

# Конденсаторы переменной емкости

## Часть 1

В. Кочемасов, к. т. н.<sup>1</sup>, С. Хорев<sup>2</sup>

УДК 621.319.4 | ВАК 05.27.01

Во многих электронных компонентах и системах используются конденсаторы переменной емкости или подстроечные конденсаторы, с помощью которых можно выполнять настройку параметров этих устройств. Сегодня существует множество разновидностей таких конденсаторов, различающихся типом применяемых в них диэлектриков, конструкцией, емкостями и рядом других параметров. Об основных типах, характеристиках и производителях современных конденсаторов переменной емкости рассказывается в статье.

**П**одстроечный конденсатор, называемый также триммер (англ. trimmer) – это малогабаритный конденсатор переменной емкости, применяемый для точной настройки колебательных контуров и других электрических цепей. Большая Советская Энциклопедия определяет триммер таким образом:

*«Триммер в радиотехнике, полупеременный конденсатор, подстроечный конденсатор, конденсатор электрический малой переменной ёмкости с фиксируемой настройкой, используемый главным образом в качестве подстроечного элемента резонансных колебательных контуров. Подстройку Т. выполняют, как правило, при изготовлении радиоэлектронного устройства, после чего положение подвижных частей Т. фиксируется и при эксплуатации устройства не изменяется. Конструктивно Т. представляет собой упрощённый плоский конденсатор переменной ёмкости с одной статорной и одной роторной пластинами либо режэ – систему, состоящую из двух (и более) коаксиальных керамических цилиндров или металлических пластин с воздушным зазором, из керамической металлизированной трубки и стержня и т. п. Ёмкость Т. и диапазон её изменения обычно составляют несколько пФ или несколько десятков пФ».*

Буква «Т» в приведенной цитате означает «триммер». Правило обозначения терминов одной буквой было принято в советских энциклопедических и справочных изданиях.

Важно иметь в виду, что на настоящий момент не существует достаточно четкого определения, различающего переменные и подстроечные конденсаторы. В частности, в ГОСТ 21415-75 от 1 января 1977 года, действующем по настоящее время, различие в определении данных типов конденсаторов заключается в том, что конденсаторы переменной емкости (КПЕ) предназначены для

использования в процессе функционирования аппаратуры, а подстроечные конденсаторы – в процессе ее подстройки. Поэтому в англоязычной литературе часто вместе с термином trimmer используются понятия preset capacitor или tuning capacitor. В целом же, различие между переменными (КПЕ) и подстроечными конденсаторами достаточно условное, но принято считать, что оно заключается в следующем:

- конденсаторы переменной емкости имеют более широкий диапазон изменения емкости. Иными словами, у переменных конденсаторов большая разница между минимальной и максимальной емкостью, которая также называется переменной частью емкости. Иногда для оценки диапазона изменения емкости применяется не нормируемый параметр – коэффициент перекрытия по емкости, представляющий собой частное от деления максимальной емкости на минимальную. Для переменных конденсаторов он должен быть не менее 5;
- подстроечные конденсаторы имеют меньший шаг изменения емкости, то есть у них больше число полных оборотов на перестройку емкости от минимальной до максимальной;
- качество исполнения подвижных частей. Поскольку подстроечные конденсаторы фиксируются сразу после подстройки аппаратуры, к их подвижным частям предъявляются менее высокие требования по надежности, в частности по устойчивости к механическим нагрузкам. Для переменных конденсаторов характеристики, определяющие качество и надежность (тип подшипника, люфт ротора, прочность на стирание и др.) – одни из важнейших. Как правило, такие характеристики указываются в технической документации.

В целом же, как показывает практика, в некоторых случаях, в зависимости от требований, предъявляемых к радиоаппаратуре, переменные и подстроечные

<sup>1</sup> ООО «Радиокомп», генеральный директор, vkochemasov@radiocomp.ru.

<sup>2</sup> ООО «Радиокомп», ведущий инженер, siw1937@yandex.ru.

конденсаторы вполне успешно заменяют друг друга. Чаще всего производитель сам указывает в описании тип конденсатора.

Можно выделить следующие возможные области применения подстроечных конденсаторов:

- точная настройка колебательных контуров, в том числе непосредственно в процессе изготовления и сборки электронных устройств или их узлов;
- точное согласование передающих линий по волновому сопротивлению;
- точная настройка и согласование полос пропускания (или режекции) фильтров и других полосовых устройств.

