

# БЕЗМОСТОВЫЕ ККМ С ЦИФРОВЫМ УПРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ

**АНДРЕЙ ПЕРЕСАДИН**, инженер

*Искусственный интеллект, облачный интернет вещей, радиочастотные технологии нового поколения, беспилотные электромобили и другие передовые решения значительно увеличили общий мировой спрос на электроэнергию, побуждая разработчиков расширять существующие границы технологий электропитания, чтобы повысить эффективность систем, их надежность и ускорить время реакции. В статье рассматриваются некоторые из этих технологий.*

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Для силовых преобразователей, используемых в телекоммуникационных системах, центрах обработки данных и в промышленном энергоснабжении, была разработана спецификация с уровнем эффективности 80 Plus. В соответствии с ней энергоэффективность превышает 80% при 20-, 50- и 100-% номинальной нагрузке, а величина коэффициента мощности составляет не менее 0,9 при полной нагрузке.

Спецификация Energy Star 80 Plus, представленная в 2007 г., устанавливает также более высокие уровни эффективности для источников питания AC/DC, начиная с уровня Gold и Platinum и заканчивая уровнем Titanium (см. табл. 1).

Ассоциация производителей сетей хранения данных (Storage Networking Industry Association, SNIA) разработала спецификацию Emerald Power Efficiency Measurement Specification. Она определяет показатели, с помощью которых можно измерить

энергопотребление и эффективность сетевых устройств хранения данных.

Для повышения эффективности силовой электроники применяются не только инновационные топологии, но и полупроводниковые материалы. Силовые устройства на основе карбида кремния (SiC) или нитрида галлия (GaN) с большой шириной запрещенной зоны совершили настоящую революцию в отрасли. Эти новые решения необходимо правильно интегрировать и оптимизировать, чтобы в полной мере обеспечить их преимущества, эффективность и надежность.

Кроме того, изолированные однокристальные датчики тока, работающие в широкой полосе частот в безмостовых корректорах коэффициента мощности (ККМ) и DC/DC-преобразователях, позволяют использовать широкозонные силовые устройства с быстрой коммутацией, что улучшает эффективность и тепловой режим; при этом уменьшаются размеры систем и количество компонентов на печатных платах. Этот дополнительный набор решений необходимо инте-

Таблица 1. Требования стандарта 80 Plus по уровню Titanium

Тип испытаний 80 Plus	Внутреннее напряжение 115 В без резервирования				Внутреннее напряжение 230 В с резервированием			
	10%	20%	50%	100%	10%	20%	50%	100%
Номинальная нагрузка								
80 Plus		80%	80%	80%				
80 Plus Bronze		82%	85%	82%		81%	85%	81%
80 Plus Silver		85%	88%	85%		85%	89%	85%
80 Plus Gold		87%	90%	87%		88%	92%	88%
80 Plus Platinum		90%	92%	89%		90%	94%	91%
80 Plus Titanium		92%	94%	90%		94%	96%	91%

