



# Моделирование теплообмена в микроэлектронном устройстве

Татьяна Маркова (markova@flowvision.ru),  
Антон Плаксин (plaksin@eremex.ru)

Проведение тепловых расчётов является важной и неотъемлемой частью процесса разработки и конструирования надёжной аппаратуры. В статье представлено описание методики моделирования и анализа тепловых режимов электронных устройств с помощью отечественных программных продуктов Delta Design, КОМПАС-3D и FlowVision.

При разработке радиоэлектронных устройств всё большее распространение получают информационные технологии автоматизированного проектирования, которые позволяют решать широкий спектр задач, таких как: автоматическая трассировка платы, исследования температурно-влажностных режимов, при которых работает аппаратура, моделирование вибропрочностных характеристик, характеристик надёжности и т.д.

Современные программные комплексы (ПК) вычислительной гидро- и газодинамики позволяют моделировать трёхмерный нагрев элементов платы и отвод тепла в окружающую среду с учётом пассивного или принудительного охлаждения. Трёхмерное распределение температуры позволяет получить подробную информацию о тепловых свойствах платы, сравнить значения температур в различных вариантах исполнения моделируемых устройств. Расчётные значения температур сравниваются с требуемыми величинами, что позволяет оценить работу всего радиоэлектронного устройства и при необходимости внести корректировки в его конструкцию, тем самым уменьшая риски отказа в результате перегрева.

## ИНТЕГРАЦИЯ ПРОДУКТОВ DELTA DESIGN, КОМПАС-3D и FlowVision

Система Delta Design позволяет схемотехникам и проектировщикам решать целый комплекс задач по созданию проекта печатной платы (см. рис. 1):

- создание и ведение базы данных радиоэлектронных изделий;
- создание электрической принципиальной схемы;
- проведение аналогового и цифрового моделирования электрической схемы;
- разработка конструкции печатной платы;
- расстановка компонентов и трассировка проводников печатной платы;
- выпуск комплекта конструкторской документации;
- подготовка комплекта файлов для производства печатной платы (например, комплект файлов Gerber и Drill).

Для внедрения в автоматизированный процесс проектирования тепловых расчётов был выбран отечественный программный комплекс вычислительной гидрогазодинамики FlowVision, который позволяет производить рас-

чёты температур элементов конструкции платы и корпуса и моделировать циркуляцию воздушных потоков внутри устройства.

Общая схема взаимодействия КОМПАС-3D, Delta Design и FlowVision представлена на рисунке 2.

Разработанную в системе Delta Design плату можно конвертировать в геометрическую 3D-модель с помощью встроенного в КОМПАС-3D конвертера ECAD-КОМПАС (в файл типа «.idf»). Если при этом библиотеки компонентов были синхронизированы, то компоненты автоматически разместятся на плате в 3D-формате. Из КОМПАС-3D все компоненты устройства экспортируются в один из форматов поверхностного представления геометрии, поддерживаемых FlowVision, например в формат «.stl». На основе файлов «.stl» формируется геометрическая модель проекта FlowVision. Кроме того, в FlowVision из отчёта Delta Design в табличном формате Excel передаются данные об элементах платы: материалы компонентов и основные источники тепла со значениями рассеиваемой мощности.

По полученным результатам теплового моделирования инженер может принять решение о необходимости модификации устройства (изменение расстановки элементов, конструкции корпуса и т.д.). После внесения топологических изменений и уточнения информации о свойствах материалов и мощностях основных источников тепла выполняется повторное моделирование.

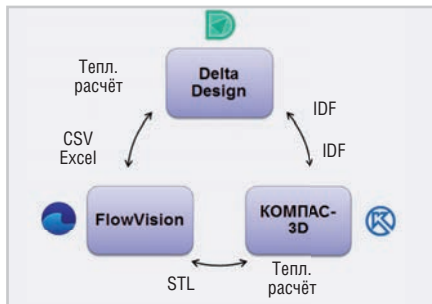
Целью и результатом интеграции ПК FlowVision в систему Delta Design является автоматизация процесса создания печатной платы и РЭА с проведением тепловых расчётов и необходимых доработок, предотвращающих избыточный перегрев и обеспечивающих высокую надёжность функционирования устройства.

