

Охлаждение в системах высокой мощности

Развитие силовой электроники связано с постоянно увеличивающимися требованиями повышения плотности мощности, расширения температурного диапазона, уменьшения габаритов. Удельные токовые характеристики кристаллов IGBT за последние 10 лет увеличились в несколько раз, соответственно, возросла и плотность мощности потерь. Дальнейший прогресс технологий силовой электроники возможен только при условии повышения эффективности систем охлаждения, наиболее перспективными из которых считаются жидкостные.

Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

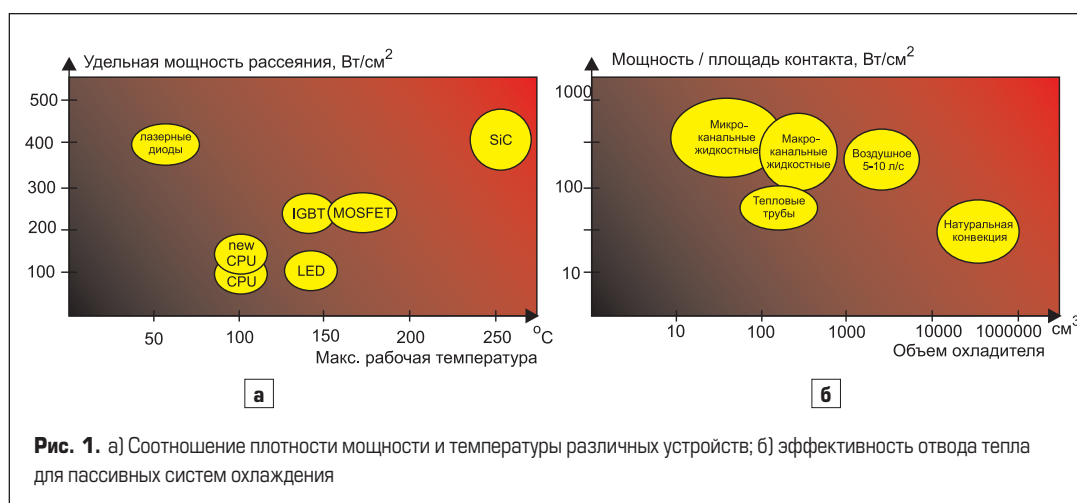
Общие положения

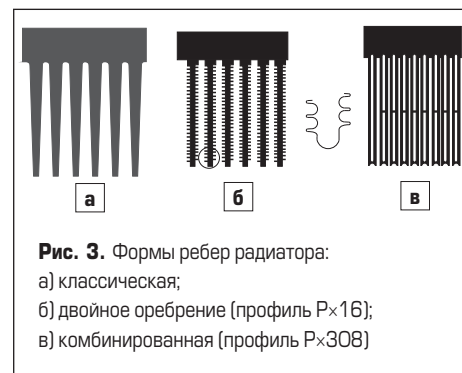
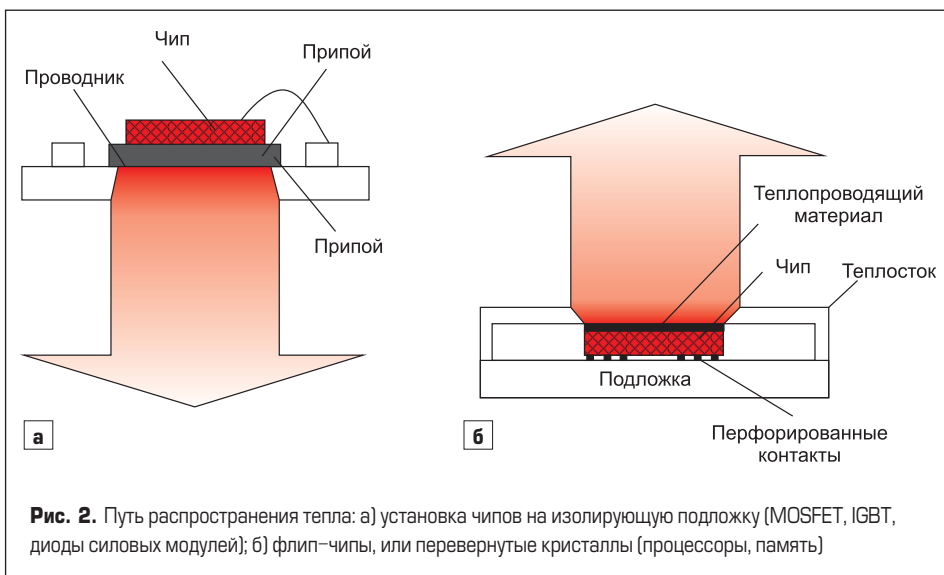
Удельное значение мощности потерь, рассеиваемой в современных силовых модулях, достигает сотен ватт на см^2 , потери на кристаллах скоростных микроконтроллеров оказываются не намного меньше. Новейшие продукты микроэлектроники — мощные лазерные диоды или сверхъяркие светодиоды генерируют в процессе работы еще больше тепла (рис. 1). При этом технологические возможности воздушных систем охлаждения уже близки к своему пределу и в ряде случаев не могут обеспечить достаточно эффективный отвод тепла. Аналогичная ситуация сложилась в свое время в двигателестроении и, как в случае с автомобилями, решить проблему охлаждения преобразователей большой мощности способны системы жидкостного охлаждения.

