

# Конденсаторы для ВЧ/СВЧ.

## Часть 3

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

В статье дан обзор разных типов конденсаторов. В третьей части публикации приведены свойства и применение конденсаторов с органическим диэлектриком<sup>1</sup>.

Как уже отмечалось, для керамических конденсаторов одним из критических факторов, который необходимо учитывать при определении целесообразности их использования в электрических цепях, является наличие пьезоэффекта у керамических диэлектриков. Указанных ограничений лишены органические конденсаторы.

### Особенности конструкции и применения

Необходимо сказать о том, как свойства органических вообще и пленочных диэлектриков в частности определили конструктивные особенности и сферы применения конденсаторов этого типа. Пожалуй, главным фактором, определившим современный набор конструктивных исполнений органических конденсаторов, является неширокий по сравнению с керамическими конденсаторами температурный диапазон применения органических полимеров. Это резко снизило возможности использования полимеров в чип-конденсаторах. Речь, прежде всего, идет о процессе пайки, в результате которого может происходить температурное разрушение либо деградация конденсаторов. Дополнительные сложности в «жизнь» органических чип-конденсаторов внесло появление требований RoHS по пайке бессвинцовыми припоями. Поскольку температура плавления таких припоев выше, чем свинцовосодержащих, значительная часть известных серий, в частности пленочных конденсаторов, имеет ограничения при пайке. Часто это невозможность использовать технологию двухволновой пайки либо ограничения по времени прохождения волны припоя. Многолетняя статистика рынка, собранная в основном по пленочным конденсаторам, показывает, что 80–90% таких конденсаторов выпускается в выводном исполнении. Пайка выводов не ухудшает свойств собственно конденсатора.

### Органические конденсаторы для ВЧ/СВЧ

Несмотря на то, что признанным лидером в области высокочастотных приложений принято считать керамические конденсаторы, органические полимеры успешно осваивают этот специфический диапазон. Говоря о применении полимерных конденсаторов на высоких частотах, можно упомянуть об авторской технологии AVX — многослойных органических структурах MLO (Multilayer Organic). Эта технология появилась именно как результат усилий по расширению частотного диапазона применения полимерных устройств. Суть ее заключается в том, что из полимерных материалов и посредством отработанных пленочных технологий создается многослойная подложка, стек слоев которой содержит один или несколько уровней полимера с малыми потерями на высоких частотах. Эти слои «зажаты» между слоями металлизации и разделительными. Слои метал-

лизации используются для формирования стандартных компонентов, посредством трассировки соединяемых в целевые устройства. Стандартный стек слоев подложек первого поколения описан в [1] и представлен на рис. 1.

Синим цветом на рис. 1 обозначены переходные отверстия между слоями. Основной проблемой при создании этого типа подложек был поиск полимерного материала, имеющего малые потери на высоких частотах и при этом высокую диэлектрическую проницаемость для формирования значительной емкости в малых габаритах. В настоящее время в качестве таких материалов для high-Q-слоев используются политетрафторэтилен (PTFE) и жидкокристаллические полимеры (LCP). Высокочастотные полимерные подложки MLO ста-

