

НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ТОКОВЫХ ШУНТОВ,

или хорошо забытое старое

Силовая электроника остается одним из самых динамично развивающихся секторов современной промышленности. Основными тенденциями в этой сфере являются повышение плотности мощности, эффективности преобразования, надежности, а также снижение массо-габаритных показателей. Требования могут меняться, и только одно из них остается постоянным и не зависящим от конкретного применения: это уменьшение цены. При внедрении передовых технологий, разработке новых транзисторов или схемных решений снижение затрат рассматривается как один из ключевых факторов.

Токовые сенсоры вносят существенный вклад в стоимость преобразовательной системы, особенно в диапазонах средней и высокой мощности, поэтому возможность их удешевления представляет несомненный интерес для разработчиков силовых преобразовательных систем. Мы уже рассказывали о новых модулях SEMIKRON SEMiX Press-Fit, соединении сигнальных выводов которых с драйвером обеспечивается методом прессовой посадки [6]. Еще одной интересной особенностью данных силовых ключей является наличие встроенного токового шунта.

**Йоханнес Крапп
(Johannes Krapp)**

**Перевод и комментарии:
Андрей Колпаков**

Andrey.Kolpakov@semikron.com

Традиционные методы измерения тока

При выборе токового сенсора для конкретного применения необходимо анализировать массу факторов, в том числе точность, динамику измерительного процесса, напряжение изоляции, а также габариты и стоимость. Существует много методов измерения тока на грузки, лучшими с точки зрения полосы пропускания и точности считаются феррозондовые датчики. Однако из-за высокой стоимости их применение ограничивается специальными, нишевыми областями. В диапазонах мощностей свыше 100 кВт наибольшую популярность имеют сенсоры на основе эффекта Холла. Они обеспечивают гальваническую развязку, как правило, имеют встроенный усилитель и обладают высокой точностью и широким динамическим диапазоном.

Увеличение степени интеграции и «интеллектуализации» силовых модулей, а также разработка новых малогабаритных конструктивов направлены на решение основной задачи — повышение плотности мощности. Эта тенденция явно противоречит традиционному способу построения системы с применением набора дискретных компонентов. Использование низкоомных резистивных шунтов для измерения тока является старым и хорошо известным решением. Однако возможность включения чип-резисторов в состав AC- или DC-терминалов силовых модулей можно рассматривать как новую конструктивную идею.

Несомненным преимуществом токовых шунтов является высокая точность измерения и хорошая помехозащищенность. Однако очевидные недостатки — отсутствие гальванической изоляции и рассеяние дополнительной мощности — привели к тому, что подобные датчики тока до настоящего времени использовались только в маломощных преобразователях. Очередной интерес к токовым шунтам связан с появлением интегральных изолирующих АЦП, позволяющих преобразовывать слабые сигналы в последовательный код с высокой точностью. Таким образом, проблема гальванической изоляции оказывается решенной. Кроме того, это дает возможность применять сверхмалые шунты и снизить активные потери до приемлемого уровня.

Использование интегральных резистивных сенсоров позволяет заметно уменьшить стоимость и габариты преобразовательной системы. Рынок силовых инверторов растет очень быстро, и пользователям интересен любой фактор снижения расходов на комплектующие. Ожидается, что к 2020 г. спрос на изолированные датчики тока должен составить около 100 млн, что приближается к количеству iPhone, произведенных в 2012 г.

Практически любой силовой преобразователь нуждается в измерении тока, поскольку эта информация является базовой для эффективного контроля системы. Без токового датчика невозможно обеспечить надежную защиту инвертора от перегрузки и короткого

замыкания. Очевидно, что требования к сенсору зависят от особенностей конкретного применения. Например, в электромобиле из-за высокой скорости вращения мотора и большого тока нагрузки полоса пропускания канала измерения тока должна быть не менее 100 кГц, чтобы обеспечить оптимальное регулирование момента и высокую эффективность управления двигателем. В авиации главное — точность: как правило, в авиационных системах погрешность измерения тока не должна превышать 0,5% в диапазоне температур $-50...+125$ °С. Между этими двумя «экстремальными» применениями находится большинство промышленных систем, таких как приводы электродвигателей, источники питания, преобразователи альтернативных источников энергии и т. п.

Не менее важной характеристикой токового датчика является напряжение изоляции. Из-за очевидных технических ограничений сенсоры с усиленной изоляцией, такие как датчики Холла, не могут быть напрямую заменены резистивными шунтами. Тем не менее в области маломощных низковольтных применений (<80 А, <400 В) они приобретают все большую популярность. В последнее время эта тенденция стала распространяться и на более мощный диапазон, что обусловлено дешевизной и простотой интеграции миниатюрных токовых шунтов.

