

Резисторы – основные типы и характеристики

Часть 1

В. Горбачёв¹, В. Кочемасов, к. т. н.²

УДК 621.316.8 | ВАК 05.27.01

В старинной студенческой шутке описывается случай, когда заучившийся студент на вопрос экзаменатора, какое сопротивление кроме активного присутствует в цепи, ответил – «сопротивление материалов (сопромат)». С высоты современного уровня развития индустрии пассивных компонентов тот незадачливый студент может восприниматься как «немножко провидец». В современной резисторной индустрии именно вопросы и проблемы материаловедения определяют скорость и направление развития отрасли. Например, обеспечение допустимых нагрузок на плату и конструкцию резистора при термических деформациях требует значительных усилий разработчиков и составляет широкое поле деятельности для «того самого» сопромата. В настоящее время выпускаются сотни наименований изделий, лишь часть из которых является резисторами в чистом виде. Вряд ли будет правильным назвать резистором, к примеру, делитель Вилкинсона в чип-исполнении или NTC-термистор. В статье приводится обзор номенклатуры пассивных компонентов сопротивления, для краткости именуемых резисторами.

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДЛЯ ГРУПП КОМПОНЕНТОВ

Реализация сопротивления в проводниках и полупроводниках

Все мы прекрасно помним картинку из школьного курса физики, на которой движению носителей заряда в проводнике под действием электрического поля «сопротивляются» узлы и неоднородности кристаллической решетки металла. При этом увеличение температуры проводника еще более затрудняет движение носителей (увеличивает сопротивление) из-за возрастания амплитуды тепловых колебаний ионов-узлов кристаллической решетки. Не будем сейчас касаться вопроса различий в физике сопротивления переменному и постоянному току и специфике скин-эффекта, поскольку это не вносит принципиальных изменений в физическую картину сопротивления в проводниках. Отметим только тот факт, что протекание электрического тока в проводнике ассоциируется у нас с преодолением некоего сопротивления. Таким образом, если в кристаллических проводниках, к которым относятся металлы, физический процесс сопротивления, именуемый также омическим, имеет простое и понятное графическое представление, то, говоря о полупроводниках, чаще

представляют процесс, обратный сопротивлению, а именно проводимость. В отличие от металлических проводников, имеющих кристаллическую решетку ионного типа, кристаллы диэлектриков и полупроводников построены на ковалентных связях между атомами. В первом случае (проводники) имеются ионы-узлы решетки и большое количество свободных электронов, во втором, если говорить о диэлектриках, свободных носителей заряда нет вообще (в упрощенном виде), но имеются пары электронов, «обобществленные» одновременно двумя узлами решетки. Такая структура кристалла и получила название ковалентной. При определенных условиях (например, тепловые колебания) один из ковалентных электронов может, преодолев энергетический барьер, освободиться из кристаллической решетки, и тогда появляются свободные носители заряда: отрицательного в виде электронов и положительного в форме освободившихся «посадочных мест» ковалентных электронов – дырок. На количество носителей обоих типов в полупроводниках сильно влияют примеси (легирование) и воздействие факторов окружающей среды: температуры, освещенности, магнитного поля и др. Все перечисленные выше эффекты создают собственную проводимость полупроводников, про которую мы можем сказать, что и она, и ее антипод – сопротивление – зависят от количества свободных носителей заряда обеих полярностей. Таким образом, в проводниках сопротивление реализуется

¹ ООО «Радиокомп», ведущий инженер.

² ООО «Радиокомп», генеральный директор.

