

Конденсаторы для ВЧ/СВЧ.

Часть 2

Василий ГОРБАЧЕВ
Виктор КОЧЕМАСОВ,
к. т. н.
Леонид ТАЛАЛАЕВСКИЙ

В статье дан обзор разных типов конденсаторов. Во второй части публикации приведены свойства и применение многослойных керамических конденсаторов.

Многослойные керамические конденсаторы (multilayer ceramic capacitor, MLCC)

Одна из важных задач, которую решают производители современной электронной базы, — увеличение емкости конденсаторов при снижении их размеров. Этого удается достигать в многослойных керамических конденсаторах (MLCC), конструкция которых приведена на рис. 1.

Как видно на рис. 1, многослойный конденсатор состоит из перемежающихся тонких слоев керамического диэлектрика, класс которого определяет класс конденсатора, и слоев проводника, как правило, из сплава серебра и палладия. Слои проводника через один замыкаются на контактный электрод, покрытый припоем. Слои диэлектрика могут быть толщиной 5–30 мкм. Контактные электроды чаще всего выполняются из нике-

ля, покрытого оловом. Некоторые производители покрывают никель золотом или сплавом серебра и палладия. Последний вариант встречается редко, поскольку сплав серебра и палладия трудно паяется. Сплав серебра и палладия чаще всего применяется для внутренних электродов, хотя отдельные производители используют и другие металлы, например никель, имеющий не только более низкую проводимость, но и меньшую стоимость. Многие производители, сокращая издержки, снижают в сплаве содержание палладия к серебру, поскольку серебро дешевле. В целом конденсаторы с электродами из никеля имеют худшие параметры, поэтому некоторые производители указывают тип электродов в маркировке серии, обозначая электроды из никеля как BME (Base Metal Electrode), а электроды из сплава серебра и палладия — NME (Noble Metal Electrode). Слои керамики стремятся сделать как можно тоньше, поскольку при

уменьшении толщины вдвое соотношение емкость–объем (так называемая объемная эффективность) увеличивается в четыре раза. Но толщина слоя керамики ограничивается напряжением пробоя конденсатора. В настоящее время керамические конденсаторы могут состоять из 100–1000 слоев толщиной до 1 мкм в зависимости от рабочего напряжения конденсатора. Многослойные керамические конденсаторы являются более высокочастотными по сравнению с другими типами конденсаторов (за исключением однослойных). На рис. 2 приведена сравнительная частотная характеристика нескольких типов конденсаторов.

На рис. 2 видно, что на частотах выше 1 кГц многослойные конденсаторы имеют меньшее эквивалентное последовательное сопротивление. Кроме того, для многослойных конденсаторов характерна прямая зависимость максимальной рабочей емкости от частоты (рис. 3).