Сопоставить возможности двух технологий измерения можно путем сравнения уровней напряжения на резистивном датчике и магнитного поля в датчике Холла. В рамках данной статьи мы не будем рассматривать другие способы (например, оптические или механические), не являющиеся экономически привлекательными для массовых промышленных применений. «Чистые» магнитные методы измерения тока основаны на физическом эффекте индукции силы Лоренца на движущихся носителях заряда. Таким образом, электромагнитное поле, создаваемое постоянным или переменным током, детектируется сенсором Холла. Поскольку состояние носителей заряда и напряжение элемента Холла зависят от температуры, основной проблемой данной технологии является обеспечение хорошей стабильности параметров в диапазоне температур.

В датчиках с разомкнутым контуром преобразование магнитного поля в напряжение происходит непосредственно, без какой бы то ни было обработки сигнала. Их совершенствование, в основном, идет по пути увеличения крутизны сигнала с помощью новых ASIC-технологий. Подобные сенсоры не имеют себе равных по соотношению размера, веса и стоимости, поэтому их можно встретить во многих массовых применениях, включая электротранспорт.

Если электромагнитный датчик снабдить дополнительной обмоткой, с помощью которой можно сбалансировать магнитный поток в сердечнике до нулевого уровня, то ток в этой компенсационной обмотке будет точно пропорционален измеряемому «первичному» току. Так устроены сенсоры с замкнутым контуром, обеспечивающие высокую точность

измерения в широком диапазоне рабочих температур, например датчики тока силовых интеллектуальных модулей SKiiP.

Датчик тока IPM SKiiP

Интеллектуальные модули высокой степени интеграции SKiiP, выпускаемые компанией SEMIKRON, содержат встроенный датчик выходного тока с замкнутым контуром [2]. Это позволяет снизить габариты устройства, а также уменьшить уровень шумов в сигнале, поступающем на контроллер. Информация о токе нагрузки необходима для управления системой, кроме того, ее наличие позволяет повысить надежность работы схемы защиты от перегрузки и сократить время анализа аварийного состояния. Для корректной работы привода ошибка измерения тока (включая температурный дрейф) не должна превышать 1–2%. В датчике SKiiP нового, 4-го поколения [3] погрешность снижена до 0,5%.

Токовый сенсор должен сохранять работоспособность во всем диапазоне нагрузок, включая режим КЗ. В зависимости от технологии IGBT ток короткого замыкания I_{SC} (Short Circuit Current) может превышать номинальное значение I_{Cnom} в 5–10 раз. Кроме того, для обеспечения стабильности контура регулирования от схемы измерения требуется минимальное время отклика и широкая полоса пропускания (желательно не менее 100 кГц).

Конструкция и структурная схема датчика тока SKiiP показаны на рис. 1. Напряжение сенсорной обмотки (она расположена в зазоре сердечника с высокой магнитной прони-

цаемостью) используется как сигнал ошибки для выработки компенсационных токов I_S , подаваемых на первичную и вторичную обмотки. Применение для этой цели широтно-импульсной модуляции позволяет заметно снизить потребление тока по сравнению с линейной схемой компенсации.

Падение напряжения, создаваемое током I_S на измерительном резисторе, является выходным сигналом датчика. Его обработка и нормирование производится специализированной интегральной схемой, входящей в состав платы управления IPM.

Наличие интегрального датчика тока позволяет сократить время реакции и повысить надежность работы схемы защиты от перегрузки, что особенно актуально для современных тонкопленочных технологий IGBT. В IPM SKiiP реализована комплексная идеология защиты от перегрузки по току, названная OCP (Over Current Protection). Для работы схемы OCP используется два сигнала: напряжение насыщения V_{CEsat} силового транзистора и выходное напряжение датчика фазного тока, в результате чего драйвер SKiiP способен блокировать IGBT уже через 1–2 мкс после обнаружения аварийного состояния. Такая защита обеспечивает безопасный режим выключения, снижение уровня переходных перенапряжений и увеличение допустимого количества срабатываний защиты от КЗ (модули SKiiP рассчитаны на 1000 аварийных отключений в течение срока службы).

Схема управления SKiiP различает два пороговых значения тока — предельное номинальное (100% I_{Cnom}), начиная с которого производится анализ неисправности и формируется