## Возможности FlowVision

Программный комплекс вычислительной гидродинамики FlowVision позволяет моделировать циркуляцию воздуха с учётом лучистого и



Рис. 1. Цикл проектирования печатной платы



**Рис. 2.** Схема интеграции FlowVision в процесс разработки ПЭВ в системе Delta Design и КОМПАС-3D

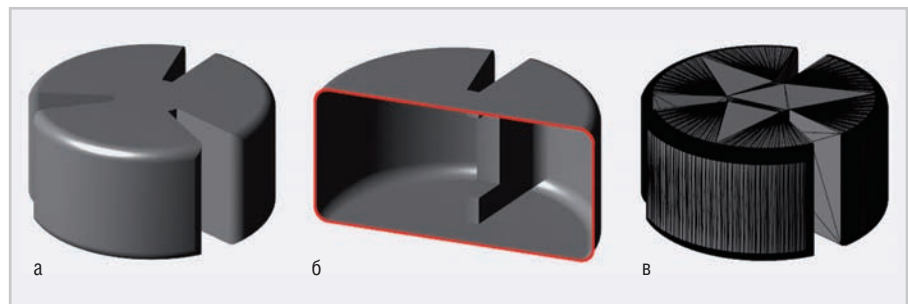
конвективного теплообмена, обеспечивая задание свойств материалов, мощностей тепловыделения источников тепла в задачах внешнего обтекания элементов конструкции, а также моделировать сопряжённый теплообмен между элементами устройства и окружающей средой в стационарном и динамическом процессах работы устройства.

FlowVision позволяет импортировать элементы конструкции устройства в форматах «.wrl», «.stl», «.mesh» и др. Проект FlowVision создаётся либо на базе одного файла геометрической модели, либо на базе списка файлов с помощью пакетного импорта файлов, что позволяет автоматизировать процесс вставки и создания расчётной геометрической модели. Геометрия элементов в системе КОМПАС-3D представляет собой твердотельный элемент, тогда как в FlowVision это уже замкнутая сеточная поверхность (см. рис. 3).

При создании геометрической сборки в FlowVision возможно использование как непосредственного контакта между деталями, так и тактирование компонентов через зазор, или же использование перекрытия между компонентами.

Способ размещения компонентов конструкции в FlowVision выбирается в соответствии с постановкой задачи: выполнение расчётов внутри и снаружи элементов (сопряжённый теплообмен) или расчётов внешнего обтекания.

В случае использования зазоров между элементами в FlowVision существует специальная «Модель зазора», которая позволяет рассчитать непосредственную передачу тепла между зазорообразующими поверхностями или же промоделировать необходимую прослойку между ними, типа герметика или клея, задавая соответствующие



**Рис. 3.** Геометрическая модель на примере катушки: а – твердотельная; б – поверхностная, в – сеточная

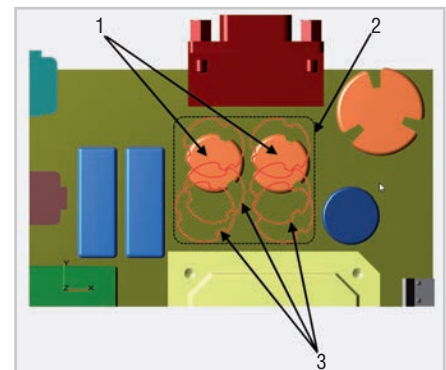
коэффициенты теплопроводности в зазоре с учётом высоты слоя.

Замена геометрического элемента непосредственно в процессе расчёта существенно сокращает время на моделирование и корректировку текущей версии конструкции. Так, например, в FlowVision можно решать задачи оптимизационного моделирования положения тех или иных элементов конструкции в заданных пределах. На рисунке 4 показано возможное перемещение катушки в процессе моделирования, результатом которого является нахождение её оптимального положения по отношению к другим элементам устройства, удовлетворяющего требованиям компоновки и тепловым характеристикам конструкции.

При решении задачи оптимизации в FlowVision замену геометрических элементов и обработку результатов можно производить либо вручную, каждый раз создавая различные варианты и запуская моделирование, либо посредством интеграции со специальными ПК, где задание параметров оптимизации и обработка результатов будут проходить автоматически в пакетном режиме (например, ПК ИОСО и др.).

