

Продолжение. Начало в № 3'2012

# Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения

## Часть 2

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

### Характеристики охлаждающих жидкостей

Чаще всего в системах жидкостного охлаждения используется водно-гликолевая смесь (антифриз), реже — деионизированная вода или изоляционное масло (фторуглероды и PAO — синтетические углеводороды). Жидкость может циркулировать в замкнутых контурах с воздушными теплообменниками или удалиться во внешнюю среду в проточных системах. В первом случае, как правило, применяется деионизированная вода, отличающаяся низкой электропроводностью. Чистая вода обладает проводящими свойствами, однако при использовании модулей в изолированных корпусах этим в большинстве случаев можно пренебречь. При охлаждении неизолированных силовых ключей в состав контура должен включаться деионизатор, необходимый для исключения паразитных токов утечки.

При выборе типа жидкости следует учитывать ее совместимость с материалами контура охлаждения и минимизировать риск возникновения коррозии. С этой целью для алюминиевых радиаторов SEMIKRON рекомендует использовать смесь с содержанием гликоля не менее 10%. В документации про-

изводителей антифризов можно встретить и более высокий процент, что позволяет избежать снижения концентрации ингибиторов коррозии для цветных металлов, которые часто используются в каналах охлаждения.

При нагреве охлаждающей жидкости свыше +60 °C рекомендуется использование замкнутых контуров, при этом степень жесткости воды не должна превышать 6. Приведенные ниже пояснения и таблицы взяты из документации компании Lytron Inc. В частности, в таблице 5 приведены рекомендации относительно совместимости металлов и жидкостей в системах охлаждения.

### Вода

Вода является самой эффективной охлаждающей жидкостью благодаря высокой теплоемкости ( $c_p = 4,187$  кДж/(кг·К)), однако при неблагоприятном химическом составе ее применение может стать причиной образования ржавчины. Коррозия вызывается, например, хлоридами или сульфитами, поэтому водопроводную воду не следует использовать в системах охлаждения при их концентрации, превышающей 25 промилле. Лимитируется также наличие в жидкости кальция и магния (их концентрация не должна превышать 50 ppm), поскольку оба минерала создают известковые отложения на поверхности металла, что ухудшает эффективность работы радиаторов (рис. 16).

### Деионизированная вода

В ней отсутствуют ионы натрия, кальция, железа, меди, а также хлориды и бромиды, кроме того, в процессе деионизации удаляются минералы, соли и другие коррозионно-активные примеси. По сравнению с большинством других жидкостей, деионизированная вода имеет очень высокое электрическое сопротивление и является отличным изолятором. Однако она быстро теряет эти свойства при контакте с воздухом, поскольку при этом происходит растворение углекислоты, и уровень кислотности pH повышается примерно до 5,0. В некоторых случаях в деионизированную воду добавляются антикоррозионные присадки, а конечные элементы радиаторов покрываются никелем. В подобных системах охлаждения исключено использование медных штуцеров, чаще всего они изготавливаются из нержавеющей стали.

Таблица 5. Совместимость металлов и охлаждающих жидкостей

	Вода	Гликолевая смесь	Деионизированная вода	Непроводящие жидкости (фторуглероды, PAO)
Медь	•	•		•
Алюминий		•		•
Нержавеющая сталь	•	•	•	•

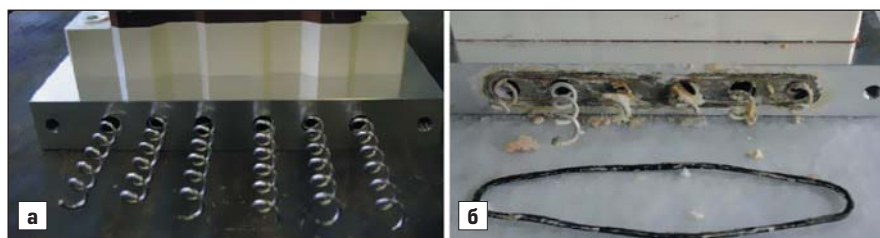


Рис. 16. Внешний вид каналов охлаждения и спиральных турбулизаторов: а) в новом радиаторе модуля SKiiP; б) после его длительного использования с водопроводной водой (известковые отложения)

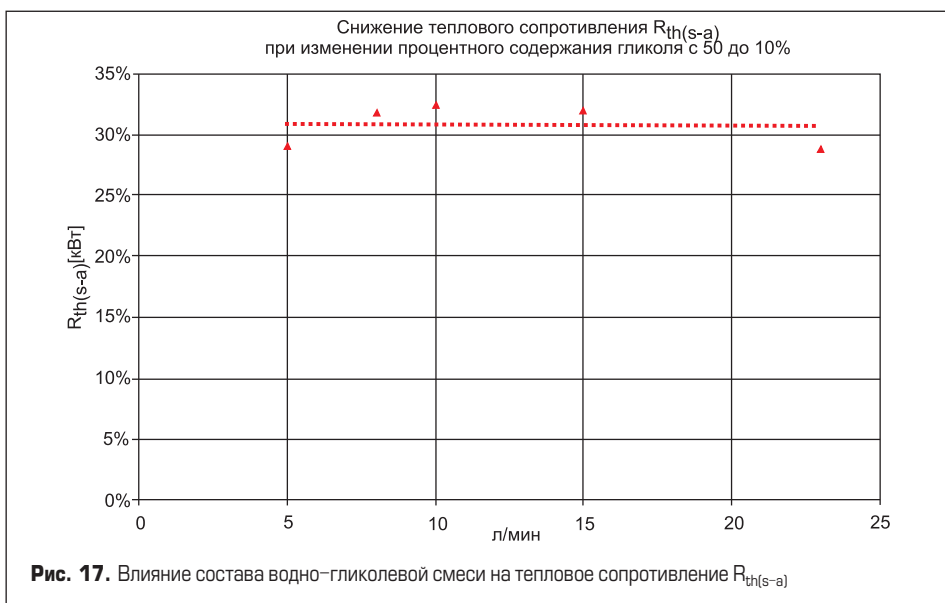


Рис. 17. Влияние состава водно-гликолевой смеси на тепловое сопротивление  $R_{th(s-a)}$

