

Интеграция в IPM функции вычисления в реальном времени

температуры полупроводникового перехода

Для силовых приборов температура их полупроводникового перехода T_{vj} является одной из основных технических характеристик в их спецификации, которая накладывает жесткие ограничения на безопасно допустимый уровень выходной мощности, т. е. формирует область безопасной работы силового модуля. С целью достижения максимальной плотности мощности системы ее компоненты проектируются с возможностью работы при максимально допустимых температурах переходов, принимая во внимание условия перегрузки. Превышение указанных максимальных температур перехода может привести к повреждению чипов силовых полупроводниковых приборов, сокращению срока службы или даже к мгновенному отказу не только их самих, но и конечного оборудования в целом.

**Штефан Шмис
(Stefan Schmies)**

stefan.schmies@infineon.com

**Д-р Питер Лал
(Dr. Peter Lahl)**

peter.lahl@infineon.com

**Вольфрам Крюшель
(Wolfram Kruschel)**

wolfram.kruschel@infineon.com

**Маттиас Лассманн
(Matthias Lassmann)**

matthias.lassmann@infineon.com

**Перевод:
Владимир Рентюк**

Обычно температура DCB-подложки (Direct Copper Bonding, DCB — буквально «прямое присоединение меди» — технология получения толстых (127–500 мкм) медных проводников на керамических подложках, а также сами подложки такого типа) в силовых и интеллектуальных силовых модулях (Intelligent Power Modules, IPM) измеряется с помощью термистора с отрицательным температурным коэффициентом (Negative Temperature Coefficient, NTC). В результате имеется либо большая неопределенность в измерениях, если приложение использует температурный мониторинг только на основе температуры NTC, либо приложение должно иметь подробную информацию по всем тепловым сопротивлениям и возможность выполнять расчет

непосредственно для текущей температуры полупроводникового перехода, причем в реальном времени.

Принимая во внимание современные тенденции ко все большей интеграции, следует отметить большое преимущество и в интеграции систем определения температуры полупроводниковых переходов непосредственно в IPM. Это позволяет приложению самому считывать температуру перехода, а уже затем сам IPM непосредственно может управлять температурой полупроводникового перехода и генерировать предупреждающие сигналы, а также отключаться еще до превышения заданных критических температур, которые при текущем рабочем токе и напряжении выводят модуль за область его безопасной работы (Safe Operating Area, SOA).

Однако проблема заключается в том, что здесь желательно не просто выполнить расчет температуры полупроводникового перехода, а выполнить его на килогерцовых рабочих частотах модуля, что обеспечивает наблюдение за конкретной температурой в условиях перегрузки, при снижении входного напряжения — характерном явлении, например, для инверторов, используемых в системах ветроэнергетики.

Авторы статьи представляют инновационный подход, обеспечивающий в режиме реального времени точный расчет температур полупроводникового перехода для элементов полумостового IPM. Расчет основан на использовании поперечных тепловых моделей и данных о потерях мощности в полупроводниковых приборах, которые были получены при применении подхода, известного в технике как метод DoE (Design of Experiment — «проект эксперимента») — теоретическая проработка с использованием данных экспериментальных исследований. Такой подход позволяет осуществить поиск оптималь-



Рис. 1. MIPAQ Pro — полумостовой IPM, использованный для создания модели и вычисления температуры полупроводникового перехода T_{vj} в реальном времени [1]

