

Методы оценки срока эксплуатации

электролитических конденсаторов

Олег Радюшкин

rov@supplier.ru

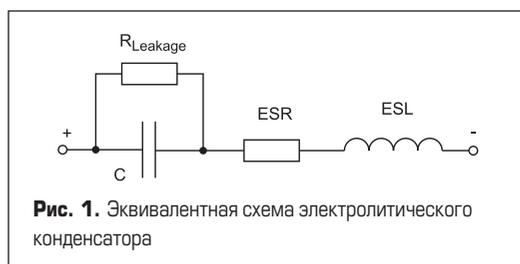
Со времени изобретения электролитического конденсатора в 1921 г. эта технология позволила сделать ряд существенных шагов вперед в различных отраслях, связанных с преобразованием электрической энергии. В данной статье мы хотим ознакомить читателей с продукцией компании Jianghai Group, специализирующейся на производстве силовых электролитических конденсаторов высокого уровня качества. В основной, технической, части статьи мы покажем примеры определения параметров надежности конденсаторов данного производителя, а также приведем примеры и критерии выбора электролитических конденсаторов для конкретного приложения.

Jianghai Capacitor Co. была основана более полувека назад в г. Нантонг (Китай) и в 1970 г. приступила к выпуску электролитических конденсаторов. С тех пор производственные мощности компании выросли более чем в три раза, а количество занятых в производстве сотрудников превысило 1100 человек. Jianghai Capacitor Co. располагает передовыми технологиями производства различных конденсаторов, в том числе полимерных типов, а также с увеличенным ресурсом и сроком эксплуатации. Отдельно стоит упомянуть конденсаторы с расширенным диапазоном рабочей температуры — до -55°C , часто востребованные российскими разработчиками аппаратуры для холодного и умереннохолодного климата. Высокий уровень качества продукции Jianghai Capacitor Co. подтвержден сертификатами ISO9001, ISO1401, QS9000, UL94, ISO TS16949.

Модель ESR-эквивалентного последовательного сопротивления электролитических конденсаторов

В основе модели для расчета потерь в электролитическом конденсаторе лежит понятие ESR-эквивалентного последовательного сопротивления (рис. 1).

В схеме на рис. 1 помимо ESR присутствуют эквивалентная последовательная индуктивность ESL,



сопротивление утечки R_l и идеальная емкость C . В данной статье мы рассмотрим подробно только ESR и определяющие его параметры. Значение ESR определяется тремя переменными:

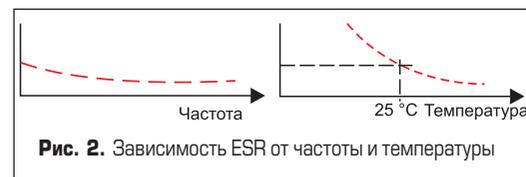
$$ESR = R_0 + R_d + R_e,$$

где R_0 — константа, определяемая сопротивлением пленки и внутренних соединений (обычно порядка 10 мОм); $R_d = D_{ox}/(2\pi fC)$ — составляющая, зависящая от частоты, где D_{ox} — фактор диэлектрических потерь диэлектрика; f — частота; C — емкость конденсатора.

Появление потерь, зависящих от частоты, обусловлено наличием тонкого слоя диэлектрика между двумя обкладками (рис. 2). Данная величина особенно значима для высоковольтных электролитических конденсаторов, в которых используется особенно толстый слой диэлектрика (типичное значение — 1,4 нм/В). Типовое значение $D_{ox} \sim 0,06-0,1$. Потери, зависящие от температуры, определяются типом применяемого электролита и бумажной «вставки». Для оценки данной составляющей сопротивления можно применять формулу:

$$R_e(T) = R_e(25^{\circ}\text{C}) \times 2^{-[(T-25)/A]^B},$$

где для электролитов на базе этиленгликоля $A = 40$, $B = 0,6$.



Компания Jianghai указывает в документации не только типовое значение ESR, но и максимальные значения, которые должны использоваться при первичном выборе конденсатора для обеспечения высоких требований к надежности разрабатываемых изделий.

Импульсные токи

В большинстве приложений, связанных с преобразованием электрической энергии, возникают всплески перенапряжения, приводящие к импульсам тока и внутреннему нагреву конденсатора. Обычно для их оценки оперируют среднеквадратичными значениями токов (RMS).

$$I_a = \sqrt{(I_{f1}/F_{f1})^2 + (I_{f2}/F_{f2})^2 + \dots + (I_{fn}/F_{fn})^2},$$

где I_a — суммарный ток (RMS); $I_{f1} \dots I_{fn}$ — значения тока на частотах $f_1 \dots f_n$; $F_{f1} \dots F_{fn}$ — фактор корректировки тока на различных частотах.

$$F_{fi} = \sqrt{ESR(f_0)/ESR(f_i)},$$

где f_0 — основная частота броска тока.

Фактор корректировки напрямую связан с зависимостью ESR от частоты. Его значения, наравне со значениями ESR, для простоты оценки приводятся в документации Jianghai в виде таблиц, в зависимости от частоты. В дополнение, поскольку фактор корректировки и ESR связаны с рабочим напряжением, в документации приводятся также таблицы зависимости фактора корректировки от напряжения.

