка 1



Рис. 12 сечение медной трубки

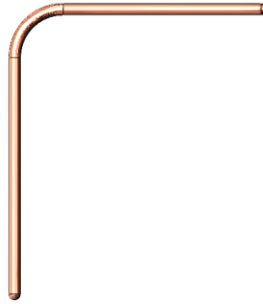


Рис. 13 Медная трубка 2

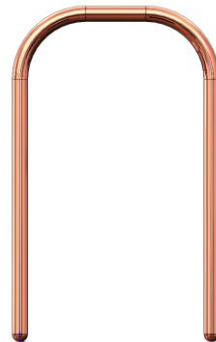


Рис. 14 Медная трубка для охлаждения СОМ модуля

4.2 Процесс создания крепления для тепловых трубок

Так же, задачей было спроектировать крепление трубок для каждого модуля и радиатора. В качестве крепления нужно использовать зажимные планки (рис 15), имеющие форму и размеры под соответствующие модули. Диаметр каналов под трубки должен быть 6 мм (диаметр трубок), пластины крепятся на болты, под них разрабатывалось крепление. Проектирование элементов происходило строго по чертежам. Для начала, было создано прямоугольное сечение [5], затем оно вытягивалось до соответствующей ширины. В случае теплосъёмника для ПЛИС, была использована симметрия при проектировании, то есть спроектирована четверть детали, а далее два раза с помощью инструмент отзеркаливания деталь была доведена до конца. В отверстия под болты добавлялась фаска для погружения головки крепления. В результате работы были спроектированы следующие элементы: теплосъёмники для ПЛИС, теплосъёмники для СОМ – модуля, крепления трубок к радиатору.

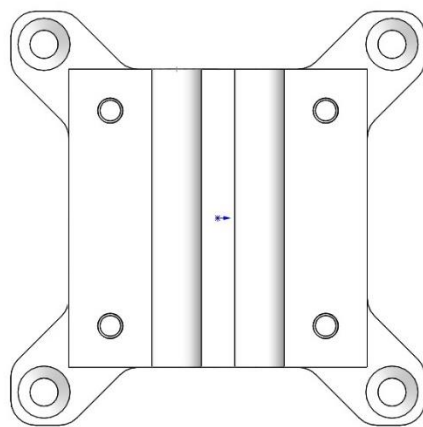


Рис. 15 теплосъёмник 1 для ПЛИС

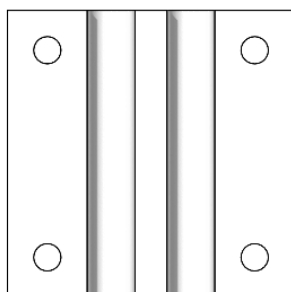


Рис. 16 теплосъёмник 2 для ПЛИС



Рис. 17 теплосъёмник для SOM модуля (вид сзади)

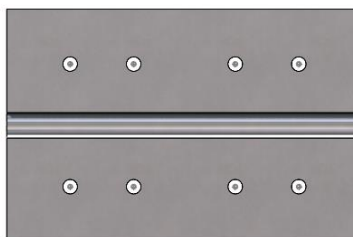


Рис. 18 теплосъёмник для СОМ модуля (вид спереди)

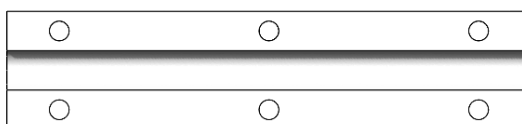


Рис. 19 модуль крепления трубки к радиатору (вид спереди)

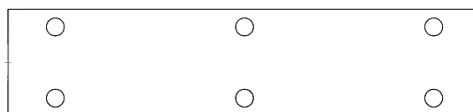


Рис. 20 модуль крепления трубки к радиатору (вид сзади)