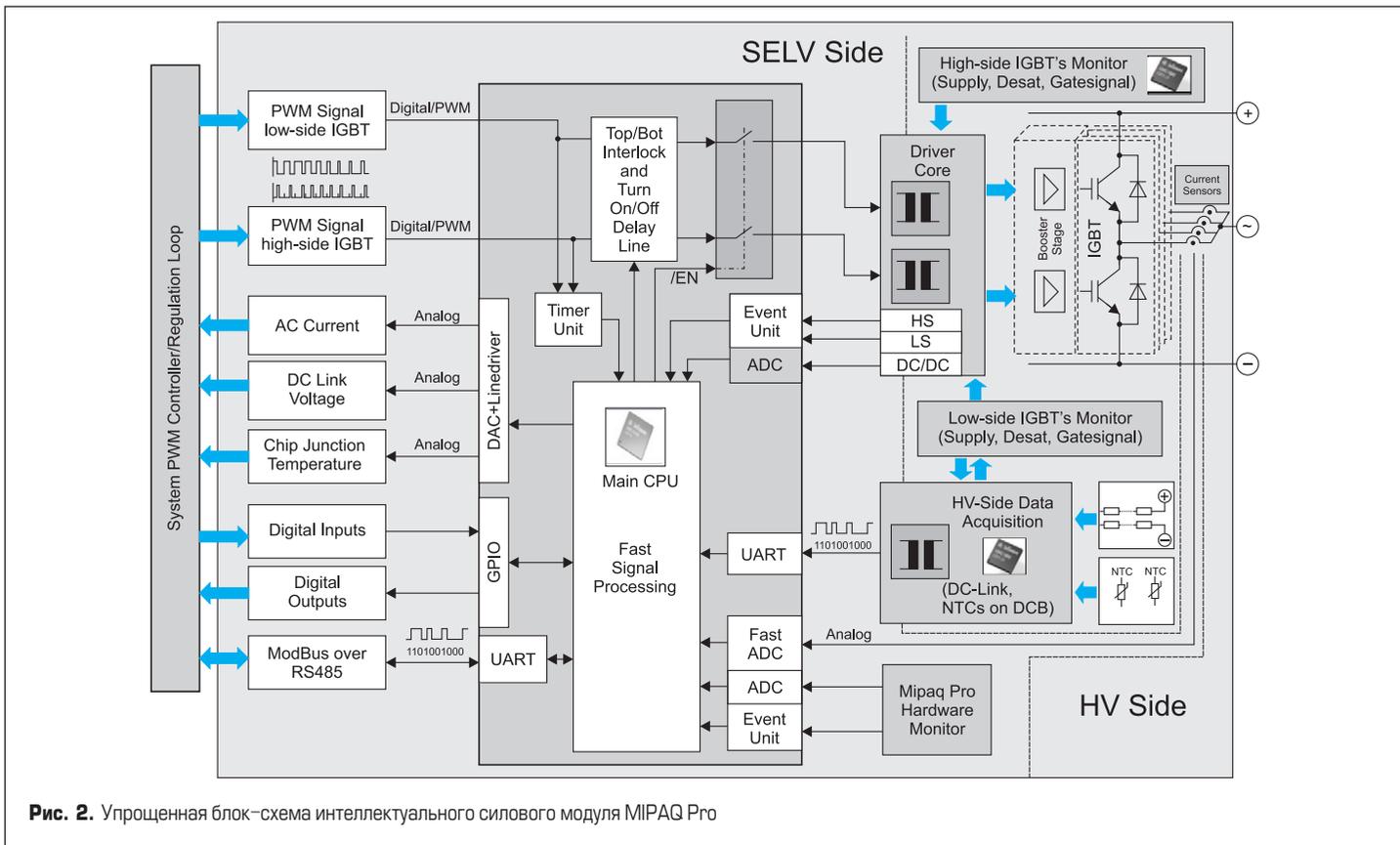


Рис. 2. Упрощенная блок-схема интеллектуального силового модуля MIPAQ Pro

ных условий, построение необходимых интерполяционных формул, выбор значимых факторов. Он также открывает широкие возможности для оценки и уточнения констант теоретических моделей. Для целей данного эксперимента использовался интеллектуальный силовой полумостовой IPM MIPAQ Pro производства компании Infineon Technologies

AG (Германия), внешний вид которого показан на рис. 1.

