

Резистивные токовые шунты для применений высокой мощности

Андрей КОЛПАКОВ
Andrey.Kolpakov@semikron.com
Евгений КАРТАШЕВ

Любое современное мощное преобразовательное устройство имеет в своем составе ряд сенсоров, выходные сигналы которых используются для формирования управляющих сигналов, а также работы схемы защиты. Для функционирования электропривода в первую очередь необходимы датчики температуры, напряжения и тока. Наиболее сложной и ответственной является задача формирования изолированного сигнала, пропорционального выходному току инвертора привода. В статье рассматриваются проблемы и перспективы использования резистивных шунтов в силовых применениях.

Общие положения

В импульсном силовом каскаде, примером которого является инвертор частотно-регулируемого привода, датчики тока необходимы для работы схемы управления и защиты. Наиболее часто в подобных устройствах применяются трансформаторы тока, сенсоры на основе эффекта Холла и резистивные шунты.

Основные параметры, характеризующие свойства измерителя, — это линейность, время отклика, стабильность характеристик и помехозащищенность. При проектировании необходимо также учитывать следующие показатели:

- надежность;
- габаритные размеры и простоту установки;
- наличие гальванической изоляции;
- стоимость (соотношение стоимости датчика и силового каскада).

Существуют различные способы преобразования тока в аналоговый или цифро-

вой сигнал, и окончательный выбор зависит от диапазона измеряемых величин, коэффициента перегрузки, способа оцифровки токового сигнала, требований к изоляции. В маломощных применениях (до единиц кВт) для измерения чаще всего применяются резистивные шунты, напряжение с которых подается на дифференциальный усилитель, который может быть изолирующим или неизолирующим. К достоинствам шунтов можно отнести низкую стоимость, невосприимчивость к воздействию электромагнитных помех, компактность. Однако на резисторе неизбежно рассеивается мощность $P_{shunt} = I^2 R_{shunt}$ (R_{shunt} — сопротивление шунта), что снижает эффективность работы преобразователя. Диапазон токов, при котором применение подобных датчиков оправдано, определяется соотношением потерь на активном сопротивлении и общего значения рассеиваемой мощности. Кроме того, шунт должен иметь удобный конструктив, предусматривающий простое подключение к си-

ловой и измерительной цепи и возможность установки на радиатор.

На рис. 1 показана упрощенная схема 3-фазного инвертора привода электродвигателя с измерительными резисторами, установленными в различных точках схемы: R_{BUS} — шунт в цепи питания силового каскада, R_E — шунты в эмиттерах нижних транзисторов полумостов, R_{PHASE} — шунты в выходных цепях инвертора. В шине питания протекает однополярный ток I_{BUS} , являющийся векторной суммой фазных токов инвертора, поэтому падение напряжения на R_{BUS} неудобно использовать для управления приводом. Однако этот сигнал служит хорошим источником информации для схемы защиты, так как при перегрузке в любой части инвертора это отразится на токе питания. Например, при пробое выхода усилителя на корпус ток перегрузки минует резисторы R_E , но проходит через R_{BUS} .

Сигналы в цепях эмиттеров I_E по амплитуде и фазе совпадают с соответствующими выходными токами. Напряжение положительной полярности на резисторе R_E образуется, когда открыт нижний транзистор полумоста и ток нагрузки течет через него, а сигнал отрицательной полярности формирует ток, проходящий через антипараллельный диод (после запирающего транзистора верхнего плеча). Добавив в схему устройство выборки-хранения, управляемое входным ШИМ-сигналом соответствующего полумоста, можно получить линейный двуполярный сигнал, пропорциональный выходному току. Преимущество данного метода в том, что резисторы R_E подключены к минусовой шине питания, которая в маломощных применениях обычно соединяется с сигнальной цепью общего провода.