Пути распространения тепла в полупроводниковых модулях зависят в первую очередь от технологии их сборки и корпусирования. В электронике наибольшее распространение получили методы COB (Chip-On-Board) и Flip-chip, суть которых иллюстрируют схемы на рис. 2. Первая технология

чаще всего применяется в силовых модулях для установки кристаллов IGBT, MOSFET и диодов, вторая — при монтаже микросхем памяти и микроконтроллеров.

Условиями, ограничивающими физические возможности отвода тепла в электронике, являются предельно допустимая температура чипа и максимальный уровень генерируемого тепла на единицу площади. На рис. 1а представлены соотношения плотности мощности и рабочей температуры для различных полупроводниковых приборов. Наибольшие потери мощности создаются лазерными диодами, для них эта величина достигает 400 Вт/см^2 . Температура охлаждающей среды для подобных компонентов не должна превышать $50\text{--}60^\circ\text{C}$. Повышение скорости и производительности микроконтроллеров (CPU) приближает их по тепловыделению к силовым модулям, разница состоит только в более низкой рабочей температуре. Самый широкий температурный диапазон из всех полупроводников имеют новые карбидокремниевые (SiC) чипы, активно внедряемые в изделия силовой электроники.





читать мощностные и токовые характеристики IGBT новых поколений. Значение теплового сопротивления «радиатор–окружающая среда» R_{thsa} для подобных профилей оказывается недопустимо большим даже при оптимальном выборе режима охлаждения, что приводит к перегреву кристаллов. Однако благодаря дешевизне они продолжают находить свое применение при плотности мощности, не превышающей 1000–1500 Вт/м²·К.

Использование новых комбинированных профилей, предназначенных для работы в режиме принудительного воздушного охлаждения (рис. 3б, в), позволяет снизить тепловое сопротивление и повысить эффективность преобразования. Такие радиаторы несколько дороже в производстве, однако их использовании оправдано при плотности мощности более 1000 Вт/м²·К.

На рис. 4 показано примерное соотношение стоимости и эффективности различных способов охлаждения, используемых в промышленности: принудительное воздушное, жидкостное, а также естественная конвекция с применением тепловых труб.

Необходимость в последнем из указанных методов отвода тепла возникает в случае, когда нет возможности использовать жидкость (например, по технологическим причинам) или вентилятор (например, в условиях очень грязных сред). При натуральной конвекции увеличение площади радиатора целесообразно только до определенных пределов, пока тепловая инерция позволяет теплу от создающего его источника распространяться по поверхности радиатора. Применение тепловых

