

# Как нужно работать, чтобы не сгореть на работе,

## или Кратко о методах и средствах охлаждения РЭА

Леонид Вихарев

lv-lv@mail.ru

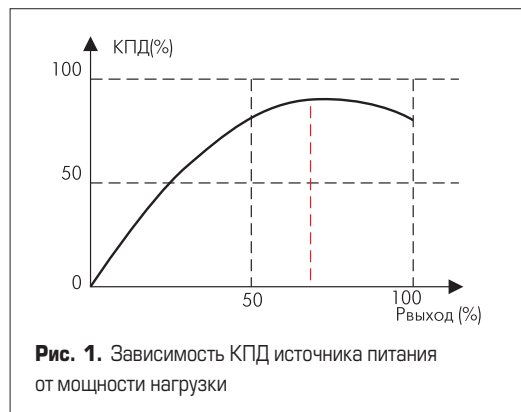
### Введение

Когда закончена проработка функциональных узлов, определен характер связей между функциональными блоками и процесс проектирования переходит к стадии поиска оптимального расположения компонентов на плате, не забудьте позаботиться о тепловом режиме работы вашего прибора. Если разрабатываемое устройство — серьезная вещь, состоящая из аналоговых и цифровых узлов, прецизионных измерительных схем и (или) силовых каскадов, то проблема тепловой стабилизации становится одной из важнейших — даже если это изделие и не будет работать в экстремальных условиях.

Почему это важно? На что могут повлиять изменения температуры? У аналоговых схем, где имеет значение каждый десяток микровольт, а отклонение сигнала от нормы в несколько милливольт — катастрофа, тепловая стабильность элементов крайне важна. Ведь с колебаниями температуры могут меняться и дрейфовать пороги компараторов, коэффициенты усиления операционных усилителей и транзисторов, меняются номиналы резисторов и конденсаторов. «Плывут» уровни сигналов обратной связи, нарастают тепловые шумы и снижается разрешающая способность преобразователей. В цифровой технике влияние температуры не столь выражено, но и там колебания температуры опасны. Ведь цифровой элемент — элемент пороговый, то есть также содержащий в себе своеобразный компаратор. Даже простейший логический элемент типа И-НЕ несет его в себе. Смещение порогов переключения и, как следствие, изменение скважности импульсов в периодических сигналах, появление «резаных» импульсов, сбой, дрейф частоты генераторов тактовых сигналов, опасность теплового пробоя транзисторов — таковы основные проблемы цифровой схемы, связанные с выходом за пределы разрешенного температурного диапазона. Для узлов, занятых точными измерениями временных параметров сигналов, таких как длительность или период колебания импульсов, обычно наблюдается снижение точности измерений. В устройствах комбинированного типа, таких как аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи, погрешности, вызванные тепловыми шумами, накладываясь друг на друга, в конце концов становятся одной из основных причин, ограничи-

вающих их точность. Общая проблема — механические напряжения в конструктивных элементах печатной платы, деформация платы, отслаивание и разрыв проводников, микротрещины и ускоренное окисление металлических поверхностей. Но наибольшую опасность рост температуры компонентов и окружающей среды представляет в силовой электронике. Здесь следствием пренебрежения или неправильной оценки тепловых параметров схемы является полное разрушение источника питания (ИП) и нарушение работы потребляющих блоков. Поэтому отвод лишнего тепла так важен при разработке питающей аппаратуры или выборе готового источника для РЭА.

Несмотря на столь опасные последствия, отношение к охлаждению аппаратуры вообще и ИП в особенности не всегда достаточно серьезное. Особенно часто грешат этим разработчики цифровых устройств. Не имея достаточных знаний в данной области, они полагают, что избегут многих неприятностей, если при выборе источника установят блок с заведомо большей выходной мощностью, чем это необходимо. Отчасти это действительно так, но лишь отчасти. Дело в том, что КПД источника питания не является величиной постоянной, а связан с выходной мощностью зависимостью, представленной на рис. 1 [1]. Как видно из графика, максимальный коэффициент полезного действия ИП достигается на нагрузке, составляющей 65–75% максимальной. При большей или меньшей нагрузке величина бесполезных потерь в источнике питания увеличивается. Но беда не только в том, что аппаратура бесполезно потребляет энергию, что,



конечно же, плохо, но также в том, что рассеиваемая мощность превращается в тепло, которое влияет на характеристики и надежность устройства. ИП, даже не будучи перегруженным, будет греться и при недостаточном отводе тепла может совсем выйти из строя. При этом следует помнить, что с ростом температуры на каждые 10 °С время безотказной работы РЭА сокращается в среднем в 2 раза [1].

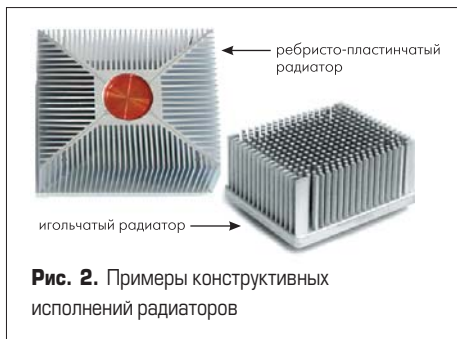
Проблема охлаждения РЭА достаточно серьезна, и отмахнуться от ее решения нельзя. Но для того чтобы с сознанием дела приниматься за задачу, нужно знать, какие решения существуют, разобраться в достоинствах и недостатках различных подходов.