И наконец, на шунтах R_{OUT} , установленных в цепи нагрузки, наблюдается истинный выходной ток. Основная проблема в данном случае — это выделение малого полезного

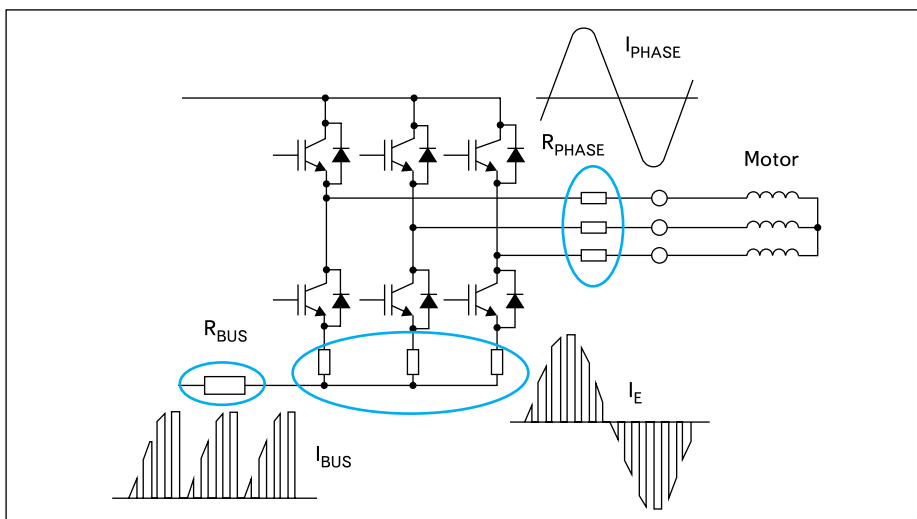


Рис. 1. Форма тока в различных цепях инвертора привода

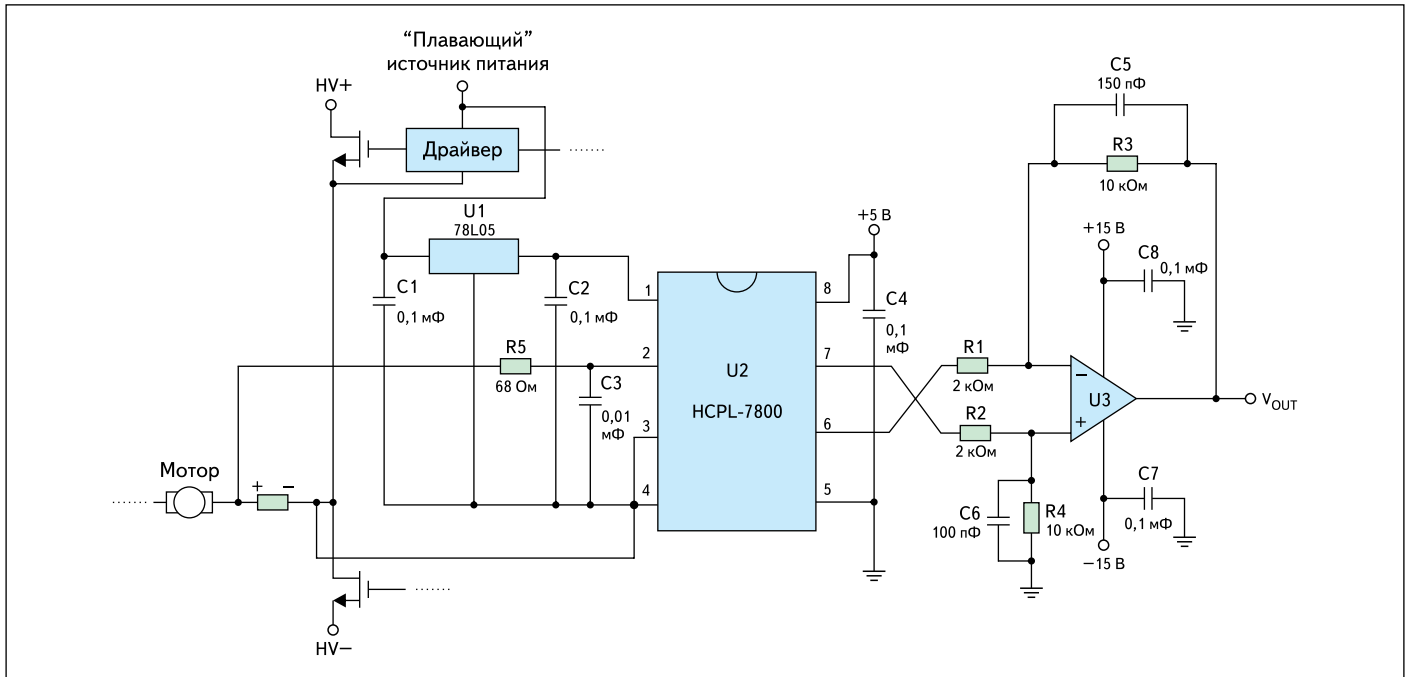


Рис. 2. Схема подключения изолирующего усилителя HCPL7800

сигнала на фоне сотен вольт синфазного напряжения, меняющегося с частотой ШИМ от нуля до напряжения питания DC-шины.

Важнейшим требованием, предъявляемым к измерительным резисторам, установленным в цепях с высоким значением di/dt (R_E), является малая распределенная индуктивность L_S . При изменении тока на шунте возникает перенапряжение $dV_1 = L_S \times di/dt$, искажающее контрольный сигнал. Через резистор, установленный в цепи эмиттера транзистора полумоста, течет ток обратного восстановления оппозитного диода, скорость изменения которого также очень высока. В этом случае значение перенапряжения будет $dV_2 = L_S \times di_r/dt$, где di_r/dt — скорость изменения тока обратного восстановления диода. При мониторинге медленно меняющегося тока в индуктивной нагрузке (I_{PHASE}) этот параметр не имеет большого значения.

Как было сказано выше, полезный сигнал токового шунта R_{PHASE} гораздо меньше выходного напряжения инвертора. Для его точного измерения относительно сигнала общего провода и гальванической развязки необходимо использовать дифференциальный изолирующий усилитель. В области небольших мощностей хорошие компоненты для этой цели предлагает Agilent Technologies. Устойчивость к высоковольтным синфазным помехам в них достигается за счет использования специального оптического экрана, обеспечивающего минимальное значение паразитной переходной емкости, и прецизионного дифференциального усилителя.

В усилителе HCPL7800 (рис. 2) входное аналоговое напряжение преобразуется в ШИМ-сигнал (несущая частота — 100 кГц) и передается через оптический барьер. Микросхема