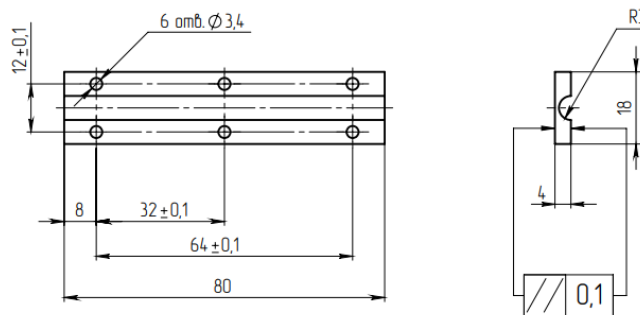


Рис. 21 чертёж крепления трубки к радиатору

4.3 Процесс доработки радиаторов

В каждом радиаторе (рис. 22) проектировался канал для трубки, куда она заводится. Далее с помощью теплосъёмника и крепежа (рис. 19) трубка фиксировалась. Был создан канал по центру задней стороны радиатора под тепловую трубку, радиусом 3 мм, используя инструмент вырезки. Также сделаны отверстия под крепление теплосъёмника, с помощью элементов программного обеспечения.

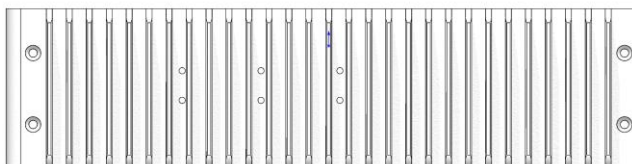


Рис. 22 Радиатор вид спереди

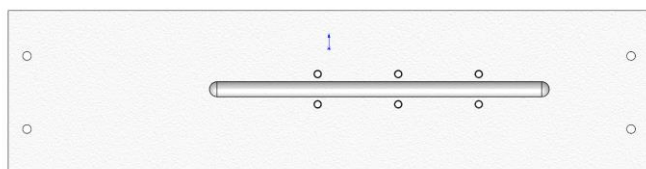


Рис. 23 Радиатор вид сзади

4.4 Крепление в сборе

Трубка крепится к радиатору с помощью теплосъёмника и 6 винтов. К СОМ модулю с помощью двух теплосъёмников (зажимных пластин) и 8 винтов. На рисунке 24 и 25 показаны крепления в сборе для СОМ модуля и ПЛИС соответственно. Сборка происходила с помощью встроенных инструментов Solidworks, а именно сопряжения поверхностей и сопряжения головок болтов с поверхностями пластин.

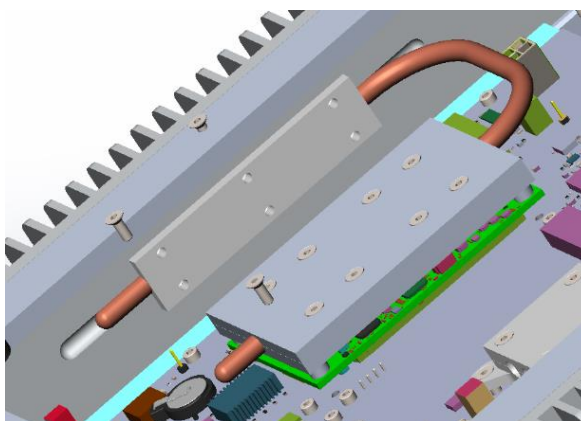


Рис. 24 система охлаждения СОМ модуля

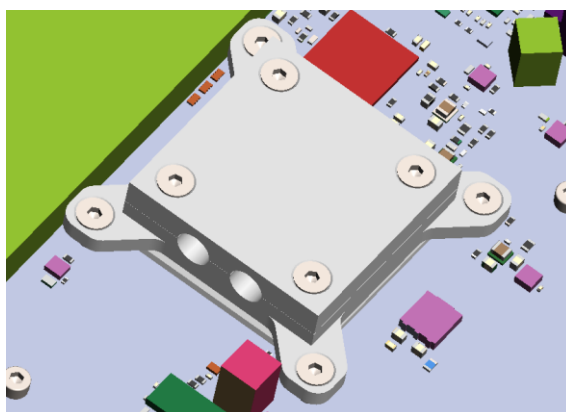


Рис. 25 система охлаждения ПЛИС

ГЛАВА 5. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ МОДЕЛИ

5.1 Входные данные

С целью определения степени нагрева различных модулей был проведен тепловой расчет устройства цифровой обработки сигнала, с помощью пакета для численного моделирования SolidWorks Flow Simulation. Далее были определены максимальные температуры основных тепловыделяющих элементов, а именно ПЛИС, СОМ модуля и разработанных ранее элементов системы охлаждения во время нагрузки прибора. Допустимые температурные нормы приведены в таблице 4.