### Основные методы охлаждения РЭА

Все способы охлаждения РЭА по методу действия можно разделить на две основные группы: на пассивный и активный методы. Для первого характерен естественный путь отвода тепла при помощи конвекции, теплопроводности и излучения. Для второго — принудительный теплоотвод с применением вентиляторов, термоэлектроохладителей и омывающих жидкостей. В зависимости от степени нагрева компонентов, наличия места и допустимой рабочей температуры выбирается нужный способ. (Поскольку излучением рассеивается лишь около 3% производимого в РЭА тепла, то все возможные способы охлаждения связанные с ним, здесь не рассматриваются как малосущественные).

Самый простой и потому часто применяющийся способ — пассивный теплоотвод с применением радиаторов. Этот метод основан на явлениях теплопроводности материалов и естественной конвекции. Размеры полупроводникового кристалла слишком малы, чтобы конвекция была достаточной для его охлаждения. Ее можно увеличить, если корпус полупроводникового прибора прикрепить к радиатору, многократно увеличивающему площадь поверхности охлаждаемой детали. Благодаря теплопроводности тепло от корпуса микросхемы или транзистора передается массивному металлическому радиатору.

Радиаторы различаются по материалу, способу изготовления и по конструкции. По материалу исполнения предпочтительнее устройства, выполненные из цветных металлов — алюминий, медь, их сплавы (поскольку эти материалы обладают наибольшей теплопроводностью). Лучше их только благородные металлы — серебро и т. п., но они, по понятным причинам, в данном качестве не используются. По конструктивному исполнению различают игольчатые и пластинчатые радиаторы или ребристо-пластинчатые (рис. 2). Игольчатые лучше работают при естественной конвекции. Другие типы предпочтительнее применять при принудительном обдуве воздухом. По способу производства принято различать радиаторы, выполненные методом горячего порошкового экструзирования (прессования), изготовленные фрезированием из цельного куска металла, «складчатые» (сделанные из тонкой металли-



ческой ленты, сложенной в «гармошку»; пример такого радиатора для кулера фирмы Molex приведен на рис. 3), а также полученные методом холоднойковки и составные (выполненные из элементов, изготовленных по различным технологиям и из различных металлов). По эффективности теплоотвода на первое место следовало бы поставить изделия, полученные фрезерованием, затем составные, если они сделаны с соблюдением технологических требований, складчатые и все остальные. (Примерно в том же порядке меняется и стоимость радиаторов: самые дорогие — точеные, фрезерованные, затем составные и т. д.)



О том, как рассчитать необходимую площадь радиатора, какая его конструкция в различных случаях предпочтительнее — обо всем этом написано множество книг и пособий. Кое-что можно найти и в периодических изданиях и на сайтах производителей. Так, например, можно порекомендовать статью [2] в журнале «Компоненты и технологии», посвященную транзисторам MOSFET и IGBT и методам расчета радиатора для импульсного источника питания, выполненного на этих элементах. Очень просто и без сложных выкладок данная проблема излагается в другой статье [3]. В последние десятилетия, когда на первый план вышла цифровая техника, число публикаций на эту тему сильно сократилось. Однако заинтересованный читатель всегда сможет отыскать необходимую литературу в библиотеках, и потому проблема расчета радиатора здесь подробно обсуждаться не будет.

Отвод тепла на массивный радиатор — лишь частичное решение проблемы охлаждения полупроводникового прибора. Если сам радиатор остывает за счет естественной конвекции, то при затрудненном обмене воздуха и малой разнице температур между радиатором и окружающей средой возможен перегрев кристалла. Требуется усиленная принудительная конвекция. Обдув радиатора воздушной струей от вентиляторов решает эту проблему и значительно усиливает теплоотвод.

Пару десятилетий назад вентилятор, ввиду его больших габаритов и потребляемой мощности, монтировался где-либо снаружи и использовался лишь для общего охлаждения аппаратуры, размещенной в закрытых корпусах. Чаще применялись устройства переменного тока, так как двигатели постоянного тока были дороги, менее надежны, требовали периодического обслуживания и контроля состояния коллекторных щеток. Габариты и потребляемая мощность вентиляторов были основными факторами, ограничивающими их применение в аппаратуре. Такой параметр, как шумность, почти никогда не нормировался. Важными считались только производительность и время безотказной работы. Сегодня ситуация изменилась — вентиляторы стали компактнее, снизилось их потребление, они почти не шумят, увеличился рабочий ресурс и, как следствие, применяются они еще чаще и шире, чем раньше. Сегодня больше применяются бесщеточные двигатели постоянного тока. Они не уступают по надежности устройствам переменного тока, но потребляют меньше энергии при большей производительности. Как и в прошлом, вентиляторы применяются для общего отвода тепла из каркасной аппаратуры. Однако с появлением на свет высокопроизводительных чипов, таких, например, как процессоры современных компьютеров, цифровые процессоры для обработки сигналов (DSP) и специализированные видеопроцессоры, чья потребляемая мощность может превышать 50 Вт (мощность среднего паяльника!), встала проблема локального охлаждения радиоэлектронных компонентов. В свою очередь, совершенствование технологий в электротехнике привело к созданию миниатюрных электродвигателей. В результате стало возможным появление крошечных вентиляторов. Сегодня серийно производятся вентиляторы, имеющие самые разные размеры, вплоть до малышек с размерами 15×15×6 мм (например, вентилятор AD1505LX-K90 фирмы JARO, USA), или 17×17×8 мм (GM0517PDV1-8 Sunon, Taiwan). Такие крохи вполне сравнимы с размерами охлаждаемых ими чипов. В большинстве случаев маленькие вентиляторы устанавливаются на радиаторы, примыкающие к поверхности проблемного компонента. В продажу они поступают либо в виде цельного, уже смонтированного в единый комплект устройства, получившего название «кулер», либо порознь — отдельно вентилятор, отдельно радиатор. (Кулер — от английского слова «cooler» — охладитель.) Сочетание общей вентиляции электронного устройства в целом с локальным обдувом воздухом отдельных наиболее разогретых его частей позволило более надежно и правильно отводить избыточное тепло из закрытых радиоэлектронных устройств.

