

Охлаждение силовых модулей:

проблемы и решения. Часть 4

Жидкостное охлаждение позволяет максимально эффективно рассеивать тепловую энергию, генерируемую полупроводниковыми приборами. Кроме конвертеров высокой мощности, данный способ отвода тепла применяется в системах, имеющих штатный контур циркуляции охлаждающей жидкости (автомобили, индукционные нагреватели, гальванические ванны).

Наибольшей эффективностью обладают многоканальные системы жидкостного охлаждения, предназначенные для использования в преобразователях мегаваттного диапазона мощности. Для их работы важно обеспечить равномерное распределение и быстрое прохождение жидкости по каналам радиатора.

Стефан Шулер
(Stefan Schuler)

Константин Лиски
(Konstantin Lickey)

Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Использование жидкостного охлаждения снижает перепад температуры между поверхностью радиатора и охлаждающей средой, что позволяет увеличить плотность мощности или снизить нагрев кристаллов и, соответственно, повысить ресурс изделия.

На тепловое сопротивление жидкостных радиаторов и эффективность охлаждения влияют следующие факторы:

- объемная скорость потока жидкости (функция перепада давления);
- наличие турбулентности в каналах охлаждения;
- эффективная площадь охлаждения (количество каналов в радиаторе);
- теплоемкость охлаждающей жидкости, а также ее плотность и вязкость (например, при изменении соотношения вода/гликоль с 50:50 до 90:10 тепловое сопротивление снижается на 35–45%);
- тепловые свойства материала радиатора (к примеру, тепловое сопротивление медных радиаторов примерно на 20% ниже, чем алюминиевых).

Увеличение эффективной площади контакта радиатора и жидкости улучшает теплопередачу. Современные игольчатые теплоотводы отличаются большей эффективностью не только за счет расширения зоны контакта, но и благодаря образованию турбулентных потоков вокруг иголок (рис. 1).

Равномерное распределение источников тепла (силовых ключей) по поверхности радиатора при жидкостном охлаждении играет еще большую роль, чем при воздушном. Благодаря высокому коэффициенту теплопередачи (порядка 1000 Вт/м²·К) наиболее эффективный отвод тепла происходит в тех областях монтажной поверхности, где установлены полупроводниковые компоненты. Использование меди в качестве материала радиатора позволяет снизить объемное сопротивление, улучшить перекрестную тепловую связь и, следовательно, увеличить эффективную площадь охлаждения. Однако, как правило, она не используется из-за высокой стоимости.

На величину $R_{th(s-a)}$ большое влияние оказывает температура охлаждающей жидкости, особенно ярко эта зависимость проявляется для водно-гликолевой смеси (антифриза), что обусловлено вязкостью гликоля, а также, хотя и в меньшей степени, изменением плотности среды. При соотношении 50:50, в диапазоне температур +10...+70 °С тепловое сопротивление $R_{th(r-a)}$ «термодатчик — охлаждающая жидкость» снижается примерно на 25%.

В замкнутых контурах охлаждения перемещение антифриза может происходить за счет силы тяжести (нагретая жидкость, имеющая меньшую плотность, поднимается к теплообменнику, а охлажденная опускается к источнику тепла). Такая схема носит название «термосифон». Однако в большинстве случаев, особенно в системах высокой мощности, циркуляция жидкости осуществляется с помощью насоса.

