

Резисторы – основные типы и характеристики

Часть 4

В. Горбачёв¹, В. Кочемасов, к. т. н.²

УДК 621.316.8 | ВАК 05.27.01

В первой, второй и третьей частях статьи, опубликованных в пятом, шестом и седьмом номерах журнала «ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес» за 2021 год, было рассказано о резисторах различных типов. В данном номере рассматриваются пассивные компоненты сопротивления специального назначения.

ПАССИВНЫЕ КОМПОНЕНТЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ ВЧ / СВЧ

Способность пассивных компонентов работать на высоких частотах настолько востребована в настоящее время, что при рассмотрении практически любых вопросов в этой области возникают аспекты, связанные с расширением частотного диапазона компонентов и изделий.

Не сильно погрешив против истины, можно отметить, что все проблемы, стоящие на пути расширения частотного диапазона, делятся на два основных класса. Это вопросы материаловедения и конструкторские. К материаловедческим можно отнести, например, создание подложек, способных рассеивать значительные мощности в широком диапазоне частот. Эта тема достаточно подробно рассматривалась в разделе «Типы подложек». Конструкторские вопросы в свою очередь разделяются на конструирование собственно компонентов и проблемы дизайна высокочастотной аппаратуры. Не вдаваясь в технические детали, которые в великом множестве описаны в российской и зарубежной профильной документации, попытаемся перечислить основные конструкторские тренды и специфические характеристики высокочастотных сопротивлений, существующие на сегодняшний день:

- малые реактивности ВЧ-сопротивлений. Например, компания Vishay для своей серии чип-резисторов FC (20 ГГц) указывает емкость 0,03 пФ и индуктивность 0,0008 нГ. Фирма State of the Art заявила для всех своих высокочастотных чип-резисторов емкость не более 0,1 пФ (на частоте 20 ГГц);
- малые размеры чип-резисторов;
- монтаж чип-резисторов «лицом вниз» (resistor element down). Этот способ монтажа, именуемый

также Face-down Mounting, рассматривался в разделе «Чип-резисторы». Он позволяет значительно уменьшить площадь токовой петли и связанную с ней индуктивность. Результатом этого является расширение частотного диапазона (см. рис. 16);

- контактные площадки чип-резисторов с малыми потерями на ВЧ. Стандартное требование к радиочастотным компонентам, позволяющее качественно согласовать цепи высокочастотной аппаратуры, являющиеся, по сути, элементами неоднородных линий передачи;
- специфическая форма резисторов. Например, стержневые (Rod) резисторы или сопротивления для монтажа в полосковую линию;
- использование квазираспределенных структур в дизайне оборудования – технология, при которой один компонент заменяется цепью или последовательностью частично согласованных компонентов. Это позволяет уменьшить паразитные реактивности и хорошо согласуется с технологией встраивания чип-компонентов в платы;
- использование длинных линий с большими погонными потерями в качестве сопротивлений-поглотителей – переход к распределенным структурам;
- применение законченных устройств в чип-исполнении. Речь идет о таких конструкциях, как делители Вилкинсона, аттенюаторы, фильтры и т. п.

По поводу последнего можно сказать, что чип-исполнение оказалось удобным для размещения законченных элементов радиочастотного тракта. Преимущества этого понятны. Небольшие размеры конструктива позволяют минимизировать паразитные реактивности, а размещение всех элементов устройства на одной подложке упрощает температурную коррекцию. Большинство производителей выпускает широкую номенклатуру таких устройств. Один из многочисленных примеров можно

¹ ООО «Радиокомп», ведущий инженер.

² ООО «Радиокомп», генеральный директор.



Рис. 29. Делитель Вилкинсона (работающий на частотах до 6 ГГц) в чип-корпусе (компания IMS)

увидеть на рис. 29. Это делитель Вилкинсона С-диапазона, рассчитанный на входную мощность 20 Вт (IMD2365) фирмы IMS.

Пример высокочастотного термопеременного аттенюатора в чип-исполнении, работающего на частотах до 6 ГГц, приведен на рис. 30.

Подобные схемы применяются и в преобразователях импеданса. Довольно распространенное устройство, имеющееся в продуктовых линейках нескольких фирм: РСН1632 – применяется для преобразования двух наиболее общих значений импеданса 50 и 75 Ом на частотах до 1,5 ГГц. Размеры корпуса (в миллиметрах) и схема этого устройства приведены на рис. 31.

Следует отметить, что производители компонентов предлагают решения не только для разработчиков пользовательской аппаратуры, но и для производителей микросхем. Так, российское АО НПО «ЭРКОН» выпускает линейку резистивных поглотителей малой мощности ПРИ-1 для аттенюаторов в составе полосковых гибридных микросхем СВЧ-диапазона. Все поглотители серии имеют размеры $2 \times 2 \times 0,9$ мм, номинальную мощность 0,5 Вт и рассчитаны на работу в диапазоне частот до 18 ГГц. КСВ в диапазоне до 1,2 ГГц достигает 1,15; в верхней части диапазона – 1,5.

Как уже отмечалось, для высокочастотной электроники очень характерно применение готовых элементов трактов в чип-исполнении. Тем не менее, дискретные компоненты микроволнового диапазона по-прежнему находятся в сфере внимания разработчиков элементной базы, производителей и дизайнеров аппаратуры. При этом специфические требования, существующие в этой области частот, определяют конструкцию компонентов. В качестве примера можно привести стержневые (Rod) резисторы (рис. 32).

Как конструктивный элемент тракта этот тип резисторов массово используется в широкополосных высококачественных коаксиальных согласующих резисторах

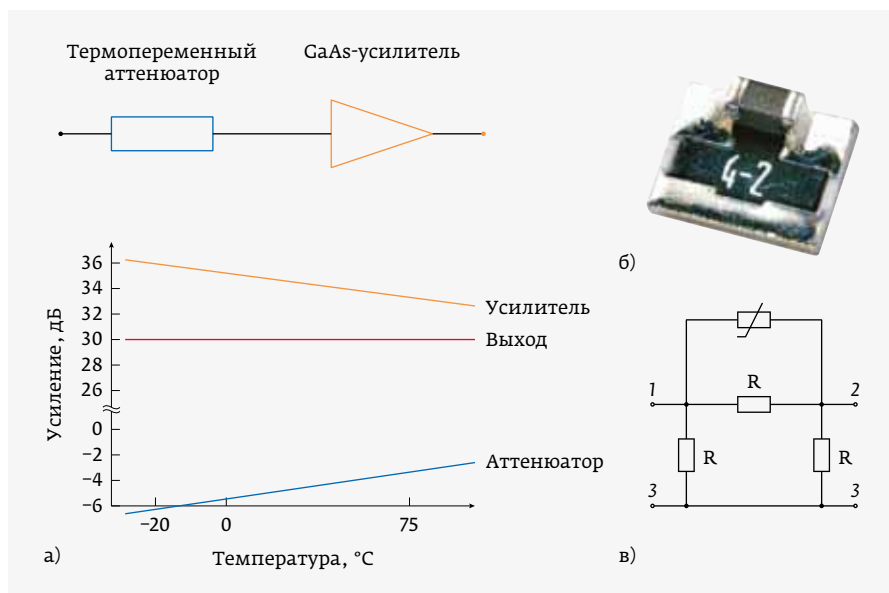


Рис. 30. Аттенюатор компании Susumu: а – принцип термокомпенсации; б – внешний вид; в – эквивалентная схема (данные компании Susumu)