Однако, газы, как известно, обладают крайне низкой теплоемкостью и теплопроводностью. По этим причинам в ряде случаев даже при сочетании обоих видов вентиляции не удается добиться приемлемой температуры кристаллов. Намного успешнее с задачей справляются жидкости, теплоемкость кото-

рых существенно выше. Система охлаждения при этом выглядит так: миниатюрный резервуар закрепляется на поверхности охлаждаемого чипа. (Он, кстати сказать, занимает меньше места, чем воздушный радиатор.) Через шланг, с помощью микропомпы, напоминающей бытовую аквариумный насосик, охлаждающая жидкость перекачивается в герметичный наружный радиатор. (На рис. 4 показан пример исполнения жидкостной системы с вертикальным внешним радиатором компании Zalman). Он, в свою очередь, может обдуваться струей воздуха от специального вентилятора. Эффективность такой системы заметно выше, чем у обычных вентиляционных систем.

Нужно сказать, что применение жидкостных охладителей в электронике — не такая уж экзотика. Их можно было и раньше встретить в составе РЭА. Жидкостная система охлаждения применялась, например, в мощных моделях ЭВМ, в частности в IBM 3081KX6 и в суперкомпьютерах Cray. В те времена жидкостной системе отводилась отдельная комната, и сантехник был важным сотрудником среди технического персонала, обслуживающего компьютер. Сегодня «хорошо забытое старое» решение вновь возвращается, причем в широко растиражированном виде. И вновь проникновение в электронику этой технологии начинается с компьютерной техники. Уже есть удачные примеры практического применения жидкостных систем для охлаждения процессоров серийных компьютеров (см. например, статью [4]). Сегодня стандартом для жидкостной системы являются не огромные шкафы с ревущими вентиляторами и не мощные электрические насосы, занимающие целую комнату, а миниатюрный центробежный насос (помпа), которого почти не слышно, маленький резервуар, монтируемый на поверхности процессора, тонкие шланги из прозрачной силиконовой резины и элегантный внешний радиатор с небольшим вентилятором. Все вместе занимает места не больше, чем настольный струйный принтер.

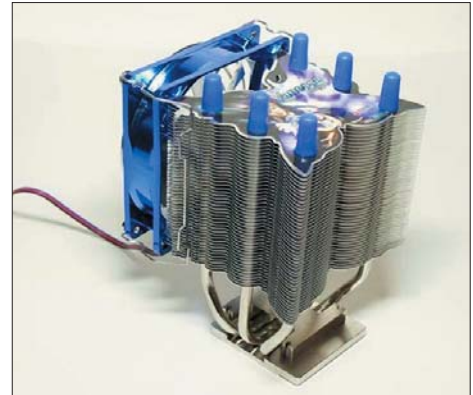
Благодаря совершенству применяемых компонентов системы, качеству используемых материалов и отлаженной технологии сборки уход за современной жидкостной системой охлаждения требуется не больший, чем за воздушными кулерами, то есть почти никакой. Но если все-таки вмешательство когда-либо потребуется, то оно, скорее всего,



**Рис. 4.** Жидкостная система охлаждения фирмы Zalman, установленная на серийном компьютере

сведется к замене микропомпы или вентилятора на внешнем радиаторе и не потребует никаких особых навыков, инструментов или знаний. Принимая во внимание все возрастающую мощность процессоров, меняющуюся пропорционально рабочей частоте, и сравнительно высокую эффективность жидкостных систем, можно ожидать дальнейшего роста внимания к этому типу охлаждения.

Особый тип жидкостной системы охлаждения — тепловые трубки. Как отдельный, самостоятельный тип, он не встречается. Тепловые трубки всегда входят в состав систем иного рода в качестве средства повышения эффективности теплопередачи. Трубка выполняется из материалов с высокой теплопроводностью и внешне не отличается от обычных медных трубок. Внутри она полая, а ее стенки покрыты пористым материалом, по которому жидкий теплоноситель стекает от радиатора к горячему концу. Нагреваясь, жидкость испаряется, поглощая тем самым тепло охлаждаемого компонента. Горячий пар по внутренней полости трубки свободно поднимается вверх, к радиатору, где, остывая, вновь превращается в жидкость, впитывается пористым материалом стенок и стекает к горячему концу. Для того чтобы обеспечить движение жидкости в трубке при любой ее ориентации в пространстве, нужно как-то преодолеть силу тяжести. Покрывая стенки пористым материалом с капиллярной структурой, удается достичь подъема жидкости даже против действия сил притяжения. Нет никаких насосов и помп. Тепло выносится из проблемного места по герметичной трубке, и при этом нет никакого шума и потребления энергии. Все бы было здорово, но малая дли-