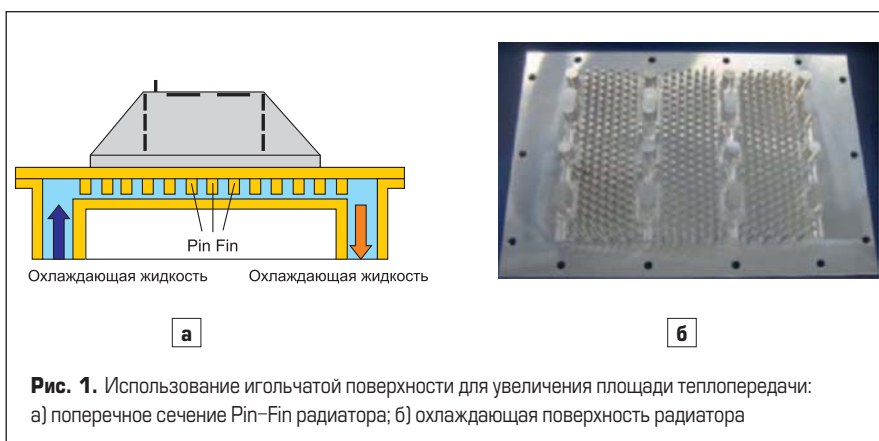


Рис. 1. Использование игольчатой поверхности для увеличения площади теплопередачи: а) поперечное сечение Pin-Fin радиатора; б) охлаждающая поверхность радиатора

Охлаждающие жидкости

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

Выбор типа жидкости следует проводить с учетом совместимости ее характеристик с материалами контура охлаждения для исключения коррозионных процессов. В алюминиевых радиаторах рекомендуется использовать смесь с содержанием гликоля не менее 10%. В документации производителей антифризов можно встретить и более высокий процент, позволяющий избежать снижения концентрации ингибиторов коррозии для цветных металлов, которые часто используются в каналах охлаждения. При нагреве жидкости свыше +60 °С рекомендуется использование замкнутых контуров, при этом степень жесткости воды не должна превышать 6.

Многоканальные радиаторы

Еще древние египтяне сталкивались с проблемой орошения полей с помощью параллельных каналов, подключенных к общему резервуару. Задача состояла в обеспечении равномерного поступления воды на каждое поле даже в том случае, если ее уровни в каналах отличаются. Уровень влияет на скорость потока и, соответственно, объем жидкости, проходящей в параллельных ветвях.

В отношении систем охлаждения силовой электроники это означает, что равномерное распределение потоков должно обеспечиваться независимо от давления и вязкости жидкости в основном канале. Ключом к решению этой задачи является оптимизация расположения подводящего коллектора и конструкции фланца. Темой данной статьи является поиск оптимального дизайна радиатора на основе моделирования и практических измерений.

На рис. 2 показана базовая структура многоканального жидкостного охладителя с двумя фланцами на передающей и приемной стороне, посредством которых вода поступает в шесть параллельных каналов охлаждения и возвращается в теплообменник. Основным вопросом моделирования является количественная оценка объема жидкости, поступающей в каждую из трубок. Простейшим «электрическим» аналогом данной конструкции является схема с источником напряжения,

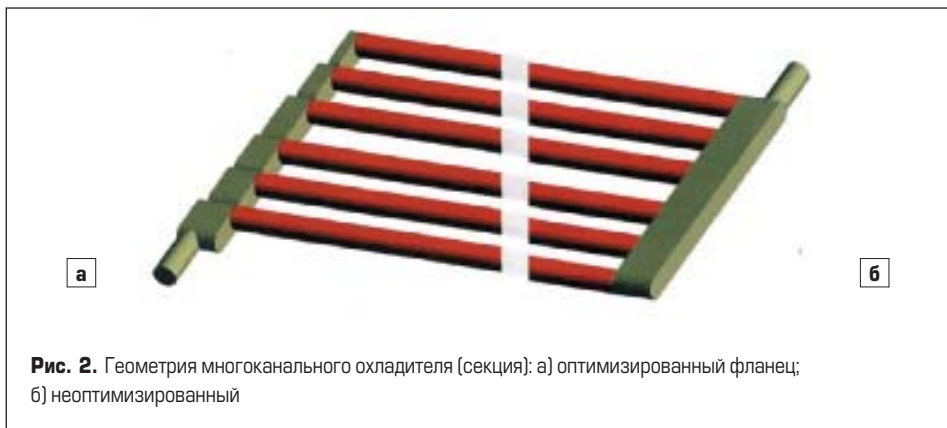


Рис. 2. Геометрия многоканального охладителя (секция): а) оптимизированный фланец; б) неоптимизированный

нагруженным на параллельно соединенные резисторы. При равенстве сопротивлений ток в них будет выравниваться автоматически, поэтому может показаться, что и потоки воды в идентичных каналах будут одинаковыми.