Для проведения моделирования была задана расчётная область и сетка (рис.26 и 27), и были наложены граничные и начальные условия на собранную модель БМ. В качестве окружающей среды был взят воздух, температура 25 °С, атмосферное давление 760 мм ртутного столба (101325.00 Pa). Прибор находился в состоянии покоя, векторы скорости во всех направлениях равны 0. Каждому спроектированному элементу был задан соответствующий материал (тепловые трубки – медь, корпус – АД31 и тд.). Заданные условия и материалы, представлены ниже в таблицах 2 и 3. Так же для проведения моделирования были заданы значения мощности для двух основных модулей 45 Вт для ПЛИС и 15 Вт для СОМ модуля.

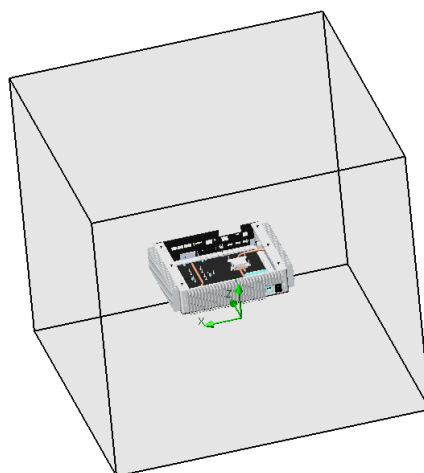


Рис. 26 Расчётная зона

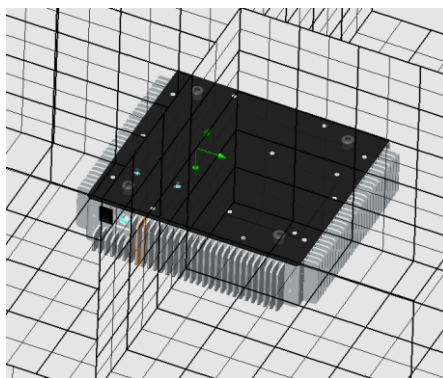


Рис. 27 Сетка

Таблица 2 Условия окружающей среды

Термодинамические параметры	Атмосферное давление: 101325.00 Pa Температура: 25.00 °C
Параметры скорости	Вектор скорости Скорость в направлении X: 0 m/s Скорость в направлении Y: 0 m/s Скорость в направлении Z: 0 m/s
Параметры твердого тела	Начальная температура твердого тела: 25.00 °C
Окружающая среда	Воздух

Таблица 3 Параметры материалов

Материал	Плотность, kg/m ³	Удельная теплоемкость, J/(kg*K)	Коэффициент теплопроводности, W/(m*K)
Алюминиевый сплав АД31	2710.00	921.0	210.0000
Алюминиевый сплав АМц	2730.00	940.0	204.0000
Медь	8960.00	390.0	390.0000

Таблица 4 Допустимые температурные нормы

Наименование	Максимальная температура корпуса T _a (°C)	Максимальная температура корпуса с учетом выделяющейся мощности T _a (°C)
Модуль FMC ADC	85	95
Модуль FMC 10G	85	95
COM-модуль	85	95
KINTEX-7	85	95

5.2 Результаты

В качестве результатов теплового расчета представлены распределения полей температур на рисунках 28 и 29. Тепловая диаграмма показывает степень нагревания каждого модуля, в том числе спроектированной системы охлаждения.