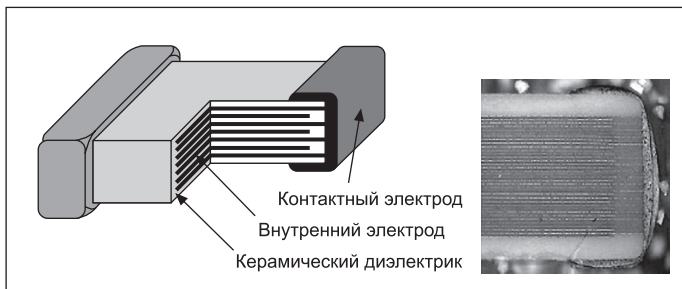


Рис. 1. Конструкция современного многослойного керамического конденсатора

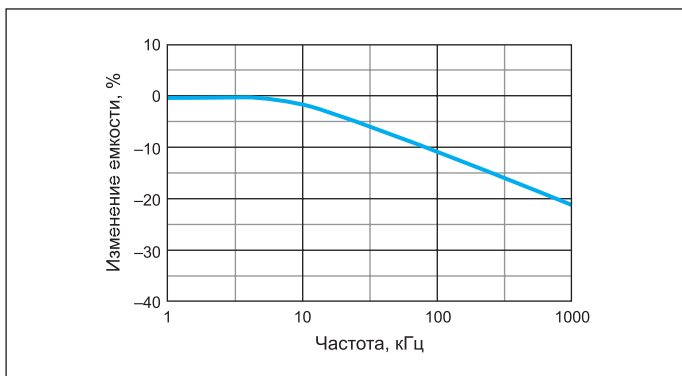


Рис. 3. Зависимость емкости MLCC от частоты

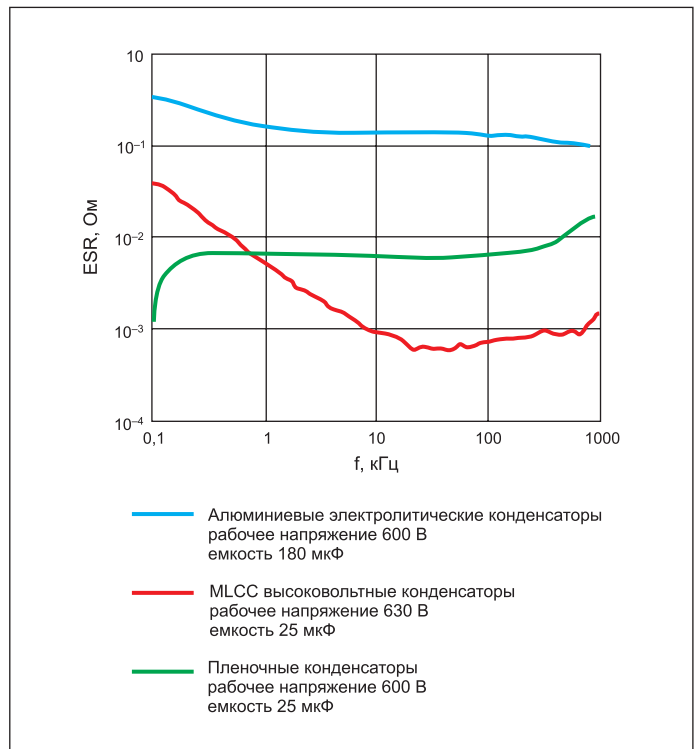


Рис. 2. Сравнительная частотная характеристика нескольких типов конденсаторов

Применение многослойных керамических конденсаторов и их модификаций

В целом многослойные керамические конденсаторы обладают рядом несомненных преимуществ по сравнению с другими типами конденсаторов: большей емкостью при равных габаритах, большей рабочей частотой при равном номинале емкости, меньшими потерями на прохождение и меньшим эквивалентным последовательным сопротивлением, малой последовательной индуктивностью, высокой температурной стабильностью.

Весьма достижения в современных технологиях изготовления керамики и значительные усилия исследователей и производителей по улучшению потребительских свойств конденсаторов привели к тому, что многослойные керамические конденсаторы стали самым распространенным видом конденсаторов. Велик не только объем выпуска этих изделий, но и количество конструктивных исполнений. Воспользовавшись информационными материалами промышленной группы Epcos, можно представить наиболее отличающиеся друг от друга по внешнему виду конструкции MLC-конденсаторов (рис. 4).

Повсеместное применение MLCC объясняется в том числе весьма широким частотным диапазоном конденсаторов этого типа. Очень наглядно представлены частотные свойства многослойных конденсаторов на диаграмме фирмы Dielectric Laboratories (рис. 5). Диаграмма позволяет оценить связь между частотными свойствами, форм-фактором и областями применения многослойных керамических конденсаторов. Она составлена на примере разделительных и высокочастотных конденсаторов и для керамик и фарфоров первого класса C0G (NP0). На диаграмме видно, что верхняя граничная частота применения MLCC находится в СВЧ-диапазоне. Отметим, что конкуренцию многослойным конденсаторам в этом частотном диапазоне составляют только однослойные конденсаторы. Это можно увидеть из сравнения представленной диаграммы с аналогичной для SLCC в первой части статьи.

Стремление расширить рамки частотного диапазона применения MLCC, прежде всего в область высоких и сверхвысоких частот, побуждает производителей к снижению такой паразитной характеристики многослойных конденсаторов, как эквивалентная последовательная индуктивность (ESL). Понятно, что увеличение скорости перезарядки конденсатора при повышении частоты требует снижения ESL. Постоянно прилагаемые усилия производителей к уменьшению ESL привели к появлению серий конденсаторов, внешний вид которых иногда значительно отличается от привычного. На рис. 6 представлены изделия с низким ESL нескольких фирм-производителей.

