

Надежность электролитических конденсаторов

Др. Арне Альбертсен, Jianghai Europe Electronic Components GmbH

Введение

Алюминиевые электролитические конденсаторы имеют важное значение для функционирования множества электронных устройств. Рост спроса на энергоэффективные устройства, расширение использования возобновляемых источников энергии и увеличение электронной начинки в современных автомобилях существенно продвинули использование данных компонентов за последние несколько десятилетий.

Во множестве сфер применения, срок эксплуатации и надежность устройства напрямую связаны с соответствующими параметрами электролитических конденсаторов [4]. В то время, как в предыдущей статье автор [1] разъяснил вопрос оценки срока службы электролитических конденсаторов, данная статья сфокусирована на надежности электролитических процессов.

Конструкция и процесс изготовления 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 мкФ до 1 Ф и более, при компактном размере. Шероховатая анодная фольга полностью покрывается тонким диэлектрическим слоем и контактирует с подогнанным катодом и электролитом. (Рис. 1.)

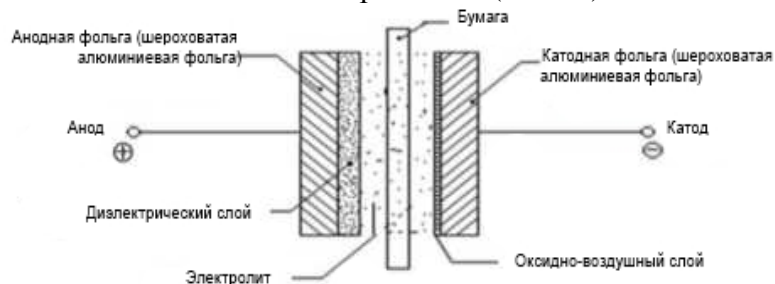


Рис. 1. Устройство алюминиевого электролитического конденсатора

Процесс изготовления электролитических конденсаторов включает 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 материала анода до коэффициента 140 (Рис. 2), в сравнении с его геометрической поверхностью.
2. Формование – анодная фольга несет на себе диэлектрический слой электролитического конденсатора, состоящий 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 по сравнению 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.



4. Намотка – наложение электрических контактных выступов на фольгу (прошиванием, холодной сваркой) и намотка анода, бумаги (разделяющей, многослойной, при необходимости) и катодной фольги.
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.
8. 100% производственный контроль ответственных электрических параметров (электрическая емкость, тангенс угла потерь и ток утечки).

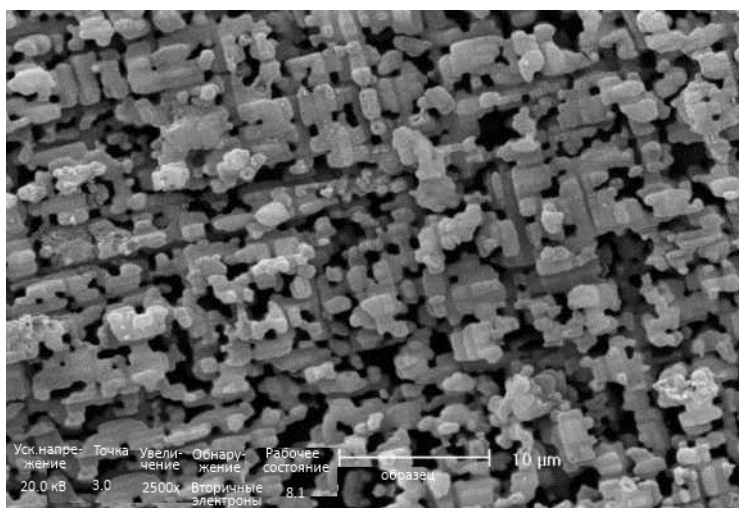


Рис. 2. Протравленная анодная фольга. Вид сверху

Рис. 2 показывает электронную микрографию поверхности травленной анодной фольги на высокое напряжение. Однородное распределение и большой диаметр ямок травления позволяют осуществить хорошее покрытие оксидным слоем и полный доступ электролита ко всей площади поверхности анодной фольги. Уже на данном раннем этапе производства, определяется будет ли в результате электролитический конденсатор соответствовать спросу на профессиональное промышленное применение с устанавливаемыми высокими требованиями по надежности, возможностям по току пульсаций и длительному сроку работы.