Организация системы получения данных в IPM

Входные данные для расчета температуры полупроводникового перехода (T_{vj}) би-

полярного транзистора с изолированным затвором (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) и его диода основаны на измерениях в реальном времени и фиксированных данных, полученных в соответствии с текущими параметрами функционирования IPM, а именно: напряжения шин постоянного тока (DC-Link), шин переменного тока, температу-

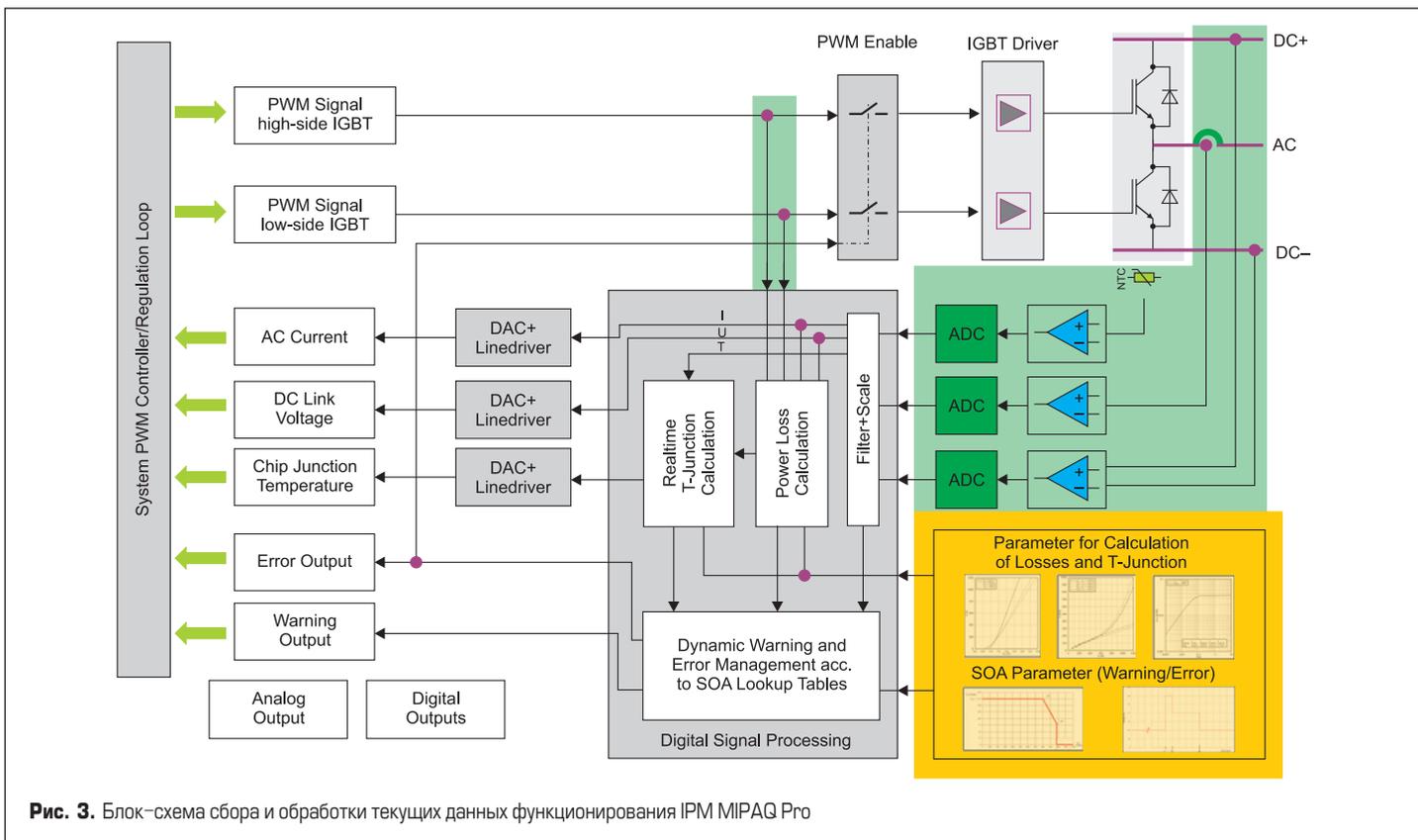
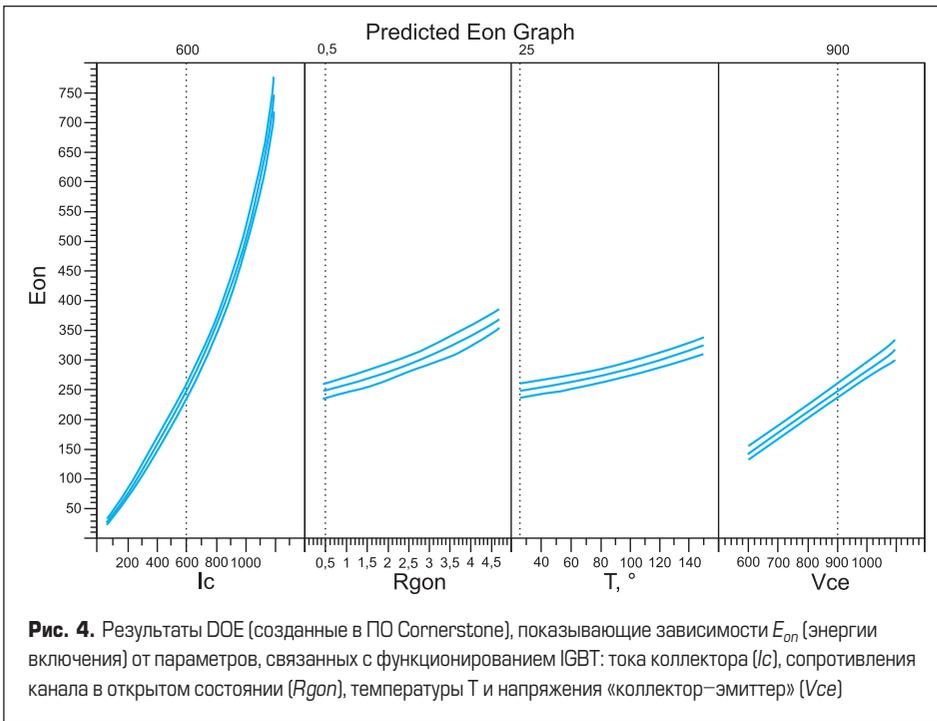