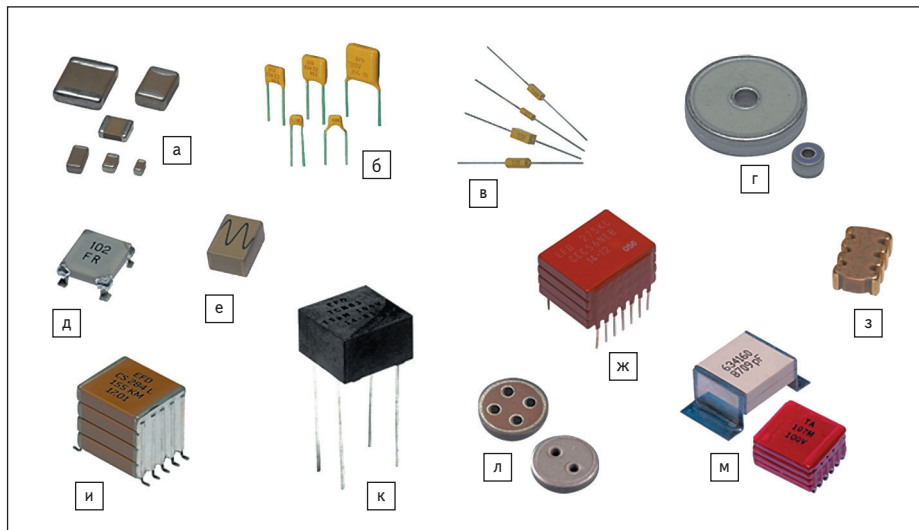


Рис. 4. Виды многослойных конденсаторов, выпускаемых промышленной группой Epcos:
 а) чип-исполнение, в том числе с расширенными диапазонами температур и напряжений;
 б) высоконадежное исполнение в окуленых корпусах с радиальными выводами;
 в) исполнение с аксиальными выводами и повышенной температурной стабильностью;
 г) дисковые высоковольтные до 1000 В многослойные конденсаторы;
 д) четырехвыводные для промышленных применений;
 е) миниатюрные высоковольтные до 10 000 В с принт-резистором, для импульсных применений;
 ж) стекловое исполнение, повышенная емкость; конденсаторы SMPS;
 з) миниатюрные; несколько конденсаторов в одном корпусе;
 и) стекловые, высоконадежные, с повышенной емкостью, до 10 000 В; SMPS;
 к) стекловые, с повышенной емкостью, для фильтрации и DC/DC-преобразователей;
 л) дисковые, до четырех конденсаторов в одном корпусе;
 м) повышенная емкость, стекловое исполнение, SMPS

Примечание. SMPS, Switch Mode Power Supply — общепринятый термин, обозначающий некоторый набор применений конденсаторов.

