

Как выбрать охладитель

В статье приведены теоретические основы тепловой схемы электронных компонентов с воздушным охлаждением, описаны типовые технологии изготовления воздушных охладителей и даны практические рекомендации по их выбору.

Seri Lee
Перевод:
Александр Савельев

asavelyev@west-l.ru

Увеличение теплового рассеяния силовых полупроводниковых модулей при одновременном уменьшении их габаритных размеров приводит к тому, что тепловой расчет изделия становится все более и более важным элементом конструирования. Два свойства — надежность и ожидаемый ресурс работы электронного оборудования — обратно пропорциональны температуре компонентов, входящих в систему. Зависимость между надежностью и рабочей температурой обычного кремниевого полупроводникового прибора показывает, что уменьшение температуры соответствует экспоненциальному увеличению его надежности и ресурса работы. Таким образом, длительное время работы и высокая надежность компонента может быть достигнута за счет эффективного сохранения его рабочей температуры в пределах, установленных разработчиками конструкции изделия.

Охладитель — это устройство, которое улучшает теплоотдачу от горячей поверхности (обычно это корпус силового модуля) к более холодной окружающей среде — воздуху. В дальнейшем, воздух — это окружающая (охлаждающая) среда. В большинстве случаев тепло передается через контакт между твердой поверхностью компонента и охлаждающим воздухом, что является большой проблемой для отвода тепла. Применение теплоотвода значительно уменьшает барьер для передачи тепла путем увеличения площади поверхности, имеющей прямой контакт с охлаждающей средой. Это дает возможность отвести большее количество тепла или уменьшить рабочую температуру устройства. Основная цель применения охладителя — поддерживать температуру компонента ниже максимально допустимого предела, предусмотренного производителем.

Тепловая схема

Перед обсуждением процесса выбора охладителя необходимо дать определение общим терминам и установить концепцию тепловой схемы. Это необходимо для того, чтобы объяснить базовые понятия теплопередачи для тех читателей, которые не знакомы с данным предметом. Условные обозначения и определения представлены ниже.

Q : полная мощность или интенсивность теплового рассеяния (Вт). Определяет интенсивность теплового рассеяния электронного компонента в работе. Для задачи выбора охладителя используется максимальная мощность рассеяния.

T_j : максимальная температура кристалла электронного компонента (°C). Приемлемый диапазон значений T_j лежит в пределах от 115 °C (в типовых случаях) и для некоторых устройств может превышать

180 °C. В специальных и военных применениях данная температура не превышает 65–80 °C.

T_c : температура корпуса компонента (°C). Поскольку эта температура зависит от места измерения, необходимо определить температуру наиболее горячей точки корпуса.

T_s : температура охладителя (°C). Максимальная температура охладителя в месте, приближенном к компоненту.

T_a : температура окружающего воздуха (°C).

Используя эти температуры и уровень теплового рассеяния, количественно эффективность теплопередачи через две нагреваемые зоны можем описать величиной теплового сопротивления R , выраженно как:

$$R = \Delta T / Q, \quad (1)$$

где ΔT есть разница температур между двумя зонами нагрева. Величина теплового сопротивления выражается в °C/Вт, что показывает увеличение температуры на единицу интенсивности теплового рассеяния. Тепловое сопротивление аналогично электрическому сопротивлению ΔR , рассчитываемому по закону Ома:

$$R = \Delta V / I, \quad (2)$$

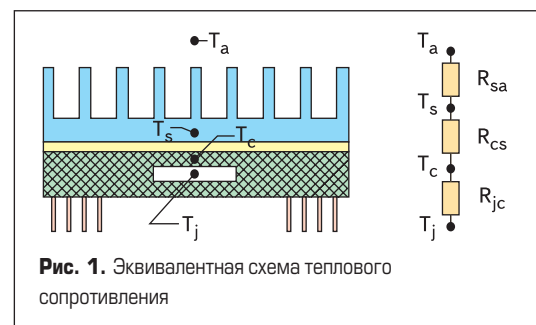
где ΔV — разность потенциалов, а I — ток.

Рассмотрим простой случай, где охладитель установлен на корпус компонента, как показано на рис. 1. Используя концепцию теплового сопротивления, простейшую тепловую схему данной системы можно изобразить, как показано на рис. 1.

