

Российская силовая электроника:

разворот на Восток и доступная функциональность.

Часть 4. AnXon

В предыдущих публикациях серии мы рассказывали о ведущих китайских производителях активных элементов, лежащих в основе современных преобразовательных устройств: IGBT-модулей и драйверов затворов [1–3]. Не менее важными компонентами силовых преобразователей являются конденсаторы, используемые в звене постоянного тока, АС-фильтрах, снабберных цепях. Силовые конденсаторы не только продукт высоких технологий — они вносят существенный вклад в стоимость подобной техники и во многом определяют ее надежность.

Кевин Ли (Kevin Lee)*

sales@anxoncap.com

Денис Новоторженцев

info@unirec.ru

Андрей Колпаков

info@unirec.ru

Знакомьтесь: Cixi AnXon Electronic

Cixi AnXon Electronic Co., Ltd — частное совместное предприятие, выпускающее высокотехнологичные электронные компоненты под брендами AnXon, AXC, RF PARTS & AOGE. В 2010 году в состав AnXon вошла компания Max Capacitor, имеющая 20-летний опыт производства высоковольтных керамических и RF силовых керамических конденсаторов. Продукция Max Capacitor признана покупателями в США, Испании, Великобритании, Швейцарии, Германии, Корее, Индии и других странах.

В настоящее время AnXon входит в десятку крупнейших поставщиков пленочных и алюминиевых

электролитических конденсаторов, керамических и танталовых конденсаторов, суперконденсаторов, вакуумных конденсаторов и других пассивных компонентов для силовой электроники. Научные исследования и передовые разработки позволяют компании создавать высокопроизводительные приборы как в стандартном каталожном исполнении, так и на заказ. В частности, у AnXon можно получить аналоги компонентов ведущих мировых производителей (Electronicon, TDK-Epcos, Hitachi и др.).

Компания ведет постоянную исследовательскую деятельность и вкладывает значительные средства в новые разработки, что гарантирует высокое качество выпускаемых изделий и соответствие их тех-

* Cixi AnXon Electronic





Рис. 2. Области применения силовых конденсаторов AnXon: электротранспорт, альтернативная энергетика, моторные приводы и многое другое

нических характеристик самым жестким современным требованиям. Продукция AnXon сертифицирована по стандартам ISO 9001, ISO 14001, IATF16949, она широко используется в моторных приводах, ветро- и солнечной энергетике, зарядных станциях электромобилей, системах хранения и передачи энергии. Основные группы элементов, изготавливаемых AnXon, а также области их применения представлены на рис. 1 и 2.

Немного теории

Развитие технологии высоковольтных пленочных конденсаторов (ПК) связано с активным внедрением электронных преобразовательных устройств во многие отрасли промышленности. Этот процесс начался в 1990-е годы с появлением силовых IGBT-

модулей, применение которых позволило резко повысить эффективность силовых конвертеров, снизить их массогабаритные показатели и стоимость.

Алюминиевые электролитические конденсаторы (ЭК) долгое время не имели альтернативы в подобных системах благодаря высокой удельной емкости. Этот показатель и сейчас делает применение ЭК оптимальным при определенных условиях (рис. 3). Причем их известные недостатки, такие как малый допустимый ток пульсаций и необходимость последовательного соединения в высоковольтных схемах, привели к тому, что звено постоянного тока (DC-шина) стало узлом, во многом определяющим надежность, вес, габариты и стоимость преобразовательного устройства. Именно поэтому ведущие производители конденсаторов непрерывно вели поиск альтернативных ре-

шений, в результате чего появилась пленочная технология МКР, позволившая создать достойную альтернативу ЭК.