Рис. 3. Блок-схема сбора и обработки текущих данных функционирования IPM MIPAQ Pro



ры DCB-подложки и параметров импульсов широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Все они измеряются в реальном времени (рис. 2). Что же касается динамических потерь и потерь проводимости диодов и IGBT, то они зависят от конкретной настройки непосредственно самого приложения и требуют расчета.

С этой целью все упомянутые выше параметры функционирования IPM объединены для поимпульсного вычисления потерь мощности диода и IGBT (рис. 3).

Расчет потерь мощности в IPM

Потери мощности в IGBT и диоде рассчитываются для каждой коммутации и интервала проводимости. Для достижения этой цели были определены зависимости динамических и статических потерь от токов, напряжений и температуры по методу DoE [2]. Полученные данные о потерях мощности моделируются при помощи кубической модели (Cubic Model), включающей в себя все связанные параметры. С использованием определенной таким образом кубической модели рассчитываются потери для конкретного IPM.

Вычисления потерь мощности при максимально допустимой температуре перехода вполне достаточно для соблюдения заданных SOA пределов, поскольку температурные коэффициенты используемых силовых транзисторов являются положительными. Однако при достаточной производительности используемого микроконтроллера кубическая модель определения потерь может также быть использована и для точного расчета температуры перехода при более низких, предельных рабочих температурах. Результаты, полученные при реализации описываемого подхода, и их начальная обработка приведены на рис. 4 и 5.

Чтобы вычислить коммутационные потери IGBT и диодов, как это показано для E_{on} на рис. 4, требуется микроконтроллер, способный выполнять вычисления с плавающей запятой. Для обработки измерений в реальном времени и для удовлетворения потребностей в вычислительной мощности авторами исследования был выбран микроконтроллер компании Infineon семейства XMC4500. Данный 32-разрядный микроконтроллер выполнен на базе ядра ARM Cortex-M4 и работает на частоте 120 МГц. Для расчета параметра T_{vj} на рабочих частотах, лежащих в килогерцовой области, вычисленные, из расчета на один ключ, потери суммируются для каждого IGBT и диода в виде временной последовательности дискретных значений.