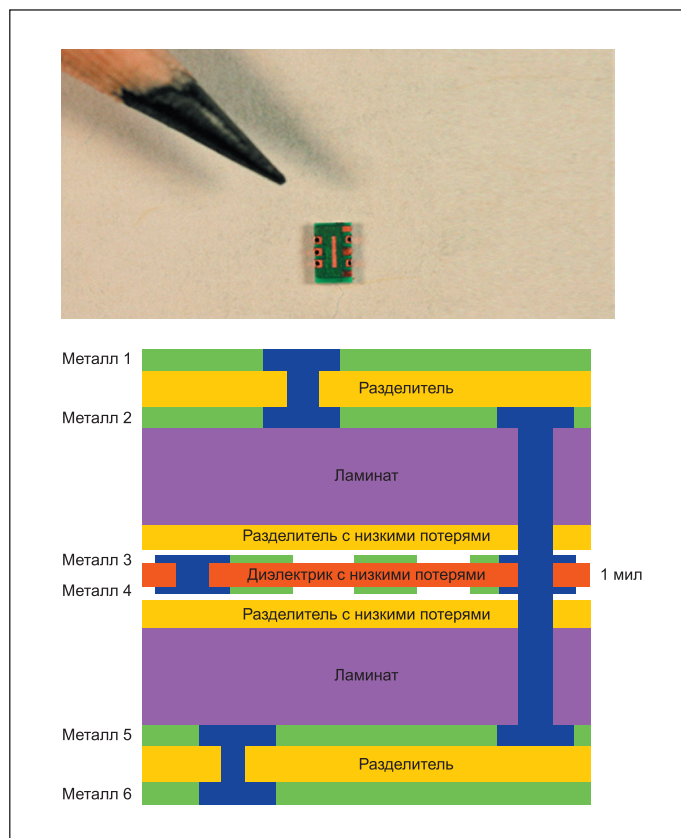


Рис. 1. Подложка MLO с шестью слоями металлизации

<sup>1</sup> При описании значительной части класса органических конденсаторов на основе трех полимеров — поликарбоната, полиэстера и полипропилена — будет использоваться традиционный, но устаревший термин «пленочные» (Film), который мы будем относить не к материалу диэлектрика, а к конструкции этого подкласса органических конденсаторов.

ли исключительно благодатной средой для размещения в них стандартных компонентов для повсеместно используемых радиотехнологий: беспроводных сетей многих протоколов, широкоэмитательных спутниковых систем, автомобильных радиосистем и т. п. По технологии MLO выполняются конденсаторы, индуктивности, диплексеры, согласующие четвертьволновые трансформаторы, фильтры, ответвители и другие компоненты, вплоть до радиочастотных микросхем (RFIC). При этом на наружных металлизированных слоях подложек может выполняться стандартная трассировка для SMT-компонентов. Дополнительным бонусом MLO-подложек является их полная совместимость с широко применяемым материалом для печатных плат — FR4. Оба материала имеют одинаковое температурное расширение, и при закреплении MLO-компонентов на печатных платах они не создают дополнительных термических нагрузок на платы. Специалисты фирмы AVX отмечают очень хорошие показатели MLO по диэлектрической абсорбции [2]. По данным [2], этот показатель для MLO составляет 0,0015%, что на порядки лучше абсорбции, например, для керамики NP0 — 0,6%. Это свойство MLO, конечно, весьма востребовано в устройствах выборки/хранения. В качестве практического решения AVX предлагает представленный в [3] MLO-конденсатор формата 0603 (EIA) с диапазоном емкостей 0,1–5,1 пФ, рабочим напряжением 50–250 В. Изделие имеет допуск по номиналу  $\pm 0,02$  пФ и может применяться в диапазоне частот до 20 ГГц.

Вообще необходимо отметить, что технология сложных подложек переживает период стремительного развития не только в области пленочных технологий. Для керамики примером тому служат 3D однослойные конденсаторы фирмы IPDiA, речь о которых пойдет ниже. А наиболее полным конструктивным аналогом MLO-подложек от AVX являются сложные керамические подложки CapStrate фирмы Johanson Dielectrics.

### Типы пленочных конденсаторов и основные материалы для их производства

Конструкция пленочного (как поясняется в сноске в начале обзора) конденсатора схожа с конструкцией многослойного керамического конденсатора или с конструкцией оксидного (электролитического) конденсатора, с тем отличием, что рулон диэлектрика с металлизацией укладывается прямоугольным брикетом. Конструкция пленочного конденсатора компании Wima приведена на рис. 2.

Так же как и в ситуации с MLCC, пленочные конденсаторы имеют большое количество конструктивных исполнений, в основном разделенных на три большие группы с корпусами для поверхностного монтажа (SMD) и выводными корпусами

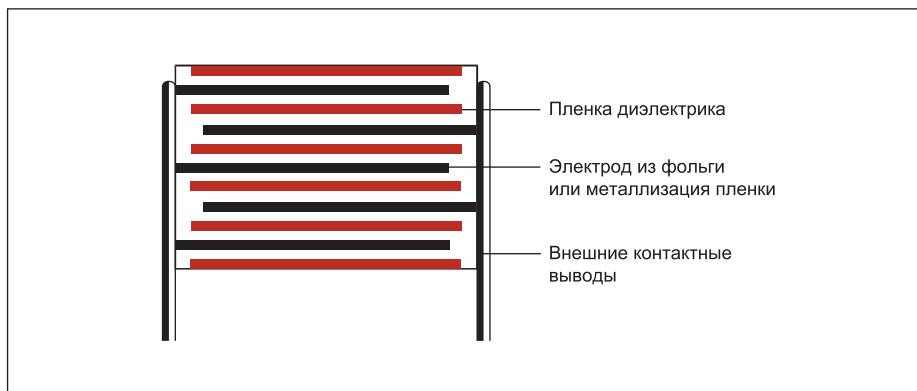


Рис. 2. Конструкция пленочного конденсатора компании Wima

с радиальным (Radial) и аксиальным (Axial) расположением выводов. На рис. 3 представлены некоторые примеры исполнений по информационным материалам фирмы Kemet и промышленной группы Epcos.

