

SKiIP-X —

силовой интеллектуальный модуль XXI в.

Современный рынок силовой электроники предъявляет все более жесткие требования к компонентам, предназначенным для применения в энергетике и на транспорте. Разработанная компанией SEMIKRON технология корпусирования SKiN [1] позволяет преодолеть существующие конструктивные ограничения и создавать компоненты, отличающиеся более высокой плотностью мощности, надежностью и расширенным температурным диапазоном. SKiIP-X — первый силовой ключ, выполненный в соответствии со SKiN-концепцией и подготовленный к серийному производству. Секционные интеллектуальные модули (IPM), созданные на его основе, предназначены для применения в преобразователях мегаваттного диапазона.

Томас Грассхоф
(Thomas Grasshoff)

Рейнгард Неллдорфер
(Reinhard Helldörfer)

Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков

Andrey.Kolpakov@semikron.com



Основной причиной отказа силовых модулей, работающих в составе преобразователей ветроэнергетических установок (ВЭУ), является вторичный пробой, вызванный загрязнением и конденсацией влаги. Выпускаемые в настоящее время компоненты рассчитаны на применение в условиях климатического класса 3К3, не допускающего образования конденсата в рабочем режиме. SKiIP-X является первым IPM на рынке силовой электроники, предназначенным к использованию по классу 4К3. Данные условия эксплуатации подразумевают возможность конденсации влаги, то есть компоненты семейства SKiIP-X могут работать в преобразовательных системах при уровне загрязнения 3 [2].

В секторе альтернативных источников энергии идет непрерывный рост мощности единичных установок, что необходимо для снижения удельной цены электроэнергии. На сегодня 3-МВт ВЭУ являются стандартными на рынке ветроэнергетики. Для до-

стижения оптимальных экономических показателей выходной ток установки должен быть увеличен до 6000 А (мощность около 6 МВт), при этом удельные массогабаритные показатели силовой секции инвертора следует уменьшить примерно вдвое.

Потребность в компактных и надежных системах, способных работать в жестких условиях эксплуатации, требует пересмотра традиционных технологий производства силовых модулей. В первую очередь к ним относятся пайка и ультразвуковая сварка, используемые для соединения кристаллов, изолирующей подложки, базовой платы, а также подключения выводов чипов. В преобразователях новейших установок общая площадь силовых кремниевых кристаллов (IGBT и диоды) достигает 3000 см². Для снижения габаритов силового каскада необходимо повышать «коэффициент использования кремния» и эффективность системы охлаждения. При этом очень важно свести к минимуму уровень электрохимических и тепловых нагрузок на элементы инвертора.

В преобразовательных системах, работающих в мегаваттном диапазоне мощностей, используется параллельное соединение модулей или готовых инверторов. Это неизбежно ведет к повышению стоимости и снижению ресурса готовых изделий. Одним из путей решения проблемы надежности является резервирование силовых каскадов, что в свою очередь требует еще более высоких начальных инвестиций.

Принципиальной особенностью SKiN-технологии является замена традиционных процессов пайки и сварки на низкотемпературное спекание серебряного нано-порошка [3–5]. Вместо алюминиевых проводников, соединяющих выводы кристаллов с контактными площадками на DBC-подложке, используется гибкая полиамидная пленка с медными шинами (рис. 1). Ее подключение, а также установка кристаллов на DBC-подложку и подложки на теплосток осуществляется посредством диффузионного спекания. Для металлизации поверхности и основания чипов используется один и тот же благородный

материал (например, серебро), обеспечивающий хороший электрический и тепловой контакт с SKiN-пленкой и подложкой.

Толщина металлизации полиамидной пленки соизмерима с диаметром проводников, используемых для подключения выводов кристаллов в силовых ключах «классической» конструкции. При этом области контактных площадок SKiN-пленки и чипов практически совпадают, в то время как общая площадь зон сварки у стандартных модулей не превышает 20% от активной поверхности кристаллов. Соединение их выводов с пленкой, имеющей двустороннюю медную металлизацию, также осуществляется посредством диффузионного спекания. Для подключения цепей управления к драйверу применяются пружинные контакты, что позволяет полностью отказаться от пайки и обеспечить высокую стойкость конструкции к механическим и тепловым воздействиям.