Таблица 1. Сравнительные характеристики систем охлаждения

Охлаждение	Преимущества	Недостатки	Область применения
Принудительное воздушное	Низкая цена, отсутствие утечек	Большой объем, необходимо распределение тепла, высокое тепловое сопротивление, акустические шумы	Практически во всех областях электроники
Жидкостное	Малый объем, гибкая конфигурация, низкое тепловое сопротивление, малый уровень шумов	Необходим компрессор, возможность утечек, высокая цена	Лазерные диоды, силовая электроника
Тепловые трубы	Малый объем, низкое тепловое сопротивление, малый уровень шумов	Ограниченная теплоносущая способность, высокая цена, сложная конструкция	Портативные компьютеры, силовая электроника, космос
Компрессорное	Малый объем, низкое тепловое сопротивление, нет зависимости от окружающей температуры	Высокая цена, сложная конструкция, акустические шумы	Экспериментальные системы, кондиционирование
Термоэлектрическое	Малый объем, низкое тепловое сопротивление, нет зависимости от окружающей температуры	Ограниченная теплоносущая способность, низкая эффективность	Оптоэлектроника
Термоакустическое	Низкое тепловое сопротивление, нет зависимости от окружающей температуры	Отсутствуют разработанные промышленные технологии	Экспериментальные системы для космоса

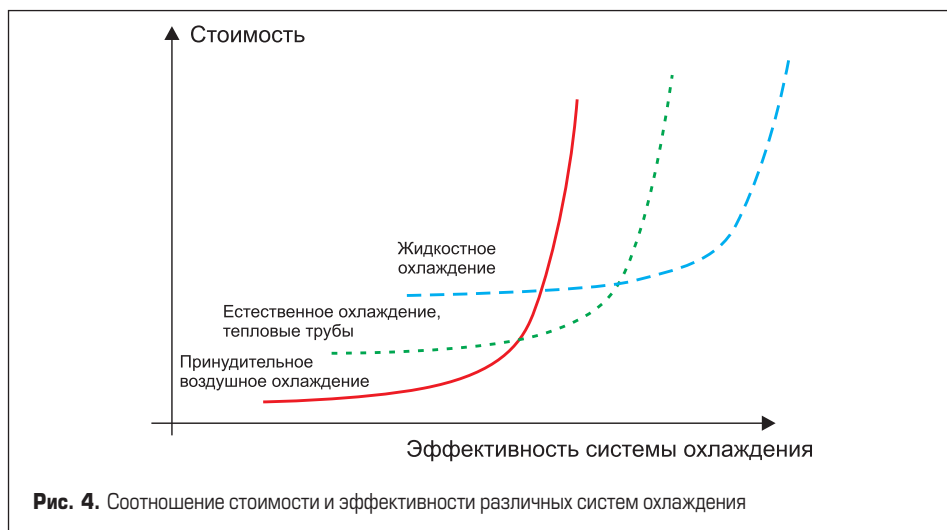
Физические ограничения для систем охлаждения электронных устройств задаются значением максимальной рассеиваемой мощности на единицу контактной площади, температурой охлаждающей среды и габаритными размерами. На рис. 16 в упрощенной форме показаны возможности пассивных схем охлаждения относительно максимальной рассеиваемой мощности, приведенной к площади контакта.

Наибольшим потенциалом при прямом отводе тепла без учета его распределения обладают миниатюрные микроканальные жидкостные охладители. Системы естественного отвода тепла имеют на 2 порядка больший размер даже при меньшей величине удельной рассеиваемой мощности, остальные занимают промежуточное положение между этими двумя.

Эффективность работы пассивных систем охлаждения зависит от температуры окружающего воздуха, активные устройства не имеют жесткого ограничения по этому параметру. В промышленности более всего распространены 2 типа подобных систем: термоэлектрические и компрессорные, проводятся также испытания термоакустических охладителей, предназначенных для работы в космосе. Основные преимущества и недостатки различных технологий отвода тепла рассмотрены в табл. 1.

Достижения технологии IGBT последних лет привели к появлению кристаллов с предельно высокими значениями плотности тока, диапазон их рабочих температур расширен до 175 и даже 200 °С. В результате этого все более возрастает значение теплового перехода «корпус–радиатор», а характеристики системы охлаждения становятся определяющими при проектировании конструкции преобразователя.