Однако для реальных систем жидкостного охлаждения данная аналогия не работает, поскольку молекулы воды, в отличие от электронов, обладают массой. Следствием этого является инерция, которая препятствует изменению вектора скорости в процессе прохождения потока по каналам охлаждения. Размеры так называемого «окна» зависят от коэффициента расширения каналов, скорости потока и сил, действующих на молекулы жидкости. При высоких скоростях окно становится слишком маленьким для большинства молекул, которые, в большинстве своем, будут «унесены» основным потоком.

Добавление каждого нового ответвления снижает объем жидкости в единицу времени и, следовательно, скорость потока, проходящего через канал с сечением заданной площади. Размеры «окон» увеличиваются, в результате чего все большее число молекул меняет направление движения.

Чтобы минимизировать относительное влияние ответвлений на скорость потока в основном канале, площадь его поперечного сечения должна быть максимально возможной. На практике ее, как правило, стараются

сделать вдвое больше суммарного сечения всех ветвей, что не всегда возможно с учетом имеющегося пространства. Не существует простого аналитического способа расчета объемов жидкости в параллельных ветвях, поскольку образование вихревых и стоячих зон (т. е. неподвижных областей, создающих нежелательные турбулентции) делает процесс распределения очень неопределенным.

В некоторых условиях поток способен даже менять свое направление, в результате чего образуются мощные завихрения между передающими и приемными зонами. При этом объемы потоков могут быть почти одинаковыми, соответственно, распределение охлаждающей жидкости оказывается абсолютно неравномерным.

Моделирование описанных выше процессов лучше всего выполнять с помощью метода конечных элементов (FEM), предназначенного для решения частных дифференциальных уравнений (рис. 3). Как можно понять из названия, FEM делит пространственную задачу на конечное число элементов. В ходе этого процесса, кроме формы и размера, каждому из них присваивается набор специальных свойств, таких как плотность, вязкость, поверхностное натяжение и теплоемкость. Повышение точности достигается за счет уменьшения размера элементов, что, в свою очередь, требует дополнительных вы-

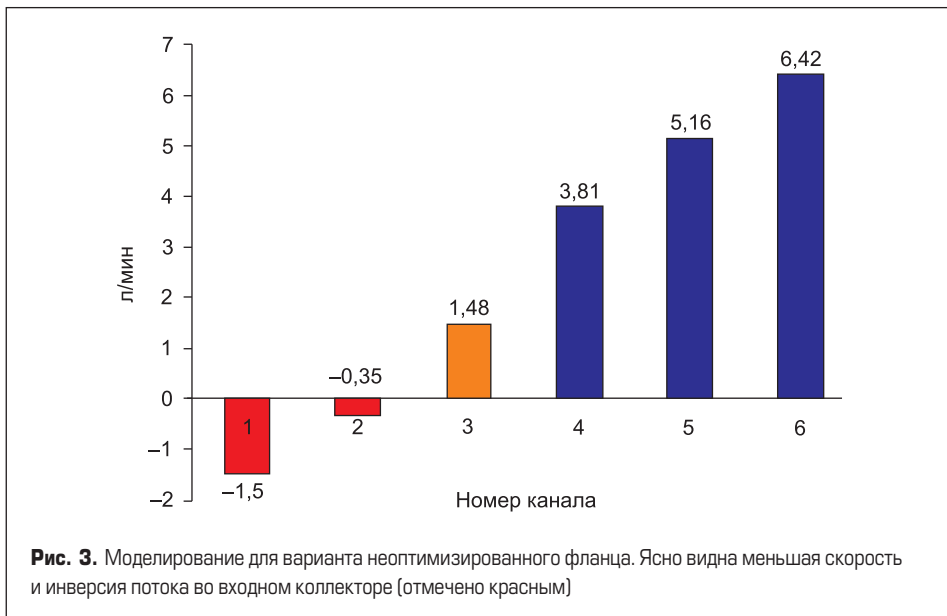


Рис. 3. Моделирование для варианта неоптимизированного фланца. Ясно видна меньшая скорость и инверсия потока во входном коллекторе (отмечено красным)

