

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники

УДК 004.418

Нгуен Ван Бач

Исследование возможностей модуля Solidworks программы Flow Simulation
для оценки эффективности работы устройства электронного охлаждения

АВТОРЕФЕРАТ

на соискание степени магистра технических наук
по специальности 7-06-0719-01 «Инженерная геометрия и компьютерная графика»

Научный руководитель
Вышинский Николай Владимирович
профессор кафедры ИКГ
профессор, кандидат технических наук

Минск 2025

ВВЕДЕНИЕ

Эффективное тепловое обеспечение критически важно для надежности современного радиоэлектронного оборудования (РЭС) с высокой удельной мощностью и миниатюризацией. Избыточные температуры ухудшают работу и вызывают отказы. Задача оптимизации систем охлаждения РЭС актуальна.

Вычислительная гидродинамика (*CFD*) - третий метод исследований, основанный на численном решении законов сохранения. *CFD*-анализ позволяет моделировать тепломассоперенос и прогнозировать температурные поля на стадии проектирования, минимизируя натурные испытания. Это мощный инструмент для понимания теплообмена.

Данная магистерская диссертация посвящена анализу и оптимизации системы охлаждения контроллера солнечной зарядки *WiFi MPPT* мощностью 1 кВт, работа которого сопровождается существенным тепловыделением.

Целью диссертационной работы является исследование теплового режима контроллера, оценка эффективности различных конструкций радиаторов на основе численного моделирования и разработка рекомендаций по оптимизации системы охлаждения для обеспечения надежной работы устройства с использованием программного комплекса *SOLIDWORKS Flow Simulation*.

В основе решения лежит подход численного моделирования тепловых процессов (*CFD*-анализ) методом конечных объемов (МКО). Основной инструмент *SOLIDWORKS Flow Simulation*, интегрированный в *SOLIDWORKS*, что ускоряет итерационный цикл проектирования и анализ влияния геометрии.

Для достижения цели решены следующие задачи:

1. Исследование теоретических основ теплообмена и численного моделирования РЭС.
2. Обзор *CFD*-комплексов, обоснование выбора *SOLIDWORKS Flow Simulation*.
3. Разработка описания и 3D-модели контроллера.
4. Формализация методики численного моделирования в *SOLIDWORKS Flow Simulation*.
5. Проведение расчетов для оценки теплового режима с разными радиаторами.
6. Анализ результатов, оценка эффективности и разработка рекомендаций по оптимизации системы охлаждения.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы магистерской диссертации:

Современное радиоэлектронное оборудование (РЭС) с ростом мощности и степени интеграции характеризуется значительным тепловыделением. Поскольку температуры являются основной причиной снижения надежности и преждевременного выхода из строя компонентов, обеспечение эффективного теплового режима является критически важной задачей для гарантирования работоспособности и увеличения срока службы РЭС. В связи с этим, применение современных инструментов вычислительной гидродинамики (*CFD*), в частности интегрированных в САПР, таких как *SOLIDWORKS Flow Simulation*, для анализа и оптимизации систем охлаждения электронных устройств является актуальным.

Цель работы:

Исследование теплового режима контроллера солнечной зарядки WiFi MPPT мощностью 1 кВт, оценка эффективности различных конструкций радиаторов на основе численного моделирования и разработка рекомендаций по оптимизации системы охлаждения для обеспечения надежной работы устройства с использованием программного комплекса *SOLIDWORKS Flow Simulation*.

Задачи исследования:

1. Исследование теоретических основ теплообмена и численного моделирования РЭС.
2. Обзор *CFD*-комплексов, обоснование выбора *SOLIDWORKS Flow Simulation*.
3. Разработка описания и 3D-модели контроллера.
4. Формализация методики численного моделирования в *SOLIDWORKS Flow Simulation*.
5. Проведение расчетов для оценки теплового режима с разными радиаторами.
6. Анализ результатов, оценка эффективности и разработка рекомендаций по оптимизации системы охлаждения.