имеет дифференциальный выход, к которому подключается измерительный усилитель U3, как показано на рисунке. Диапазон входных напряжений HCPL7800 (± 200 мВ) определяет требования к номиналу резистивного шунта и, соответственно, уровень рассеиваемой им мощности. Например, при максимальном токе 20 А необходимо установить резистор $R_{SENSE} = 10$ мОм, на котором будет рассеиваться не более 4 Вт. Эта величина вполне допустима, если учесть, что выходная мощность преобразователя при питании от промышленной сети 380 В составляет более 4 кВт.

Микросхему HCPL788J ее создатели назвали Smart Current Sensor («умный датчик тока»). Устройство формирует аналоговый сигнал V_{OUT} пропорциональный току нагрузки, который может подаваться непосредственно на вход АЦП. Кроме того, у HCPL788J имеются встроенные каскады детектирования состояния перегрузки по току и короткого замыкания. Изделие отличается высокой линейностью коэффициента преобразования, хорошей температурной стабильностью параметров и стойкостью к синфазным помехам.

Еще одна интересная микросхема — изолирующий модулятор HCPL786x, который представляет собой Sigma/Delta (Σ/Δ) АЦП, предназначенный для преобразования низкочастотного аналогового напряжения (например, с резистивного шунта) в последовательность высокочастотных импульсов, длительность которых пропорциональна значению входного сигнала. Компоненты серии HCPL786x разработаны для применения в промышленной аппаратуре с высоким уровнем шумов, в частности в инверторах частотных приводов.

Резистивные шунты для сильноточных применений

Выходные токи описанных выше устройств с токовыми шунтами не превышают десятка ампер, что обусловлено вполне понятными причинами. Однако резистивные датчики продолжают привлекать внимание разработчиков благодаря своим очевидным преимуществам перед индуктивными датчиками и трансформаторами тока. К ним относятся низкая стоимость, высокая линейность и помехозащищенность.