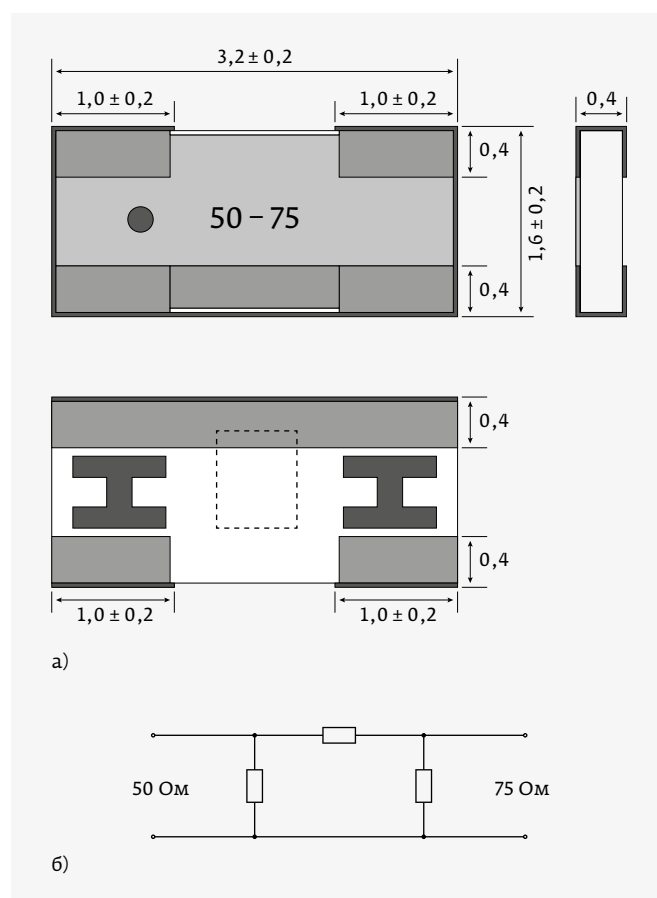


Рис. 31. Преобразователь импеданса в чип-исполнении: а – размеры в мм; б – схема (данные компании Rhopoint Components)



Рис. 32.
Стержневые резисторы
(данные компании
US Resistors)

(терминаторах). В качестве областей применения для стержневых резисторов фирма US Resistors перечисляет мощные нагрузки, снабберные (демпфирующие) схемы мощных ВЧ-усилителей, импульсные генераторы, высоковольтное и рентгеновское оборудование, имитаторы нагрузок.

Конструктивно стержневой резистор представляет собой стержень из композитной керамики с нанесенным на него тонкопленочным резистивным слоем и контактными площадками разнообразной формы [29]. Существует важный технологический момент, отличающий стержневые резисторы от сходных с ними по форме MELF-резисторов. Лазерная подрезка резистивного слоя, имеющая своей целью достижение номинала с заданным допуском, производится без надразов слоя. Как уже упоминалось в разделе «Чип-резисторы», это самый сложный и затратный (сканирующий) тип обработки, позволяющий минимизировать паразитную индуктивность резистора и достичь наилучших значений допуска (~0,05%).

Еще одной особенностью стержневых резисторов, востребованной в мощных широкополосных приложениях, является цилиндрическая форма элемента, позволяющая рассеять большее количество тепла по сравнению с резисторами плоского (flat) типа.

Термочувствительные пассивные компоненты

В соответствии с заявленной тематикой статьи, из всего класса термочувствительных приборов рассмотрим только пассивные компоненты, сопротивление которых связано с температурой. Соответственно такие устройства, как термопары и датчики температуры на положительно смещенных р-п-переходах, в рассмотрение не войдут. Таким образом, в заявленный класс попадают металлические термометры сопротивления, NTC- и PTC-термисторы.

Металлические термометры сопротивления

Наиболее известным металлическим терморезистором является платиновый термометр сопротивления. Температурные свойства платины хорошо изучены и стабильны. Поскольку платина практически не окисляется в воздухе, это положительно влияет на время жизни, повторяемость, температурный диапазон и точность платиновых приборов. Дополнительным бонусом этого же является то, что платиновые терморезисторы могут изготавливаться без защитного покрытия, которое практически всегда

увеличивает тепловую инерцию. Стандартный температурный диапазон термометров этого типа ограничивается сверху цифрой 650 °С, хотя имеются примеры расширения температурного диапазона до 850 и 1100 °С [30]. Как и большинство металлов, платина имеет положительный ТКС. Строго говоря, зависимость сопротивления платины от температуры имеет сложный аналитический вид (уравнение Каллендара – Ван Дьюзена), содержащий линейные, квадратичные и кубические температурные слагаемые со своими весовыми коэффициентами (полином третьего порядка). Однако в силу малости весовых коэффициентов квадрата и куба температуры считается, что зависимость сопротивления от температуры достаточно точно описывается линейной функцией. Так, например, на рис. 33 представлена соответствующая зависимость для широко и повсеместно используемого платинового датчика Pt100 (сопротивление 100 Ом при 0 °С).

Отметим также, что ТСП (термопреобразователи сопротивления платиновые – российское обозначение платиновых терморезисторов) производятся как в проводном исполнении, так и варианте напыления платины на стеклянную или кварцевую подложку. Обычное применение платиновых терморезисторов – это точное и воспроизводимое измерение температуры в широком диапазоне. В силу стабильности параметров и отработанных технологий контроля допусков при изготовлении терморезисторов, ТСП часто используются для калибровки других датчиков температуры.

В завершение раздела о металлических термометрах сопротивления надо упомянуть, что измерительные терморезисторы делают также из меди и никеля. Поскольку медь значительно окисляется при воздействии высоких температур, медные термосопротивления обычно используются до 200 °С.

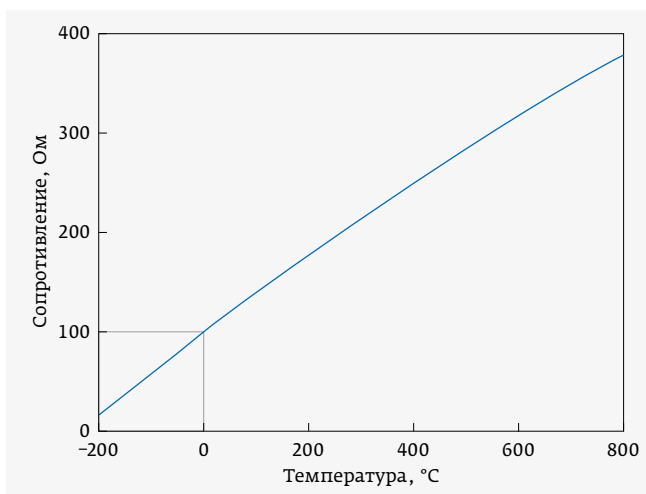


Рис. 33. Зависимость сопротивления платинового терморезистора от температуры

Полупроводниковые термочувствительные компоненты

Большинство современных полупроводниковых терморезисторов производится из смесей окислов переходных металлов (имеются в виду металлы из переходной группы элементов таблицы Д. И. Менделеева), способных изменять валентность в соединениях. Например, в списке этих металлов присутствуют такие элементы, как кобальт, никель, титан, медь, магний, марганец, ванадий. Технология производства термисторов этого класса состоит из смешивания различных порошкообразных окислов, прессования формы, обжига, создания контактов и финишного покрытия. Таким образом создаются термочувствительные приборы двух типов: с отрицательной (Negative Temperature Coefficient, NTC) и положительной (Positive Temperature Coefficient, PTC) зависимостями сопротивления от температуры. В обоих случаях присутствует значительная нелинейность зависимости сопротивления от температуры и ВАХ сложной формы (рис. 34).