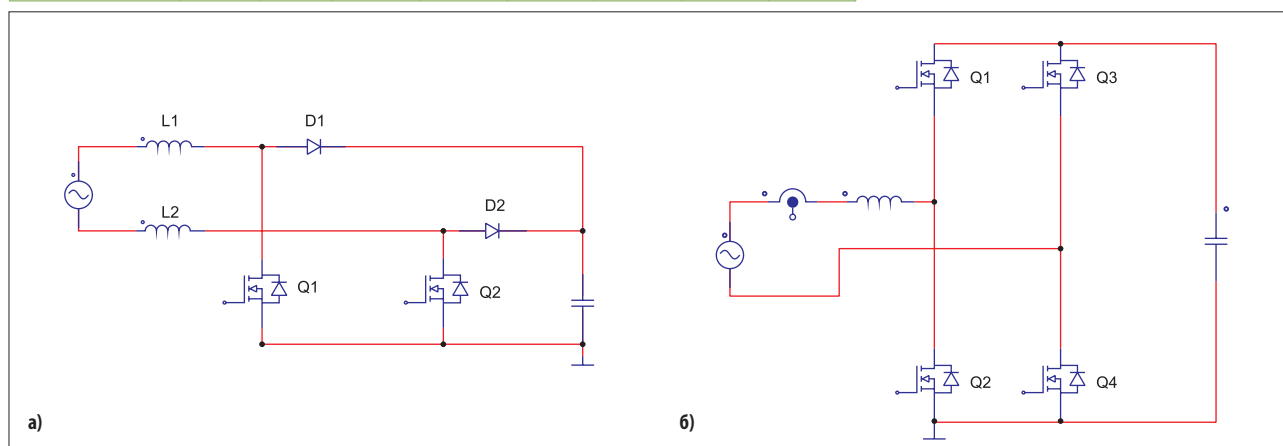


Рис. 1. Топологии безмостовых ККМ двух типов: а) Bridgeless; б) Totem Pole

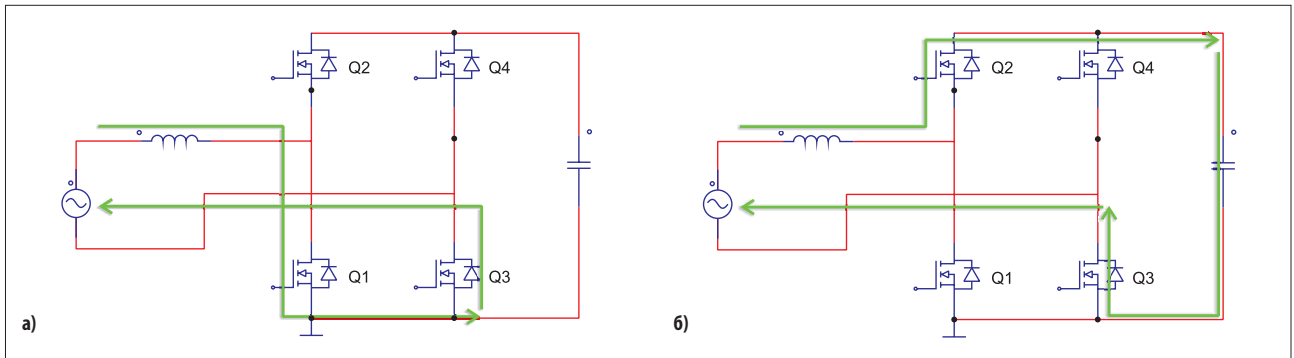


Рис. 2. Включены: а) Q1 и Q3; б) Q2 и Q3

группировать так, чтобы приложение было как можно более экономичным.

### ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Эффективность и плотность мощности напрямую влияют на размер и требования к терморегулированию импульсного источника питания. Чтобы соответствовать стандарту 80 Plus Titanium, пиковая эффективность конструкции должна составлять 96%. Это значит, что эффективность ККМ должна равняться 98,5% при входном напряжении питания 115 и 230 В при суммарной эффективности 96%. Для достижения этой цели применяется одна из наиболее подходящих топологий – безмостовая схема ККМ, которая не требует двухполупериодного выпрямительного моста переменного тока, благодаря чему снижаются соответствующие потери проводимости.

Известны схемы двух типов безмостовых ККМ: 1) Bridgeless и 2) Totem Pole («тотемно»-полюсная) (см. рис. 1). Во второй из них отсутствует входной мостовой выпрямитель, и используется MOSFET для замены выпрямительного диода, что позволяет повысить эффективность.

### ШИРОКОЗОННЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКИ

В схеме ККМ 2-го типа (Totem Pole) требуется SiC MOSFET. Как видно из рисунка 2, эту схему можно рассматривать как DC/DC-преобразователь с синхронным выпрямлением. Использование таких систем вызывает большие

трудности из-за заряда обратного восстановления внутреннего диода MOSFET при работе преобразователя в режиме непрерывной проводимости (CCM). Это значит, что ККМ 2-го типа может работать в режиме прерывистой (DCM) или граничной проводимости (BCM).

