КОНДЕНСАТОРЫ ДЛЯ СИЛОВОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ.

СРАВНЕНИЕ ПЛЕНОЧНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ С ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКИМИ

АЛЕКСЕЙ ЧИСТЯКОВ, инженер

В статье рассматриваются особенности конструкции и основные характеристики пленочных конденсаторов. Приводятся области использования пленочных и электролитических конденсаторов. Показано, что алюминиевые электролитические конденсаторы предпочтительно использовать в схемах, где требуется запасать энергию, а пленочные конденсаторы успешнее справляются с задачами в сильноточных и высоковольтных цепях.

Конденсаторы в схемах силовой электроники, как правило, выполняют две функции. Первая из них состоит в сглаживании пульсаций напряжения, а вторая – в фильтрации помех для обеспечения электромагнитной совместимости. Причем, в последнем случае задача разделяется на две подзадачи. Для решения одной из них конденсаторы используются в сетевых помехоподавляющих фильтрах, а для решения другой от конденсаторов требуется «умение» подавлять помехи и всплески напряжения длительнос тью от десятков наносекунд до нескольких микросекунд, вызванные процессами коммутации силовых ключей.

В настоящей статье акцент сделан на конденсаторах, используемых для сглаживания напряжения. Мы рассмотрим, в основном, пленочные конденсаторы, сравним их с алюминиевыми электролитическими конденсаторами и постараемся определить границы применения каждого типа.

Бесспорным преимуществом алюминиевых электролитических конденсаторов является высокая удельная емкость на единицу объема – по этому показателю они превосходят конденсаторы всех других типов. К сожалению, у электролитических конденсаторов немало и недостатков: срок их службы заметно зависит от температуры, у них большое эквивалентное последовательное сопротивление (ESR), что приводит к саморазогреву от токов пульсаций. Кроме того, у них плохие частотные свойства. Перечисленные недостатки электролитических конденсаторов можно в какой-то степени компенсировать за счет корректного их выбора для конкретных приложений, но полностью от них избавиться не удается, что и дает шанс пленочным конденсаторам.

Пленочные конденсаторы имеют меньшую плотность емкость, чем электролитические, но у них заметно меньше ESR при том же значении произведения CV (C – емкость конденсатора, V – номинальное напряжение конденсатора, указанное изготовителем), что позволяет увеличить допустимый ток пульсаций. Пленочные конденсаторы более терпимы к всплескам перенапряжения.

Конденсаторы этого типа в течение ограниченного интервала времени выдерживают перегрузку по напряжению до 100%, в то время как для алюминиевых электролитических конденсаторов перенапряжение, как правило, не должно превышать 20%. В промышленном оборудовании перенапряжение – не редкость: оно может возникать при разрядах молнии и коммутации мощных токоприемников.

Таблица. **Основные параметры пленочных конденсаторов разных типов**

Параметр		Полиэфирные (PET)	Полипропилен-нафталатовые (PEN)	Полипропилен-сульфидные	Полипропи-леновые (PP)
Относительная диэлектрическая проницаемость при частоте 1 кГц		3,3	3	3	2,2
Толщина пленки (мин.), мкм		0,7–0,9	0,9–1,4	1,2	1,9–3,0
Влагопоглощение, %		низкое	0,4	0,05	менее 0,1
Напряженность поля пробоя, В/мкм		580	500	230	400
Рабочие напряжения постоянного тока (ном.), В		50–1000	16–250	16–100	40–2000
Емкость		100 пФ…22 мкФ	100 пФ…1 мкФ	100 пФ…0,47 мкФ	100 пФ…10 мкФ
Диапазон рабочей температуры, °C		–55…125/150	–55…150	–55…150	–55…150
Изменение емкости в диапазоне рабочей температуры, %		±5	±5	±1,5	±2,5
Фактор рассеивания мощности (коэффициент потерь) (10^{-6})	1 кГц	50–200	42–80	2–15	0,5–5
	10 кГц	110–150	54–150	2,5–25	2–8
	100 кГц	170–300	120–300	12–60	2–25
	1 МГц	200–350	–	18–70	4–40
Постоянная времени RC, с	25°C	более 10 тыс.	более 10 тыс.	более 10 тыс.	более 100 тыс.
	85°C				
Остаточная поляризация (диэлектрическая абсорбция)		0,2–0,5	1–1,2	0,05–1	0,01–0,1
Способность к самовосстановлению		средняя	средняя–низкая	низкая	высокая