Максимальная величина мощности рассеяния полупроводникового модуля ограничена допустимым перегревом кристаллов T_p , температурой охладителя T_a и сопротивлением «кристалл-окружающая среда» $R_{th(j-a)}$. В тепловой модели стандартного силового ключа с эффективной системой жидкостного охлаждения основной вклад в общее значение $R_{th(j-a)}$ вносит слой термопасты (до 30%). В модулях SKiN эта проблема решается за счет спекания изолирующей DBC-подложки с радиатором. Мелкозернистый серебряный слой отлично проводит тепло и обладает механической эластичностью, что позволяет обеспечить высокую стойкость к термоциклированию.

Использование жидкостного способа охлаждения связано с опасностью возникновения коррозии, приводящей с течением времени к заметному ухудшению тепловых свойств радиатора. Эта проблема становится еще более серьезной, когда каналы охлаждения интегрированы в базовую плату силового ключа. Материал радиатора (или способ обработки каналов) должен выбираться с учетом состава охлаждающей жидкости, поэтому алюминий (Al) является наиболее предпочтительным благодаря его свойству «самопассивации», т. е. естественного окисления за счет кислорода, содержащегося в воде. Однако он не годится для производства базовых плат из-за высокого КТР (коэффициент теплового расширения) и плохой пригодности к пайке. Применение диффузионного спекания для соединения чистого Al и DBC-подложки позволяет решить этот вопрос.

Сравнение характеристик стандартных «многослойных» конструкций с базовой платой и сило-



Рис. 2. Базовая секция модуля SKiiP-X

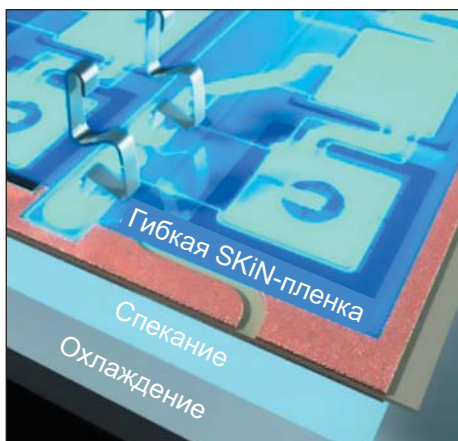


Рис. 1. SKiN-концепция предусматривает замену алюминиевых выводов чипов, подключаемых методом ультразвуковой сварки, на гибкую спекаемую полиамидную пленку с медными шинами (подключение драйвера производится с помощью пружинных контактов)

вых ключей, выполненных по SKiN-технологии, показывает, что у последних величина теплового сопротивления $R_{th(j-a)}$ «кристалл-охлаждающая жидкость» ниже примерно на 30% при аналогичной токовой нагрузке.

На рис. 2 и 3 показана конструкция силовой секции модуля SKiiP-X, силовые терминалы которого также подключены к изолирующей подложке методом спекания. Это позволило заметно поднять их токонесущую способность и обеспечить более надежный механический контакт (в сравнении с пайкой или ультразвуковой сваркой). Шины звена постоянного тока секций объединяются посредством сварки, что обеспечивает минимальные габариты и высокую надежность изделия, делая компоненты семейства SKiiP-X оптимальными для применения в компактных преобразователях мегаваттного диапазона.

В первую очередь сказанное относится к системам с жидкостным охлаждением. Большинство из них организовано таким образом, что теплоотвод, силовые модули

и соединительные шины находятся на разных уровнях. Применение SKiN-концепции позволяет осуществлять прямое охлаждение DBC-платы с кристаллами, при этом отдельные элементы силовой секции монтируются на общий жидкостный радиатор. Конструктив на основе трех таких элементов (рис. 2 и 3) представляет собой базовую платформу, позволяющую наращивать мощность за счет параллельного соединения. В концепции SKiiP-X сконцентрированы все основные преимущества SKiN-технологии: компактность, оптимальные тепловые характеристики, минимальное значение распределенных индуктивностей.

На рис. 2 показан внешний вид базовой секции SKiiP-X с DC- и AC-терминалами, платой управления затворами и системой охлаждения. Габариты такого блока 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 всех зон локального тепловыделения, результатом чего является низкое значение теплового сопротивления [3]. Выбор наилучшего 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.

Радиатор трехсекционной платформы SKiiP-X выполняет функцию базы, обеспечивающей механическую прочность конструкции. В находящейся сверху пластиковой рамке расположены пазы для установки силовых терминалов, которые фиксируются там с помощью теропластичного эластомера, необходимого для герметизации внутреннего пространства. Терминалы AC и DC расположены на противоположных сторонах корпуса, как показано на рис. 3.

