

Жидкостные охладители:

проблемы и решения

Освоение предлагаемых охладителей позволит разработать функционально законченные блоки охлаждения, конструктивно представляющие собой устройства силовой электроники, спроектированные по модульному принципу, охватывающие широкий диапазон возможных реализаций, решений и исполнений, предназначенных для выполнения конкретных задач — от простых однофазных преобразователей мощностью несколько киловатт до мощных мегаваттных трехфазных преобразователей с охладителями жидкостного и испарительного типа.

Юрий Таланин

tyv1357@mail.ru

Стремление к снижению габаритов и увеличению мощности преобразовательных устройств неизбежно создает серьезные проблемы, связанные с отводом тепла. Достижения технологии IGBT последних лет привели к появлению кристаллов с предельно высокими значениями плотности тока, диапазон их рабочих температур расширен до +200 °С. В результате все более возрастает значение теплового перехода «корпус — охладитель — окружающая среда», а характеристики системы охлаждения становятся решающими при проектировании конструкции преобразователя. Физические ограничения для систем отвода тепла определяются величиной максимальной рассеиваемой мощности, температурой внешней среды, габаритными размерами, весом и надежностью.

Поэтому основным направлением в решении проблемы создания мощных статических преобразователей является разработка и производство высокоэффективных охладителей, а также применение более действенных способов охлаждения — жидкостного и испарительного, — позволяющих увеличить коэффициент теплоотдачи, а также уменьшить массу и габариты охлаждающих устройств и преобразователей в целом.

Потери, генерируемые полупроводниковыми кристаллами в процессе работы, приводят к повышению их температуры, снижению производительности и надежности системы.

Существует эмпирическое соотношение, в соответствии с которым при повышении средней рабочей температуры силового кристалла на 20 °С его ресурс сокращается вдвое. Чтобы исключить перегрев кристалла и рассеять тепло, выделяемое кристаллом, необходимо его эффективное охлаждение.

Поэтому проблема отвода тепла становится одной из самых важных при проектировании преобразовательной техники, особенно это относится к преобразователям большой мощности.

Состояние техники систем жидкостного охлаждения

Традиционно используется два способа изготовления жидкостных охладителей: закрытые и открытые.

Закрытые охладители, как правило, изготавливаются из алюминия и его сплавов, в плите выполняются каналы или содержатся вмонтированные в плиты медные (алюминиевые) трубки для прохождения охлаждающей жидкости [2]. По другой версии закрытые охладители изготавливаются из двух металлических плит, которые затем соединяются сваркой, пайкой. Охлаждающая жидкость проходит между двумя плитами по выполненным в них каналам, при этом поток охлаждающей жидкости идет параллельно поверхности силового модуля, закрепленного на плите. Охладители имеют входной и выходной патрубки для подачи и отвода охлаждающей жидкости.

Эффективность теплообмена между базовой платой или изолирующей подложкой силового модуля и охладителем зависит от качества сопрягаемых поверхностей, которые неизбежно имеют определенную шероховатость и неравномерность. Как следствие, в зоне сопряжения образуются воздушные полости, препятствующие прямой передаче тепла (теплопроводность воздуха низкая — $\lambda_{air} \approx 0,03 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$). Для улучшения качества теплопередачи воздушные полости заполняют теплопроводящим материалом (Thermal Interface Material, ТИМ), термопастой.

Теплопроводность промышленных термопаст (λ) находится в диапазоне 0,5–6 Вт/м²·К, то есть по этому показателю они примерно в 20–200 раз лучше, чем воздух. Потери, вносимые термопастой в суммарном значении теплового сопротивления в сборке, между изолирующей подложкой силового модуля и охладителем $R_{th(j-s)}$ составляют 20–65% в зависимости от типа модуля и параметров системы охлаждения. Потери, вносимые термопастой с теплопроводностью 0,7 Вт/м²·К, составляют примерно 50% полно-

го теплового сопротивления в сборке между изолирующей подложкой силового модуля и охладителем. Несмотря на многие конструктивные отличия, все закрытые охладители имеют промежуточный слой термопасты, между изолирующей подложкой силового модуля и охладителем.