Напомним, какие разновидности конденсаторов используются в силовой электронике и каковы их наиболее важные параметры:

- Снабберные (демпфирующие) конденсаторы (damping, snubber capacitors) — предназначены для ограничения импульсных перенапряжений, возникающих при переключении силовых транзисторов из-за наличия паразитных индуктивностей шин питания. Емкость снаббера C_s выбирают на основе заданного уровня перенапряжения ΔV при известной величине распределенной индуктивности L_B и тока коммутации I : $C_s = L_B \times I^2 / \Delta V$.
- Сглаживающие конденсаторы (smoothing capacitors) — используются для уменьшения уровня пульсаций в шинах питания.
- Накопительные конденсаторы (supporting, intermediate circuit capacitors) — применяются для накопления энергии в промежуточных цепях постоянного тока многофазных приводов и импульсных преобразователей. Они работают в условиях высоких импульсных кратковременных токов, пиковое значение которых намного превышает среднеквадратичное.
- Фильтрующие конденсаторы (AC filter capacitors) — используются в выходных LC-цепях для формирования синусоидального напряжения, работают в условиях высоких импульсных токов; выпускаются одно- и трехфазные версии.

Основные параметры по стандарту IEC 1071

- Номинальное напряжение (rated voltage) U_N — максимальное рабочее напряжение постоянного тока в длительном режиме эксплуатации.

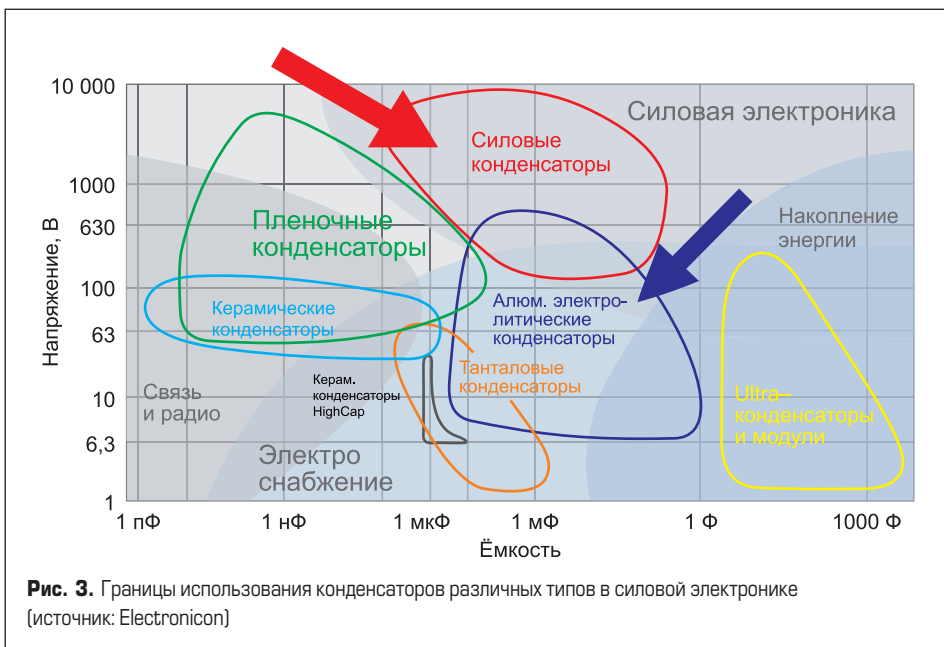


Рис. 3. Границы использования конденсаторов различных типов в силовой электронике (источник: Electronicon)

- Неповторяющееся напряжение перегрузки (non-repetitive surge voltage) U_S — однократное напряжение, которое конденсатор может выдержать без пробоя (макс. длительность 50 мс, макс. количество импульсов в течение срока службы — 1000).
- Максимальный рабочий ток I_{max} — максимально допустимое среднее квадратичное значение тока в режиме постоянной эксплуатации. Данное значение обычно приводится в технических спецификациях и определяет предельную мощность, рассеиваемую конденсатором.
- Пиковый ток \hat{I} — допустимая амплитуда тока в повторяющемся режиме, может определяться по допустимой скорости нарастания напряжения dv/dt : $\hat{I} = C \times dv/dt$.
- Неповторяющийся ток перегрузки (non-repetitive surge current) I_S — пиковое значение однократного тока, которое конденсатор может выдержать без повреждения (макс. длительность 50 мс, макс. количество импульсов тока в течение срока службы — 1000).
- Эквивалентное последовательное сопротивление (Equivalent Series Resistor) ESR, или R_S — эквивалентное сопротивление конденсатора, определяющее потери мощности $P = I_{rms}^2 \times R_S$.
- Тангенс угла потерь $\tan\delta$ — параметр, определяющий соотношение между активной и реактивной мощностью конденсатора $P = U \times I \times \tan\delta$. Он зависит от свойств диэлектрика на рабочей частоте.
- Максимальная допустимая рассеиваемая мощность $P_{max} = (T_{hs} - T_a)/R_{th}$ определяется максимальной температурой самой нагретой точки конденсатора T_{hs} , температурой окружающей среды T_a и тепловым сопротивлением конденсатора R_{th} .
- Минимальная и максимальная рабочая температура T_{min} , T_{max} .
- Напряжение изоляции U_{is} — максимальное среднее квадратичное значение переменного напряжения между корпусом конденсатора и его выводами. Если этот параметр не приводится в технических характеристиках, то он определяется как $U_{is} = U_N/\sqrt{2}$.
- Контрольное напряжение изоляции U_{BG} — максимальное допустимое напряжение переменного тока между корпусом конденсатора и его закороченными выводами при комнатной температуре, в отличие от предыдущего параметра, напряжение U_{BG} может проверяться многократно в течение срока службы.

