

# ЗАЩИТА IGBT С ПОМОЩЬЮ УСИЛИТЕЛЕЙ С ОПТИЧЕСКОЙ РАЗВЯЗКОЙ

**ХОНГ ЛЕЙ ЧЕН (HONG LEI CHEN)**

*Помимо функций измерения тока и напряжения усилители с гальванической развязкой обеспечивают эффективную защиту IGBT от перегрузок, перенапряжения и чрезмерных токов. Используя их совместно с драйверами затворов с расширенными опциями, можно создать экономически эффективную схему полной защиты IGBT.*

Биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) для безаварийной работы требуют надежной защиты от короткого замыкания, перегрузок и перенапряжений. Такая защита является ключевым условием обеспечения безопасности и стабильной работы преобразователя мощности в таких приложениях как системы управления электродвигателями, а также ветряные и солнечные энергосистемы. Для обнаружения перегрузки или превышения тока в фазах на выходе и на DC-шине используются быстродействующие усилители с гальванической развязкой, обладающие быстрой реакцией на аварийные ситуации.

На рисунке 1 показана типовая схема преобразователя мощности, используемая для управления электродвигателем переменного тока. В ее состав входит инвертор, преобразующий

постоянное напряжение шины в мощность переменного тока для управления двигателем на разной частоте. IGBT-транзисторы, являющиеся дорогостоящими силовыми ключами, составляют основу инвертора. Эти силовые устройства должны работать на большой частоте и выдерживать высокие напряжения.

Усилители с гальванической развязкой (изолирующие усилители, ИУ), например ACPL-C79A (см. рис. 2), работающие совместно с шунтирующими резисторами, обеспечивают точное измерение тока в преобразователях мощности даже в присутствии больших коммутационных помех. Совместно с резистивным делителем изолирующие усилители играют роль прецизионных датчиков напряжения, отслеживающих напряжение на DC-шине. Информация о токе и напря-

жении, снимаемая с усилителей, поступает на микроконтроллер, который использует эти данные для расчета значений сигналов обратной связи и выходных сигналов, обеспечивающих эффективное управление преобразователем мощности и предотвращение аварийных ситуаций.

## ЗАЩИТА ОТ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ

IGBT-транзисторы являются наиболее дорогостоящими компонентами инвертора, и потому предпринимаются серьезные усилия для их защиты. ИУ обеспечивают быструю реакцию при появлении аварийных ситуаций, а заложенные в микроконтроллер программы способны предотвратить аварию и выход IGBT из строя. Более того, оптическая развязка ИУ защищает микроконтроллер от перегрузки, предотвращая его выход из строя.