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНДЕНСАТОРОВ ПЕРЕМЕННОЙ ЕМКОСТИ

У переменных конденсаторов, в силу особенностей их конструкции и назначения, существуют, помимо общих для всех конденсаторов параметров, присущие только им характеристики. К ним относятся:

### Максимальная и минимальная емкость ( $C_{\max}/C_{\min}$ ).

Для подстроечных (и переменных) конденсаторов вместо параметра номинальная емкость применяются параметры минимальной и максимальной емкости. Это минимальное и максимальное значения емкости конденсатора, которые могут быть получены перемещением его подвижных частей. Они определяются конструкцией конденсатора, его исполнением и материалом диэлектрика.

**Рабочее ( $U_{\text{раб}}$ ) и предельное рабочее ( $U_{\text{пред}}$ ) напряжение.** Рабочим напряжением конденсатора называется такое напряжение в цепи, в которую он включен, при котором конденсатор в заданных условиях эксплуатации гарантированно сохраняет свои параметры в течение срока службы. Для выполнения этих условий рабочее напряжение не должно превышать номинальное напряжение конденсатора. Предельное рабочее напряжение – это напряжение, при котором происходит электрический пробой слоя диэлектрика и выход конденсатора из строя.

**Резонансная частота конденсатора (Serial Resonance Frequency, SRF).** Резонансная частота конденсатора – это частота, на которой индуктивная составляющая его импеданса (определяемая эквивалентной последовательной индуктивностью конденсатора (ESL)) равна и противоположна по фазе емкостной составляющей (определяемой номинальной емкостью конденсатора). При этом следует иметь в виду, что, как отмечалось выше, для конденсаторов переменной емкости понятие номинальной емкости заменяется предельными значениями емкости – минимальной и максимальной. Поэтому в данном случае под номинальной емкостью следует понимать текущее значение емкости, на которое был перестроен конденсатор. На резонансной частоте конденсатор начинает работать как сопротивление, равное по

значению эквивалентному последовательному сопротивлению (ESR). На частотах выше SRF конденсатор ведет себя, как индуктивность, поэтому рабочая частота конденсатора не должна превышать SRF. Для гарантированного применения конденсатора в электрических цепях рабочая частота этих цепей должна быть много ниже, чем SRF. Если рассматривать конденсатор по его эквивалентной схеме, то SRF иногда называют частотой последовательного резонанса – в отличие от частоты параллельного резонанса (PRF), первую гармонику которой на практике определяют как двойную частоту последовательного резонанса.

На рис. 1 [1] на примере конденсаторов серии U компании AVX (цифрами указан тип конденсатора) показана типичная зависимость частоты последовательного резонанса (SRF) от значения емкости конденсатора. Из рис. 1 видно, что с ростом номинала конденсатора частота последовательного резонанса уменьшается. Это означает, что конденсаторы большего номинала можно применять на более низких частотах, чем конденсаторы меньшего номинала. На частотах, больших частоты последовательного резонанса, конденсатор будет работать как сосредоточенная индуктивность.

**Момент вращения.** Это минимальный момент силы, необходимый для непрерывного перемещения подвижных частей подстроечного конденсатора.

**Число полных оборотов.** Это число полных оборотов подвижных частей конденсатора, которые необходимо произвести для перестройки его емкости от минимальной до максимальной.