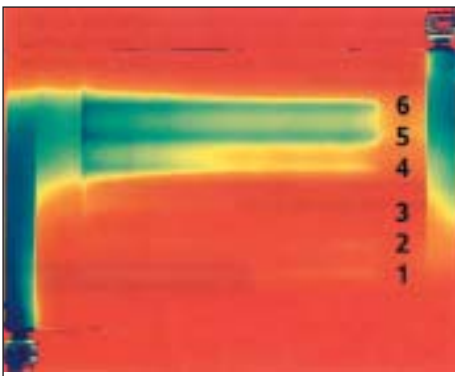


Рис. 4. Тепловой профиль радиатора через 5 с после включения системы охлаждения (неоптимизированный фланец). Ясно виден приоритет дальних каналов (5 и 6)

числительных ресурсов и увеличивает время анализа.

Возможные сценарии распределения потоков для различных геометрий фланцев были проанализированы с помощью программного обеспечения ANSYS. В качестве исходной или базовой рассматривалась конструкция фланца постоянного сечения с боковым притоком (неоптимизированный вариант на рис. 2). Данная простейшая структура позволяет сделать процесс оптимизации наиболее наглядным.

Первый этап анализа состоит в раздельной оптимизации подающих и принимающих каналов, расположенных поперечно коллекторам. Коллектор «золотого сечения», рассматриваемого как базовая величина, может принять одинаковое количество воды в единицу времени от каждого канала охлаждения. Однако это допущение несколько ограничивает степень свободы, поскольку оно исключает возможность взаимной компенсации. Кроме того, влияние геометрии приемного коллектора на распределение потоков в данном случае существенно меньше, чем у передающего. Поэтому исследование отдельных

секций не имеет смысла, следует анализировать только конструкцию всей системы охлаждения в целом.

Основной целью последующих исследований была гомогенизация скорости потока в верхней и нижней части каждой ветви. Простейшим путем решения данной задачи является оптимизация размеров поперечного сечения, производимая с учетом реальных технологических возможностей. Результатом моделирования стала разработка конструкции, обеспечивающей равномерное распределение потоков и отсутствие «инверсных» составляющих.

Известные ограничения метода FEM способны привести к ошибкам в расчетах и/или неточностям, которые могут резко возрасти после нескольких итераций. Следовательно, результаты моделирования должны быть подтверждены тестами, проводимыми в реальных условиях работы. Использование существующих баз данных позволяет с легкостью изготовить фланец способом фрезерования из любой жесткой заготовки. Это самая простая часть работы. Задача усложняется, когда дело доходит до выбора метода измерения, наиболее известным из которых является расходомерия.

В данном случае более предпочтительным является другой способ, основанный на измерении перепада давления и теплового импеданса Z_{th} , поскольку он обеспечивает наименьшее влияние на сценарий распределения потоков в тестовом оборудовании. Жесткая корреляция между градиентом давления, температурой, поперечным сечением и расходом жидкости делает этот метод предпочтительным для расчета скорости потока при любых изменениях температуры.

К сожалению, задача далеко не тривиальна: наличие вибраций делает невозможным точное измерение малых перепадов давления. Метод расходомерии здесь по-прежнему не подходит из-за взаимного влияния (выходной фланец должен быть заменен на датчик потока для каждого канала охлаждения).

На практике измерение дифференциального давления является не очень надежным, поэтому необходимо найти альтернативный способ, обеспечивающий требуемые параметры. Такую возможность предоставляют новейшие скоростные тепловизионные камеры. Эти устройства содержат детектор на основе антимонида индия (кристаллическое бинарное неорганическое химическое соединение индия и сурьмы, химическая формула InSb), охлажденного до температуры 77 К. Теплое разрешение скоростного тепловизора составляет 20 мК (при времени интегрирования 1 мс), или 640×512 пикселей при 14-битовом разрешении по глубине. В полноэкранном режиме камера позволяет записывать примерно 100 изображений в секунду. Это дает возможность протестировать тепловизор и снять тепловой профиль радиатора, находящегося в горизонтальном положении и нагретого до +95 °С, в тот момент, когда через него начинает проходить охлаждающая жидкость с температурой +25 °С.