Конструкция МКР-конденсаторов

Основным элементом МКР-конденсаторов является полимерная пленка, на которую в вакууме напыляется тонкий цинко-алюминиевый слой. Торцевые контактные зоны секции также металлизуются методом напыления (рис. 4). Такая технология гарантирует хорошую стабильность параметров в течение длительного срока службы, обеспечивает низкое значение индуктивности выводов и высокую плотность тока.

Корпус конденсатора с крепежным болтом изготавливается из прессованного алюминия.



Секция сушится в вакууме, после чего производится ее наполнение полиуретановой смолой или газом, что повышает срок службы и улучшает защиту элемента от воздействия окружающей среды. Применение пропиточных материалов и наполнителей необходимо для защиты самого конденсатора и его электродов. Без качественной изоляции происходит коррозия металлических покрытий, возрастает количество локальных пробоев, сокращается срок службы.

В большинстве МКР-конденсаторов используется так называемый самовосстанавливающийся диэлектрик. При возникновении электрического пробоя в течение нескольких микросекунд происходит испарение слоя металла, который таким образом удаляется из зоны повреждения. В результате, как показано на рис. 5, образуется свободная от металла изолированная область. В процессе и после пробоя конденсатор остается полностью работоспособным. В новейших МКР-элементах в качестве наполнителя используется экологически чистый наполнитель — нейтральный газ. При повреждении такие емкости не создают вредных утечек в окружающую среду, они более удобны для монтажа и имеют меньший вес (в среднем на 15–20%).

Конденсаторы МКР отличаются низким значением эквивалентной последовательной индуктивности (ESL) и сопротивления (ESR), оптимальны для применения в DC-шинах силовых инверторов. В отличие от ЭК с алюминиевой фольгой, МКР-элементы способны надежно работать при гораздо больших токах пульсаций.



Показатели надежности

Свойство самовосстановления позволяет МКР-емкостям не только сохранять работоспособность в условиях короткого замыкания (если ток КЗ не превышает значения I_S), но и выдерживать гораздо более высокие перегрузки по напряжению, чем электролитические конденсаторы. В отличие от ЭК, в спецификациях ПК обычно обговаривается допустимое время работы в условиях перена-