Объект исследования:

Устройство электронного охлаждения контроллера солнечной зарядки WiFi MPPT мощностью 1 кВт.

Предмет исследования:

Тепловой режим контроллера, эффективность работы его системы охлаждения (в частности, радиатора), возможности применения модуля *SOLIDWORKS Flow Simulation* для теплового анализа и оптимизации.

Научная новизна диссертации заключается в разработке и апробации детальной методики численного моделирования тепловых процессов в контроллере солнечной зарядки 1 кВт с использованием *SOLIDWORKS Flow Simulation*, системном исследовании влияния ключевых геометрических параметров (числа и формы ребер) пластинчато-ребристого радиатора на эффективность теплоотвода для данной конструкции устройства, численном определении оптимальных геометрических параметров стандартного радиатора и сравнительной оценке эффективности теплоотвода модифицированных конструкций ребер.

Магистерская диссертация выполнена самостоятельно, проверена в системе «Антиплагиат». Процент оригинальности составил 87,27%. Заметвования, самоцитирования и цитирования обозначены ссылками на публикации, указанные в «Библиографическом списке».

Основные положения, выносимые на защиту

1. Модуль *SOLIDWORKS Flow Simulation* является эффективным инструментом для численного моделирования теплового режима и оценки эффективности работы устройств электронного охлаждения, позволяющим проводить анализ параллельно с процессом проектирования.

2. Для пластинчато-ребристого радиатора в системе охлаждения контроллера солнечной зарядки *WiFi MPPT* мощностью 1 кВт существует оптимальное количество ребер (около 8), при котором достигается наилучший баланс между площадью теплообмена и аэродинамическим сопротивлением, минимизируя температуру силовых транзисторов.

3. Модификация геометрической формы ребер пластинчато-ребристого радиатора, в частности использование конструкций с горизонтально расположенными гофрированными полукруглыми штырями, позволяет снизить термическое сопротивление радиатора и существенно улучшить эффективность охлаждения по сравнению со стандартными пластинчатыми ребрами, приводя к снижению максимальной температуры критических компонентов.

4. Разработанная методика теплового анализа в *SOLIDWORKS Flow Simulation* позволяет получать достоверные количественные оценки

температурного режима и служит основой для обоснованной оптимизации системы охлаждения РЭС на стадии проектирования.

Апробация диссертации и информации об использовании ее результатов

Результаты исследований, вошедшие в диссертацию, докладывались и обсуждались на 60-й и 61-й научной конференции студентов, магистрантов и аспирантов БГУИР 2024, 2025.

Публикации: По материалам диссертации опубликовано 2 печатных работ, из них 2 доклада в материалах научных конференций.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, четырех глав с краткими выводами по каждой главе, заключения, библиографического списка и приложений.

В первой главе представлены основные понятия и методы численного моделирования тепловых процессов.

Во второй главе проведен обзор существующих программных комплексов для *CFD*-анализа и обоснован выбор программного обеспечения для моделирования.

В третьей главе представлена постановка задачи и разработана методика моделирования исследуемого объекта.

В четвертой главе представлен анализ результатов моделирования и оптимизация системы охлаждения.

Общий объем диссертации составляет 108 страниц включая 76 иллюстраций, 12 таблицы, библиографический список из 28 наименований, список собственных публикаций соискателя из 2 наименования и 2 приложения.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** рассмотрены критическая важность эффективного теплового обеспечения надежности современного радиоэлектронного оборудования, проблемы, вызванные избыточными температурами, вычислительная гидродинамика как ключевой метод исследования в данной области, предмет исследования – анализ и оптимизация системы охлаждения контроллера солнечной зарядки *WiFi MPPT*, а также цель, задачи и методика проведения работы с использованием *SOLIDWORKS Flow Simulation*, а также дается обоснование актуальности темы диссертационной работы.

