В статье пойдет речь о пленочных конденсаторах, это сокращенный технический перевод, но для тех, кто занимается силовой электроникой, эта информация может быть полезной. Ранее была статья-перевод [об интересных свойствах SMD конденсаторов](https://www.kondratev-v.ru/eto-prigoditsya/keramicheskie-kondensatory-smd-parametry.html). Данную статью на английском языке полностью без сокращений можно прочитать, пройдя по ссылке - [Статья в оригинале на английском языке](https://www.edn.com/film-capacitors-characteristics-and-uses-in-power-applications/#comments).

**РУДИ РАМОС**

Пленочные конденсаторы: характеристики и применение в энергетике

Инженеры, проектирующие силовую электронику, обнаруживают, что конденсаторы необходимы для нескольких функций, от хранения энергии до фильтров и развязки. Доступны различные типы конденсаторов, которые на первый взгляд могут показаться эквивалентными по своим номинальным характеристикам емкости и напряжения, но не будут одинаково работать.

Неправильный выбор может привести в лучшем случае к дорогостоящему перепроектированию устройства, а в худшем - к ненадежному или небезопасному продукту

В этой статье описываются различные типы конденсаторов, которые могут быть рассмотрены для использования в схемах силовой электроники. В частности, сравниваются электролитический (Al-электролитик) и пленочный типы, показывающие, как и когда каждый из них играет свою роль. Разнообразие типов пленок и их конструкция описаны более подробно, а также определены предпочтительные типы. Подробно рассматриваются характеристики емкости, номинального тока пульсаций, переходных напряжений и безопасности, а также другие характеристики. Обсуждается феномен “самовосстановления " после напряжения пробоя, объясняющий его физический механизм и значение, которое он придает в типичных схемах. Трудно представить себе современную электронику, которая не включала бы в себя конденсаторы какого-либо типа. Они могут быть маленькими типами поверхностного монтажа в сотовых телефонах, например, но они все еще существуют. В силовой электронике на них возложены функции фильтрации, обработки и передачи энергии, объемы конденсаторов могут быть измерены в кубических дюймах. В этом приложении иногда существует кажущийся выбор между алюминиевым (Al) электролитическим и пленочным типами, но с точки зрения плотности накопленной энергии, Al-электролитика в некоторых отношениях впереди. Al-электролитики имеют относительно плохую репутацию по долговечности и надежности. При соответствующем облегченном режиме - снижении напряжения, пульсирующего тока и температуры они могут прослужить много лет. Их низкая стоимость при заданной мощности- напряжении (CV) является, существенным фактором. Это означает, что они являются предпочтением для больших объемов хранения энергии, таких как внутренняя высоковольтная шина постоянного тока товарных источников питания переменного и постоянного тока.

**Пленочные конденсаторы имеют свое место в силовой электронике**

Типы пленочных конденсаторов, безусловно, имеют некоторые преимущества перед их Al- электролитическими родственниками; они могут иметь гораздо более низкое эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) для той же оценки CV, что дает им, как правило, гораздо лучшие оценки пульсаций тока. Они также относительно более устойчивы к перенапряжению и в некоторых случаях могут "самовосстанавливаться" после определенной степени выхода из строя, повышая надежность и срок службы системы. Когда происходит локализованный пробой, в теле пленочного конденсатора образуется короткое замыкание, но возникает плазменная дуга, которая в точке пробоя испаряет часть обкладки, чтобы устранить КЗ. Однако это работает только в пределах определенных напряжений; катастрофический отказ все еще может произойти из-за осаждения углерода и сопутствующего повреждения диэлектрической изоляции. На практике Al- электролитика может выдерживать обычно только 20% перенапряжения напряжения, в то время как показатель для пленочных типов может быть 100% в течение ограниченного времени. Разница в режиме отказа также значительна; Al-электролитика часто после перенапряжения взрывается, вызывая разброс жидкого электролита и повреждение других компонентов.

Действительно, теоретические показатели отказов для Al-электролитических и пленочных типов могут быть сопоставимы, но в реальных приложениях со случайными напряжениями, например, от индуктивных нагрузок или ударов молнии, надежность системы может быть совершенно разной между двумя технологиями. Деградация из-за влажности является проблемой для пленочных конденсаторов, но это общее с другими компонентами, поэтому должно контролироваться для лучшей надежности.