В этой модели тепловой поток движется от p - n -перехода к корпусу, затем через место соединения к охладителю, где и рассеивается в окружающую среду.

Тепловое сопротивление между переходом и корпусом компонента описывается следующим образом:

$$R_{jc} = \Delta T_{jc} / Q = (T_j - T_c) / Q. \quad (3)$$



Это сопротивление определяется технологией изготовления электронного компонента и приводится как справочная (постоянная) величина для данного компонента.

Точно так же тепловое сопротивление «корпус–охладитель» и «охладитель–окружающая среда» описываются как:

$$R_{cs} = \Delta T_{cs} / Q = (T_c - T_s) / Q, \quad (4)$$

$$R_{sa} = \Delta T_{sa} / Q = (T_s - T_a) / Q. \quad (5)$$

Здесь R_{cs} — тепловое сопротивление «корпус–охладитель», часто называемое переходным сопротивлением. (Эта величина зависит от качества соприкасающихся поверхностей и теплопроводящего материала контакта.) R_{ca} — тепловое сопротивление охладителя.

Таким образом, полное переходное сопротивление «кристалл — окружающая среда» описывается как сумма сопротивлений всех трех переходных зон:

$$R_{ja} = R_{jc} + R_{cs} + R_{sa} = (T_j - T_a) / Q. \quad (6)$$

Допустимое тепловое сопротивление охладителя

Чтобы выбрать охладитель, сначала определим величину теплового сопротивления охладителя, удовлетворяющего тепловому критерию компонента. Путем несложного преобразования предыдущего уравнения тепловое сопротивление охладителя можно записать так:

$$R_{sa} = (T_j - T_a) / Q - R_{jc} - R_{cs}. \quad (7)$$

В этом выражении T_j , Q и R_{jc} определяются изготовителем компонента, а T_a и R_{cs} — параметры, определяемые пользователем.

Температура окружающего воздуха T_a для охлаждения электронного оборудования зависит от рабочих условий эксплуатации, в которых предполагается использовать компонент. Обычно этот диапазон находится в пределах 35–45 °С, если изделие находится на открытом воздухе, и от 50 до 60 °С, если компонент работает в закрытом пространстве или находится в потоке воздуха от какого-либо другого нагревающегося устройства.

Переходное сопротивление R_{cs} зависит от чистоты поверхности охладителя, его геометрических параметров (неплоскостность), усилия монтажа, площади контакта и, конечно, типа теплопроводящего материала (пасты) и его толщины. Определение величины этого сопротивления — задача довольно трудная, т.к. оно зависит от усилия монтажа и других случайных параметров. Однако более достоверные данные могут быть напрямую получены от производителя материала или от производителя охладителя. Типичные величины для самых распространенных теплопроводящих материалов приведены в таблице 1.

Таким образом, величина теплового сопротивления выбираемого охладителя должна быть равна или меньше величины R_{sa} , чтобы температура установленного кристалла не превышала заданную производителем величину T_j .

Таблица 1. Температурные свойства теплопроводящих материалов

Материал	Удельная тепловая проводимость, Вт/дюйм °С	Толщина, дюйм	Удельное тепловое сопротивление перехода, дюйм °С /Вт
Ther-O-Link	0,010	0,002	0,19
Высококачественный Теплопроводящий компаунд	0,030	0,002	0,07
Con-Dux	0,030	0,005	0,17
A-Dux	0,008	0,004	0,48
1070 Ther-A-Grip	0,014	0,006	0,43
1050 Ther-A-Grip	0,009	0,005	0,57
1080 Ther-A-Grip	0,010	0,002	0,21
1081 Ther-A-Grip	0,019	0,005	0,26
A-Pli 220@20psi	0,074	0,020	0,27
1897 In-Sil-8	0,010	0,008	0,81
1898 In-Sil-8	0,008	0,006	0,78

Выбор охладителя

При выборе охладителя, удовлетворяющего требуемым критериям, необходимо исследовать переменные параметры, которые описывают не только свойства самого охладителя, но и характеристики окружающей его системы. Выбор специфического типа охладителя зависит в основном от его тепловых параметров и условий окружающей среды. Наиболее важно то, что у любого охладителя никогда не может быть единственной величины теплового сопротивления, так как тепловое сопротивление изменяется с внешними условиями окружающей среды.