В 2005 году компания Siemens Drive Technologies выпустила на рынок преобразователь SINAMICS G120 мощностью 132 кВт (рис. 3), в котором для контроля фазных токов использованы шунты, встроенные в силовые модули. Технология измерения токов до 800 А с помощью интегральных резистивных датчиков была разработана в ходе совместных исследований компаний Siemens, SEMIKRON и Isabellenhütte.



Рис. 3. Вид шунта SINAMICS G120, встроенного в силовой модуль

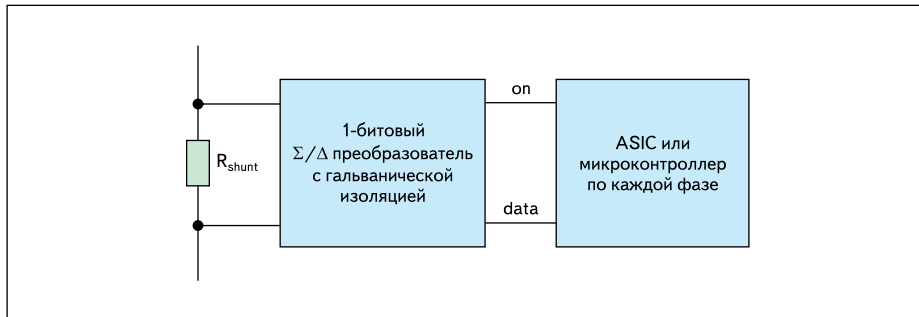


Рис. 4. Базовая схема изолирующего измерителя тока

Схема с измерительным резистором является классической для маломощных применений, где активными потерями на датчике можно пренебречь. В идее использования токовых шунтов с изолирующим усилителем для гальванической развязки также нет ничего революционного. Впервые такое решение было реализовано в приводе Siemens 15 лет назад, сейчас его использует достаточно много производителей.

Требования повышения мощности и линейности измерения при малых габаритах и цене привели к тому, что производители силовой преобразовательной техники снова обратились к идее использования резистивных датчиков. Этому способствует тот факт, что современные технологии силовой электроники позволяют решить большинство конструктивных проблем.

На рис. 4 показана базовая схема изолирующего измерителя тока, в которой падение напряжения на резисторе R_{shunt} преобразуется в последовательный 1-битовый поток данных посредством Sigma/Delta АЦП. Гальваническая развязка осуществляется с помощью оптического, емкостного или магнитного изолятора, интегрированного в цифровой фильтр на основе микроконтроллера или ASIC.

Шунт, состоящий из одного или нескольких параллельных резисторов, и Σ/Δ -конвертор устанавливаются во всех фазах инвертора, где необходимо проводить измерение. Разработка преследовала решение следующих задач:

- снижение стоимости и упрощение конструкции измерителя;
- уменьшение веса и габаритов измерителя;
- обеспечение минимальных потерь мощности на шунте;
- обеспечение требуемого диапазона измерения тока;
- повышение точности работы системы.

Сравнительные характеристики

Сравнение стоимости датчика на базе трансформатора тока с резистивным сенсором показывает, что второй вариант, как правило, экономически является более выгодным. При этом его технические характе-

ристики оказываются соизмеримыми или даже лучшими.

Следует отметить, что 90% модулей, продающихся на рынке в настоящее время, используются в преобразователях малого и среднего диапазона мощности с током до 100 А. Применение в подобных устройствах резистивных шунтов, обеспечивающих прямое и линейное преобразование тока в напряжение, позволяет обеспечить существенную экономию. Основным преимуществом трансформатора тока всегда считалась гальваническая развязка сигнала. Однако добавление цифрового изолятора, необходимого для передачи последовательного кода, почти не влияет на общую стоимость всего преобразователя, и этот фактор является решающим при сравнении экономических показателей (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение стоимости и потерь мощности при использовании трансформатора тока и резистивного шунта

Ток, Arms	Трансформатор, %	Шунт, %
Относительная стоимость		
0–10	100	≈45
10–100	100	≈75
100–250	100	≈90
Потери (от общей мощности)		
1	7	0,3
10	2	0,8
100	0,3	0,9
250	0,1	0,9

Считается, что медные трассы печатных плат типа FR4 могут проводить токи нагрузки до 30–50 А, что позволяет реализовать схему измерения тока с резистивным шунтом на основе SMD-компонентов. Таким образом, данный вариант может оказаться и гораздо более компактным по сравнению с трансформатором тока.