**Гликолевые и водные растворы**

Опасность возникновения коррозии, а также требование морозостойкости исключает возможность применения чистой воды в системах охлаждения. В этом случае, как правило, используются этилен-гликолевые (EWG) или пропилен-гликолевые (PWG) смеси. Этиленгликоль имеет высокую точку кипения, низкую температуру замерзания, хорошую стабильность характеристик, а также большую удельную теплоемкость и теплопроводность. Ему свойственна низкая вязкость, способствующая циркуляции жидкости в каналах радиатора. Пропилен-гликоль используется в высокотоксичных применениях. Гликолевые растворы могут содержать антикоррозионные присадки.

Автомобильные гликолевые смеси (тосолы) не годятся для применения в системах жидкостного охлаждения или теплообменниках, поскольку они содержат ингибиторы коррозии на силикатной основе. Эти добавки могут переходить в твердое состояние и создавать отложения на поверхностях теплообменников, снижая эффективность их работы.

Добавление гликоля снижает способность к сохранению тепла на 3,4 кДж/(кг·К) при соотношении 50÷50% и температуре +40 °С. Вязкость, удельный вес охлаждающей жидкости и, соответственно, тепловое сопротивление растут вместе с процентным содержанием гликоля. Добавка 10% увеличивает  $R_{th(s-a)}$  примерно на 15%, при 50% прирост сопротивления составляет 50–60%, а при 90% значение  $R_{th(s-a)}$  удваивается (рис. 17).

**Влияние конструкции на тепловые характеристики**

При разработке конструкции системы охлаждения необходимо исключить возможность образования воздушных пузырей, препятствующих нормальной циркуляции жидкости. С этой точки зрения оптимальным является вертикальное расположение каналов, а худшим — горизонтальное (один над

другим), поскольку в верхней части пузыри могут накапливаться (рис. 18).

Самым предпочтительным считается вариант вертикальной конструкции, при котором входной штуцер находится в нижней, а вы-