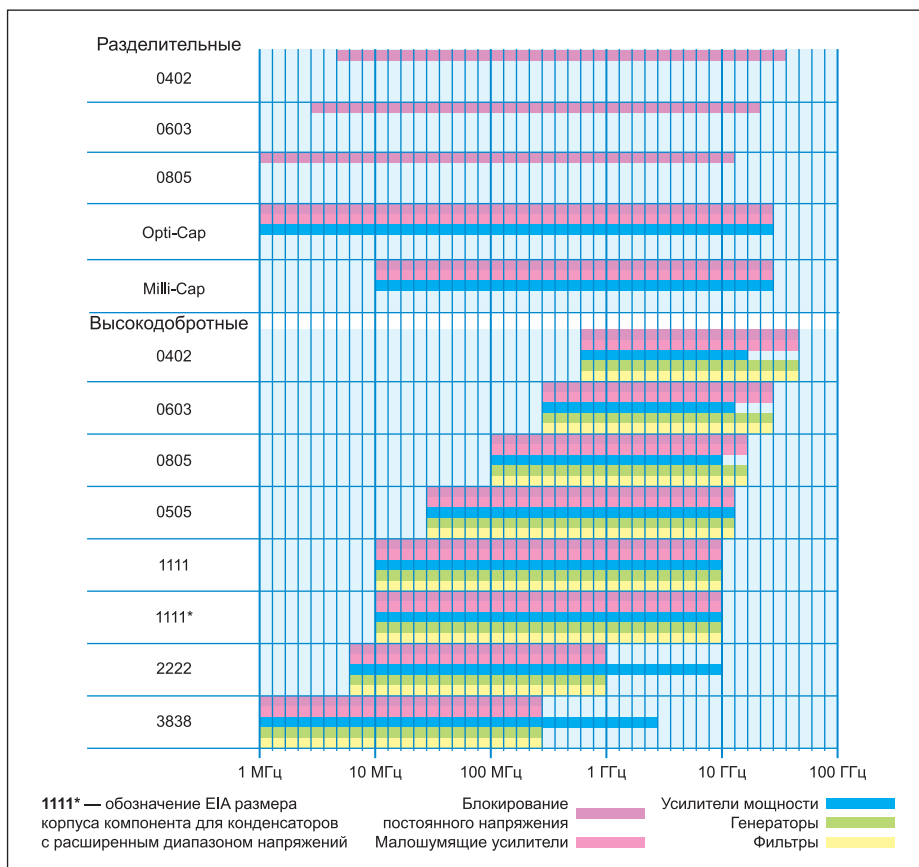


Рис. 5. Частотные границы и области применения MLCC фирмы Dielectric Laboratories

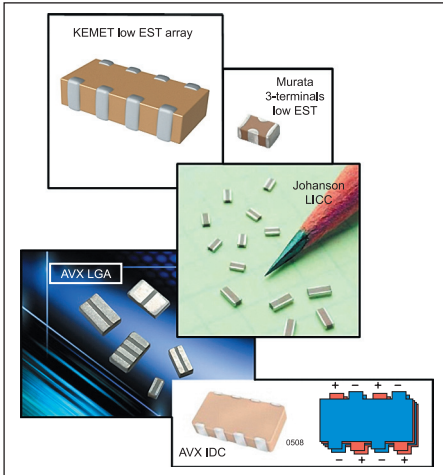


Рис. 6. Конденсаторы с низким ESL фирм KEMET, Murata, Johanson, AVX

Индуктивность конденсатора обусловлена взаимодействием магнитных полей при протекании тока через него. Возникающая при этом токовая петля охватывает внутренний объем конденсатора, его контактные электроды и прилегающие фрагменты платы. Снижение ESL в основном достигается уменьшением токовой петли. Эволюция низкоиндуктивных конденсаторов проявилась в разработке нескольких технологий изготовления компонентов, часть из которых представлена на рис. 6.

Обозначим их в хронологическом порядке:

- Low Inductance Chip Capacitors, LICC — низкоиндуктивные чип-конденсаторы;
- Inter-Digital Capacitors, IDC — конденсаторы с встречно-гребенчатой структурой;
- Low Inductance Capacitor Array, LICA — низкоиндуктивные конденсаторные матрицы;
- Land Grid Array, LGA — конденсаторы с матрицей контактных площадок.

В материалах фирмы AVX представлена зависимость полного импеданса от частоты для трех типов многослойных конденсаторов: MLCC, LICC и IDC (рис. 7).

На рис. 7 показано индуктивное «плечо» полного импеданса и видно, что внедрение каждой следующей технологии снижает ESL конденсаторов.

Повышение таких параметров многослойных конденсаторов, как емкость и напряжение пробоя, создало возможности для разработчиков аппаратуры по замене оксидных конденсаторов на MLCC. Такая замена позволяет уменьшить габариты изделий и снизить эксплуатационные издержки, связанные со спецификой оксидных конденсаторов (например, ограниченный срок службы). В настоящее время многие производители MLCC выпускают серии изделий, которые можно устанавливать вместо оксидных конденсаторов без замены печатных плат. Во многих случаях замена оксидного конденсатора керамическим повышает ха-