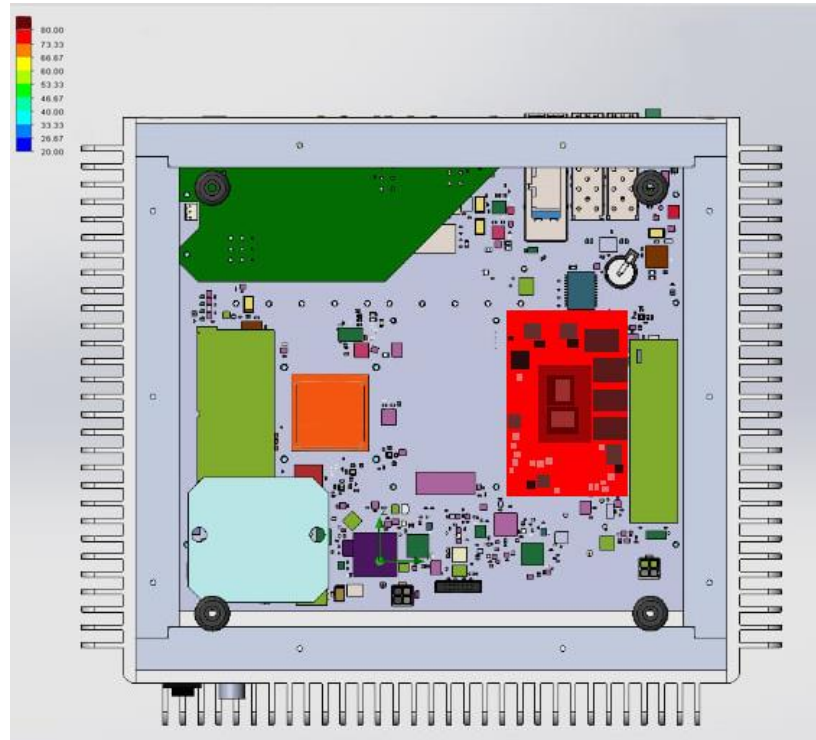


Рис. 28 Тепловая диаграмма Kintex-7

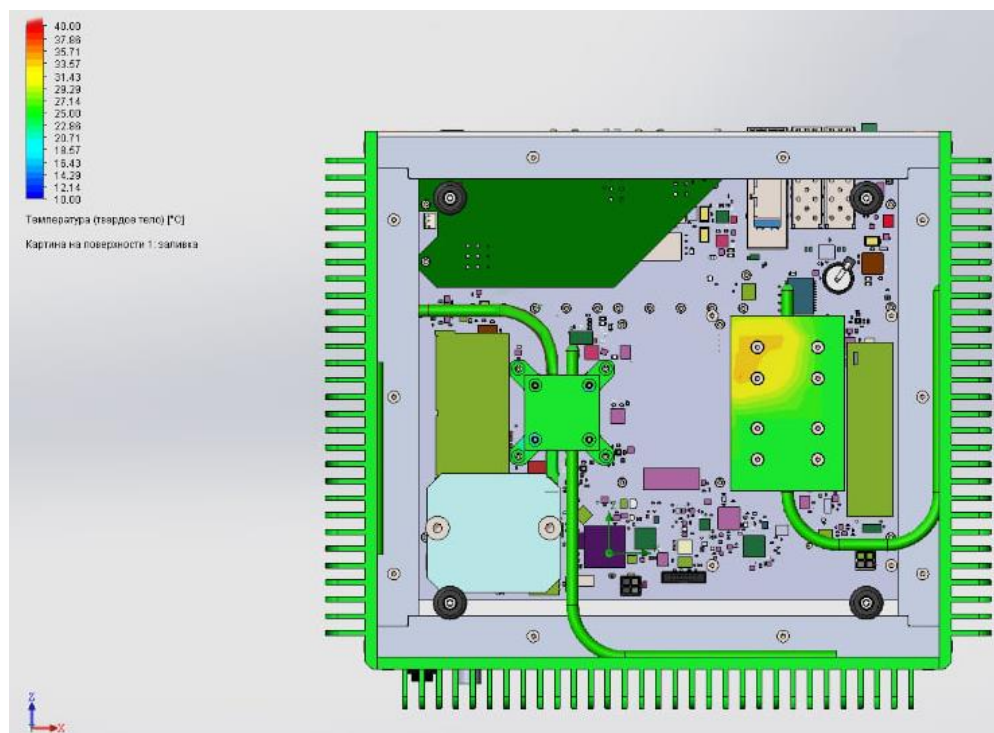


Рис. 29 Тепловая Диаграмма нагрева корпуса и элементов

В ходе теплового расчета была определена максимальная температура на элементе Kintex-7 $73,55^{\circ}\text{C}$, на COM модуле 85°C . При анализе тепловых диаграмм было выявлено, что при данном режиме работы нет элементов с температурой корпуса выше 80°C , что удовлетворяет максимально допустимым условиям (таблица 4).