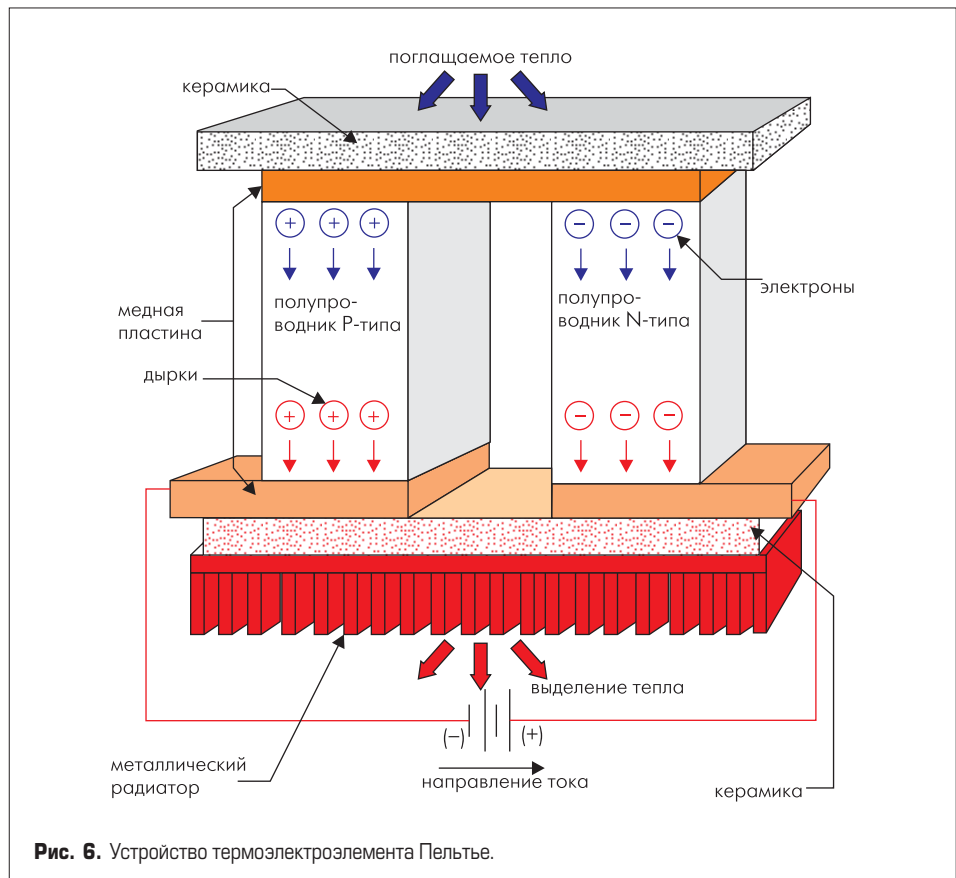


**Рис. 5.** Радиатор с тепловыми трубками (кулер Vanessa, компания Titan)

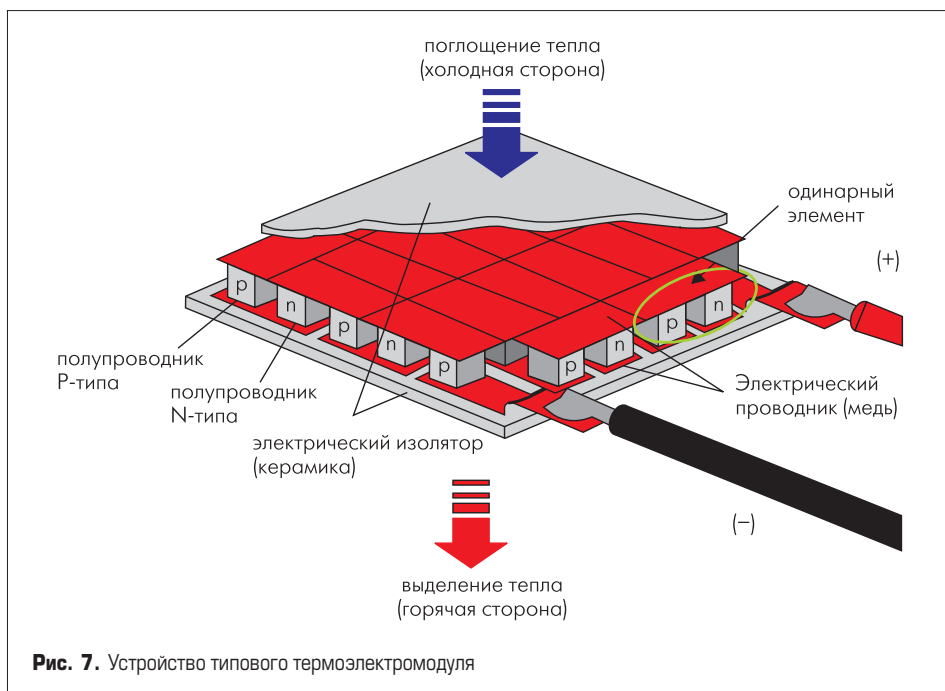
на трубок (максимум 30 см) сильно мешает широкому распространению данной технологии. Чаще всего тепловые трубки встраивают в радиаторы кулеров (рис. 5), что позволяет им более эффективно отводить тепло от разогретой поверхности. В результате удается немного повысить общую эффективность системы охлаждения при сокращении габаритов радиатора.

Еще одна современная технология охлаждения — применение термоэлектроохладителей, действие которых основано на эффекте Пельтье. Суть явления заключается в том, что при подаче постоянного тока в цепь, составленную из двух разнородных проводников, в местах контактов, в зависимости от направления тока, будет выделяться или поглощаться тепло. Количество теплоты зависит от свойств материалов и величины тока.