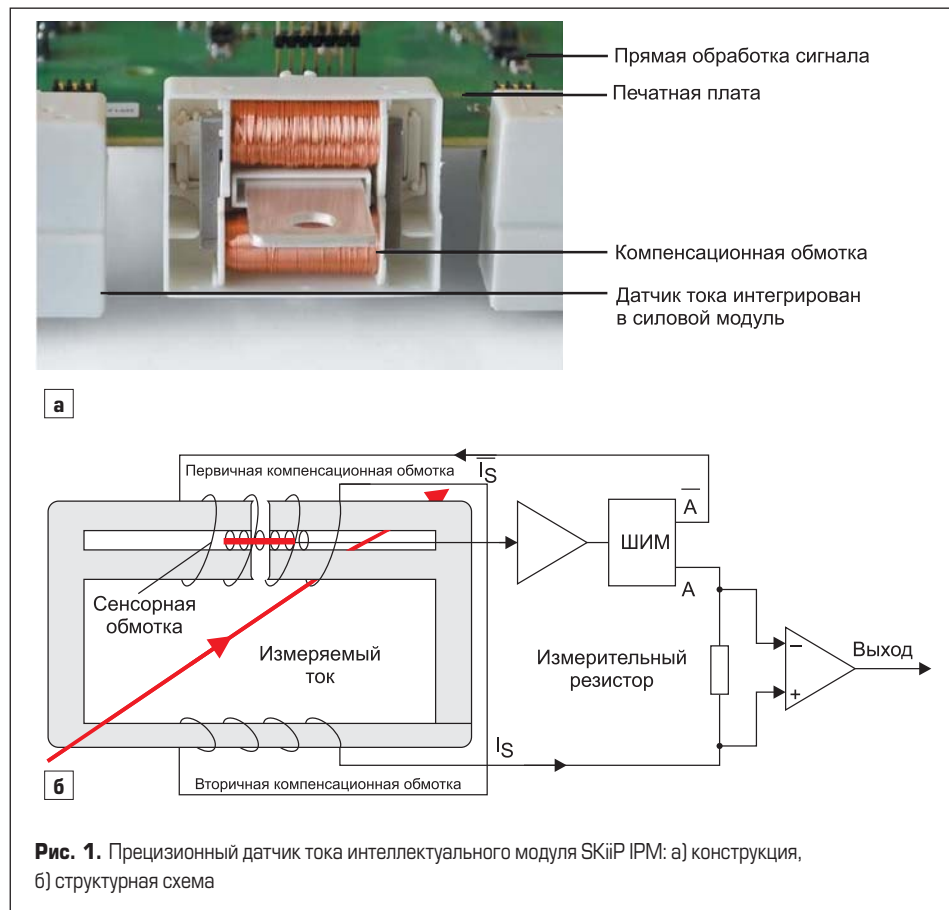
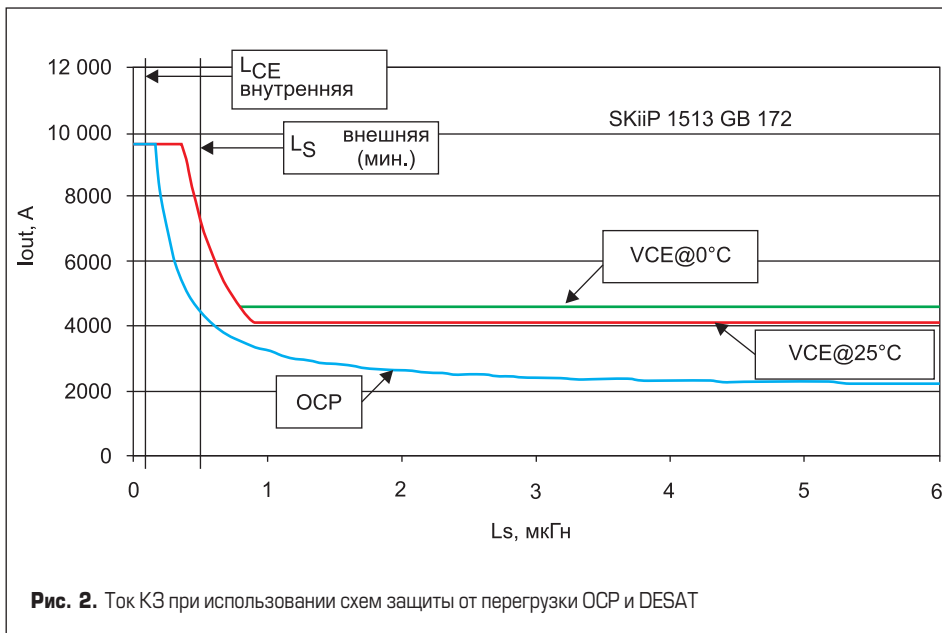


Рис. 1. Прецизионный датчик тока интеллектуального модуля SKiiP IPM: а) конструкция, б) структурная схема



контрольный сигнал, и перегрузка (125% I_C). После обнаружения аварийного состояния напряжение на затворах снижается, что приводит к ограничению I_C . Если ток превышает номинальное значение более чем на 25%, отключаются все силовые транзисторы, сигналы управления игнорируются. Драйвер формирует сигнал неисправности, выход ERROR OUT (открытый коллектор) принимает уровень логической единицы.