Стандартные штампованные радиаторы из алюминиевых сплавов не способны обеспе-



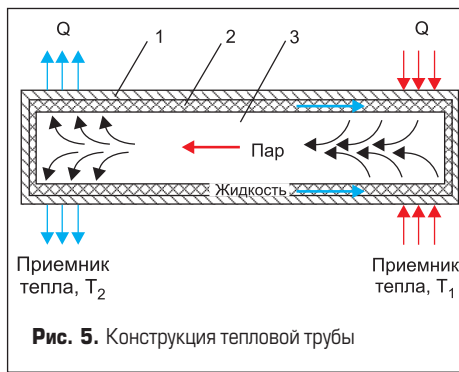


Рис. 5. Конструкция тепловой трубы

труб позволяет многократно увеличить эффективность охлаждения за счет снижения градиента температуры. При меньшем весе и соизмеримых размерах они способны отводить тепла в десятки, а иногда и сотни раз больше, чем любые металлы.

Классическая тепловая труба (рис. 5) представляет собой вытянутый в длину герметичный тонкостенный металлический сосуд (1), внутренние стенки которого выложены капиллярно-пористым материалом, так называемым фитилем (2). Фитиль имеет малую толщину и пропитан рабочей жидкостью. Внутренний объем (3), свободный от фитиля, заполнен паром этой жидкости и является паровым каналом.

Если один конец тепловой трубы подключить к источнику тепла с температурой T_1 , а другой — к приемнику с температурой T_2 ($T_2 < T_1$), при этом будет происходить очень интенсивный теплообмен. Причем количество передаваемого при этом тепла Q оказывается во много раз больше, чем при использовании сплошных стержней, изготовленных, например, из меди или серебра.

Лучшим способом отвода тепла для конверторов мощностью более 1 МВт является жидкостное охлаждение. Кроме высокой эффективности, оно обеспечивает и снижение габаритов преобразовательного устройства.

Жидкостное охлаждение в силовой электронике

Жидкостное охлаждение обладает наилучшими показателями по рассеянию тепла, генерируемого полупроводниковыми устройствами. Основные параметры преобразователя, позволяющие в первом приближении выбрать способ отвода тепла, показаны в табл. 2.

На качество отвода тепла в жидкостных системах охлаждения влияют следующие параметры:

- скорость потока охлаждающей жидкости;
- наличие турбулентности охлаждающей жидкости в канале охлаждения;
- количество каналов охлаждения в радиаторе;
- материал теплоστοка (например, тепловое сопротивление медных радиаторов примерно на 20% ниже, чем алюминиевых);
- соотношение гликоль/вода в охлаждающей жидкости (например, при изменении соотношения вода/гликоль с 50/50 до 90/10% тепловое сопротивление снижается на 35–45%).

Зависимость теплового сопротивления R_{th} от скорости потока V является нелинейной, и, как правило, в реальных системах она опреде-

Таблица 2. Выбор режима охлаждения

Параметры	Воздушное охлаждение	Жидкостное охлаждение
Мощность преобразователя, МВт	<1	>0,5
Коэффициент перегрузки	1,5–2	1,1–1,3
Перегрев на низких частотах $[0,01F_{nom}]$, °C	15	30
Ценообразующие элементы	Вентилятор	Компрессор, тосол, шланги, патрубки

ляется экспериментально. В первом приближении в диапазоне номинальных значений соотношение величин R_{th} при изменении скорости охлаждения V определяется следующим образом:

$$R_{th2} = R_{th1} \times (V_1/V_2)^K,$$

где K — эмпирический коэффициент.

На рис. 6а показано семейство графиков зависимости $R_{th(s-a)} = f(V)$ для 3 типоразмеров радиаторов NWK 40, отличающихся длиной и видом установленных на них модулей SKiiP. Для данной зависимости характерен так называемый «эффект насыщения», когда увеличение скорости потока не приводит к существенному снижению теплового сопротивления. Пользователи программы теплового моделирования SemiSel

могут убедиться, что при увеличении параметра Flow Rate в меню Cooling начиная с некоторого значения прекращается коррекция величины $R_{th(s-a)}$. Например, для теплоστοка NWK 40 максимальное значение Flow Rate — 12 л/мин соответствует величине $R_{th(s-a)} = 0,009$ °C/Вт, что соответствует состоянию насыщения.

