

Охлаждение силовых модулей:

оценка эффективности жидкостных радиаторов в различных режимах работы

В процессе эксплуатации силовые полупроводниковые приборы генерируют тепло, которое необходимо отвести, обеспечив минимальный перегрев кристаллов относительно окружающей среды. В зависимости от конкретных условий эксплуатации для этой цели используется принудительное воздушное или жидкостное охлаждение. Первый способ, как правило, применяется в системах малой и средней мощности, не имеющих внешнего теплообменника. Преимуществом жидкостных радиаторов является более высокая эффективность отвода тепла, необходимая в преобразователях мегаваттного диапазона.

В данной части статьи анализируется зависимость динамического теплового импеданса радиатора $Z_{th(s-a)}$ от скорости потока, состава и температуры охлаждающей жидкости. Дано обобщенное определение параметра $Z_{th(s-a)}$, рассмотрен разработанный SEMIKRON способ его оценки с учетом влияния различных факторов.

Мэрион Кинд
(Marion Kind)

Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Динамический тепловой импеданс

Стандартные значения динамического теплового импеданса $Z_{th(s-a)}$ приводимые в спецификациях SEMIKRON, нормированы для определенной скорости потока, состава охлаждающей жидкости (50% воды и 50% этиленгликоля G48 GLYSANTIN BASF) и ее температуры.

Величина Z_{th} определяется двумя факторами, первым из которых является разница внутренней «виртуальной» температуры электронного компонента и температуры в заданной внешней контрольной точке в конце определенного периода времени. На графике Transient thermal impedance в технической документации SEMIKRON этот интервал времени обозначается как длительность импульса проводимости t_p . Также Z_{th} является функцией изме-

нения мощности потерь, обеспечивающего данный перепад температур.

Основное ограничение предельных режимов силовых полупроводников — максимальная температура кристалла T_{jmax} . Величина стационарного теплового сопротивления R_{th} необходима для расчета параметров в установившемся состоянии. Динамический тепловой импеданс Z_{th} позволяет проанализировать состояние системы в переходных режимах для конкретного профиля нагрузки.

Таким образом, $Z_{th(x-y)}$ определяется как изменение температуры между контрольными точками $X(T_X)$ и $Y(T_Y)$, произошедшее за некоторый промежуток времени и разделенное на величину «функционального» градиента рассеиваемой мощности. Для «безбазовых» модулей SEMIKRON SKiP в спецификациях приведены типовые значения $R_{th(j-s)}$ и $Z_{th(j-s)}$. Для стандартных модулей с базовой платой в технической документации определяются максимальные значения параметров кристаллов $R_{th(j-s)}$ и $Z_{th(j-s)}$ и типовая величина теплового сопротивления «корпус–радиатор» — $R_{th(c-s)}$. Жидкостные радиаторы характеризуются значением $R_{th(s-a)}$ при различных скоростях потока тосола (измеряемых в литрах в минуту) и $Z_{th(s-a)}$ при его номинальном расходе (для заданной концентрации гликоля и температуры жидкости).

Положение контрольных точек измерения T_j , T_s и T_a у «безбазовых» модулей показано на рис. 1:

- T_j определяется как средняя температура на поверхности одного кристалла или нескольких параллельных чипов;

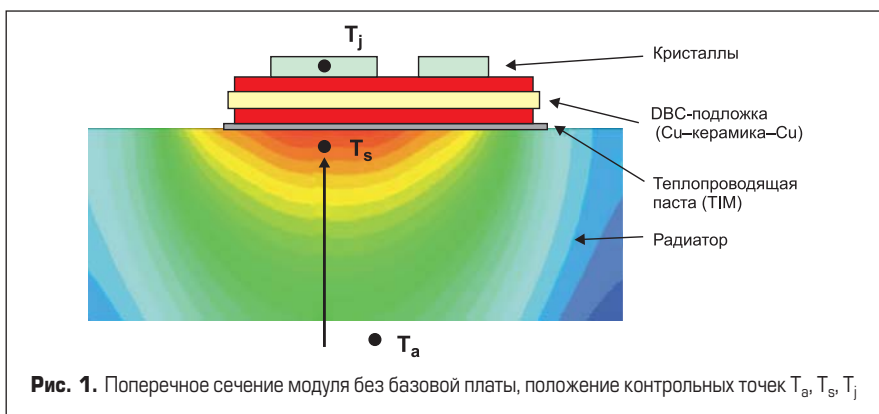


Рис. 1. Поперечное сечение модуля без базовой платы, положение контрольных точек T_a , T_s , T_j

- T_s измеряется под каждым чипом тестируемого модуля; датчик устанавливается в отверстие, заканчивающемся в 2 мм от поверхности тепловода [2];
- T_a — температура окружающей среды, в рассматриваемом случае — жидкости во впускном отверстии радиатора.

Тепловое сопротивление $R_{th(j-s)}$ определяется как разность средней температуры наиболее нагретого кристалла (или группы параллельных чипов) и средней температуры радиатора (измеренной под этими же кристаллами), деленная на мощность, рассеиваемую данным силовым модулем в стационарном режиме (AN14004) [3].



Рис. 2. Модуль SKiIP 1814 GB17E4 – 3DUV с жидкостным охлаждением (радиатор NHC)

Таблица 1. Условия охлаждения при измерении тепловых характеристик

Скорость потока V, л/мин	Концентрация гликоля G, %	Температура охлаждающей жидкости T _{ст} , °C
2,5	10	10
5	30	70
10	50	Н. д.*
15	70	Н. д.
20		Н. д.

Примечание: Н. д. — нет данных.

интеллектуального модуля SKiIP 1814 GB17E4 с жидкостным радиатором NHC (рис. 2). Конструктивно прибор состоит из трех полумостовых элементов, верхний (TOP) и нижний (BOT) ключи каждого из которых содержат по восемь параллельно включенных кристаллов IGBT. При проведении измерений все шесть плеч соединяются последовательно, чтобы протекающий в них ток был одинаковым. Для реализации такой схемы следует изменить логику управления, заложив в оригинальных драйверах затворов. В частности, необходимо отключить функцию INERLOCK, предназначенную для предотвращения сквозного пробоя. Ток нагрузки задается источником, подключенным к шести последовательно соединенным IGBT. Измерение падения напряжения производится только на самом «горячем» из них, таким образом, находится максимальная средняя температура восьми параллельных чипов. Величина T_s определяется под этими кристаллами по методике, описанной выше, ее среднее значение используется для расчета $R_{th(j-s)}/Z_{th(j-s)}$.