Выбирая охладитель, необходимо классифицировать воздушный поток, как:

- естественная конвекция;
- режим принудительного силового потока;
- смешанный поток.

Естественная конвекция происходит, когда нет внешних, индуцированных потоков и тепло передается исключительно свободным потоком воздуха, окружающим охладитель. Силовой поток имеет место, когда поток воздуха генерируется механическим устройством, обычно вентилятором. Нет строгого различия между двумя последними потоками. Как правило, считается, что смешанный поток определяется скоростью потока в пределах 1–2 м/с или 200–400 л/мин. Все что выше — силовой поток.

Следующий шаг — определение требуемого объема охладителя. В таблице 2 приведен приблизительный диапазон объемного теплового сопротивления для различных воздушных потоков.

Объем охладителя для конкретного типа конвекции может быть получен путем деления величины объемного теплового сопротивления на рекомендуемое тепловое сопротивление охладителя. Цифры в таблице 2 служат лишь для прикидочных расчетов на первой стадии выбора размера охладителя. Действительные величины сопротивлений могут отличаться большим разбросом, поскольку зависят от многих других факторов, таких как: реальные размеры охладителя, тип охладителя, вида конвекции, ориентации охладителя по отношению к потоку воздуха, чистоты поверхности охладителя, высоты над уровнем моря и т. д.

Принимая во внимание данные таблицы 2, предполагаем, что конструкция охладителя

Таблица 2. Диапазон объемных тепловых сопротивлений

Скорость воздушного потока, м/с	Объемное тепловое сопротивление, см ³ ·°С/Вт
Естественная конвекция	500–800
1,0	150–250
2,5	80–150
5,0	50–80

оптимизирована для этого типа воздушного потока. Несмотря на то, что многие параметры охладителя довольно просто оптимизируются, существует целый ряд критических параметров, существенно влияющих на свойства охлаждающей системы. Один из таких параметров — плотность ребрения охладителя. В охладителях с плоскими ребрами интервал между ними строго зависит от двух величин: скорости потока и длины ребра в направлении потока. Таблицу 3 можно применить для приблизительной оценки оптимального шага ребра для таких охладителей в типовых применениях.

Охлаждающая способность типового охладителя пропорциональна его ширине в направлении, перпендикулярном потоку воздуха, и примерно пропорциональна площади основания охладителя в направлении, параллельном потоку. Например, увеличение по ширине охладителя в два раза приведет к увеличению теплового рассеяния в два раза, тогда как увеличение длины охладителя в два раза приведет к увеличению теплового рассеяния только в 1,4 раза. Таким образом, если возможно, предпочтительнее идти по пути увеличения ширины охладителя, чем его длины. Также эффект передачи тепла весьма важен и в условиях естественной конвекции, так как она отвечает более чем за 25% общего теплового рассеяния. Кроме того, для усиления теплообмена поверхность охладителя необходимо анодировать.

Таблица 3. Зависимость шага ребра от его длины и интенсивности потока

Воздушный поток, м/сек (л/мин)	Длина ребра, мм (дюйм)			
	75 (-3,0)	150 (6,0)	225 (9,0)	300 (12,0)
Естественная конвекция	6,5 (0,25)	7,5 (0,30)	10 (0,38)	13 (0,50)
1,0 (200)	4,0 (0,15)	5,0 (0,20)	6,0 (0,24)	7,0 (0,27)
2,5 (500)	2,5 (0,10)	3,3 (0,13)	4,0 (0,16)	5,0 (0,20)
5,0 (1000)	2,0 (0,08)	2,5 (0,10)	3,0 (0,12)	3,5 (0,14)

Типы охладителей

Все охладители могут быть классифицированы по способу изготовления и форме ребер. Основные типы охладителей для силовых применений изготавливаются с использованием самых современных технологий.