Пленочные конденсаторы применяются, как правило, в сильноточных импульсных устройствах, в том числе работающих в нагруженных режимах с малыми скажностями. Хотя эта область электронной техники напрямую не связана с заявленной темой статьи, тем не менее краткий экскурс в нее оправдан, поскольку в развитии электронной индустрии виден процесс конвергенции, при котором высокочастотные устройства становятся сильноточными, а импульсная техника работает на все больших частотах.

В качестве диэлектрика в них чаще всего применяются поликарбонат, полиэстер и полипропилен, которые называют «большой тройкой» пленочных конденсаторов. Эти диэлектрики применяет большинство фирм — производителей пленочных конденсаторов. Хотя в последнее время на первое место выходит полифенилен сульфид (PPS), который активно замещает конденсаторы из поликарбоната [4]. Достаточно распространены на рынке и конденсаторы с диэлектриком из пропитанной бумаги.

Класс пленочных конденсаторов условно делится на два основных типа. Те конденсаторы, у которых металлические обкладки выполняются из фольги (например, тонкой фольги хрома), называются фольговыми. В англоязычной литературе принят термин

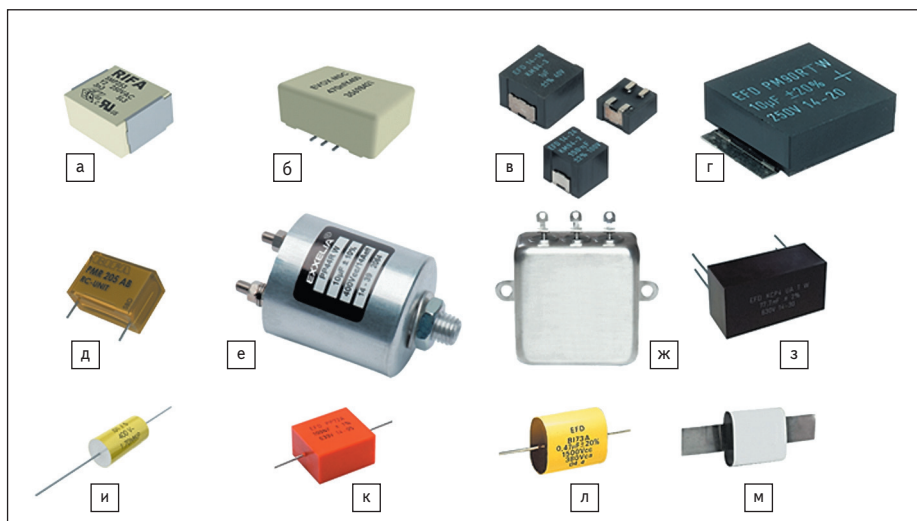


Рис. 3. Виды корпусов пленочных конденсаторов от Kemet и Epcos:

- SMD-исполнение от Kemet с размерами 12,7×11,5×6,5 мм;
- SMD от Kemet в корпусе DIL6 с минимальными размерами 11×12,2×6,05 мм;
- низкоиндуктивные SMD-конденсаторы с самовосстановлением от Epcos;
- SMD высокочастотные SMPS Epcos;
- радиальный конденсатор с серийным резистором от Kemet;
- радиальный Epcos, выводы с резьбой или в виде контактного лепестка;
- радиальный высоковольтный до 1000 В, Epcos;
- точный радиальный от Epcos, каждая обкладка соединена с двумя выводами;
- аксиальный от Kemet для SMPS-применений;
- аксиальный низкоиндуктивный от Epcos;
- аксиальный высоковольтный до 2200 В от Epcos;
- аксиальный Epcos, имеется исполнение, при котором один из выводов соединен с корпусом

Таблица 1. Сравнение типов диэлектриков (Kemet)