Для каждого типа радиатора оптимальная рабочая точка системы охлаждения выбирается на пересечении двух характеристических кривых: описанной выше $R_{th(s-a)} = f(V)$ и зависимости падения гидравлического давления радиатора ΔP от скорости потока. Вариант выбора рабочей точки для теплоστοка NWK 40 длиной 300 мм с 4-элементным модулем SKiiP при использовании 50%-ной смеси вода/гликоль приведен на рис. 6б.

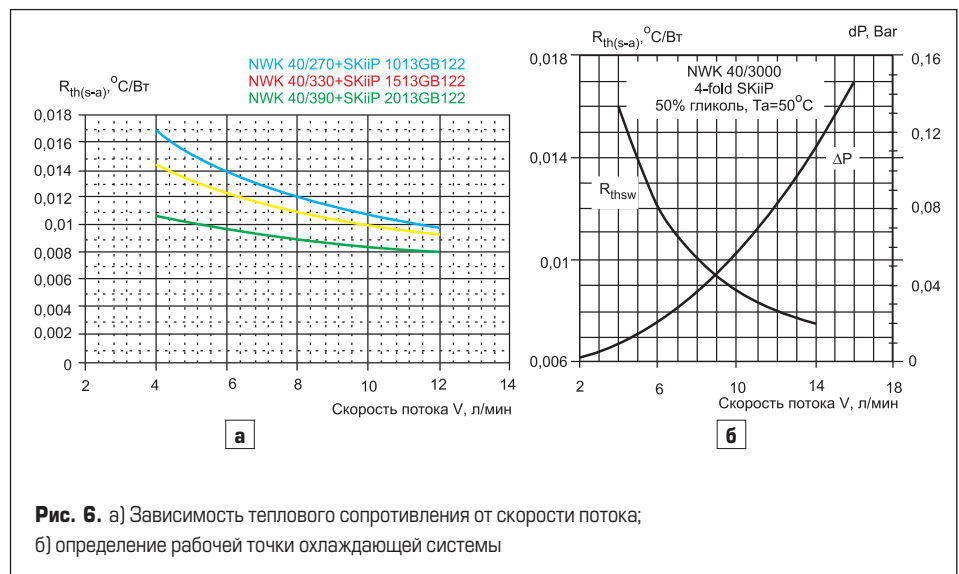


Рис. 6. а) Зависимость теплового сопротивления от скорости потока; б) определение рабочей точки охлаждающей системы