Когда накопление энергии не является основным параметром, пленочные конденсаторы могут быть высокоэффективным решением. Примером может служить шина постоянного тока с батарейным питанием, которую вы видите в электромобилях, системах альтернативной энергетики и источниках бесперебойного питания. В этих приложениях основной функцией конденсатора является источник и приемник высокочастотного пульсирующего тока, который может быть измерен в сотнях или тысячах ампер, где низкий ESR конденсатора жизненно важен для достижения низких потерь и низкого напряжения пульсаций.

Переход к более высоким напряжениям шины также благоприятствует типам пленочных конденсаторов, та же энергия хранится с меньшими значениями CV при высоком напряжении (из-за "квадрата" в E=CV²/2)таким образом, требуется меньшая емкость. Al-электролитики ограничены своей технологией примерно до 550 В, и хотя они могут быть сложены для более высокого напряжения, им присущ высокий и переменный ток утечки, требующий параллельных балансировочных резисторов с соответствующими затратами и потерями. Мы обсуждали режим короткого замыкания в Al-электролитике; при последовательном отказе один из них будет передавать высокое напряжение на другие с лавиной последовательных повреждений.

В отличие от Al- электролитов, пленочные типы неполярны, они могут спокойно работать при любой полярности приложенного напряжения. Это также значит, что они идеально подходят для применения, где имеется напряжение тока AC, для фильтрации выхода инвертора.

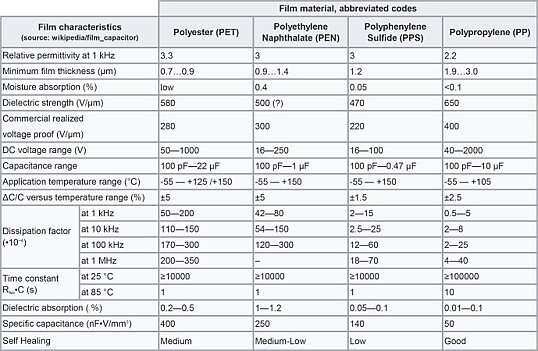
Мы говорили о "пленочных" конденсаторах в целом, но есть много подтипов с различной производительностью и приложениями. В таблице1 [1] приведены основные характеристики некоторых типов, которые могут быть использованы в силовой электронике.

Рисунок 1 Характеристики пленочного конденсатора

Среди эксплуатационных характеристик полипропилен является хорошим соперником для силовых применений, благодаря своему широкому диапазону напряжений и емкостей, а также хорошим характеристикам самовосстановления. Важен также особенно низкий показатель коэффициента диссипации (Диссипация энергии (лат. dissipatio — рассеяние) — переход части энергии упорядоченных процессов (кинетической энергии движущегося тела, энергии электрического тока и т. п.) в энергию неупорядоченных процессов, в конечном счёте — в теплоту.)(DF) на всех частотах; DF-это отношение ESR к емкостному реактивному сопротивлению ZC = 1/2 NFC. Низкая цифра подразумевает более низкие тепловые эффекты по сравнению с другими диэлектриками и является способом сравнения потерь на микрофараду емкости в разных типах конденсаторов. Как правило, DF немного зависит от температуры и частоты, но полипропилен лучше всего работает в сравнении, см. Рисунок 2 для графиков.

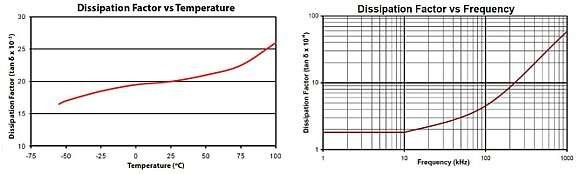


Рис. 2 типичное изменение коэффициента рассеяния с температурой и частотой для полипропиленовой пленки (источник: Cornell Dubilier)

Для менее критичных применений в энергетике полиэстер может быть отличным недорогим выбором благодаря своей высокой удельной емкости (CV на объем) и широкому температурному диапазону.