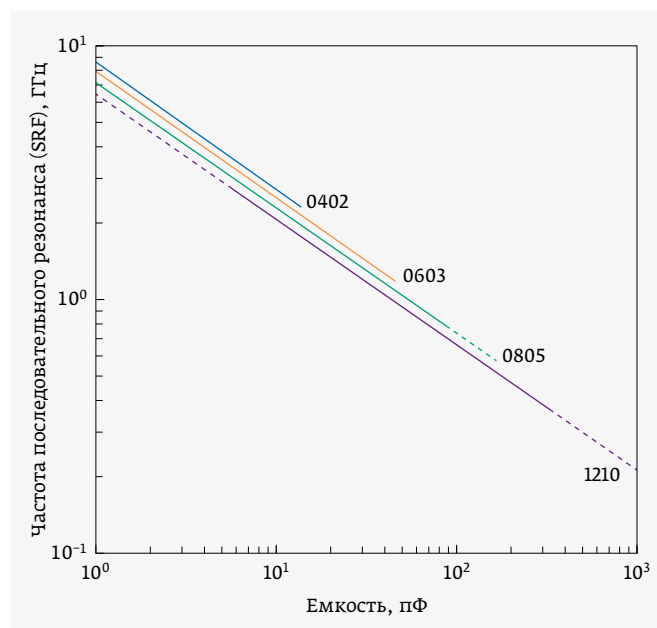


Рис. 1. Зависимость частоты последовательного резонанса от номинала конденсатора

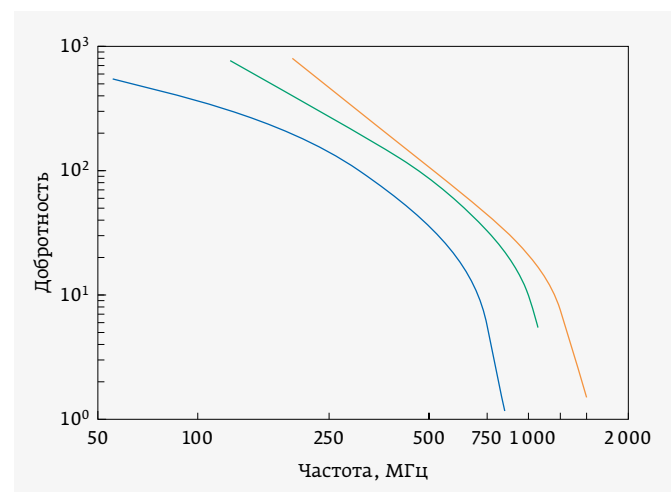
**Температурный коэффициент емкости (ТКЕ).** При изменении температуры окружающей среды изменяются размеры обкладок конденсатора, расстояние между ними, а также значение диэлектрической постоянной диэлектрика. Зависимость емкости конденсатора от температуры, как правило, нелинейная, но для некоторых типов диэлектриков, применяемых при изготовлении конденсаторов, она приближается к линейной. Поэтому ТКЕ может быть определен как относительное изменение емкости конденсатора при изменении температуры окружающей среды на один градус Цельсия (Кельвина). ТКЕ применяется для характеристики конденсаторов с зависимостью емкости от температуры, которую можно считать линейной. Для конденсаторов с нелинейной зависимостью емкости от температуры, а также с большим уходом емкости при изменении температуры, обычно указывают относительное изменение емкости в диапазоне рабочих температур. В случае конденсаторов переменной емкости ТКЕ определяет изменение под влиянием температуры граничных значений емкости ( $C_{\min}/C_{\max}$ ) и дрейф текущего значения емкости, на которое перестроен конденсатор. При этом все расчеты с использованием ТКЕ следует производить исходя из текущего значения емкости конденсатора.

**Добротность (Q-factor).** Добротность конденсатора определяется как величина, обратная тангенсу угла потерь. В свою очередь тангенс угла потерь характеризует потери энергии в конденсаторе и определяется отношением активной мощности к реактивной при синусоидальном напряжении определенной частоты. Таким образом, добротность показывает, насколько конденсатор отличается от идеального конденсатора, в котором потери минимальны, а угол сдвига фаз между напряжением и током составляет  $90^\circ$ . В реальном конденсаторе угол сдвига фаз уменьшается, а потери в силу этого возрастают. Конкретное значение добротности зависит от типа диэлектрика, конструкции конденсатора, температуры окружающей среды и частоты переменного тока, на которой измеряется добротность. Типичная зависимость добротности от частоты приведена на рис. 2 [2]. Кривые на рис. 2 соответствуют разным типам диэлектрика, примененного в конденсаторах. Конструктивное исполнение конденсаторов одинаковое. Как видно из рис. 2, с увеличением частоты добротность конденсатора уменьшается, что связано, в первую очередь, с частотными свойствами диэлектрика.

**Сопrotивление изоляции.** Этот параметр определяет электрическое сопротивление конденсатора постоянному току определенного напряжения. Сопротивление изоляции характеризует качество диэлектрика и качество изготовления конденсатора и зависит, в первую очередь, от типа диэлектрика. Сопротивление изоляции для конденсатора пропорционально площади обкладок и диэлектрической постоянной диэлектрика, то есть номинальной емкости конденсатора для заданного типа диэлектрика. Для

конденсаторов переменной емкости сопротивление изоляции указывается отдельно для минимального и максимального значения емкости. Этот параметр определяет способность конденсатора сохранять заряд, поскольку из-за тока утечки, протекающего через слой диэлектрика между обкладками и по поверхности диэлектрика, предварительно заряженный конденсатор с течением времени теряет заряд. Этот эффект иногда называют саморазрядом конденсатора. В технической документации на конденсаторы сопротивление изоляции (утечки) часто определяют через постоянную времени саморазряда конденсатора, которая численно равна произведению емкости на сопротивление утечки. Для неподключенного к электрической цепи конденсатора под сопротивлением утечки понимается эквивалентное последовательное сопротивление (ESR), а постоянная времени саморазряда – это время, за которое начальное напряжение на конденсаторе уменьшается в  $e$  раз.