Изменение температуры проводников при протекании по ним электрического тока наблюдается при контакте различных пар мате-



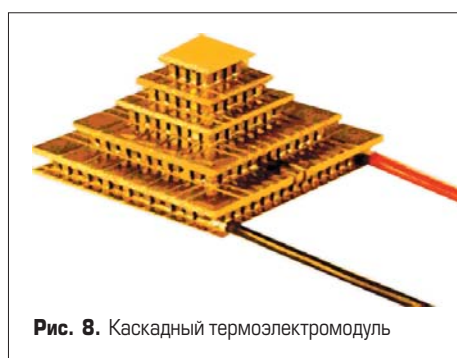
**Рис. 6.** Устройство термоэлектрoэлемента Пельтье.



риалов. В том числе и в металлах, но в них концентрация электронов проводимости велика и их энергия почти не зависит от температуры. В полупроводниках взаимосвязь энергии электронов и температуры проводника выражена более сильно. По этой причине, хотя явление было открыто французским ученым Пельтье в 1834 году, практическое применение эффект получил только в последние десятилетия. В полупроводнике электроны на примесных уровнях локализованы, а энергия электронов проводимости значительно выше уровня Ферми в металле. В термоэлементе, состоящем из дырочного и электронного полупроводников, термоЭДС складываются. Перейдя в металл из полупроводника, электроны проводимости отдают свою избыточную энергию. При этом выделяется теплота Пельтье. При противоположном направлении тока из металла в полупроводник могут перейти только те электроны, энергия которых выше дна зоны проводимости полупроводника. Тепловое равновесие в металле при этом нарушается и восстанавливается за счет тепловых колебаний кристаллической решетки. При этом поглощается теплота Пельтье.

Устройство полупроводникового термоэлектрического элемента приведено на рис. 6, а на рис. 7 изображен типовой модуль. Часто оказывается, что для надежного охлаждения детали вполне достаточно простого модуля. Но иногда для достижения большей эффективности теплоотвода модули каскадируются. В этом случае на горячую поверхность первого модуля устанавливается второй чуть большего размера. Иногда собирается целая пирамида модулей. С ее помощью можно достичь разницы ( $\Delta T$ ) температур в 70–75 °С при температуре окружающей среды 25 °С. Пример составного (каскадного) модуля приведен на рис. 8.

У этого метода охлаждения очень широкие перспективы, так как он лишен многих недостатков, присущих остальным способам. Но, пожалуй, главным достоинством



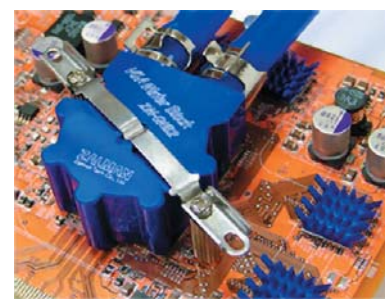
данной технологии является возможность применения термоэлектрических модулей не только для охлаждения, но и для стабилизации температуры объекта, так как модуль Пельтье одновременно может служить и охладителем и нагревателем. Достаточно лишь переключить полярность источника питания.

### Преимущества и недостатки различных методов

Как уже говорилось ранее, применение радиаторов с естественным охлаждением является наиболее дешевым и распространенным способом теплоотвода. Малые затраты и полное отсутствие шума в работе — главные достоинства этого подхода. Поскольку в радиаторе ничего не движется и никакая его часть не потребляет электрической энергии, то ломаться в нем нечему и дополнительной мощности в своей работе он не требует. Иными словами, надежность этого элемента очень высока, а энергозатрат нет вовсе. Это два важных плюса. Есть и еще одно преимущество — простота решения проблемы. Однако за эту простоту приходится расплачиваться громоздкими размерами аппаратуры, так как эффективность такого охлаждения невелика. Известно, что в условиях свободного конвекционного теплоотвода необходим радиатор с площадью поверхности примерно 25 см<sup>2</sup> на каждый ватт рассеиваемой мощности. Чтобы не увеличивать габариты,

но повысить эффективность теплоотвода, нужно увеличивать площадь охлаждаемой поверхности радиатора. Увеличение обычно достигается путем придания радиатору сложной формы, что увеличивает стоимость. К качеству поверхности радиатора предъявляются определенные требования: сторона, соприкасающаяся с полупроводниковым элементом, должна быть гладкой; она не должна иметь отклонений от плоскостности, так как только при этих условиях можно рассчитывать на хороший контакт между деталями. Изготовители радиаторов и электронных компонентов стараются выполнять эти требования. Тем не менее, несмотря на все старания, неровности и микропустоты в месте сопряжения деталей все-таки остаются. Если их не ликвидировать, то все они будут заполнены воздухом, который, являясь теплоизолятором, будет препятствовать нормальному теплообмену. Для того чтобы устранить воздух из зазоров и обеспечить низкое тепловое сопротивление, на поверхности соприкасающихся деталей наносит теплопроводящие пасты или приклеивают специальные теплопроводящие пленки. Те и другие довольно дороги. В общем, хотя данный способ охлаждения электронных компонентов и прост, но и в нем есть свои проблемы. Главная среди них — увеличение габаритов аппаратуры.

Достоинством жидкостной системы охлаждения является ее более высокая эффективность и относительно невысокая энергоемкость. В ряде случаев жидкостные системы просто незаменимы. Поясним это на примере: часто, особенно в условиях промышленного производства, в воздухе могут находиться пыль и влага. Прогонять вентиляторами такую загрязненную газовую среду через шкафы с электроникой с целью ее охлаждения просто опасно — рано или поздно на поверхностях компонентов образуется проводящая пленка, которая может привести к короткому замыканию в схеме. Вот тут жидкостные системы очень полезны, поскольку они позволяют достигать цели даже при герметично закрытом шкафу. Только шланги с жидким теплоносителем проникают в шкаф, выводя оттуда избыточное тепло, но запыленный или влажный воздух туда не проникает. На рис. 9 изображена печатная плата с резервуаром, закрепленным на мощном полупроводниковом элементе.