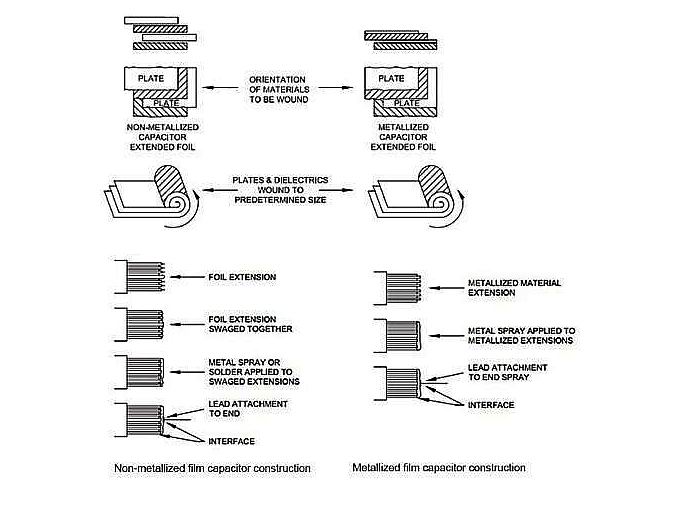


Рис. 3. методы изготовления пленочных конденсаторов

Рассматривая теперь полипропиленовые конденсаторы более подробно, можно выделить две основные конструкции—металлическую фольгу и напыление металла (Рис. 3 ), взятые из справки [2].

В первом случае металлическая фольга толщиной около 5 микрон зажата между слоями диэлектрика и дает высокую пиковую токовую способность, но не самовосстанавливается. В металлизированной пленочной конструкции алюминий, а иногда и цинк или цинковый сплав при температуре около 1200°C осаждаются на полипропиленовую пленку под вакуумом толщиной примерно от 20 до 50 нм. Во время осаждения пленка выдерживается при низкой температуре, обычно от -25°С до -35°С. В этом процессе включается самосцеление. При использовании локализованный пробой вызывает интенсивный нагрев, возможно, до 6000°C, что приводит к образованию плазменной дуги. Это локально испаряет металлизацию, а быстрое расширение плазмы гасит дугу, изолируя дефектную область в пределах примерно 10 мкс и позволяя конденсатору продолжать функционировать. Некоторая емкость теряется, но эффект минимален, и его можно воспринимать как старение компонента, если следить за ним с течением времени.

Металлизация иногда сегментируется на участки на пленке, возможно, миллионы, с узкими "воротами", подающими ток в сегменты и выступающими в качестве предохранителей для больших перегрузок. Обработка пикового тока немного уменьшается за счет сужения общего пути прохождения тока, но дополнительный запас прочности, введенный, следовательно, позволяет конденсатору быть рассчитанным на более высокое напряжение.

В некоторых конденсаторах конструкция из фольги и металлизации комбинируется, чтобы обеспечить компромисс между обработкой пикового тока и самовосстановлением. Металлизация также может быть градуирована от края конденсатора так, чтобы более толстый материал по краям давал лучшую обработку тока и более надежное окончание пайкой или сваркой.

**Эффекты частичного разряда**

Используемая полипропиленовая пленка имеет диэлектрическую прочность около650В/мкм при толщинах около 2 мкм, поэтому легко получить номинальное напряжение прибора несколько кВ с деталями, доступными при 100кв. Однако есть эффект, который вступает в игру с очень высокими напряжениями – частичный разряд или "PD". Иногда называют "короной", это пробой микропустот в объеме диэлектрического материала или воздушные зазоры между изолирующими слоями.

Пропитка высоковольтных конденсаторов маслом помогает с ПД, вытесняя воздух с его более низким порогом пробоя из интерфейсов изоляции. Заполненные смолой низковольтные конденсаторы также помогают в этом отношении и дополнительно повышают механическую прочность.

PD - это эффект, вызванный напряженностью электрического поля кв/мм, поэтому более толстый диэлектрический материал менее восприимчив, но за счет компонентов большего размера при той же величине CV. Конденсаторы могут быть соединены последовательно так, чтобы по отдельности на них падало более низкое напряжение, ниже начальной точки PD, но могут нуждаться в балансировочных резисторах. Иногда высоковольтные конденсаторы формируются из последовательных элементов в одном корпусе, чтобы избежать PD.

**Пленочные конденсаторы в качестве демпферов**

Еще одно ценное применение конденсаторов в силовых преобразователях заключается в "подавлении", преднамеренном замедлении коммутационных сигналов (демпфировании)для уменьшения электромагнитных помех и напряжения полупроводников (рис. 4 ). Здесь важным соображением является способность конденсатора выдерживать высокий dV/dt или скорость изменения напряжения, которая может толкать высокие среднеквадратические токи в компонент. Опять же, полипропилен является хорошим выбором, особенно когда металлизация двусторонняя и изготавливается в сочетании с металлической фольгой, чтобы принимать большие токи. Конденсаторы, предназначенные для применения, как правило, также имеют очень низкую индуктивность для низкого сопротивления переменному току, а высокое напряжение выдерживает запас, чтобы справиться с иногда неопределенными пиковыми напряжениями.