Зависимость теплового сопротивления $R_{th(s-a)}$ от скорости потока V

Для улучшения отвода тепла проще всего повысить расход жидкости. Это приводит к увеличению скорости прохождения тосола, усилению турбулентности или переходу от ламинарного потока к турбулентному. На рис. 3–5 показана зависимость теплового сопротивления $R_{th(s-a)}$ от скорости потока V,

Стационарная температура T_s измеряется термопарой, однако ее медленная реакция не позволяет анализировать переходные процессы с достаточной точностью. Аналитически величина $Z_{th(s-a)}$ может быть найдена как разность измеренного значения $Z_{th(j-a)}$ (по методу $V_{CE-}(T)$) и расчетного значения $Z_{th(j-s)}$.

Методика определения $Z_{th(j-s)}$ разработанная SEMIKRON, состоит в измерении $R_{th(j-s)}$ и формировании переходной кривой с помощью метода конечных элементов (FEM), или метода аппроксимации. Результаты измерений $R_{th(j-s)}$ и $Z_{th(j-a)}$ позволяют подтвердить точность имитационной FEM-модели, которая в дальнейшем используется для нахождения $Z_{th(j-s)}$.

Способ аппроксимации основан на определении временного отклика $Z_{th(j-a)}$ и адаптации полученной кривой в соответствии с величиной теплового сопротивления $R_{th(j-s)}$. Далее импеданс $Z_{th(s-a)}$ может быть рассчитан по формуле (1):

$$Z_{th(s-a)}(V, G, T_a) = Z_{th(j-a)}(V, G, T_a) - Z_{th(j-s)} \quad (1)$$

где $Z_{th(j-a)}$ — измеренное значение для одного или нескольких режимов охлаждения; $Z_{th(j-s)}$ — смоделированное или расчетное значение, независимое от условий охлаждения (табл. 1).

Анализ тепловых режимов для различных условий охлаждения проводился на примере

Результаты расчетов и измерений

Для измерения T_j чаще всего используется бессенсорный метод, называемый $V_{CE-}(T)$ и основанный на известном физическом соотношении между прямым падением напряжения и температурой $p-n$ -перехода. В IGBT существует линейная зависимость напряжения насыщения $V_{CE(sat)}$ при малом фиксированном токе от температуры кристалла. Для формирования калибровочной кривой прибор нагревается от внешнего источника до состояния теплового равновесия при различных температурах. Затем измеряются T_j и напряжение насыщения при пропуске через транзистор небольшого стабилизированного тока. Полученный график позволяет определить температуру кристалла по соответствующей величине $V_{CE(sat)}$.

При измерении тепловых сопротивлений R_{th}/Z_{th} полупроводниковый прибор нагружается определенным током. На затвор IGBT подается номинальное напряжение включения $V_{GE} = 15$ В, силовой модуль нагревается до равновесного состояния, после чего нагрузка быстро снимается и записывается величина $V_{CE(sat)}$ при подаче калибровочного тока (кривая охлаждения). Отметим, что этот метод пригоден только для измерения температуры кристаллов IGBT и диодов.

К сожалению, очень трудно определить тепловой импеданс радиатора $Z_{th(s-a)}$ непосред-

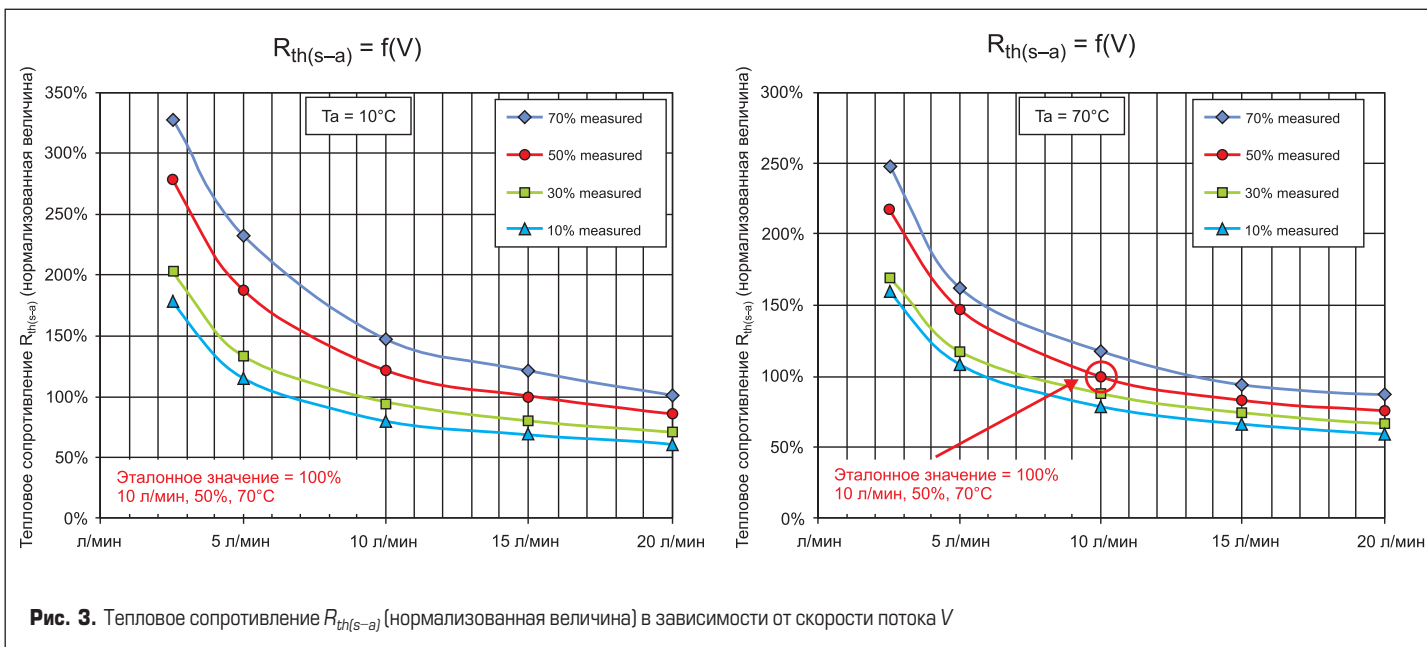


Рис. 3. Тепловое сопротивление $R_{th(s-a)}$ (нормализованная величина) в зависимости от скорости потока V