из-за взаимодействия потока электронов с кристаллической решеткой, в полупроводниках – определяется количеством свободных носителей заряда. Но, говоря о полупроводниках, совершенно невозможно не упомянуть о таком значимом феномене, как создание р-п-перехода. Это структура, которую получают в едином кристалле полупроводника, вводя в некоторую его область донорную примесь, а в соседнюю с ней – акцепторную. В физике сопротивления при этом ничего принципиально не изменяется, но возникающая на границе раздела область, обедненная свободными носителями заряда, становится главной локацией, определяющей сопротивление р-п-перехода. Благодаря свойствам р-п-перехода, отраженным в его вольт-амперной характеристике, при прямом и обратном смещении стало возможным создание в том числе нелинейных сопротивлений, часто используемых в современном оборудовании. В итоге можно сказать, что развитие материаловедения и технологий целенаправленного введения примесей (легирования) привело к появлению того неисчислимого множества активных и пассивных полупроводниковых элементов, которым сейчас располагают инженеры. В силу же зависимости проводимости полупроводников и структур на их основе от воздействия внешних факторов мы имеем сейчас большое количество датчиков различных физических величин.

Волновое сопротивление

В самом общем виде волновое сопротивление является характеристикой среды, влияющей на перенос энергии в этой среде. В зависимости от физического контекста (акустика, аэро/гидродинамика, электродинамика, радиофизика) у этого термина существует несколько определений. В контексте обсуждаемого нами материала волновое сопротивление необходимо учитывать, когда цепь, построенная из сосредоточенных компонентов, проявляет свойства цепи с распределенными параметрами (длинной линии). Определение волнового сопротивления именно для такой цепи мы и будем рассматривать (корень квадратный из отношения погонной индуктивности к погонной емкости линии). В соответствии с определением и в отличие от активного омического сопротивления, на волновом сопротивлении не предполагается потери мощности. Но поскольку цепи, построенные из сосредоточенных компонентов, проявляют свойства неоднородных линий передачи, потери мощности могут возникать из-за несогласования комплексных сопротивлений участков линий. Поэтому в процессе построения цепи сосредоточенных компонентов, проявляющей свойства среды передачи, проектировщик может столкнуться с двумя базовыми ситуациями. Первая – это когда сосредоточенный элемент является нагрузкой некоей линии передачи и для снижения потерь должно выполняться условие согласования. Понятно, что при этом знание волнового сопротивления

линии становится необходимым условием такого согласования. И вторая ситуация – это когда некий сосредоточенный компонент сам проявляет свойства линии передачи с точки зрения распространения высокочастотного сигнала. При этом представление о таких, например, параметрах сосредоточенного компонента, как КСВ контактных площадок (связанных с волновым сопротивлением), также будет служить условием корректного согласования. В самом общем случае все компоненты проектируемой конструкции могут являться фрагментами линий передачи. Более того, характерный для современного этапа развития элементной базы мощнейший тренд на миниатюризацию приводит к тому, что в распоряжении разработчика оказываются не только дискретные пассивные компоненты, но и законченные устройства в чип-исполнении. К таковым можно отнести различные фильтры или делители Вилкинсона.

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОНЕНТОВ СОПРОТИВЛЕНИЯ

В повседневной деятельности проектировщика электронной аппаратуры происходит постоянное обращение к технической документации, в том числе по пассивным компонентам сопротивления. Напомним некоторые наиболее часто используемые для оценки применимости параметры.

Допуск на номинал резистора (Tolerance). Сам по себе параметр не содержит каких-либо тонкостей в понимании и применении, но в связи с ним надо отметить два момента. Первое – для оценки характеристик резисторных сборок используется версия обозначения *Relative Tolerance*. И второе – с понятием допуска связана система номинальных рядов компонентов. Эта система стандартизована в конце 50-х годов прошлого века и распространяется также на конденсаторы и индуктивности. Система носит название E-рядов (E-series). Обозначение номинального ряда состоит из буквы E и цифры, указывающей количество номиналов в декаде. Это количество связано с допуском на номинал. Например, номинальная линейка E6 содержит 6 номиналов в любой декаде номиналов (0,1–1 Ом, 10–100 Ом и т. д.). Допуск всех номиналов в E6 – 20%. В ряду E12 содержится 12 номиналов с допуском 10%. Наиболее распространенные ряды представлены в табл. 1.