Использование каждой схемы сопряжено с отдельными трудностями. Например, ККМ в режиме DCM может поддерживать только приложения с низким энергопотреблением. У ККМ в режиме BCM частота меняется в широких пределах, а пиковый ток в два раза превышает ток ККМ в режиме CCM, что увеличивает сложность конструкции фильтра ЭМП и оптимизацию эффективности. Благодаря использованию широкозонных ключей на основе SiC и GaN схема ККМ 2-го типа может успешно функционировать в режиме CCM, обеспечивая более высокую эффективность и мощность.

Для схемы ККМ 2-го типа мощностью 3,3 кВт на основе SiC MOSFET, датчиков магнитной индукции и цепи управления режимом CCM мы выбрали SiC MOSFET C3M0065090K от Wolfspeed в качестве высокочастотных ключей и устройство IXFH80N65X2 от IXYS для низкочастотной части схемы. Выбор SiC MOSFET вместо GaN MOSFET был сделан потому, что у SiC-ключа – более высокое напряжение пробоя. Использование SiC MOSFET значительно уменьшает потери при обратном восстановлении, позволяя ККМ 2-го типа работать в режиме CCM для обеспечения большей мощности. Кроме того, у кремниевых MOSFET –

Таблица 2. Сравнение потерь Si и SiC MOSFET C3M0065090K

	Si MOSFET	C3M0065090K
$V_{DSr}$ , В	400	400
$I_{Dr}$ , А	12,4	20
$Q_{DR}$ , мкКл	0,77	0,13
$f_{sr}$ , кГц	60	60
Потери, Вт	18,48	3,12

другие значения потерь во внутреннем диоде. В таблице 2 сравниваются величины потерь при обратном восстановлении Si и SiC MOSFET. Видно, что у SiC-ключа потери во внутреннем диоде значительно ниже, как и потери при обратном восстановлении.

### РАБОТА В ПОЛОЖИТЕЛЬНОМ ПОЛУПЕРИОДЕ ЦИКЛА

Работа безмостового ККМ 2-го типа в положительном полупериоде цикла показана на рисунке 2. Ключи Q1 и Q2 являются устройствами SiC MOSFET, которые работают с высокой частотой, а ключи Q3 и Q4 – традиционные низкоскоростные кремниевые MOSFET, функционирующие на частоте 50 или 60 Гц. В токовом тракте ККМ 2-го типа – только два полупроводниковых устройства.

В положительном полупериоде Q1 работает как главный ключ, Q2 – как MOSFET синхронного выпрямителя, а Q3 всегда замкнут и выступает в роли резистора. Когда Q1 включен, источник переменного тока накапливает энергию в индуктивности, а выходной конденсатор подает ток в нагрузку. Когда

