

## Держите дистанцию - Электрическая прочность электролитических конденсаторов Др. Арне Альбертсен, Jianghai Europe Electronic Components GmbH

### Введение

Алюминиевые электролитические конденсаторы являются важными компонентами многих современных силовых электронных устройств. Постоянно растущие требования на энерго-эффективные устройства, расширение использования возобновляемых источников энергии и постоянный рост количества электроники в автомобилях продвинули широкое использование данных компонентов.

Во множестве сфер применения, срок эксплуатации и надежность устройства напрямую зависят от соответствующих параметров электролитических конденсаторов [4]. В предыдущих публикациях [1], [2] автор сосредоточился на таких темах, как прогнозирование срока эксплуатации и надежности, также затрагивая зависимость данных параметров от рабочего напряжения. В настоящей статье объясняются причины ограниченных номинальных напряжений конденсаторов и показаны диапазоны напряжений, которые должны быть выдержаны для обеспечения безопасной работы.

Важным параметром при выборе электролитического конденсатора является его электрическая прочность, которая обычно приводится, как номинальное, рабочее, импульсное или, в особых случаях, переходное напряжение. Превышение электрической прочности, даже, если такое превышение было совершено в течение всего нескольких миллисекунд, может привести к немедленному отказу конденсатора или ухудшению его эффективности на остаточный срок службы. Для многих сфер применения, невозможно предсказать наивысшую возможную нагрузку по напряжению. Примерами возможных причин увеличенной нагрузки по напряжению в сравнении с нормальными рабочими напряжениями являются:

- скачки напряжения из-за переходных процессов при коммутации индуктивных нагрузок;
- ответная реакция свободновращающихся двигателей;
- высокоимпедансные состояния генераторов с различными нагрузками;
- неравномерная нагрузка или ошибки подключения фазы или отпадание одной фазы;
- ошибка при подключении (ошибка при монтаже проводки, источниках электропитания, например, на строительных площадках);
- (разрушающие) испытания на перенапряжение, например, «Проверка пробивного напряжения компонентов» согласно стандарта UL 508C

Один из подходов заключается в выборе номинального напряжения конденсатора, такого, что намного превышает ожидаемое максимальное напряжение для характерного применения. Однако, данный подход противоречит общим целям уменьшения габаритов устройства и сокращения расходов. Для успешной минимизации «коэффициента запаса», не жертвуя при этом надежностью, требуется полное понимание как свойств проектируемой цепи, так и свойств задействованных в цепи конденсаторов. Для того, чтобы полностью охарактеризовать свойства цепи, помимо моделирования, полезным является проведение измерений («измерить» означает «знать»). Для иллюстрации определений и границ электрической прочности электролитических конденсаторов, сначала рассмотрим конструкцию и процесс производства данных электронных устройств.

### Конструкция и изготовление электролитических конденсаторов

Алюминиевые электролитические конденсаторы включает конденсаторы с диапазоном электрической прочности от нескольких вольт до приблизительно 750 вольт с широким диапазоном емкостей, начиная от 1  $\mu\text{F}$  до 1  $\text{F}$  и более, при компактном размере. Шероховатая анодная фольга полностью покрывается тонким диэлектрическим слоем и контактирует с подогнанным катодом и электролитом. (Рис. 1).

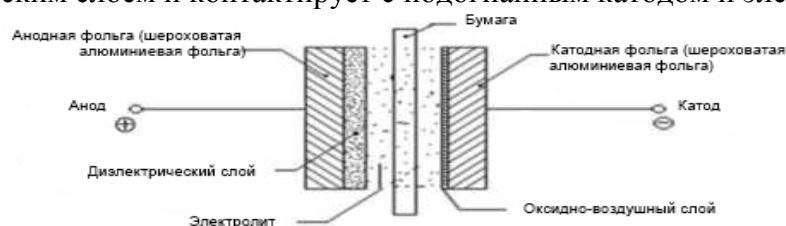
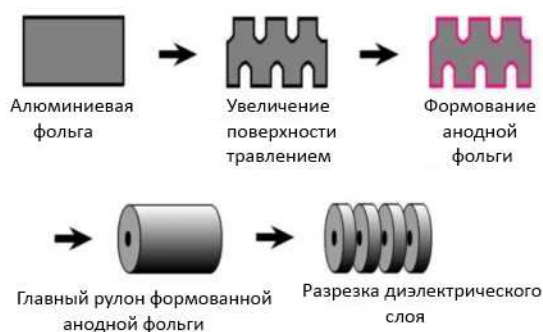


Рис. 1 Устройство алюминиевого электролитического конденсатора



Процесс изготовления электролитических конденсаторов включает в себя следующие основные этапы производства:

1. Протравленная алюминиевая фольга высокой степени чистоты толщиной 20~100 мкм является основным материалом для последующего изготовления анодной и катодной фольги. Протравка увеличивает общую площадь поверхности анодного материала до коэффициента 140 (Рис. 2), в сравнении с его геометрической поверхностью. Даже на этом раннем этапе процесса производства, определяется будет ли конденсатор впоследствии отвечать высоким требованиям в отношении стабильности по напряжению, надежности, длительному сроку службы и пульсационному току для профессионального промышленного применения. Производитель должен решить на данном шаге, является ли для него важным низкая цена продукта или он осознает важность пористой структуры для производительности в характерной сфере применения и важность качества продукции. Последнее приводит иногда к существенным дополнительным затратам на материалы и технологии, но обеспечивает стабильное качество продукции. Структура порового пространства анодного материала применительно к опыту производителя (а не только формирующее напряжения) определяет производителя, отвечающего за качество продукции.
2. Формование – анодная фольга несет на себе диэлектрический слой электролитического конденсатора и состоит из оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ). Он наносится поверх шероховатой анодной фольги посредством электрохимического процесса, называемого анодное окисление или формование. Качество формования, т.е. однородность и полнота покрытия площади поверхности является важным для высокой надежности компонентов в процессе эксплуатации. Чем выше напряжение формования в сравнении с номинальным напряжением, тем меньше вероятность диэлектрического пробоя. Типовые значения отношения напряжения формования к номинальному напряжению для электролитической продукции компании Jianghai лежат в диапазоне от 1.25 (низкое напряжение) до 1.60 (высокое напряжение). Толщина диэлектрического слоя составляет приблизительно 1.4 нм/В, что составляет около 900 нм для электролитического конденсатора с электрической прочностью 450 В (это менее 1/100 толщины человеческого волоса).
3. Разрезка - протравленная и формованная фольга выходит в так называемых головных рулонах шириной около 50 см. Посредством разрезки, головные рулоны нарезаются на длины, необходимые для материала анода и катода.



**Рис. 2. Технологические шаги подготовки анодной фольги**

4. Намотка – наложение электрических контактных выступов на фольгу (прошиванием, холодной сваркой) и намотка анода, бумаги (разделяющей, многослойной, при необходимости) и катодной фольги. Выбор бумаги и структур катодной фольги имеет существенное влияние на последующую производительность компонента. Конструкция ячейки намотки конденсатора и линия тока по внутренним и внешним соединениям определяет также паразитную индуктивность. Несмотря на то, что зачастую желательно защитить силовой полупроводниковый прибор при использовании конденсаторов с низкой индуктивностью, конденсаторы могут сами подвергаться негативному воздействию кратковременных скачков напряжения. Поэтому рациональность применения конденсаторов с низкой индуктивностью оценивается в каждом индивидуальном случае.
5. Пропитка – поры разделительной бумаги в ячейке обмотки и вся площадь поверхности анодной фольги покрываются электролитом – жидким катодом.
6. Сборка намотки конденсатора в корпус, электрическое соединение контактных выступов посредством пайки или винтовых выводов и клепка конденсатора для герметичности.



7. Пост-обработка («термоциклирование») для исправления обрезанных кромок фольги. Основными причинами пост-обработки являются неформованные и обрезанные края анодной фольги, трещины в оксидном слое, которые выявляются в процессе намотки, и (в меньшей степени) повреждения на соединительных выводах.
8. 100% производственный контроль ответственных электрических параметров (электрическая емкость, тангенс угла потерь и ток утечки).



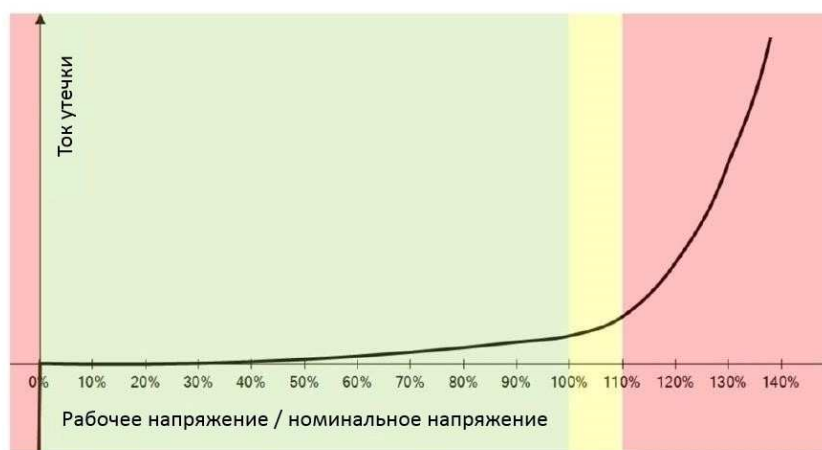
**Рис. 3. Технологические шаги от сырья до конденсатора**