Таблица 2. Основные характеристики шунтовых модулей серии SKKR

Параметр	Условия измерения	SKKR 200/0,2	SKKR 300/0,2	SKKR 400/0,2	SKKR 800/0,1
Долговременный измеряемый ток $I_{ном}$, А	DC (80 °C)	100	150	200	400
Максимальный измеряемый ток I_{max} , А	AC	200	300	400	600
Измеряемое напряжение, мВ	I_{max}	211	211	211	150
$P_{ном}$ на фазу, Вт	$I_{ном}$	11	16	21	42
P_{max} на фазу, Вт	I_{max}	42	64	86	94
R_{shunt} , мОм		1,06	0,71	0,53	0,26

Разводка более мощных цепей должна производиться с помощью силовых шин, и потери мощности на токовых шунтах при этом становятся определяющим фактором. Преодоление данной проблемы возможно только с помощью новых технологических и конструкторских решений.

Максимальная температура кристаллов в модулях IGBT, как правило, составляет 150 °C, у компонентов 4-го поколения (Trench 4) она увеличена до 175 °C. Расширение диапазона рабочих температур и повышение плотности мощности силовых чипов вообще является общей тенденцией силовой электроники. В рамках этой тенденции применение интегральных токовых шунтов может оказаться технически и экономически оправданным.

В измерителях на основе трансформатора тока потери создаются компенсационной схемой, нагрузочным резистором (с которого снимается измерительный сигнал) и преобразователем «напряжение – частота». Мощность, рассеиваемая в компенсационной схеме, практически не зависит от измеряемого тока, однако его величина влияет на потери в нагрузочном резисторе и выходном каскаде устройства.

Как было показано выше, мощность рассеяния шунта непосредственно связана со значением измеряемого тока I в соответствии с выражением:

$$P_{shunt} = I^2 \times R_{shunt} = I \times U_{shunt}$$

Максимальное значение сопротивления и падения напряжения на нем ограничено диапазоном входных сигналов Σ/Δ конвертора, для большинства практических схем эта величина не превышает 0,2 В. При токе 10 А мощность рассеяния составляет 2 Вт, что вполне допустимо для существующих резисторов в SMD-исполнении. С увеличением тока возрастает и серьезность проблемы, например, при измерении 300 А, падение напряжения 200 мВ соответствует потерям 60 Вт (на фазу). Уменьшение U_{shunt} за счет использования меньшего номинала шунта приводит к соответствующему снижению точности измерения.

Очевидно, что использование резистивных датчиков в силовых схемах возможно только при обеспечении эффективного отвода тепла. В любом случае потери на шунте на максимальном токе не должны превышать 1% от общей мощности преобразователя, сравнение по данному показателю приведено в нижней части таблицы 1.

Модули с интегрированными шунтами

Специализированные силовые модули с интегрированными токовыми шунтами для сильноточных применений были разработаны совместно компаниями SEMIKRON и Isabellenhütte (поставщик измерительных резисторов). В процессе разработки решались следующие задачи: согласование коэффициентов теплового расширения (ТКР), обеспечение высокой перегрузочной способности и долговременной стабильности характеристик. Сенсор состоит из 2–4 параллельно соединенных шунтов типа BVT (рис. 5), установленных на изолирующую керамическую подложку, обеспечивающую отдачу тепла на корпус модуля. Выбор номинала резисторов и модификация геометрии DBC-платы позволили обеспечить значение ТКР на уровне 30 ppm/°C.