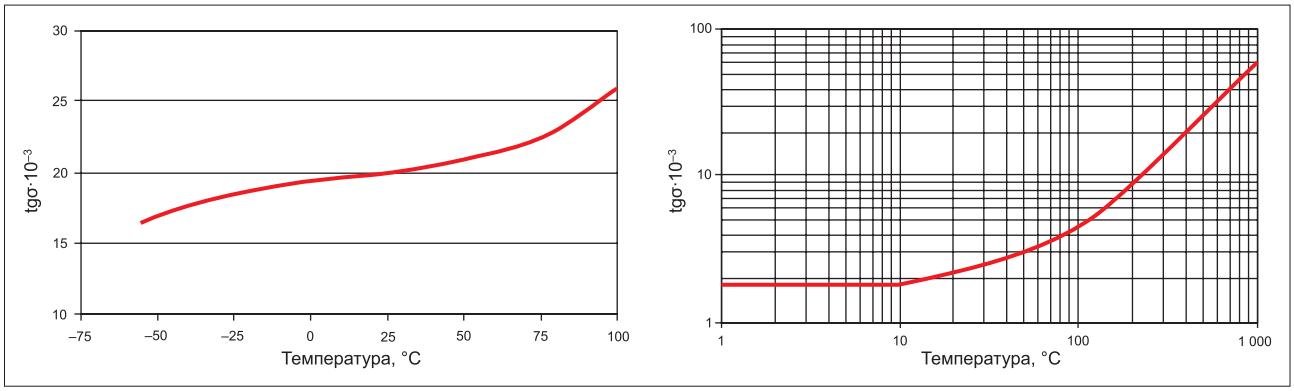

Рис. 1. **Зависимость коэффициента рассеяния DF от температуры и частоты**

Если накопление энергии не является главной задачей, то пленочные конденсаторы выигрывают у электролитических. Например, на низковольтной шине постоянного тока требуется устанавливать конденсаторы, способные пропускать ток пульсаций величиной в сотни, а иногда и тысячи ампер. В этом случае низкое значение ESR является ключевым параметром.

Кроме того, пленочные конденсаторы хорошо подходят для применения в высоковольтном оборудовании. Их максимально допустимое напряжение достигает нескольких тысяч вольт, тогда как для электролитических конденсаторов этот показатель ограничен в пределах 500–550 В. С помощью последовательного соединения конденсаторов можно увеличить указанный диапазон, но при этом уменьшится эквивалентная емкость соединения, да и выравнивание напряжения на последовательно соединенных конденсаторах едва ли можно назвать легкой задачей.

Ну и, конечно, еще одним несомненным преимуществом пленочных конденсаторов над электролитическими является их неполярность, т. е. они могут работать в цепи переменного тока. В таблице приведены основные параметры различных типов пленочных конденсаторов.

Не менее важным для конденсаторов, работающих в силовых цепях, является фактор рассеивания мощности DF (коэффициент потерь). Чем меньше этот коэффициент, тем меньше потери мощности, и соответственно, меньше нагрев. Напомним формулу (1) для вычисления DF:

$$DF = ESR/XC = tg\sigma, \quad (1)$$

где XC – емкостное сопротивление конденсатора равное 1/(2πfC).

На рисунке 1 показана зависимость коэффициента рассеяния DF от температуры и частоты. Как видно из рисунка, эта зависимость невелика. Заметим, что коэффициент рассеяния DF у пленочных конденсаторов существенно ниже, чем у электролитических.

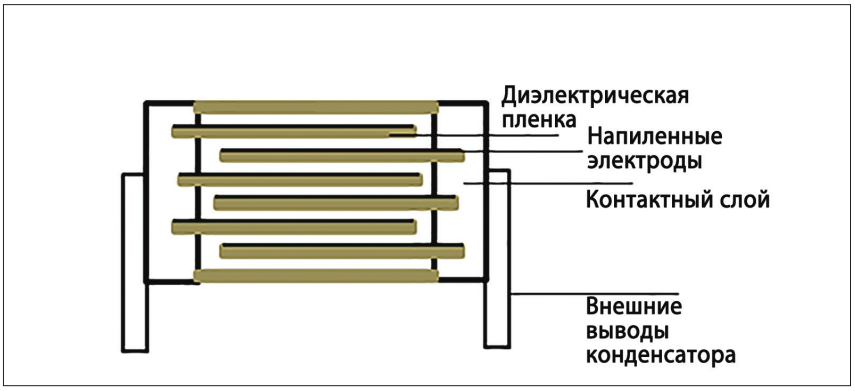

Рис. 2. **Устройство пленочного конденсатора**

На рисунке 2 схематично показано устройство пленочного конденсатора. При их производстве применяются две технологии. В первой из них используется металлизированная фольга, а во второй – напыление металлов. В первой технологии металлическую фольгу толщиной 5 мкм, играющую роль обкладки конденсаторов, помещают между слоями диэлектриков. Вторая технология предполагает напыление алюминия, цинка или сплавов цинка, разогретых примерно до 1200°C, на полипропиленовую пленку толщиной 20–50 нм.