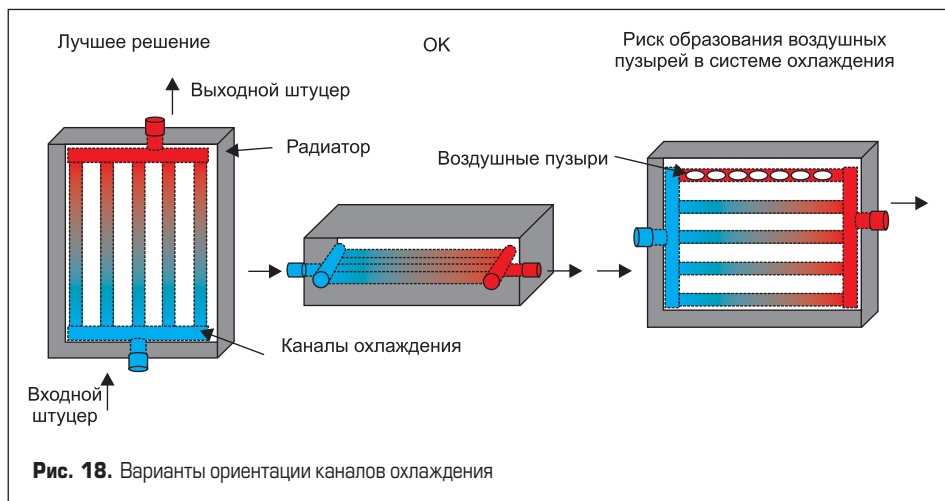


Рис. 18. Варианты ориентации каналов охлаждения

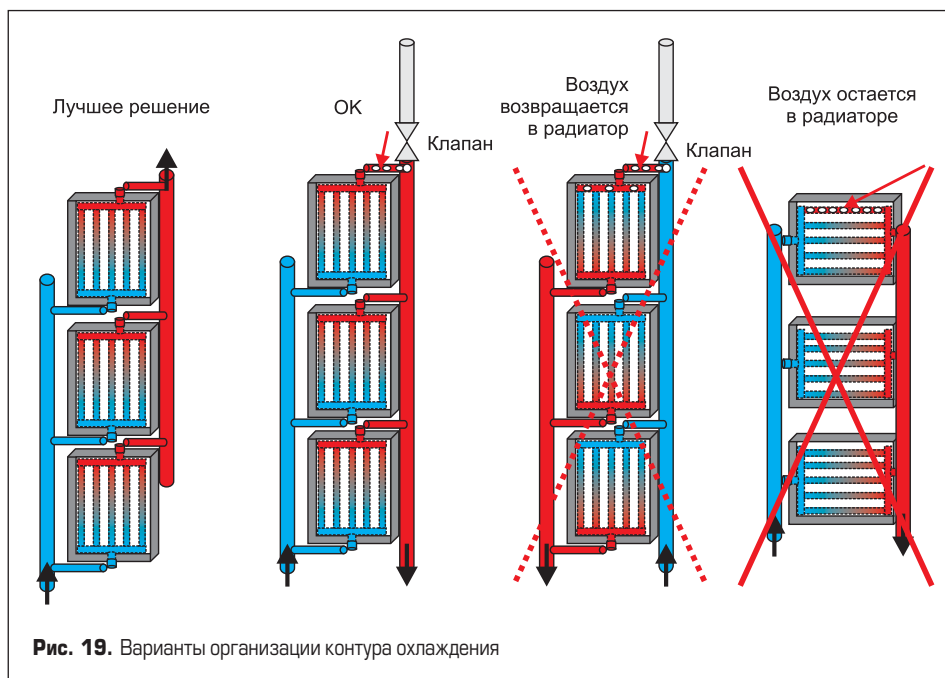


Рис. 19. Варианты организации контура охлаждения

ходной — в верхней точке сборки (рис. 19). Наличие петлевых контуров протекания жидкости (вверх и вниз) является нежелательным. В этом случае в системе охлаждения могут понадобиться дренажные клапаны, располагаемые над силовыми модулями. После заполнения системы жидкостью необходимо провести ее испытания при максимально возможном объемном расходе в течение достаточно длительного периода времени (не менее 0,5 ч) без подключения к электрической сети. Подобный тест помогает выявить возможные места утечки и устранить воздух, который может проникнуть в контур при его заполнении.

При проектировании параллельной схемы охлаждения следует обеспечить равенство перепадов давления в параллельных каналах (одинаковое количество и длина радиаторов, каналов, изменений направления жидкости т.д.). Важна также инерция жидкости в направлении ее движения: этот параметр отвечает за прямооточность потока, даже если одинаковые параллельные каналы прерываются в боковой части системы. Для подачи воды в ветвящиеся каналы должны быть использованы направляющие экраны, лопатки и т. д.

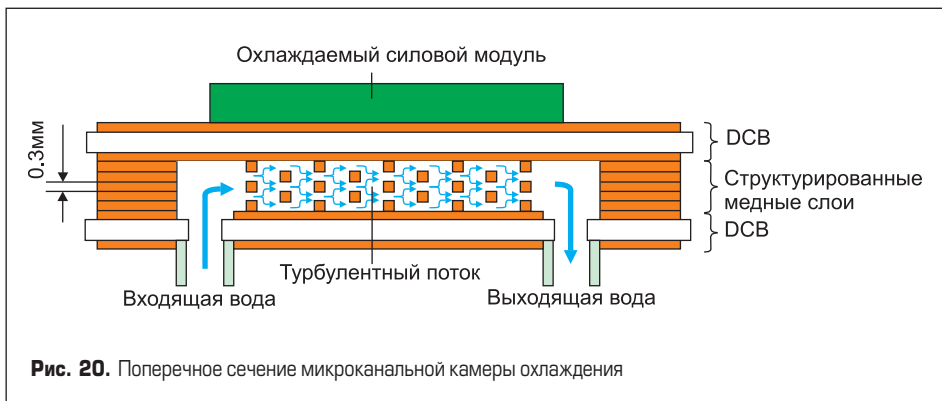


Рис. 20. Поперечное сечение микроканальной камеры охлаждения

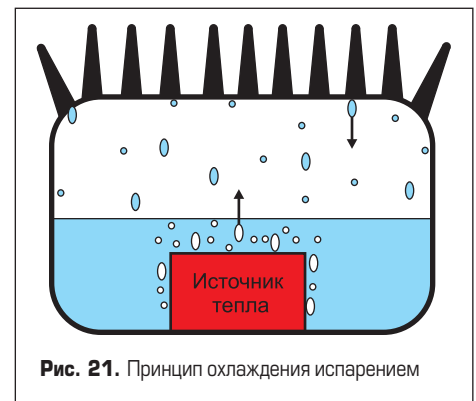


Рис. 21. Принцип охлаждения испарением

**«Экзотические» системы охлаждения**

**Микроканальное охлаждение**

Микроканальное охлаждение является одним из вариантов жидкостного (рис. 20). В процессе диффузионного напыления меди на керамику (Direct Bonded Copper, DBC) микроканалы образуются с помощью нескольких медных пленок, размещаемых между двумя DBC-слоями. Эти пленки перфорируются таким образом, чтобы отверстия были смещены одно напротив другого. В керамической подложке на нижнем слое DBC делаются отверстия для подвода и отвода воды. Благодаря смещению отверстий в перфорированных медных пленках в жидкости создаются турбулентные потоки даже при низкой скорости ее движения, что обеспечивает хорошую передачу тепла от силового элемента к жидкости. Таким образом достигается высокий охлаждающий эффект при малом перепаде давления и низком расходе воды. Недостатком описанного метода является риск загрязнения микроканалов или большой перепад температуры по поверхности модуля вследствие недостатка жидкости.

**Охлаждение испарением**

Охлаждение на фазовом переходе использует тот факт, что для испарения жидкости, то есть превращения жидкого теплоносителя в газообразное состояние, требуется определенное количество тепла (теплота испарения). Если газ конденсируется, то данное количество тепла затем будет рассеяно снова. При

организации цикла испарения и конденсации в замкнутом контуре существует возможность переноса большого количества тепла из точки испарения в точку конденсации. Сила тяжести и капиллярные силы способны поддерживать этот процесс без применения насосов.

В случае охлаждения испарением жидкость испаряется в наиболее нагретой точке (например силового модуля), газовые пузыри поднимаются и конденсируются на холодной стороне изолированного конденсатора (рис. 21).

*Примечание:* если плотность теплового потока очень высока, на источнике образуется тонкий слой пара. Он способен прервать тепловой контакт между ним и жидкостью, в результате чего процесс охлаждения может неожиданно остановиться (т.н. явление Лейденфроста).