По сравнению с другими компонентами «тепловой системы» термопаста имеет наихудшие характеристики, соответственно, ее использование можно рассматривать как крайне нежелательную необходимость.

Открытые жидкостные охладители

Для уменьшения значения теплового сопротивления между изолирующей подложкой силового модуля и охладителем производится структурирование нижней поверхности осно-

вания охлаждаемого модуля выработкой так называемых ребер-штырьков, которые могут быть ромбовидные, эллиптические и круглой формы [2]. Таким образом увеличивают поверхность основания, находящуюся в контакте с жидкостью, и одновременно повышают турбулентность охлаждающей жидкости при ее прохождении. Модуль монтируют на охладитель, выполненный в виде ванны, имеющей входной и выходной штуцера для ввода и вывода охлаждающей жидкости. Между основанием структурированного модуля и ванной устанавливают уплотняющую манжету. Такие охладители стоят дорого, это объясняется в первую очередь необходимостью механической обработки основания модуля алмазным инструментом.

Концепция охлаждения силового модуля получила название охлаждения ShowerPower,

состоящая из пластмассовой ванны, имеющей входное и выходное отверстия для подвода и отвода охлаждающей жидкости, монолитной пластмассовой литой детали, на нижней стороне которой размещены разветвления для жидкости. Протоки на среднем уровне представляют собой сопла для притока и оттока, а на верхней стороне выполнены извилистые каналы [3]. Между основанием модуля и ванной устанавливают уплотняющую манжету.

Преимущества этой концепции — непосредственное охлаждение модуля без использования термопаст.

К недостаткам конструкции жидкостного охладителя относятся:

- дорогостоящая оснастка, необходимо изготовить несколько типов сложных литевых пресс-форм для одного типа силового модуля;

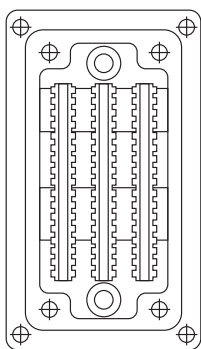


Рис. 1. Охладитель под силовой диод с емкостью для охлаждающей жидкости

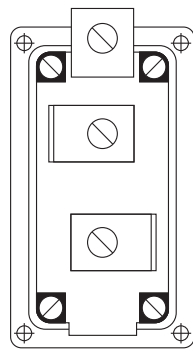


Рис. 4. Охладитель с установленным диодным силовым модулем

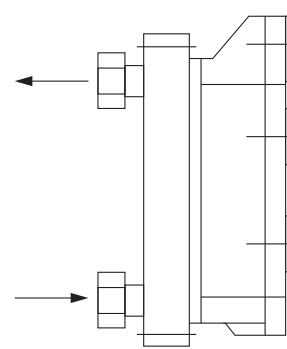


Рис. 7. Охладитель с установленным силовым диодом, вид сбоку

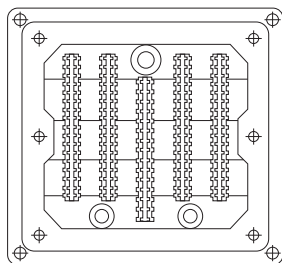


Рис. 2. Охладитель под силовой IGBT-модуль с размерами корпуса 140×130 мм, с емкостью для охлаждающей жидкости

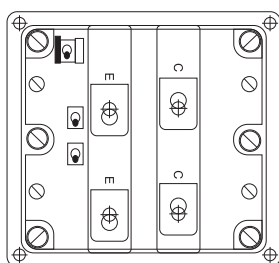


Рис. 5. Охладитель с установленным силовым IGBT-модулем с размерами корпуса 140×130 мм

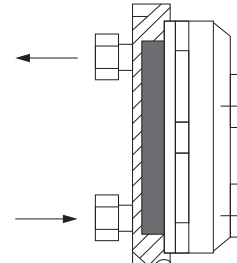


Рис. 8. Охладитель с установленным силовым IGBT-модулем, с размерами корпуса 140×130 мм, вид сбоку