Как и всем прочим сопротивлениям, терморезисторам отчасти присущи характеристики, перечисленные в разделе «Основные характеристики компонентов сопротивления». Существуют и специфические параметры терморезисторов, об одном из которых на примере NTC-термисторов надо сказать подробнее.

Известно, что аналитический вид зависимости сопротивления от температуры для NTC-термисторов представлен уравнением Стейнхарта – Харта, которое, будучи записанным относительно температуры, содержит три (в некоторых редакциях четыре) слагаемых. Его классический вид:

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C (\ln R)^3, \quad (1)$$

где T – температура, К; R – сопротивление, Ом; A – константа, имеющая размерность сопротивления; B , C – константы.

В силу пренебрежимой малости весового коэффициента C , уравнение, разрешенное относительно R , принимает вид:

$$R = Ae^{B/T}. \quad (2)$$

Такой вид уравнения считается приближенной, но достаточной для практических целей, аппроксимацией $R(T)$ для NTC-термисторов. В этой формуле величина B называется *константой материала*, а в зарубежной технической документации часто именуется *индексом чувствительности* (sensitivity index) термистора. В инженерной документации также встречается обозначение *B-параметр*. Поскольку B -параметр является характеристикой материала, из которого сделан термистор, его знание необходимо для уменьшения погрешности вычисления температуры в каждом конкретном случае. Для расчета B -параметра необходимо измерить сопротивление NTC-термистора при двух температурах, разность между которыми не менее 10 °С. Вычисление происходит по формуле (2), которая для этого принимает вид:

$$R_1 = R_2 \exp B \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right), \quad (3)$$

где $R_2 = A$.

Тогда разрешенное относительно B уравнение выглядит так:

$$B = \frac{1}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right). \quad (4)$$

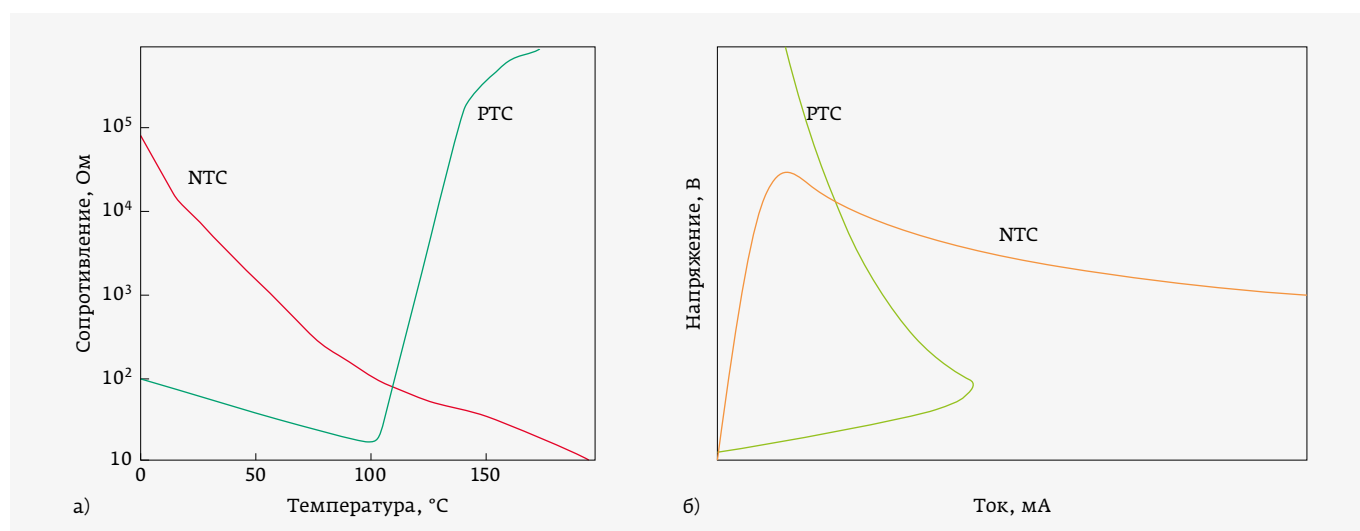


Рис. 34. Пример зависимости сопротивления от температуры (а) и ВАХ (б) для NTC- и PTC-термисторов

Традиционно для расчета B -параметра используются температуры 25 и 85 °С. Однако для того, чтобы минимизировать погрешность вычисления температуры с конкретным значением B -параметра, разработчик имеет возможность посчитать B при других значениях температур. Таким образом уравнение Стейнхарта – Харта, разрешенное относительно T и B , имеет практическое значение и часто и реализуется, например, в виде исполняемых кодов вычислительных устройств измерения и контроля температуры.

Применение NTC- и PTC-термисторов

Одной из самых значимых возможностей, возникших с появлением NTC- и PTC-термисторов, стало объединение в одном, относительно дешевом, пассивном компоненте измерительной и исполнительной функций. В большей степени это характерно для PTC-термисторов в силу значительной крутизны характеристики $R(T)$ (см. рис. 34). Самым известным исполнительным устройством на базе PTC-термистора является самовосстанавливающийся предохранитель.

NTC-термисторы, имеющие в общем более гладкую зависимость $R(T)$, повсеместно применяются в том числе для измерения температуры. При этом они уступают платиновым термометрам сопротивления по точности и диапазону, но имеют преимущество в цене.

Вообще же о традиционном применении NTC- и PTC-термисторов имеется большое количество доступного справочного и методического материала и поэтому в предлагаемой статье имеет смысл рассмотреть не столь часто встречающиеся применения терморезисторов, например в СВЧ-диапазоне.

Интересный проект представлен в работе [31], где предлагается использовать сбалансированный измерительный мост из линейных PTC- и NTC-термисторов для измерения СВЧ-мощности. В качестве обоснования проекта указывается экономическая целесообразность замены

дорогих и сложных туннельных диодов и диодов Шоттки, традиционно используемых для этого, относительно простыми и дешевыми термисторами. Для реализации поставленной задачи были разработаны пасты для толстополеночных термисторов с высокой линейностью зависимости $R(T)$. В качестве материалов для контактных площадок использовались сплавы Pt / Au (платина / золото) и Ag / Pd (серебро / палладий). Для всех образцов был реализован стандартный технологический процесс трафаретной печати, обжига, нанесения контактных площадок и финишных покрытий. Проведены исследования образцов на время жизни и частотный отклик.

По замыслу авторов проекта предлагаемое устройство может работать как элемент радиочастотного тракта в потребительской электронике, для которой важны простота, надежность и невысокая цена компонентов. Блок-схема стандартного двухчастотного тракта и схема измерителя мощности представлены на рис. 35.

