

УДК 621.396.6

## РАЗРАБОТКА КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ ЭФФЕКТИВНЫХ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ АВИАЦИОННОЙ БОРТОВОЙ РЭА

Ю. И. Лужавин, заместитель начальника отдела ОАО «НПП «Полет»; luzhavin@rambler.ru

В. П. Хранилов, профессор НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д.т.н.; hranilov@nntu.nnov.ru

**Рассматриваются особенности конструирования авиационной бортовой РЭА. Сформулированы основные принципы по моделированию и обеспечению теплового режима выходных каскадов передатчика и унифицированных модулей бортовых вычислительных машин. Рекомендованы конструкции системы воздушного охлаждения, определяющие направление воздушного потока.**

**Ключевые слова:** моделирование, система охлаждения, авиационная бортовая радиоэлектронная аппаратура, двухтактные ячейки, радиатор.

**Введение.** Условия работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) на борту летательных аппаратов (ЛА) определяются внешними дестабилизирующими факторами. Дестабилизирующее действие тепловых режимов относится к одному из наиболее критичных факторов, требующих тщательной проработки при проектировании конструкций современной авиационной бортовой РЭА (БРЭА). Необходимого (нормального) температурного режима работы элементов РЭА можно добиться, разработав собственную эффективную систему охлаждения, учитывающую особенности условий эксплуатации на протяжении всего жизненного цикла изделия.

Современная методология проектирования БРЭА предусматривает всемерное привлечение методов и средств непрерывной информационной поддержки жизненного цикла изделий (CALS), в том числе применение средств математического моделирования, и внедрения их в процессы проектирования на всех этапах и уровнях. Методы расчета теплового режима РЭА на основе упрощенных моделей, построенных с помощью электротепловых аналогий и полупирических соотношений, вытесняются моделированием тепловых процессов РЭА с использованием пакетов численного анализа. Это объясняется возможностью непосредственной передачи трехмерной геометрической модели исследуемого объекта в расчетную программу и детальным учетом аэродинамических процессов, определяющих конвективное охлаждение.

**Особенности конструирования теплонагруженной авиационной БРЭА.** Базовые несущие конструкции (БНК) БРЭА данных видов представляют собой сборную конструкцию, предназначенную для установки унифицированных ячеек, субблоков питания и т.п. Несущим элементом блока является шасси, в которое по направляющим с определенным шагом вставляются ячейки и субблоки. В этом случае нормальный тепловой режим в большей степени определяется эффективностью теплостока с элементов. Теплосток осуществляется путем кондуктивного теплообмена за счет металлизации печатных плат, клиновых зажимов, шасси блока, а также последующей конвекцией радиаторов.

Отличительной особенностью конструкций усилителей мощности (УМ) МВ- и КВ-связи является высокая тепловая мощность (десятки и сотни ватт), что при комплексной

микроминиатюризации требует применения специальных мер для обеспечения нормального теплового режима за счет установки теплонагруженных элементов непосредственно на радиатор охлаждения, являющийся частью шасси или стенкой блока.

Блоки БРЭА выполняются, как правило, в виде прямоугольного параллелепипеда в стандартных типоразмерах и с установочно-присоединительными размерами, построенными по нормализованному модульному ряду [1] и установленными на монтажную раму. Дополнительно на раме размещаются блочные части внешних электросоединителей и при необходимости воздушный коллектор для подвода охлаждающего воздуха в блок.

На ЛА передача тепла от теплонагруженной БРЭА к окружающей среде происходит с помощью централизованных или автономных систем охлаждения (ЦВСО и АВСО). ЦВСО может работать только в условиях полета или при работающих двигателях. В аэродромных условиях при стоянке самолета во время отладки оборудования, регламентных работ и предполетной подготовки подача воздуха в ЦВСО производится от наземного кондиционера [1].

Необходимый расход воздуха в специальных самолетах для снятия 1 кВт рассеиваемой мощности определяется в зависимости от температуры охлаждающего воздуха  $t_{вх}$

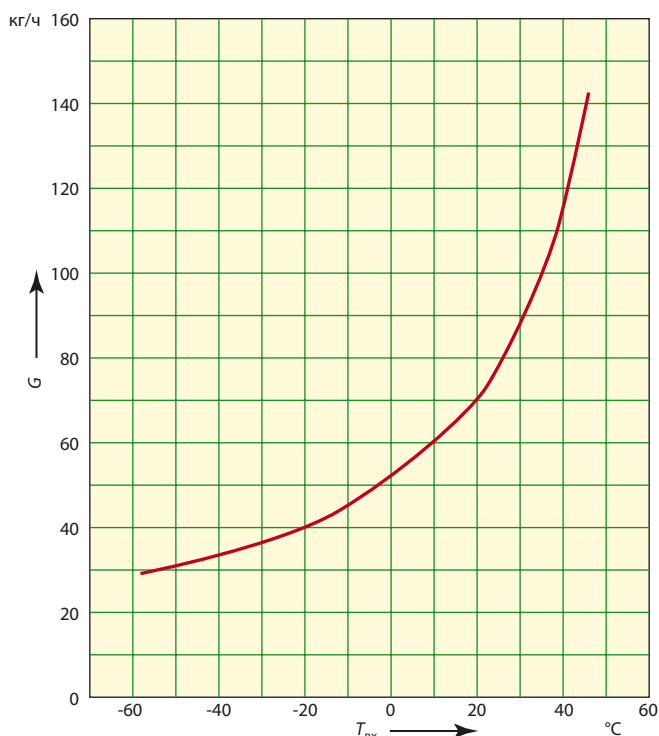


Рис. 1. Зависимость массового расхода воздуха на 1 кВт тепловой мощности от температуры охлаждающего воздуха в технических отсеках специальных самолетов

(рис. 1) [1]. В соответствии с этой зависимостью, выведенной из уравнения теплового баланса, для снятия 1 кВт тепловой мощности необходимо 120 кг/ч при температуре подаваемого воздуха 40 °С или 60 кг/ч при температуре 10 °С.

Расчет теплового режима РЭА при максимальной температуре охлаждающего воздуха не всегда является наиболее жестким условием нагружения [1]. При уменьшении температуры охлаждающего воздуха снижается и объем воздушного потока. Эти изменения могут повлиять на перераспределение воздушного потока в блоке, что в некоторых случаях вызвано конструктивными особенностями блока (рамы), а также возможной сменой режима течения охлаждающего воздуха (ламинарный, турбулентный).

Применяются АВСО, главным образом, при дозвуковых скоростях и относительно малой высоте полета (3000—5000 м) — более выгодных с точки зрения экономии массы. При высоте полета 10000—12000 м и более используются централизованные системы.

**Выбор средств моделирования.** Моделирование систем охлаждения стало возможным с появлением программ аэродинамического анализа. Наиболее популярной программой является интегрированная в САПР SolidWorks программа SolidWorksFlowSimulation [2, 3]. SolidWorks — один из наиболее распространенных CAD-пакетов, обеспечивающих возможность создания актуальных для дальнейшей конструкторско-технологической проработки геометрической модели конструкции электронных устройств и целых радиоэлектронных систем непосредственно в этом пакете. В него входят встроенные средства численного анализа для проверки принятых решений без выполнения конвертации геометрических моделей. В отличие от известных программ конечно-элементного анализа ANSYS, NASTRAN, пакет SolidWorks имеет интерфейс и инструментарий, в большей степени ориентированный на решение прикладных инженерных задач.

**Конструктивные решения систем обеспечения теплового режима выходных каскадов передатчика.** УМ с высокой линейностью и большим уровнем выходной мощности выгодно конструировать из модулей, представляющих двухтактные ячейки на паре транзисторов, работающих в недонапряженном режиме. Для усилителя мощностью 1 кВт схему с минимальным количеством двухтактных ячеек в оконечном каскаде можно сделать только с применением мощных транзисторов.

Двухтактные схемы позволяют уменьшить значение четных гармоник в выходном сигнале каждого транзистора и в идеальном случае взаимно уничтожить четные гармони-

ки. Снижение количества двухтактных ячеек в оконечном каскаде позволяет обойтись малым количеством суммирующих трансформаторов. Также значительно упрощается процесс подбора транзисторов с близкими параметрами, что позволяет обойтись без схем выравнивания мощности. Это приводит к улучшению таких электрических параметров, как линейность и коэффициент усиления УМ, снижению габаритов платы и повышению надежности устройства [4].

Основные трудности при реализации схемы усиления с двумя двухтактными ячейками в оконечном каскаде возникают при проектировании радиатора, способного снять локальный перегрев с теплонагруженных транзисторов. Увеличение температуры на РЭА уменьшает надежность изделия. Неудачное схемотехническое решение может потребовать значительных усилий конструкторов и приведет к существенному ухудшению конструктивных и эргономических показателей РЭА, заметно увеличит цикл разработки. Вот почему необходимо уметь оценивать конструктивные показатели будущего изделия уже на первом этапе конструирования при разработке электрических схем.

Оценка тепловой нагрузки производится по тепловому потоку, проходящему через единицу поверхности. Воздушное принудительное охлаждение получило наибольшее распространение, поскольку при невысокой стоимости и относительной простоте обеспечивает нормальный тепловой режим при более высоких удельных мощностях рассеивания.

Следует отметить, что во всех конструктивных вариантах воздушного охлаждения необходимо наличие радиатора — теплообменника, назначение которого сводится к обеспечению эффективного термодинамического процесса по максимальному отбору тепловой мощности и максимальной ее отдаче в окружающую среду.

Построение усилителя с большим количеством транзисторов подразумевает использование схем сложения мощности (от отдельных двухтактных ячеек). Но каждая схема сложения имеет собственные потери и вносит дополнительное рассогласование в цепи нагрузки, приводя к общему ухудшению КПД. Таким образом, усилители, построенные с большим количеством транзисторов (при одинаковой выходной мощности), выделяют большее количество тепловой мощности. Тем не менее, для общей оценки конструкции системы охлаждения УМ, построенного как на шести транзисторах, так и на двух, принимаем равную тепловую мощность 200 Вт.

Результаты проведенных тепловых расчетов приведены в таблице и на рис. 2, где: а) вариант с двумя транзисторами,

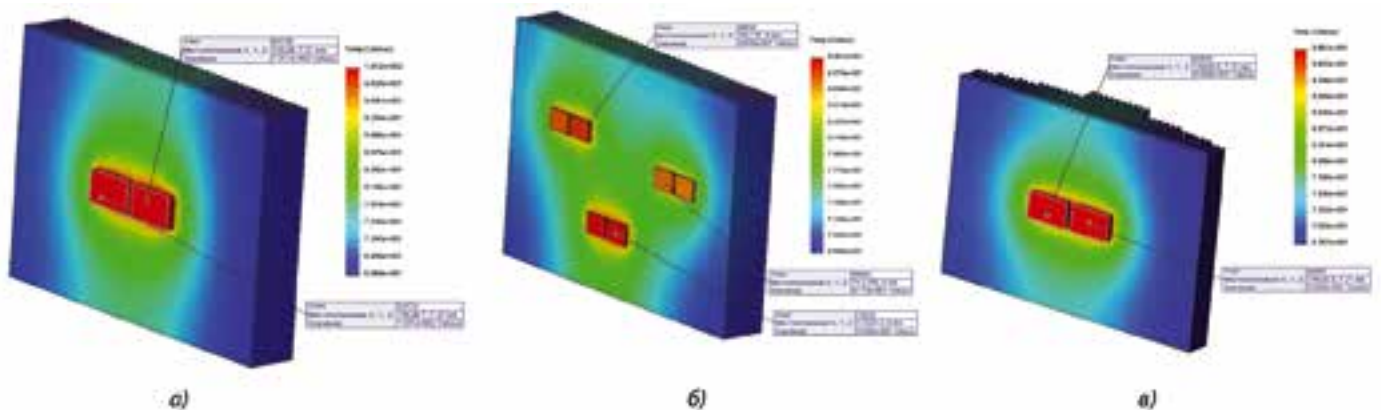


Рис. 2. Визуализация распределения поля температур

3 мм — основание радиатора (материал — алюминий), максимальный перегрев в результате теплового расчета  $\Delta T_{2тр} = 101 - 60 = 41 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

б) вариант с шестью транзисторами, 3 мм основание радиатора (материал — алюминий), максимальный перегрев в результате теплового расчета  $\Delta T_{6тр} = 91 - 60 = 31 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

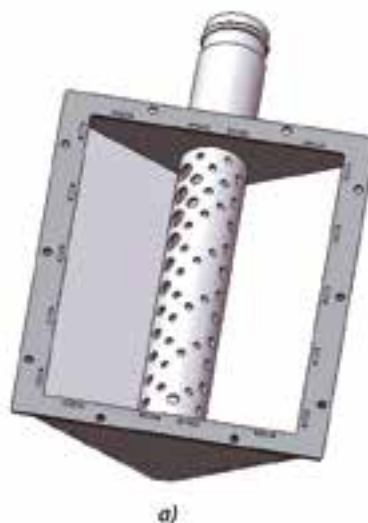
в) вариант с двумя транзисторами, ступенчатый радиатор (рассеиваемая площадь радиатора не изменялась), 3 мм — основание радиатора (материал — алюминий), максимальный перегрев в результате теплового расчета  $\Delta T_{2тр} = 99 - 60 = 39 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Вариант исполнения конструкции УМ	Перегрев, $^\circ\text{C}$
Шесть транзисторов, основание радиатора 3 мм алюминий	31
Шесть транзисторов, основание радиатора 3 мм алюминий + 2 мм медь*	27
Два транзистора, основание радиатора 3 мм алюминий	41
Два транзистора, основание радиатора 3 мм алюминий + 2 мм медь*	35
Два транзистора, ступенчатый радиатор, основание радиатора 3 мм алюминий	39
Два транзистора, ступенчатый радиатор, основание радиатора 3 мм алюминий + 2 мм медь*	33

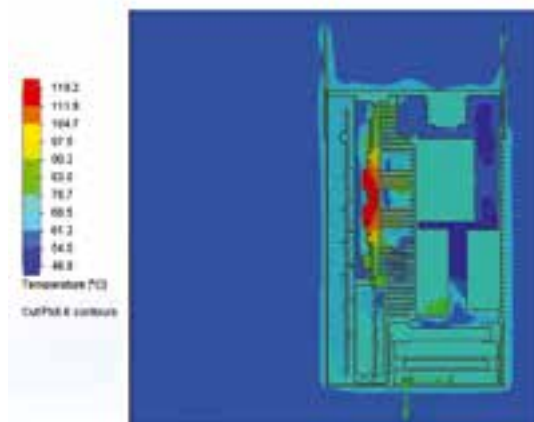
\*медная пластина  $190 \times 250 \times 2$  (между радиатором и транзисторами)

Из таблицы видно, что уменьшение числа теплонагруженных элементов ведет к большему перегреву. Медная пластина снижает перегрев с теплонагруженных элементов на 15—20%. При реализации схемы усиления с минимальным количеством двухтактных ячеек в оконечном каскаде УМ, проблема локального перегрева в большей степени может быть снята за счет применения медной пластины, ступенчатого радиатора или системы целенаправленного распределения воздушного потока.

Главное внимание стоит уделять правильному распределению принудительных воздушных потоков с целью максимального съема и эвакуации тепловой мощности и одновременно обеспечению нормального гидравлического сопротивления воздушному потоку [5, 6]. Высокое гидравлическое сопротивление приводит к большей турбулент-



а)



б)

Рис. 3: а) — поддон рамы под централизованную воздушную систему охлаждения; б) — визуализация поля температур в приемопередатчике

ности и резкому снижению производительности электровентилятора, что также уменьшает эффективность работы системы; более низкое гидравлическое сопротивление сни-

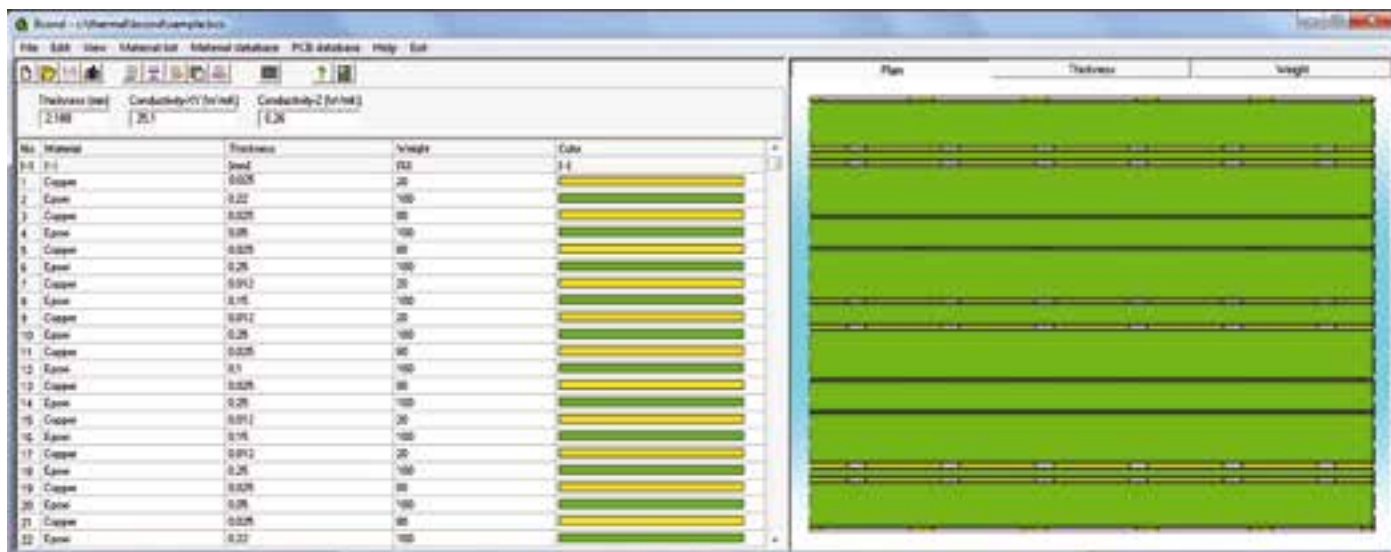


Рис. 4. Определение эквивалентной теплопроводности в программе Bspnd

жает эффективность съема тепла в результате ламинарного характера воздушного потока.

Пример системы целенаправленного распределения воздушного потока представлен на рис. 3, а в виде поддона рамы под централизованную воздушную систему охлаждения.

Таким образом, коэффициент конвективной теплоотдачи, определяемый скоростью воздушного потока и омываемой площадью радиатора, примет переменные значения по длине радиатора. Оптимальный конструктив системы охлаждения обеспечивается за счет целенаправленного движения воздушного потока в наиболее теплонагруженные зоны.

**Моделирование теплового режима БНК с унифицированными модулями.** При оценке локальных тепловых участков конструкции необходимо учитывать качество теплового контакта и степень металлизации печатных плат. В расчетной геометрической модели металлизированную плату можно представить как эквивалентную ортотропную однородную модель. Так, например, с помощью программы Vsond можно определить эквивалентную теплопроводность многослойной металлизированной платы (рис. 4). Использование эквивалентных параметров позволяет минимизировать количество расчетных ячеек, что необходимо в связи с ограничением компьютерных вычислительных ресурсов.

Наиболее часто замена многослойных плат на эквивалентные однородные применяется в расчетах блоков, построенных по модульному принципу с применением клиновых зажимов (рис. 5 и 6). Клиновые зажимы, как правило, моделируются одной деталью в разжатом положении. В этом случае, основным принципом обеспечения воздушного сопряжения между горизонтальным патрубком рамы, через который подключается ЦВСО самолета, является решение задачи равномерного распределения воздушного потока по длине радиатора блока за счет соответствующих направляющих [5].