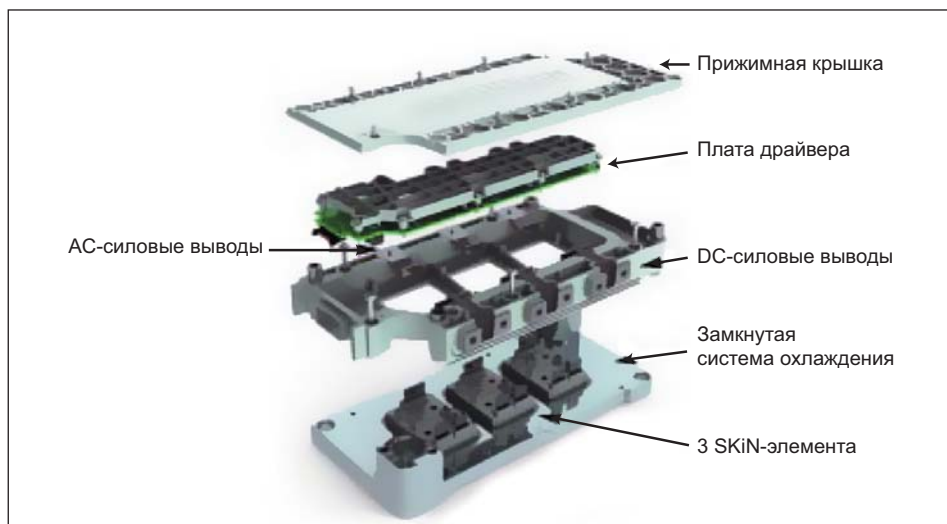


Рис. 3. Конструкция базовой платформы SKiiP-X



Рис. 4. Девятисекционный трехфазный модуль SKiiP-X для преобразователя мощностью 1,5 МВт

Модули, работающие с большими скоростями коммутации di/dt , должны иметь низкое значение распределенной индуктивности токонесущих шин, соединяющих кристаллы IGBT/диодов и силовые терминалы. Кроме того, для повышения стойкости к электромагнитным шумам необходимо минимизировать перекрестную связь силовых и сигнальных цепей. Использование гибкой SKiN-пленки, осуществляющей электрическое соединение силовых кристаллов и терминалов, помогает решить эту задачу. Токонесущие шины на ней можно сделать предельно симметричными и короткими, что гарантирует хорошее распределение токов в параллельных цепях, а также минимальное значение паразитных индуктивностей L_S .

В разработанном конструктиве SKiiP-X удалось достичь величины L_S на уровне 5 нГн без учета силовых выводов, а суммарное значение (с терминалами) составляет 15 нГн. Близкое расположение соседних силовых секций и непосредственное соединение DC-цепей позволило уменьшить распределенную индуктивность примерно на 50% по сравнению с традиционным внешним звеном постоянного тока. Кроме того, при этом обеспечивается близкое к идеальному распределение токов параллельных ветвей.

Плата управления устанавливается на полимерной раме, которая также обеспечивает фиксацию пружинных сигнальных контактов для надежного электрического соединения. Поддерживающая сетчатая пластина, расположенная над печатной платой драйвера, необходима для стабилизации усилия, создаваемого пружинами. Термические чувствительные электронные компоненты расположены близко к теплостоку, что способствует

продлению срока их службы. На вершине секции находится пластиковая пластина, закрывающая внутреннее пространство модуля и защищающая его от воздействия окружающей среды.

Сборка SKiiP-X (рис. 4) представляет собой набор близко расположенных плоских секций, снабженных двумя концевыми элементами. На них располагаются штуцеры для подвода и отвода охлаждающей жидкости, а также монтажные отверстия. Изделие выпускается в двух основных конфигурациях (полумостовой и трехфазной), оно предназначено для применения в диапазоне мощности от 1,5 МВт.

На рис. 4 показана сборка SKiiP-X в максимальной комплектации. Она включает в себя девять секций и общую интерфейсную плату для связи с контроллером (установлена сверху). На фронтальной стороне расположены AC-выводы, а терминалы для подключения звена постоянного тока размещены сзади. Класс защиты от климатических воздействий увеличен до 3K4 (степень загрязнения 3), что обеспечивает модулю возможность длительной эксплуатации в суровых климатических условиях. По сравнению с силовыми ключами третьего поколения (SKiiP 3 на рынке с 2000 г.) монтажная площадь SKiiP-X уменьшена на 70% при аналогичной выходной мощности, что позволяет заметно снизить габариты преобразовательного устройства. В таблице представлены основные характеристики нескольких конфигураций интеллектуальных модулей новой генерации.