Нагрев конденсатора во время эксплуатации

Во время эксплуатации конденсатора температура внутри него увеличивается по отношению к температуре снаружи, что приводит к необходимости рассеивания тепловой энергии во внешнем пространстве. Основным механизмом охлаждения электролитических конденсаторов — излучение тепла в окружающую среду и конвекция, естественная или с принудительным обдувом (рис. 3). Для конденсаторов с большим размером колбы излучение тепла (radiation), как правило, более эффективно, чем естественная конвекция. Эффективность излучения тепла в инфракрасном спектре во внешнюю среду зависит от типа материала поверхности конденсатора: так, конденсатор с изоляционной «рубашкой» имеет коэффициент эмиссии тепла $\epsilon = 0,85$, в то время как конденсатор без изоляции — лишь $\epsilon = 0,40$ [5].

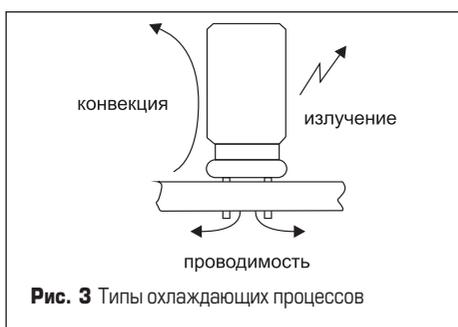


Рис. 3 Типы охлаждающих процессов

Формула расчета мощности излучения тепла во внешнюю среду по закону Стефана-Больцмана:

$$P_{RAD} = \epsilon \sigma A (T_S^4 - T_A^4) = h_{RAD} \times A \times \Delta T;$$

где $\epsilon = 0,85$ — коэффициент эмиссии; $\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ (Вт/(м²К⁴)) — постоянная Стефана-Больцмана; A — площадь поверхности конденсатора без основания; $h_{RAD} = \epsilon \sigma (T_S + T_A)(T_S^2 + T_A^2)$ — коэффициент передачи тепла; T_S — температура поверхности конденсатора; T_A — температура окружающей среды; $\Delta T = T_S - T_A$ — разница температур.

Для естественной конвекции:

$$P_{CONV} = h_{free} \times A \times \Delta T,$$

где $h_{free} = 1,32 \times [\Delta T/D]^{1/4}$, D — диаметр колбы конденсатора.

В случае естественной конвекции совместно с излучением тепла поверхностью типовые значения коэффициента передачи тепла составят (Вт/м²К):

$$h_{tot} = h_{free} + h_{rad} = 13,5 - 17 \text{ (Вт/м}^2\text{К)};$$

В случае принудительного обдува со скоростью потока воздуха v (м/с) значение экстраполированного итогового коэффициента передачи тепла можно представить формулой [5]:

$$h_{tot} = 5 + 17 \times (v + 0,1)^{0,66}.$$

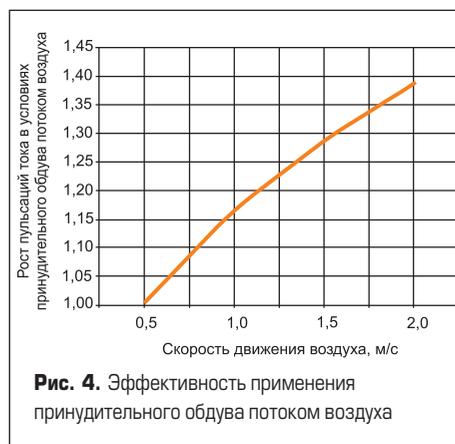


Рис. 4. Эффективность применения принудительного обдува потоком воздуха

Применение принудительного обдува со скоростью потока воздуха 1–2 м/с способно существенно улучшить общий эффект охлаждения по сравнению с естественной конвекцией (рис. 4).

Отвод тепла за счет теплопроводности печатной платы актуален только для малых конденсаторов и в случае применения охладителей. Тепловое сопротивление в общем случае может быть представлено как R_{th} . Приращение температуры электролитического конденсатора с основанием площадью A и импульсным током I составит:

$$\Delta T = P \times ESR \times R_{th},$$

где $R_{th} = 1/(h_{tot} \times A)$.

Следующий шаг в понимании тепловых характеристик конденсатора — определение температуры внутри T_C .

$$T_C = \Delta T \times R_{th}^{inside} / R_{th} + T_S,$$

где числовое значение комбинированного теплового сопротивления в радиальном и осевом направлении $R_{th}^{inside} = 1 - 3$ К/Вт.

На практике точные расчеты внутренней температуры конденсатора в зависимости от температуры на его поверхности верны лишь для диаметра колбы не более 25 мм. Для больших конденсаторов Jianghai предлагает применять встроенный терморезистор

и способна производить такие конденсаторы по требованию заказчика.