Расчет температуры полупроводникового перехода T_{vj}

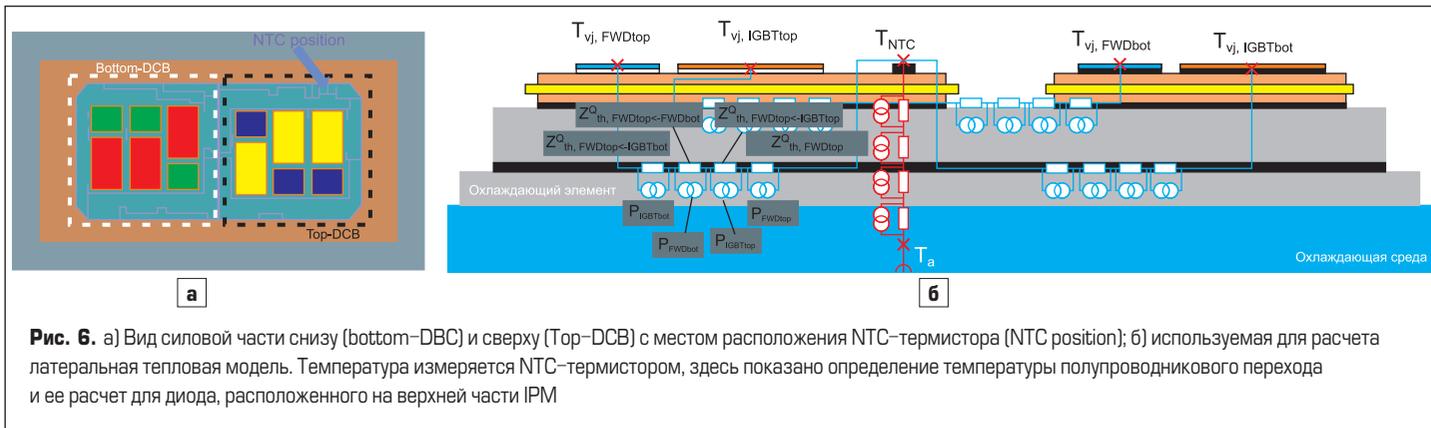
Тепловая модель

Расчет температуры перехода начинается от точки установки NTC-термистора, который располагается на DCB-подложке, как показано на рис. 6а. Далее используется по-

IGBT Eon	Cubic Model				
	Input				Output
	Rg	T	Ic	Vce	Eon
	[Ohm]	[°C]	[A]	[V]	[mJ]
	0,5	25	600	900	247,02
Min	0,45	25	60	600	
Max	4,7	150	1200	1100	
Midpoint	2,575	87,5	630	850	
Term	-9,765E-01	-1E+00	-5,263E-02	2E-01	

	Koeff.	Koeff* Term
Constant	1,79E+01	1,79E+01
T[°]	1,266E+00	-1,266E+00
Rg_on	2,574E+00	-2,514E+00
Vce	4,131E+00	8,263E-01
Ic	1,206E+01	-6,346E-01
T[°]^2	2,502E-01	2,502E-01
T[°]*Vce	4,579E-01	-9,159E-02
Ic*T[°]	2,398E+00	1,262E-01
Rg_on^2	4,487E-01	4,278E-01
Rg_on*Vce	5,475E-01	-1,069E-01
Ic*Rg_on	2,246E+00	1,155E-01
Vce^2	-3,381E-01	-1,352E-02
Ic*Vce	2,79E+00	-2,936E-02
Ic^2	2,559E+00	7,088E-03
Ic*Rg_on*T[°]	1,358E-01	-6,981E-03
Ic*T[°]*Vce	2,78E-01	2,926E-03
Ic^2*T[°]	1,909E+00	-5,288E-03
Rg_off^3	-7,805E-01	7,267E-01
Ic*Rg_on*Vce	6,009E-01	6,176E-03
Ic^2*Rg_on	4,893E-01	-1,324E-03
Ic*Vce^2	-3,107E-01	6,54E-04
Ic^2*Vce	1,598E-01	8,856E-05
Ic^3	2,969E+00	-4,329E-04
sum		1,572E+01
sum^2		2,47E+02

Рис. 5. Перенос вычисленных для E_{on} коэффициентов, полученных с использованием Cornerstone, в лист электронной таблицы Excel



перечная тепловая модель, позволяющая рассчитать температуру перехода транзистора и диода, основываясь на значении температуры NTC-термистора и соответствующих величинах.