Полумостовая сборка SKiiP-X, состоящая из четырех секций, при общей ширине менее 300 мм рассчитана на нагрузку около 2200 кВт в трехфазной системе. Готовый трехфазный модуль в максимальной комплектации имеет выходную мощность 1650 кВт, при этом он может быть установлен в стандартный шкаф 600 мм. Такие сборки также доступны в шестисекционном исполнении (мощность нагрузки 1,1 МВт). Подобная гибкость и масштабируемость позволяет проектировать широкий класс инверторов мегаваттного диапазона на основе одного универсального базового конструктива. Вес самого большого модуля SKiiP-X не превышает 25 кг.

У девятиэлементной трехфазной сборки каждый из трех AC-терминалов объединяет выводы переменного тока трех секций, соответствующий датчик тока размещается снаружи. Герметичный сигнальный разъем SUB-D расположен в нижней части лицевой стороны, что улучшает защиту от проникновения конденсата. Пять таких систем могут быть установлены в стандартный шкаф шириной 600 мм и высотой 2000 мм, что по-

зволяет сформировать четырехквadrантный конвертер мощностью 3,3 МВт с тормозным чопперным каскадом. В настоящее время для размещения подобной системы требуется примерно в два раза больше места.

Устройство управления, динамические характеристики

Каждый полумостовой элемент SKiiP-X управляется от собственного вторичного драйвера, полностью изолированного от первичной цепи и способного коммутировать три параллельных затвора IGBT в диапазоне рабочих частот. Первичные и вторичные каскады устройства управления разработаны на основе новых специализированных микросхем (ASIC), в которых использован цифровой протокол двунаправленной передачи данных с высоковольтной изоляцией. На сигнальный разъем подаются логические импульсы амплитудой 24 В, суммарное значение джиттера составляет менее 10 нс.

Первичный каскад схемы контроля (расположенный на интерфейсной плате) способен управлять системой в полумостовой или трехфазной конфигурации с общим количеством секций от четырех до девяти. Их сигнальные входы и выходы объединяются на общем интерфейсном блоке, для связи с системным контроллером служит герметичный разъем SUB-D.

Стандартный динамический двухимпульсный тест, проводимый на каждой секции при двойном номинальном токе ($2 \times I_{Cnom} = 2200$ А), продемонстрировал хорошее распределение токов в статике и динамике, а также низкий уровень коммутационных потерь и переходных перенапряжений. Небаланс токов параллельных цепей составляет менее 10% в предельных режимах. Разброс времени задержки переключения не превышает 50 нс, а пиковое значение коммутационных выбросов при всех условиях эксплуатации остается в пределах 1700 В при максимально допустимом напряжении на звене постоянного тока ($V_{DC} = 1300$ В). Эти результаты получены без применения дополнительных снабберных конденсаторов, они относятся ко всему диапазону рабочих температур. Кривые, приведенные на рис. 5, дают представление об основных динамических свойствах модуля в зависимости от температуры кристалла.

Концепция корпусирования силовых ключей SKiiP-X устанавливает новые границы показателей надежности. Их стойкость к термоциклированию возросла примерно в 10 раз благодаря замене традиционных технологий пайки и сварки на низкотемпературное диффузионное спекание. Использование специализированных

Таблица. Основные конфигурации SKiiP-X

Конфигурация	Количество секций/ Ширина	1/45 мм	4/180 мм	6/270 мм	9/405 мм
Одна секция — 690 В AC, PF = 0,85	Одна секция Pout/Iout	550 кВт/540 А			
Одна фаза, трехфазный конвертер	Pout/Iout		2200 кВт/2160 А		
Три фазы, трехфазный конвертер	Pout/Iout			1100 кВт/1080 А	1650 кВт/1620 А

интегральных схем в устройстве управления, оптимизация топологии электрических цепей и каналов охлаждения позволили на 50% уменьшить количество компонентов драйвера, снизить распределенную индуктивность силовых шин, упростить систему отвода тепла. Предварительные расчеты и тесты показали, что показатель FIT (интенсивность отказов) компонентов SKiiP-X примерно в два раза ниже, чем у модулей SKiiP третьего поколения.

Заключение

Появление SKiN-концепции после многих лет эволюционного развития технологий силовой электроники определило революционные изменения в подходах к проектированию силовых ключей. Ее внедрение позволяет одновременно снизить тепловое сопротивление и величину паразитных распределенных индуктивностей, увеличить плотность тока, улучшить показатели надежности и уменьшить габариты преобразовательных устройств. Только замена слоя теплопроводящей пасты на спеченное соединение снижает суммарное значение $R_{th(j-a)}$ примерно на 25%. В сочетании с этим применение игольчатых жидкостных радиаторов с непосредственным охлаждением DBC повышает отдачу мощности вдвое.