При использовании металлической фольги обеспечиваются высокие значения допустимых токов, но в таких конденсаторах отсутствует или крайне слабо проявляется эффект самовосстановления. У конденсаторов, изготовленных путем напыления металлов, имеется способность самовосстанавливаться после некоторых аварийных ситуаций, что повышает надежность системы в целом. При пробое такого конденсатора возникает электрическая дуга, причем температура в месте пробоя может достигать 6000°C. В этом случае металл испаряется в течение примерно 10 мкс, благодаря чему исчезает проводящий тракт и восстанавливается диэлектрическая прочность поврежденного участка. После процесса самовосстановления может немного уменьшиться емкость конденсатора.

Иногда область металлизации разбивается на множество участков (вплоть до нескольких миллионов), которые соединяются между собой узкими проводниками, играющими роль предохранителей. В этом случае несколько уменьшается максимально допустимый ток, но увеличивается запас прочности, позволяющий повысить допустимое напряжение. Иногда совмещают обе технологии изготовления для получения компромиссных характеристик между максимальным пиковым током и способностью к самовосстановлению.

Приведем несколько примеров использования конденсаторов. На рисунке 3 показана типичная топология системы питания. Рассмотрим случай, когда конденсатор C1 используется для накопления энергии. Допустим, мощность DC/DC-преобразователя составляет P = 1 кВт, а его КПД = 0,9. При этом требуется, чтобы при пропадании входного напряжения в течение t = 20 мс (один период питающего напряжения) величина напряжения на конденсаторе не стала бы менее 300 В. В таком случае емкость конденсатора C1 можно определить из выражения (2):

$$P \cdot t/КПД = C \cdot (V_N^2 - V_D^2)/2, \quad (2)$$

где V_N = 400 В – начальное напряжение конденсатора C1; V_D = 300 В – конечное напряжение конденсатора в момент времени t = 20 мс.

Подставляя принятые в примере значения, получим C = 654 мкФ. При этом номинальное напряжение конденсатора должно составить 450 В. В ассортименте