Результаты исследований оказались впечатляющими, прежде всего благодаря высокой детализовке, и они подтвердили выводы, полученные в ходе моделирования. На рис. 4 показан тепловой профиль радиатора через 5 с после включения системы охлаждения. Снимок демонстрирует сильную асимметрию с приоритетом тыловых каналов 5 и 6 и минимальной эффективностью фронтальных ветвей. Изучение 30-с видеоролика выявило обратный поток в каналах 1 и 2. Это ожидаемая ситуация, вызванная эффектом Вентури (назван в честь итальянского физика Джованни Вентури — Giovanni Battista Venturi, 1746–1822), который заключается в падении давления при протекании потока жидкости или газа через суженную часть трубы. Тем не менее удивительно, что его проявление оказалось настолько ярким. На практике подобная циркуляция приводит к резкому снижению эффективности работы фронтальных каналов (что иллюстрирует рис. 4), поскольку они получают уже нагретые обратные потоки.

Подробное объяснение ситуации дают рис. 5 и 6, на которых видно симметричное распространение фронта охлаждающей жидкости во всех каналах слева направо в оптимизированной версии. Анализ видеоролика,

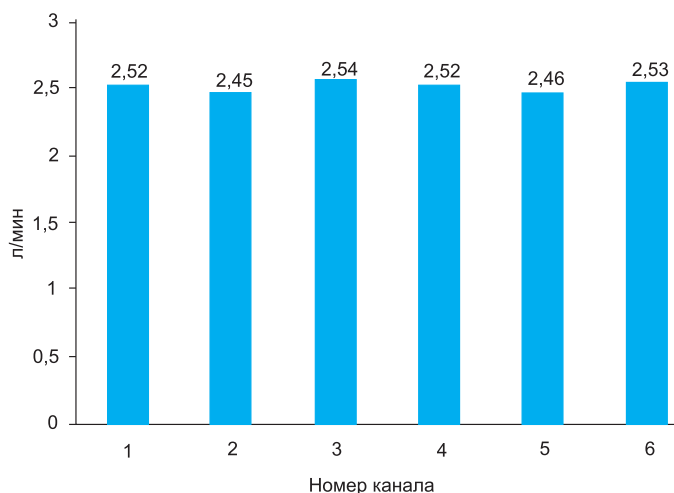


Рис. 5. Распределение потоков в оптимизированном фланце (моделирование). Пропускная способность каналов практически одинаковая

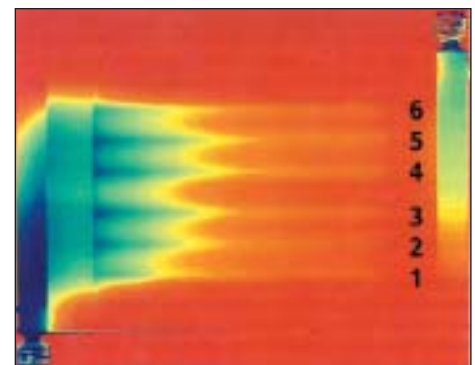


Рис. 6. Тепловой профиль радиатора через 5 с после включения системы охлаждения (оптимизированный фланец). Распределение потоков почти симметричное