Свойства веществ в FlowVision можно задавать вручную для каждого варианта расчёта или использовать базу данных веществ (БВ) FlowVision, наполняя её, при необходимости, новыми веществами с соответствующими теплофизическими свойствами.

Тепловыделение в FlowVision задаётся источниками с соответствующей объёмной ( $Вт/м^3$ ) и поверхностной ( $Вт/м^2$ ) мощностью. Количество источников определяется постановкой задачи и может меняться в процессе расчёта. Для решения нестационарных задач тепловыделение можно задавать как функцией от времени или от условий работы устройства (напри-



**Рис. 4.** Пример решения задачи оптимизации расположения компонентов платы:

1 – перемещаемые объекты; 2 – допустимая область перемещения; 3 – возможные варианты расположения объектов

мер, при отключении источников при достижении критической температуры на плате).

### ТЕПЛОЙ РАСЧЁТ В FlowVISION

На рисунке 5 схематично показаны этапы создания геометрической модели от разводки платы ПЭУ, спроектированной в системе Delta Design, до импорта элементов конструкции устройства из КОМПАС в виде сеточных поверхностей в FlowVision.

Стоит отметить, что из КОМПАСа, практически напрямую, без каких-либо упрощений, файлы геометрической модели в формате «.stl» импортируются в FlowVision, что позволяет работать как с упрощёнными геометрическими моделями элементов печатной платы, так и с реальными, с учётом всех геометрических особенностей элементов устройства.

На рисунке 6 показана плата с выделенными на ней тепловыделяющими компонентами: резистор, реле, конденсаторы и блок питания.

Сама плата располагается в корпусе (см. рис. 7), внутренняя поверхность которого формирует замкнутую

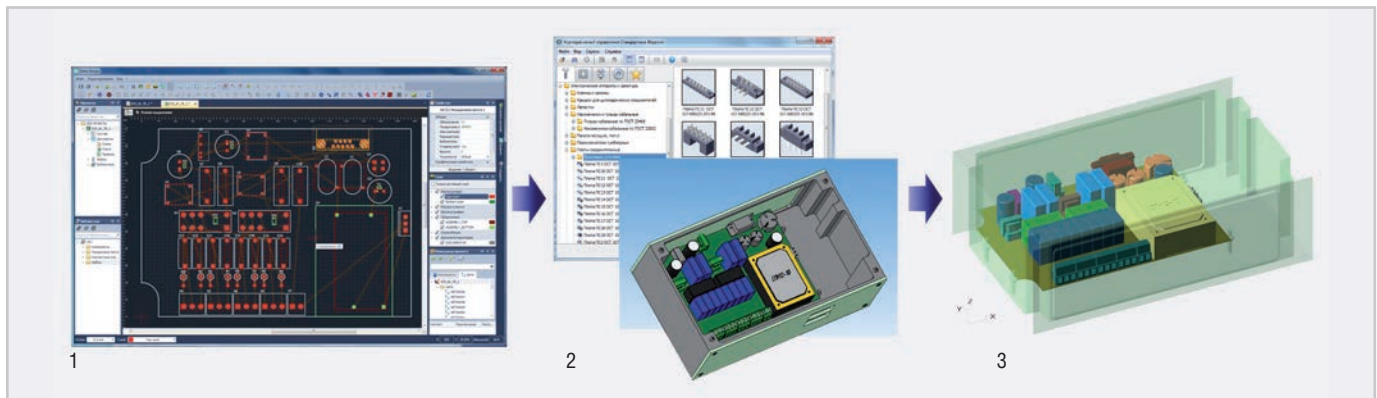


Рис. 5. Этапы создания геометрической модели: 1 – Delta Design, разводка и размещение элементов на плате; 2 – КОМПАС, 3D-модель с использованием библиотек компонентов; 3 – FlowVision, поверхностная геометрическая модель