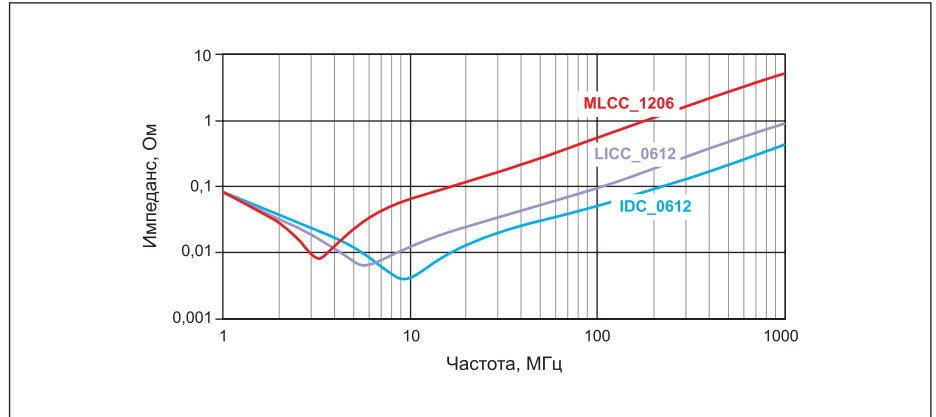


Рис. 7. Сравнение обычных и низкоиндуктивных многослойных конденсаторов от AVX

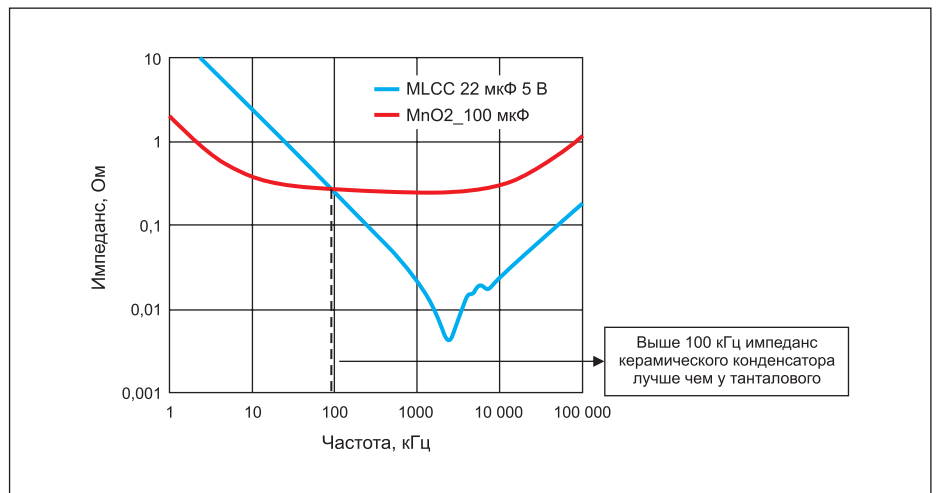


Рис. 8. Сравнение импедансов MLCC и танталовых конденсаторов в частотной области (Murata)

рактеристики конечного изделия. Например, в таких областях, как сглаживание пульсаций переменного напряжения (источники вторичного электропитания), шунтирование переменного напряжения, развязка по постоянному току, являющихся традиционными сферами применения оксидных конденсаторов, самыми значимыми характеристиками конденсатора являются ESR, ESL и, как следствие, полный импеданс конденсатора. В материалах компании Murata [1] описывается практический опыт по замене одного танталового конденсатора 100 мкФ/6,3 В/форм-фактор 3216 (EIA) на два керамических конденсатора 22 мкФ/6,3 В/форм-фактор 0603. Сравнение импедансов обоих типов конденсаторов показывает, что уже начиная с частоты в 100 кГц такая замена дает практическое улучшение характеристик конечного изделия (рис. 8).

Необходимо отметить, что зависимость емкости конденсаторов второго класса от постоянного напряжения (DC-bias) усложняет задачу по замене оксидных конденсаторов на керамические. Тем не менее в задачах, где стабильность емкости не является критически важной, например при сглаживании пульсаций переменного напряжения,

такая замена может принести практическую пользу.