Графики, приведенные на рис. 2, демонстрируют отличие общепринятого способа

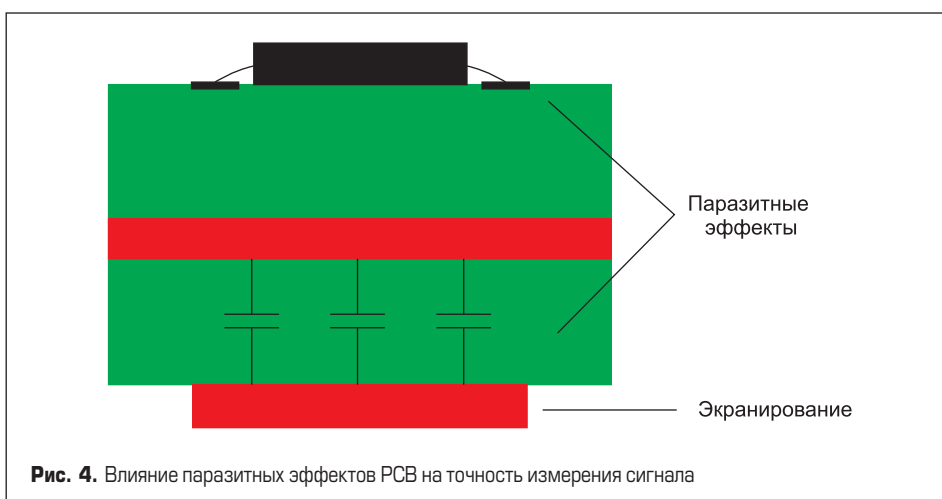
отключения транзисторов IGBT по выходу из насыщения DESAT (от англ. desaturation) и OCP. Скорость нарастания тока короткого замыкания (di_{SC}/dt) ограничена распределенной индуктивностью выходной цепи L_S в соответствии с соотношением $V_{DC} = L_S \times di_{SC}/dt$. Предельно достижимое значение i_{SC} зависит от напряжения на затворе и уровня «самоограничения» тока, определяемого технологией IGBT.

Самым опасным режимом перегрузки является короткое замыкание непосредственно на выходе модуля, при котором «внешняя» паразитная индуктивность минимальна («внутренняя» индуктивность L_{CE} является характеристикой силового ключа, ее значение, как правило, приводится в спецификациях). Графики показывают, что для модуля SKiiP 1513 GB 172 ток отключения при $L_S = 0,5$ мкГн может достигать 7 кА, в то время как при использовании схемы OCP он не превышает 4,5 кА. При величине L_S , превышающей 1 мкГн (КЗ на стороне нагрузки), ток выключения снижается до 4 кА и 2 кА соответственно.



Альтернативные решения

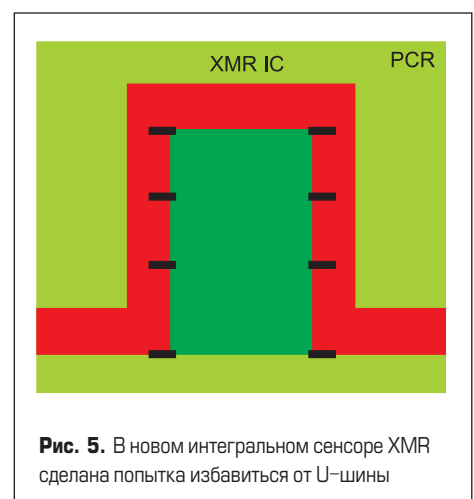
Совершенствование элементов Холла идет по пути повышения мобильности носителей



заряда, что позволяет снизить погрешность измерения. Это достигается, в частности, путем внедрения новых материалов, таких как антимонид индия (InSb) или графен.

Значительные усилия разработчиков элементов силовой электроники направлены на поиск замены дорогих материалов и удешевление производственных процессов. Использование стандартных, отработанных технологий мощных полупроводниковых кристаллов и микроконтроллерных технологий может быть одним из путей снижения затрат. Производство печатных плат (PCB) с применением автоматизированных процессов также позволяет сократить финансовые и временные затраты при изготовлении преобразовательных устройств. Основной проблемой здесь остается поиск высоконадежных методов соединения PCB и чипов, а также обеспечение эффективного охлаждения. Тем не менее концепция IPM, предусматривающая объединение в одном корпусе силовой секции и платы управления, предлагает явные преимущества, заключающиеся в уменьшении габаритов, снижении уровня помех и подавлении паразитных эффектов.

Миниатюрные модули SEMIKRON MiniSKiiP GB (рис. 3) являются хорошей альтернативой стандартным силовым ключам IGBT в диапазоне токов до 250 А [9]. Их конструктивное преимущество состоит в отсутствии паяных соединений и возможности использования печатных дорожек на плате управления в качестве DC-шин. На базе этих модулей разработана серия маломощных инверторов, все связи и элементы которых расположены на одной печатной плате. Интегральные датчики смонтированы непосредственно на дорожках PCB, подключенных к AC-выходам инвертора. Полоса пропускания контура измерения тока составляет 150 кГц при погрешности не более 0,7%. Основной проблемой здесь является обеспечение хорошего соотношения сигнал/шум, которое очень сильно зависит от топологии печатной платы. Помехи в данном случае направляются через паразитные емкости трасс и переходных отверстий PCB. Уровень помех можно снизить с помощью фильтрации, однако это заметно ухудшает динамику системы. Решением также является экранирование (рис. 4), что, в свою очередь, повышает



стоимость системы, т. е. лишает ее одного из главных преимуществ.