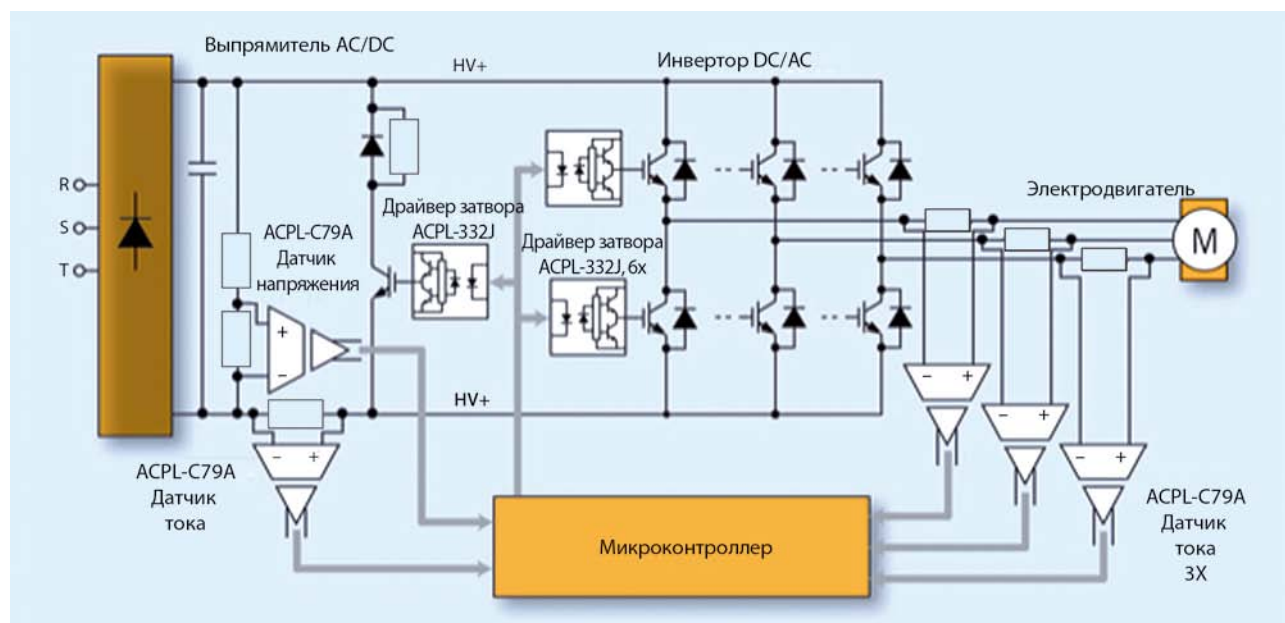


Рис. 1. Блок-схема преобразователя мощности, используемая для управления электродвигателем

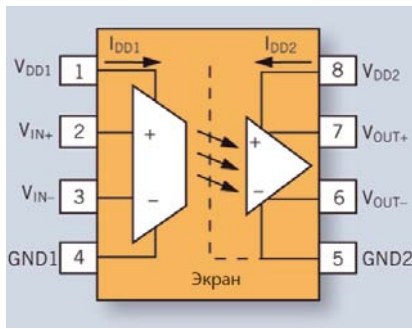


Рис. 2. Упрощенная схема усилителя с гальванической развязкой ACPL-C79A

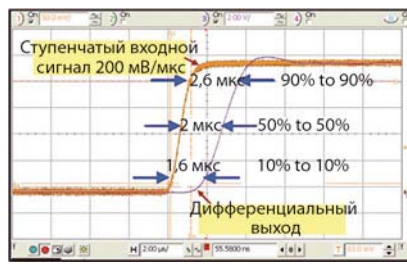


Рис. 3. Отслеживание быстродействующим усилителем ACPL-C79A с временем отклика 1,6 мкс токов в условиях короткого замыкания и перегрузки

Таблица 1. Аварийные ситуации и способы защиты от них

Условия	Возможные ситуации	Опасность	Опции защиты
Превышение тока	Межфазное короткое замыкание, короткое замыкание на землю, пробой	Выход из строя инвертора, тепловая нагрузка на двигатель	Детектирование превышения тока датчиком тока
Перегрузка	Остановка двигателя, перегрузка	Выход из строя инвертора, перегрев двигателя	Детектирование перегрузки датчиком тока
Перенапряжение на DC-шине	Ток регенерации приводит к большому выбросу напряжения	Выход из строя инвертора силовых устройств и других компонентов	Применение ИУ в качестве датчика напряжения для отслеживания напряжения на DC-шине

Однако защита IGBT должна быть эффективной по стоимости — на рынке востребованы устройства, обеспечивающие надежную защиту IGBT от аварийных ситуаций, стоимость которой практически не сказывается на общей стоимости системы управления двигателем. Для выполнения этого требования должны применяться драйверы затворов IGBT (например, ACPL-332J [1]) и датчики тока, не только выполняющие функции управления и измерения, но и обладающие защитными опциями, которые позволяют обнаруживать

аварийные ситуации. Такие устройства обеспечивают эффективные по стоимости схемы защиты IGBT, исключая необходимость в отдельных компонентах защиты и цепей обратной связи. В работах [1–2] приводится детальная информация об опциях защиты у драйверов затвора и способах использования этих опций для защиты IGBT. Мы рассмотрим некоторые защитные функции, которые реализуются с помощью датчиков тока и напряжения (см. табл. 1).

Превышение по току в IGBT может произойти из-за межфазного замыка-

ния, короткого замыкания на землю и пробоя. Эти ситуации обнаруживаются с помощью токочувствительных устройств, состоящих из ИУ и шунта, которые установлены на выходных фазах и DC-шине. Для типовых IGBT безопасный временной интервал в случае возникновения короткого замыкания составляет порядка 10 мкс [3–4]. Для обеспечения эффективной защиты этот предел превышать нельзя. В течение данного времени необходимо обнаружить аварийную ситуацию, оповестить об этом контроллер и выполнить процедуру отключения питания. Это можно сделать несколькими способами.