Подводя итоги теплового моделирования, можно сделать следующие выводы: разработанная система пассивного охлаждения справляется со своей задачей, устройство не перегревается во время работы, а также имеется запас по допустимым температурам на основных тепловыделяющих элементах.

ГЛАВА 6. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БМ-УМП-ЦОС

6.1 Подготовка к эксперименту

Для проведения эксперимента необходимо нагрузить устройство (рис.32) и зафиксировать показатели температуры на основных тепловыделяющих элементах. Главными вычислительными модулями в устройстве являются: ПЛИС, СОМ-модуль. Тепловые данные внутри модулей находились с помощью встроенного ПО. БМ УМП ЦОС было помещено в климатическую термокамеру (рис. 31). Для начала нужно было дождаться пока температура компонентов БМ достигнет $+55^{\circ}\text{C}$ или больше (условия проведения эксперимента (рисунок 30)). После того, как температура всех модулей стала 55°C , БМ был включен и запущено на СОМ- модуле ПО в режиме стресс-тест с использованием всех 4-х ядер CPU БОК. Загрузка всех ядер CPU должна быть не менее 99%. БМ должен находиться в режиме «Автономный». В течение 3 часов, а именно каждые 20 минут фиксировалась температура основных узлов БМ (БОК, ПЛИС) и показания ПО. Экспериментальные образцы считаются выдержавшими испытания, если температура основных узлов БМ не превысила $+80^{\circ}\text{C}$, а температура основных элементов процессора БОК не превышает 95°C . При этом БМ должен продолжать исправно функционировать (не выдавать сообщений об ошибке при опросе датчиков).



Рис. 30 Панель датчика температуры климатической камеры



Рис. 31 БМ в климатической камере



Рис. 32 Компоновка модулей внутри устройства

6.2 Результаты эксперимента

Таблица 5 Температурные показатели на тепловыделяющих модулях

Время	ПЛИС, °С	БОК, °С
14:24	50	62
14:44	62	71
15:04	68,6	80
15:24	72	84
15:44	73,5	88
16:04	74,9	89
16:24	75,9	89
16:44	76,4	90
17:05	76	90

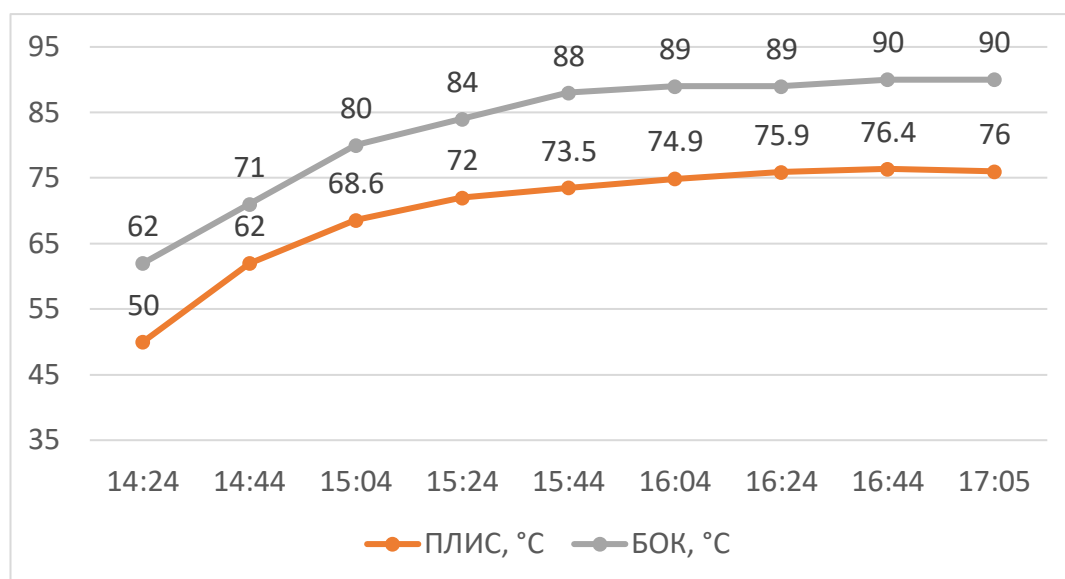


Рис. 33 графики температурных показателей

На рисунке 33 в виде графиков приведены результаты измерения температуры основных узлов БМ (БОК, ПЛИС). Показания ПО фиксировались в таблицу в течение трёх часов каждые 20 минут. Графики строились по точкам, значения которой указаны в таблице номер 5. Анализируя графики можем