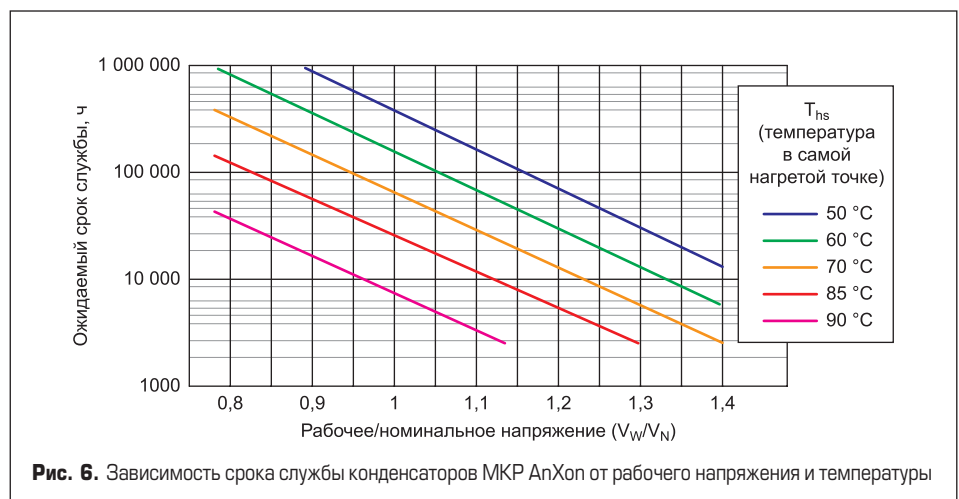




Рис. 7. Пленочные конденсаторы серии СТ27 для DC-шин с напряжением 600–4000 В

Таблица 1. Основные характеристики конденсаторов серии СТ27

Параметр по спецификации	Значение
Стандарты	IEC 61071:2007, GB/T 17702-2013
Диапазон температур (рабочая и хранения), °C	-40...+85
Рабочее напряжение (DC), В	600–4000
Емкость, мкФ	50–5600
Допуск емкости	±5% (J), ±10% (K)
Испытательное напряжение (между выводами)	1,5U _N , 10 с (25 ± 5 °C)
Испытательное напряжение (между выводами и корпусом)	1,5U _N + 1000 В AC; 10 с (50 Гц, +(25 ± 5) °C)
Срок службы	100 000 ч (Θ _{max(hotspot)} ≤ +70 °C)
Интенсивность отказов	50 FIT

пряжения — например, AnXon нормирует допустимую перегрузку следующим образом:

- 1,1U_N — в течение 30% от срока службы;
- 1,15U_N — в течение 30 мин в день;
- 1,2U_N — в течение 5 мин в день;
- 1,3U_N — в течение 1 мин в день;
- 1,5U_N — не более 30 мс, не более 1000 раз в течение срока службы.

Ресурс любых электронных компонентов зависит от условий эксплуатации. На рис. 6 показана типовая зависимость срока службы пленочных конденсаторов от температуры и рабочего напряжения.

Конденсаторы AnXon для силовой электроники

Пленочные конденсаторы серии СТ27

Конденсаторы серии СТ27 на основе металлизированной полипропиленовой пленки (рис. 7, табл. 1) отличаются низким значением ESL и ESR и высокой стойкостью к токовым перегрузкам. По конструкции они относятся к сухим элементам, обладают свойством самовосстановления, имеют долговечный алюминиевый корпус, заполненный теплопроводящей смолой. Используются в качестве сглаживающих или накопительных в цепях постоянного тока силовых преобразователей. Основные применения: инверторы моторных приводов, преобразователи частоты для солнечной и ветроэнергетики.

Снабберные конденсаторы серии СТ15

Снабберные конденсаторы (или просто снабберы), размещаемые непосредственно на DC-терминалах IGBT, используются для ограничения переходных коммутационных перенапряжений. В самом общем смысле снаббер работает как фильтр низких частот, замыкающий через себя пульсирующие токи, наводимые переходными процессами.

Номинал конденсатора C_s вычисляется исходя из заданного уровня перенапряжения V_{os} и величины энергии, запасенной в паразитной индуктивности шины L_B при коммутации тока I_{peak}:

$$V_{os} = I_{peak} \sqrt{L_B / C_s}$$

Конструкция снаббера должна обеспечивать минимальную распределенную индуктивность и удобство подключения к выводам питания силового модуля. Основные особенности специализированных снаб-



Рис. 8. Снабберные конденсаторы серии СТ15 с рабочим напряжением 700–3000 В

Таблица 2. Основные характеристики конденсаторов серии СТ15

Параметр по спецификации	Значение
Стандарты	IEC 61071, GB/T 17702-2013
Диапазон температур (рабочая и хранения), °C	-40...+85
Рабочее напряжение (DC), В	700–3000
Емкость, мкФ	0,047–10
Коэффициент диэлектрического рассеивания	4 × 10 ⁻⁴ C _N ≤ 1 мкФ; 6 × 10 ⁻⁴ C _N > 1 мкФ (10 кГц, +25 °C)
Испытательное напряжение (между выводами и корпусом)	U _N ≤ 1300 В, 3000 В AC (10 с, 50 Гц) U _N > 1300 В; 1,5U _N + 1000 В AC (10 с, 50 Гц)
Срок службы	100 000 ч (Θ _{max(hotspot)} ≤ +70 °C)