**Охлаждение орошением**

Охлаждение орошением (струйное) осуществляется посредством разбрызгивания жидкого охладителя (в виде аэрозоля или струи) на нагретую поверхность (например кристалла, рис. 22). В какой-то степени при этом используется и теплота испарения, такое охлаждение может быть односторонним и двусторонним. Теплоноситель, в качестве которого, как правило, используются инертные жидкости, такие как фторированный углеводород, испаряется в нагретой области и конденсируется в холодной. Вода непригодна для отвода тепла от чипов, так как наличие электропроводности способно вызвать замыкание их краевых областей. Наибольшее преимущество описанный метод имеет при

прямом охлаждении кристаллов, поскольку в этом случае жидкость воздействует на непосредственный источник тепла и теплообмен происходит очень быстро. К недостаткам способа следует отнести ограниченное количество испаряемого фторированным углеводородом тепла, сложность оборудования, высокое давление в системе охлаждения (3–15 бар) и риск засорения сопла (его диаметр около 0,1 мм). Проблемой является также плотная упаковка выводов чипов, препятствующая распространению аэрозоля по охлаждаемой поверхности.

**Охлаждение базовых плат**

Непосредственное охлаждение базовой платы позволяет устранить тепловые переходы слоя терморасты и радиатора благодаря прямому контакту базовой платы с охлаждающей жидкостью. Это позволяет снизить величину сопротивления  $R_{th(j-a)}$  на 25%, хотя очевидно, что для реализации метода требуется тщательная герметизация соединения по контуру корпуса элемента. Данный метод отвода тепла планируется использовать в новейшем, пятом поколении модулей SKiiP.

Эффективность охлаждения может быть повышена при использовании специальных структурированных базовых плат, например имеющих ребристую или игольчатую поверхность, погруженную в жидкость. Существует также вариант компании Danfoss, названный ShowerPower, при котором в полость под модулем вставляется пластиковая рама, содержащая большое количество параллельных щелевых отверстий (рис. 23). Они создают турбулентность жидкости, кроме того, в них образуются вертикальные потоки, способствующие эффективному и равномерному

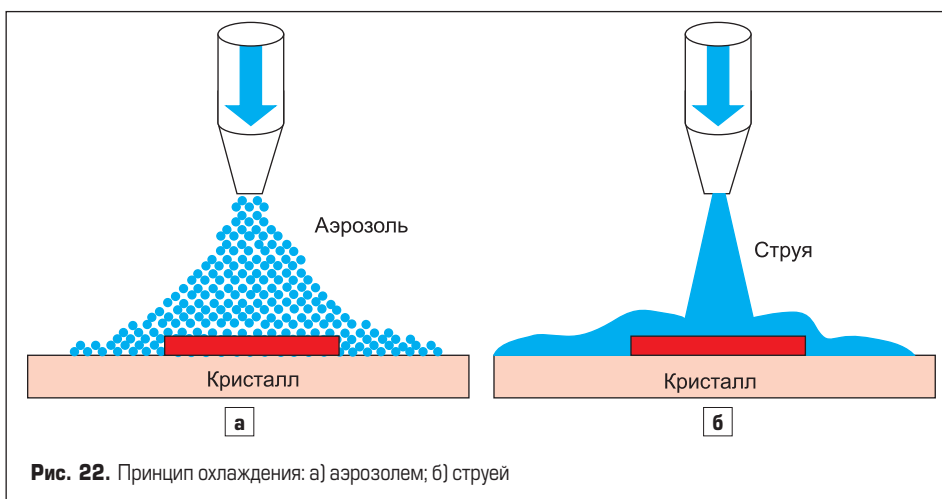
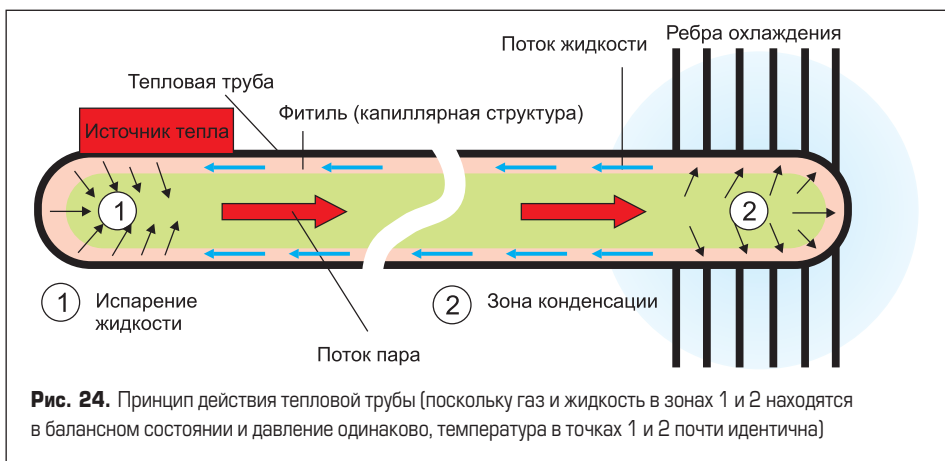


Рис. 22. Принцип охлаждения: а) аэрозолем; б) струей



Рис. 23. Радиатор ShowerPower, обеспечивающий прямой контакт с охлаждающей жидкостью



охлаждению. Преимуществом такого решения является возможность отвода тепла от стандартных модулей, недостатком — меньшая контактная поверхность и высокий перепад давления.

**Тепловые трубы**

Необходимость в тепловых трубах возникает в тех случаях, когда невозможно использовать жидкостное (по технологическим причинам) и принудительное воздушное (например в условиях очень грязных сред) охлаждение. При натуральной конвекции увеличение площади радиатора целесообразно только до пределов, определяемых тепловой инерцией. Применение труб позволяет многократно увеличить эффективность охлаждения. Их основные преимущества:

- экстремально высокая теплопередающая способность (в 100 раз больше, чем у меди) при меньшем весе и температурном градиенте;
- отсутствие движущихся механических частей и необходимости обслуживания;
- возможность изготовления труб любой формы.