В **первой главе** представлены основные понятия и методы численного моделирования тепловых процессов. Рассмотрены теоретические основы теплообмена, включая теплопроводность (Закон Фурье), конвекцию (Закон Ньютона-Рихмана, критерии подобия: Нуссельта, Грасгофа, Прандтля, Рейнольдса, виды конвекции) и тепловое излучение. Подробно описаны методы численного моделирования дифференциальных уравнений, используемые при решении инженерных задач: метод конечных элементов (МКЭ), метод конечных разностей (МКР) и метод конечных объемов (МКО). Особое внимание уделено вычислительной гидродинамике (*CFD*), основанной на численном решении управляющих уравнений Навье-Стокса (сохранения массы, импульса, энергии), и ее применению для моделирования тепломассопереноса в электронных устройствах. Обсуждены преимущества и сложности применения *CFD*.

Во **второй главе** проведен обзор существующих программных комплексов для *CFD*-анализа и обоснован выбор программного обеспечения для моделирования. Рассмотрены ведущие коммерческие пакеты для вычислительной гидродинамики и теплопередачи, такие как *ANSYS Fluent*, *SOLIDWORKS Flow Simulation* и *COMSOL Multiphysics*, с описанием их возможностей, используемых численных методов (МКО, МКЭ), преимуществ и ограничений применительно к задачам охлаждения электроники. Обоснован выбор программного комплекса *SOLIDWORKS Flow Simulation* как оптимального инструмента для решаемой задачи. Среди ключевых преимуществ *SOLIDWORKS Flow Simulation* выделены его полная интеграция в среду *SOLIDWORKS*, концепция "сопутствующего *CFD*", ускоряющая итерационный процесс проектирования и анализа, интуитивно понятный интерфейс, автоматизация построения сетки и специальные функции для моделирования электроники. Также отмечена важность сотрудничества *ECAD-MCAD* и роль *SOLIDWORKS Flow Simulation* в этой экосистеме.

В третьей главе представлена постановка задачи и разработана методика моделирования исследуемого объекта. Подробно описана конструкция проектируемого изделия – контроллера солнечной зарядки *WiFi MPPT* мощностью 1 кВт, включая его схемотехнический анализ, определение элементной базы и основных источников тепловыделения (*MOSFET*). Обоснован выбор материалов конструкции, печатной платы и типа электрического монтажа (смешанный). Разработаны конструкторские решения, обеспечивающие удобство ремонта и эксплуатации (винтовое крепление, защелкивающийся механизм). Описана комбинированная система охлаждения (пассивное – радиатор, активное – вентилятор) и выбран вентилятор *ebm-papst 252N*, материал радиатора Алюминий 6061 и термопрокладка *ExeGate Ice EPG-13WMK*. Формализована методика проведения численного теплового анализа в *SOLIDWORKS Flow Simulation*: описана подготовка 3D-модели (с упрощениями и моделированием компонентов), создание нового проекта, задание граничных условий (вход/выход воздуха, вентилятор), определение тепловых источников, моделирование печатной платы как анизотропного тела, создание целей расчета (температуры компонентов), настройка конечно-элементной сетки (глобальная и локальная для радиатора) и запуск расчета. Приведены сведения о создании моделей пластинчато-ребристых радиаторов с различным количеством (от 5 до 12) и формой ребер для исследования их влияния на теплоотвод.

В четвертой главе представлен анализ результатов моделирования и оптимизация системы охлаждения. Результаты моделирования тепловых характеристик и температур критически важных компонентов (*MOSFET*) для радиаторов с различным числом ребер (от 5 до 12). Проведен анализ влияния количества ребер, который показал нелинейную зависимость: увеличение числа ребер до 8 приводит к снижению температуры за счет увеличения площади теплообмена, в то время как дальнейшее увеличение (до 12) повышает температуру из-за роста аэродинамического сопротивления воздушному потоку, что приводит к снижению эффективности конвекции. Установлено, что оптимальным является радиатор с 8 ребрами. Исследовано влияние модификации геометрической формы ребер 8-реберного радиатора (скругление, гофрированные штыри). Показано, что форма ребер влияет на термическое сопротивление, а вариант с горизонтально расположенными гофрированными полукруглыми штырями демонстрирует наилучшие результаты. Проанализированы факторы, влияющие на эффективность теплоотвода, такие как термический пограничный слой и расстояние между ребрами, а также взаимодействие вентилятора и радиатора. Сформулированы рекомендации по оптимизации системы охлаждения, включающие