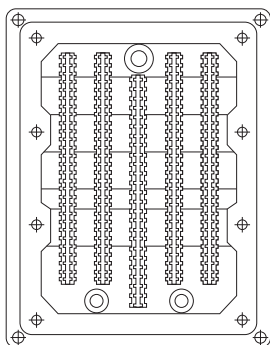


Рис. 3. Охладитель под силовой IGBT-модуль с размерами корпуса 170×130 мм, с емкостью для охлаждающей жидкости

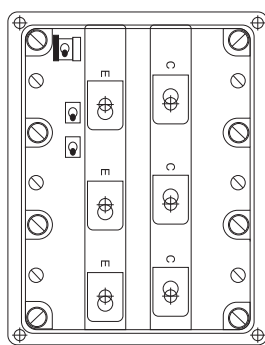


Рис. 6. Охладитель с установленным силовым IGBT-модулем с размерами корпуса 170×130 мм

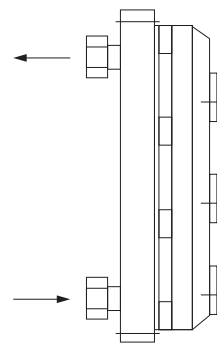


Рис. 9. Охладитель с установленным силовым IGBT-модулем, с размерами корпуса 170×130 мм, вид сбоку

- конструкция пресс-форм охладителя оптимизирована под конкретные параметры: объемная скорость потока жидкости, ее теплоемкость, плотность и вязкость, и отклонение от этих параметров снижает эффективность охлаждения.

Кроме того, возникающие при переключении силовых модулей высокие значения скоростей изменения сигнала di/dt , du/dt приводят к появлению переходных перенапряжений, шумов и помех. Для борьбы с ними в мощных импульсных преобразователях необходимо обеспечивать минимальное значение распределенных индуктивностей силовых линий связи. Все это вносит определенные трудности в проектирование статических преобразователей средней и большой мощности, поэтому силовые модули, драйверы, электролитические и снабберные конденсаторы, датчики тока и температуры должны размещаться компактно на общем эффективном охладителе. Конструкция охладителей ShowerPower не позволяет это сделать.

Способ изготовления жидкостного охладителя

Предлагается способ изготовления эффективных, универсальных, недорогих жидкостных охладителей для охлаждения силовых модулей, с высокими техническими и эксплуатационными характеристиками [1].

Способ изготовления жидкостного охладителя относится к области техники, где существует

высокая плотность мощности с большим выделением тепла, потенциальные сферы применения данного способа изготовления многообразны — это электротехническая, радиоэлектронная, автомобильная промышленность, установки индукционного нагрева металла.

На рис. 1–9 изображены автономные диодные и IGBT-модули с охладителями.

Изготовление автономного жидкостного охладителя выполняется под конкретный индивидуальный силовой модуль, например IGBT-модуль (с размерами корпуса 140×130 мм). Берется металлическая пластина с высоким коэффициентом теплопроводности, с хорошей способностью к механообработке, например алюминиевая пластина размером 160×150 мм толщиной 20 мм. На обрабатываемом центре с числовым программным управлением (ЧПУ) проводят фрезерование площадки размером 144×134 мм на глубину, например 2 мм, превышающую периметр контура основания силового модуля на 2 мм по всему периметру модуля. Затем по предварительно смоделированным тепловым режимам, в частности по программе CFD (компьютерная динамика жидкостей) или по программе Flow Simulation, интегрированной в полнофункциональную версию системы Solid Works, на вновь образованной площадке, предварительно отступив от ее краев на расстояние, скажем, 10 мм, проводят фрезерование емкости охладителя с каналами для охлаждающей жидкости. Для повышения турбулентности проходящей охлаждающей жидкости стенки каналов делают