Альтернативой датчикам Холла также являются магнитно-резистивные сенсоры AMR, принцип работы которых основан на анизотропном эффекте, изменяющем сопротивление датчика в зависимости от величины внешнего магнитного поля. Эта технология аналогична принципу работы датчиков с замкнутым контуром, измеряющих дифференциальное значение магнитного поля с компенсацией. «Первичный» ток проходит через U-образную шину, создавая градиент поля между двумя ее сторонами. Выходное напряжение на выходе сенсора, чувствительного к этому градиенту, сводится к 0 с помощью компенсационной обмотки, ток которой является измеряемым сигналом.

Преимуществом AMR-технологии является отсутствие гистерезисного эффекта у датчика. Благодаря быстрому контуру регулирования, реализованному в интегральной схеме, AMR-сенсор способен обеспечить полосу пропускания до 500 кГц, т. е. чувствовать сигналы со скоростью нарастания менее 2 мкс. Основной проблемой данной технологии остается точность, даже у новейших датчиков она не превышает 2%. Кроме того, у AMR-элементов достаточно низкая помехоустойчивость по отношению к внешним магнитным полям. Они имеют очень ограниченные возможности по позиционированию, что сильно усложняет разработку и производство печатных плат.

Однако если вопрос снижения стоимости и габаритов является определяющим, то лучшим выбором могут стать резистивные сенсоры, традиционно используемые в мало-мощных системах. Интерес к ним в последнее время неуклонно растет и в секторе преобразователей средней и высокой мощности. Принцип работы токовых шунтов хорошо известен: протекающий ток создает на резисторе падение напряжения, которое и является измеряемым сигналом. Резистивные датчики практически не подвержены влиянию электромагнитных помех, а их точность определяется только температурным коэффициентом (ТКС). Недостатки данного метода тоже хорошо известны — это дополнительные потери мощности и необходимость гальванической изоляции.

Теперь, благодаря появлению недорогих прецизионных АЦП с усиленной изоляцией, резистивные сенсоры могут соответствовать самым высоким требованиям рынка преобразовательной техники. Они обеспечивают погрешность измерения ниже 0,5%, разрешение 16 бит, высокую линейность и термостабильность при температуре до +170 °С. Сами шунты, как правило, встраиваются во внешнюю AC- или DC-шину, что несколько увеличивает габариты конвертера, поэтому хорошим альтернативным решением может стать установка мощного чип-резистора внутрь силового модуля. До настоящего времени одна из главных проблем состояла в достаточно высокой стоимости реализации такого решения. Однако использование новых техно-



Рис. 6. Расположение токового шунта на DBC-подложке модуля SEMiX 453GB12E4lp, сборка модуля и цифрового драйвера SKYPER 12

логий монтажа позволяет с успехом решить этот вопрос.

Концепция модуля с интегральным сенсором SEMIKRON состоит в замене части имеющихся в модуле промежуточных соединений на мощный чип-резистор, что позволяет сохранить основные характеристики на прежнем уровне при минимальных изменениях в конструкции. Все внешние силовые и сигнальные подключения остаются неизменными, что обеспечивает простоту доработки преобразовательной системы. Компания SEMIKRON первой выпустила на рынок стандартные 17-мм модули с встроенными токовыми шунтами, рассчитанными на ток до 600 А. Чип-резисторы изготовлены из сплава, сохраняющего свои характеристики до +250 °С, и имеющего сверхнизкий ТКС (рис. 6).

Как было отмечено ранее, использование силовых модулей со встроенными токовыми сенсорами позволяет отказаться от внешних изолированных датчиков тока, т. е. существенно снизить стоимость системы. Особенно эта экономия заметна в системах, от которых требуется уменьшение габаритов при одновременном повышении плотности мощности. Такие требования предъявляются, например, к современным транспортным приводам.

Сигнальные выводы модулей SEMiX Press-Fit [4–8] рассчитаны на подключение к плате управления методом прессовой посадки; таким же способом с ней соединяется и встроенный датчик тока. Шунт имеет очень низкое сопротивление (0,19 мОм в 600-А модуле), что увеличивает потери примерно на 3% при номинальном выходном токе. Стандартные габариты корпуса и простота соединения методом прессовой посадки обеспечивают простоту доработки системы при заметном снижении расходов, повышении надежности и уменьшении количества внешних соединений.