**Диапазон рабочих температур.** Это такой температурный диапазон, в котором конденсатор не только сохраняет работоспособность, но гарантированно обеспечивает параметры, заявленные производителем и указанные в технической документации. Изменение температуры приводит к изменению механических и электрических характеристик конденсатора и, как правило, к увеличению его паразитных параметров, в частности импеданса и тангенса угла потерь. При этом следует иметь в виду, что разные производители определяют требования к диапазону рабочих температур по-разному. Например, европейские производители руководствуются, как правило, стандартом МЭК 60068-1, в соответствии с которым ESR конденсатора на нижней границе температурного диапазона должно быть не более чем в семь раз больше, чем



**Рис. 2.** Зависимость добротности конденсатора от частоты (на примере конденсаторов серии JQ компании Voltronics)

при температуре 20 °С. Если конденсатор будет использоваться при температуре, ниже указанной в технической документации, то необходимо учитывать снижение емкости, увеличение ESR и импеданса. Вообще же конденсатор может быть включен в работу при температуре вплоть до минимальной температуры хранения (например, -65 °С). Азиатские производители указывают температурный диапазон без ссылки на какой-либо международный стандарт вообще и руководствуются в этом вопросе только своими внутренними правилами. Поэтому при определении возможности применения конденсатора в тех или иных температурных условиях нужно руководствоваться не только технической документацией, но и данными о конкретном производителе.

**Устойчивость к механическим воздействиям.** При эксплуатации и транспортировании аппаратуры конденсаторы, установленные в ней, подвергаются воздействию механических нагрузок различного вида: вибрации, одиночным и многократным ударам, линейному ускорению, акустическим нагрузкам. Наиболее опасны вибрационные и ударные нагрузки. Воздействие механических нагрузок, превышающих допустимые нормы, может вызвать обрывы выводов и внутренних соединений, увеличение тока утечки из-за механического повреждения пластин и диэлектрика, появление трещин в керамических корпусах и изоляторах, снижение электрической прочности, изменение установленной емкости. Высокие уровни разрушающих усилий могут возникать при воздействии ударных нагрузок, если составляющие спектра ударного импульса совпадают с собственными резонансными частотами конденсатора. Особую важность внешние механические воздействия имеют для переменных конденсаторов, поскольку подвижные части конденсаторов наиболее чувствительны к ним. При этом могут нарушаться практически все самые важные для переменных конденсаторов параметры: точность перестройки емкости, добротность, момент вращения, минимальная и максимальная емкости. Предельно допустимые значения внешнего механического воздействия на конденсаторы, в частности вибрации и ударных нагрузок, определяются соответствующими нормативами, например ГОСТ 17516.1-90 или ГОСТ 30630.0.0-99, и указываются в технической документации.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРЕМЕННЫХ КОНДЕНСАТОРОВ ПО ТИПУ ДИЭЛЕКТРИКА

Следует отметить, что на настоящий момент не существует сколько-нибудь единой и устоявшейся системы классификации не только триммеров, но и вообще конденсаторов как класса устройств для электронной техники. Ситуация усугубляется еще и тем, что с появлением новых материалов, которые используются при изготовлении конденсаторов, список типов конденсаторов постоянно расширяется и изменяется. Тем более, что

многие производители ставят себе в заслугу именно разработку новых материалов с интересными свойствами. Тем не менее можно отметить несколько основных типов конденсаторов, которые отмечают производители в перечне своей продукции.

## Конденсаторы с воздушным диэлектриком

В силу особенностей поведения воздуха как диэлектрика, он применяется чаще всего именно в переменных и подстроечных конденсаторах. К положительным свойствам воздуха можно отнести отсутствие старения, то есть электрические свойства воздуха не изменяются со временем. Кроме того, использование воздуха в качестве диэлектрического материала обеспечивает малые диэлектрические потери и быстрое восстановление электрической прочности после пробоя.

К недостаткам, ограничивающим возможности практического применения конденсаторов с воздушным диэлектриком, относятся:

- невысокая электрическая прочность и малое напряжение пробоя;
- низкая теплопроводность;
- сильная зависимость от параметров окружающей среды, особенно от влажности.

Независимо от конструктивного исполнения, в переменных конденсаторах воздух находится между подвижной и неподвижной обкладками конденсатора. Это показано на рис. 3 [3, 4] на примере конструкции конденсатора компании Voltronics (сейчас компания Voltronics входит в группу компаний Exxelia).