Схема предлагаемого измерителя мощности представляет собой сбалансированный и термокомпенсированный мост сопротивлений. Подача СВЧ-мощности на левое плечо моста приведет к нагреву термисторов этого плеча. Соответственно на измерительной диагонали моста появится напряжение разбаланса, пропорциональное разности температур правого и левого плеч моста. Понятно, что это напряжение будет также пропорционально мощности входного сигнала. Практические количественные результаты проекта представлены на рис. 36.

Итогом проекта явилось создание измерителя мощности (коммерческое название Smartload®), в котором благодаря высокой линейности зависимостей $R(T)$ примененных термисторов достигнута линейность выходной характеристики. Авторами заявлено КСВ устройства не хуже 1,25 в полосе до 6 ГГц.

В заключение надо отметить, что метод измерения СВЧ-мощности посредством термистора, включенного в плечо измерительного моста, применяется давно

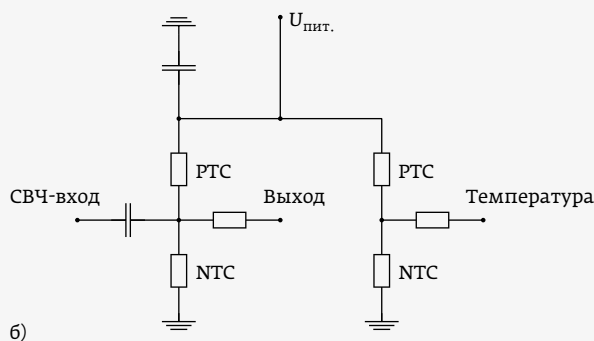
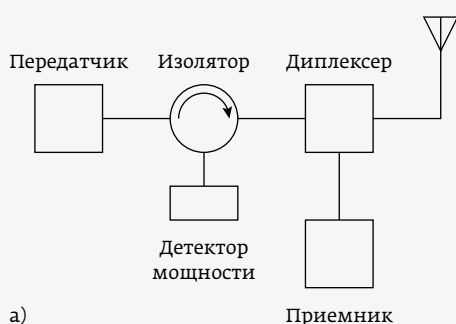


Рис. 35. Термисторный измеритель мощности: а – блок-схема тракта; б – схема измерителя

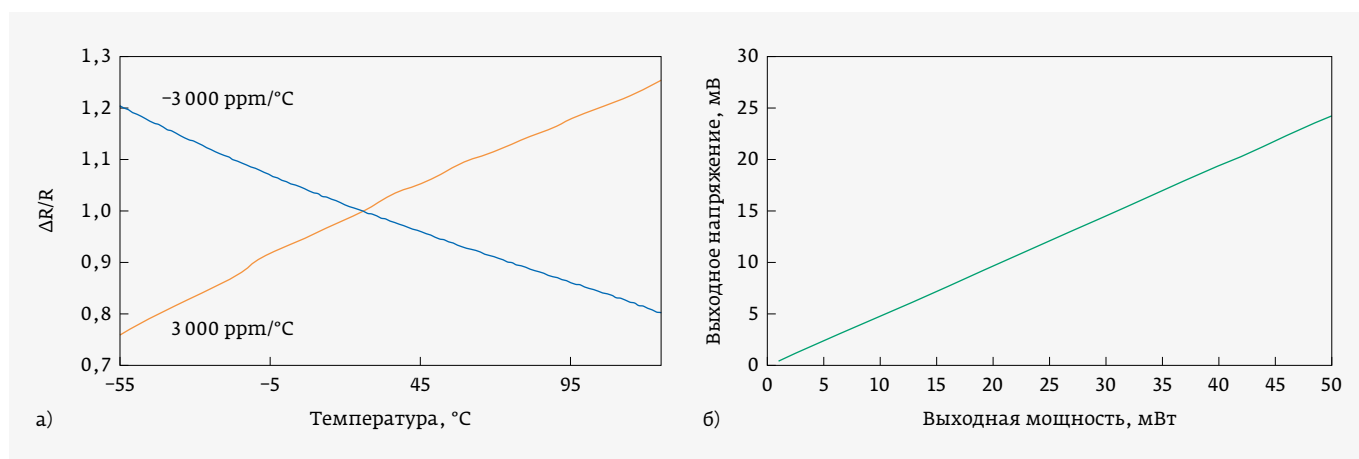


Рис. 36. Линейные зависимости $R(T)$ РТС- и NTC-термисторов (а) и выходная характеристика термисторного измерителя мощности, представленного на рис. 35 (б)

и методически хорошо проработан. Известными проблемами этого способа являются нелинейность зависимости сопротивления термистора от рассеиваемой мощности $R(P)$ и необходимость термокомпенсации измерительного моста. В работе [31] заявлена высокая линейность зависимостей $R(T)$, что позволяет использовать для термокомпенсации моста плечо РТС- и NTC-термисторов.

Более известное высокочастотное применение термисторов реализовано в продукции фирмы Susumu [32]. Речь идет о термопеременных аттенуаторах П-типа серии P*V, рассчитанных на работу в диапазоне до 6 ГГц и мощность до 2 Вт. Эти приборы используются для компенсации температурной деградации высокочастотных арсенид-галлиевых усилителей. Принцип компенсации, внешний вид и эквивалентная схема прибора приведены на рис. 30 [32].

Из рис. 30 понятно, что аттенуатор и усилитель имеют оппозитные температурные характеристики и их последовательное включение позволяет поддерживать стабильное усиление каскада в диапазоне температур. В данном случае термопеременный аттенуатор заменяет сложную схему обратной связи усилителя.

Измерение тока

Всеобщий тренд на специализацию компонентов сопротивления в полной мере проявился в разработке и производстве резисторов для измерения тока. Два момента стали определяющими. Первое: для измерения тока используются резисторы со сверхмалыми значениями сопротивления (единицы миллиом) и, следовательно, от точности их калибровки зависит точность измерения падения напряжения, пропорционального измеряемой величине. И второе: значительные токи, протекающие через измерительные резисторы, вызывают сопутствующие тепловые явления, влияющие на точность измерения.

Стандартные процедуры борьбы с нагревом со стороны производителей компонентов включают применение подложек с высокой теплопроводностью, корпусов с развитой поверхностью излучения тепла или корпусов с удлинёнными контактными площадками (long-side terminal). А со стороны конструктора печатных плат – дополнительные усилия по отводу тепла, особенно при применении компонентов для поверхностного монтажа. Кроме подложек и корпусов при проектировании токоизмерительных резисторов применяется специфическая конфигурация контактов, называемая «конфигурацией Кельвина (Kelvin)». Суть ее, на примере SMD-изделий, заключается в том, что каждая контактная площадка или вывод резистора снабжены термобарьерным вырезом, превращающим единый с точки зрения электрического соединения контакт в два термически различных условных контакта (рис. 37).