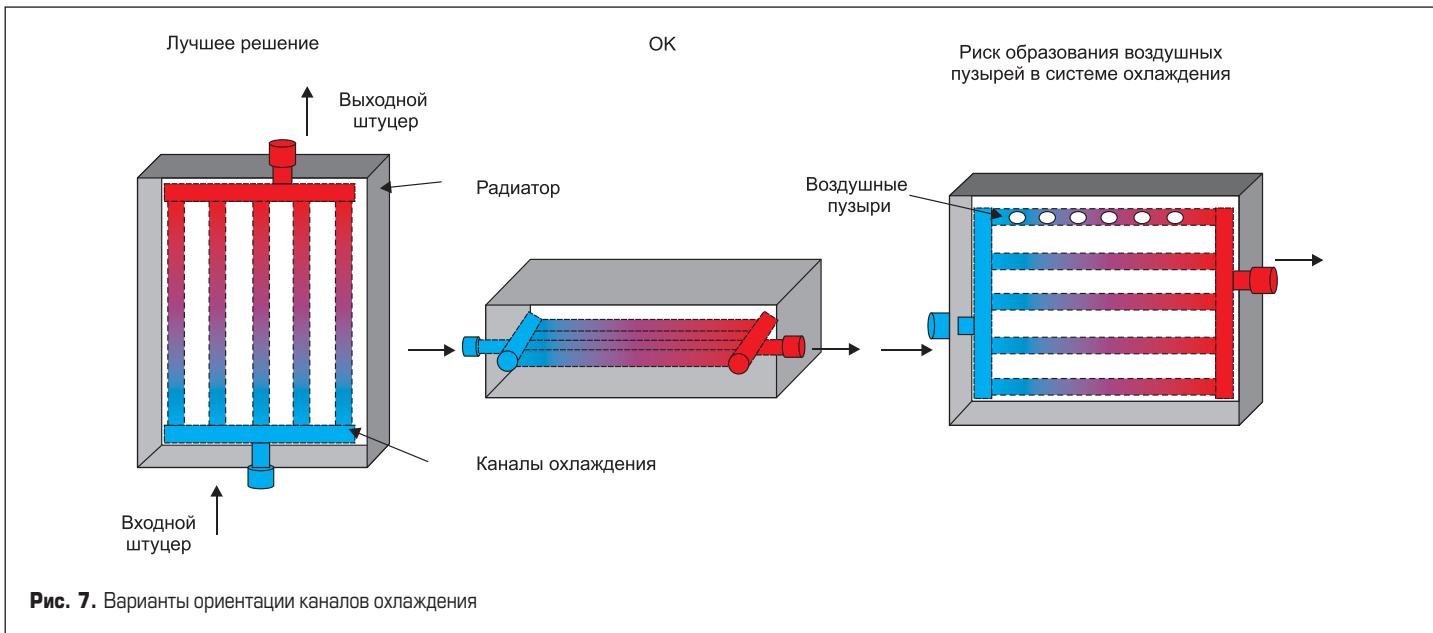


Рис. 7. Варианты ориентации каналов охлаждения

снятого скоростной камерой, подтверждает отсутствие циркуляций (их не выявило и моделирование). Мгновенный снимок демонстрирует равномерное распределение температуры по телу радиатора.

Сравнение двух изображений, полученных через 5 с после начала работы системы охлаждения, демонстрирует кажущуюся лучшую пропускную способность неоптимизированного фланца. Причиной этого заблуждения является меньшее эффективное гидравлическое сопротивление каналов 5 и 6 по отношению ко всему теплоотводу. Сравнение полных характеристик обоих вариантов конструкции не выявляет разницы пропускной способности.

Практические рекомендации

При выборе 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 пузырьки могут накапливаться (рис. 7 и 8).

Наиболее предпочтительным считается вариант вертикальной конструкции, при котором входной штуцер находится в нижней, а выходной — в верхней точке сборки (рис. 8).