Температурный коэффициент сопротивления – ТКС (англ. TCR). Общепринятой единицей измерения для этой величины является миллионная доля на градус – ppm/°C (используются также градусы Кельвина). Например, при значении ТКС, равном 50 ppm/°C, изменение сопротивления не может превышать 50 Ом на каждый МОм номинала при изменении температуры на один градус Цельсия. Для этого параметра также существует версия, предназначенная для описания резисторных сборок – *TCR tracking*.

От температуры зависит еще один значимый параметр пассивных компонентов сопротивления – *номинальная*

Таблица 1. Е-ряды

Наименование ряда	Допуск, %	Примечание
E6	20	-
E12	10	-
E24	5	Возможен допуск 1%
E48	2	-
E96	1	-
E192	0,5	Также 0,25 и 0,1%

мощность рассеяния (*Rated Power*). Обычно в большинстве технических описаний (*data sheets*) резисторов присутствуют две характеристики, связанные с номинальной мощностью: собственно *Rated Power* в виде числа (например, 0,25 Вт) и график зависимости номинальной мощности от температуры. В англоязычной документации этот график называется *Derating curve* и позволяет оценить мощность, которую компонент способен рассеивать при определенной температуре. Классический вид графика приведен на рис. 1.

Знаковой точкой на этом графике является температура 70 °С, при достижении которой мощность, рассеиваемая резистором, перестает совпадать с номинальной. В англоязычной документации ось температур на графике обычно имеет обозначение «Температура окружающей среды» (*Ambient Temperature*). В этом обозначении содержится коллизия, на которой имеет смысл остановиться чуть более подробно. Параметр *Derating curve* появился в эпоху становления отрасли как реакция на запрос миниатюризации элементной базы. В тот момент большая часть резисторов представляла собой проволочные цилиндрические выводные изделия. Монтировались они чаще всего навесным монтажом на монтажные лепестки. При таком способе монтажа теплоотвод происходил посредством конвекционных потоков воздуха, обтекающих резистор. Свой вклад в отвод тепла вносила и инфракрасная радиация (при соответствующей температуре нагрева). На конвекцию и радиацию приходилось до 90% теплоотвода. Оставшиеся проценты рассеивались через теплопроводность выводов резистора. Вследствие этого и появилось обозначение *Ambient Temperature* как указание главного канала отвода тепла. Еще один момент заключался в том, что резисторы тех времен имели значительный запас по тепловым и электрическим параметрам, и не требовалось скрупулезного следования температурным требованиям. В процессе миниатюризации и с появлением поверхностного монтажа характер теплоотвода кардинально изменился. Большая часть тепла теперь отводится именно через выводы резистора и печатную плату. В современных

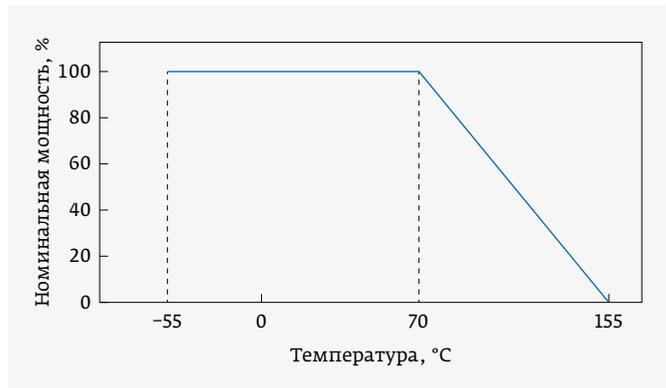


Рис. 1. Зависимость мощности от температуры для резистора CR1206 Bourns

условиях понятие «температура окружающей среды» применительно к обсуждаемой теме стало размытым и его использование для определения мощности приводит к тому, что резистор приходится выбирать «с запасом». Обозначенный же «запас» это и дополнительная площадь печатной платы, а в некоторых случаях и увеличение количества компонентов (например, один резистор не способен рассеять заданную мощность при заданной температуре). Как решение проблемы было предложено использовать на оси температур нагрев контактных площадок резистора. При этом точка перелома графика сдвигается с 70 до 100 °С. Методика использования такого способа расчета мощности изложена в документе компании KOA [1]. В частности, там приводится пример, в котором требуется подобрать SMD-резистор для рассеивания мощности 0,05 Вт на плате, нагретой до температуры 100 °С. При расчете по температуре окружающей среды для рассеивания заданной мощности резистор должен иметь форм-фактор 2012 (2×1,2 мм) при номинальной мощности 0,25 Вт. Эту мощность могут также рассеять два резистора 1005 (1×0,5 мм) номинальной мощностью 0,1 Вт. Та же задача, посчитанная через температуру контактных площадок (*Terminal Temperature*), дает другой результат – один резистор 1005 мощностью 0,1 Вт.