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».

Срок службы в зависимости от надежности

Механизмы электрохимического старения ограничивает срок службы электролитических конденсаторов до уровня, который может быть оценен в зависимости от температуры, тока пульсаций и рабочего напряжения. В течение данного срока службы, случайные отказы могут произойти в любое время. Абсолютное количество таких отказов зависит от размера наблюдаемой общей партии. Существование случайных отказов обычно не связано с



процессом старения, но скорее является последствием скрытых внутренних дефектов (например, в разделительной бумаге, фольге или вблизи электрических соединений). Зачастую, данные отказы происходят без какого-либо предупреждения и заканчиваются коротким замыканием цепи. Повышенные токи утечки, в результате повреждения диэлектрического слоя, могут привести к такому большому образованию (которое протекает вместе с повышением давления водородного газа), что повышенное давление открывает предохранительную свечу. Затем, электролитический конденсатор высыхает и происходит отказ в связи с низкой емкостью.

100% измерение конечной электрической емкости, тока утечки и ЭПС на всех производимых компонентах и проведение дополнительных испытаний образцов, взятых из всех партий серийного производства, обеспечивают высокий уровень качества продукции. Поэтому ранние отказы для характерного применения являются редко наблюдаемым исключением [2].

Существует много определений термина «надежность» и, в зависимости от того, спросите ли вы специалиста по статистике, математика или инженера, вы можете получить различный ответ. Разумным подходом к определению надежности может быть следующее определение: вероятность электронного устройства удовлетворительно выполнять требования поставленной задачи в течение установленного срока.

Типовая динамика плотности распределения надежности электролитических конденсаторов, представляет собой так называемую «U-образную кривую» [3]. Интенсивность отказов λ обозначает количество отказов в единицу времени (плотность распределения отказов, единица измерения интенсивности отказов = «отказы за единицу времени» в $\frac{10^{-9} \text{отказов}}{ч}$).



Рис. 3. Зависимость интенсивности отказов от времени - U-образная кривая

U-образная кривая на Рис. 3 показывает три отдельных последовательных сегмента:

1. Период ранних отказов («мгновенный выход из строя») с затухающей интенсивностью отказов λ
2. Период, в течение нормального срока службы имеет постоянную интенсивность отказов λ которая описывает возникновения случайных отказов.
3. Конечный сегмент с увеличением интенсивности отказов λ происходит из-за износа и изменений, превышающих допустимые пределы в конце или после завершения регулярного срока службы.

Так называемая «интенсивность отказов», приведенная во взаимосвязи с «полезным сроком службы» относится к статистическому процентному значению, то есть относительному количеству компонентов, чьи параметры выходят за пределы заданных технических требований в конце испытания на эксплуатационную долговечность и ее не следует путать с интенсивностью отказов для случайных отказов.

Виды и характер отказов

Нормальным типом отказа вследствие обычного износа электролитического конденсатора является уход параметров за допустимые пределы вследствие низкой емкости или повышенное ЭПС (Рис. 4, светло-зеленные прямоугольники).