Если терморазрез делит контактную площадку на две неравные части, то через большие сегменты контактных площадок пропускают измеряемый ток, а к меньшим подключают схему измерения падения напряжения. Например, по данным фирмы Ohmite (www.ohmite.com),

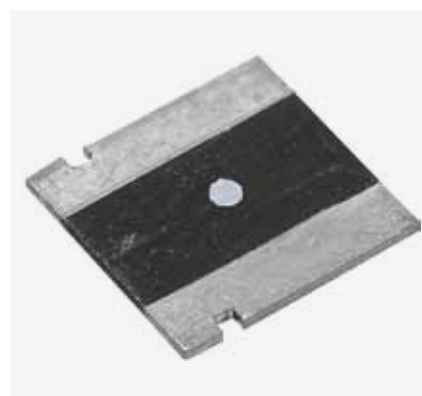


Рис. 37. Конфигурация Кельвина на примере компонента CSM3637 компании Vishay Precision Group

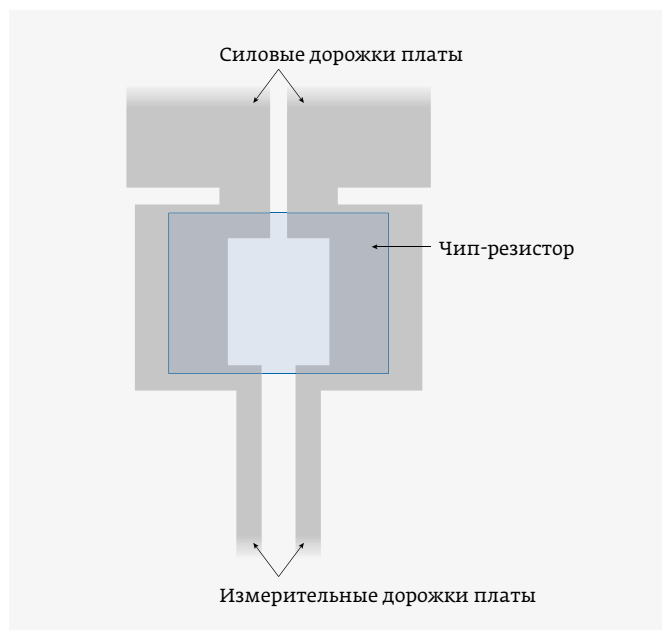


Рис. 38. Конфигурация Кельвина для посадочного места чип-резистора (данные компании Caddock)

применение дизайна Кельвина позволяет снизить влияние сопротивления и температурного коэффициента контактных площадок для более точного измерения тока [33]. Заметим, что дизайн Кельвина применяется не только при производстве резисторов, но и при проектировании печатных плат. Такой дизайн может использоваться, когда на плату устанавливается токоизмерительный резистор без терморазрывов. Например, компания Caddock дает такие рекомендации по дизайну посадочного места (footprint) для прецизионных низкоомных токоизмерительных резисторов серии CC сопротивлением менее 0,2 Ом (рис. 38).

Производственная линейка уже упомянутой Ohmite дает полное представление о многообразии исполнений измерительных резисторов (рис. 39). Необходимо отметить, что, кроме резисторов с конфигурацией Кельвина, компания Ohmite выпускает значительное количество серий двухвыводных изделий для измерения тока.

Обычно производители выпускают продуктовые линейки токоизмерительных резисторов, рассчитанных на разные диапазоны токов. Так, промышленная группа KOA выпускает 28 серий токоизмерительных резисторов. Большая их часть — это резисторы из сплавов металлов

(Metal Plate), присутствуют также толсто пленочные (Thick Film) резисторы и проволочные резисторы, выполненные как намоткой (Wirewound), так и из прямого провода (Metal Wire) (серия LR). В производственных программах других производителей (Vishay) присутствуют токоизмерительные резисторы, сделанные по технологии Metal Foil Resistor, при которой резистивный слой выполняется из фольги металлургического сплава. Тут надо обратить внимание на то, что Metal Plate резисторы конструктивно значительно отличаются от Foil-резисторов тем, что в первых резистивный материал является несущим элементом конструкции (отсутствует подложка), в то время как во вторых лента или фольга наклеиваются на несущую подложку. В этом смысле Metal Foil резисторы вполне можно отнести к толсто пленочным резисторам просто по формальному параметру толщины резистивного слоя, которая составляет 2–10 мкм.

Тут можно отметить, что Metal Plate резисторы чаще всего используются именно в мощных приложениях и для измерения токов. Это определяется самой конструкцией резистора, где резистивный элемент представляет собой обработанную лазером (для точности) пластину из сплава манганин (86Cu-2Ni-12Mn) или нихром (20Cr-77/80Ni-0/2Mn). Использование сплава металла в качестве резистивного элемента при характерных размерах резистора позволяет получить сопротивления от единиц до сотен миллиом, чем и определяется применение таких изделий. Выбор между тем или иным сплавом определяется необходимым номиналом сопротивления (у манганина меньше, у нихрома больше) и рабочей температурой конечного изделия. Нихромовые резисторы используются до 220 °C, в то время как манганиновые до 185 °C. В плане применения для измерения больших токов резисторы на основе металлических сплавов имеют еще два значимых преимущества.



Рис. 39. Токоизмерительные резисторы компании Ohmite: а — серии резисторов для поверхностного монтажа, рассчитанных на мощности до единиц ватт; б — серии выводных резисторов, рассчитанных на разные мощности и токи до 300 А

Во-первых, относительно большая масса резистивного материала позволяет обрабатывать большие импульсы тока при сравнимых габаритах изделия. И, во-вторых, термоЭДС резисторов из сплавов на порядок меньше, чем толстопленочных. Соответственно, уменьшается влияние этого эффекта на точность измерения [34]. Если говорить о термоЭДС вообще, то это явление, известное также как эффект Зеебека, оказывает значительное влияние на точность измерений. Например, уже упомянутый сплав манганин имеет термоЭДС $1 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$ (при контакте с медью), в то время как резистивный сплав константан ($54\text{Cu}-45\text{Ni}-1\text{Mn}$) – $40 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}$ (при контакте с медью). Пропорционально этим значениям возрастет и ошибка измерения тока при использовании константанового шунта. Это учитывается производителями токоизмерительных резисторов и шунтов, не часто применяющими этот сплав в такого рода изделиях.

Надо уточнить, что в Metal Plate резисторах медь используется не только в резистивном элементе, но и в качестве теплоотводящего элемента конструкции резистора, что тоже определяет сферу его использования. Примером всему сказанному может служить серия мощных резисторов с конфигурацией Кельвина WFM компании Vishay. Серия содержит два наименования из указанных сплавов в чип-корпусах форм-фактора 3939, рассчитанных на диапазон частот до 50 МГц и мощности

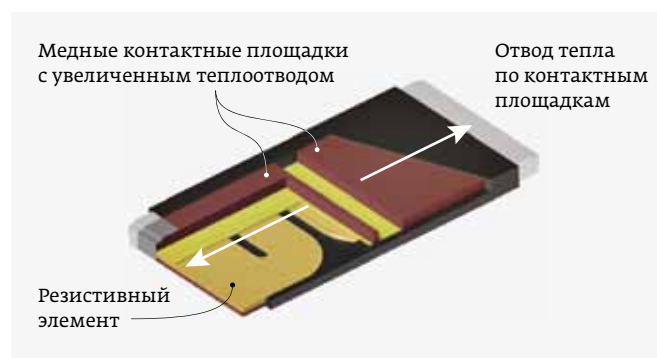


Рис. 40. Токоизмерительный Metal Plate резистор WFM (компания Vishay)

до 20 Вт. Конструкция корпуса, обеспечивающая теплоотвод, приведена на рис. 40.