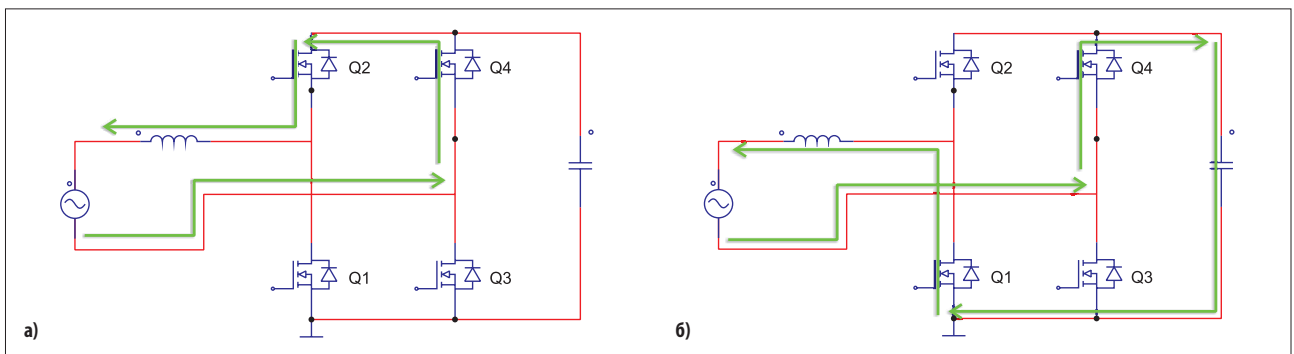


Рис. 3. Включены: а) Q2 и Q4; б) Q1 и Q4

Q1 выключен, а Q2 включен, источник переменного тока и запасенная индуктивностью энергия обеспечивают выходной ток и заряжают выходной конденсатор.

### РАБОТА В ОТРИЦАТЕЛЬНОМ ПОЛУПЕРИОДЕ ЦИКЛА

Работа в отрицательном полупериоде цикла ККМ 2-го типа показана на рисунке 3. И в этом случае в токовом тракте схемы – только два полупроводниковых устройства. В отрицательном полупериоде Q2 работает как главный ключ, а Q1 – как MOSFET синхронного выпрямителя. Q4 всегда включен и выступает в роли резистора.

Когда Q2 включен, источник переменного тока накапливает энергию в индуктивности, а выходной конденсатор подает ток в нагрузку. Когда Q2 выключен, а Q1 включен, источник переменного тока и запасенная индуктивностью энергия обеспечивают выходной ток и заряжают выходной конденсатор.

### ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА

В приложениях с ККМ часто используется контроль среднего значения тока благодаря своей простоте и точности. Для его осуществления контуры регу-

лирования тока требуется усредненное значение тока индуктивности. В традиционных схемах ККМ шунт для измерения тока обычно установлен в линии заземления (см. рис. 4а). Шунтирующий резистор используется для измерения входного тока, а усилитель – для усиления падения напряжения на токочувствительном резисторе. В конструкции ККМ 2-го типа линия заземления отсутствует, и эта схема не может измерять ток.

Для измерения тока индуктивности в безмостовом ККМ 2-го типа применяется несколько методов: трансформатор тока (ТТ) (см. рис. 4б), шунтирующий резистор с операционным усилителем (ОУ) и изолятором (см. рис. 4в), модули датчиков магнитной индукции или ИС (см. рис. 4г).

ТТ можно использовать для измерения тока индуктивности. Поскольку он работает только с переменным током, ТТ лучше подходит для высокочастотных схем. Для измерения коммутируемого тока необходимы три трансформатора тока, которые интегрируют токи индуктивности через MOSFET и выпрямитель в положительном и отрицательном циклах. На рисунке 4б показано, как трансформаторы тока обеспечивают изоляцию при измерении. Хотя им

не требуется отдельное изолированное питание, для восстановления линейного тока схеме необходимы три ТТ. Трансформаторы тока вносят погрешности измерения из-за нелинейности и гистерезиса, присущие магнитному материалу сердечника. К тому же, оба этих параметра имеют температурный дрейф. Кроме того, использование трех ТТ увеличивает расходы и требует больше места на печатной плате.

В другом методе токовый шунт устанавливается последовательно индуктивности, как показано на рисунке 4в. Схеме требуется ОУ, изолятор и отдельный изолированный источник питания с несколькими пассивными компонентами, установленными рядом с изолятором и операционным усилителем. Эта сложная схема занимает достаточно большое пространство. В случае сильноточных приложений дорого обходится использование точных резисторов малого номинала для минимизации рассеиваемой мощности. Кроме того, время отклика на выходе ограничено из-за оптрона и ОУ в сигнальном тракте. Суммарное время отклика на выходе часто превышает 1 мкс.