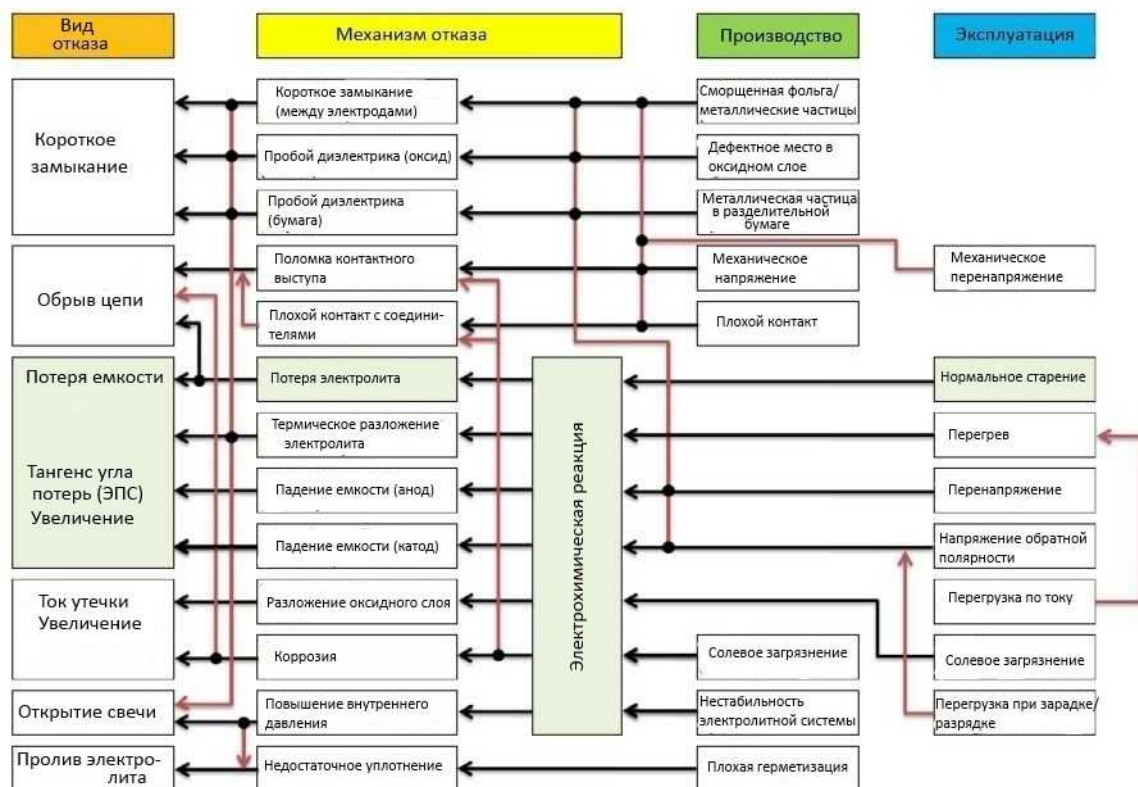


Рис. 4. Виды и характер отказов

В обзоре на Рисунке 4 показан характер отказов, которые могут возникать по производственным или эксплуатационным причинам. В условиях эксплуатации, отказы, связанные с производством, наблюдаются редко, так как чистота основных материалов и показатели качества процессов механизированного производства непрерывно улучшались за последние годы. Зачастую, отказы могут быть прослежены, как возникающие из неблагоприятных рабочих условий, потому, что перегрузки для характерной сферы применения (например, температура окружающей среды, ток пульсаций, рабочее напряжение, вибрация, механическое напряжение и т.д.) иногда не могут быть ни предсказаны, ни предотвращены.

Оценка интенсивности отказов

Даже при использовании наилучших материалов и производственных технологий мирового класса совместно с эффективной системой обеспечения качества, в реальной эксплуатации встречаются случайные отказы компонентов. В контексте с оценкой интенсивности отказов, в литературе часто встречается отсылка к справочнику MIL-HDBK-217F, несмотря на то, что данный справочник полагается на данные по надежности компонентов, которые были получены несколько десятилетий назад. Численная величина интенсивности отказов компонентов, приведенная в справочнике, зачастую превышает интенсивность отказов в условиях эксплуатации, наблюдаемых с актуальной промышленной серией Jianghai с коэффициентом 10~100. Даже несмотря на полученные результаты, данные справочника MIL-HDBK-217F, и приведенные в нем схемы расчетов, дают представление о зависимости интенсивности отказов от температуры окружающей среды и фактического рабочего напряжения (Рис. 5). Интенсивность отказов нормализуется к работе при температуре окружающей среды 40 °С и 50% от номинального напряжения.