Для обеспечения максимально высокой точности измерения здесь учитываются и недиагональные элементы Z-матрицы, которые соответствуют перекрестной связи между IGBT и диодами. Эти матричные элементы тем более важны, чем больше расстояние между NTC-термистором и чипами по сравнению с расстоянием между кристаллами. Каждый элемент Z-матрицы, а также вектор мощности зависят от времени, представляя динамическое поведение IPM.

На рис. 6б изображена тепловая модель, представленная эквивалентной сетью элементов передачи тепла.

Особенности выбранной тепловой модели содержатся в членах матрицы, которые описывают разность температур между NTC-термистором и IGBT или диодом соответственно результату вычисления вектора потерь мощности. Температуры определяются для IGBT и диода индивидуально. Таким образом, в тепловой модели объединены все три чипа, показанные на рис. 6а.

$$\begin{pmatrix} T_{IGBTbot} \\ T_{FWDbot} \\ T_{IGBTtop} \\ T_{FWDtop} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{th,IGBTbot}^Q & Z_{th,IGBTbot \leftarrow FWDbot}^Q & Z_{th,IGBTbot \leftarrow IGBTtop}^Q & Z_{th,IGBTbot \leftarrow FWDtop}^Q \\ Z_{th,FWDbot \leftarrow IGBTbot}^Q & Z_{th,FWDbot}^Q & Z_{th,IGBTbot \leftarrow IGBTtop}^Q & Z_{th,FWDbot \leftarrow FWDtop}^Q \\ Z_{th,IGBTtop \leftarrow IGBTbot}^Q & Z_{th,IGBTtop \leftarrow FWDbot}^Q & Z_{th,IGBTtop}^Q & Z_{th,IGBTtop \leftarrow FWDtop}^Q \\ Z_{th,FWDtop \leftarrow IGBTbot}^Q & Z_{th,FWDtop \leftarrow FWDbot}^Q & Z_{th,FWDbot \leftarrow IGBTtop}^Q & Z_{th,FWDtop}^Q \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} P_{IGBTbot} \\ P_{FWDbot} \\ P_{IGBTtop} \\ P_{FWDtop} \end{pmatrix} + T_{NTC}$$

$$Z_{th,xy \leftarrow ab}^Q = \frac{T_{j,xy} - T_{NTC}}{P_{ab}}$$

Обратите внимание, что в формуле для расчета T_{vj} умножение представляет собой интеграл свертки, так как параметры Z и P зависят от времени. Z-матрица определялась и исследовалась при помощи систем моделирования, а верифицировалась измерениями на реальном устройстве.

Вычисление температуры полупроводникового перехода в реальном времени

Для расчета температуры полупроводникового перехода временные ряды векторов потерь мощности должны быть численно свернуты с Z-матрицей.

Весь алгоритм этого расчета был реализован на интегрированном микроконтроллере XMC4500 с использованием метода цифровой фильтрации. Здесь тепловые импедансы каждого элемента Z-матрицы аппроксимируются одним цифровым фильтром, так что в общем случае необходимо выполнить вычисления для шестнадцати фильтров. Для того чтобы обеспечить вычисления в килогерцовой области рабочих частот инвертера, время вычисления должно быть значительно ниже 1 мс. Уже первая реализация предлагаемого решения показала, что при использовании вычисления на основе Z-матрицы микроконтроллер используется менее чем на 25% своих вычислительных возможностей.

В [3] приведены результаты детального исследования относительно эффективности выполнения расчета температуры полупроводникового перехода в реальном времени с использованием микроконтроллера семейства XMC4500. Для этих исследований была разработана HiL-система (Hardware-In-Loop — аппаратно-программный комплекс, используемый для воспроизведения поведения объектов управления в реальном времени) на базе пакета. Была проведена оценка нескольких типов фильтров относительно скорости и точности расчета. В результате для обеспечения оптимальной производительности и достаточной точности для расчета текущей температуры полупроводникового перехода был выбран фильтр с бесконечной импульсной характеристикой, или сокращенно БИХ-фильтр (Infinite Impulse Response Filter, IIR-filter).