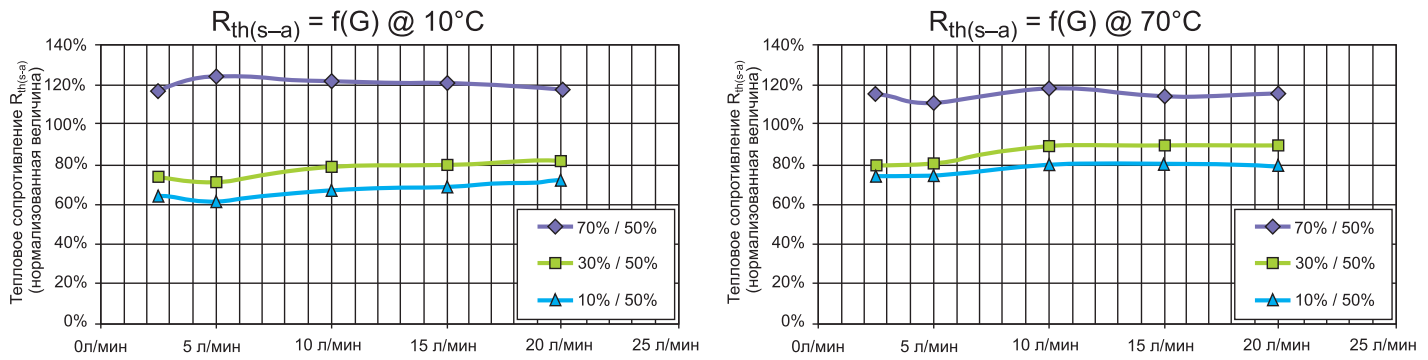


Рис. 4. Тепловое сопротивление $R_{th(s-a)}$ (нормализованная величина) при различной концентрации гликоля

концентрации гликоля G и температуры T_a . Кривые имеют вид гиперболической функции, следовательно, чем больше V , тем ниже величина $R_{th(s-a)}$. Однако при дальнейшем увеличении расхода жидкости улучшение теплового сопротивления становится все менее ощутимым, как видно из рис. 3.

Зависимость теплового сопротивления $R_{th(s-a)}$ от концентрации гликоля G

Во многих практических применениях невозможно использовать чистую воду для охлаждения из-за риска ее замерзания и возможности возникновения коррозионных процессов. Для решения этой задачи в жидкость добавляются этиленгликоль и соответствующие ингибиторы коррозии. Выбор концентрации гликоля, прежде всего, зависит от минимальной рабочей температуры.

Выделяемое при работе электронных компонентов тепло нагревает жидкость, которая должна охлаждаться с помощью теплообменника. Для поддержания постоянной температуры тосола на его выходе (т. е. на входе радиатора) температура «внешней» среды в теплообменнике должна быть ниже заданного значения T_a .

Уменьшение содержания гликоля приводит к уменьшению эффективности работы радиатора, поскольку эта добавка снижает охлаждающую способность жидкости. Динамическая вязкость гликоля выше, чем у воды. Она обратно пропорциональна числу Рейнольдса Re ,

которое является основной характеристикой турбулентного потока (больше число $Re \rightarrow$ больше турбулентность \rightarrow выше коэффициент теплоотдачи). Кроме того, теплопроводность гликоля прямо пропорциональна коэффициенту теплопередачи и удельной теплоемкости. Она, в свою очередь, пропорциональна числу Прандтля Pr и, следовательно, коэффициенту теплоотдачи, который у гликоля хуже, чем у воды.

Напомним, что число Прандтля — один из критериев подобия тепловых процессов в жидкостях и газах, учитывающий влияние физических свойств теплоносителя на теплоотдачу:

$$Pr = \nu/\alpha = \eta c_p/\chi,$$

где ν — кинематическая вязкость; η — динамическая вязкость; χ — коэффициент теплопроводности; α — коэффициент температуропроводности; c_p — удельная теплоемкость среды при постоянном давлении.

Число Прандтля связано с другими критериями подобия — числом Пекле Pe и числом Рейнольдса Re — соотношением $Pr = Pe/Re$. На рис. 4 показано влияние концентрации гликоля на нормализованную (по отношению к 50%) величину $R_{th(s-a)}$.

Зависимость теплового сопротивления $R_{th(s-a)}$ от температуры тосола T_a

Влияние температуры тосола на эффективность охлаждения и, следовательно, на $R_{th(s-a)}$

объясняется тепловой зависимостью физических свойств жидкости. Теплопроводность воды с нагревом увеличивается, а гликоля — уменьшается (в диапазоне 0...100 °C), но у смеси 40% гликоля и 60% воды этот показатель почти не зависит от температуры. Удельная теплоемкость чистой воды практически постоянна, для тосола 50/50 она увеличивается с ростом температуры, но всегда остается ниже, чем у воды.

Еще одним важным фактором, характеризующим охлаждающую способность жидкости, является динамическая вязкость η . У чистой воды она ниже, чем у гликоля, кроме того, этот параметр является термозависимым. С нагревом значение уменьшается, что приводит к увеличению числа Рейнольдса и, соответственно, к повышению коэффициента теплопередачи.