На рис. 10 показан внешний вид контроллера системы жидкостного охлаждения, поставленного на крышку плотно закрытого модуля PЭА. Впрочем, сказать, что это контроллер, будет не совсем верно. Устройство содержит в себе компактный выносной радиатор с воздушным охлаждением (позади блока видны шланги), тепловые датчики, схему измерения температуры, микропмпу, ЖК-индикаторы, отображающие состояние системы, источник питания и др. узлы. Как видно, вся конструкция в целом совсем не велика и примерно равна по габаритам небольшому принтеру. Известно, что фактором, определяющим интенсивность теплообмена, является не объем жидкости в охлаждающем резервуаре, а скорость потока теплоносителя и режим его движения. При достаточно высокой скорости движения жидкости и обеспечении турбулентности потока отпадает нужда в громоздких радиаторах-теплообменниках (как внешних, так и внутренних), а усиленная конвекционная теплопередача, обеспечиваемая встроенным осевым или радиальным вентилятором, улучшает теплообмен с окружающей средой. Так что компактные размеры — это ни в коей мере не ухудшение, а скорее оптимизация его параметров.

Высокая эффективность при умеренных габаритах и возможность охлаждения герметичных устройств — важные преимущества присущи подобным системам. Неудобств, связанных с этим способом охлаждения, тоже достаточно. Они вызваны, прежде всего, опасностью протечек. Ведь малейшая утечка охлаждающей жидкости способна привести к полному выходу из строя всей аппаратуры. Что же касается требований, предъявляемых к поверхности охлаждающего резервуара, то они ничуть не отличаются от тех, которые предъявляются к поверхностям пассивных радиаторов. Резервуар должен также плотно прилегать к охлаждаемому процессору или транзистору, как и обычный радиатор, то есть он должен быть идеально ровным и плоским. Если принимать во внимание только объем резервуара, то можно считать, что жидкостная система имеет очень маленькие размеры для столь эффективного охлаждения. Но если учитывать габариты выносного радиатора, где остывает жидкий теплоноситель, то окажется, что суммарный объем системы не так уж и мал. Микронасос — элемент системы, потребляющий электроэнергию, который тоже, кстати, требует места — это движущаяся конструкция системы. Изве-

стно, что все, что движется, крутится, трется — все рано или поздно изнашивается. Присутствие двух движущихся деталей (насос и вентилятор) в составе электронной аппаратуры резко снижает ее надежность и, кроме того, повышает ее шумность.

Очень надежны и абсолютно бесшумны термоэлектрорхладители, действие которых основано на эффекте Пельтье. Продолжительность их безотказной работы превышает 200 тысяч часов. (Для сравнения: средняя продолжительность работы обычного вентиляционного кулера составляет 50 000 часов). Термоэлектрорхладители имеют маленькие габариты, что позволяет делать аппаратуру компактной. К тому же эти устройства могут использоваться не только для охлаждения, но и для нагрева, то есть для стабилизации температуры на заданном диапазоне. Никакие другие системы охлаждения такими качествами не обладают. Да и габариты у всех остальных систем больше, а надежность меньше. Что же касается экономической стороны дела, то стоимость наиболее популярных термоэлектромодулей сравнима со стоимостью вентиляторов наиболее известных фирм.

На этой технологии стоит остановиться подробнее, поскольку она очень перспективна и ее применение по мере совершенствования будет расширяться. Правда, произойдет это, вероятно, еще не завтра, так как, к сожалению, есть еще много нерешенных проблем. Одна из них — сравнительно малая эффективность работы. В данной области техники есть понятие — коэффициент холодильной мощности (КХМ). КХМ — это отношение холодильной мощности модуля к электрической энергии, потребляемой модулем. Он характеризует экономичность протекающих процессов. (Очень похоже на своеобразный коэффициент полезного действия.) У элементов Пельтье этот коэффициент в 2–3 раза меньше по сравнению с широко используемыми и в промышленности и в быту компрессионными холодильниками. Относительно низкий КХМ на практике означает, что для получения большой разницы температур между окружающей средой и охлаждаемым объектом нужны большие затраты энергии. Иначе говоря, высокое потребление — наиболее существенный недостаток термоэлектромодулей. (Попутный вывод: экономичные бытовые холодильники на основе элементов Пельтье — техника отдаленного будущего, а не сегодняшнего дня.)

В соответствии с законом Джоуля-Ленца, тепло выделяется в любом проводнике при протекании по нему электрического тока, а рассеиваемая мощность определяется соотношением

$$P = R \times I^2.$$

Из-за высокого токопотребления модули сами являются источником тепла. Ток, поступающий в термоэлектрорхладители, зависит от размеров модуля и желаемой разницы температур, но в любом случае он срав-

нительно большой — в диапазоне от единиц до десятков ампер (то есть для работы модулей термоэлектрорхладителей необходим мощный источник питания). Вспомним, что у пассивных радиаторных систем охлаждения нет никакой потребляемой мощности. У жидкостных систем суммарный ток потребления для насоса и внешнего вентилятора не превышает 0,3 А при напряжении питания 5–12 В. Потребляемая мощность вентиляционных охладителей лежит в интервале от десятых долей до единиц ватта (типичными являются величины 0,5 Вт у маленьких изделий и приблизительно 2 Вт у крупных (92×92×25) образцов). Термоэлектрорхладители Пельтье потребляют десятки ватт! Так, например, рассеиваемая мощность для модуля размером 40×40×4 мм (без вентилятора) может достигать 85 Вт. Правда, разница температур ( $\Delta T$ ) между холодной и горячей стороной модуля может превышать 60 °С при температуре окружающей среды 25 °С. Такой степени охлаждения ни одно другое сравнимое по габаритам устройство обеспечить не может!