Как видно из рис. 3, воздух находится между неподвижным корпусом конденсатора и подвижным, но не вращающимся центральным электродом. Изменение емкости происходит при изменении воздушного зазора между

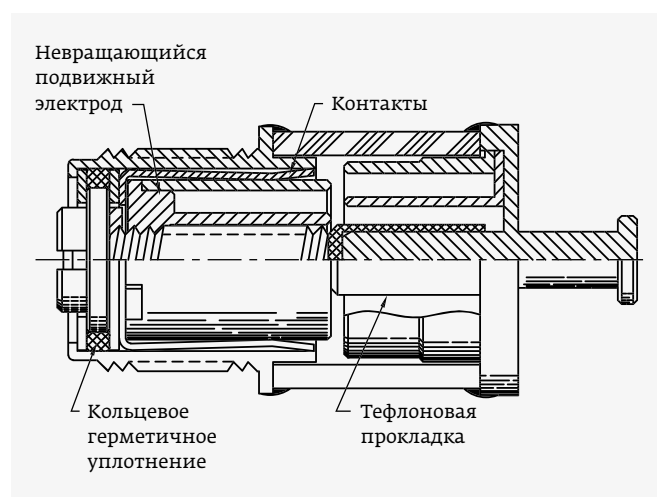


Рис. 3. Конструкция переменного конденсатора с воздушным диэлектриком компании Voltronics

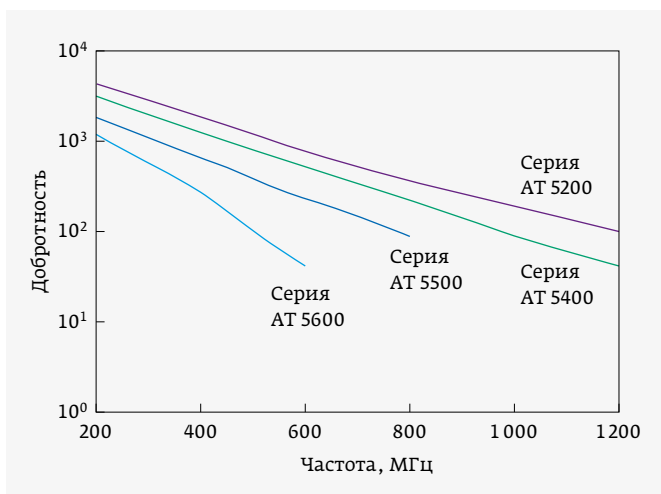


**Рис. 4.** Переменные конденсаторы с воздушным диэлектриком: а – трубчатый конденсатор компании Voltronics; б – конденсатор с плоскими обкладками компании Tronser Trimmer; в – подстроечный конденсатор компании Temex Ceramics

обкладками. Для предотвращения выхода воздуха применена герметичная кольцевая прокладка. Внешний вид некоторых переменных конденсаторов разного исполнения с воздушным диэлектриком показан на рис. 4а [4], рис. 4б [5] и рис. 4в [6].

Следует также отметить, что в зависимости от конструктивного исполнения емкость переменного конденсатора с воздушным диэлектриком может изменяться от минимальной до максимальной за один оборот подвижной части (single turn) или же за несколько оборотов (multi turn). В частности, для конденсатора на рис. 4а требуется 10 полных оборотов подвижной части для изменения емкости от минимальной до максимальной, а для конденсатора на рис. 4б – только один.

На рис. 5 [7] приведено типичное поведение добротности в зависимости от частоты для некоторых моделей триммеров с воздушным диэлектриком компании Temex Ceramics (в настоящий момент компания Temex Ceramics входит в группу компаний Exxelia).



**Рис. 5.** Типичное поведение добротности (при максимальном значении емкости) в зависимости от частоты для некоторых моделей конденсаторов с воздушным диэлектриком компании Temex Ceramics

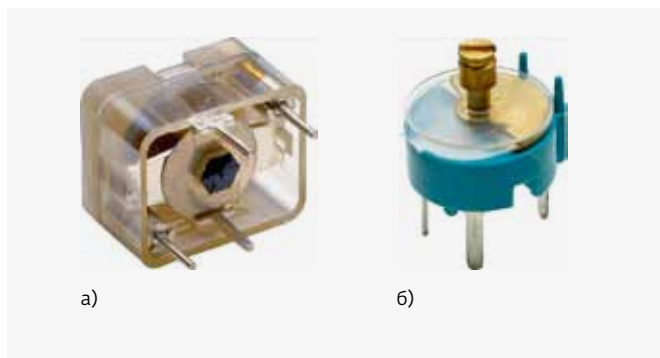
### Конденсаторы с полимерными пленками на основе PTFE

Данный тип конденсаторов относится к так называемым пленочным (Film) конденсаторам, в которых в качестве диэлектрика используются пленки из органических или неорганических материалов. PTFE – это аббревиатура от полного названия материала – политетрафторэтилен. Другие названия этого материала – тефлон (торговая марка компании DuPont) или фторопласт-4, принятое ранее в СССР и применяемое в настоящее время в России. Существуют также названия и обозначения PTFE, применяемые реже, в частности Fluon G163, Fluon G190, Algoflon F, Hostafilon TF 1702, Polyflon M 12, Polyflon M 14. Конденсаторы, изготовленные на основе фторопласта-4, обладают рядом несомненных преимуществ по сравнению с конденсаторами, изготовленными на основе других материалов. Особо следует отметить следующие из них:

- высокая теплопроводность. В силу этой особенности диэлектрическая проницаемость PTFE практически не зависит от температуры. Во всём диапазоне температур, в котором фторопласт-4 сохраняет свои физические и химические свойства, она меняется незначительно и изменение происходит линейно. Без соответствующих присадок диэлектрическая проницаемость фторопласта-4 составляет от 1,9 до 2,2 в зависимости от плотности спекания;
- широкий диапазон рабочих частот. Диэлектрическая проницаемость фторопласта-4 определяется только плотностью материала и не зависит от частоты, что позволяет применять конденсаторы на основе PTFE во всём диапазоне частот вплоть до 10 ГГц;
- крайне низкие диэлектрические потери. На частотах до 10 ГГц тангенс угла диэлектрических потерь фторопласта-4 не превышает 0,0002. Он остается неизменным в температурном диапазоне от -190 до 250 °С. Но даже при нагреве свыше 300 °С фторопласт-4 сохраняет свои электрические свойства;
- высокая электрическая прочность. У фторопластовой пластины толщиной 0,005–0,02 мм электрическая прочность составляет 200–300 кВ/мм, что позволяет применять триммеры на основе фторопласта-4 в высоковольтных цепях.

Вместе с тем, следует отметить ряд параметров, которые ограничивают применение фторопласта-4 в качестве диэлектрика в переменных и подстроечных конденсаторах. К ним относятся:

- низкая механическая прочность чистого фторопласта-4. Наличие подвижных частей в переменных и подстроечных конденсаторах приводит



**Рис. 6.** Подстроечный (а) и переменный (б) конденсаторы с полимерными пленками на основе PTFE компании Vishay

к механическому стиранию пластин фторопласта, изменению его толщины и, таким образом, изменению емкости конденсатора. Механическая прочность фторопласта-4 может быть увеличена введением особых присадок при варке, например стекловолокна, кокса, графита, дисульфида молибдена. Присадки увеличивают механическую прочность исходного материала, но изменяют его электрические свойства. Тип присадки, как правило, указывается в технической документации;

- высокая холодная текучесть. Под воздействием постоянного внешнего механического давления фторопласт-4 теряет свою форму и становится пластичным, что приводит к изменению формы пластин диэлектрика и, как следствие, емкости конденсатора. Это особенно существенно для подстроечных конденсаторов, в которых механическим образом устраняется воздушный зазор между диэлектриком и металлическими обкладками конденсатора.

Одна из компаний, выпускающих переменные и подстроечные конденсаторы с PTFE в качестве диэлектрика, – Vishay. На рис. 6а [8] и рис. 6б [9] приведены две модели



**Рис. 7.** Линейка конденсаторов компании Polyflon

конденсаторов этой компании. Их отличительной особенностью является то, что корпуса конденсаторов изготовлены из высокотемпературного пластика полисульфон (PSU), что позволяет применять эти устройства при внешних температурах до 125 °С. Неподвижная обкладка термическим способом вварена в корпус, что исключает появление люфта при частом вращении ротора. Статор и контакты ротора гальваническим способом покрыты оловом или никелем (для дешевых моделей) или золотом (для дорогих моделей).

В этой группе конденсаторов необходимо отметить также изделия компании Polyflon, линейка конденсаторов которой приведена на рис. 7 [10]. Конденсаторы этой компании изготовлены на основе тефлона (полифлона). Их особенность – прочное молекулярное сцепление (за счет взаимной адгезии материалов) тефлона и медных элементов конструкции, что исключает появление коронного разряда и позволяет использовать данные конденсаторы в высоковольтных цепях. Например, конденсаторы серии RP имеют пиковое рабочее напряжение от 1 до 10 кВ, а конденсаторы серии RFFC – импульсное пиковое рабочее напряжение от 5 до 15 кВ.



**РАДИОКОМП**

РАЗРАБОТКА  
ПРОИЗВОДСТВО  
ИСПЫТАНИЯ  
ПОСТАВКА

**ВЧ/СВЧ усилители и транзисторы**  
[www.radiocomp.ru](http://www.radiocomp.ru)

**POLY-FET RF-DEVICES**

Усилительные модули:  
частоты 1 – 1260 МГц,  
выходная мощность до 200 Вт

Мощные транзисторы на основе  
кремния и нитрида галлия:  
частота до 2,5 ГГц, КПД до 65%,  
мощность до 600 Вт

**B&Z TECHNOLOGIES**

Усилители многих типов:  
частоты 5 кГц – 60 ГГц

МШУ: широкополосные, сверхширокополосные, с большим динамическим диапазоном, с криогенным охлаждением, в волноводном исполнении

Коэффициент шума: менее 0,5 дБ для сверхмал шумящих МШУ



**Рис. 8.**  
Подстроечные конденсаторы серии NT компании Voltronics

Следует отметить также высоковольтные конденсаторы компании Voltronics [11]. На рис. 8 [11] приведены триммеры серии NT, диапазон рабочих напряжений которых составляет от 6 до 15 кВ. Отличием от приведенных выше конденсаторов компании Polyflon является то, что часто вместо меди Voltronics применяет покрытый серебром никель, что существенно снижает стоимость продукции. В линейке триммеров и переменных конденсаторов компании существует даже отдельный класс бюджетных (Low Cost) конденсаторов.