В левой части рис. 5 показан график зависимости нормализованной величины $R_{th(s-a)}$ (10/70 °C) от скорости потока при разных значениях G . Данный показатель уменьшается с ростом V , т. е. чем больше интенсивность охлаждения, тем меньше влияние температуры. Это также означает, что отношение $R_{th(s-a)_{10^\circ C}}/R_{th(s-a)_{70^\circ C}}$ падает с увеличением расхода жидкости.

График в правой части рисунка демонстрирует связь между нормализованным тепловым сопротивлением и концентрацией гликоля. При увеличении G отношение $R_{th(s-a)_{10^\circ C}}/R_{th(s-a)_{70^\circ C}}$ также возрастает.

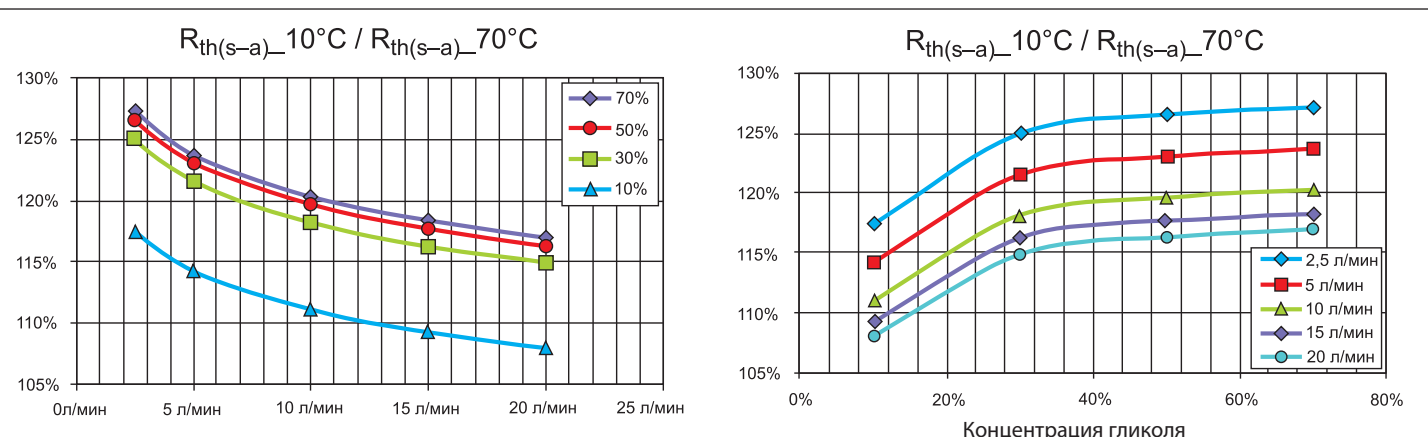
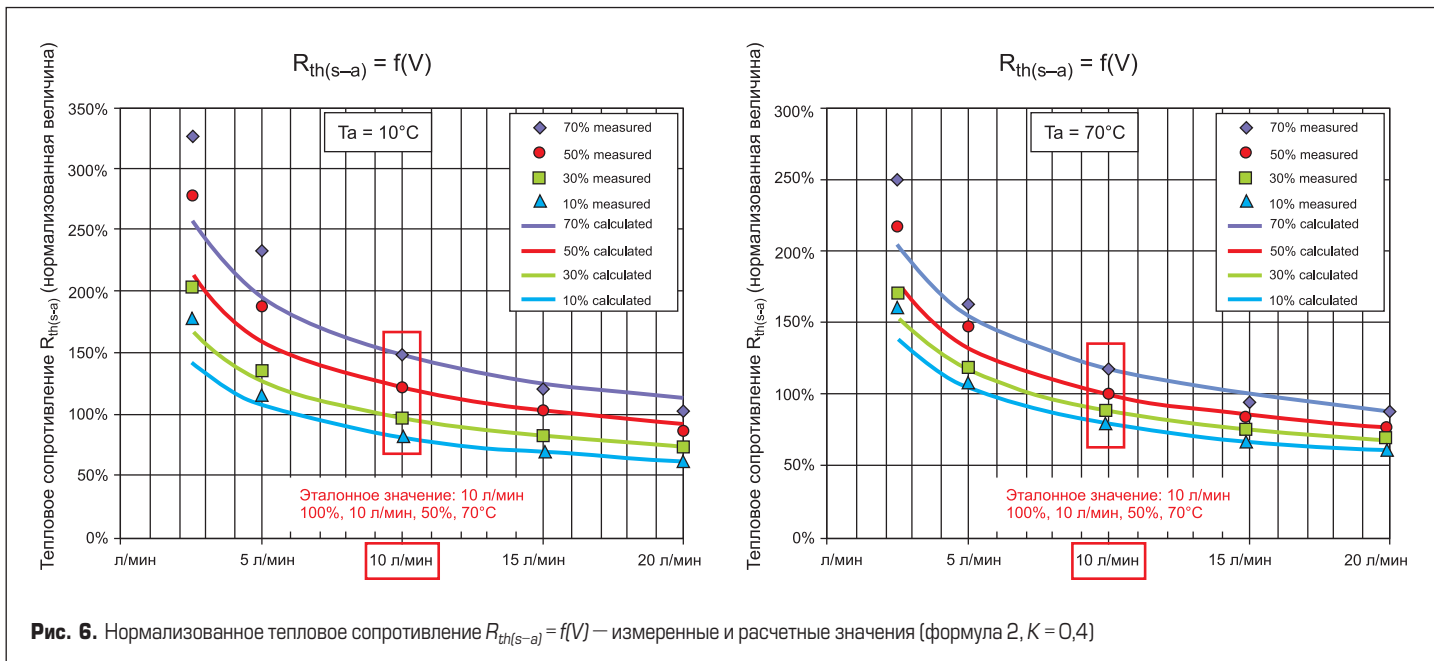


Рис. 5. Нормализованное тепловое сопротивление $R_{th(s-a)}$ (10/70 °C) при различной концентрации гликоля и скорости потока



Расчет $R_{th(s-a)}$ и $Z_{th(s-a)}$ с учетом совокупности факторов

Влияние отдельных параметров на $R_{th(s-a)}$ описано выше. Если свести комбинацию этих факторов в общую формулу, это позволит найти отклонение теплового сопротивления от номинального значения при различных условиях охлаждения.