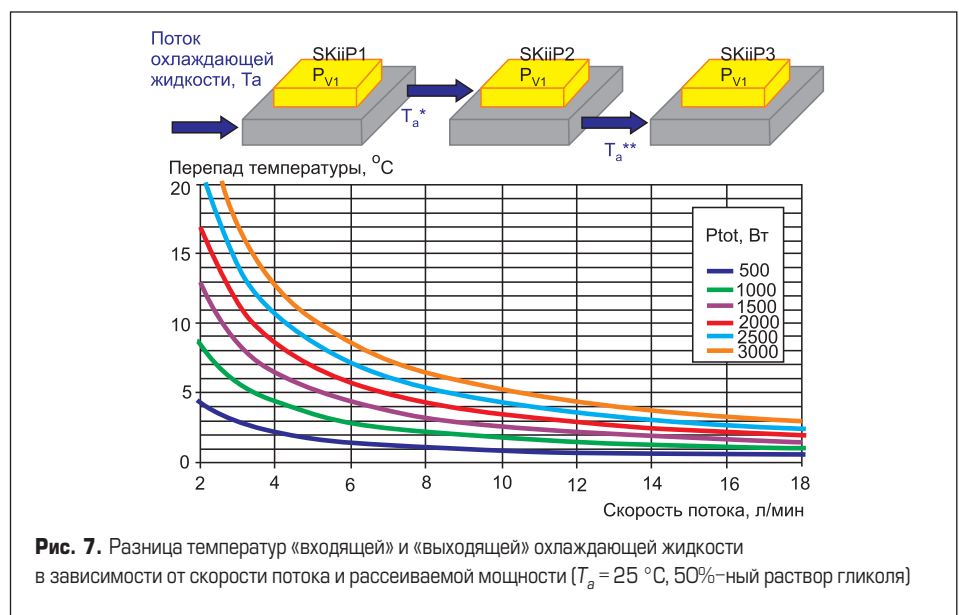


Рис. 7. Разница температур «входящей» и «выходящей» охлаждающей жидкости в зависимости от скорости потока и рассеиваемой мощности ($T_a = 25$ °C, 50%-ный раствор гликоля)

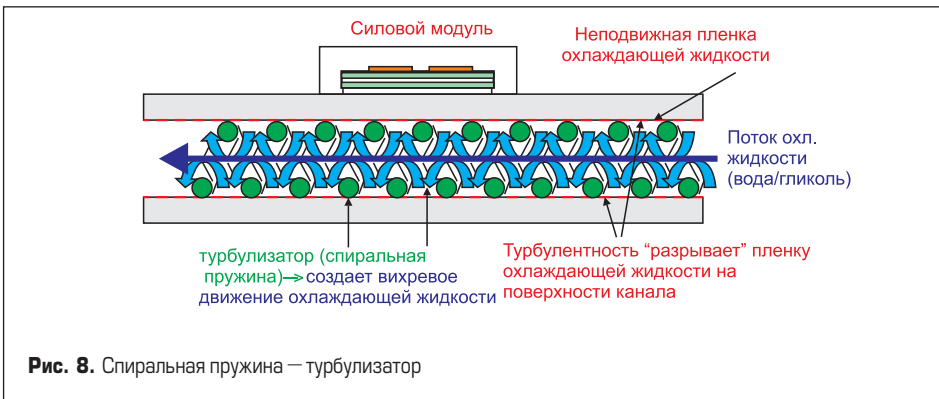


Рис. 8. Спиральная пружина — турбулизатор

В реальных применениях иногда приходится использовать последовательное включение радиаторов, как показано на рис. 7. В этом случае необходимо учесть, что жидкость нагревается по мере прохождения по контуру охлаждения. Расчет «входящей» температуры T_a^* для каждого последующего теплостока производится по следующей формуле:

$$T_a^* = T_a + \frac{(0,0174 - 0,000013 \times C^{-1} \times T_a) \times P_{\text{вн}} \times V_{\text{H}_2\text{O}}}{\min \frac{WL}{n-1}}$$

где T_a — температура «входящей» жидкости, а $P_{\text{вн}}$ — мощность, рассеиваемая n -ым модулем. На графике, приведенном на рис. 7, показано, как разница температур «выходящего» и «входящего» воздуха зависит от скорости потока при различных значениях мощности потерь $P_{\text{вн}}$.

Эффективность работы жидкостного радиатора может быть повышена с помощью различных методов, один из которых показан на рис. 8. Известно, что отводу тепла при данном способе охлаждения препятствует застой жидкости на стенках несущих трубок. Для борьбы с этим явлением используется ряд технологических приемов, один из которых был предложен и запатентован компанией Semikron. Суть метода состоит в размещении цилиндрических спиралей — «турбулизаторов» — в каналах охлаждения. Спиральные пружины разрывают пленку на стенке канала и создают вихревые потоки жидкости, в результате чего тепловое сопротивление радиатора снижается на 15–20%.

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_2O_3 или нитрид алюминия AlN). Отметим, что у модулей SKiiP предусмотрено оба типа теплоотводов и оба типа керамики, тепловые модели всех версий включены в базу данных программы теплового расчета SemiSel.

Как показано на рис. 9, способ отвода тепла в свою очередь может влиять на выбор мате-

риала керамической подложки модуля. В режиме воздушного охлаждения основная часть теплового сопротивления приходится на составляющую $R_{\text{th}(s-a)}$ «тепlostок-окружающая среда». В этом случае, как видно по рисунку, переход на более дорогой нитрид алюминия дает небольшой выигрыш. Ситуация полностью меняется при использовании жидкостного охлаждения, когда вклад сопротивления $R_{\text{th}(j-s)}$ «кристалл-тепlostок» становится намного больше. В этом случае применение нитрида алюминия позволяет существенно уменьшить температуру кристаллов T_j .