увидеть, что температура на ПЛИС не превышает 77 градусов Цельсия. Так же видно из графиков, значения температуры остаются в безопасной зоне. Графики для БОК и ПЛИС имеют схожий характер монотонности, что говорит о корректности проведённого эксперимента. Рассматривая графики, видно, температура не выходит за рабочий диапазон на всём временном интервале, это говорит о надёжности спроектированной системы охлаждения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный экспериментально и виртуально расчет показывает, что конструкция «Системы цифровой обработки сигналов» соответствует требованиям, предъявляемым к ней в ТЗ. А именно, максимальная температура не превышает допустимую норму, спроектированные элементы системы охлаждения работают корректно, не мешают демонтажу сторонних модулей. Разработанная система пассивного охлаждения, куда входят медные тепловые трубки, теплосъемники, радиаторы, полностью удовлетворяет условиям заказчика. На основе проведенного моделирования и его сравнения с результатами реального эксперимента, можно сделать вывод о высокой точности моделирования. Несмотря на небольшие различия, а именно в 2,9 градуса Цельсия или 3,2 % для ПЛИС и 5 градусов Цельсия (5,5%) для БОК, результаты моделирования совпадают со значениями, полученными в реальном эксперименте, что является вполне допустимым и удовлетворяет заданию заказчика.

Это подтверждает возможность использования моделирования для проведения предварительных исследований без необходимости физического эксперимента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бегун П. И., Лебедева Е. А., Лобачева Д. А., Щепилина О. В. К63 Компьютерное моделирование в прикладной биомеханике: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. 159 с.
2. Волкович В.Л., Бакалов И.И., Мирошников О.М. Кондуктивные отводы тепла из электронной аппаратуры. - Москва: Радио и связь, 1984.
3. Дударева, Н. Ю. Д81 Самоучитель SolidWorks 2010 / Дударева Н. Ю., Загайко С. А. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 416 с
4. Евтушенко В.М., Игнатъев В.И., Углов Ю.Г. Теплоперенос в тепловых трубах. - Москва: Энергоиздат, 1981.
5. Комлев С.И., Корнев А.И., Куценко В.С. Тепловые трубы. - Москва: Энергия, 1978. Лыков А.В. Теория теплопроводности. – М.: Высшая школа, 1967 г. – 600 с.
6. Куликов В. В. Кондуктивный отвод тепла в электронных устройствах: Учебное пособие / Куликов В. В., Жуков А. В. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 201 с.
7. Марков, В. Ф. Материалы современной электроники: [учеб. пособие] / Марков В. Ф., Мухамедзянов Х. Н., Маскаева Л. Н.; [под общ. ред. В. Ф. Маркова]; М-во образования и науки Рос. Федерации, Урал. федер. ун-т. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 272 с.
8. Медведев В.А. Конструирование преобразователей – 2015. – 159 с.
9. Соловьев, В. А. Кондуктивный отвод тепла: Методические указания к лабораторной работе по курсу «Теплоперенос» / Соловьев В. А., Григорович А. А. – СПб.: Изд-во Политехнического университета, 2016. – 15 с.
10. Шангин, Ю. М. Кондуктивный отвод тепла: Учебное пособие / Шангин Ю. М. – М.: МФТИ, 2006. – 175 с.

11. Шарков А.В., Кораблев В.А., Герасютенко В.В., Заричняк Ю.П. Системы охлаждения и термостатирования– СПб: Университет ИТМО, 2021. – 89 с.
12. David C. Planchard, Marie P. Planchard, SOLIDWORKS Simulation 2017: A Power Guide for Beginners and Intermediate Users
13. Matt Lombard, SOLIDWORKS Simulation 2021: A Power Guide for Beginners and Intermediate Users
14. Paul Tran and Gary Lamit "SolidWorks 2019 Essentials: The User Interface, Navigation and Basic Part Modeling".
15. Scott Ashby "SolidWorks 2019: A Power Guide for Beginners and Intermediate Users".