Тепловые трубы используются для транспортировки тепла от источника до удаленного приемника, в котором оно рассеивается с помощью радиатора или теплообменника. Трубы могут встраиваться в охлаждающий профиль, многократно повышая эффектив-

ность его работы и снижая, соответственно, сопротивление  $R_{th(s-a)}$ .

Классическая тепловая труба (рис. 24) представляет собой вытянутый в длину герметичный тонкостенный металлический (медный) сосуд, внутренние стенки которого выложены капиллярно-пористым материалом, так называемым фитилем. Фитиль имеет малую толщину и пропитан рабочей жидкостью, а внутренний объем трубы (паровой канал) заполнен паром этой жидкости при пониженном давлении.

Если один конец тепловой трубы подключить к источнику с температурой  $T_1$ , а другой — к приемнику с температурой  $T_2$  ( $T_2 < T_1$ ), при этом будет происходить интенсивный теплообмен. Пар переносит тепло к радиатору, где происходит конденсация, после чего жидкость возвращается обратно за счет капиллярного эффекта, обусловленного структурой фитиля. Как правило, он изготавливается из металлического порошка или углеродного волокна. Существует несколько вариантов конструкции:

- спеченная порошковая структура (наивысший охлаждающий эффект);
- увеличенная площадь внутренней поверхности трубы (слабый капиллярный эффект);
- сетчатая или ячеистая структура (используется чаще всего).

Эффективность работы тепловой трубы зависит от ее положения. Например, при спеченной капиллярной структуре фитиля перемещение жидкости может происходить только за счет гравитации (испарение в верхней части, конденсация в нижней).

Тип теплоносителя зависит от диапазона рабочих температур, который ограничен снизу точкой замерзания, а сверху — критической температурой, при которой пропадает различие между жидким и газообразным состоянием вещества. Чаще всего в качестве теплоносителя используется вода (при положительных температурах), а также ацетон, спирт, аммиак, фторированный углеводород.

**Охлаждение сложных конструкций**

Отвод тепла от нескольких объединенных радиаторов, особенно в системах высокой мощности, приводит к повышению перепада давления и снижению интенсивности охлаждения. При анализе подобных систем необходимо учитывать прогрев воздуха (жидкости) по мере прохождения вдоль охлаждаемой конструкции. Подобная ситуация рассмотрена на примере популярного семейства приводных блоков SEMIKUBE компании SEMIKRON, два варианта исполнения которых (горизонтальный и вертикальный) показаны на рис. 25.

Для анализа подобных ситуаций существует два метода:

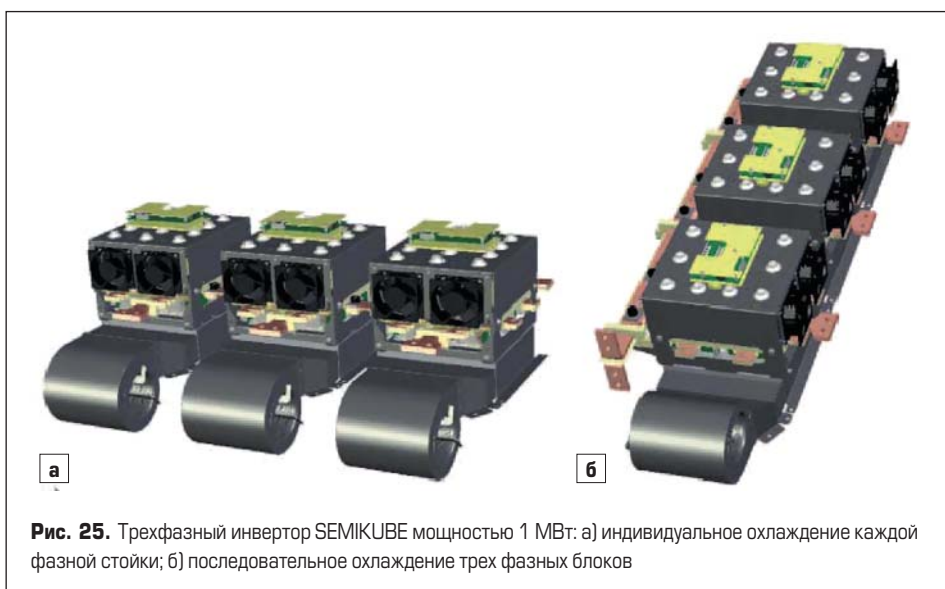
- определение теплового импеданса  $Z_{th(a-a')}$  между контрольными точками на радиаторах 1, 2, 3... n;
- расчет прогрева воздуха (жидкости) по мере его прохождения: температура воздуха на выходе модуля 1 считается входящей для модуля 2 и т. д.

**Расчет дополнительного теплового импеданса**

Температура перегрева определяется на основании суммарной величины мощности рассеяния  $P_{tot(n)}$  n-го источника тепла, а также статического значения теплового сопротивления  $R_{th(a-a')}$  или динамического теплового импеданса  $Z_{th(a-a')}$  между двумя находящимися рядом радиаторами (рис. 25б). Очевидно, что в процессе работы каждый последующий по ходу потока охлаждения радиатор становится «горячее» предыдущего, поэтому необходимо определить разницу температур теплоотводов при известной величине  $P_{tot}$ . Разделение общего перепада температуры между источниками тепла позволяет в результате найти значение  $Z_{th(a-a')}$ . В большинстве случаев первая часть импеданса может быть отобрана с помощью одного эквивалентного элемента  $R/\tau$ , как показано в следующем выражении:

$$Z_{th(s-a)1} = \sum_{v=1}^n R_v \left( 1 - e^{-\frac{-t}{\tau_{mv}}} \right).$$