Немагнитные MLCC

Совершенствование технологий использования сильных магнитных полей сформировало запрос к производителям комплектующих на создание немагнитных компонентов, в том числе многослойных керамических конденсаторов. Это особенно наглядно проявляется в таких областях, как магнитно-ядерная томография. Здесь наличие в оборудовании компонентов со значительным магнитным откликом приводит к появлению паразитных артефактов на изображении, что снижает точность обработки и затрудняет последующее диагностирование. Еще один немаловажный фактор в пользу немагнитных компонентов заключается в том, что потери на намагничивание увеличивают общую температуру электронных устройств, снижая тем самым надежность систем. Это важно в таких областях, как высокочастотные системы большой мощности.

Необходимо отметить, что наиболее полное подавление нежелательной намагниченности достигается не только использованием

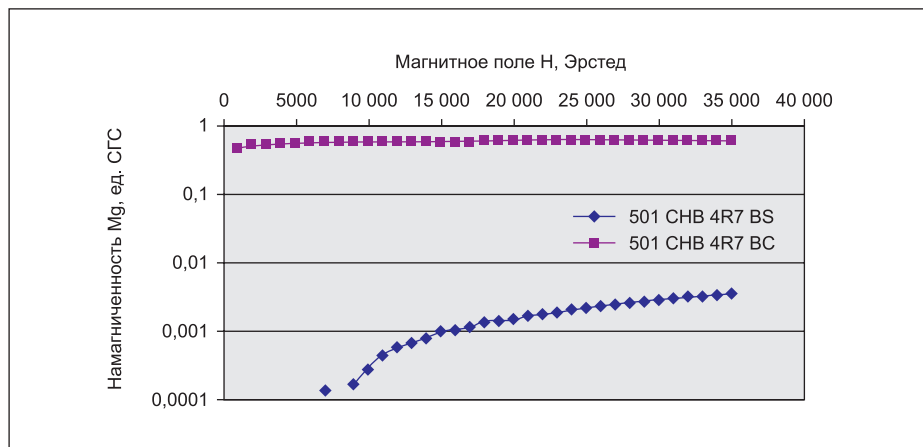


Рис. 9. Сравнение намагниченности конденсаторов с никелевыми и медными контактными площадками от Temex Ceramics

компонентов с пониженным магнитным откликом, но и соответствующей проработкой других элементов аппаратуры, плат, корпусов, проводников и т. п.

Основным направлением снижения магнитных свойств компонентов является отказ от использования ферро- и парамагнитных материалов при производстве MLCC с переходом на диамагнетики (немагнитные материалы). Наиболее часто при изготовлении компонентов применяются такие ферромагнетики, как никель, кобальт, железо. Парамагнитными свойствами обладают платина, алюминий, магний. К диамагнетикам относятся золото, серебро, медь.

В материалах фирмы Temex Ceramics, ныне подразделения группы Ecxelia, приводится сравнение намагниченности двух конденсаторов с никелевыми и медными контактными площадками [2]. Так, на рис. 9 видно, что при приложении магнитного поля конденсатор Temex Ceramics 501CHB4R7BS с никелевыми контактными площадками показывает явно определяемые ферромагнитные особенности, характеризующиеся логарифмическим видом кривой намагничивания и магнитным насыщением. Конденсатор же 501CHB4R7BC с медными контактными площадками демонстрирует плавный и гладкий вид кривой намагничивания, характерный для диамагнетиков. Специалисты Temex Ceramics считают величину намагниченности $0,1 \text{ эрг} \cdot \text{Гс}^{-1} \cdot \text{см}^{-3}$ (СГС) границей намагниченности образца, превышение которой уже не позволяет считать его диамагнетиком.

MLCC для сложных условий эксплуатации

Описание применения многослойных керамических конденсаторов было бы неполным без упоминания областей, где конденсаторы должны сохранять свои характеристики в крайне жестких условиях эксплуатации. Прежде всего, речь идет о таких применениях, как высокочастотные систе-

мы большой мощности, индуктивный нагрев в промышленности, источники питания мощных лазеров, ЯМР-оборудование, военные системы.

Например, в мощных ВЧ/СВЧ-устройствах конденсаторы эксплуатируются при повышенных рабочих токах, при этом вследствие общего тренда на миниатюризацию компонентов возросла общая температура систем и, соответственно, повысилась тепловая напряженность конструкций.