Есть у термоэлектромодулей еще одна проблема — необходимость охлаждения внешней, горячей стороны модуля. Только в этом случае можно добиться хорошей разницы температур. Достигается это тем, что на бесшумный, высоконадежный и малогабаритный полупроводниковый модуль устанавливается большой радиатор и шумный вентилятор, с появлением которых некоторые преимущества, присущие данному методу охлаждения, сразу исчезают. Появляются движущиеся детали, а вместе с ними падает надежность системы. Увеличиваются общие габариты. Конечно, если высокая степень охлаждения не требуется, то можно попробовать отказаться от вентилятора и обойтись установкой на горячую сторону модуля обычного радиатора. Шумность такого комбинированного устройства останется нулевой, но габариты катастрофически увеличатся и большой разницы температур достичь не удастся.

Необходимо отметить, что если не требуется очень сильное охлаждение компонента, то не требуются и большие затраты энергии. При работе в диапазоне малых изменений температуры применение термоэлектрических модулей Пельтье становится энергетически выгодным. Если требуется, например, поддерживать температуру на заданном уровне внутри небольшого объема хорошо термоизолированной камеры, то элементам Пельтье эта работа вполне по силам, и они могут конкурировать с традиционными компрессионными холодильниками. Учитывая малые размеры и соответственно низкий вес модулей Пельтье, а также принимая во внимание их безразличное отношение к положению в пространстве, можно делать на их основе малогабаритные переносные термокамеры. Собственно, именно это и делается уже много лет. Термокамеры применяются, например, для переноса трансплантируемых органов из одного медицинского центра в другой. Компрессионный холодильник для

Таблица 1. Компании-производители устройств и систем охлаждения РЭА

Компания	Адрес сайта	Тип производимой продукции
AAWID Thermalloy (USA)	<a href="http://www.aavidthermalloy.com">http://www.aavidthermalloy.com</a>	Жидкостные охладители и любые радиаторы
Лигра (Россия)	<a href="http://www.ligra.narod.ru">http://www.ligra.narod.ru</a>	Радиаторы игольчатые и пластинчатые
Протон-электротекс (Россия)	<a href="http://www.eletex.ru">http://www.eletex.ru</a>	Радиаторы игольчатые и пластинчатые
Summit heat sinks metal co. (Тайвань)	<a href="http://www.heat-sink.com.tw">http://www.heat-sink.com.tw</a>	Радиаторы игольчатые и пластинчатые
Alutronic (Германия)	<a href="http://www.alutronic.de">http://www.alutronic.de</a>	Радиаторы игольчатые и пластинчатые, корпуса для РЭА
ThermaFlo (USA)	<a href="http://www.thermaflo.com">http://www.thermaflo.com</a>	Радиаторы всех типов
Melcor (USA)	<a href="http://www.melcor.com">http://www.melcor.com</a>	Модули Пельтье, контроллеры и источники питания к ним, вентиляторы, кондиционеры и системы на базе кулеров Пельтье
Marlow Inc. (USA)	<a href="http://www.marlow.com">http://www.marlow.com</a>	Модули Пельтье, контроллеры и источники питания к ним, системы на базе кулеров Пельтье
FerroTec (USA)	<a href="http://www.ferrotec.com">http://www.ferrotec.com</a>	Модули Пельтье, контроллеры и источники питания к ним
Fandis (Italia)	<a href="http://www.fandis-tm.com">http://www.fandis-tm.com</a>	Модули Пельтье, контроллеры и источники питания к ним, вентиляторы, кондиционеры
Komatsu Electronics (Japan)	<a href="http://www.komatsu-electronics.co.jp">http://www.komatsu-electronics.co.jp</a>	Модули Пельтье, контроллеры и источники питания к ним, системы на базе кулеров Пельтье
Криотерм (Россия)	<a href="http://www.kryotherm.ru">http://www.kryotherm.ru</a>	Модули Пельтье, контроллеры и источники питания к ним, переносные термокамеры, кондиционеры для охлаждения РЭА
Остерм (Россия)	<a href="http://www.osterm.ru">http://www.osterm.ru</a>	Модули Пельтье, контроллеры к ним, носимые термостабилизированные холодильные камеры, автомобильные бытовые холодильники
PMT (Россия)	<a href="http://www.rmltd.ru">http://www.rmltd.ru</a>	Модули Пельтье, контроллеры к ним, системы для научно-исследовательских задач
Evercool (Тайвань)	<a href="http://www.evercool.com.tw">http://www.evercool.com.tw</a>	Вентиляторы, кулеры, жидкостные системы
Titan (Тайвань)	<a href="http://www.titan-cd.com">http://www.titan-cd.com</a>	Вентиляторы, кулеры, жидкостные системы, источники питания
Zalman (Корея)	<a href="http://www.zalman.co.kr">http://www.zalman.co.kr</a>	Вентиляторы, кулеры, жидкостные системы, источники питания, контроллеры кулеров
Sunon (Тайвань)	<a href="http://www.sunon.com.tw">http://www.sunon.com.tw</a>	Вентиляторы, кулеры, электродвигатели
Thermaltake(Тайвань)	<a href="http://www.thermaltake.com">http://www.thermaltake.com</a>	Вентиляторы, кулеры, жидкостные системы, источники питания
Molex (USA)	<a href="http://www.molex.com">http://www.molex.com</a>	Вентиляторы, радиаторы, кулеры, жидкостные системы
Delta (Тайвань)	<a href="http://www.delta.com.tw">http://www.delta.com.tw</a>	Вентиляторы, кулеры, радиаторы, электродвигатели,
EBM-Papst (USA)	<a href="http://www.ebmpapst.com">http://www.ebmpapst.com</a>	Вентиляторы, электродвигатели, кондиционеры, радиаторы
AMETEK (USA)	<a href="http://www.ametek.com">http://www.ametek.com</a>	Вентиляторы, контроллеры, электродвигатели
NMB (Panasonic Japan)	<a href="http://www.nmbtech.com">http://www.nmbtech.com</a>	Вентиляторы, миниатюрные подшипники, электродвигатели