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 пере-

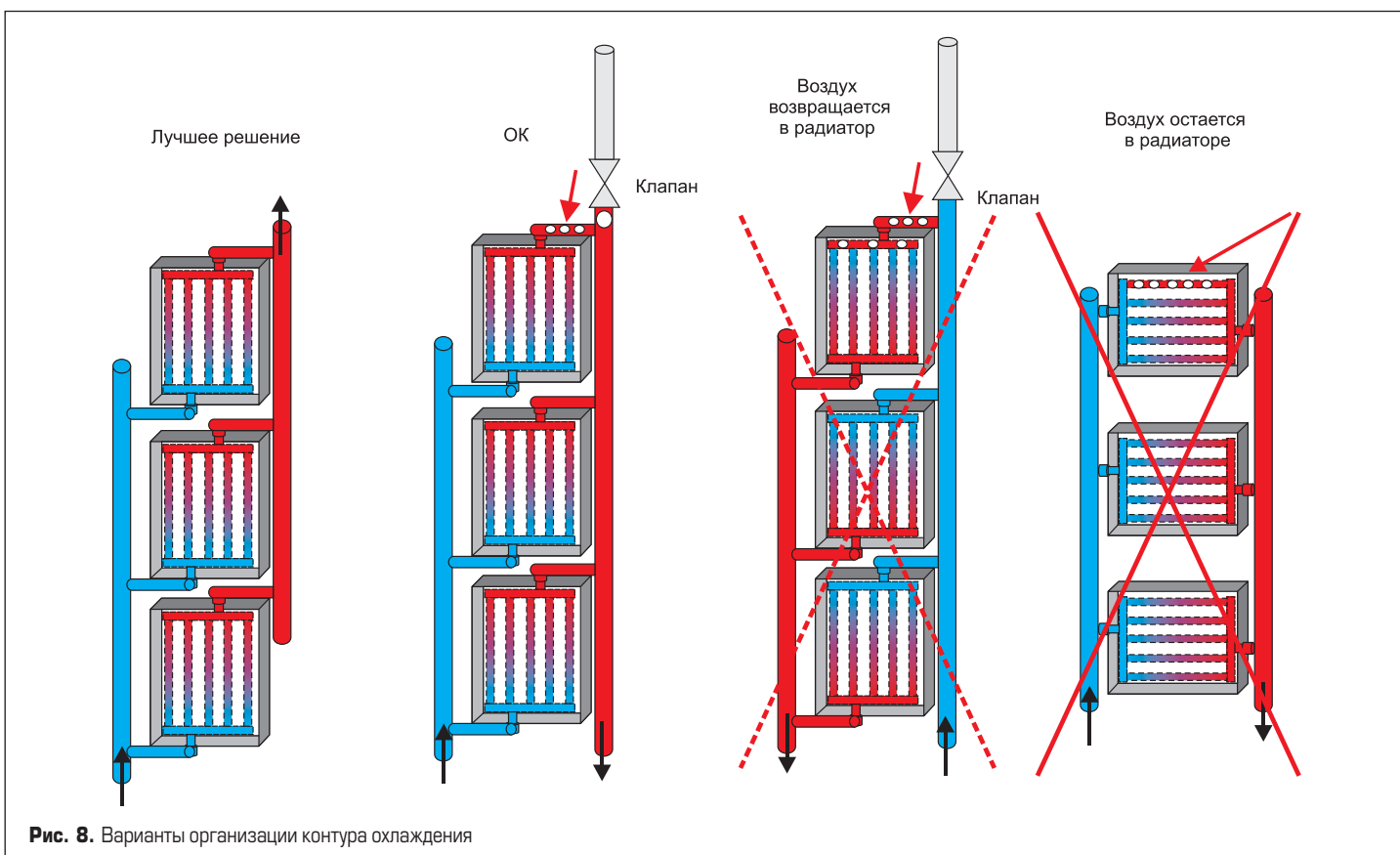


Рис. 8. Варианты организации контура охлаждения

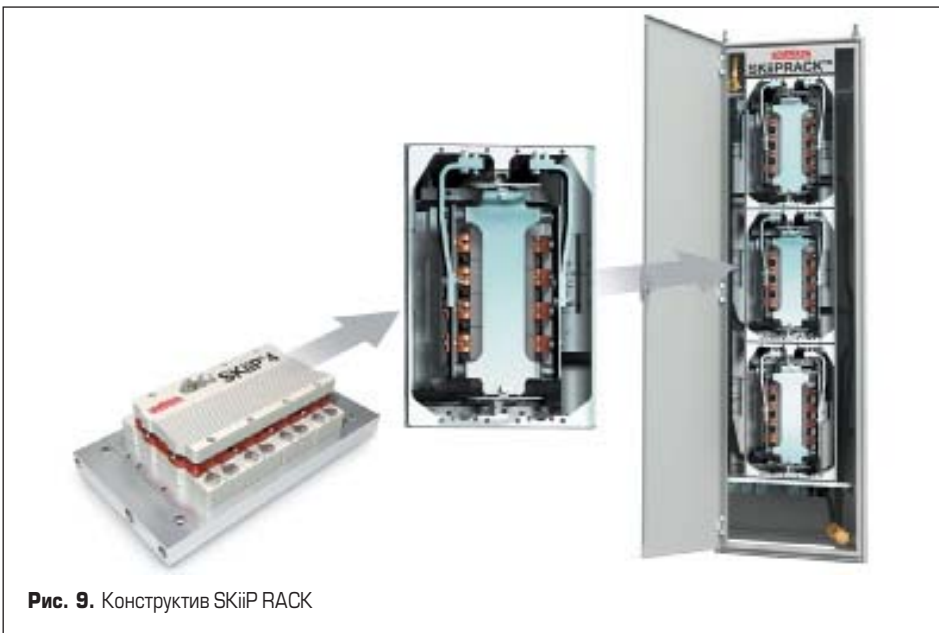


Рис. 9. Конструктив SKiiP RACK

падов давления в параллельных каналах (одинаковое количество и длина радиаторов, каналов, изменений направления жидкости и т. д.). Важна также инерция жидкости в направлении ее движения: этот параметр отвечает за прямолинейность потока, даже если одинаковые параллельные каналы прерываются в боковой части системы. Для подачи воды в каналы могут быть использованы направляющие экраны, лопатки и т. д.

Заключение

Как показывают результаты моделирования и испытаний, использование оптимизированной конструкции фланца позволяет получить гораздо более равномерное распределение тепла в многоканальном жидкостном радиаторе. Это удалось наглядно продемонстрировать с помощью скоростной инфракрасной камеры. Улучшение интенсивности и равномерности теплопередачи означает меньший

перепад температуры внутри силового модуля и, соответственно, более высокие показатели надежности.

Различные компенсационные меры, направленные на улучшение теплопередачи, например за счет применения более толстого слоя металла в верхней части каналов охлаждения или более эффективных теплопроводящих материалов, таких как медь, оказываются менее работоспособными, чем оптимизация конструкции.