извилистыми и сужающимися от основания емкости к вершине, а сами каналы — волнообразными. По периметру площадки, в соответствии с расположением крепежных отверстий силового модуля, сверлят крепежные отверстия. На одном конце емкости выполняют отверстия для подвода, а на противоположном конце — отверстия для отвода охлаждающей жидкости. В отверстия для подвода и отвода охлаждающей жидкости устанавливают трубки со штуцерами (например, при помощи сварки). Затем проводят финишную обработку площадки, мест соприкосновения охладителя с силовым модулем, причем высота стенок каналов всегда располагается ниже плоскости соприкосновения охладителя с изолирующей подложкой силового модуля, например на 1 мм. По периметру площадки, на места соприкосновения охладителя с силовым модулем, наносят тонкий слой (50–100 мкм) терморасты, к примеру Wacker P12. Устанавливают силовой модуль на охладитель и закрепляют его в соответствии с рекомендациями по порядку установки крепежа и усилиям его затяжки. Углубление по периметру между корпусом силового модуля и стенками охладителя заполняют герметиком, например Loctite-5205.

Далее проводят тест на герметичность, для этого во входную трубку со штуцером подают охлаждающую жидкость (например, водно-гликолевую смесь) под давлением 7 бар, выходную трубку со штуцером заглушают и выдерживают в течение 1,5 ч.

На рис. 10–13 изображена многоканальная система жидкостного охлаждения для шести диодных и шести силовых IGBT-модулей (выпрямитель и инвертор).

Берется металлическая пластина с высоким коэффициентом теплопроводности, с хорошей способностью к механообработке, например алюминиевая пластина размером 550×715 мм (пластина может быть любых размеров, под конкретные условия) толщиной 30 мм. На обрабатываемом центре с ЧПУ на пластине, в соответствии с разметкой, производят фрезерование шести емкостей под диодные модули и шести емкостей под IGBT-модули. Идеология выполнения емкостей охладителя остается прежней.

По периметру площадок, на места соприкосновения силовых модулей с охладителем, наносят тонкий слой (50–100 мкм) терморасты, например Wacker P12. Устанавливают силовые диодные и IGBT-модули на охладитель и производят их крепление в соответствии с рекомендациями по порядку установки крепежа и усилиям их затяжки. Углубления между корпусами силовых модулей и охладителем заполняют герметиком, например Loctite-5205.

Далее проводят тест на герметичность, для этого в трубку со штуцером (входной магистральный коллектор) подают охлаждающую жидкость (например, водно-гликолевую смесь) под давлением 7 бар, выходную трубку со штуцером (выходной магистральный коллектор) заглушают и выдерживают в течение 1,5 ч.

Циркуляция охлаждающей жидкости в многоканальной системе жидкостного охлаждения осуществляется с помощью