Технология SKiN позволяет полностью отказаться от наиболее проблемных (паяных и сварных) элементов конструкции силовых модулей. Подключение кристаллов, а также соединение керамической DBC-подложки с радиатором и выходными терминалами производится методом спекания. Большое количество алюминиевых проводников, необходимых для подключения кристаллов IGBT и диодов, заменяется одной гибкой пленкой с медными токонесущими шинами. Отметим, что процесс ультразвуковой сварки выводов чипов является одним из самых сложных и длительных, поэтому применение

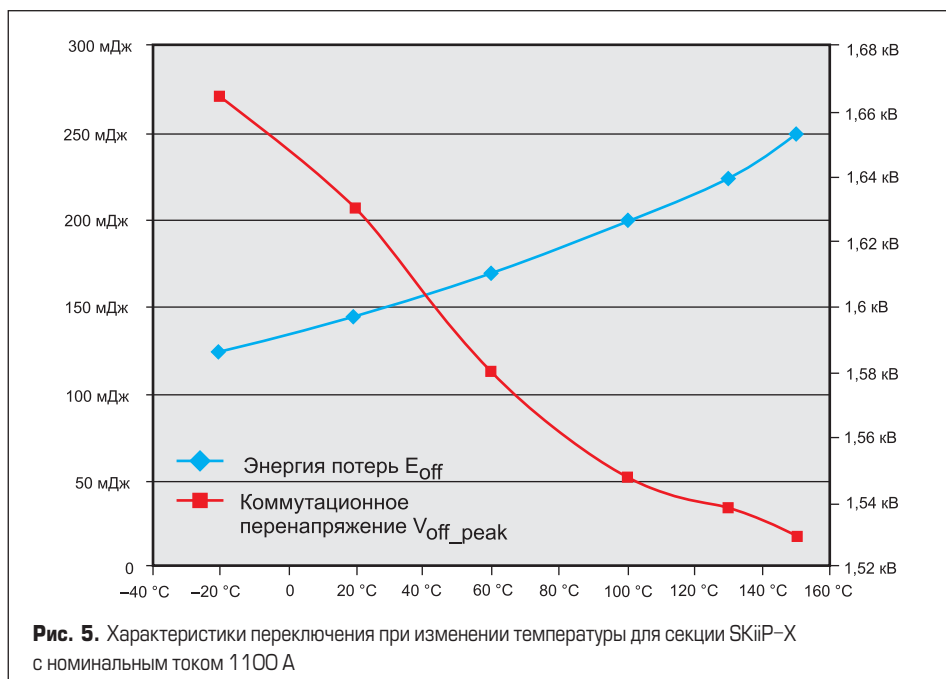


Рис. 5. Характеристики переключения при изменении температуры для секции SKiiP-X с номинальным током 1100 А

новой технологии позволяет устранить одно из узких мест в процессе производства.

Модули, разработанные с применением SKiN-технологии, ориентированы на применение в альтернативной энергетике, в частности в ВЭУ. К конвертерам ВЭУ предъявляются высокие требования по перегрузочным режимам и климатическим воздействиям, которым полностью соответствуют силовые ключи SKiiP-X. На основе данных компонентов можно создавать компактные преобразователи мощностью от 1,5 МВт и выше, которые могут быть размещены непосредственно в гондоле ВЭУ.

Использование силовых ключей SKiiP-X открывает широкие возможности для развития рынка малой гидроэнергетики, являющегося очень перспективным в России, где применение ветровых и солнечных установок пока что признано экономически неэффективным.

Литература

1. Thomas Grasshoff. SKiN-технология и силовые модули XXI в. // Силовая электроника. 2014. № 1.
2. ГОСТ Р 50030.1-2007 (МЭК 60947-1:2004)
3. Beckedahl P. Performance comparison of traditional packaging technologies to a novel bond wireless all sintered module // PCIM Europe. 2011.
4. Gobl C. Low temperature sinter technology die attachment for power electronic applications. // Proc. CIPS 2010. Nuremberg. 2010.
5. Stockmeier T., Beckedahl P., Göbl C., Malzer T. SKiN: Double side sintering technology for new packages // ISPSD 2011.
6. Gobl C., Beckedahl P. A new 3D power nodule packaging without bond wires // PCIM Europe. 2008.