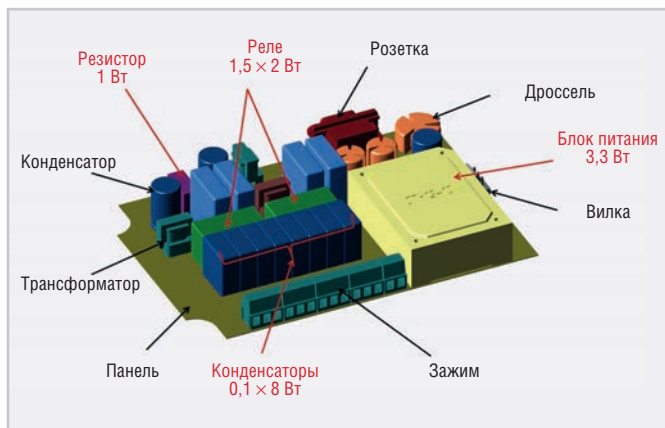


Рис. 6. Геометрическая модель платы в FlowVision

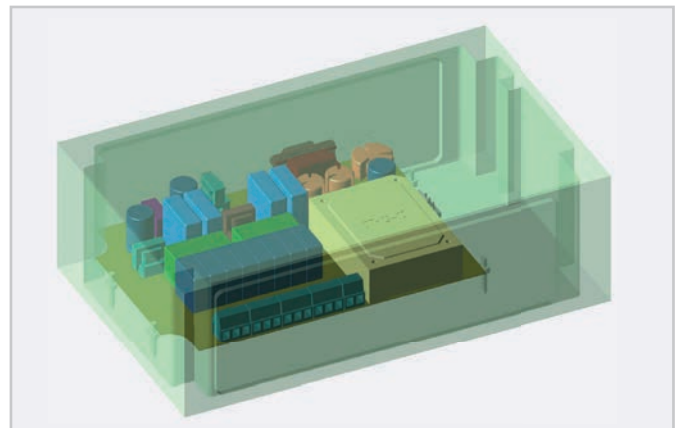


Рис. 7. Корпус с расположенной внутри платой

воздушную расчётную подобласть. Теплообмен на стенках корпуса с окружающей средой определяется температурой этой среды и коэффициентом теплоотдачи между корпусом и средой.

В моделируемой воздушной среде решаются трёхмерные уравнения Навье–Стокса с учётом гравитационной силы и уравнение энергии. Моделирование учитывает сопряжённый теплообмен между блоком питания, резистором и реле с окружающим воздухом с соответствующим заданием объёмных источников тепловыделения внутри каждого элемента, для которых определены соответствующие свойства материалов. Тепловыделение на конденсаторах полагается равномерным по поверхности. Все остальные стенки – адиабатические.

В FlowVision используется прямоугольная, динамически адаптируемая расчётная сетка. Построение сетки происходит автоматически по задаваемой пользователем функции размера ячейки. Для более тщательного разрешения течения вблизи стенок, вокруг всех элементов платы строится более подробная сетка с помощью инструмента адап-

тации – локального уменьшения размера сетки (см. рис. 8).

Первые результаты расчёта показали плохую циркуляцию воздуха внутри корпуса и между элементами платы при нормальных значениях температур компонентов платы и воздуха, что свидетельствует о недостаточном охлаждении и непригодности данной конструкции устройства. На рисунках 9 и 10 представлены трёхмерные распределения линий тока воздуха и температура элементов платы.

Анализ результатов показал, что при расчётах не был учтён лучистый теплообмен от нагреваемых поверхностей, величина которого в подобных задачах весьма существенна.

Для улучшения циркуляции воздуха было принято решение включить в конструкцию корпуса устройства вентиляционные отверстия. Это было реализовано в проекте FlowVision посредством задания профиля щелей на боковых поверхностях корпуса с помощью модификаторов геометрий, что позволило продолжить предыдущий расчёт. Геометрия щелей и их компоновка на корпусе показаны на рисунке 11. Профиль щели на боковой поверхно-

сти корпуса представляет собой трёхмерный геометрический объект, созданный в КОМПАСе и импортируемый в FlowVision. Массив щелевых элементов создаётся как одной сборочной 3D-моделью в КОМПАСе, так и импортированием одного типового элемента с последующим его «размножением» непосредственно в FlowVision.

Результаты моделирования теплового расчёта с учётом лучистого теплообмена и нового корпуса с вентиляционными отверстиями представлены на рисунках 12 и 13.