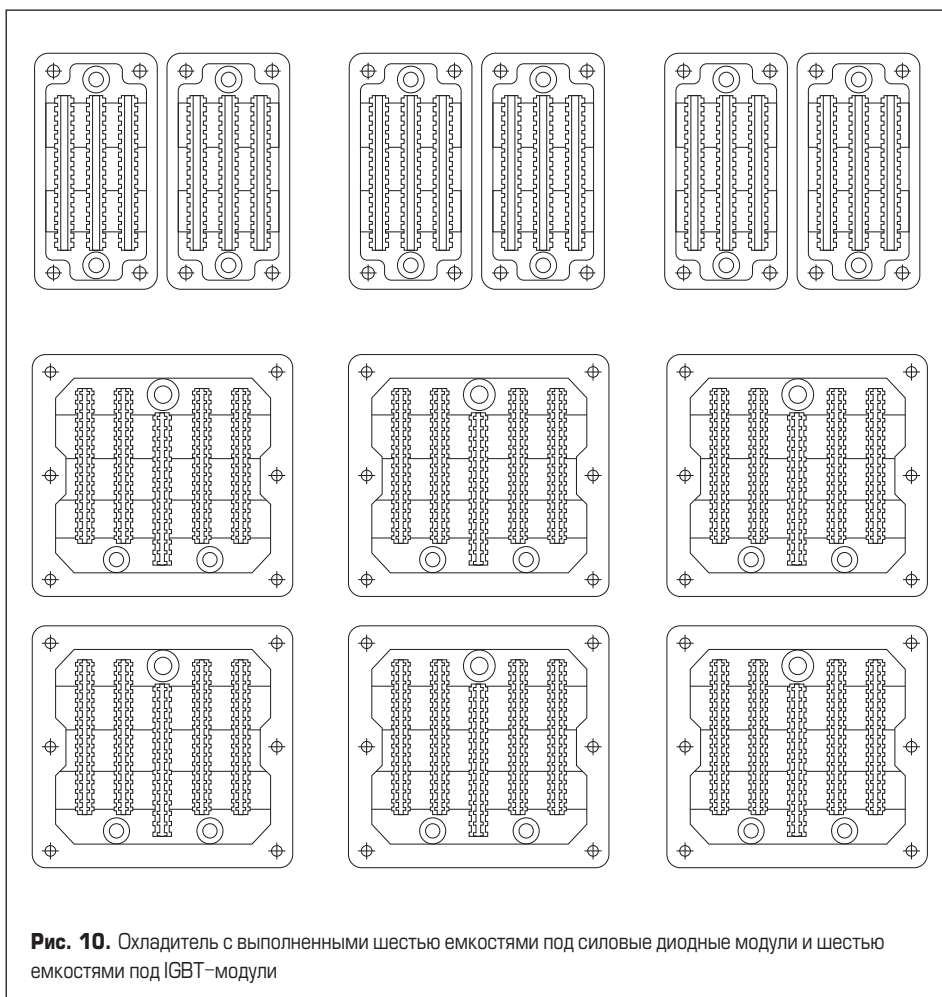


Рис. 10. Охладитель с выполненными шестью емкостями под силовые диодные модули и шестью емкостями под IGBT-модули

насоса (на рис. не показан). Охлаждающая жидкость из магистрального коллектора через распределительные коллекторы, подводящие шланги, подключенные к подводящим штуцерам входных трубок, поступает и заполняет емкости охладителей и по каналам поднимается к основаниям силовых модулей, охлаждая их. Далее охлаждающая жидкость из емкостей поступает в отводные отверстия и через отводящие трубки, выходящие штуцера, по отводящим шлангам поступает к отводным распределительным коллекторам, а затем в отводной магистральный коллектор, из которого направляется в теплообменник (на рис. не показан). Затем процесс повторяется.

Эффективность охлаждения силовых модулей при данном способе изготовления жидкостного охладителя достигается за счет:

- равномерного распределения силовых модулей по поверхности охладителя;
- моделирования тепловых процессов, результатом которого является оптимизация размеров поперечного сечения жидкостного охладителя (количество каналов и глубина, зазор между высотой стенок каналов и основаниями силовых модулей и т. д.), объемная скорость потока жидкости, ее теплоемкость, плотность и вязкость;
- наличия турбулентности проходящей жидкости в каналах охлаждения;
- непосредственного контакта основания силового модуля с охлаждающей жидкостью (примерно 85% площади и только не более

15% площади основания силового модуля имеет контакт с охладителем);

- равномерного распределения потоков охлаждающей жидкости, проходящей через емкости с каналами, и высокого коэффициента теплопередачи (порядка 1200 Вт/м²·К), в результате чего тепло от силового модуля отдается в охлаждающую жидкость с незначительными потерями.

Охладитель, изображенный на рис. 10–13, может использоваться с испарительной системой охлаждения. В качестве теплоносителя применяют, например, фреон 113 или перфтордибутиловый эфир МД-3Ф.

В результате нагревания силовых модулей, установленных на охладителе, и самого охладителя теплоноситель в нем нагревается, происходит расширение жидкого теплоносителя, повышение давления жидкой фазы теплоносителя до давления конденсации и превращение теплоносителя в парожидкостную фазу. При этом происходит отбор тепла от силовых модулей и охладителя при одновременном нагреве теплоносителя жидкой фазы до температуры конденсации, полученное тепло используется в расширительном цикле для охлаждения силовых модулей и охладителя. За счет избыточного давления в автономных емкостях парожидкостный теплоноситель по каналам поступает в отводящие трубки и через выходные штуцера по отводящим шлангам направляется в выходные распределительные коллекторы, а затем в выходной магистраль-

ный коллектор. Далее парожидкостный теплоноситель поступает в конденсатор, где конденсируется, смешивается с жидкой фазой теплоносителя, охлаждается и попадает во входной магистральный коллектор, откуда поступает в распределительные коллекторы, и через подводящие шланги теплоноситель вновь поступает в емкости, на которых установлены силовые модули.