И в завершение разговора о номинальной мощности и ее зависимости от параметров окружающей среды отметим, что в отечественной технической документации часто указывается *зависимость номинальной мощности от давления окружающей среды*. Пример тому можно встретить в документах НПО «ЭРКОН» (Россия, Нижний Новгород) [2]. В целом нужно отметить, что с уменьшением давления рассеиваемая резистором мощность также уменьшается. Точкой «перелома» графика, в которой паспортное значение мощности становится неактуальным, является давление 630 мм рт. ст.

Отметим еще несколько характеристик сопротивлений.

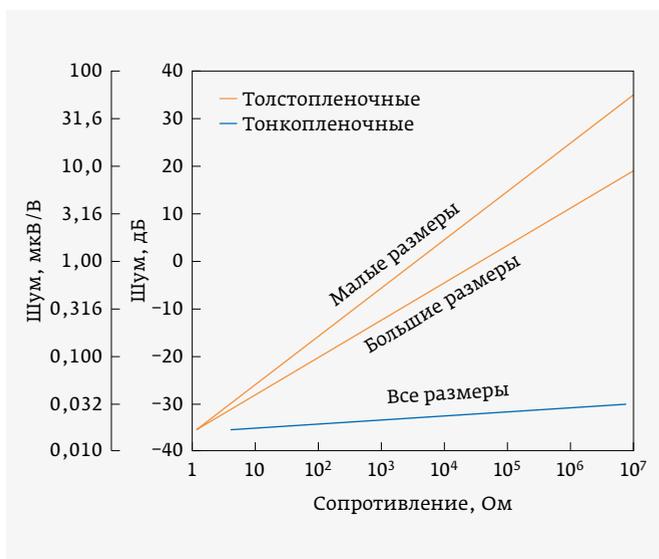


Рис. 2. Токовый шум тонкопленочных и толстопленочных резисторов (данные компании SOTA)

Частотный отклик (Frequency Response). Этот параметр оценивается по значениям паразитной емкости и индуктивности. Так, емкость зависит от размеров компонента и вида контактных площадок. Например, фирма State of the Art (SOTA) заявляет, что частотный отклик ее

резистивной продукции близок к идеальному в районе единиц гигагерц, межэлектродная емкость резисторов находится в диапазоне 0,05–0,12 пФ, типичная индуктивность – менее 0,5 нГ.

Шум (Noise). Токовый шум резистора обычно представляется как отношение среднеквадратичного напряжения токового шума к приложенному напряжению. Шум существенно зависит от материала и размеров компонента и его контактных площадок. Отмечается, что шум возрастает с увеличением сопротивления и различается у толстопленочных резисторов малых и больших размеров. Тонкопленочные шумят одинаково вне зависимости от размеров компонента. Если говорить о чип-компонентах, необходимо отметить, что тонкопленочные резисторы значительно превосходят толстопленочные по параметру малозумности. Показательные сравнительные данные по этому параметру можно найти в материалах компании SOTA (рис. 2).

ЛИТЕРАТУРА

1. Introduction of the derating curves based on the terminal part temperature. https://www.koaglobal.com/technology/terminal_temp?sc_lang=en
2. Резисторы постоянные непроволочные общего применения C2-33AI. https://www.erkon-nn.ru/upload/pdf/c2-33ai_og0.467.093ty_02122020.pdf.

Фильтры ФИЛИН
www.filin-rf.ru
www.radiocomp.ru
filin-rf@radiocomp.ru

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

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