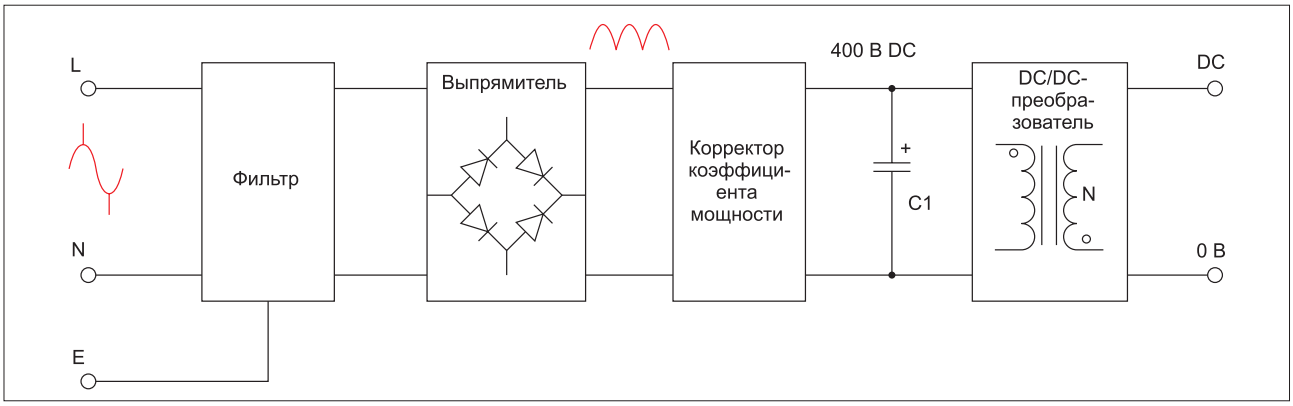

Рис. 3. **Типичная топология системы питания**

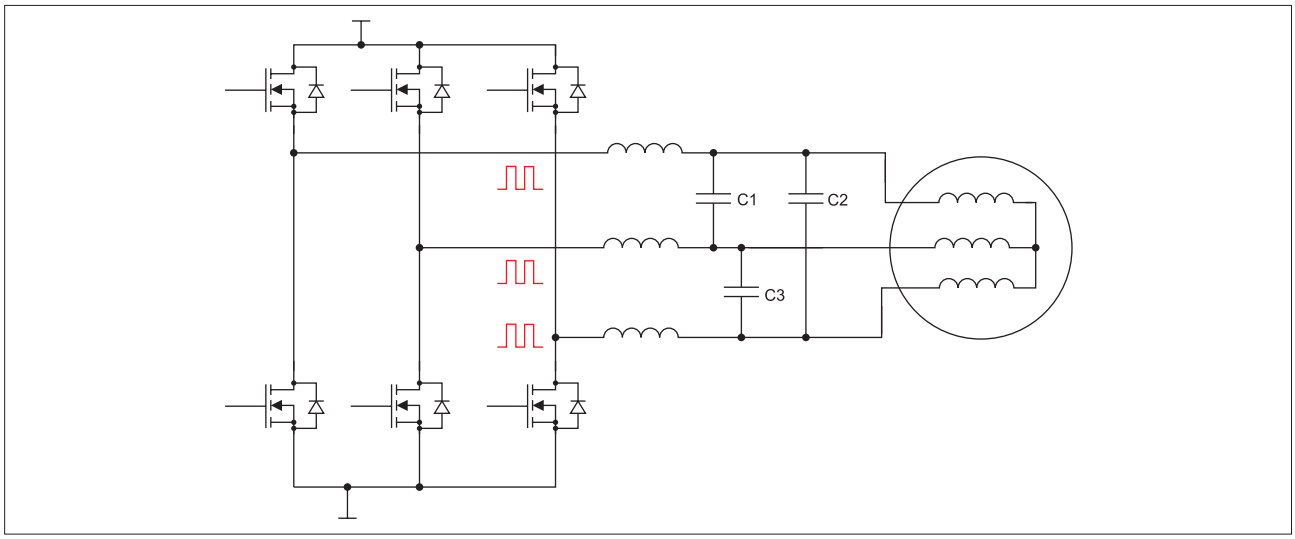

Рис. 4. **Использование пленочных конденсаторов в цепи переменного тока на выходе инвертора**

известных производителей, выпускающих оба типа конденсаторов, например компании TDK, имеется электролитический конденсатор B43508, который вполне удовлетворяет предъявленным требованиям: его емкость составляет 680 мкФ, и он рассчитан на напряжение 450 В.

Эта же компания производит пленочные конденсаторы серии B32678. Их максимальная емкость с нормированным напряжением составляет 180 мкФ. Таким образом, если мы выберем этот конденсатор, нам потребуется соединить четыре компонента параллельно. Разумеется, это решение не является удовлетворительным – оно не экономично и его габариты велики. Следовательно, в данном случае счет 1:0 в пользу электролитических конденсаторов.

Рассмотрим еще один пример системы питания, но большей мощности. В тяговых системах также используется шина питания 400 В, но конденсатор C1 в таком случае предназначен только для сглаживания пульсаций. Допустим, требуется, чтобы пульсации не превышали 4 В при среднеквадратичном значении токе пульсации 80 А и частоте пульсаций f = 20 кГц. Тогда емкость конденсаторов вычисляется из (3):

$$C = I_{СКЗ}/(2\pi f V_{П}) = 160\ мкФ. \quad (3)$$

Максимально допустимый ток пульсаций электролитического конденсатора равен примерно 3,5 А (используем известное эмпирическое правило для электролитических конденсаторов: 20 мА/мкФ). Таким образом, потребуется примерно 23 электролитических конденсатора, включенных параллельно. В то же время с этой же задачей способен справиться один-единственный пленочный конденсатор серии B32678. В данном случае бесспорное преимущество уже не на стороне электролитического компонента, и счет становится 1:1. Следует добавить, что из-за меньшего ESR и коэффициента потерь DF полипропиленового конденсатора уменьшится и рассеяние тепла.

Мы привели этот простой пример с единственной целью – показать, что нельзя однозначно вынести суждение о том, какой из рассмотренных конденсаторов лучше или хуже: каждый из них хорош в разных условиях. Для подтверждения этой «умной мысли» бросим на чашу весов еще экономические соображения.

В [1] приводятся следующие данные по конденсаторам, рассмотренным в примере выше. Удельная стоимость энергоемкости алюминиевого электролитического конденсатора составляет 0,47 долл./Дж, а у пленочного конденсатора этот показатель заметно больше и достигает 3 долл./Дж. Однако если обратиться к удельным показателям на единицу пульсирующего тока, то ситуация изменится на противоположную: удельная стоимость электролитических конденсаторов составит 2,68 долл./А, а пленочных – 0,42 долл./А.

Приведем пример использования пленочных конденсаторов, в котором проявляется их другая сильная сторона – неполярность. На рисунке 4 показано типовое использование этих компонентов в цепи переменного тока на выходе инвертора. Неполярные конденсаторы других типов проигрывают пленочным в данном случае практически по всем параметрам.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rudy Ramos. Film capacitors: Characteristics and uses in power applications//www.edn.com.