В высоковольтных системах разработчики также сталкиваются с двумя фундаментальными ограничениями. Первое из них — диэлектрическая прочность керамики. При помещении керамики в электрическое поле высокой напряженности в ней возникают механические напряжения, способные привести к разрушению образца. Различные керамики имеют разную диэлектрическую прочность, приведенную к единице толщины образца. В таблице сравнивается несколько образцов керамики по этому параметру.

Таблица. Сравнение керамики по диэлектрической прочности

Материал	Диэлектрическая прочность, кВ/дюйм
Фарфор	40–200
Стекло	2000–3000
Слюда	5000

О диэлектрической прочности MLCC несколько подробнее будет сказано в разделе, посвященном преодолению недостатков конденсаторов этого типа.

Вторая серьезная проблема при разработке высоковольтного оборудования — возникновение коронного разряда между контактными площадками конденсатора. Физика этого процесса объясняется в законе Пашена (1889). Закон описывает диэлектрические свойства газового промежутка как нелинейную (в общем случае) функцию давления газа и длины газового промежутка. Записанный относительно пробойного на-

пряжения газового промежутка закон имеет следующую форму:

$$V = (365 \times p \times d) / (1,18 + \ln(p \times d)),$$

где V — напряжение возникновения электрической дуги, В; p — давление, Торр (мм рт. ст.); d — расстояние, см.

В материалах фирмы Temex Ceramics [3] описывается эксперимент с конденсатором серии CLE, имеющим форм-фактор EIA 4040, что эквивалентно предполагаемой длине газового промежутка 1,05 см. В соответствии с приведенной формулой, если бы указанный промежуток был заполнен только газом при давлении 750 Торр, дуга возникла бы при напряжении 36,6 кВ. Но поскольку значительная часть промежутка заполнена керамикой, заряд которой приводит к ионизации воздуха, дуга на испытуемом конденсаторе появилась уже при напряжении около 10 кВ.

Производители компонентов активно предлагают решения по многослойным конденсаторам, способным работать в описанных условиях. Так, в Temex Ceramics уже несколько лет реализуется программа *n-chip*, смысл которой можно описать следующим образом: «Там, где не справляется один конденсатор, надо поставить несколько. А соответствующее увеличение общих габаритов будет компенсировано отчасти миниатюризацией исходной компонентной базы и частично послужит для уменьшения тепловых нагрузок на изделие».

Например, для работы на больших токах предлагается использовать блоки из параллельно соединенных конденсаторов. Комбинация высокодобротной керамики и развитых контактных площадок позволяет такому конденсаторному блоку работать на значительных токах не только из-за снижения плотности тока и лучшего рассеяния тепла в больших контактных площадках, но и пропорционального снижения ESR вследствие параллельного соединения (рис. 10).