- 1. Штамповка.** Медным или алюминиевым листам металла придается нужная форма при помощи штамповки. Такие охладители традиционно используются для охлаждения маломощных электронных компонентов, имеют низкую цену и невысокую эффективность. Используется там, где не требуется минимизировать габариты конечного изделия, а отработанная и сравнительно простая технология изготовления таких охладителей позволяет достичь высоких показателей производительности, что существенно снижает цену как самого охладителя, так и всего изделия.
- 2. Экструзионная технология.** Такая технология дает возможность очень точно сформировать требуемую форму ребра охладителя и обеспечить тем самым высокую эффективность теплового рассеяния. Охладитель изготавливается одним куском заданной ширины (т. н. рельс) и оторцовывается на необходимую для заказчика длину. При этом форма ребра делается зазубренной, что улучшает свойства охладителя примерно на 10–20%. Однако данная технология накладывает определенные ограничения на геометрию ребра и требует более тщательного подхода к разработке конфигурации охладителя. Типовое соотношение высоты ребра к шагу ребра при толщине ребра 1,3 мм и стандартной экструзии, как правило, не превышает 6. Можно достичь и соотношения 10 при толщине ребра 0,8 мм, однако точность изготовления при этом ухудшится.
- 3. Впрессованные или клеенные ребра.** У большинства воздушных охладителей внешние тепловые характеристики можно значительно улучшить, если увеличить зону поверхности охлаждения. Такие охладители используют технологию термоэпоксидного соединения ребра с углублением на базовом основании. Данный процесс позволяет существенно увеличить соотношение высоты ребра к шагу ребра до 20–40, тем самым заметно повысив теплоотдачу охладителя без увеличения объема изделия.
- 4. Изогнутые ребра.** Гофрированные листы металла (алюминиевые или медные), из которых изготавливаются ребра охладителя, увеличивают площадь внешней охлаждающей поверхности, благодаря чему увеличивается объем охладителя. Такие ребра затем присоединяются к основанию охладителя или непосредственно на охлаждающую поверхность при помощи пайки твердыми припоями. Такая технология не годится для высокопрофильных охладителей по причине неэффективности ребра. Однако такие охладители можно использовать в приложениях, где непрактично или невозможно использование технологий, описанных в пп. 2 и 3.

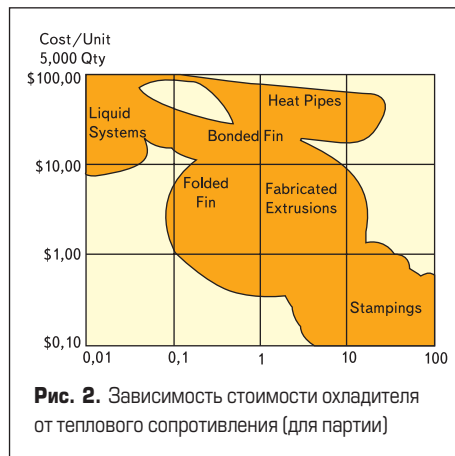


Рис. 2. Зависимость стоимости охладителя от теплового сопротивления (для партии)

Рис. 2 показывает типовую зависимость стоимости разных типов охладителей при требуемом тепловом сопротивлении.

Свойства различных типов охладителей зависят от воздушного потока, проходящего через охладитель. Определить количественно эффективность различных типов охладителей можно по формуле для коэффициента полезного действия (КПД) теплового потока:

$$\eta = Q / (\dot{m}c\Delta\bar{T}_{sa}), \quad (8)$$

где \dot{m} — масса потока воздуха, проходящего через охладитель, c — теплоемкость воздуха, $\Delta\bar{T}_{sa}$ — усредненная разница между температурами охладителя и окружающего воздуха.

Величины КПД теплового потока, измеренные для различных типов охладителей, приведены в таблице 4.

Таблица 4. Диапазон КПД тепловых потоков для различных типов охладителей

Тип охладителя (технология изготовления)	КПД, %
Штампованные и плоские	10–18
Ребристое литье	15–22
Охладители с принудительной конвекцией	25–32
Экструзионные	45–58
Впрессованные ребра	78–90

Видна и другая закономерность: чем выше КПД охладителя, тем выше и его стоимость.

График тепловых характеристик

Типовые характеристики вышеописанных охладителей показаны на рис. 3. При этом предполагается, что охлаждаемый компонент должным образом смонтирован на охладителе, а сам охладитель правильно ориентирован: ребра размещены параллельно направлению конвекции. Кривая (а) показывает зависимость превышения температуры охладителя ΔT_{sa} от интенсивности теплового рассеяния Q для естественной конвекции. Кривая (а) также предполагает, что охладитель анодирован. Кривая (б) показывает зависимость теплового сопротивления R_{ca} от скорости потока воздуха для принудительного охлаждения. В режиме принудительного потока ΔT_{sa} прямо пропорциональна Q , следовательно, R_{ca} не зависит от Q и является функцией только скорости потока. Напротив, явление естественной конвекции есть функция нелинейная, при которой непременно ΔT_{sa} зависит от Q .