Например, время отклика быстродействующего ACPL-C79A при ступенчатом сигнале на входе составляет 1,6 мкс, что позволяет уловить переходные процессы, происходящие в условиях короткого замыкания и перегрузки (см. рис. 3) [5]. Время задержки на распространение сигнала с входа на выход устройства в средней точке составляет всего 2 мкс, тогда как для преодоления пути с входа на выход и достижения уровня 90% от установившегося сигнала ему потребуется 2,6 мкс.

ACPL-C79A характеризуется не только высоким быстродействием, но и точностью коэффициента усиления  $\pm 1\%$ , отличной линейностью (коэффициент нелинейности составляет порядка 0,05%) и хорошим соотношением сигнал/шум (SNR) порядка 60 дБ. Модификация ACPL-C79B обладает более высокой точностью коэффициента усиления ( $\pm 0,5\%$ ), а допуск по коэффициенту усиления ACPL-C790

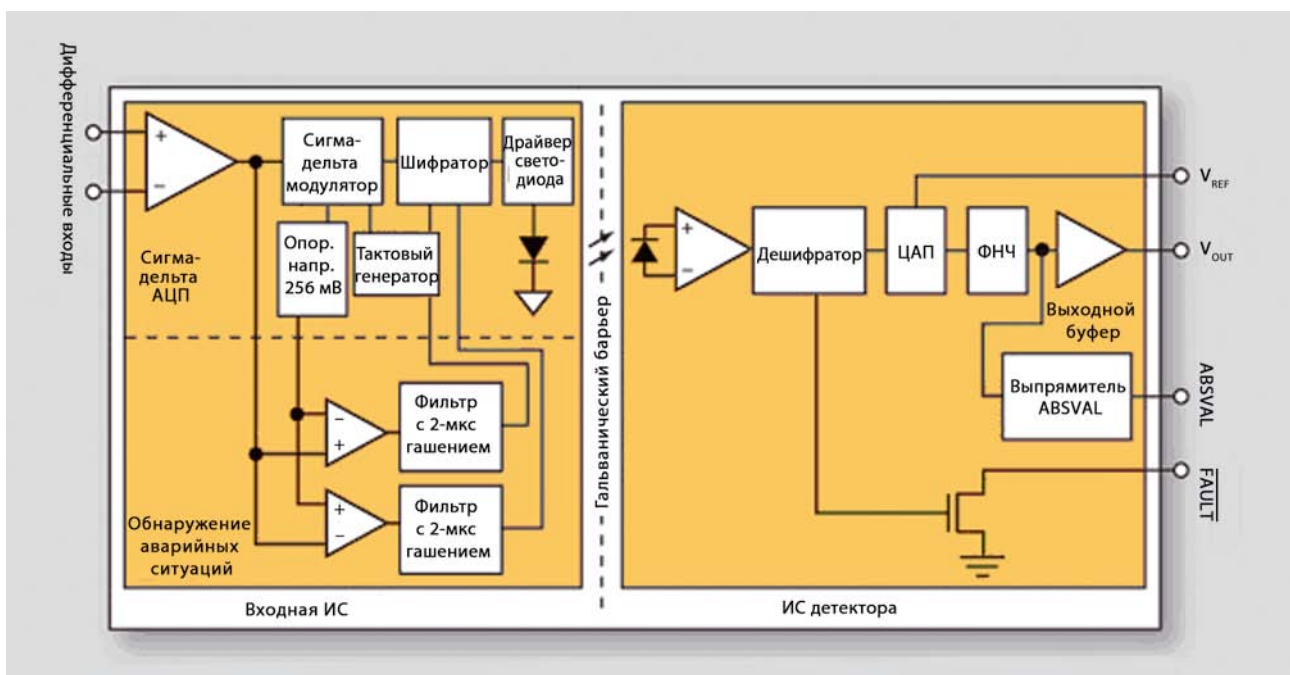


Рис. 4. В ИУ HCSPL-788J дифференциальный входной сигнал преобразуется с помощью сигма-дельта АЦП в цифровой код, подаваемый на светодиодный драйвер, который передает данные через гальванический барьер на детектор и ЦАП