Для работы с повышенными операционными напряжениями используется и агре-



Рис. 10. Решение от Temex Ceramics для работы на больших токах

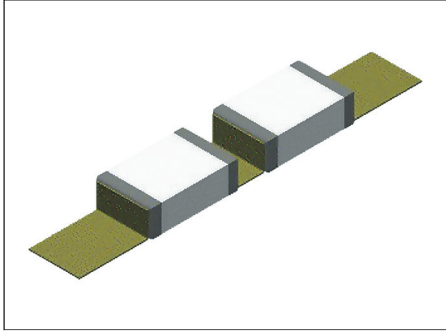


Рис. 11. Удвоение рабочего напряжения в конденсаторе Temex Ceramics

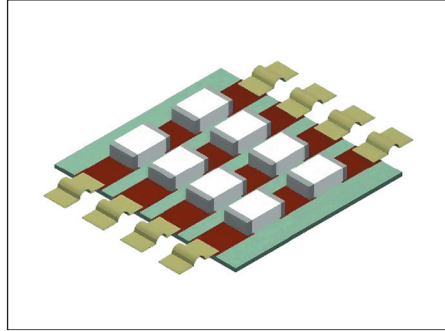


Рис. 12. Согласованный набор конденсаторов Temex Ceramics

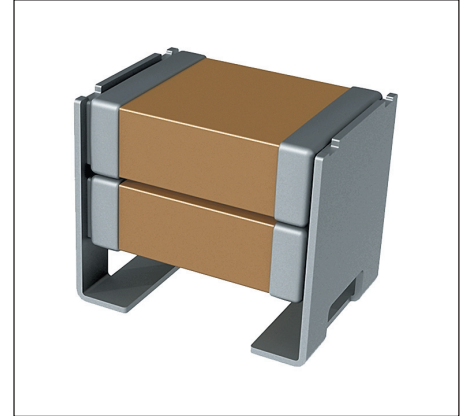


Рис. 13. Конденсаторный блок от KEMET

гатирование нескольких конденсаторов, но на этот раз последовательное (рис. 11).

И наконец, существует технология на основе специализированного ПО, которая позволяет создавать согласованные последовательно-параллельные наборы конденсаторов для получения нестандартных значений емкости и их лучшей адаптации к приложению (рис. 12).

К недостаткам MLCC, которые особенно сильно заметны в сложных условиях эксплуатации, можно отнести низкую механическую прочность. Эта проблема проявляется как при наружных деформациях, например плоскости монтажа, так и при внутренних напряжениях в материале диэлектрика, обусловленных явлением электрострикции, уже упоминавшимся и связанным с высокой напряженностью электрического поля в диэлектрике конденсатора. Необходимо отметить, что фирмы, занимающиеся производством конденсаторов, активно ищут возможности снижения рисков, связанных с деформациями конденсаторов. Так, промышленная группа Knowles, использующая разработки поглощенной Dielectric Laboratories, выпускает многослойные конденсаторы с применением двух защитных технологий: StackiCap и FlexiCap. Обе технологии связаны с введением в конструкцию конденсатора слоев, которые можно назвать

условно мягкими. StackiCap подразумевает введение антистрессового слоя между слоями диэлектрика в местах наибольшего механического напряжения [4]. Технология FlexiCap состоит во введении дополнительного проводящего полимерного слоя в конструкцию контактного узла. Этот слой демпфирует нагрузки на диэлектрик конденсатора со стороны печатной платы [4]. Серии конденсаторов с использованием этой технологии выпускают также фирмы Syfer (входит в Knowles) [5] и Murata. Аналогичные технологии защиты многослойных конденсаторов используют и другие фирмы-производители, давая им другие названия. Например, у фирмы KEMET сходные технологии могут называться Floating Electrode Design (FE-Cap) и Flexible Termination System (FT-Cap).

Еще одна технология увеличения механической прочности многослойных конденсаторов, активно продвигаемая производителями, — пакетирование нескольких конденсаторов в общий стек. Поскольку конденсаторы в таком блоке соединены параллельно, происходит увеличение суммарной емкости изделия, при этом без расширения площади, занимаемой им на плате (рис. 13).

К недостаткам многослойных керамических конденсаторов также можно отнести и значительную чувствительность параметров конденсатора к качеству пайки. Кроме

того, нарушение условий пайки, например непропой контактных поверхностей (электродов) или плохое растекание припоя, часто приводит к росту пьезоэффекта в керамике конденсаторов, что резко ограничивает срок службы конденсаторов и служит причиной их выхода из строя.

В настоящее время наиболее известными производителями многослойных керамических конденсаторов являются компании AVX, Murata, KEMET Charged, Johanson Dielectrics, Syfer CMP, Cornell Dubilier, ATC Corp., Temex Ceramics, Passive Plus, Dielectric Laboratories, Morgan Ceramics и другие. ■

Литература

1. www.murata.com/en-eu/products/capacitor/mlcc/apps/ta
2. www.yumpu.com/en/document/view/40835168/non-magnetic-capacitors-temex-ceramics
3. www.elmechanics.com/pdf_manufacturers/108/Application%20Data%20for%20Power%20HV-HQ%20Ceramic%20capacitors.pdf
4. Филиппов А. Конденсаторы StackiCap. Новые возможности для радиоэлектронной аппаратуры // Электроника: НТБ. 2017. № 3.
5. Ефременко В. Многослойные компоненты Syfer FlexiCap // Компоненты и технологии. 2010. № 9.