Неизолированная схема измерения тока с помощью шунта с ОУ (без изолятора), обычно используемого в обратном

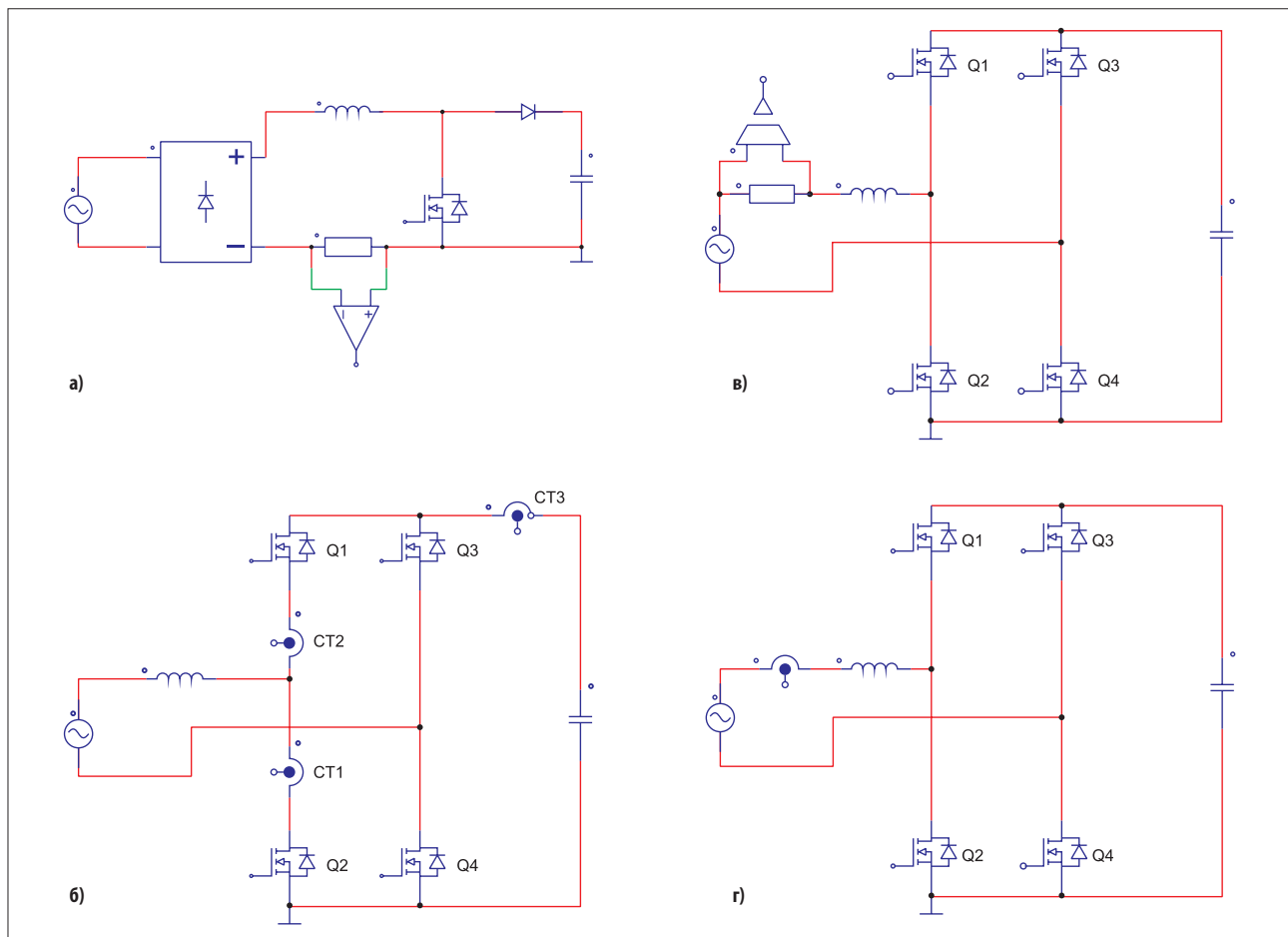


Рис. 4. а) традиционный датчик тока в схеме ККМ; б) трансформатор тока; в) шунтирующий резистор с операционным усилителем и изолятором; г) модуль датчика магнитной индукции, ИС на основе эффекта Холла или анизотропный магниторезистивный датчик