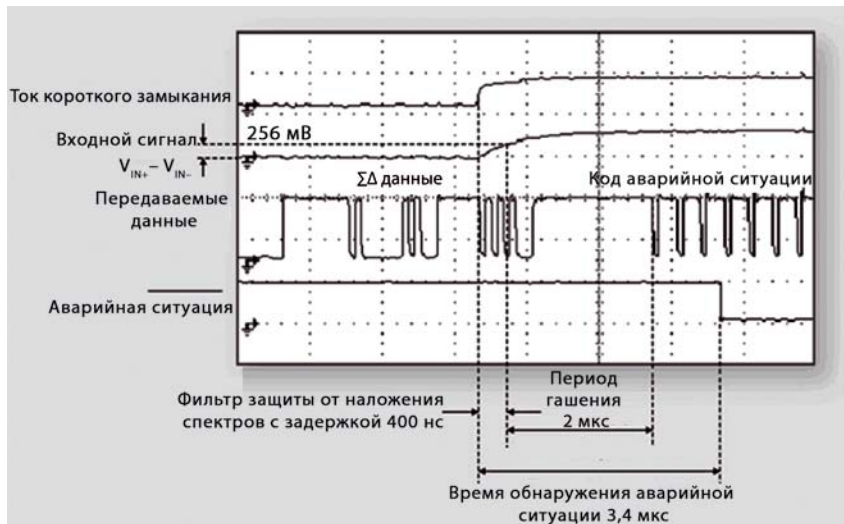


Рис. 5. Временные диаграммы сигналов для ИУ HCPL-788J

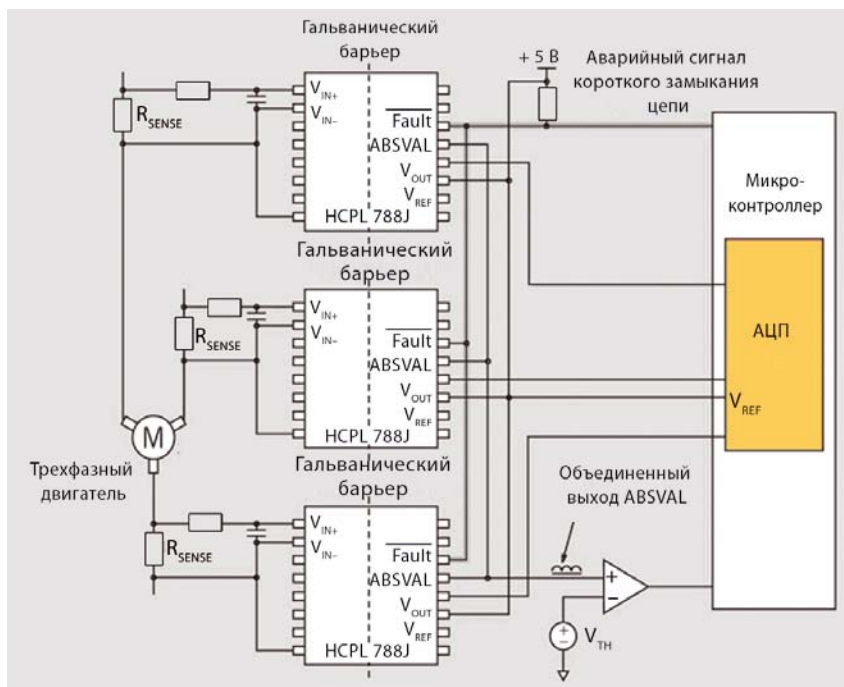


Рис. 6. Схема подключения HCPL-788J, в которой сигналы детектирования аварийных сигналов соединены по схеме ИЛИ

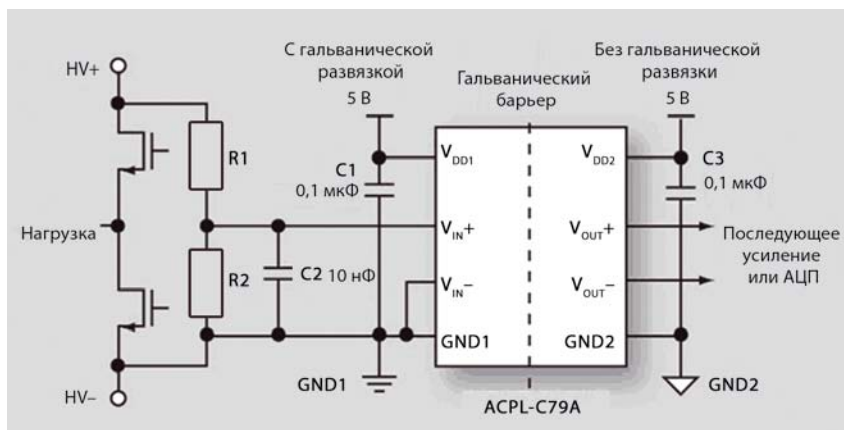


Рис. 7. Применение ACPL-C79A для отслеживания напряжения

составляет  $\pm 3\%$ . Все устройства семейства ACPL-C79A выдерживают в рабочем режиме напряжение изоляции  $1230 V_{PEAK}$  и справляются с большими синфазными переходными помехами до  $15 \text{ кВ/мс}$ . Эти устройства размещаются в корпусах стандарта SO-8, имеющих на 30% меньшую площадь по сравнению со стандартными корпусами DIP-8.

В качестве другого примера можно привести HCPL-788J, в котором для достижения быстрого отклика при обнаружении ситуации превышения тока используется другой подход (см. рис. 4) [6–7]. Это устройство помимо вывода для выходного сигнала имеет вывод аварийного сигнала (Fault), который в случае превышения тока быстро меняется с высокого на низкий уровень. Точность измерения такого ИУ составляет  $\pm 3\%$ .

При проектировании схем защиты приходится решать проблему с ложными срабатываниями при детектировании аварийных ситуаций, способных вывести IGBT из строя, при их реальном отсутствии. Для устранения ложных срабатываний в HCPL-788J применяется схема дискриминатора импульсов, эффективно предотвращающая аварийное срабатывание системы при появлении всплесков  $di/dt$  и  $dv/dt$ . Преимуществом такого метода является его независимость от амплитуды ложных сигналов. Это значит, что можно установить очень низкий порог срабатывания, не увеличив риск ложного отключения электропитания.

Для обеспечения быстрого детектирования аварийных ситуаций в рассматриваемой схеме используются два компаратора, обнаруживающие превышение абсолютных значений как положительного, так и отрицательного аварийных порогов. Порог переключения равен эталонному сигналу сигма-дельта модулятора 256 мВ. Выходы этих компараторов подключены к фильтрам, задерживающим импульсы длительностью менее 2 мкс. Выходы фильтров подключены к шифратору.

Для обеспечения максимально быстрой передачи аварийного сигнала через гальванический барьер используются два специальных кодовых сигнала, соответствующих обнаруженной аварийной ситуации: один при превышении положительного порога, другой — отрицательного. При детектировании аварийного сигнала нормальная передача данных через оптический канал прерывается, и поток битов заменяется кодом аварийной ситуации. Коды аварийных ситуаций существенно отличаются от обычной схемы кодировки, поэтому дешифратор на стороне детектора их мгновенно распознает [7].

Для детектирования и распознавания аварийной ситуации дешифрато-

ру, расположенному за гальваническим барьером, требуется порядка 1 мкс. Фильтр защиты от наложения спектров (anti-aliasing) добавляет задержку порядка 400 нс, поэтому задержка на распространение сигнала оказывается равной 1,4 мкс. Задержка между возникновением аварийной ситуации и появлением аварийного сигнала на выходе устройства складывается из двух составляющих: времени распространения и периода гашения ложных импульсов (2 мкс). Таким образом, суммарное время детектирования аварийной ситуации составляет 3,4 мкс (см. рис. 5).

Вывод Fault позволяет подключать аварийные сигналы одновременно от нескольких устройств, что позволяет объединять по проводной схеме ИЛИ несколько частей системы, реализуя тем самым единый аварийный сигнал (верхняя правая часть рисунка 6) [6]. Этот сигнал можно затем использовать для непосредственного отключения входов ШИМ с помощью контроллера.

### ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ПЕРЕГРУЗКИ

Ситуация перегрузки относится к случаям, когда ток электродвигателя превышает номинальный ток драйвера, но не настолько, чтобы для инвертора или двигателя существовала угроза немедленного выхода из строя. Например, это происходит, когда двигатель механически перегружен или он остановился из-за выхода из строя подшипника.

Для инверторов в дополнение к номинальным значениям обычно определяют допустимые параметры перегрузки. Допустимый интервал времени работы в условиях перегрузки зависит от того, насколько быстро перегрев становится реальной проблемой. Обычно номинальная допустимая перегрузка составляет 150% от номинальной нагрузки в течение интервала времени, не превышающего 1 мин.

Типовой диапазон входных напряжений ACPL-C79A составляет  $\pm 300$  мВ, но в справочных данных указывается номинальный входной диапазон  $\pm 200$  мВ. Разработчик имеет возможность выбрать порог перегрузки по любому из этих двух значений или среднее из них. Если требования к точности измерения тока перегрузки менее строгие, чем к точности номинального рабочего тока, что является обычной ситуацией, правильным решением является выбор порога в районе 300 мВ, что позволяет использовать динамический входной диапазон ИУ полностью. Однако установка порога на уровне 200 мВ обеспечит точность измерения тока перегрузки. После того как разработчик определился с уровнями напряжения, ему следует подобрать соответствующий чувствительный резистор, номинал которого задается уровнем тока.

У HCPL-788J имеется дополнительная опция — выход ABSVAL, который может использоваться для упрощения схемы детектирования перегрузки. Цепь ABSVAL преобразует выходной сигнал таким образом, чтобы он оставался пропорциональным абсолютному значению входного сигнала, т.е.:

$$ABSVAL + |V_{in}| \cdot \frac{V_{refext}}{252 \text{ мВ}} \quad (1)$$

Такие выходы могут подключаться по схеме OR (ИЛИ). При объединении синусоидальных сигналов от трех фаз двигателя выпрямленный сигнал на выходе ABSVAL представляет собой напряжение, пропорциональное суммарному эффективному значению (RMS) тока электродвигателя. С помощью этого DC-сигнала и порогового компаратора можно детектировать условия перегрузки двигателя до того, как он или его драйвер выйдут из строя (см. рис. 6).

### ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ

Напряжение на DC-шине также необходимо постоянно контролировать. В определенных рабочих условиях дви-

гатель может работать как генератор, добавляя в DC-шину через силовые компоненты инвертора или восстанавливающиеся диоды высокое напряжение. Это высокое напряжение, складываясь с напряжением на DC-шине, формирует всплески очень высокого напряжения, попадающие на IGBT. Такие всплески могут превышать максимально допустимое напряжение коллектор-эмиттер IGBT, что может стать причиной его выхода из строя.

Миниатюрный ИУ ACPL-C79A часто используется как датчик напряжения, отслеживающий напряжение на DC-шине системы (см. рис. 7). Разработчик должен отрегулировать напряжение на DC-шине, выбрав корректные значения R1 и R2, чтобы оно соответствовало входному диапазону ИУ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. ACPL-332J Data Sheet, Avago Technologies, AV02-0120EN.
2. Hong Lei Chen and Chun Keong Tee. Using gate drive optocouplers in IGBT protections//EETimes Europe. December 2010. PP. 28–31.
3. Terje Rogne. Short-Circuit Capability of IGBT (COMFET) Transistors//IEEE. 1988.
4. J. Li, R. Herzer, R. Annacker, B. Koenig. Modern IGBT/FWD Chip Sets For 1200V Applications. Semikron Elektronik GmbH. 2007.
5. ACPL-C79B, ACPL-C79A, ACPL-C790 Precision Miniature Isolation Amplifiers Data Sheet. Avago Technologies. AV02-2460EN.
6. HCPL-788J Data Sheet, Avago Technologies, AV02-1546EN.
7. Patrick Sullivan, Denis Kobasevic. Smart Current Sensor For Motor Drive Control//PCIM Europe. 1998. Vol. 10. No. 4. PP. 182–186.

## СОБЫТИЯ РЫНКА

### | СОЗДАНИЕ БАЗЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОНИКИ — ВОПРОС БЕЗОПАСНОСТИ РФ, СЧИТАЮТ УЧЕНЫЕ |

Академик Андрей Кокошин на заседании Президиума РАН заявил: «Надо создать консорциум по электронной компонентной базе, (состоящий) из представителей Минпромторга, Министерства обороны, ФСБ. Нам нужно иметь собственные технологии такого рода, это один из важнейших вопросов информационной безопасности (страны)».

Такой консорциум необходимо создавать с участием соответствующих предприятий и научных институтов, добавил глава Сибирского отделения РАН академик Александр Асеев. По его словам, Россия занимает ведущие позиции в мире по ряду соответствующих научных направлений, в частности, связанных с созданием квантовых материалов.

Для реализации работ по электронно-компонентной базе необходимо создавать российское оборудование, чтобы не зависеть от его экспорта, отметил академик Владимир Бетелин. «Центральный вопрос — обязательно включить в эту программу создание (отечественного) оборудования», — сказал он.

[www.elcomdesign.ru](http://www.elcomdesign.ru)

ООО  
СМР



ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН  
[www.SMD.ru](http://www.SMD.ru)

электронные  
для поверхностного  
монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК



Синфазные EMI фильтры 0805 и 1206  
Проходные конденсаторы Murata

Москва, ул. Балтийская, 13; e-mail: [sale@smd.ru](mailto:sale@smd.ru)  
Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8780