Величина $R_{th(s-a)}$ определяется скоростью потока V , концентрацией гликоля G и температурой жидкости T_a . Расход тосола в свою очередь зависит от его концентрации и температуры. С другой стороны, величина G по-

стоянна, а температура T_a является функцией G и V . В табл. 2 показано обобщенное влияние всех указанных факторов на $R_{th(s-a)}$.

В работе [2] приведена простая формула для расчета $R_{th(s-a)}$ при разных значениях V :

$$R_{th(s-a)_{V_2}} = R_{th(s-a)_{V_1}} \times \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^K, \quad K = 0,3...0,5 \quad (2)$$

При таком диапазоне изменения показателя степени K вариации теплового сопротивления оказываются очень большими. Поэтому желательно выработать более точный критерий оценки, учитывающий концентрацию гликоля и температуру жидкости. На рис. 6 показаны нормализованные кривые $R_{th(s-a)}$ для измеренных и расчетных значений (формула 2, $K = 0,4$).

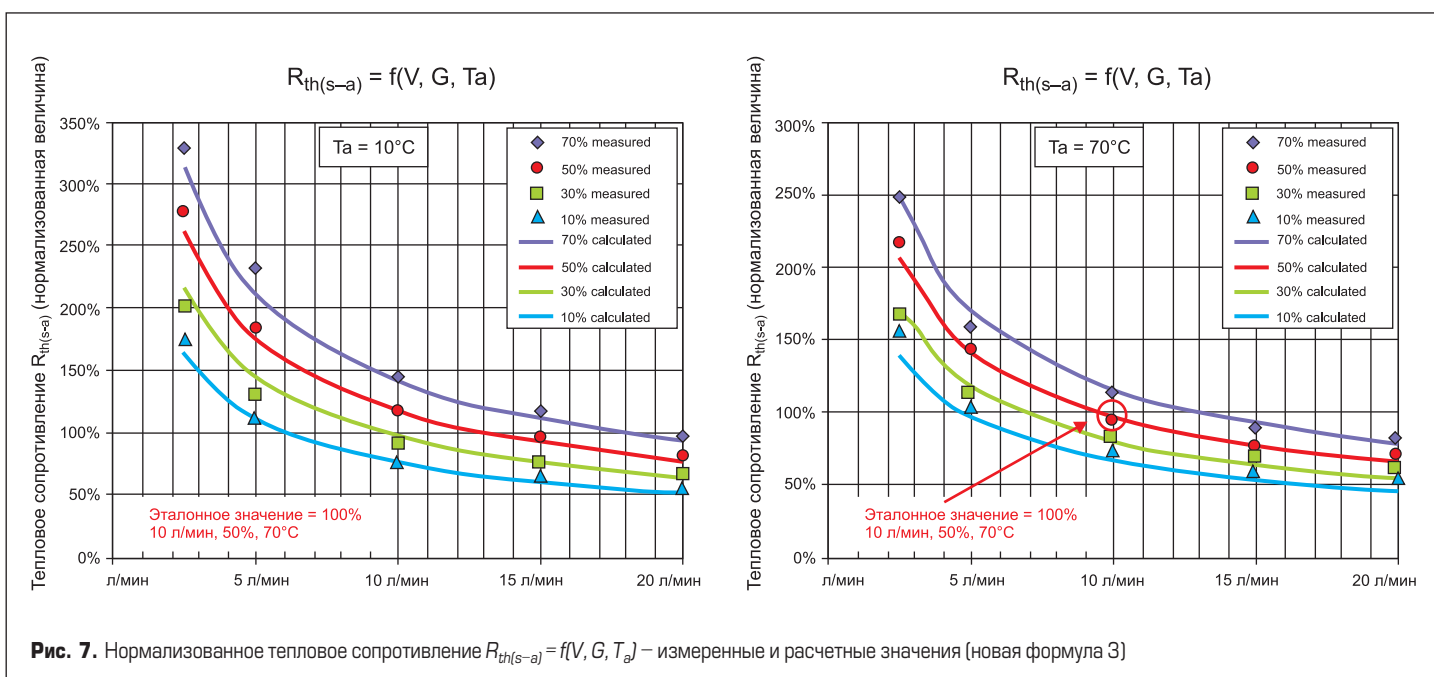
Величины, соответствующие расходу жидкости 10 л/мин для каждого варианта концентрации и температуры жидкости, используются в качестве эталонных. Сравнение показывает, что расчетные значения R_{th} для различных скоростей потока не всегда соответствуют результатам измерений, особенно при малом расходе жидкости. Кроме того, влияние параметров V и T_a здесь не учитывается.

Кривые, представленные на рис. 7, получены с помощью выражения, связывающего скорость потока, концентрацию гликоля, а также температуру тосола. Оно позволяет получить все необходимые данные с помощью только одного измерения (при $V = 10$ л/мин, $G = 50\%$, $T_a = 70^\circ\text{C}$).

Новая формула (3) для расчета $R_{th(s-a)}$, учитывающая расход жидкости, ее состав и температуру, может быть использована в рамках следующих ограничений: V : 2...30 л/мин; G : 10...90%; T_a : 10...90 °C.

Таблица 2. Влияние V, G и T_a на $R_{th(s-a)}$

Скорость потока V	Концентрация гликоля G	Температура жидкости T_a
V	++	++
G	/	0
T_a	+	++



$$R_{th(s-a)}(V, G, T_a) = SF \times R_{th(s-a)}(V_{ref}, G_{ref}, T_{aref}) \times \left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{Exp(V)} \times 0,92^{\frac{G_{ref}[\%]-G[\%]}{10\%}} \times \left(\frac{T_{aref}}{T_a}\right)^{Exp(T)}, \quad (3)$$

SF = 1...1,1 (коэффициент запаса).

$$Exp(V) = 0,51 + 0,0085 \times \left(1 - \frac{G_{ref}[\%]}{G[\%]}\right) - 0,0067 \times \left(\frac{T_{aref}}{T_a}\right),$$

$$Exp(T) = 0,092 + 0,0085 \times \left(1 - \frac{G_{ref}[\%]}{G[\%]}\right).$$

Коэффициент SF использован для создания некоторого запаса надежности. Если эталонное значение $R_{th(s-a)}$ находится далеко от требуемой рабочей точки, то рекомендуемое значение SF = 1,1. Параметр $R_{th(s-a)}(V_{ref}, G_{ref}, T_{aref})$ во второй части формулы представляет собой измеренное (эталонное) значение теплового сопротивления из документации SEMIKRON. Третий компонент формулы предназначен для учета расхода жидкости.