Надо отметить, что Vishay имеет внушительную линейку токоизмерительных резисторов. С некоторыми компонентами этой линейки можно ознакомиться в [34].

Отметим здесь же, что часто в производственных линейках фирм рядом с токоизмерительными резисторами соседствуют шунты, выполненные по тем же технологиям и с той же точностью, что и первые. Обычно шунты имеют меньшее сопротивление, чем токоизмерительные резисторы, но граница между ними достаточно

www.filin-rf.ru
ФИЛИН
Filter Innovations
www.radiocomp.ru
filin-rf@radiocomp.ru

Фильтры ФИЛИН

Фильтры ВЧ/СВЧ, в том числе переключаемые и перестраиваемые, и устройства на их основе для частот до 26,5 ГГц и выше

- Диплексеры
- Мультиплексеры
- Генераторы
- Фазовращатели
- Делители/сумматоры мощности
- Направленные ответвители

Любые виды заказов:

- крупносерийные заказы
- единичные заказы
- срочные заказы
- НИР, ОКР

Разработка, производство, испытания устройств с учетом требований заказчика

- Устройства на сосредоточенных элементах
- Устройства на керамических резонаторах
- Гребенчатые и встречно-стержневые фильтры
- Моноблочные керамические фильтры
- Устройства на микрополосковых линиях
- Волноводные устройства
- Устройства по технологии LTCC

ИНТЕРПОЛИТЕХ
СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГОСУДАРСТВА

19-22 октября
МВЦ «Крокус Экспо»
Стенд 8-D5-3

109316, Москва, Волгоградский проспект, 42 Отдел продаж: +7 495 95 777 45 Техподдержка: +7 495 361 09 04

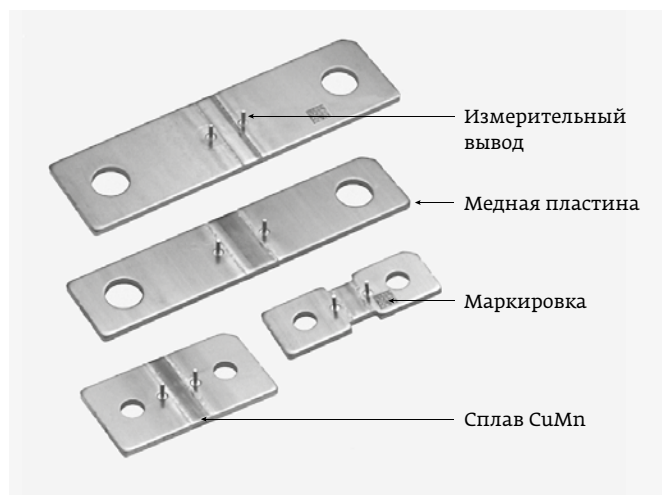


Рис. 41. Шунт HS (компания KOA)

условна. Соответственно, при изготовлении шунтов возрастают технологические сложности выполнения точных микроомных сопротивлений. Между тем развитие тягового электропривода вообще и автомобильного в частности сформировало запрос именно на точные мощные шунты с элементами подключения измерительных схем. Одно из таких изделий как раз и «возглавляет» производственную линейку группы KOA, как самый мощный шунт, рассчитанный на токи до 600 А (рис. 41). Заявлено сопротивление от 50 до 200 мкОм, допуск $\pm 5\%$ и ТКС 50 ± 25 ppm/K. Рабочая температура контактных площадок – до 105 °С. Размеры 600-А шунта – 40×15 мм. Изделие квалифицировано по автомобильному стандарту AEC-Q200 (для пассивных компонентов).

Рассеяние мощности и нагрев, импульсные приложения

Собственно говоря, речь идет о резисторах, имеющих повышенные возможности утилизации энергии импульсного и постоянного типа. Если попытаться в самом общем виде очертить ту границу, которая отделяет импульсно нагружаемые сопротивления от резисторов, работающих на постоянной мощности, то в значительном количестве примеров эта граница будет совпадать с физической границей самого компонента. Чаще всего импульсная мощность утилизируется в теле самого компонента, в то время как для рассеяния постоянной мощности используется окружающее пространство. Тем не менее, конечно же, процессы рассеяния импульсной и постоянной мощности взаимосвязаны. Например, существуют уже цитированные данные из работы [35], в которой показывается, что покрытие подложки из нитрида алюминия слоем химического алмаза увеличивает предельно рассеиваемую импульсную мощность в 5–8 раз, а постоянную – в 1,3–1,4 раза. Способов создания повышенных

возможностей рассеяния совсем немного. Это утилизация энергии в резистивном компоненте, подложке и различного вида «пристройках» к сопротивлению в виде фланцев и радиаторов пассивного и активного охлаждения. Два первых способа уже обсуждались в этом материале. Так, известно, что повышенными возможностями рассеяния энергии обладают, например, резисторы типа Metal Plate, имеющие массивный резистивный элемент из металлургического сплава, а толсто пленочные SMD-резисторы рассеивают импульсную мощность лучше тонкопленочных за счет распределения тепла в большем объеме резистивной пленки. Что касается подложек, то также известно, что на сегодняшний день самым теплопроводящим материалом является химический алмаз, активно используемый для мощных высокочастотных пассивных компонентов сопротивления. Про резисторы, имеющие специальные элементы конструкции для охлаждения, будет сказано ниже, а начать практическую часть этого раздела надо с компонентов, которые на первый взгляд никаких ассоциаций с мощностью не вызывают.

MELF

Данный вид поверхностно монтируемых компонентов известен как MELF-резисторы. Это цилиндрические безвыводные чип-компоненты, чье название Metal Electrode Leadless Face сложилось в аббревиатуру. Основным достоинством резисторов этого типа является цилиндрическая форма подложки и резистивного элемента, позволяющая рассеять большую по сравнению с плоскими чип-компонентами импульсную мощность. Сравнение площадей резистивного компонента плоского и цилиндрического резисторов представлено на рис. 42.

При всех очевидных достоинствах MELF, как это часто случается в истории научно-технического прогресса, у новшеств появляются не только последовательные

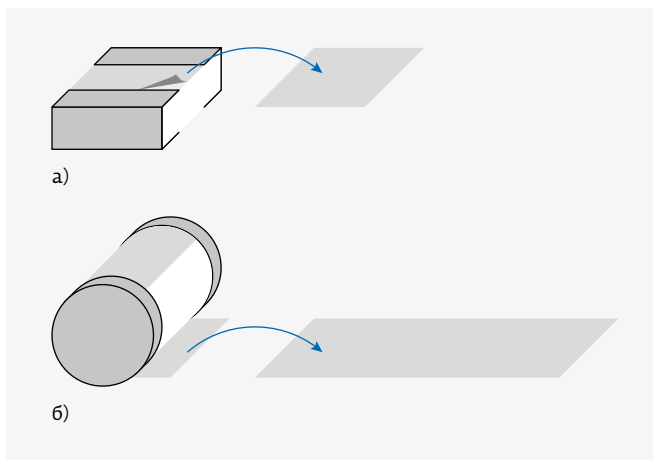


Рис. 42. Площади резистивного компонента у MELF (а) и плоского (б) резисторов

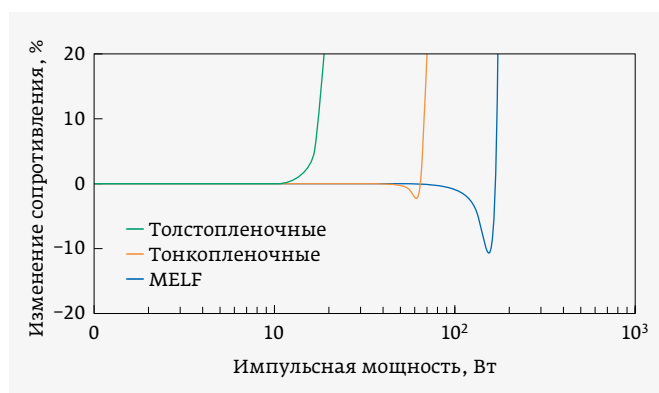


Рис. 43. Изменение сопротивления 1-кОм резисторов при импульсной нагрузке (данные компании Vishay)