Материал диэлектрика	Аббревиатура	Минимальная толщина, мкм	Диэлектрическая константа (1 кГц, +23 °С)	Нормальная рабочая температура, °С (расширенная)	Температурный коэффициент, ppm/°С	Тангенс угла потерь (1 кГц, +23 °С), %	Сопротивление изоляции, с	Диэлектрическая абсорбция, %
Полиэстер	PET	0,9	3,3	-55...+100 (+125)	+400 (±200)	0,5	25 000	0,5
Полиэтилен нафталат	PEN	1,4	3	-55...+125 (+150)	+200 (±150)	0,4	25 000	1,2
Поликарбонат	PC	2	2,8	-55...+125	0 (±100) нелинейно	0,15	25 000	0,06
Полифенилен сульфид	PPS	1,2	3	-55...+125 (+175)	0 (-50)...+100 °С	0,06	50 000	0,05
Полипропилен	PP	2,4	2,2	-55...+105 (+125)	-200 почти линейно	0,03	100 000	0,01
Пропитанная бумага	P	8	5,5	-40...+115	+1200 (±200)	0,8	15 000	—

all-film либо foiled. Встречается также термин film/foil. Ко второму типу относятся конденсаторы, чьи обкладки выполняются непосредственным напылением на пленку диэлектрика тонкой пленки металла. Это металлизированные конденсаторы, или metallized. В количественном соотношении металлизированные конденсаторы выпускаются в значительно больших объемах, чем фольговые. При этом фирмы-производители стараются разрабатывать и использовать проприетарные технологии изготовления для продвижения своей продукции. Так, перед напылением металлической пленки компания AVX проводит обработку диэлектрика коронным разрядом для лучшего сцепления полимера и металла. О причинах количественного неравенства между фольговыми и металлизированными конденсаторами будет сказано ниже.

В зависимости от типа полимера, который используется в качестве диэлектрика, пленочные конденсаторы можно разбить на три большие группы:

- Поликарбонат. Этот материал имеет низкий температурный дрейф (ниже, чем у других материалов), малый коэффициент рассеяния и диэлектрической абсорбции. Конденсаторы на основе поликарбоната применяются в импульсных цепях и прецизионных аналоговых устройствах в тех случаях, когда требуется хорошая температурная стабильность и высокий температурный коэффициент. В отличие от других диэлектриков имеет низкую устойчивость к влажности, что весьма критично в некоторых областях применения. Конденсаторы из поликарбоната имеют высокое тепловое сопротивление (до +125 °С), но плохо подходят для поверхностного монтажа. Большинство производителей рекомендует использовать поликарбонатные пленочные конденсаторы в автомобильных приложениях. Наиболее известные производители конденсаторов этого типа — Kemet PN, Electronic Concepts Inc, American Capacitor Corporation, EFC Wesko.
- Полиэстер. Этот материал, вероятно, самый популярный в пленочных конденсаторах, во всяком случае для монтажа на плату. Полиэстер — другое название класса аналогичных полимеров на основе полиэтилена терефталата. Европейское название — миллар, PET, PETE или PETP. Высокий коэффициент рассеяния, особенно с ростом ча-

стоты, позволяет применять конденсаторы на основе полиэстера в цепях постоянного тока, в низкочастотных импульсных цепях с малым током или в источниках питания. Конденсаторы на основе полиэстера имеют высокий температурный дрейф, но их совместное подключение с конденсаторами на основе полипропилена позволяет выровнять температурную кривую. Конденсаторы этого типа имеют номиналы 1 нФ — 10 мкФ и выше (речь идет в основном о конденсаторах до 1000 В). Высокое тепловое сопротивление позволяет применять их для поверхностного монтажа. Наиболее известные производители конденсаторов на основе полиэстера — EFC Wesko, Richey, Southern Electronics Inc.

- Полипропилен. Конденсаторы на основе полипропилена (PP) являются самым распространенным типом пленочных конденсаторов. Они выпускаются в очень широком диапазоне размеров и рабочих напряжений и применяются во многих электрических цепях. PP имеет низкий коэффициент рассеяния во всем диапазоне рабочих температур и в широком диапазоне частот. Это позволяет применять данный тип конденсаторов в высокочастотных цепях и в цепях с высоким током нагрузки, например в импульсных источниках питания. Некоторые типы конденсаторов имеют рабочее напряжение выше 400 кВ переменного тока. Они предназначены для замены старых моделей электролитических и бумажно-масляных конденсаторов. Конденсаторы данного типа имеют номиналы емкостей 100 пФ — 10 мкФ. Малая утечка и низкий коэффициент диэлектрической абсорбции позволяют применять полипропиленовые конденсаторы в интегрирующих цепях и в цепях выборки и хранения. Влияние влажности незначительное. По температурному дрейфу они немногим превосходят конденсаторы на основе полиэстера, поэтому их эксплуатация ограничена температурой +105 °С и делает невозможным их применение для поверхностного монтажа. Наиболее известные производители конденсаторов на основе полипропилена — Susco, RTI Electronics, TSC Electronics, Suntan.