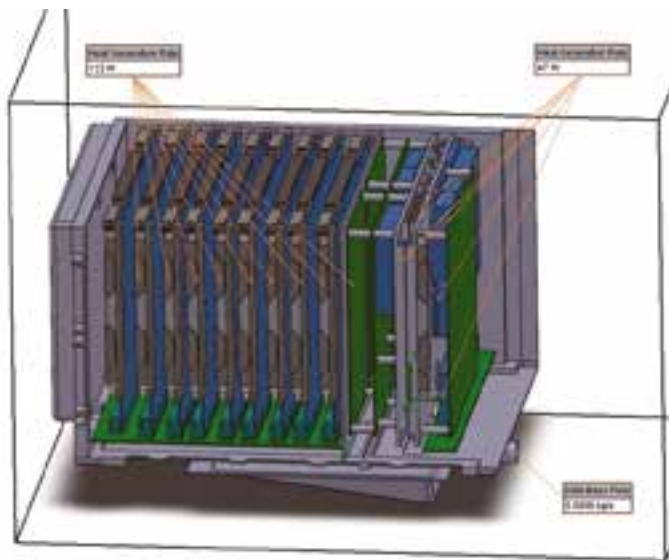


Рис. 5. Трехмерная модель блока (модель бортовой вычислительной машины)

В результате аэродинамических расчетов определяются направляющие, обеспечивающие оптимальное распределение воздушного потока в зоне радиаторов блока. В про-

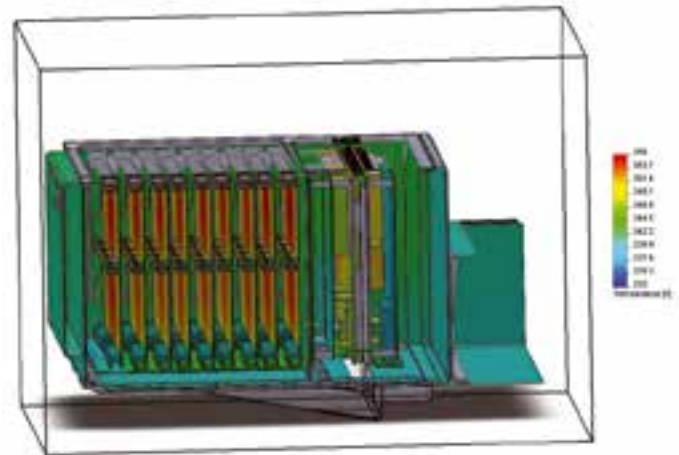


Рис. 6. Визуализация поля температур в блоке

грамме SolidWorksFloSimulation определены рекомендуемые размеры изгиба направляющих.

Важной частью в конструкции системы охлаждения РЭА являются внешние радиаторы и внешние стенки, образующие наиболее эффективный канал для прохода воздуха. Из-за уменьшения скорости воздушного потока в области радиатора без стенки, высоту внешней направляющей стенки рекомендуется принимать не менее 3/4 высоты радиатора блока. Проведенные в результате моделирования расчеты позволяют определить рекомендуемые размеры изгиба направляющих [6].

**Заключение.** Разработка эффективных систем охлаждения бортовой авиационной РЭА достигается с применением программ аэрогидродинамического и теплового анализа. Это дает возможность решить задачу температурной стабилизации в РЭА, которая, в свою очередь, улучшает показатели надежности, массогабаритные и качественные характеристики.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусов Е.Л., Ушкар М.Н. Конструирование блоков бортовой авиационной аппаратуры связи.— Н. Новгород: НГТУ, 2005.
2. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В. Solid Works 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике.— СПб: БХВ-Петербург, 2008.
3. Лужавин Ю.И. Автоматизированный метод моделирования теплового режима при проектировании авиационной бортовой РЭА с принудительной системой охлаждения в пакетах SolidWorksSimulation и SolidWorksFloSimulation // Материалы XVIII междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь».— Воронеж: СЕКВОЕЕ, 2012.
4. Лужавин Ю.И. Оптимальный подход к проектированию усилителей мощности на полупроводниковых приборах, применяемых в авиационной технике // Материалы IXX междунар. науч.-техн. конф. «Радиолокация, навигация, связь».— Воронеж: СЕКВОЕЕ, 2013.
5. Лужавин Ю.И., Хранилов В.П. Моделирование систем воздушного охлаждения бортовой авиационной РЭА // Успехи современной радиоэлектроники.— 2014.— № 4.
6. Лужавин Ю.И., Хранилов В.П. Повышение эффективности проектирования систем воздушного охлаждения бортовой авиационной РЭА средствами интерактивного математического моделирования / Тр. НГТУ.— Нижний Новгород, 2013.— № 4.