При выборе конденсаторов компании Voltronics необходимо обращать внимание на маркировку изделия, в которой указывается возможная область применения. В частности, высоковольтные конденсаторы в названии имеют литеры HV – High Voltage. Выпускаются также конденсаторы с литерами NM – Non-Magnetic (немагнитные). Voltronics разработана специальная процедура правильной подстройки, которой рекомендуется придерживаться при использовании конденсаторов данной компании.

Стоит отметить, что компании Polyflon и Voltronics – прямые конкуренты, поскольку претендуют на один и тот же сегмент рынка. Поэтому их технические решения во многом похожи.

### Сапфировые конденсаторы

Переменные и подстроечные конденсаторы с диэлектриком на основе сапфира относятся к типу изделий

ООО СМП

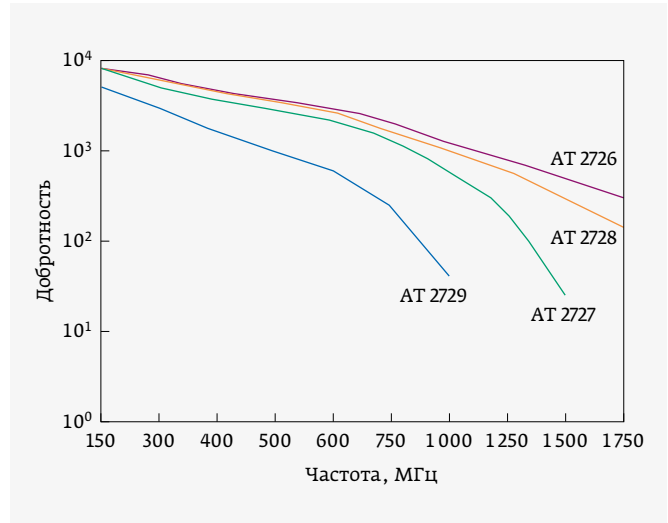
ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИН  
[www.SMD.ru](http://www.SMD.ru)

электронные  
для поверхностного  
монтажа

НОВОЕ В ПРОГРАММЕ ПОСТАВОК

- Сдвижные переключатели на 2 и 3 положения
- Керамические радиаторы для микросхем

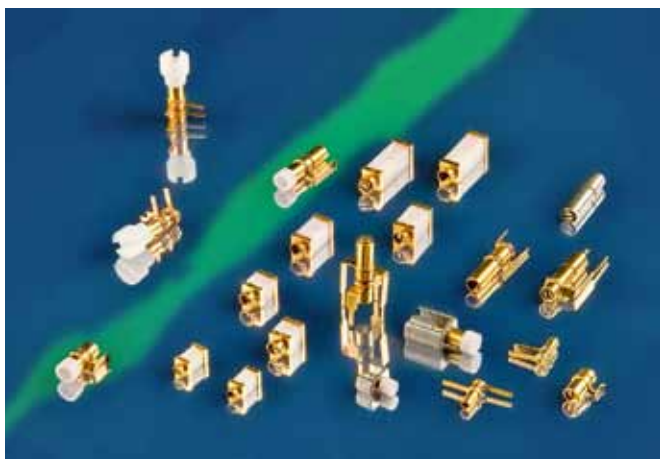
Москва, Ленинградский пр., 80 к. 32, e-mail: [sale@smd.ru](mailto:sale@smd.ru)  
 Тел.: +4991 158-7396, +4991 943-6254, +4991 943-8780



**Рис. 9.** Зависимость добротности от частоты для некоторых моделей триммеров компании Temex Ceramics

с неорганическим диэлектриком. При их производстве чаще всего применяется искусственно выращенный бесцветный сапфир, так называемый лейкосапфир. По химическому составу сапфир представляет собой оксид алюминия  $Al_2O_3$ . Поскольку сапфир является кристаллическим материалом, то его физические и химические свойства сильно зависят от того, как была обработана исходная заготовка. Так, например, диэлектрическая постоянная сапфира, распиленного параллельно оптической оси, на частоте 10 ГГц составляет 11,5, а распиленного перпендикулярно оптической оси – 9,3 на той же частоте. Особые свойства сапфира делают его перспективным материалом для изготовления переменных и подстроечных конденсаторов. Для сапфира характерны:

- высокая механическая прочность на стирание. Сапфир характеризуется высокой твердостью, которая составляет девять единиц по шкале Мооса. Это особенно важно для переменных и многооборотных подстроечных конденсаторов, поскольку при многократных поворотах подвижных частей не происходит стирание пластин диэлектрика. Так например, подстроечные конденсаторы серии P компании Voltronics выдерживают не менее 10 000 полных оборотов подвижных частей;
- диэлектрическая постоянная сапфира не зависит от частоты, что дает возможность применять конденсаторы на основе сапфира на частотах выше 10 ГГц;
- диэлектрические потери сапфира крайне малы и не превышают 0,0003 на частоте 10 ГГц;
- кристаллическая структура сапфира, его термические и электрические характеристики позволяют



**Рис. 10.** Линейка сверхвысокочастотных сапфировых подстроечных конденсаторов компании Temex Ceramics

получать конденсаторы с очень высокой добротностью. На рис. 9 [12] приведена типовая зависимость добротности от частоты конденсаторов компании Temex Ceramics (рис. 10) [13].

Вместе с тем следует отметить, что имея высокую механическую прочность, сапфир как материал довольно хрупок. Поэтому изделия из него, в том числе конденсаторы, имеют малую прочность на удар. Кроме того, несмотря на появление новых технологий изготовления сапфира, он остается достаточно дорогим материалом. Поэтому сапфировые переменные и подстроечные конденсаторы, особенно сверхвысокочастотные, дороже аналогичных конденсаторов, изготовленных на основе других материалов. Что, тем не менее, окупается их свойствами и характеристиками.

В линейке сапфировых конденсаторов компании Temex Ceramics следует отметить немагнитные конденсаторы, например серий AT 57250, AT 57290, TG 091, TG 092. Как правило, их металлические части изготавливаются из немагнитных металлов и покрываются серебром. Отдельный интерес представляют в этом отношении триммеры, выполненные из инвара – сплава железа и никеля, по стандартам США он обозначается как FeNi36 или 64FeNi (число обозначает процентное содержание данного элемента в сплаве). Отличительная особенность инвара – малый температурный коэффициент линейного расширения, в силу чего геометрические размеры изделия (а также емкость, которая с ними связана) практически не зависят от температуры окружающей среды. Данный эффект определяется тем, что тепловое расширение компенсируется магнестрикцией сплава. Несколько моделей этих конденсаторов приведены на рис. 11 [14].



**Рис. 11.** Триммеры из инвара компании Temex Ceramics

## ЛИТЕРАТУРА

1. Каталог компании AVX Corporation: AVX Surface Mount Ceramic Capacitors Products. P. 10.
2. Каталог компании Voltronics: Ceramic Chip Trimmer Capacitors. P. 9.
3. Каталог Knowles Precision Devices (подразделения компании Knowles Corporation): Trimmers and non-magnetic components. P. 15.
4. Каталог продукции компании Voltronics. – М.: ООО «Радиокомп», 2009. С. 5.
5. <https://www.tronser.de/en/products/products-trimmer/air-plate-trimmer/10-1606.html>
6. Материалы компании Temex Ceramics: Air Trimmer Capacitors. Miniature, Standard & High Voltage Series. P. 1.
7. Материалы компании Temex Ceramics: Air Trimmer Capacitors. Miniature, Standard & High Voltage Series. P. 4.
8. Vishay BCcomponents: Film Dielectric Trimmers. Document Number: 28529.
9. Vishay BCcomponents:  $\varnothing 7.5$  mm Film Dielectric Trimmers. Document Number: 28527.
10. <http://www.polyflon.com/products/capacitors/>
11. Материалы компании Voltronics: High Voltage PTFE Trimmer Capacitors. 6KV TO 15KV.
12. Материалы компании Temex Ceramics: GigaHertz Sapphire Trimmer Capacitors. P. 2.
13. Материалы компании Temex Ceramics: GigaHertz Sapphire Trimmer Capacitors. P. 1.
14. <http://www.exxelia.com/en/product/detail/595/custom-invar-tuning-element>

Санкт-Петербург, Россия  
ул. Матроса Железняка,  
д. 57, лит. А, пом. 126-Н  
Телефон: 7-812-3259792

Москва, Россия  
Лужнецкая набережная, 2/4,  
строение 19, офис 119  
Телефон: 7-095-7477590

**VITAL-IC**

Поставки электронных компонентов  
широкой номенклатуры  
Системы RFID: поставка и консультации

**XILINX** **Mini-Circuits**  
**ALTERA**