Интересно практическое количественное сравнение различных типов диэлектриков, данное в материалах фирмы Kemet [4] (табл. 1). Отметим, что в таблице сопротив-

ление изоляции представлено в виде постоянной времени саморазряда конденсатора (секунды) после минутного заряда напряжением 100 или 500 В, в зависимости от типа испытываемого конденсатора.

### Сильноточные и высоковольтные

Еще одно эксклюзивное свойство пленочных конденсаторов, не присущее другим видам, — так называемое управляемое самовосстановление после пробоя (self-healing). Оно определяется не только и не столько свойствами пленки, сколько уже в целом конструкцией конденсатора. Свойством самовосстановления обладают только металлизированные конденсаторы. Суть его заключается в том, что в случае пробоя диэлектрика (в силу разных причин) ток короткого замыкания локализуется в определенном месте диэлектрика, где возник дефект, уменьшивший сопротивление слоя изоляции. При этом плотность тока такова, что происходит испарение металлизированного слоя в локальной области на двух прилегающих обкладках конденсатора. Испарение металла изолирует проблемную область диэлектрика. Лавинного пробоя не происходит. Работоспособность восстанавливается. Этот процесс иллюстрирует рис. 4 из материалов фирмы Wima.

Как следует из данных производителя, локальные дефекты сопротивления изоляции чаще всего возникают в местах сгиба металлизированной пленки при формировании объема конденсатора вследствие механических напряжений. На рис. 5 представлена микрофотография участка пробоя.

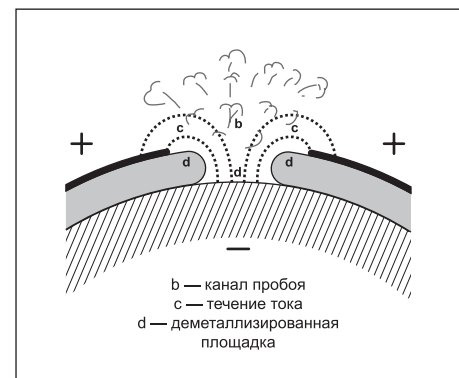


Рис. 4. Процесс управляемого самовосстановления (Wima)

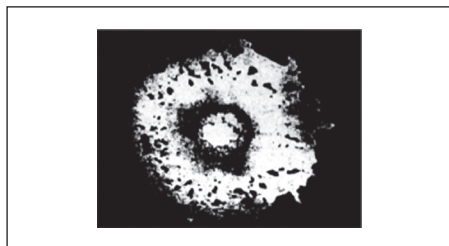


Рис. 5. Участок пробоя (Wima)

Надежная система самовосстановления создает своеобразный синергетический эффект, поскольку позволяет повысить энергетическую эффективность металлизированных конденсаторов за счет увеличения рабочей напряженности электрического поля.

Общепринятая практика рекомендует завершение эксплуатации конденсатора после изменения емкости более чем на 2% (из-за локальных пробоев). При этом понятно, что по достижении такой величины падения емкости конденсатор по-прежнему работоспособен и, следовательно, решение о продлении эксплуатации принимает техперсонал объекта. Такая возможность увеличивает выгоды применения пленочных конденсаторов.

Наличие эффекта самовосстановления в немалой степени способствовало использованию пленочных конденсаторов в высоковольтной, высоковольтной и импульсной технике. С ним же связано и количественное преобладание на рынке металлизированных конденсаторов по сравнению с фольговыми.

Однако необходимо отметить, что фольговые конденсаторы имеют достаточно устойчивую нишу применения. Это связано с некоторыми параметрами данных конденсаторов, которые лучше, чем у металлизированных. Так, именно из-за применения фольги, значительно более толстой, чем напыляемая пленка, снижается переходное сопротивление в области соединения обкладок с внешним выводом. Благодаря этому фольговые конденсаторы часто предпочтительнее металлизированных в импульсных устрой-

ствах. Вторым важным плюсом фольговых конденсаторов — низкий ток утечки неметаллизированной пленки.