Как правило, для организации защиты от перегрева используется термодатчик, установленный на DBC-плате силового модуля (как это сделано в SKiiP) или на радиаторе с температурой T_s . Порог срабатывания системы защиты должен быть выбран с учетом используемого способа охлаждения.

На рис. 10 показаны основные элементы структуры «безбазового» модуля SKiiP с жидкостным охлаждением: радиатор, силовой каскад на подложке из нитрида алюминия и плата управления с сигнальным разъемом. На этом же рисунке поясняется принци-

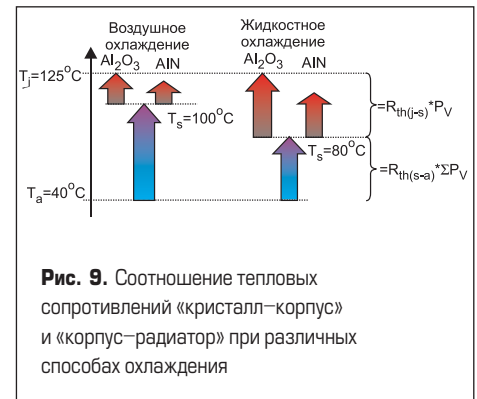


Рис. 9. Соотношение тепловых сопротивлений «кристалл-корпус» и «корпус-радиатор» при различных способах охлаждения

альная разница конструкций прижимного силового ключа SKiiP и стандартного модуля с базовой платой. Приведенные в табл. 3 данные свидетельствуют о том, что исключение базы и связанное с этим уменьшение толщины слоя теплопроводящей пасты позволяет снизить суммарное значение теплового сопротивления «кристалл-радиатор» более чем на 30% по сравнению с модулем стандартной конструкции. Для иллюстрации выбраны компоненты с близкими номинальными характеристиками и габаритными размерами.

Заключение

В 2009 г. дизайнерский центр Semikron представил новую платформу на базе интеллектуальных силовых ключей SKiiP (рис. 11), предназначенную для использования в конверторах энергетических станций. Модульная конструкция, выбор режима охлаждения и возможность параллельного соединения базовых блоков позволяют использовать компоненты платформы для разработки преобразователей мощностью от 450 кВт до 2,5 МВт. Основные характеристики системы приведе-

Таблица 3. Сравнительные тепловые характеристики модулей стандартной и прижимной конструкции (рабочее напряжение 1700 В)

Тип модуля	Конфигурация	Ток коллектора I_C , А @ 80 °С	$R_{\text{th}(j-c)}$, °С/Вт	$R_{\text{th}(c-s)}$, °С/Вт	$R_{\text{th}(j-s)}$, °С/Вт
2403GB172-4DW	Полумост IGBT	1800	-	-	0,013
FZ2400R17KE3	Одиночный IGBT	2400	0,008	0,009	0,017