Для нахождения второго компонента необходимо добавить дополнительный элемент,





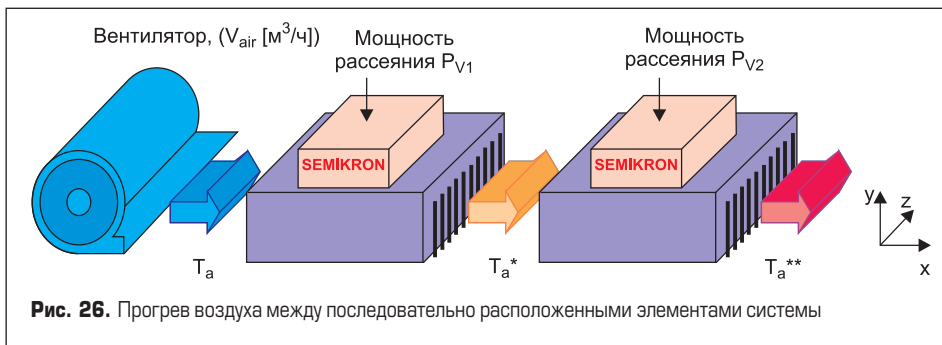


Рис. 26. Прогрев воздуха между последовательно расположенными элементами системы

отображающий градиент температуры между радиатором 1 (а) и 2 (а\*). Уровень перегрева зависит от потерь мощности компонента 1, поэтому потери учитываются с помощью весовых коэффициентов. Если они одинаковы для всех источников тепла, то для компонента 2 используется следующая формула:

$$Z_{th(s-a)2} = \sum_{v=1}^4 R_v \left( 1 - e^{-\frac{-t}{\tau_{thv}}} \right) + \frac{P_{tot1}}{P_{tot2}} \times R_{th(a-a^*)} \times \left( 1 - e^{-\frac{-t}{\tau_{th(a-a^*)}}} \right).$$

Аналогично вычисляются третий и все остальные элементы эквивалентной схемы:

$$Z_{th(s-a)3} = \sum_{v=1}^4 R_v \left( 1 - e^{-\frac{-t}{\tau_{thv}}} \right) + \frac{P_{tot1} + P_{tot2}}{P_{tot3}} \times R_{th(a-a^*)} \times \left( 1 - e^{-\frac{-t}{\tau_{th(a-a^*)}}} \right).$$

**Расчет температуры перегрева при воздушном охлаждении**

Идея метода заключается в использовании известных базовых уравнений для расчета перегрева и повторного перерасчета входящей температуры для n-го элемента (рис. 26). Простота и корректность таких вычислений обусловлена высокой способностью охлаждающей среды к сохранению тепла даже при наличии перекрестных тепловых связей. Удельный вес и теплоемкость охладителя являются термозависимыми параметрами, поэтому для расчета перегрева необходимо определить тепловой коэффициент.

Основная формула выглядит следующим образом:

$$T_a^* = T_a + \left( \frac{1}{C_p \times \rho} + TC_c \times T_a \right) \times \frac{P_{tot1}}{V_{air}},$$

где  $C_p$  — удельная теплоемкость воздуха (кДж/(кг·К));  $\rho$  — плотность воздуха (кг/м³);  $TC_c$  — температурный коэффициент удельной теплоемкости;  $T_a$  — температура охлаждающего воздуха для второго источника тепла;  $P_{tot1}$  — мощность рассеяния источника 1.

Адаптируя выражение к среднему атмосферному давлению (1 бар) и базовой температуре (0 °C) и преобразуя его для заданной интенсивности охлаждения (м³/ч), получим следующий результат:

$$T_a^* = T_a + \left( \frac{3,6}{1,006 \times 1,275} + 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \times T_a \right) \times \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{м}^3}{\text{Вт} \cdot \text{ч}} \times \frac{P_{tot1}}{V_{air}} \times K_{ing},$$

где  $P_{tot1}$  — мощность рассеяния источника 1 (Вт);  $V_{air}$  — объемный расход воздуха через поверхность радиатора (м³/ч);  $K_{ing}$  — коэффициент коррекции, учитывающий неравно-

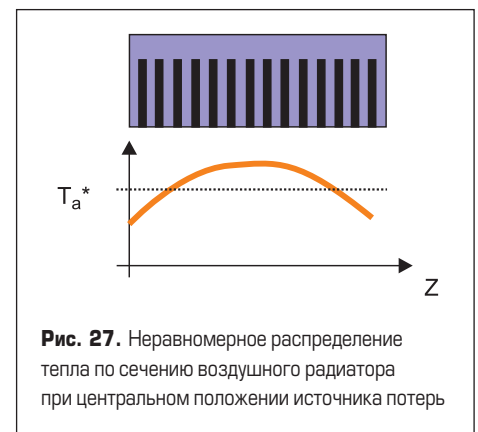


Рис. 27. Неравномерное распределение тепла по сечению воздушного радиатора при центральном положении источника потерь

мерное распределение тепла. Как правило, используется значение  $K_{ing} = 1 \dots 1,25$ , позволяющее определить среднюю температуру по сечению радиатора (рис. 27, 28).