Модули IGBT со встроенными резистивными датчиками были использованы компанией Siemens при проектировании новой серии инверторов SINAMICS. С начала их производства было выпущено около 100 000 силовых ключей, опыт эксплуатации которых подтвердил высокую техническую эффективность данного решения. Основные характеристики модулей с интегрированными шунтами приведены в таблице 2. Эти компоненты предназначены для работы при напряжении сети до 690 В AC, однако их возможности ограничены, прежде всего, допустимой токовой нагрузкой. Максимальная плотность тока достигнута в SKKR 800/0,1 за счет применения специальной геометрии шунтов и токонесущих шин DBC-подложки. Важно, что данные технологические приемы обеспечивают требуемые характеристики при сохранении показателей надежности и без изменения конструкции корпуса модуля. Последний факт, позволяющий использовать стандартные элементы крепления и силовые шины, очень важен для серийного производства.

С начала выпуска компонентов серии SKKR в 2005 году удалось повысить значение максимального измеряемого тока с 400 до 600 А. Для дальнейшего расширения токонесущей способности шунтовых модулей необходимо решить следующие проблемы:

- уменьшение номинала измерительных резисторов;
- увеличение мощности терминалов и силовых шин;
- снижение суммарных потерь проводимости;
- обеспечение выравнивания статических и динамических характеристик при параллельном соединении модулей;
- использование АЦП с большим динамическим диапазоном.

Специалисты обеих компаний считают, что развитие технологии интегрированных измерительных шунтов в стандартных корпусах IGBT-модулей технически и экономи-

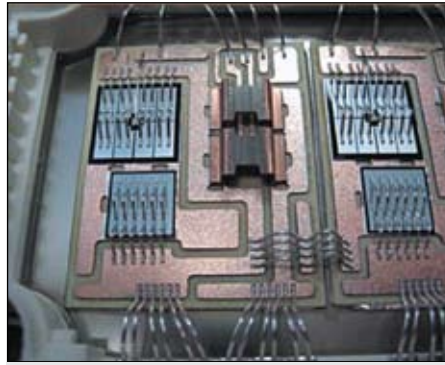


Рис. 5. Параллельное соединение 2 BVT измерительных резисторов на DBC-подложке модуля IGBT

чески оправдано. Опыт разработки и производства подобных компонентов подтвердил, что процесс их проектирования и адаптации под специализированные требования является достаточно простым и недорогим.

Требования к точности измерения

Качество любой измерительной системы определяется ее разрешением, уровнем сигнала смещения и шумов, нелинейностью характеристики, температурной и временной стабильностью параметров. Абсолютная погрешность измерения значения тока оказывает непосредственное влияние на точность работы инвертора привода. Применение инверторов типа SINAMICS в приводе металлообрабатывающих станков позволяет обеспечить качество обработки поверхности на уровне менее 0,2 мкм благодаря очень низкому значению пульсации момента.

Разрешение определяется, прежде всего, разрядностью АЦП и в меньшей степени зависит от характеристик аналоговой части схемы. Заданная Siemens погрешность составляет <0,1%, это требование обеспечивается обоими методами измерения, рассмотренными в статье. При использовании токового шунта чрезвычайно важно корректно выбрать его номинал, технологию изготовления и резистивную модель. Материал, не согласованный с медью по термоэлектрическим параметрам (например, константан), создает термоЭДС и не может соответствовать требованиям по уровню сигнала смещения в диапазоне рабочих температур. Данная проблема полностью устраняется при использовании резисторов Isa-Weld, изготовленных из манганина или материала «изаом», в этом случае смещение определяется только параметрами Sigma/Delta преобразователя.

Нелинейность коэффициента преобразования и их разница между фазами не должны превышать 0,9%. Этот параметр зависит от допуска на номинал нагрузочного резистора компенсационного датчика, критичным также является количество витков компенсационной обмотки токового трансфор-

матора. При использовании резистивного сенсора ошибка измерения определяется разбросом параметров шунта и точностью Σ/Δ конвертора. Однако оценка и сравнение этих характеристик в ходе испытаний показывает, что временной и температурный дрейф сопротивления оказываются более критичными, чем полное значение погрешности.