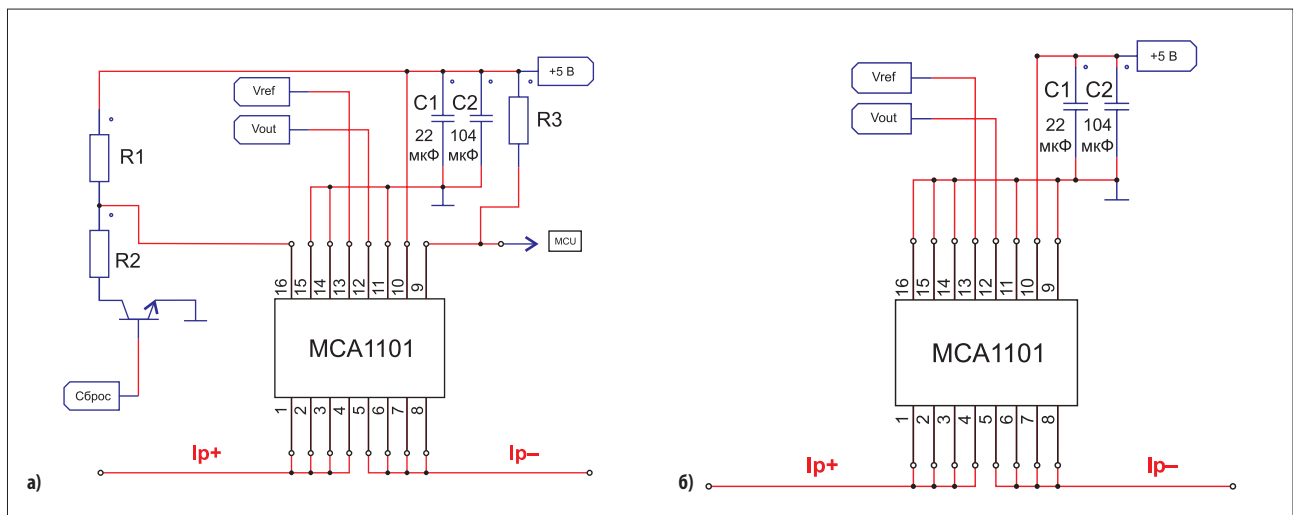


Рис. 5. Использование ИС MCA1101: а) с функцией ОСР; б) без функции ОСР

заземляющем тракте традиционного ККМ (см. рис. 4а), не подходит для ККМ 2-го типа. Применение изолированного модуля датчика, измеряющего магнитное поле, ИС на основе эффекта Холла или анизотропного магниторезистивного датчика (AMR) является эффективным и распространенным методом измерения тока. Эти датчики магнитной индукции обеспечивают изоляцию и не требуют отдельных изолированных источников питания. Типичное расположение датчика показано на рисунке 4г.

При работе с датчиками магнитной индукции возникают две основные проблемы. К первой из них относится ограниченная ширина полосы частот. Полоса пропускания традиционного датчика Холла, как правило, составляет 120 кГц, а искажения достигают 3 дБ на этой частоте. Несмотря на то, что его можно использовать для измерения 50-Гц тока ККМ, большое время отклика на выходе датчика, обусловленное полосой пропускания, не в состоянии обеспечить защиту от пиков и перегрузки по току.