**Расчет температуры перегрева при жидкостном охлаждении**

При жидкостном охлаждении последовательно расположенных радиаторов можно использовать такие же базовые уравнения, однако в этом случае следует учесть динамическое изменение вязкости среды в зависимости от температуры (рис. 29). Принимая во внима-

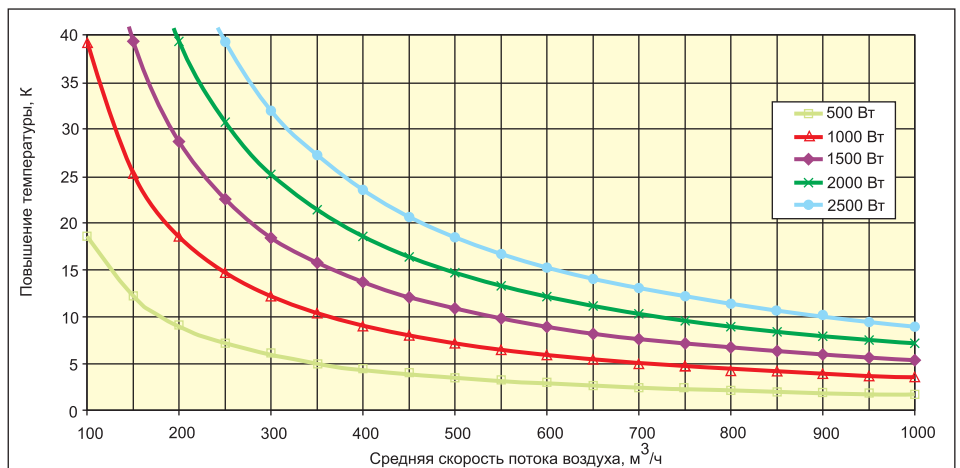


Рис. 28. Разница температур «входящего» и «выходящего» воздуха в зависимости от скорости потока охлаждения и рассеиваемой мощности ( $T_a = +40 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

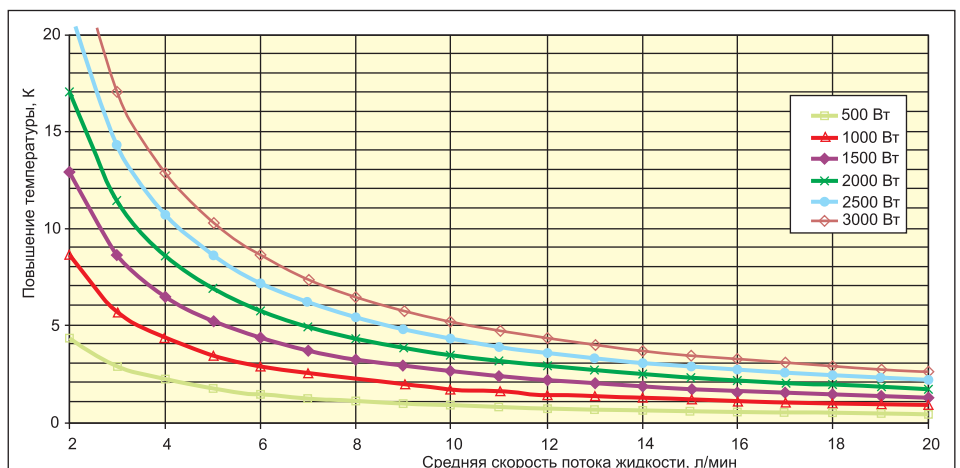
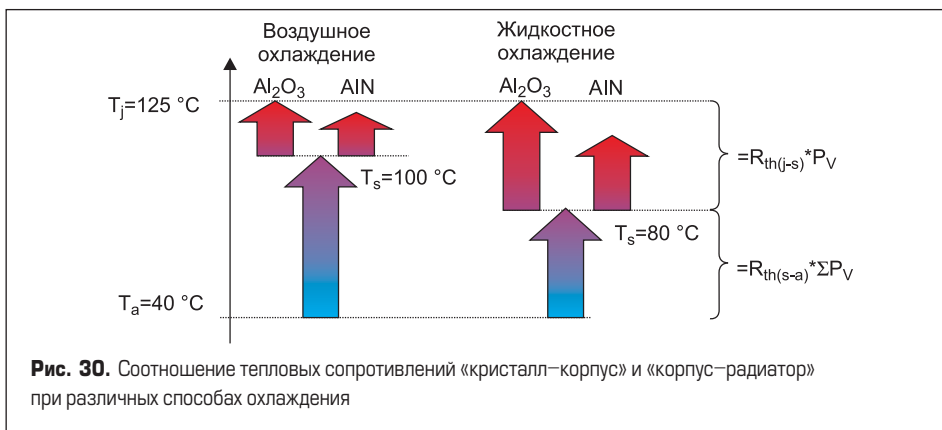


Рис. 29. Разница температур «входящей» и «выходящей» жидкости в зависимости от скорости потока охлаждения и рассеиваемой мощности ( $T_a = +25 \text{ } ^\circ\text{C}$ , водно-гликолевая смесь 50:50)



ние характеристики водно-гликолевой смеси (50÷50) и преобразуя приведенное выше выражение для заданной интенсивности охлаждения (л/мин), получим следующий результат:

$$T_a^* = T_a + (0,0174 - 0,000013^\circ\text{C}^{-1} \times T_a) \times \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{л}}{\text{Вт} \cdot \text{мин}} \times \frac{P_{\text{tot1}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}}$$

При охлаждении чистой водой меняется удельная теплоемкость и температурный коэффициент:

$$T_a^* = T_a + (0,0133 - 0,000008^\circ\text{C}^{-1} \times T_a) \times \frac{^\circ\text{C} \cdot \text{л}}{\text{Вт} \cdot \text{мин}} \times \frac{P_{\text{tot1}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}}$$

**Тепловое сопротивление при воздушном и жидкостном охлаждении**

В ряде случаев, особенно при расчете системы охлаждения для применений высокой мощности, встает вопрос о выборе между жидкостным и воздушным охлаждением и о выборе материала керамической подложки силового модуля (как правило, это оксид алюминия Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> или нитрид алюминия AlN). Отметим, что у некоторых модулей (например SKiIP) предусмотрены оба типа радиаторов и оба типа керамики, причем тепловые модели всех версий включены в базу данных программы SEMISEL.