использование высокопроизводительных термоинтерфейсных материалов (термопаст или жидкого металла вместо термопрокладок) и выбор материала радиатора (медь предпочтительнее алюминия, несмотря на недостатки).

В **заключении** изложены основные результаты магистерской диссертации, включающие исследование тепловых процессов, выбор *SOLIDWORKS Flow Simulation* и моделирование системы охлаждения контроллера. Приведены основные установленные зависимости и полученные выводы: определено оптимальное количество ребер радиатора (с 8) и показана эффективность модифицированных форм ребер. Подведен итог проведенной работы по оптимизации теплового режима устройства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенного исследования было изучено тепловое состояние радиоэлектронной техники и рассмотрены основные понятия и методы численного моделирования тепловых процессов, включая способы теплопередачи и основные управляющие уравнения. Применение численных методов является ключевым подходом для решения задач вычислительной гидродинамики и теплообмена в электронных устройствах.

Проведен обзор существующих программных комплексов для *CFD*-анализа. Выбран программный комплекс *SOLIDWORKS Flow Simulation* как наиболее эффективный инструмент для теплового моделирования, благодаря его функциональным возможностям и интеграции с САПР.

Разработан технический проект контроллера заряда для фотоэлектрических систем мощностью 1 кВт, определены компоненты, требующие эффективного охлаждения. С использованием *SOLIDWORKS Flow Simulation* разработана методика моделирования тепловых процессов. Проведен анализ результатов моделирования для радиаторов с различным количеством ребер. С использованием *SOLIDWORKS Flow Simulation* разработана методика моделирования тепловых процессов для спроектированного контроллера. Подготовлена геометрическая модель устройства к анализу, настроены параметры проекта, заданы граничные условия, источники тепла и определены цели расчета. Проведены вычислительные эксперименты для пластинчато-ребристых радиаторов с различным количеством ребер (от 5 до 12) и с модифицированными формами ребер.

Анализ результатов моделирования позволил установить влияние количества ребер и их геометрии на эффективность теплоотвода. Выявлено, что существует оптимальное 8 ребер, при котором достигаются минимальные температуры критически важных компонентов (*MOSFET*). Увеличение числа ребер сверх этого оптимума приводит к росту аэродинамического сопротивления и снижению коэффициента теплоотдачи, ухудшая эффективность охлаждения. Сравнение различных форм ребер показало, что модифицированные геометрии, в частности, с горизонтально расположенными гофрированными полукруглыми штырями, обеспечивают лучшие тепловые характеристики по сравнению со стандартными пластинчатыми ребрами, достигая более низких температур.

Анализ позволил установить влияние количества ребер на эффективность теплоотвода и выявить оптимальное количество ребер для достижения минимальных температур критических компонентов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1—А. Нгуен, В.Б. Сотрудничество ECAD-MCAD повышает скорость разработки электронных устройств в ALTIUM Designer и SOLIDWORKS / В.Б. Нгуен // Сборник материалов 60-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, 22-26 апреля 2024 г.: Электронные системы и технологии / Минск: БГУИР, 2024. – С.643–646.

2—А. Нгуен, В.Б. Введение в вычислительную гидродинамику (CFD) и ее применение для анализа потока в SOLIDWORKS Flow Simulation / В.Б. Нгуен // Сборник материалов 61-ой научной конференции аспирантов, магистрантов и студентов учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», Минск, 22-26 апреля 2025 г.: Электронные системы и технологии / Минск: БГУИР, 2025. – С. 662–664.