Опять же для сравнения отметим, что фольговые конденсаторы не имеют процесса восстановления после пробоя в том виде, как это только что описано для металлизированных конденсаторов. Это связано с тем, что толщина фольги в фольговом конденсаторе может до 1000 раз превышать толщину металлической пленки в металлизированном конденсаторе. При пробое фольгового конденсатора утилизирующей в канал пробоя энергии недостаточно для испарения металла, именно из-за его толщины. Происходит сплавление двух обкладок конденсатора.

Тем не менее в фольговых конденсаторах также используются технологии самовосстановления. Примером тому может служить продукция немецкой фирмы Electronicon. Речь идет об их силовых высоковольтных косинусных конденсаторах [5]. Эти изделия выполнены по all-film-технологии и представляют собой набор однотипных спирально намотанных секций, помещенных в общий корпус и имеющих смешанное последовательно-параллельное соединение (рис. 6).

Как видно на рис. 6, каждая из параллельно включенных секций защищена плавкой вставкой, представляющей собой медную проволоку диаметром 0,25–0,35 мм. В случае пробоя с последующим коротким замыканием предохранитель отключает неисправную секцию. Конденсатор сохраняет работоспособность с потерей емкости в пределах 1,5–5%. На рис. 6 представлен пример того, как изменится емкость конденсатора в случае перегорания предохранителей в двух секциях изделия. Красной стрелкой показано снижение емкости и реактивной мощности.

Системы внутренней защиты в изделиях компании Electronicon отслеживают состояние конденсатора на протяжении всего жизненного цикла. Известно, что в конце срока службы при большом количестве самовосстанавливаемых пробоев в металлизированных конденсаторах или в результате

перегрузок по напряжению или температуре внутри корпуса конденсатора может возникнуть избыточное давление с возможностью катастрофического отказа. Защитой в таких случаях является предохранитель-прерыватель избыточного давления [6], используемый в сериях E62, E63, E65 (рис. 7).

Корпус конденсатора оснащен элементом защиты от повышенного давления. В качестве такового может работать либо гибкая крышка корпуса, либо зигованный желоб на корпусе изделия. Один из выводов конденсатора выполняется внутри корпуса в виде струны с ослабленным участком. При повышении давления и появлении выпуклости на крышке либо растяжении зиговки происходит обрыв проводника в месте тарированного ослабления.

Как мы уже убедились, пленочным конденсаторам в высокой степени свойственны технологии внутренней защиты и поддержания работоспособности.

Вкратце отметим основные исполнения выводных пленочных конденсаторов. В современной практике конденсаторы средней мощности чаще всего изготавливаются по сухой технологии (газонаполненные), а высокой мощности делают масломполненными. Для многих приложений используется заполнение корпуса конденсатора полиуретановыми смолами (твердый наполнитель). В качестве жидкого наполнителя наиболее часто применяется рапсовое масло. Применение наполнителей (кроме газа) позволяет повысить пробивное напряжение конденсатора, увеличить работоспособность при низких температурах, улучшить экологические параметры производства, эксплуатации и утилизации конденсаторов.

Необходимо обратить внимание на тот факт, что все перечисленные достоинства пленочных конденсаторов стимулируют замену электролитических конденсаторов пленочными. Процесс этот идет достаточно давно и замедляется только тем, что оксидные конденсаторы пока еще часто выигрывают в ценовом отношении (табл. 2).

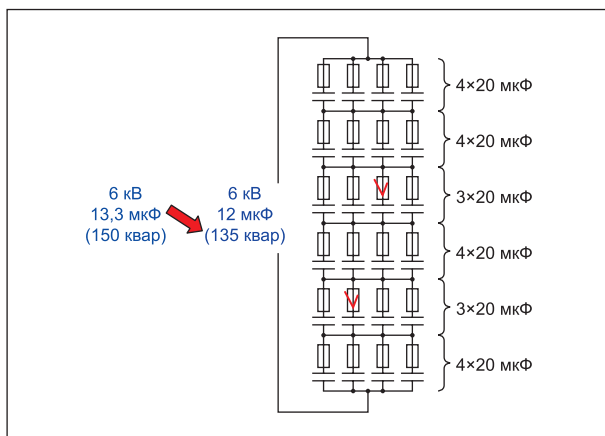


Рис. 6. Схема соединений высоковольтного конденсатора и принцип самовосстановления