Результаты, полученные в ходе тестов, подтвердили, что резисторы типа Isa-Weld обеспечивают оптимальное сочетание характеристик и соответствуют всем требованиям Siemens. Необходимую линейность преобразования обеспечивают оба описанных метода измерения, однако резистивные датчики имеют по этому показателю большой и пока что нереализованный потенциал.

Новые исследования и перспективы

Несмотря на описанные выше преимущества резистивных датчиков, большие активные потери по-прежнему ограничивают широкое применение резистивных датчиков на токах выше 600 А. Возможным способом решения проблемы является использование параллельного соединения резисторов, позволяющее снизить их тепловыделение. Однако этот способ требует дополнительного места для размещения шунтов, кроме того, при этом растет стоимость.

Постоянное рассеяние от 30 до 100 Вт мощности только для измерения тока трудно признать целесообразным, особенно в свете современных требований по энергосбережению. Этот факт заставляет разработчиков и технологов искать новые применения для резистивных датчиков, например в области автоэлектроники или солнечной энергетики. Интересные идеи появляются и у производителей Σ/Δ преобразователей. В дополнение к гальванической изоляции посредством оптопар некоторые компании предлагают электромагнитные и емкостные изоляторы. Подобное соревнование технологий приводит к существенному снижению цены и улучшению параметров датчиков.

Основным путем совершенствования схем с токовыми шунтами является снижение диапазона рабочих напряжений (200 → 50 → 20 мВ) при сохранении точности измерения. Это позволит существенно снизить уровень активных потерь шунтов и уменьшить их габариты и стоимость. Примером является новая разработка компании Isabellenhütte: калиброванный сенсорный модуль прямого измерения тока (до ±300 А), напряжения и температуры с изолированным цифровым интерфейсом (рис. 6).

На рынке доступно большое количество недорогих Σ/Δ преобразователей со сниженными требованиями по изоляции, простота их конструкции позволяет существенно снизить стоимость, особенно при больших объемах производства. Такой эффект мож-



Рис. 6. Калиброванный сенсорный модуль ИМС

но получить при использовании одиночного изолирующего барьера, когда тактовый сигнал и данные передаются одновременно в манчестерском коде.

Очевиден тот факт, что технические требования к подобным устройствам неуклонно повышаются. Для того чтобы ослабить влияние сильных электромагнитных полей и повысить помехозащищенность, Σ/Δ конвертер должен располагаться как можно ближе к резистивному датчику. Оптимальным решением является объединение шунта и преобразователя в одном корпусе, подобная интеграция позволяет также снизить габариты и стоимость изделия. Измерительные модули с интегрированным токовым шунтом уже предлагаются на рынке. На рис. 7 показаны токоизмерительные модули типа ИНС

с гальванической изоляцией, рассчитанные на токи до 2000 А.

Развитие технологий полупроводников может привести к тому, что датчики на основе резистивных сенсоров с изолирующим АЦП будут все более востребованы. Уже существуют специальные приводные контроллеры, способные принимать информацию одновременно с 3 фазных шунтов и преобразовывать ее 12–14-битовый цифровой код с высокой частотой выборки. Измерение может проводиться косвенным образом в определенный момент времени после выключения силового транзистора. Это дает возможность резко снизить уровень активных потерь на шунте, уменьшить его размер и даже включить Σ/Δ конвертер в состав силового модуля. Кроме того, схема преобразования может быть смон-

тирована непосредственно на измерительном резисторе, что позволит повысить помехозащищенность. Над такой конструкцией активно работает компания Isabellenhütte, которая уже имеет действующие прототипы подобного решения. ■

Литература

1. Göpfrich K. (Siemens Drive Technologies); Stark R. (SEMIKRON); Hetzler U. (Isabellenhütte). Shunt Current Measuring up to 800 A in the Inverter // Power Electronics Europe. 2009. Issue 7.
2. Ming-Hian Chew. Measuring motor drive and inverter currents // PCIM. July/August 2003.
3. Колпаков А. Измерение тока в мощных импульсных преобразовательных устройствах // Электронные компоненты. 2004. № 2.



Рис. 7. Измерительные модули ИНС с гальванической изоляцией на ток до 2000 А