Показатель степени в формуле более не является постоянной величиной (0,3-0,5), теперь он зависит от концентрации гликоля и температуры жидкости. Влияние концентрации учитывается в четвертом компоненте формулы. Ее последняя составляющая описывает воздействие температуры тосола на $R_{th(s-a)}$, а показатель степени здесь является функцией параметра G. Влияние расхода жидкости на температурную экспоненту незначительно.

В случае если один из параметров (V, G, T_a) не изменяется относительно эталонного значения, соответствующая часть формулы не оказывает влияния на расчетное значение $R_{th(s-a)}$.

Динамические тепловые процессы в документации фирмы SEMIKRON описываются с помощью модели Фостера (подробное объяснение можно найти в руководстве Application Manual Power Semiconductors [2]). Математическая модель Фостера выглядит следующим образом:

$$Z_{th(x-y)} = R_{th1} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{th1}}}\right) + R_{th2} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{th2}}}\right) + \dots + \sum_{i=1}^n R_{thi} \times \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{thi}}}\right), \quad (4)$$

τ_{th} — тепловая постоянная времени; n — количество «пар» R_{th}/τ_{th} .

Динамический тепловой импеданс $Z_{th(s-a)}$ определяется с помощью совокупности пар параметров R_{th}/τ_{th} , соответствующих каждому конкретному тепловому состоянию. Для последующих расчетов определены эталонные значения $R_{th,ref,i}$ и $\tau_{th,ref,i}$. Чтобы найти $Z_{th(s-a)}$ для различных усло-

вий охлаждения, необходимо поменять оба параметра — R_{thi} и τ_{thi} , что изменяет не только стационарную величину теплового сопротивления $R_{th(s-a)}$, но и время реакции.

Приведенные далее формулы предназначены для расчета R_{thi} и τ_{thi} при различных условиях охлаждения. Эти показатели должны быть отсортированы по увеличению тепловых постоянных времени ($\tau_{th,ref,i} < \tau_{th,ref,(i+1)}$, $i = 1 \dots n$).

Величина $R_{th(s-a)}(V, G, T_a)$ определяется по формуле (3), в которой:

$$R_{th1} = R_{thref,1}; \text{ если } R_{thref,1} \times \frac{R_{th(s-a)}}{R_{th(s-a)ref}} < 0,5 R_{th(s-a)},$$

$$R_{th1} = R_{thref,i}; \text{ если } \sum_1^i R_{thi} = \sum_1^i R_{thref,i} \times \frac{R_{th(s-a)} - \sum_1^{i-1} R_{thi}}{R_{th(s-a)ref} - \sum_1^{i-1} R_{thref,i}} < 0,5 R_{th(s-a)}; i > 1,$$

$$R_{th1} = R_{thref,1} \times \frac{R_{th(s-a)}}{R_{th(s-a)ref}}; R_{th1} \neq R_{thref,1},$$

$$R_{thi} = R_{thref,i} \times \frac{R_{th(s-a)} - \sum_1^{i-1} R_{thi}}{R_{th(s-a)ref} - \sum_1^{i-1} R_{thref,i}};$$

$$R_{thi} \neq R_{thref,i}; i > 1,$$

$$R_{th(s-a)} = \sum_{i=1}^n R_{thi}.$$

Только при достижении половины величины $R_{th(s-a)}$ происходит адаптация соотношения R_{th}/τ_{th} к новому тепловому сопротивлению $R_{th(s-a)}$. Если параметры R_{thi} меняются, то и значения τ_{thi} будут соответствующим образом скорректированы.

$$\tau_{thi} = \tau_{thref,i}; \text{ если } R_{thi} = R_{thref,i},$$

$$\tau_{thi} = \tau_{thref,i} \times \left(\frac{V_{ref}}{V}\right)^{0,7} \times 0,92^{\frac{G_{ref}[\%]-G[\%]}{10\%}} \times \left(\frac{T_{aref}}{T_a}\right)^{0,2};$$

$$\text{если } R_{thi} = R_{thref,i}.$$

Пример расчета

Ниже приведен пример расчета на основе представленных формул. В качестве эталонных использованы номинальные технические характеристики модуля SKiP 1814 GB17E4-3DUW. В табл. 3 и 4 приведены справочные значения $R_{th(s-a)}$ и $Z_{th(s-a)}$, а также параметры, относящиеся к эталонным и заданным условиям охлаждения (рис. 8).

Таблица 3. Эталонные и заданные условия охлаждения, $R_{th(s-a)}$

	V, л/мин	G, %	T _{ар} , °C	R _{th(s-a)} , К/Вт
Эталонные	15	50	40	0,0087
Заданные	5	30	70	?

Таблица 4. Z_{th(s-a)}: справочные значения при номинальных условиях охлаждения (элементы модели Фостера)

i*	R _{th,ref,ir} К/Вт	τ _{th,ref,ir} с
1	0,0065	5,27
2	0,0022	17,9

Примечание: * — τ_{th,ref,i} < τ_{th,ref,(i+1)}.

Отметим, что справочные значения $R_{th,ref,i}$ и $\tau_{th,ref,i}$ имеющие порядок i, часто сортируются по-разному.