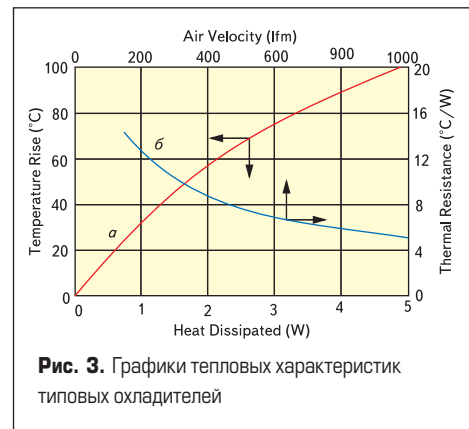


Рис. 3. Графики тепловых характеристик типовых охладителей

Можно использовать данные графики, чтобы выбрать подходящий охладитель, а для приложений с принудительной вентиляцией определить минимальную скорость потока, которая бы удовлетворяла температурным требованиям. Если требуемое температурное сопротивление в случае принудительного охлаждения составляет, например, 8 °C/Вт, по кривой (б) получаем величину скорости потока 470 л/мин (2,4 м/с). Для естественной конвекции требуемое тепловое сопротивление R_{ca} , помноженное на Q , даст максимальное возможное ΔT_{sa} при том же самом Q .

Кривая естественной конвекции предполагает оптимальную ориентацию охладителя по отношению к горизонтальной поверхности. Кроме того, скорость потока для кривой принудительной конвекции предполагает приблизительную величину без учета потерь на эффект байпаса. Существуют теоретические исследования эффекта байпаса, на основании которых можно считать, что характеристики охладителей могут ухудшиться вплоть до 50% при одинаковой скорости противотока [2, 3].

Когда размеры компонента существенно меньше, чем основание охладителя, необходимо учитывать при расчетах добавленное тепловое сопротивление, называемое объемным (распределенным) тепловым сопротивлением. Графики (а) и (б) предполагают, что тепло равномерно распределяется по всему основанию охладителя (то есть объемное тепловое сопротивление не учитывается). Такое объемное тепловое сопротивление может составлять от 5 до 30% общего теплового сопротивления охладителя. Количественная оценка объемного теплового сопротивления в простых аналитических выражениях дана в работе [4].

Другой конструктивный критерий, который необходимо учитывать при выборе охладителя, — это высота над уровнем моря. В отличие от температуры воздуха внутри помещения, которая обычно стабильна, управляема и не находится под влиянием изменения высоты над уровнем моря, давление воздуха в том же помещении зависит от этого параметра. Так, многие электронные системы, установленные существенно выше уровня моря, требуют снижения электрической нагрузки на охладитель, главным образом вследствие уменьшения плотности воздуха на больших высотах.

Таблица 5 показывает зависимость коэффициента уменьшения мощности (κ_w) для

Таблица 5. Коэффициент снижения мощности в зависимости от высоты над уровнем моря

Высота над уровнем моря H_c , м	Коэффициент снижения мощности κ_w
0 (уровень моря)	1,00
1000	0,95
1500	0,90
2000	0,86
3000	0,80
3500	0,75

типовых охладителей для разной высоты над уровнем моря (H_c). Например, чтобы определить реальные тепловые свойства охладителя, который будет работать на определенной высоте над уровнем моря, величину теплового сопротивления, полученную из графиков на рис. 3, необходимо разделить на κ_w .

Литература

1. Aavid Engineering, Inc. EDS #117. Interface Materials. Jan 1992.
2. Wirtz R. A., Chen W., Zhou R. Effect of Flow Bypass on the Performance of Longitudinal Fin Heat Sinks // ASME Journal of Electronic Packaging. Vol. 116. 1994.
3. Lee S.. Optimum Design and selection of Heat Sinks. Proceedings of 1th IEEE Semi-Therm Symposium. 1995.
4. Song S., Lee S., Au V. Closed Form Equation for Thermal Constriction/Spreading Resistances with Variable Resistance Boundary condition. Proceedings of the 1994 IEPS Technical Conference. 1994.