беров AnXon серии СТ15 с двухсторонней металлизацией электродов (рис. 8, табл. 2) перечислены ниже:

- низкое значение ESR и ESL, свойство самовосстановления;
- длительный срок службы, малый эффект саморазогрева;
- высокая стойкость к dV/dt и большим пульсирующим токам;
- низкий коэффициент диэлектрического рассеивания (этот параметр, характеризующий «неидеальность» конденсатора, выражается как отношение активных потерь мощности в ESR к реактивной мощности в конденсаторе).

Конденсаторы для AC-фильтров серии СТ52

Конденсаторы серии СТ52 (рис. 9, табл. 3), изготовленные на основе металлизированных полипропиленовых пленок, предназначены



Рис. 9. Конденсаторы для AC-фильтров серии СТ52 с рабочим напряжением 200–1400 В AC

Таблица 3. Основные характеристики конденсаторов серии СТ52

Параметр по спецификации	Значение
Стандарты	IEC 61071, GB/T 17702-2013
Диапазон температур (рабочей и хранения), °C	-40...+85
Рабочее напряжение (AC), В	200–1400
Емкость, мкФ	6–400 (±5, ±10%)
Коэффициент диэлектрического рассеивания	≤ 2 × 10 ⁻³ (100 Гц, +25 °C)
Испытательное напряжение (между выводами и корпусом), В	U _N ≤ 1300 В, 3000 В AC (10 с, 50 Гц) U _N > 1300 В; 1,5U _N + 1000 В AC (10 с, 50 Гц)
Срок службы	100 ч (Θ _{max(hotspot)} ≤ +70 °C)

для работы в цепях переменного тока: выходных АС-фильтрах силовых инверторов, пассивных корректорах коэффициента мощности, источниках бесперебойного питания.

Основные особенности АС-конденсаторов AnXon серии СТ52:

- низкое значение ESR и ESL, свойство самовосстановления;
- длительный срок службы, малый эффект саморазогрева;
- высокая стойкость к dV/dt и большим пульсирующим токам.

Заключение

Пленочные конденсаторы практически полностью вытеснили стандартные ЭК в современных силовых преобразователях высокой мощности. Это позволило повысить надежность изделий и уменьшить их габариты за счет исключения последовательно-параллельных соединений. Большое номинальное напряжение, высокая стойкость к коммутационным перенапряжениям и импульсным токам, свойство самовосстановления, низкие значения ESR и ESL — вот основные отличия современных МКР-конденсаторов от их электролитических аналогов.

К недостаткам ПК можно отнести более высокую стоимость и несогласованные параметры, однако это компенсируется малыми потерями

и возможностью в 3–5 раз снизить суммарную емкость DC-шины. Например, ЭК для звена постоянного тока трехфазного инвертора выбирают из расчета 0,06–0,08 мкФ/А выходного тока, а для ПК эта норма составляет 0,02–0,03 мкФ/А при естественном охлаждении. Справедливости ради отметим, что электролитические конденсаторы остаются незаменимыми в тех случаях, когда требуется высокая удельная емкость.

Литература

1. Колпаков А., Новоторженцев Д. Российская силовая электроника: разворот на Восток. Часть 1. Xiner // Силовая электроника. 2023. № 1.
2. Колпаков А., Новоторженцев Д. Российская силовая электроника: разворот на Восток. Часть 2. Novosense // Силовая электроника. 2023. № 2.
3. Колпаков А., Новоторженцев Д. Российская силовая электроника: разворот на Восток. Часть 3. Firststack // Силовая электроника. 2023. № 3.
4. Capacitors for Power Electronics. ELECTRONICON Kondensatoren GmbH.
5. Колпаков А., Ламп И. Проблемы проектирования IGBT-инверторов. Перенапряжения и снабберы // Компоненты и технологии. 2008. № 5.
6. Колпаков А. Расчет конденсаторов шины питания мощных преобразовательных устройств // Компоненты и технологии. 2004. № 2.