Полученные результаты показали, что добавление в конструкцию корпуса вентиляционных отверстий улучшило циркуляцию воздуха, что в совокупности с учётом процессов лучистого теплообмена позволило ещё на стадии моделирования снизить температуру всех компонентов платы до приемлемого уровня.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На приведённом примере моделирования нагрева окружающей среды и элементов электрической платы источниками тепловыделения удалось проиллюстрировать возможности использо-



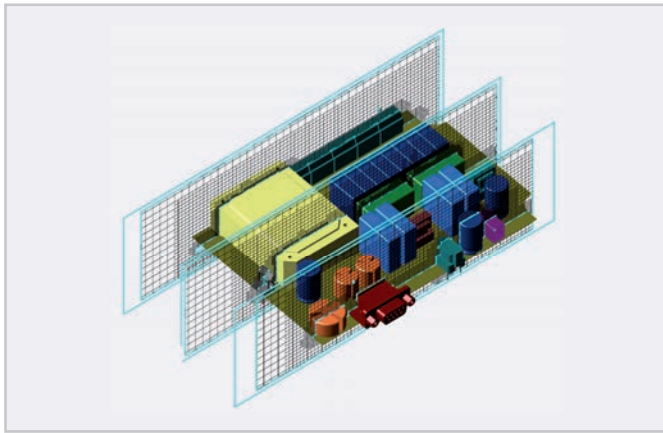


Рис. 8. Расчётная сетка FlowVision в нескольких сечениях

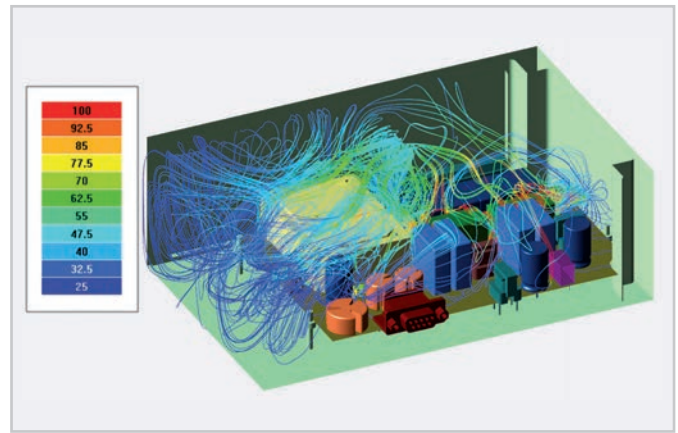


Рис. 9. Линии тока воздуха и их температура, °С

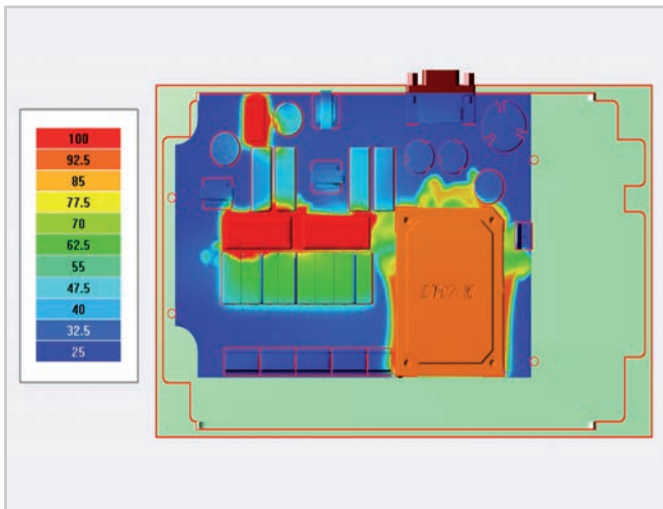


Рис. 10. Температура поверхности компонентов платы, °С

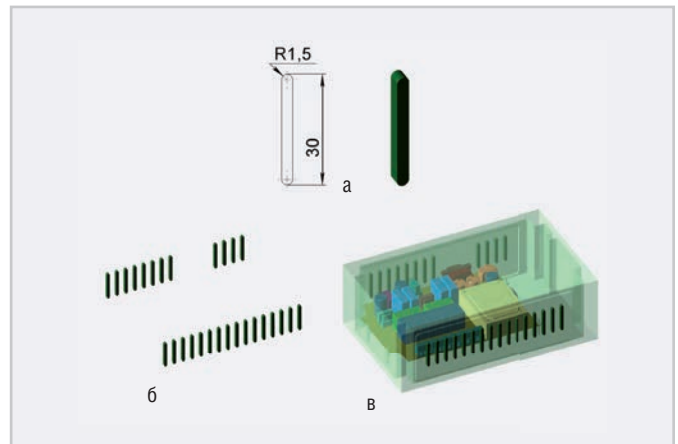


Рис. 11. Изменение конструкции корпуса с учётом вентиляционных отверстий: а – геометрическая модель отверстия; б – массив геометрических моделей отверстий; в – корпус с отверстиями в сборе

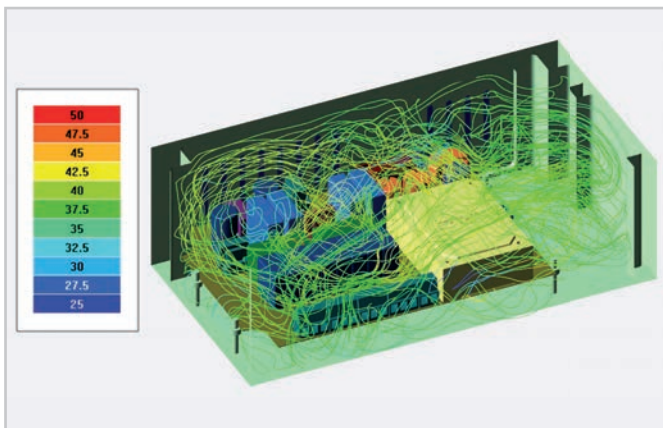


Рис. 12. Линии тока воздуха и их температура в корпусе с вентиляционными отверстиями

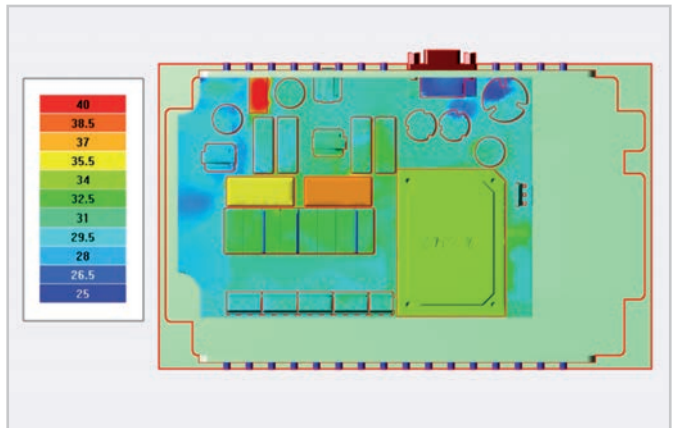


Рис. 13. Температура поверхности компонентов платы в корпусе с вентиляционными отверстиями

вания ПК вычислительной гидродинамики FlowVision в процессе разработки радиоэлектронных устройств. Применение данного ПК позволяет улучшить тепловые показатели моделируемого устройства, повысить его надёжность и автоматизировать весь комплекс работ по проектированию печатных плат РЭА.

Возможности FlowVision позволяют не только решать задачи по моделированию теплообмена между компонен-

тами платы, но и проводить оптимизацию для улучшения тепловых показателей устройства за счёт быстрого изменения геометрической компоновки, свойств веществ и значений мощностей тепловыделяющих элементов.

Совместное использование трёх отечественных программных продуктов (ПК вычислительной гидродинамики FlowVision, САПР электронных устройств Delta Design и системы

трёхмерного моделирования КОМПАС-3D) даёт возможность инженерам, особенно в ответственных областях применения, решать поставленные задачи без привлечения иностранного ПО.

### ЛИТЕРАТУРА

1. FlowVision – руководство пользователя. Режим доступа: [https://flowvision.ru/webhelp/fvru\\_30905/](https://flowvision.ru/webhelp/fvru_30905/) (проверено 19.05.2017).