сторонники, но и критики. Случай с MELF исключением не стал, хотя и приобрел некоторый оттенок своеобразного отраслевого юмора. Так, главными «злопыхателями» в отношении этого типа сопротивлений стали монтажники РЭА, работающие ручным методом сборки. Поскольку цилиндрическая форма компонентов затрудняет ручной монтаж, аббревиатура MELF даже получила шуточную расшифровку Most End up Lying on the Floor, что переводится, как «Большинство в конечном итоге лежит на полу».

Одним из известных производителей MELF-резисторов является компания Vishay, выпускающая около десятка серий этих компонентов. В ее производственной линейке присутствуют как металлопленочные серии MMA, MMB, MMU, так и углепленочная серия CMB на керамике из оксида алюминия Al_2O_3 (глинозем). В технической документации этой фирмы представлены возможности импульсной нагрузки для MELF-резисторов по сравнению с плоскими резисторами (рис. 43).

Выше, в разделе, посвященном высокочастотным сопротивлениям, сравнивались виды резистивных покрытий MELF- и стержневых резисторов в плане частотного отклика. Действительно, MELF-резисторы (в отличие от стержневых) имеют резистивный слой со спиральной нарезкой, для которой характерна относительно высокая паразитная индуктивность. Для уменьшения реактивности специалисты Vishay используют особую нарезку резистивного слоя, именуемую пульсирующей. Ими также проведено сравнительное исследование двух MELF-резисторов со спиральной (MMA0204) и пульсирующей (MMA0204 HF) нарезкой (рис. 44).

В своих рекомендациях разработчикам Vishay указывает, что, например, резисторы MMU0102 HF (длина – 2,2 мм, диаметр – 1,1 мм) можно применять на частотах до 5 ГГц с постоянной мощностью рассеяния 0,2 Вт. Резисторы этого типа могут эксплуатироваться также и с расширенным диапазоном мощности при условии

сокращения времени жизни и улучшенного теплоотвода. Для резистора MMU0102 рассеиваемая мощность составляет 0,3 Вт.

Что касается импульсной нагрузки, то несомненным лидером линейки MELF-резисторов Vishay по этому параметру является углепленочный компонент CMB0207 (длина – 5,8 мм, диаметр – 2,2 мм), заявленная импульсная мощность которого – 3000 Вт (однократный импульс). При этом надо отметить, что номинальная постоянная мощность этого резистора – 0,4 Вт, увеличенная – 1 Вт, а эквивалентным ему по метрическим размерам плоским резистором является компонент форм-фактора 6123 (6,1×2,3 мм).

Резисторы с дополнительными конструктивами охлаждения

С уже заявленными выше оговорками такие резисторы можно считать наиболее подходящими для работы с постоянной мощностью рассеяния. В обзорном материале невозможно представить всё многообразие конструктивных элементов, предназначенных для отвода тепла от резистора. Тем не менее, если сделать попытку классификации, то все конструктивы охлаждения можно разделить на два больших класса:

- с отводом тепла преимущественно в радиатор;
- с отводом тепла в радиатор и окружающую среду.

Во второй класс можно также для общности отнести сопротивления, охлаждаемые теплоносителем. Самые основные конструкции теплоотвода представлены на рис. 45. Фланцевые (Flange mount) резисторы (рис. 45а) и резисторы со шпилькой (Stud mount) (рис. 45б) обеспечивают основной теплоотвод в радиатор.

Большую производственную линейку мощных высокочастотных фланцевых резисторов (рис. 45а), терминаторов и нагрузок производит компания Barry Industries Inc. (США). Все помещаемые на фланец толсто пленочные чип-резисторы этой фирмы имеют подложки из оксида бериллия (BeO) или нитрида алюминия (AlN). Для фланца и выводов резистора используется медь, покрытая серебром. В линейке имеются изделия (например

ООО
СМП



ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН
www.SMD.ru

**электронные
для поверхностного
монтажа**

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Разборные металлические EMI SMD экраны
- Кварцевые генераторы 0532 на частоты до 125 МГц

Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32; e-mail: sale@smd.ru
 Тел.: (499) 158-7396, (495) 940-6244, (499) 943-8760

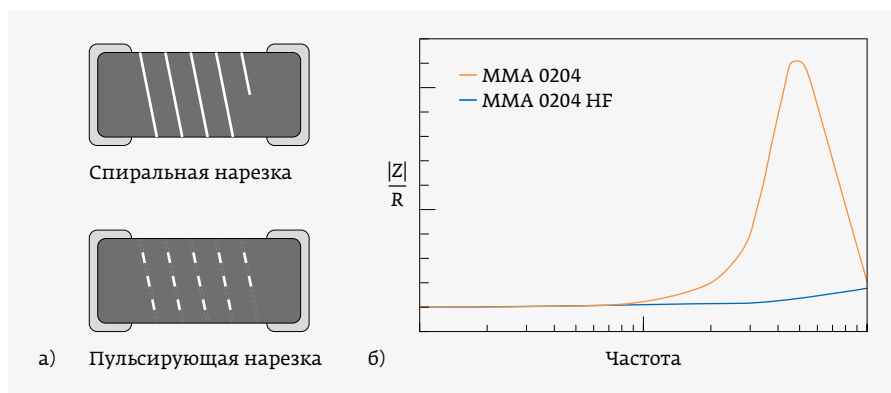


Рис. 44. Сравнение двух типов MELF-резисторов: а – способы нарезки резистивного слоя; б – зависимость реактивности (отношения модуля полного сопротивления к активному) от частоты для резисторов со спиральной (MMA0204) и пульсирующей (MMA0204 HF) нарезкой (данные компании Vishay)

RXXXX-800-1E – фланцевый резистор, мощность 800 Вт), у которых чип закреплен на фланце посредством высокотемпературного припоя из сплава золота с германием (Au/Ge). В англоязычной терминологии такие резисторы могут называться Brazed Resistors. Эти резисторы имеют расширенный температурный диапазон. Номинальная мощность у них заявляется до 100 °C, как и у сопротивлений с клеевым соединением чипа с фланцем, а вот ниспадающая часть зависимости номинальной мощности от температуры (derating curve) простирается до 250 °C, в отличие от резисторов с клеевым