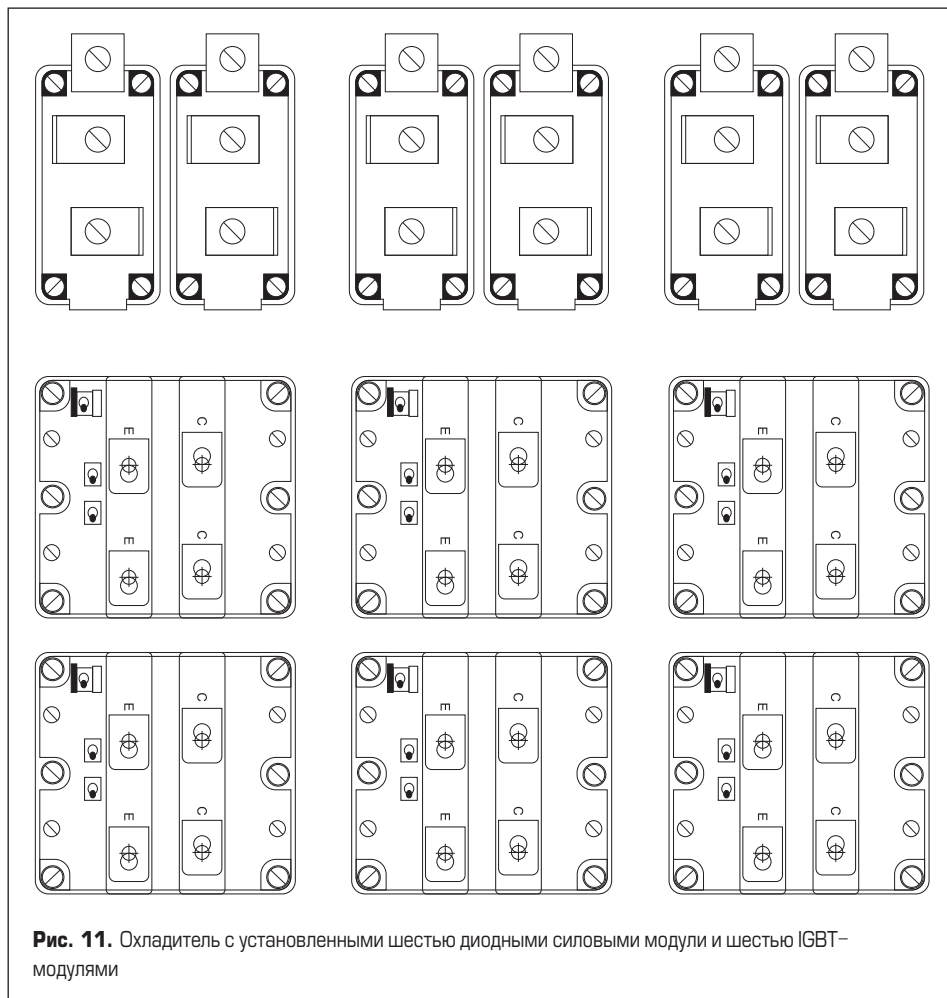


Рис. 11. Охладитель с установленными шестью диодными силовыми модулями и шестью IGBT-модулями

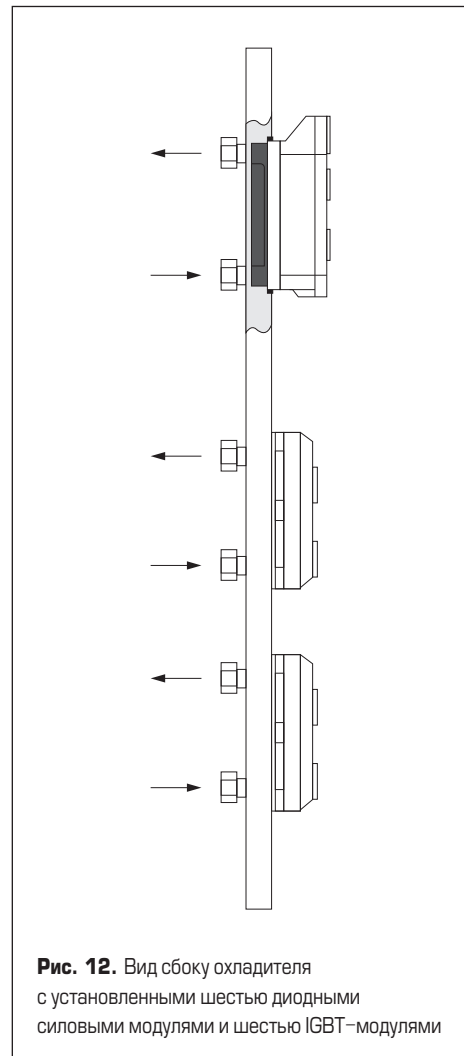


Рис. 12. Вид сборки охладителя с установленными шестью диодными силовыми модулями и шестью IGBT-модулями

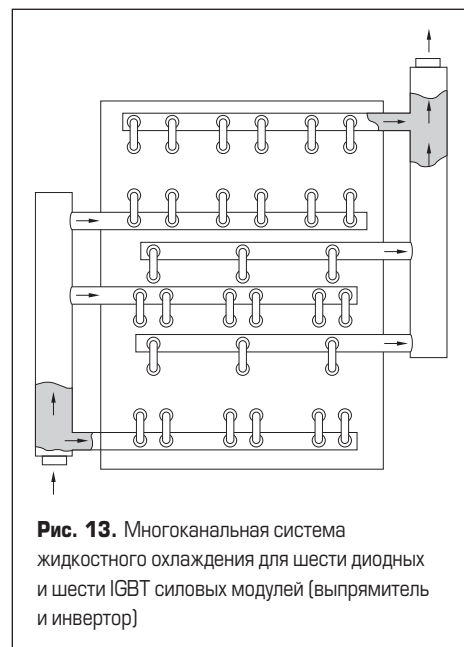


Рис. 13. Многоканальная система жидкостного охлаждения для шести диодных и шести IGBT силовых модулей (выпрямитель и инвертор)

Охлаждение силовых модулей и охладителя происходит за счет тепла, выделяемого силовыми модулями, и чем сильнее происходит нагрев силовых модулей и охладителя, тем выше давление и конденсация теплоносителя и эффективней охлаждение силовых модулей.

Эффективность охлаждения достигается за счет изменения агрегатного состояния теплоносителя и высокого коэффициента теплоотдачи.

Важным преимуществом данного способа испарительного охлаждения являются отсутствие вращающихся деталей, бесшумность работы, отсутствие вибрации, что намного упрощает статический преобразователь и делает его более надежным. ■

Литература

1. Патент РФ на изобретение № 2647866 «Способ изготовления жидкостного охладителя».
2. Каталог охладителей итальянской фирмы TECNOAL s. n. c., 2014.
3. Каталог охладителей австрийской фирмы Austerlits Electronic, 2010.
4. Исламгазина Л. Применение различных материалов в системах охлаждения силовых полупроводниковых приборов, в том числе силовых модулей и твердотельных реле // Силовая электроника. 2005. № 3.
5. Колпаков А. Охлаждение в системах высокой мощности // Силовая электроника. 2010. № 3.
6. Колпаков. А. Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения. Часть 1 // Силовая электроника. 2012. № 3.
7. Колпаков. А. Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения. Часть 2 // Силовая электроника. 2012. № 4.
8. Колпаков А. Охлаждение силовых модулей: проблемы и решения. Часть 3 // Силовая электроника. 2013. № 6.
9. Lickey K., Schuler S. Охлаждение силовых модулей. Часть 4 // Силовая электроника. 2015. № 3.
10. Колпаков. А. Охлаждение силовых модулей. Оценка эффективности жидкостных радиаторов в различных режимах работы // Силовая электроника. 2016. № 2.