Расчет R_{th(s-a)} (SF = 1)

$$R_{th(s-a)}(5 \text{ л/мин}, 30\%, 70^\circ\text{C}) = 1 \times 0,0087 \text{ К/Вт} \times \frac{15 \text{ л/мин}^{0,501}}{5 \text{ л/мин}} \times 0,92^{\frac{50\%-30\%}{10\%}} \times \left(\frac{40^\circ\text{C}}{70^\circ\text{C}}\right)^{0,086} = 0,0122 \text{ К/Вт};$$

$$Exp(V) = 0,51 + 0,0085 \times \left(1 - \frac{50\%}{30\%}\right) - 0,0067 \times \left(1 - \frac{40\%}{70\%}\right) = 0,501;$$

$$Exp(T) = 0,092 + 0,0085 \times \left(1 - \frac{50\%}{30\%}\right) = 0,086.$$

Расчет Z_{th(s-a)}

$$R_{th1} = 0,0065 \text{ К/Вт} \times \frac{0,0122 \text{ К/Вт}}{0,0087 \text{ К/Вт}} = 0,00911 \text{ К/Вт};$$

$$R_{th2} = 0,0022 \text{ К/Вт} \times \frac{0,0122 \text{ К/Вт} - 0,00911 \text{ К/Вт}}{0,0087 \text{ К/Вт} - 0,0065 \text{ К/Вт}} = 0,0031 \text{ К/Вт};$$

$$\tau_{th1} = 5,27 \text{ с} \times \left(\frac{15 \text{ л/мин}}{5 \text{ л/мин}}\right)^{0,7} \times 0,92^{\frac{50\%-30\%}{10\%}} \times \left(\frac{40^\circ\text{C}}{70^\circ\text{C}}\right)^{0,2} = 8,6;$$

$$\tau_{th2} = 17,9 \text{ с} \times \left(\frac{15 \text{ л/мин}}{5 \text{ л/мин}}\right)^{0,7} \times 0,92^{\frac{50\%-30\%}{10\%}} \times \left(\frac{40^\circ\text{C}}{70^\circ\text{C}}\right)^{0,2} = 32.$$

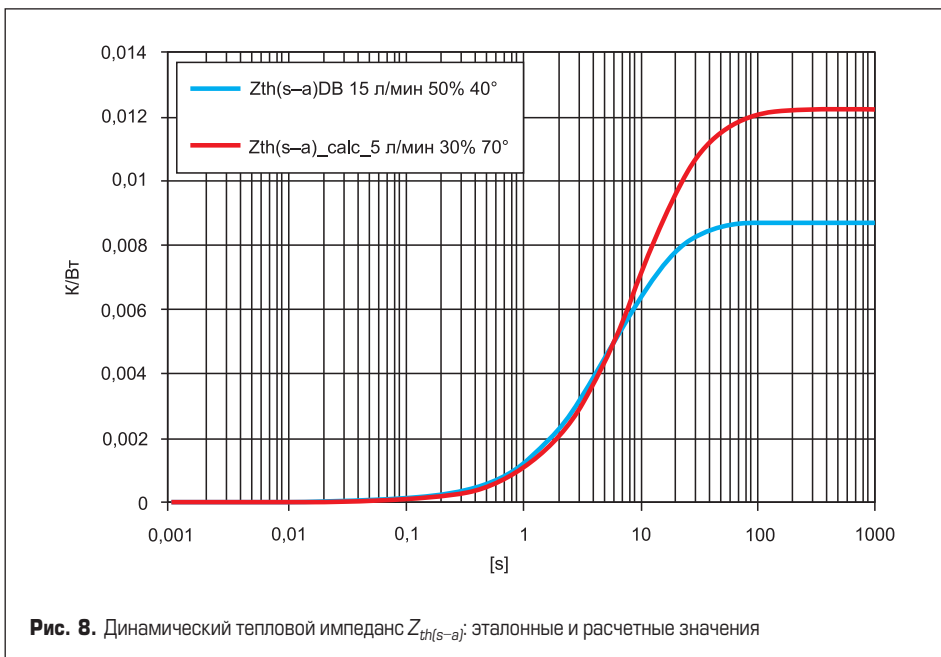


Таблица 5. Пример расчета $Z_{th(s-a)}$ для заданных условий охлаждения

i	R_{thij} , К/Вт	τ_{thij} , с
1	0,0091	8,6
2	0,0031	32

что у ключей величина теплового сопротивления $R_{th(j-a)}$ «кристалл–охлаждающая жидкость» ниже примерно на 30% при аналогичной токовой нагрузке.

На рис. 9 представлена конструкция силовой секции модуля SKiiP-X, терминалы которого также подключены к изолирующей подложке методом спекания. Это позволило заметно поднять их токонесущую способность и обеспечить более надежный механический контакт (по сравнению с пайкой или ультразвуковой сваркой). Шины звена постоянного тока секций соединяются сваркой, что обеспечивает минимальные габариты и высокую надежность изделия, делая компоненты семейства SKiiP-X оптимальными для применения в компактных преобразователях мегаваттного диапазона. В концепции SKiiP-X сконцентрированы все основные преимущества SKiN-технологии: компактность, оптимальные тепловые характеристики, минимальное значение распределенных индуктивностей.

Габаритные размеры базовой секции SKiiP-X с номинальным током 540 А составляют 260×115×45 мм. Несмотря на то, что здесь использован интегрированный канал отвода тепла, все электрические цепи физически отделены от области прохождения тосола. Диагональное направление потока обеспечивает равномерное и независимое охлаждение зон локального тепловыделения, результатом чего является низкое значение теплового сопротивления. Выбор направления протекания жидкости в параллельных SKiN-секциях, а также оптимизация соотношения площади охлаждаемых зон и падения давления позволили добиться равномерного отвода тепла даже в максимальной конфигурации SKiiP-X (девять базовых блоков). При этом суммарный перепад давления на каждом охладителе не превышает 400 мбар.