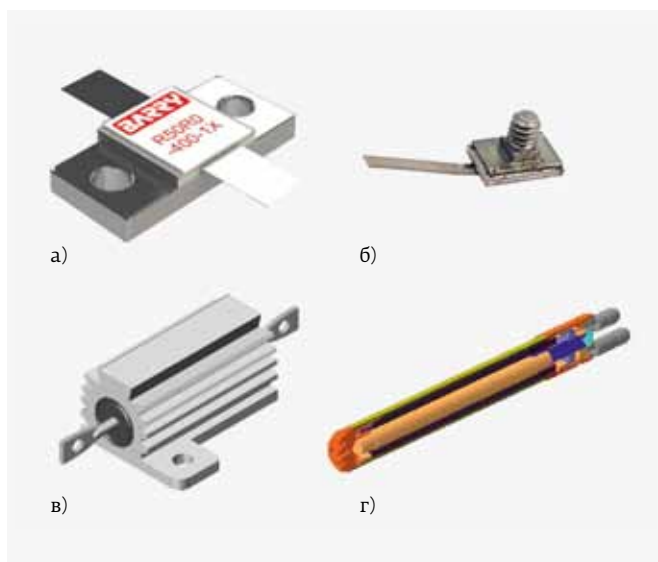


Рис. 45. Конструкции резисторов с различными способами теплоотвода: а – фланцевые; б – со шпилькой; в – с отводом тепла в радиатор и окружающую среду; г – водоохлаждаемый резистор (P1-106, АО «Ресурс»)

соединением, у которых граница находится на 150 °C. Выводы таких резисторов также присоединяются к чипу высокотемпературным припоем.

Лидером резистивной линейки фланцевых изделий Barry является BeO-компонент RXXXX-1200-1X с номинальной мощностью 1200 Вт. В линейке терминаторов имеется еще более мощная нагрузка T50R0-1750-1X номинальной мощностью 1750 Вт, рассчитанная на диапазон до 1 ГГц.

Поскольку выше отмечалось, что компоненты с дополнительными конструктивами чаще рекомендуются для использования при постоянных мощностях, необходимо особым образом отметить ту часть

продуктовой линейки компании Barry, которая предназначена для мощных импульсных приложений. Одной из специфических особенностей таких приложений является работа компонентов в термоциклическом режиме. Частые импульсные нагревы компонентов приводят к появлению усталостных эффектов и разрушению. Для минимизации этих эффектов в качестве материала для фланцев используется сплав меди и вольфрама (CuW, 10–20% Cu). Этот сплав имеет меньшую теплопроводность, чем медь: 180–200 Вт/мК против 398 Вт/мК у меди. В силу этого нагрузки, аттенюаторы и резисторы на таком фланце имеют несколько меньшую постоянную (CW) мощность. Например, лидер линейки нагрузок на медно-вольфрамовых фланцах резистор-терминатор T50R0-800-11E имеет CW-мощность 800 Вт. Но при этом особенностью сплава меди и вольфрама является меньший, чем у меди, коэффициент теплового расширения (СТЕ): 6,5–8,3 ppm/° против 17,8 ppm/° у меди (в диапазоне 25–150 °C). Фланцы из этого сплава значительно лучше работают в термоциклическом режиме. Количественное подтверждение этому получено при проведении циклического теста: 10 с при нагружении мощностью 250 Вт, 10 с без нагрузки. Компоненты с медным фланцем имеют отказы после 600 циклов, в то время как компоненты с медно-вольфрамовыми фланцами штатно работают после 500 тыс. циклов теста. Как заявляется в документации Barry, все компоненты с медно-вольфрамовыми фланцами относятся к типу Brazed, в то время как у компонентов с медными фланцами, предназначенных для работы на постоянных мощностях, имеются как склеенные, так и припаянные элементы.

Конструктивным продолжением фланцевых резисторов можно считать резисторы с оребренным радиатором

(рис. 45в). Многие производители компонентов имеют такие изделия в производственных линейках, но объем их выпуска меньше, чем фланцевых, поскольку форма этих сопротивлений затрудняет их применение на высоких частотах. Тем не менее, эти компоненты вполне востребованы в приложениях, где требуется преобразование электрической энергии в тепловую. Для различных видов нагрева производят достаточно специализированные мощные резисторные компоненты. Если говорить о резисторах с орбренным радиатором, то, например, компания RARA производит зонные (Space Free Air) нагреватели серий RSHT и RSH, рассчитанные на диапазон мощностей 50–500 Вт для переменного напряжения 110–240 В.

Существуют мощные резисторы и для нагрева плотных сред. К ним относится пиротехнический чип-резистор PI-151 производства российского АО НПО «ЭРКОН», предназначенный для воспламенения пиросоставов.

Приведенная в статье информация поможет выбрать резисторы, оптимальные для различных применений.

ЛИТЕРАТУРА

29. Rod Resistors: <https://usresistor.com/index.php/products/rod-resistors>
30. **Гришин А.** Высокотемпературные платиновые термометры сопротивления // Технология машиностроения. 2007. № 11. С. 58–59.
31. **Feingold A. H., Wahlers R. L., Amstutz P., Huang C., Stein S. J., Mazzochette J.** New Microwave Applications for Thick-film Thermistors // Microwave Journal. 2000. № 1.
32. Thermo-variable Chip Attenuator: https://www.rhopointcomponents.com/image/catalog/Manufacturers/Susumu/Rhopoint_Susumu_Resistor_PXV_PBV_&_PAV_series_datasheet.pdf
33. LVK Series. Four Terminal High Precision Current Sense. OHMITE: https://www.ohmite.com/assets/docs/res_lvk.pdf
34. **Никитин И.** Токочувствительные резисторы // Электронные компоненты. 2016. № 6. С. 76–77.
35. **Ральченко В. Г., Савельев А. В.** Двухслойные теплоотводящие диэлектрические подложки алмаз – нитрид алюминия // Микроэлектроника. 2006. Т. 35, № 4. С. 243.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1960 руб.
за два тома

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОНИКА ТЕХНИЧЕСКАЯ ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

Белоус А. И., Солодуха В. А., Шведов С. В.

Издание 3-е, исправленное. В 2-х книгах

Книга 1
М.: ТЕХНОСФЕРА,
2021. – 696 с.,
ISBN 978-5-94836-576-3
Книга 2
М.: ТЕХНОСФЕРА,
2021. – 488 с.,
ISBN 978-5-94836-576-3

Весь материал авторы оформили в виде «двухтомника», где кроме глав, посвященных непосредственно проблемам проектирования современных микроэлектронных устройств космического и специального (военного) назначения, появились главы, посвященные другим «космическим» проблемам. Книга посвящена анализу современного состояния, проблем и перспектив развития микроэлектронной элементной базы радиоэлектронной аппаратуры ракетно-космической техники (РКТ), космических аппаратов и систем двойного и военного применения. Впервые в отечественной научно-технической литературе сделана попытка рассмотреть в рамках одной книги всю сложную цепь взаимосвязанных этапов создания электронных блоков РКТ – от разработки требований к этим блокам и их элементно-компонентной базе (ЭКБ), до выбора технологического базиса ее реализации, методов проектирования микросхем и на их основе бортовых систем управления аппаратурой космического и специального назначения.

Издание адресовано инженерам-разработчикам радиоэлектронной аппаратуры, а также преподавателям, студентам, аспирантам, специализирующимся в области микроэлектроники и ее приложений.

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru