

Резисторы

для силовой электроники

Бурное развитие силовой преобразовательной техники, происходящее в настоящее время, неразрывно связано с появлением на рынке полупроводников новых компонентов, обладающих уникальными импульсными характеристиками. В первую очередь это силовые транзисторы *MOSFET* и *IGBT*, а также управляемые тиристоры *GTO*. Использование этих компонентов в мощных приводах, источниках питания и др. позволяет создавать преобразователи, имеющие высокую эффективность и отличные массогабаритные показатели. Однако необходимо принять во внимание, что не только силовые ключи определяют качественные показатели преобразовательного устройства, его разработка немислима и без разнообразных пассивных компонентов — конденсаторов, снабберов, элементов защиты, резисторов. О мощных резисторах, необходимых для разработки и производства силовых преобразователей, и пойдет речь в данной статье.

Александр Савельев

Asavelyev@elfa.spb.ru

Сфера применения мощных сопротивлений в силовых преобразовательных устройствах чрезвычайно широка: это прецизионные токоизмерительные шунты, разрядные резисторы и модули предварительного заряда, элементы снабберов, нагрузки, тормозные резисторы и многое другое. Заменить их в данных применениях на активные компоненты не представляется возможным, значит, еще многие годы сопротивления будут оставаться элементами, востребованными в силовой электронике.

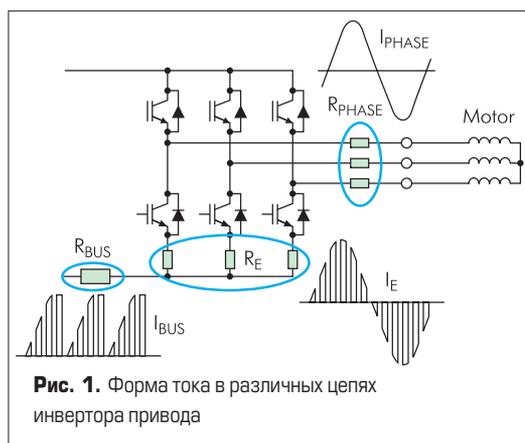
Одним из наиболее интересных применений резисторов в силовой электронике является измерение тока.

Существуют различные способы преобразования тока в аналоговый или цифровой сигнал, и окончательный выбор зависит от диапазона рабочих токов, значения тока перегрузки, способа оцифровки токового сигнала, требований к изоляции. При невысоком значении тока (обычно не превышающем десятков ампер) для его измерения применяются резистивные токовые шунты, напряжение с которых подается на дифференциальный усилитель, который

может быть изолирующим или неизолирующим. Преимуществами резистивных шунтов является их низкая стоимость, невосприимчивость к воздействию электромагнитных помех, компактность. Однако на резистивном шунте неизбежно рассеивается мощность I^2R_s (R_s — сопротивление шунта), что снижает эффективность работы преобразователя. Именно поэтому диапазон токов, при котором применение резистивных измерителей оправданно, определяется допустимым уровнем потерь на сопротивлении шунта. Кроме того, токовый шунт должен иметь удобный конструктив, предусматривающий простое подключение к силовой и измерительной цепи и возможность установки на радиатор.

На рис. 1 показана упрощенная схема трехфазного инвертора привода электродвигателя с измерительными шунтами, 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. На рисунке также приведены эпюры токов, сигнал которых снимается с соответствующих измерительных резисторов. Ток в шине питания I_{BUS} , являющийся векторной суммой фазных токов инвертора, однополярный, поэтому его неудобно использовать для управления приводом, однако он служит хорошим источником информации для схемы защиты, так как при токовой перегрузке в любой части инвертора это отразится на токе питания. Например, при пробое выхода усилителя на корпус ток пробоя не будет индцироваться эмиттерными резисторами R_E .

Токи в цепи эмиттеров I_E по амплитуде и фазе совпадают с соответствующими выходными токами. Сигнал положительной полярности на резисторе R_E образуется, когда открыт нижний транзистор полумоста и ток нагрузки течет через него, а сигнал отрицательной полярности формирует ток нагрузки, проходящий через антипараллельный ди-



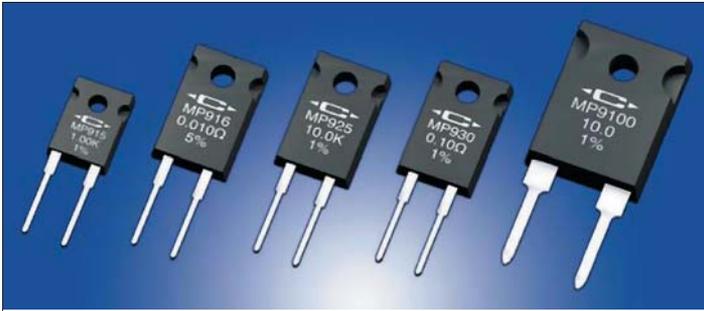


Рис. 2. Внешний вид измерительных резисторов CADDOCK серии MP

од (после запираания транзистора верхнего плеча). Добавив в схему устройство выборки-хранения, управляемое входным ШИМ-сигналом соответствующего полумоста, можно получить линейный двуполярный токовый сигнал. Преимуществом данного метода является то, что резисторы R_E подключены к общей шине питания, которая в маломощных применениях может быть соединена с сигнальной цепью общего провода.

И наконец, на шунтах R_{OUT} , установленных в цепи нагрузки, наблюдается истинный выходной ток. Основной проблемой в данном случае является выделение полезного сигнала, значение которого составляет единицы милливольт, на фоне сотен вольт синфазного напряжения, меняющегося с частотой ШИМ от нуля до напряжения шины силового питания.

Важнейшим требованием, предъявляемым к измерительным резисторам, является низкое значение распределенной индуктивности. Значимость этого параметра определяется тем, что в современных импульсных усилителях чрезвычайно высока скорость изменения токов выходных каскадов. Соответственно, на измерительном резисторе будет возникать перенапряжение $dV1 = L_S \times dI_C/dt$, искажающее контрольный сигнал, где L_S — значение распределенной индуктивности шунта, а dI_C/dt — скорость изменения тока транзистора. Если шунт установлен в цепи эмиттера (коллектора) транзистора полумоста, то через него течет также ток обратного восстановления оппозитного диода, скорость изменения которого тоже очень высока. В этом случае значение перенапряжения будет: $dV2 = L_S \times dI_{TR}/dt$, где dI_{TR}/dt — скорость изменения тока обратного восстановления диода. Естественно, что при измерении медленно меняющегося тока, например тока в индуктивной нагрузке (I_{PHASE} на рис. 1), этот параметр не столь важен.

Мощные безындуктивные шунты нужны в случае, когда стоит задача измерения или осциллографирования быстро меняющихся токов. Хорошим решением данной проблемы является использование пленочных измерительных резисторов серии MPxx, производи-

мых фирмой CADDOCK. Мощные низкоомные безындуктивные (Non-Inductive) резисторы MPxx предназначены для использования в качестве измерительных шунтов в силовых электронных устройствах. Они выпускаются в изолированных корпусах для поверхностного монтажа и мощных корпусах (D-PAK, TO-126, TO-220, TO-247), что упрощает монтаж на теплоотвод и позволяет отводить значительную мощность. Внешний вид измерительных резисторов, выпускаемых фирмой CADDOCK, приведен на рис. 2, а их основные технические характеристики — в таблице 1.

Продукция фирмы CADDOCK настолько интересна и разнообразна, что стоит подробнее рассказать о типах и классах элементов, выпускаемых данной компанией.

С 1962 года фирма CADDOCK специализируется на производстве прецизионных пленочных резисторов специального применения. Используемые технологии Micronix и Tetrix обеспечивают отличные технические характеристики и позволяют использовать эти резисторы в различной специальной аппаратуре, в том числе космического и военного применения. Основные преимущества резисторов CADDOCK — это сверхнизкая индуктивность, точность, температурная и временная стабильность параметров.

Области применения резисторов CADDOCK:

- Серии TG, MG, MX — электронные микроскопы, CRT-дисплеи, линейные акселерометры.
- Серии MS, MP, MV, MM — источники питания, радиопередатчики, импульсные конвертеры, системы обработки данных.
- Серии MG, TG, TK, MK, T1794 — медицинская аппаратура, компьютерные сканеры и томографы.
- Серии 1776, T1794, 1787, 1789, T912/T914 — измерительная аппаратура, цифровые мультиметры, прецизионные источники опорного напряжения и тока.
- Серии MG, ML, MS, MM, MK, TG, THV — сверхпрецизионные и надежные пленочные резисторы для космической и военной аппаратуры.

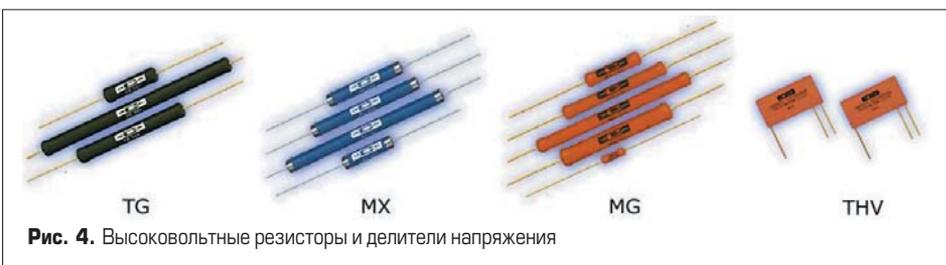


Рис. 4. Высоковольтные резисторы и делители напряжения

Таблица 1. Основные параметры резисторов MPxx CADDOCK

Тип	Корпус	Номинал	Мощность, Вт	Рабочее напряжение, В	Тепловое сопротивление, R_{thj-c} C/Вт	T_{max} C
MP915	TO-126	0,02 Ом–1 кОм	15	200	8,33	150
MP916	TO-220	0,01 Ом–0,02 Ом	16	Ограничено мощностью	7,81	150
MP925	TO-220	5 кОм–100 кОм	25	500	5	150
MP930	TO-220	0,02 Ом–5 кОм	30	250	4,17	150
MP9100	TO-247	0,05 Ом–100 Ом	100	Ограничено мощностью	1,5	175

MP800, MP900, MP2060

Мощные низкоомные резисторы предназначены для использования в качестве измерительных шунтов в силовых электронных устройствах. Они имеют сверхмалую индуктивность и выпускаются в изолированных корпусах TO-220, TO-126, TO-247, что обеспечивает удобство установки на печатную плату и радиатор и позволяет отводить требуемую мощность.



Рис. 3. Прецизионные резисторы для поверхностного монтажа

Особенности:

- Диапазон сопротивлений от 0,005 Ом до 100 кОм.
- Рассеиваемая мощность 20–100 Вт.
- Рабочая температура от –55 до 155 °C.
- Тепловое сопротивление 4 °C/Вт.
- Точность 1%.

CC, CD, CHR, MP725

Прецизионные резисторы для поверхностного монтажа.

Особенности:

- Диапазон сопротивлений от 0,01 Ом до 100 МОм.
- Рабочая температура от –55 до 155 °C.
- Точность 1%.
- Температурный коэффициент ТКС менее 25 ppm/°C.

TG, MG, USG, MX, USVD, HDV

Прецизионные высоковольтные резисторы и делители напряжения имеют лучшие характеристики в своем классе. Ультростабильные прецизионные USG с напряжением до 15 кВ, сверх-



Рис. 5. Прецизионные и сверхпрецизионные резисторы

прецизионные делители напряжения USVD и HDV обеспечивают деление высоковольтного напряжения с точностью до 0,01% и с температурным коэффициентом деления 2ppm/°C.

Особенности:

- Диапазон сопротивлений от 1 МОм до 1 ГОм.
- Рабочее напряжение до 48 кВ.
- Точность 0,01–1%.
- Коэффициент деления от 1:1 до 100:1.

USF, TK, TF, TN

Сверхпрецизионные резисторы с низким ТКС в керамических корпусах, обеспечивающие в своем классе самый низкий температурный коэффициент сопротивления и имеющие отличные тепловые характеристики.

Особенности:

- Диапазон сопротивлений от 50 Ом до 125 МОм.
- Рабочая температура от –55 до 155 °C.
- Точность 0,01–1%.
- Температурный коэффициент ТКС 2–5 ppm/°C.

T912, T914, 1776, 1787

Сверхпрецизионные резисторные сборки и делители напряжения в керамических корпусах, обеспечивающие в своем классе самый низкий температурный коэффициент сопротивления и имеющие отличные тепловые характеристики.

Особенности:

- Диапазон сопротивлений от 1 Ом до 50 МОм.
- Рабочая температура от –55 до 155 °C.
- Точность 0,01–1%.
- Температурный коэффициент ТКС 1–5 ppm/°C.

Резисторы для силовой электроники Danotherm

Более мощные резисторы для различных применений в изделиях силовой электроники выпускаются рядом фирм, среди которых ведущее место занимают Danotherm, Isabellenhutte и Argol. В данной статье мы рассмотрим продукцию компании Danotherm, перекрывающей наиболее широкий спектр применений в данной области. Компания Danotherm Electric A/S была основана в 1919 году в Копенгагене. С тех пор фирма занимается производством высококачественных надежных компонентов и систем для различных отраслей промышленности.

Основные типы резисторов, выпускаемых фирмой, а также их основные характеристики приведены в таблице 2.

Далее мы приведем подробное описание наиболее интересных групп компонентов, выпускаемых Danotherm.

Семейство **α ALPHA** представляет серию мощных тормозных резисторов в алюминиевых корпусах. Изолированные резисторы **ALPHA** предназначены для применения в компактных преобразователях, работающих в условиях высоких импульсных токов.

Таблица 2. Основные типы и характеристики резисторов Danotherm

Группа элементов	Описание	Тип, мощность	Внешний вид
ALPHA	Тормозные резисторы в алюминиевых корпусах	65–1000 Вт	
OMEGA	Нагрузочные резисторы в стальных трубчатых корпусах с воздушным и жидкостным охлаждением	Серия UT 1,2–5,2 кВт (воздушное охлаждение) 5–100 кВт (жидкостное охлаждение)	
SIGMA	Модульные витые тормозные резисторы	100 Вт–5 кВт	
TERA	Сильноточные 3-фазные тормозные и нагрузочные резисторы	до 500 МВт	
Заказные тормозные резисторы	Тормозные резисторы заказного исполнения		
Трубчатые резисторы	Эмалированные цементные стандартные резисторы для зарядных и защитных цепей	15–1000 Вт	
Плоские овальные резисторы	Проволочные мощные резисторы плоской овальной формы на цементной основе остеклованные	15–1000 Вт	
Резисторы для установки на радиатор	HS, HSD — стандартные в алюминиевом корпусе; HSF — стандартные плоские резисторы; HSM — модульные счетверенные резисторы; HSH — резисторы в алюминиевом корпусе с повышенной площадью охлаждения	до 500 Вт	
Толстопленочные резисторы	Толстопленочные резисторы на керамическом основании со стеклянным покрытием для работы в условиях высоких перегрузок	до 300 Вт	
Реостаты	Проволочные витые реостаты на керамическом основании эмалированные	12–500 Вт	
Заказные продукты	<ul style="list-style-type: none"> • Нагревательные элементы. • Потенциометры для джойстиков. • Наборы резисторов. • Паяльные станции на горячем воздухе. 		

Допустимая мощность сопротивлений может быть увеличена с помощью установки их на теплоотвод или за счет применения принудительного воздушного охлаждения.

Danotherm предлагает шесть семейств тормозных резисторов данного типа: CA, CB, CCH, CCR, CBT, CBR. Серии CA и CB выпускаются

в горизонтальных и вертикальных исполнениях. Поскольку допустимая мощность, рассеиваемая резистором, зависит от значения тока перегрузки, условий охлаждения, а также наличия и параметров теплоотвода, предельные характеристики резисторов **ALPHA** ограничены размерами алюминиевого корпуса.

Нагрузочные резисторы **OHMEGA** в стальных трубчатых корпусах предназначены для работы с воздушным и жидкостным охлаждением. Они отличаются компактным конструктивом и высокой стабильностью механических характеристик. Основные применения:

- дизель-электрические транспортные средства;
- климатические системы для железнодорожного транспорта;
- лифтовое оборудование.

Модульные тормозные резисторы **Σ SIGMA** предназначены для применения в преобразователях частоты в каскадах предварительного заряда и торможения. Данные компоненты выполнены по проверенной надежной технологии проволоочной навивки на керамическую основу из кордериита — теплопроводящего материала со сверхнизким коэффициентом теплового расширения. Резистивный материал покрыт слоем фосфата алюминия, сохраняющего свои свойства при температуре до 700 °С, для защиты проволоки от окисления и улучшения теплопередачи.

Благодаря модульной конструкции модули **SIGMA** могут быть смонтированы из различного количества резисторов в зависимости от задачи. Возможно открытое исполнение (только резистор на несущем основании) или исполнение с защитной сеткой по классу IP20-IP65 с выводами на керамическом основании или контактной группой. Возможно также изготовление **SIGMA** в виде термостата и высоковольтное исполнение.

Резисторы **Σ SIGMA** выпускаются в корпусе по классу IP20-IP65, они имеют электрическую и тепловую защиту. Номинальная мощность составляет 100 Вт и более, при этом импульсная мощность может превышать номинальное значение в 20 и более раз благодаря оптимально согласованным электрическим и механическим характеристикам материалов.

Следует отметить, что фирма Danotherm разрабатывает тепловые модели всех выпускаемых компонентов, что позволяет проводить компьютерный анализ поведения резисторов при всех условиях эксплуатации.

Семейство **τ TERA** представляет собой серию тормозных резисторов на основе стальной решетчатой структуры. Они имеют мощность до 5–8 кВт и более и предназначены для применения совместно с преобразователями частоты в каскадах предварительного заряда и торможения.

Резисторы по технологии **τ TERA** выпускаются более 30 лет. За это время они многократно подтвердили свою высокую надежность в таких тяжелых применениях, как тормозные каскады крановых приводов, работающие в условиях воздействия агрессивных сред, или резисторы заземления в высоковольтных линиях электропередач.

Производители батарей предъявляют разнообразные требования к разрядным резисторам, эти требования зависят от типа аккумуляторов и часто бывают противоречивы. В течение последних лет компанией Danotherm разработано несколько семейств мощных специализированных разрядных резисторов технологии **τ TERA** с естественным и принудительным режимами воздушного охлаждения (см. рис. 6).



Рис. 6. Разрядный резистивный модуль TERA

В состав серии **TERA** также входят резисторы, предназначенные для заземления нейтрали (см. рис. 7). Для подключения нейтрали в высоковольтных распределительных сетях используется три основных метода:

- изолированная нейтраль;
- непосредственно заземленная нейтраль;
- нейтраль, заземленная через заземляющий резистор.

Распределительные сети с изолированной нейтралью в режиме однофазного короткого замыкания с ограниченным током имеют высокие и часто непредсказуемые уровни перенапряжений. В сетях с непосредственно заземленной нейтралью в аналогичном режиме уровни перенапряжения оказываются небольшими, но ток короткого замыкания может быть недопустимо высок.

Альтернативой двум описанным схемам является заземление нейтрали через цепь с определенным импедансом. Цепь заземления может быть индуктивной (дугогасительная катушка или катушка Петерсена) или резистивной. Задача заземляющего резистора — ограничивать ток до значений, которые могут быть использованы схемами защиты для безопасного отключения через определенное время. Заземляющие резисторы Danotherm по заказу потребителя могут поставляться с трансформаторами тока, коммутаторами и т. д.

Основные параметры резисторов сварной конструкции со стекловидно-эмалевым покрытием и мощных резисторов плоско-овальной формы:

- допуск $\pm 5\%$ или $\pm 10\%$;
- рабочая температура от -50 до 250 °С;
- температурный коэффициент сопротивления для низкоомных сопротивлений $200\text{--}400$ ppm/°С, для высокоомных сопротивлений 100 ppm/°С;
- напряжение изоляции определяется расстоянием между терминалами и крепежным основанием, при 5 мм — 1000 В, при 6 мм — 1200 В;
- сопротивление изоляции > 10 МОм (испытательное напряжение 500 В);



Рис. 7. Заземляющий резистивный модуль TERA

- допустимая перегрузка: 10-кратная в течение 5 с;
- материалы сердечника: стеатитовая керамика, фарфор, корделитовая керамика;
- материал терминалов FeNi42 — имеет коэффициент теплового расширения, согласованный со стеатитовой керамикой;
- материалы резистивных проводников: для низкоомных резисторов CuNi10 (400 ppm/°С), CuNi23Mn (200 ppm/°С), для резисторов среднего диапазона сопротивлений CuNi44 (80 ppm/°С), для высокоомных резисторов NiCr8020 или CrAlFe (100 ppm/°С).

Danotherm производит широкий спектр резисторов в заказном исполнении (OEM). Фирма имеет собственный центр разработок и испытательный центр, поэтому любая продукция по профилю компании может быть изготовлена по заданию заказчика и в кооперации с ним. Все разработки производятся с использованием трехмерных CAD-систем. Это позволяет заказчику отслеживать процесс разработки на всех его стадиях и вносить коррективы.

При заказе специального исполнения резисторов могут быть оговорены такие параметры, как конфигурация проводников, крепежные размеры, значение индуктивности. Столь широкий выбор возможен благодаря тому, что фирма выпускает более 50 типоразмеров выпускаемых сопротивлений.

В результате разработки заказчик получает изделие с полным комплектом технической документации и файл тепловой модели, позволяющей моделировать поведение резистора в условиях различных нагрузок.

Литература

1. Ming-Hian Chew. Measuring motor drive and inverter currents // PCIM. July-August 2003.
2. Колпаков А. Измерение тока в мощных импульсных преобразовательных устройствах // Электронные компоненты. 2004. № 2.
3. Материалы сайтов www.caddock.com, www.danotherm.com.