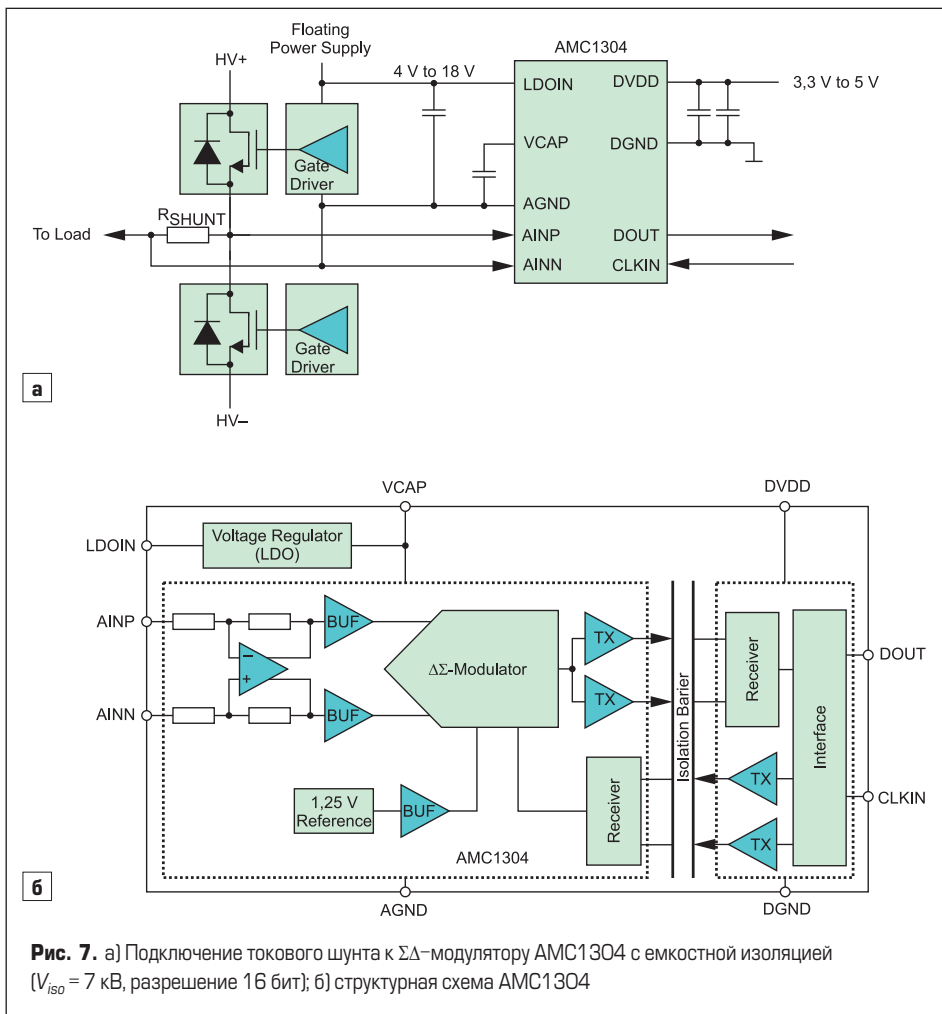
Очевидно, что использование резистивных шунтов требует решения ряда проблем, в частности, для передачи токового сигнала на управляющий контроллер необходима его гальваническая изоляция от высокого потенциала AC-выхода и оцифровка. При этом важно обеспечить высокую точность,

температурную стабильность, минимальное время отклика и симметрию во всем диапазоне измеряемых токов. Сенсор должен сохранять работоспособность во всех режимах эксплуатации, включая КЗ. Также следует учесть распределенную индуктивность цепей его подключения, падение напряжения на которой в процессе коммутации создает помехи, искажающие полезный сигнал.

Модули SEMiX Press-Fit со встроенным токовым шунтом спроектированы с учетом всех вышеперечисленных факторов. Далее мы рассмотрим, как передать токовый сигнал на контроллер при минимальном уровне помех, с высокой точностью и хорошей динамикой (рис. 7).

Напряжение, формируемое сенсором, может передаваться через оптический, емкостной или индукционный барьер. В большинстве современных интегральных микросхем используется оптическая и емкостная изоляция. Оцифровка сигнала осуществляется с помощью различных протоколов; использование дифференциального канала для передачи данных позволяет обеспечить высокую помехозащищенность. Окончательное решение принимается на основании системных требований по изоляции, к интерфейсу и, конечно, относительно стоимости.

Интерфейс UART позволяет производить аналого-цифровое преобразование низковольтного напряжения в последовательный код и его изолированную передачу на управляющий контроллер. Динамические характеристики и изоляционные свойства должны быть адаптированы к конкретным требованиям. Основными преимуществами такого решения являются реальная гальваническая развязка с помощью трансформатора и высокая точность. Кроме допуска на сопротивление шунта (0,5%), погрешность преобразования определяется характеристиками АЦП и каскада усиления. Скорость передачи данных 6 Мбит/с обеспечивает эффективное управление приводом. Современные микроконтроллеры могут непосредственно обрабатывать последовательные коды, тактовый сигнал при этом, как правило, не требуется.