Проблема 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 °С его ресурс сокращается вдвое.

Примером конструкции с тщательно проработанным «тепловым дизайном» является

сборка SKiiP RACK мощностью более 1 МВт, предназначенная для применения в энергетических установках и приводах. Изделие представляет собой четырехквadrантный инвертор на базе интеллектуальных модулей SKiiP, содержащих силовой каскад, схему управления и защиты, датчики тока и температуры, а также радиатор с жидкостным охлаждением. Каждая из ячеек сборки содержит два полумостовых ключа, которые могут быть соединены в параллель, при этом конфигурация схемы меняется на трехфазную, а выходная мощность удваивается.

Базовый конструктив SEMISTACK RE показан на рис. 9. Кроме силового каскада, инвертор содержит звено постоянного тока с полипропиленовыми конденсаторами и снабберами, а также терминалы AC-входов и выходов. Подключение подводящих и отводящих шлангов осуществляется с помощью специальных быстроразъемных штуцеров, обеспечивающих надежное соединение.

Литература

1. Arendt Wintrich, Ulrich Nicolai, Werner Tursky, Tobias Reimann. Application Notes for IGBT and MOSFET modules. SEMIKRON International. 2010.
2. Колпаков А. Контрольная точка // Электронные компоненты. 2005. № 6.
3. Jurgen Schultz-Harder. Liquid cooling in high density packages. www.curamik.com
4. Martin Freyberg, Uwe Scheuermann. 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.