такой задачи неприменим — он имеет большие габариты, не желает работать при вибрациях и тряске и требует определенной ориентации в пространстве.

Вообще же с сильным охлаждением РЭА нужно быть осторожным, так как избыточно низкая температура ей на пользу не идет. Компьютерный процессор, например, при чрезмерном охлаждении может перестать работать вовсе или может резко снизить производительность. К тому же сильное охлаждение вызывает конденсацию влаги на охлаждаемых деталях, а это может повлечь за собой короткое замыкание и полное разрушение всей аппаратуры. Не стоит думать, что появление конденсата возможно только тогда, когда температура охлаждаемого компонента снижается очень сильно, почти до 0 °С. В действительности, момент появления влаги зависит от температуры окружающей среды и относительной влажности воздуха. Роса может образоваться, например, при охлаждении элемента до 18 °С, если окружающая температура равна 25 °С, а относительная влажность воздуха превышает 70%. В Петербурге летом такая обстановка — обычное явление.

В проводниках, выполненных из различных материалов, наблюдается не только эффект Пельтье, но и другие термоэлектрические явления. Наиболее известным является эффект Зеебека, проявляющийся в генерации термо-ЭДС, величина которой пропорциональна температуре. Это явление давно используется в технике для измерения температур при помощи термопар. Модуль Пельтье также является своего рода термопарой, но генерируемая им мощность имеет столь заметную величину, что модуль даже может служить источником питания.

Подводя итоги, можно сказать, что, несмотря на ряд проблем, связанных с использованием модулей Пельтье в качестве элементов системы охлаждения, они, вероятно, будут все активнее внедряться в современную технику, так как только они имеют способность быть одновременно охладителями, нагревателями и одновременно еще и датчиками температуры. Модули безразличны к пространственной ориентации и высоконадежны. К тому же они не шумят и имеют очень малые размеры. Именно они имеют наименьшие габариты среди всех устройств, способных обеспечить хорошее охлаждение электронных компонентов. В ряде случаев, особенно в медицине, в аэрокосмической технике и в экспериментальной ядерной физике (для охлаждения детекторов излучений), а также в военных областях, где перечисленные качества особенно важны, термоэлектромодули применяются уже давно. В индустрии также есть примеры успешного применения данной методики охлаждения, но пока они немногочисленны, единичны.

Интерес к технологии растет во всем мире. Читатель может получить более подробную информацию по данной теме либо на сайтах лидирующих фирм-производителей, либо из доступных источников в Интернете, например, в работе [5] (некоторые из наиболее успешных производителей различных систем охлаждения перечислены в таблице).

Вероятно, широкое применение модулей Пельтье — дело не слишком отдаленного будущего, но пока самым популярным методом охлаждения радиоэлектронной аппаратуры являются системы на базе различных типов вентиляторов. Причины такой популярности — сравнительно низкая стоимость вентиляционных систем, а также их малая

потребляемая мощность при достаточной эффективности и надежности.

*Продолжение следует*

## Литература

1. Гончаров А. Практика применения конверторных модулей класса DC-DC // Электронные компоненты. 1999. № 3.
2. Колпаков А. Особенности теплового расчета импульсных силовых каскадов // Компоненты и технологии. 2002. № 1.
3. Криницин В. Ликбез по системам охлаждения. Занятие первое и последующие // <http://www.ixbt.com/cpu-coolers-inquestion-august2k2.shtml>.
4. Криницин В. Система водяного охлаждения Infinipro AquaCool // <http://www.ixbt.com/cpu/infinipro-aquacool.shtml>
5. Полупроводниковые кулеры Пельтье // <http://www.hardline.ru/selfteachers/Info/OS/Adjustment%20and%20optimization%20of%20a%20computer/Glava%2017/Index4.htm>
6. Материалы сайта из раздела «Технические статьи» компании EBM-Papst <http://ebm.com/Product/techarticles.htm>
7. Каталог «Compact Fans for AC and DC» 2005 г. компании EBM-Papst
8. <http://www.jarol.com/catalog.asp>
9. Валентинова М. Компьютерные системы: с тепловым режимом все «О'кей!» // Электроника, НТБ. 2001. № 1.
10. <http://www.titan-cd.com>
11. <http://www.zalman.co.kr>
12. <http://www.sunon.com.tw>
13. <http://www.melcor.com>
14. <http://www.osterm.ru>
15. <http://www.kryotherm.ru>