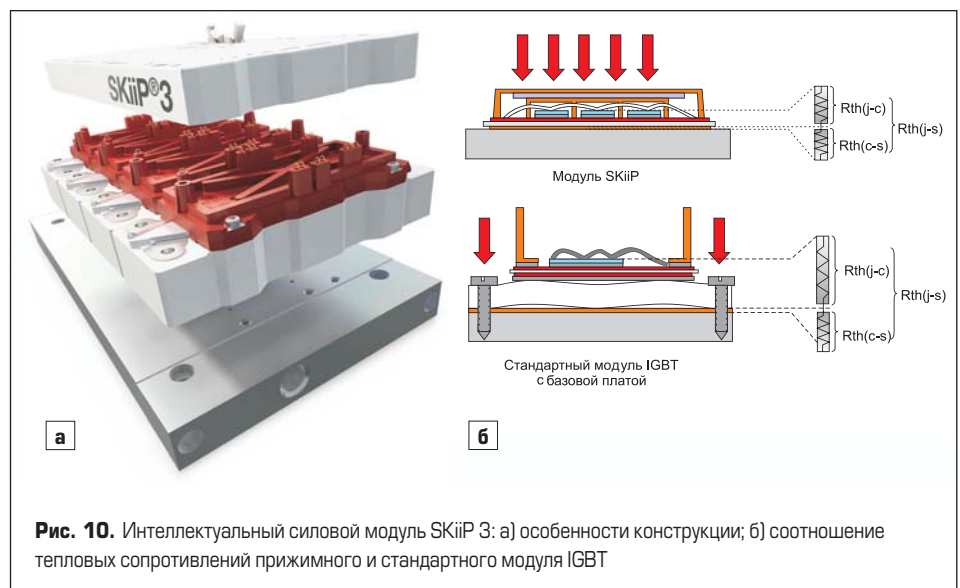


Рис. 10. Интеллектуальный силовой модуль SKiiP 3: а) особенности конструкции; б) соотношение тепловых сопротивлений прижимного и стандартного модуля IGBT



Рис. 11. а) SKiiP RACK — базовый конструктив 4-квadrантного преобразователя; б) внешний вид ячейки с жидкостным радиатором

ны в табл. 4. Новая разработка ориентирована в первую очередь на возобновляемые источники энергии, такие как ветроэнергетические и солнечные установки, а также малые гидроэлектростанции.

Дизайн единичного модуля платформы SKiiP RACK позволяет ему работать в режиме воздушного и жидкостного охлаждения. Способ отвода тепла и конфигурация всей системы выбираются пользователем в зависимости от вида источника энергии и требуемой мощности.

Сборка SKiiP RACK включает все необходимые элементы монтажа, она может постав-

Таблица 4. Основные характеристики базовой платформы SKiiP RACK

Тип генератора	Воздушное охлаждение				Жидкостное охлаждение			
	1,5 МВт		2,5 МВт		1,5 МВт		2,5 МВт	
DFIG*	SKiiP в параллель	I_{out} , А	SKiiP в параллель	I_{out} , А	SKiiP в параллель	I_{out} , А	SKiiP в параллель	I_{out} , А
Выпрямитель	1	600	2	1100	1	470	1	950
Инвертор	1	420	1	720	1	525	1	820
SG**	SKiiP в параллель	I_{out} , А	SKiiP в параллель	I_{out} , А	SKiiP в параллель	I_{out} , А	SKiiP в параллель	I_{out} , А
Выпрямитель	1	1440	3	2160	1	1350	2	2400
Инвертор	1	1500	3	2250	1	1350	2	2400

* — DFIG (Double Fed Induction Generator) — асинхронный генератор с двойным возбуждением;
 ** — SG (Synchronous Generator) — синхронный генератор.

ляться на раме или в шкафу в виде полностью законченной конструкции, имеющей силовые терминалы питания и выходов, а также штуцеры для подключения жидкостной системы охлаждения. Конструкция сборки содержит 3 вертикально расположенные ячейки, каждая из которых состоит из двух фазных блоков. Вес ячейки 26 кг, в звене постоянного тока применены полипропиленовые конденсаторы ELECTRONICON общей емкостью 3–5 мФ.

В режиме воздушного охлаждения SKiiP RACK дает возможность формировать 4-квadrантную систему мощностью до 1,5 МВт, вся сборка размещается в стандартном шкафу размером 600×600×1400 мм. При параллельном соединении ячеек с жидкостным охлаждением общая мощность инвертора достигает 2,5 МВт. В настоящее время в разработке на-

ходится платформа на базе компонентов SKiiP четвертого поколения, которая должна позволить увеличить токовые характеристики на 15–20% в тех же габаритах.

Литература

1. Schultz-Harder J. Liquid cooling in high density packages. www.curamik.com.
2. Freyberg M., Scheuermann U. Measuring Thermal Resistance of Power Modules // PCIM Europe journal. 2003.
3. Thermal Considerations in the Application of Silicon Rectifier. IR Designer's Manual. 1991.
4. Calculation of the Maximum Virtual Junction Temperature Reached Under Short-time or Intermittent Duty. IEC 60747-6 by Semikron.