Оценка влияния варианта решения охлаждения в конкретном приложении

На расчет интересующей нас температуры полупроводникового перехода может оказать влияние тип конкретного приложения и его конструктивная реализация. Причина этого кроется в особенностях организации охлаждения, а именно — удельной теплоемкости элементов охлаждения, а в случае использования теплоносителя — и скорости его потока. Удельная теплоемкость теплоносителя зависит от процентного соотношения смеси воды с добавками, препятствующими замерзанию, и обеспечивающими защиту теплоотводящих конструктивных элементов от коррозии.

Влияние этих условий на точность расчета T_{vj} было исследовано путем анализа нескольких вариантов решения в части охлаждения с использованием компьютерного моделирования. Для этой цели в радиатор от входа к выходу были введены различные температурные градиенты, представляющие минимальные и максимальные условия охлаждения применительно к (а) низкой теплоемкости теплоносителя и малой скорости потока и (б) высокой теплоемкости теплоносителя и высокой скорости потока. Для каждого случая были определены и сравнивались тепловые модели. Было наглядно продемонстрировано, что влиянием используемого в конкретном приложении условия охлаждения на описанный выше расчет температуры полупроводникового перехода можно пренебречь.

Таким образом, использованная в данной статье поперечная тепловая модель имеет явные преимущества по сравнению с вертикальной тепловой моделью, поскольку распределение температуры в радиаторе от модуля до теплоотводящей среды здесь менее актуально.

Заключение и выводы

В статье продемонстрирована возможная реализация расчета температуры полупроводникового перехода T_{vj} в ИРМ с использованием микроконтроллера ХМС4500, встроенного в модуль МІРАQ Pro большой мощности. С этой целью были подробно описаны определение потерь и поперечная динамически изменяющаяся тепловая модель. Расчет T_{vj} выполняется микроконтроллером с использованием цифровых фильтров. Показана адекватно высокая скорость вычисления, приемлемая точность и достаточная независимость выбранной модели от условий охлаждения конкретного приложения.

Внедрение расширенных функциональных возможностей в ИРМ позволяет глубже понять условия работы и связь между такими параметрами, как ток, напряжение и температуры. Помимо получения данных о температуре

плат управления и температуре DCB-подложки, вычисление максимальной температуры полупроводникового перехода IGBT и связанных с ним диодов представляет достаточно большой интерес, поскольку именно она относится к основным параметрам, ограничивающим выходную мощность ИРМ.

Реализация функции расчета истинной температуры полупроводникового перехода позволяет ИРМ самому контролировать работу системы, генерировать предупредительные сигналы или прекращать работу системы еще до наступления нарушения заданных температурных пределов кристалла и выхода за SOA. Кроме того, она позволяет упростить разработку конечных приложений, особенно в части изучения пределов ее возможностей еще на этапе проектирования. Таким образом, реализация вычисления температуры полупроводникового перехода непосредственно в ИРМ представляет собой последовательное продол-

жение интеграции дополнительных функций для обеспечения конкурентных преимуществ использования ИРМ.

Литература

1. P. Lahl, S. Schmies, K. Schoo, M. Schulz. Advanced Features in Sophisticated Inverter Design Supporting MW-Applications. PCIM Europe, 2015.
2. R. Zaaza. Bestimmung und Modellierung der Schaltenergien eines High-Power-IPM nach dem Design of Experiments (DoE) Verfahren für den applikationsnahen Parameterraum. Bachelor Thesis, Hochschule Düsseldorf, 2015.
3. P. Gräber. Entwurf, Ausarbeitung, Implementierung und Verifikation einer mikrocontrollerbasierten, echtzeitfähigen Sperrschichttemperaturberechnung für IGBT-Module. Master Thesis, HTWK Leipzig, 2014.