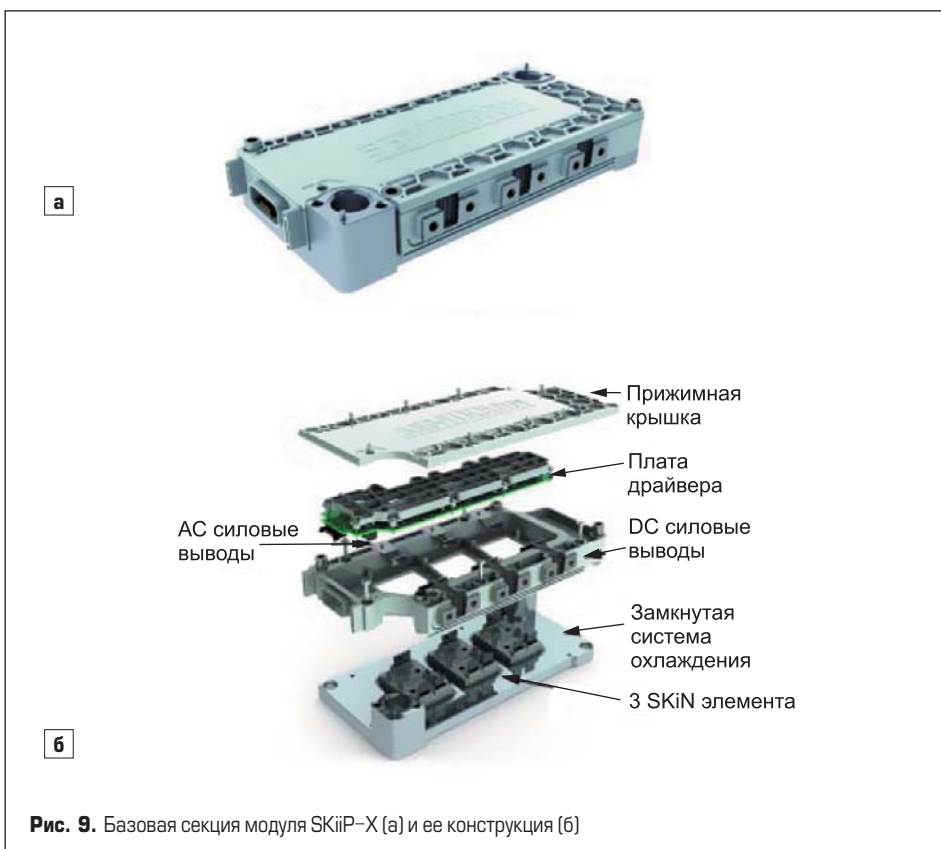
SKiiP-X — новое решение системы жидкостного охлаждения

В 2014 г. компания SEMIKRON представила новое поколение силовых интеллектуальных модулей SKiiP-X, выполненных по технологии SKiN [10]. Для отвода тепла в них использован высокоэффективный игольчатый жидкостный радиатор, соединенный с изолирующей подложкой методом низкотемпературного спекания.

Максимальная величина мощности рассеяния полупроводникового модуля ограничена допустимым перегревом кристаллов T_p , температурой охлаждающей среды T_a и со-

противлением «кристалл–окружающая среда» $R_{th(j-a)}$. В тепловой модели стандартного силового ключа с жидкостным охлаждением основной вклад в общее значение $R_{th(j-a)}$ вносит слой терморасты (до 30%). У модулей SKiN эта проблема разрешена путем спекания изолирующей DBC-подложки с теплоотводом. Мелкозернистый серебряный слой отличается высокой теплопроводностью и механической эластичностью, что обеспечивает хорошую стойкость к термоциклированию.

Сравнение характеристик стандартных «многослойных» конструкций с базовой платой с характеристиками силовых ключей, выполненных по SKiN-технологии, показывает,



На рис. 10 показан 3-фазный модуль SKiiP-X в максимальной комплектации, включающей девять силовых секций и общую интерфейсную плату для связи с контроллером, установленную сверху. На фронтальной стороне расположены АС-выводы, а терминалы для подключения звена постоянного тока размещены на задней. Класс защиты от климатических воздействий увеличен до 3К4 (степень загрязнения 3) по стандарту ЕС 60721, что обеспечивает модулю возможность длительной эксплуатации в жестких климатических условиях.

Заключение

Жидкостное охлаждение силовых полупроводниковых модулей, как правило, используется в преобразователях высокой мощности в энергетике и на транспорте. Оно необходимо для снижения перегрева кристаллов, увеличения плотности мощности и, в итоге, повышения ресурса изделия.

Представленные в статье формулы для расчета $R_{th(s-a)}$ и $Z_{th(s-a)}$ позволяют учесть отклонение параметров системы охлаждения (ско-

рости потока, концентрации гликоля, температуры жидкости) от номинальных величин, приведенных в технической документации. Очень важно оценить возможности теплоотвода на этапе проектирования, до изготовления прототипа и измерения его реальных параметров. Испытания, подтверждающие соответствие результатов моделирования и измерений тепловых режимов, необходимы в любом случае. Однако высокая достоверность предварительных расчетов позволяет существенно снизить временные и финансовые затраты на разработку и сократить время выхода изделия на рынок.

Фирма SEMIKRON планирует использовать описанную выше методику в программе Semisel для повышения точности моделирования статических и переходных тепловых режимов.

Литература

1. AN1501, SEMIKRON Application Note. 2015-10-16.
2. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Application Manual Power Semiconductors // ISLE Verlag. 2011. ISBN 978-3-938843-666.
3. Wintrich A. AN1404: Thermal resistance of IGBT Modules – specification and modelling // www.SEMIKRON.com
4. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Application Notes for IGBT and MOSFET modules // SEMIKRON International. 2010.
5. Schultz-Harder J. Liquid cooling in high density packages // www.curamik.com
6. Freyberg M, Uwe Scheuermann // Measuring Thermal Resistance of Power Modules / PCIM Europe journal. 2003.
7. Calculation of the Maximum Virtual Junction Temperature Reached Under Short-time or Intermittent Duty // IEC 60747-6 by SEMIKRON.
8. Wintrich A., Nicolai U., Tursky W., Reimann T. Application Manual Power Semiconductors // ISLE Verlag. 2011. ISBN 978-3-938843-666.
9. Wintrich A. AN1404: Thermal resistance of IGBT Modules – specification and modelling // www.SEMIKRON.com
10. Колпаков А. SKiiP X — силовой интеллектуальный модуль XXI века // Силовая электроника. 2014. № 4.