Чаще всего для преобразования низковольтного сигнала шунта в последовательный код применяются интегральные $\Delta\Sigma$ -модуляторы, которые могут содержать встроенный изолирующий барьер. $\Delta\Sigma$ АЦП формируют 1-битовый поток, передаваемый по однопроводной линии. Плотность цифровых «единиц» в нем будет зависеть от напряжения на шунте, т. е. от величины тока, как показано на рис. 8. На передаточной характеристике (рис. 8а) приведена средняя плотность «единиц» по шкале от 0 до 1, а также выходной сигнал после фильтрации.

С помощью передискретизации может быть найдено оптимальное соотношение между точностью и динамическими характеристиками для конкретного режима работы. При установке $\Delta\Sigma$ -модулятора на одной плате с управляющим контроллером обеспечивается высокий уровень помехозащищенности. В этом случае последовательный код, отображающий величину тока, поступает непосредственно на контроллер вместе с сигналом тактовой частоты, если он нужен.

Однако если они располагаются на разных платах, между которыми имеется некоторое расстояние, то необходимо обеспечить передачу сигнала по защищенному от помех каналу. Для этой цели SEMIKRON применяет дифференциальный интерфейс RS485, позволяющий использовать проводные соединения контроллера.

Заключение

На рис. 9 показан вариант конструкции трехфазного инвертора мощностью 150 кВт, разработанный с применением модулей SEMiX453GB12E4Ir со встроенными шунтами сопротивлением 0,4 мОм. Для управления силовыми ключами использованы новые цифровые драйверы SKYPER 12 (пиковый выходной ток 20 А, регулируемое время подавления коротких (шумовых) импульсов, джиттер менее 20 нс). Поскольку все функции схемы управления реализованы на одной специализированной микросхеме ASIC, ядро SKYPER 12 имеет очень компактные размеры (меньше спичечной коробки), а его наработка на отказ (MTBF) достигает 8 млн ч. Драйверы и АЦП AMC1304 установлены на единой адаптерной плате, соединенной с модулями методом пресовой посадки.

$\Delta\Sigma$ -модулятор получает питание от изолированного источника SKYPER 12, так же, как и выходные каскады драйвера, поэтому дополнительная изоляция не требуется. Шунты, входящие в состав модулей SEMiX, подключены непосредственно ко входам микросхем AMC1304 (рис. 7), обеспечивающих $\Delta\Sigma$ -преобразование и гальваническую развязку. Битовый поток трансформируется в помехозащищенный дифференциальный сигнал с тактовой частотой 20 МГц, что позволяет осуществлять непосредственную цифровую фильтрацию. Полоса пропускания контура управления инвертора составляет 50 кГц при максимальной суммарной погрешности измерения 1%. Такие характе-

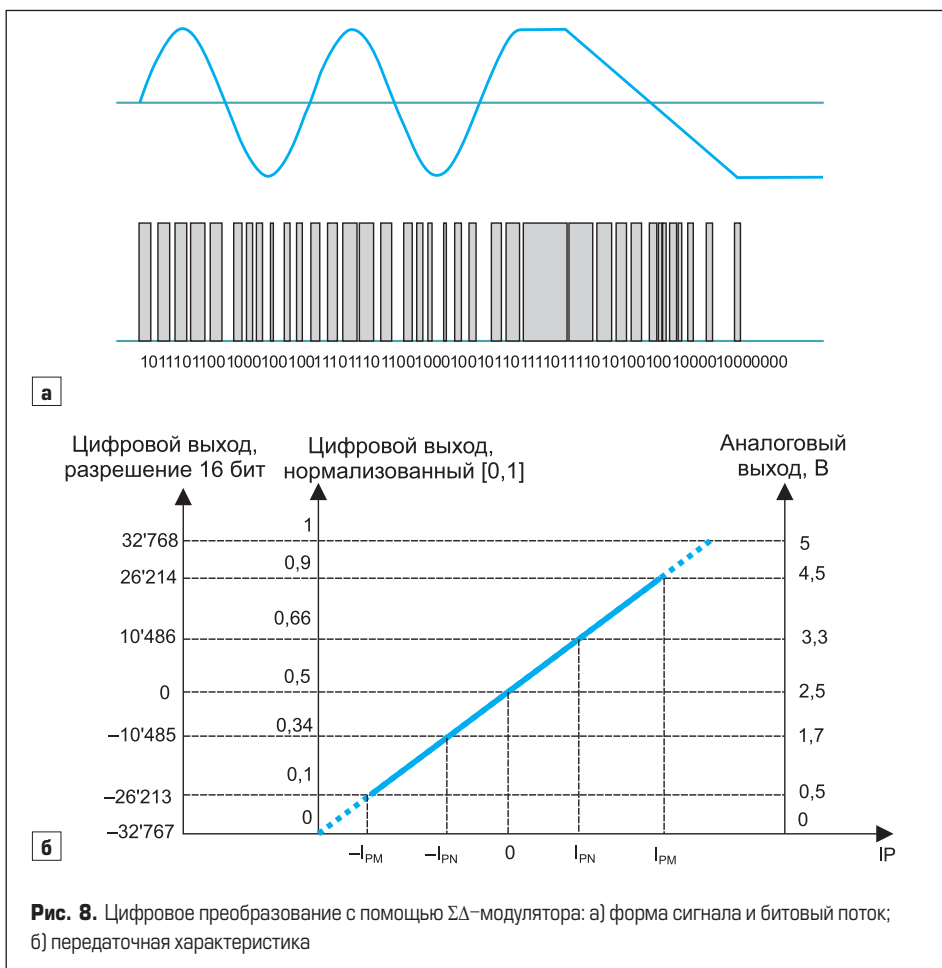


Рис. 8. Цифровое преобразование с помощью $\Delta\Sigma$ -модулятора: а) форма сигнала и битовый поток; б) передаточная характеристика