В системах с быстрым переключением защита от пикового тока осуществляется с задержкой. На практике измерение тока обычно выполняется поцикловым в середине коммутационных ШИМ-импульсов. При этом датчик тока должен работать в достаточно широкой полосе, чтобы измерять ток на высокой коммутационной частоте в схемах ККМ 2-го типа на основе SiC или GaN.

#### ТРЕБОВАНИЯ К РАЗМЕРУ

Модули датчиков тока с ферритовыми сердечниками должны обеспечивать высокую точность измерения и надежную защиту, работать в широкой полосе частот, иметь малую фазовую задержку и малое время реакции на выходе. Обычно модули прецизионных датчиков тока с широкой полосой частот не только достаточно громоздкие, но и дорого-

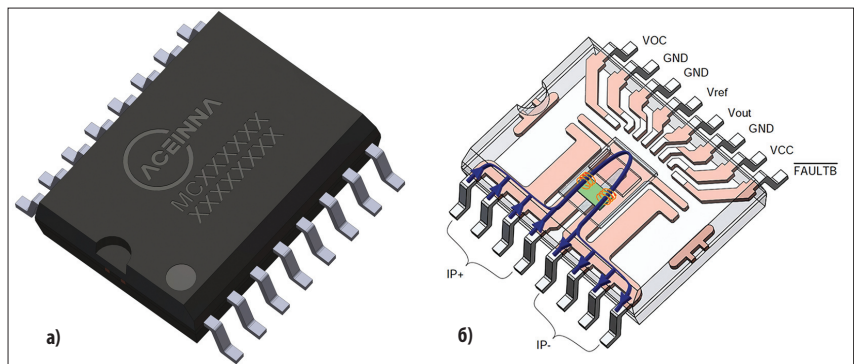


Рис. 6. а) микросхема датчика тока MCA1101; б) внутренняя конструкция ИС

стоящие. Размер этих модулей влияет на занимаемое пространство, плотность мощности и стоимость ККМ-решения.

В рассматриваемом случае для измерения тока индуктивности была выбрана ИС высокоточного изолированного датчика на 4,8 кВ (MCA1101-50-5) от ACEINNA. Эта микросхема, измеряющая ток в диапазоне  $\pm 50$  А с точностью 0,6% (тип.) в полосе частот 1,5 МГц и временем отклика на выходе 300 нс, в состоянии полностью удовлетворить требования к поцикловым измерениям тока на высокой частоте и требованиям к защите.

Устройство с усиленной изоляцией, отвечающее стандарту UL60950, не требует дополнительного изолированного источника питания. Типичная схема приложения показана на рисунке 5а. Если внутренняя функция обнаружения перегрузки по току (OCD) не используется, необходимы только развязывающие конденсаторы, что в еще большей мере упрощает схему, как видно из рисунка 5б.

ИС датчика тока MCA1101 оснащена выходом, напряжение на котором соответствует току 0 А, что позволяет провести калибровку смещения 0 А в системе. Имеется возможность задать порог обнаружения перегрузки по току, а выводы с флагом неисправности

обеспечивают интерфейс с микроконтроллером для активации защиты от перегрузки по току в программном обеспечении. Этот однокристалльный датчик тока заключен в компактный корпус (см. рис. 6).

ИС MCA1101 имеет множество преимуществ для использования в системах с ККМ типа Totem Pole. Эти микросхемы имеют высокую точность по температуре, широкую полосу пропускания, быстрый отклик, один источник питания, усиленную изоляцию, программируемое напряжение для защиты OCD и вывод для индикации сигнала неисправности для передачи в микроконтроллер. Все эти достоинства делают рассматриваемую ИС на основе анизотропного магниторезистивного датчика привлекательным решением.

#### ВЫВОДЫ

Для удовлетворения растущих потребностей в электропитании самых современных прикладных решений необходима наиболее эффективная и экономичная силовая электроника. Понимание новейших базовых технологий, позволяющих выполнить эти требования, и особенностей их интеграции имеют решающее значение для успешного проектирования систем. ▢