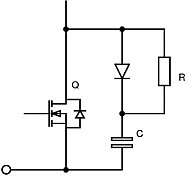


Рис. 4 пленочный конденсатор с в сети демпфера

**Пленочные конденсаторы в качестве силовых фильтров**

Хотя фильтрация часто рассматривается как функция уровня сигнала, в инверторах и моторных приводах, в частности, выходные конденсаторы пропускают высокие импульсные токи, чтобы предотвратить высокие уровни dV/dt на кабелях, вызывающие перенапряжения и EMI (Electro Magnetic Interference, EMI – электромагнитные помехи)

(рис.7). Поскольку переменный ток передается на нагрузку, конденсаторы должны быть неполяризованными, во всяком случае, исключая использование Al-электролитов. Среда применения часто бывает суровой, и для этого необходимы надежность, пульсация и объемная эффективность полипропиленовых конденсаторов.

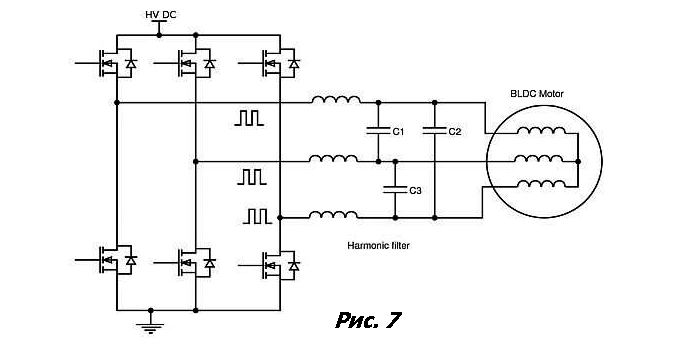


Рисунок 7 пленочные конденсаторы в двигателе привода фильтрация EMI

**Фильтры EMI**

Пленочные конденсаторы широко используются в фильтрах EMI линии электропередачи, не столько для снижения пульсаций тока, сколько из-за их самовосстанавливающегося свойства с переходными процессами напряжения (рис. 8).Полипропиленовые конденсаторы с рейтингом безопасности обычно оцениваются как " X1 " или "X2", когда они поперек линии выдерживают 4 кВ и 2,5 кв соответственно, и могут иметь значение в несколько МКФ, чтобы соответствовать стандартам EMI. Конденсаторы от линии к земле для ослабления синфазных излучений относятся к типам " Y1 " и "Y2", рассчитанным на напряжение 8 кв и 5 кв, но их значение ограничено соображениями тока утечки в линии. В этих приложениях фильтрации электромагнитных помех низкая самоиндуктивность типичных пленочных конденсаторов является преимуществом, поддерживающим высокие саморезонансы.

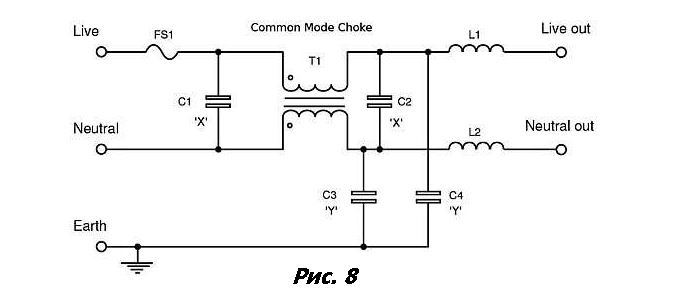


Рис. 8 Типичный сетевой фильтр с пленочными конденсаторами "X ‘и "Y"

Пленочные конденсаторы в силовой электронике находят множество применений и преуспевают, когда требуются высокие показатели значения пульсаций тока или когда в системах возникают перенапряжения, особенно ценны полипропиленовые типы. При сравнении CV-оценок пленочных и алюминиевых электролитов более глубокий анализ показывает, что, хотя Al-электролитические типы выигрывают из-за простых соображений хранения энергии, практический выбор компонентов должен включать оценку пульсационного тока и соображения надежности, когда пленка часто будет лучшим выбором.

Рекомендации

1 [Пленочный конденсатор](https://en.wikipedia.org/wiki/film-capacitor)

2 [Конденсаторы для коммутации фильтров регуляторов](https://www.electrocube.com/details/capacitors-for-switching-regulators-filters)