ристики удовлетворяют большинству требований, предъявляемых к современному приводу.

Высокое усилие прижима контактных поверхностей Press-Fit соединения гарантирует стабильность механических характеристик в течение всего срока службы, а также целостность контактных отверстий PCB. Сборка модуля IGBT и драйвера впервые сертифицирована производителем (SEMIKRON) по контактным характеристикам. Ускоренные испытания, проводимые в экстремальных условиях промышленных воздействий, подтверждают высокую стабильность параметров пружинных и Press-Fit соединений, а также их устойчивость к микровибрациям, фреттингу, тепловым ударам и воздействию агрессивных газов.

SEMIKRON предлагает «шунтовую» версию модулей SEMiX Press-Fit с номинальным током 300, 400, 600 А и рабочим напряжением 1200 и 1700 В, что соответствует диапазону мощностей примерно 75–250 кВт. Дальнейшее наращивание мощности производится путем параллельного соединения силовых ключей, причем токовые шунты также можно включать в параллель. Благодаря наличию встроенного термодатчика NTC и возможности измерения напряжения DC-шины все необходимые для работы контроллера изолированные сигналы формируются на одной печатной плате. Предварительные расчеты показывают, что отказ от внешних изолированных датчиков тока обеспечивает снижение стоимости системы до 6%.

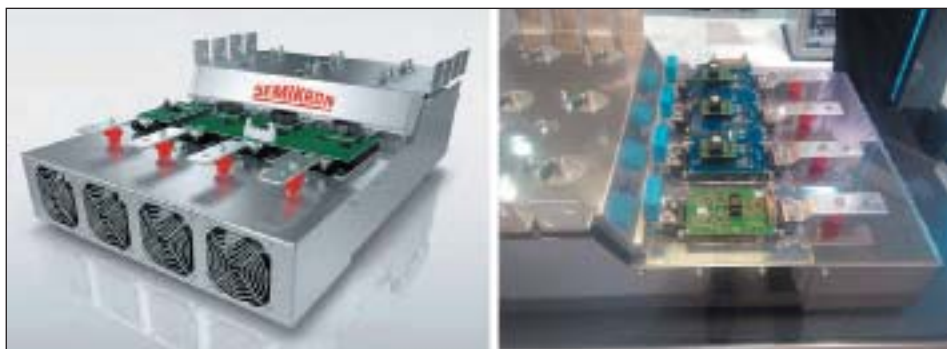


Рис. 9. Трехфазный инвертор 150 кВт без внешних датчиков тока. Используются модули SEMiX453GB12E4p со встроенными шунтами; драйверы SKYPER 12 и $\Sigma\Delta$ -модуляторы AMC1304 установлены на адаптерной плате инвертора

Литература

1. J. Krapp. No need for external sensors // Bodo's Power Systems. May 2016.
2. А. Колпаков. Сила и интеллект // Компоненты и технологии. 2007. № 7.
3. А. Колпаков. SKiip 4 — новая серия IPM для применений высокой мощности // Силовая электроника. 2009. № 4.
4. Thomas Grasshoff. Spring contacts – a reliable, solder-free electrical contact. SEMIKRON INTERNATIONAL. 2006
5. А. Колпаков. Надежность прижимных соединений в условиях агрессивных сред // Силовая электроника. 2006. № 4.
6. А. Колпаков. Никакой пайки! // Силовая электроника. 2015. № 3.
7. T. Stolze, M. Thoben, M. Koch, R. Severin. Reliability of PressFIT Connections. Infineon Technologies. Bodospower. June, 2008.
8. M. Thoben, I. Graf, R. Tschirbs. Press-Fit Technology, a Solder less Method for Mounting Power Modules. PCIM. 2005.
9. Volker Demuth, Thomas Hurtgen. MiniSKiip Dual вместо IGBT 62 мм // Силовая электроника. 2014. № 3.
10. IEC Standard 60749. Semiconductor devices — Mechanical and climatic test methods. August, 2002.
11. IEC Standard 60068-2. Environmental testing. Part 52: Test Kb: Salt mist, cyclic (sodium, chloride solution). February, 1996.
12. IEC Standard 60068-2. Environmental testing. Part 43: Test Kd: Hydrogen sulphide test for contacts and connections. May, 2003.