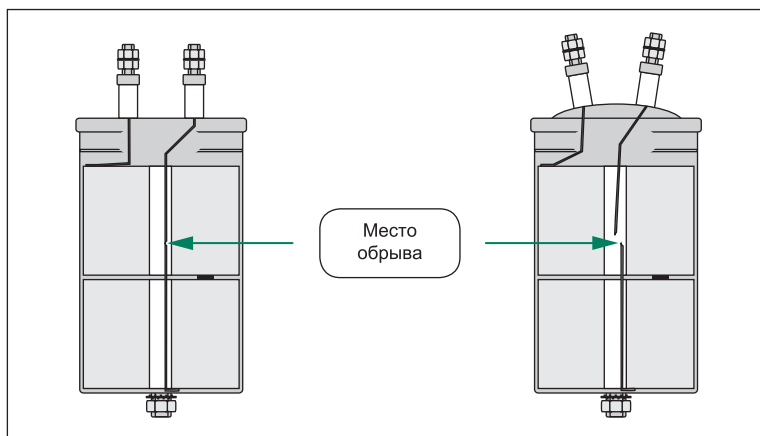


Рис. 7. Предохранитель-прерыватель (Electronicon)



Таблица 2. Сравнение основных параметров пленочных и оксидных конденсаторов [7]

Пленочные конденсаторы	Электролитические конденсаторы
Допускается двукратная перегрузка по напряжению	Максимальная перегрузка в 1,2 раза
Выдерживают броски обратного напряжения	Нет
Выдерживают быстрый разряд	Нет
Обеспечивают эффективный ток до ~1 Агмс/мкФ	Примерно в 40 раз меньше
Нет риска выбросов вредных веществ	Используется кислота
Высокая надежность	Средний срок службы меньше в 10 раз, чем у пленочных
В конце срока службы максимальное уменьшение емкости 5%. Можно использовать и после заявленного срока службы	Снижение емкости до 30%
Длительное хранение не влияет на характеристики	После длительного хранения необходимо их восстановление

### Заключение

В завершение разговора об органических полимерных конденсаторах отметим, что полимерные и основанные на сходных технологиях конденсаторы имеют широчайшую область, точнее, даже области применения. Граница разделения тут в основном проходит по типу корпуса. Чипированные изделия применяются в индустрии ВЧ, в то время как основная область применения выводных конденсаторов — это силовоточная техника. Силовые приводы электротранспорта, генераторы энергии, мощные импульсные устройства, источники питания, промышленные индукционные установки и сварка, мощные лазеры и силовоточная техника военного применения.

Основными производителями полимерных конденсаторов являются AVX и его подразделение TPC (Thomson Passive Component), Spectrum Advanced Specialty Products, Pilkor Electronics Co., Elpac Components, Wima, Eurofarad, Vishay Intertechnology, Seacor, Kemet, Faratronic Co. Ltd., Ixis, Cornell Dubilier, Epcos, TDK, JARO Components Ink., Electronicon Kondensatoren GmbH., Exxelia, Sprague-Goodman Electronics Inc., Electronic Concepts Inc., American Capacitor Corporation, EFC Wesko, Richey, Southern Electronics Inc., Susco, RTI Electronics, TSC Electronics, Suntan.

### Литература

1. Stratigos J. Capabilities of Multi-Layer Organic Packaging // Microwave Journal. 2007. September.
2. Menendez E. Dielectric Absorption of Multilayer Organic (MLO) Capacitors. US, AVX. 2014.
3. RF Passive Components Made Using Multi-Layer Organic Technology.
4. [www.kemet.com/Lists/ProductCatalog/Attachments/155/F9000\\_GenInfo\\_SMD.pdf](http://www.kemet.com/Lists/ProductCatalog/Attachments/155/F9000_GenInfo_SMD.pdf)
5. Шишкин С., Юшков А. Новое поколение косинусных конденсаторов среднего напряжения компании Electronicon // Силовая электроника. 2007. № 2.
6. [www.electronicon.com/fileadmin/inhalte/pdfs/produkte/leistungselektronik/allgemein/PEC\\_application\\_notes.pdf](http://www.electronicon.com/fileadmin/inhalte/pdfs/produkte/leistungselektronik/allgemein/PEC_application_notes.pdf)
7. Самойлова М. Пленочные конденсаторы AVX/TPC // Компоненты и технологии. 2007. № 5.