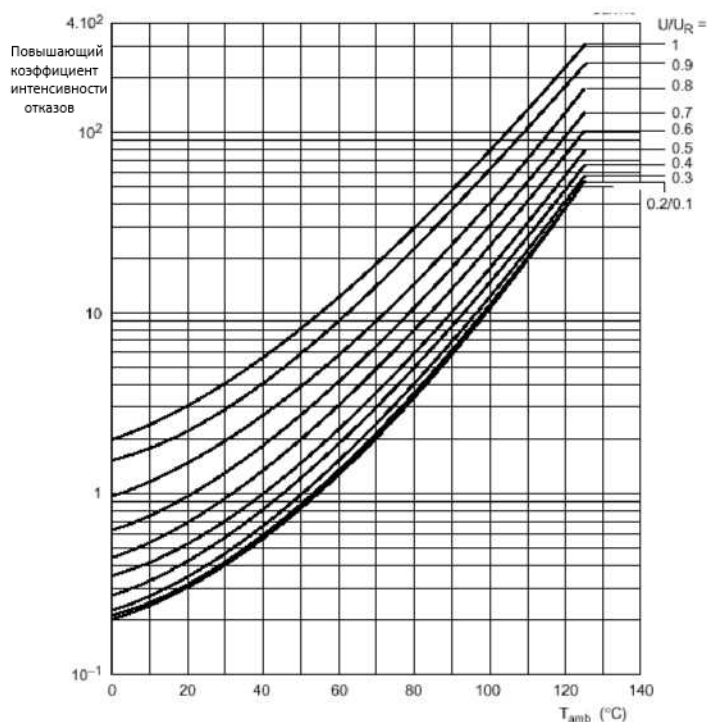


Рис. 5. Повышающие коэффициенты интенсивности отказов (справочник MIL HDBK-217F)

Для того, чтобы получить достоверные данные по надежности на основе лабораторных испытаний, необходимо затратить колоссальные усилия. Потребуется экспериментально полученные данные испытаний от миллиардов единиц-часов, например, 1 миллион электролитических конденсаторов должен быть испытан при большой стоимости трудовых затрат. Компания Jianghai вместо этого использует информацию о фактических эксплуатационных отказах от клиентов вместе с типовыми условиями характерного применения (температура, ток пульсаций, рабочее напряжение). Используя эксплуатационные данные, данные по произведенным количествам и типу используемых технологий, а также результаты лабораторных испытаний, можно провести оценку интенсивности отказов при разумных затратах. Порядок величины оцениваемых интенсивностей отказов в эксплуатационных условиях лежит в пределах 0.5~20 интенсивности отказов во времени.

По данным интенсивности отказов во времени можно легко рассчитать среднее время наработки на отказ, как обратную величину: $MTBF = 1 / FIT$, где MTBF - среднее время наработки на отказ, FIT - интенсивность отказов в единицу времени. Следует отметить, что показатель средней наработки на отказ не составляет гарантированный минимальный срок до появления первого отказа, а скорее указывает на средний интервал, когда работоспособными остаются около 37% от первоначального количества электролитических конденсаторов (аналогично радиоактивному распаду, функция распределения отказов компонентов подчиняется экспоненциальному распределению).

Факторы, влияющие на надежность

Надежность (а также срок службы) электролитических конденсаторов любой марки и типа нелинейно зависит от температуры, тока пульсаций и рабочего напряжения. Небольшое изменение любого из данных параметров оказывает большое воздействие на общую производительность данных компонентов. Тщательное проектирование цепи является необходимым для получения требуемого уровня надежности устройства:

- Сложность – сокращение количества компонент улучшает надежность.
- Нагрузка – температура, ток пульсаций и рабочее напряжение, иногда совместно с механическими нагрузками, такими как вибрация, требует компромиссных решений по



стоимости и габаритам. При возможности, термическая нагрузка должна быть сведена к минимуму: на каждые 10 К градусов повышения температуры, интенсивность отказов электролитических конденсаторов удваивается!