Как показано на рис. 30, способ отвода тепла может влиять на выбор материала изолирующей подложки модуля. В режиме воздушного охлаждения основная часть теплового сопротивления приходится на составляющую R<sub>th(s-a)</sub> «тепlostок–окружающая среда». В этом случае, как видно из рисунка, переход на более дорогой нитрид алюминия дает небольшой выигрыш. Ситуация полностью меняется при использовании жидкостного охлаждения, когда вклад сопротивления R<sub>th(j-s)</sub> «кристалл–тепlostок» становится намного больше. В этом случае применение нитрида алюминия позволяет существенно уменьшить температуру кристаллов T<sub>j</sub>.

**Заключение**

Проблема эффективного отвода тепла является одной из самых важных при проектировании преобразовательных устройств, особенно

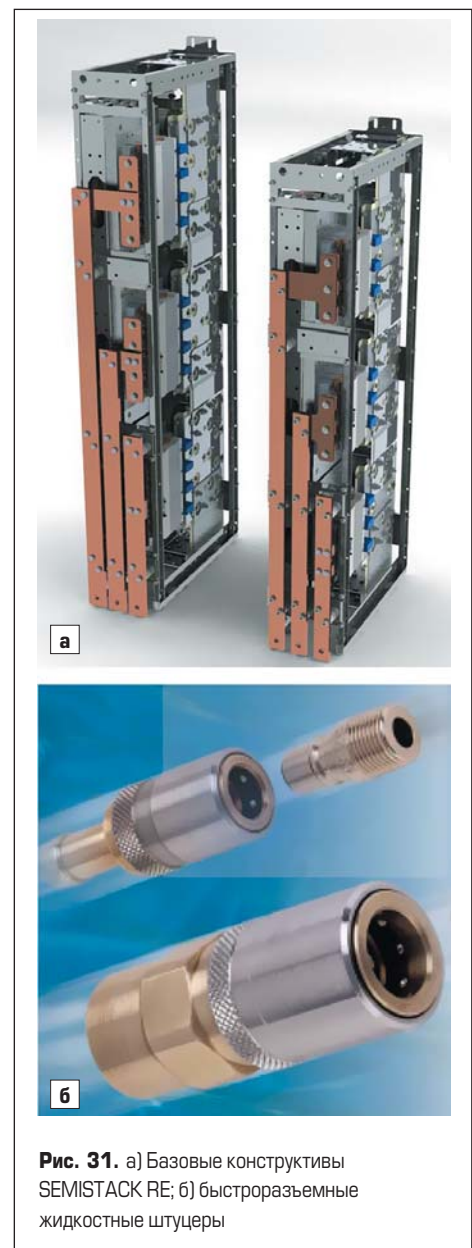
это относится к системам высокой мощности. Существует эмпирическое соотношение, в соответствии с которым при повышении средней рабочей температуры силового кристалла на 20 °C его ресурс сокращается в два раза.

Примером конструкции с тщательно проработанным «тепловым дизайном» является новая разработка компании SEMIKRON — блок SEMISTACK RE (Renewable Energy) мощностью до 1,5 МВт, предназначенный для применения в энергетических установках. Сборка представляет собой трехфазный инвертор на базе интеллектуальных модулей SKiIP, содержащих силовой каскад, схему управления и защиты, датчики тока и температуры, а также радиатор с жидкостным или воздушным охлаждением. Новая разработка ориентирована в первую очередь на новейшие типы ветрогенераторов с полноразмерным четырехквadrантным конвертером.

Базовый конструктив SEMISTACK RE включает три фазных ячейки (рис. 31а), соединенных в вертикальном положении. Каждая ячейка содержит полумостовой модуль SKiIP IРM на радиаторе, звено постоянного тока (ЗПТ) с полипропиленовыми конденсаторами и снабберами, а также терминалы для подключения АС-выходов. Фазные блоки соединяются копланарным конвектором, позволяющими сформировать конфигурацию 2Q или 4Q, а также включить модули SKiIP в параллель, удваивая мощность инвертора.

Для работы каждой трехфазной сборки требуется свой контур отвода тепла, причем все ячейки инвертора охлаждаются параллельно, что позволяет исключить взаимный нагрев силовых ключей. Подключение подводющих и отводящих шлангов осуществляется с помощью специальных быстрозъемных штуцеров, обеспечивающих надежное соединение (рис. 31б).

К началу 2011 г. блок SEMISTACK RE прошел полный цикл квалификационных тестов, став, таким образом, стандартным изделием с четко определенным набором технических характеристик и условий эксплуатации. Как и другие изделия, выпускаемые дизайнерским центром SEMIKRON, данная сборка подвергается различным видам приемо-сдаточных испытаний, условия проведения которых соответствуют международным и собственным стандартам компании. Тесты включают проверку изоляции и электрических характеристик, многочасовую прогонку при полной нагрузке, термо-



**Рис. 31.** а) Базовые конструктивы SEMISTACK RE; б) быстроразъемные жидкостные штуцеры

циклирование, короткое замыкание, ударные и вибрационные воздействия и т. д.

**Литература**

1. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Application Notes for IGBT and MOSFET modules. SEMIKRON International. 2010.
2. Колпаков А. Контрольная точка // Электронные компоненты. 2005. № 6.
3. Schultz-Harder Jurgен. Liquid cooling in high density packages. [www.curamik.com](http://www.curamik.com)
4. Freyberg M., Scheuermann U. Measuring Thermal Resistance of Power Modules // PCIM Europe journal. 2003.
5. Calculation of the Maximum Virtual Junction Temperature Reached Under Short-time or Intermittent Duty. IEC 60747-6 by SEMIKRON.
6. Колпаков А. Охлаждение в системах высокой мощности // Силовая электроника. 2010. № 3.
7. Колпаков А. Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения. Часть 1 // Силовая электроника. 2012. № 3.