В частности, технологические шаги 2 и 7 имеют большое влияние на надежность работы электролитических конденсаторов. Для обеспечения высокой надежности, компания Jianghai преследует цель поддержания достаточно высокой разности между напряжением формования и номинальным напряжением и разумное время выдержки в процессе пост-обработки. Так как напряжение формования обычно не указано в спецификациях, конечному пользователю компонентов трудно использовать данный параметр в качестве показателя эффективности. Уточняя информацию у поставщика электролитических конденсаторов и сравнивая нагрузки по току утечки, конечный пользователь может сделать выводы в отношении принципов конструкции, используемых производителем электролитических конденсаторов. Во времена роста цен на материалы и электроэнергию, даже некоторые хорошо известные производители прибегают к уменьшению напряжений формования для серийно выпускаемой продукции. С точки зрения обеспечения качества, компания Jianghai считает неприемлемыми такие меры по «оптимизации затрат».

### Определения электрической прочности

Даже единственный случай выхода напряжения за допустимые пределы (площади, окрашенные зеленым и желтым на Рис. 4) уже могут привести к необратимому повреждению электролитического конденсатора. Для безопасной и надежной работы электролитических конденсаторов, первоочередную важность имеют следующие определения.





**Рис. 4. Типовая зависимость тока утечки от отношения рабочего и номинального напряжения для конденсатора высокого напряжения**

Напряжение обратной полярности (МЭК 60384-4, 4.15)

Алюминиевые электролитические конденсаторы как поляризованные компоненты должны всегда подключаться с соблюдением полярности подключения. Приложение напряжения обратной полярности будет означать, что тонкий оксидно-воздушный слой на катоде будет выполнять задачу диэлектрической пленки. Так как оксидный слой очень тонкий, обычно имеющий диэлектрическую прочность только в 0.7~3 вольт. Превышение данного напряжения запускает электрохимическую реакцию, которая наращивает оксидный слой на катодной фольге, с образованием газообразного водорода и выделением тепла. Напряжение обратной полярности (в зависимости от напряжения и источника питания) может привести к разрушению компонента в результате перегрева, перегрузки давлением и диэлектрических пробоев. Поэтому, компания Jianghai не разрешает какую-либо эксплуатацию конденсаторов при условиях напряжения обратной полярности (площадь слева, окрашенная красным на Рис. 4).

Номинальное Напряжение (МЭК 60384-4, 2.2.3 ~ 2.2.5)

Номинальное напряжение напечатано на конденсаторе и указано в технической спецификации. Представляет собой максимальное значение для всего температурного диапазона электролитического конденсатора. Непрерывно подаваемое на конденсатор рабочее напряжение (включая любое наложенное переменное напряжение) не должно превышать значение номинального напряжения. Пиковое значение налагаемых напряжений переменного и постоянного тока должно всегда располагаться в пределах площади, помеченной зеленым, на Рис. 4, в то же время максимально допустимый ток пульсации не должен быть превышен.

Перенапряжение (МЭК 60384-4, 4.14)

Перенапряжение указывает на значение максимального напряжения, которое может быть приложено в течение срока службы с частотой в 1000 циклов (каждый с выдержкой в 30 секунд и интервалом в 5 минут и 30 секунд) не приводя к видимому повреждению конденсатора или изменению емкости конденсатора на более чем 15%. Для конденсаторов, рассчитанных на повышенные требования (нормальный случай для профессионального промышленного применения), должны проводиться максимум пять испытаний в час при верхнем пределе температуры. Для конденсаторов с номинальным напряжением до 315 вольт, перенапряжение равно 1.15 от номинального напряжения, для конденсаторов с номинальным напряжением свыше 315 вольт, перенапряжение равно 1.10 от номинального напряжения (площадь, выделенная желтым, на Рис. 4). Компания Jianghai усиливает защиту от перенапряжений посредством тщательной повторной формовки при достаточно высоком напряжении пост-обработки. Если меньшие значения перенапряжений показаны в спецификациях, это может означать оптимизированный по стоимости процесс производства (более короткие циклы и/или меньшие напряжения пост-обработки в термокамере)



Нарушенная эффективность при перенапряжениях может также быть результатом несоответствующих требованиям структур порового пространства, которые первоначально обладали высокой диэлектрической прочностью (и тем самым их было трудно отличить от компонентов высокого качества, пока они были новыми), но в течение эксплуатации данные конденсаторы проявили большое отклонение параметров и поэтому, как правило, более подвержены повреждениям, вызванным перенапряжением. Даже если эти компоненты могут быть подвержены очень высоким допустимым профилям тока, любой неожиданный всплеск напряжения может вызвать внезапный отказ конденсатора.