- Надежность отдельных компонентов – при выборе компонентов их индивидуальная надежность должна приниматься во внимание с учетом стоимости. Высоконадежные компоненты обычно имеют более высокую цену.

Успешное применение электролитических конденсаторов

Большинство наблюдаемых отказов в процессе эксплуатации электролитических конденсаторов не связано с классическими случайными отказами. За пределами ответственности производителя электролитического конденсатора, конечный пользователь обязан обеспечивать необходимые рабочие условия посредством обеспечения надежных конструкций, бережного обращения и производственных процессов, умеренного воздействия окружающей среды. Ниже приведен список некоторых рекомендаций для успешного применения электролитических конденсаторов:

Транспортировка и хранение

Корпуса (из чистого алюминия) и уплотнение (резиновое) конденсаторов мягкие и эластичные. Явно поврежденные (вдавленные) компоненты должны быть утилизированы. Загрязнение солями (в частности, бромидом, используемым для стерилизации при морских перевозках), к сожалению, является часто наблюдаемым явлением. Это относится, как к отгрузке отдельных компонентов, так и к транспортировке готовых изделий.

Монтаж и сборка

Необходимо избегать нажатий, вытягивания или изгиба контактных зажимов (в частности, для конденсаторов с радиальными выводами). Это может привести к серьезным повреждениям внутренних контактов анодной и катодной фольги.

Клей, прессовочная масса и лаки не должны содержать солей. Вблизи уплотнения электролитического конденсатора, необходимо поддерживать отверстие в окружающую среду для предотвращения создания микроклимата внизу ограниченного пространства (риск коррозии). Токопроводящие дорожки не должны быть проложены под каким-либо электролитическим конденсатором. Электролитические устройства никогда не должны использоваться в качестве «ручки» для переноса печатной платы.

Пайка

Необходимо соблюдать указанные пределы температуры пайки во избежание повреждений (вздутие, сокращение срока службы или термическое разрушение электролита). Это, в частности, относится к обработке электролитических конденсаторов, монтируемых на поверхности в процессе бессвинцовой пайки с припоем (профиля пайки с более высокими температурами).

Эксплуатация

При включении или выключении, может произойти изменение напряжения в переходном процессе, создаваемое индуктивными нагрузками и превышающее формовочные или обратное напряжения. Даже при однократном приложении, данные типы переходных нагрузок могут вызвать необратимое повреждение электролитического конденсатора и их следует избегать при проектировании соответствующего устройства.

Механические перенапряжения в процессе работы (например, авторезонанс) могут привести к повреждению соединительных контактов. Приклеивание электролитических конденсаторов к печатной плате или перемещение их на другое место могут решить данную проблему.

Любое увеличение температуры среды на 10 К удваивает интенсивность отказов и сокращает срок службы наполовину. Полезно размещать электролитические конденсаторы вдали от



источников тепла (теплоотводов, силовых индукторов и т.д.).

Резюме

Алюминиевые электролитические конденсаторы через свою собственную надежность 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 приведены объяснения определения надежности и наиболее значимые факторы, влияющие на надежность. Ряд практических рекомендаций служит в качестве руководства для успешной эксплуатации 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] Both, J., Aluminium-Elektrolytkondensatoren, Teil 1 - Ripplestrom und Teil 2 - Lebensdauerberechnung, BC Components, February 10, 2000
- [3] Stiny, L., Handbuch passiver elektronischer Bauelemente, Franzis Verlag, Poing, 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.

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 BCcomponents, 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.

www.jianghai-europe.com

a.albertsen@jianghai-europe.com