#### Напряжение переходного процесса (МЭК 60384-4, 4.22)

Диапазон переходных напряжений, превышающих диапазон рабочих напряжений, приведен в спецификации (площадь, выделенная красным, расположенная справа на Рис. 4). Тем не менее, электролитические конденсаторы могут, в принципе, выдерживать очень высокие, кратковременные, напряжения переходных процессов при низкой энергоемкости. Напряжения, превышающие перенапряжение, приводят к высоким токам утечки и предел изменения напряжения аналогичен диоду Зенера [3]. Когда напряжённость электрического поля является слишком высокой для электролита, она может непосредственно вызвать короткое замыкание цепи. Но даже если электролит выдерживает приложенное напряжение, электрохимические процессы приводят к дальнейшему образованию оксида на поверхности анодной фольги, сопровождающееся выделением тепла и образованием газообразного водорода, и, по прошествии определенного периода, открывается предохранительная свеча.

Если в характерной сфере применения ожидаются импульсные помехи, компания Jianghai обладает техническими возможностями по оптимизации анодной фольги, электролита, разделительной бумаги для предоставления специализированного решения при существующих физических ограничениях. Так как почти все материалы и шаги технологического процесса имеют влияние на стабильность компонента и его диэлектрическую прочность, существуют сложные зависимости всех параметров, задействованных при проектировании данных компонентов. Компания Jianghai предлагает своим клиентам тесное взаимодействие по выработке оптимальных решений по проектированию и закупке.

#### **Резюме**

Алюминиевые электролитические конденсаторы через свою собственную электрическую прочность влияют на общую надежность электронных устройств, в которые они установлены. Глубокое знание некоторых основных параметров этих компонентов необходимо для обеспечения надежной конструкции электронных устройств.

В статье пояснены определения электрической прочности и наиболее значимые факторы, влияющие на электрическую прочность. В качестве практического инструмента, иллюстративный график рекомендуемых допустимого и запрещенного диапазонов напряжений служит в качестве руководства для успешного применения электролитических конденсаторов.

Применимость общих рекомендаций зависит от конкретного типа продукта и характерного применения. Проведение консультаций с поставщиком является основой для получения методической помощи при разработке проекта и подтверждения любых оценок.

#### **Ссылки на источники**

- [1] Albertsen, A., Lebe lang und in Frieden! Hilfsmittel für eine praxisnahe Elko-Lebensdauerabschätzung, Elektronik Components 2009, 22-28 (2009)
- [2] Albertsen, A., Auf eine sichere Bank setzen - Zuverlässigkeit von Elektrolytkondensatoren, Elektronik Components 2010, 14-17 (2010)
- [3] Imam, A.M., Condition Monitoring of Electrolytic Capacitors for Power Electronics Applications, Dissertation, Georgia Institute of Technology (2007)
- [4] Venet, P., A. Lahyani, G. Grellet, A. Ah-Jaco, Influence of aging on electrolytic capacitors function in static converters: Fault prediction method, Eur. Phys. J. AP 5, 71-83 (1999)



## Информация о компании

Компания Jianghai Europe Electronic Components GmbH имеет офис и склад в г. Крефельд (Германия) и оказывает поддержку европейским клиентам компании Nantong Jianghai Capacitor Co., Ltd. (Jianghai), расположенной в г. Наньтун, Китай. Компания Jianghai была основана в 1958 году на месте текущей штаб-квартиры – приблизительно в двух часах езды на автомобиле к северу от г. Шанхай. На заре своей деятельности, компания Jianghai разрабатывала и производила специализированную химическую продукцию (например, растворы электролита). В 1970 году было запущено производство электролитических конденсаторов и, в течение последующих лет, новое производство анодной фольги, рассчитанной на низкое и высокое напряжение, которые дополнили портфель продукции Jianghai. Являясь лидирующим производителем в Китае, компания Jianghai является также одним из крупнейших в мире производителей электролитических конденсаторов с защелкивающимися или винтовыми фиксаторами.

[www.jianghai-europe.com](http://www.jianghai-europe.com)

## Об авторе



Д-р. Арне Альбертсен изучал физику со специализацией по прикладной физике в Кильском университете. После защиты диплома (1992) и докторской диссертации (1994), которые были посвящены стохастическому анализу временных рядов системы переноса через биофизическую мембрану, он сделал промышленную карьеру в строительстве завода по специализированной очистке сточных вод и технологиям генерации возобновляемой энергии. В 2001 году он начал работать с ведущими производителями электронных компонентов, такими как VSCcomponents, Vishay, и KOA. Он работал на управляющих должностях в проектировании, продажах и маркетинге пассивных и активных дискретных компонентов. до того, как перешел работать в компанию Jianghai Europe Electronic Components в ноябре 2008 года. В текущей должности менеджера по продажам и маркетингу, д-р. Альбертсен отвечал за поддержку европейских поставщиков комплектующих и дистрибьюторов.

[a.albertsen@jianghai-europe.com](mailto:a.albertsen@jianghai-europe.com)