Химическая стабильность

Современные электролитические конденсаторы содержат большое количество различных химических соединений и компонентов. Хорошим показателем стабильности химических компонентов является срок годности (см. табл., правая колонка). В отличие от времени хранения, указываемого для нормальной температуры окружающей среды, проверка на срок годности производится на базе теста ускоренного старения (life test) при максимальной температуре и нулевом приложенном напряжении в течение заданного промежутка времени. Поскольку к конденсатору не прикладывают внешнее напряжение, результаты такого теста не «улучшаются» за счет перепада температур и отображают наиболее «жесткий» результат. Основные параметры электролитического конденсатора, такие как ток утечки, емкость и фактор потерь, должны оставаться в заданном заранее диапазоне. Высокое значение срока годности конденсатора отображает высокую химическую стабильность, основанную на чистоте применяемых материалов и строгом технологическом процессе. Результаты данного теста приводятся в документации на все конденсаторы Jianghai.

Надежность и срок эксплуатации

Существует несколько способов определения надежности электролитических конденсаторов:

- Тест на «выносливость», Endurance test. Методика описана в стандарте IEC60384-4. В процессе тестирования конденсатор работает при максимальном приложенном напряжении и максимально допустимой температуре, при этом контролируются значения емкости, ESR и тока утечки. Тест останавливается при превышении допустимого порога одного из параметров. В зависимости от типов испытуемых конденсаторов допускается «уход» основных параметров не более чем в 7% выборки.
- Время эксплуатации, Useful life. Параметр, характеризующий время эксплуатации, определен стандартом DIN IEC60384-4 (Германия). Процедура тестирования аналогична предыдущей, но, помимо максимального постоянного напряжения и максимальной температуры, присутствуют выбросы напряжения, приводящие к дополнительному внутреннему нагреву конденсатора.

При чтении документации различных производителей электролитических конденсаторов приходится сталкиваться со множеством различных наименований параметров надежности. При этом зачастую термины оказываются перемешаны или переопределены. Так, встречаются «load life», «useful life», «endurance», «life expectancy», «operational life», «service life». В дополнение к расхождениям в терминологии

Таблица. Характеристики надежности конденсаторов Jianghai

Характеристика	Эксплуатационная долговечность		Испытание на долговечность при полной нагрузке	Испытание на долговечность	Хранение
Время эксплуатации, ч	9 000	>200 000	5000	5000	1000
Ток утечки	Не более указанного значения				
Изменение емкости (от начального значения)	±30%		±20%	±10%	±20%
Потери (от указанного значения, не более)	300%		200%	130%	200%
Последовательность					
Напряжение	U _R	U _R	U _R	U _R	U _R = 0*
Ток	I _R	1,4×I _R	I _R	I _R = 0	I _R = 0*
Температура, °C	105	50	105	105	105*
Уровень отказов	≤1%	≤1%	гарантировано без отказов		

Примечание: * — не менее чем за 24 ч до измерений на 30 мин. прикладывается напряжение U_R.

некоторые производители допускают применение иных стандартов тестирования и иное определение параметров его проведения, что делает весьма сложным «прямое» сравнение характеристик надежности.

К сожалению, на сегодняшний день нет единого стандарта для проведения тестирования параметров надежности и срока эксплуатации электролитических конденсаторов. Существует лишь рекомендация комитета стандартизации США EIA IS-749, в которой определена методика тестирования времени эксплуатации электролитического конденсатора, установленного в схеме непосредственно после основного выпрямителя. Пока иное не определено отраслевыми стандартами, Jianghai публикует все параметры проводимых тестов и их результаты в основной документации на конденсаторы.

Таким образом, документация на конденсаторы Jianghai позволяет получить «прозрачную» картину всех параметров тестирования надежности и срока эксплуатации выбранной группы конденсаторов.

Чтобы обеспечить разработчиков необходимыми инструментами для расчета параметров надежности, Jianghai приводит соответствующие диаграммы с базовыми параметрами (температура и импульсные токи). В дополнение предлагается более полная математическая модель, в которой учитывается рабочее напряжение. Применение этих двух инструментов для определения параметров надежности является достаточным для большинства приложений. В случае особых применений (когда конденсаторы эксплуатируются у максимально допустимых границ температуры, в присутствии нерегулярных импульсных токов большой величины или в особом конструктивном исполнении) первичная оценка с помощью диаграмм и моделирования может оказаться неверной. В любом случае, для уточнения пригодности конденсаторов для конкретного приложения рекомендуется обратиться в службу технической поддержки Jianghai.

Жидкий электролит внутри конденсатора является основной причиной ограничения срока эксплуатации и сказывается на постоянном изменении электрических параметров конденсатора во времени [1]. Электрохимическая деградация параметров, ускоряющаяся с ростом температуры и напряжения, может быть оценена с помощью полуэмпирической модели срока эксплуатации (lifetime).

Jianghai приводит графические диаграммы коэффициента срока эксплуатации (рис. 5) в зависимости от температуры и импульсных токов для всех серий на основании математической модели. На этих диаграммах серая область отображает совокупность характеристик, при которых возможно закипание электролита. Работа в «серой» области допустима только после согласования всех параметров с производителем конденсатора.

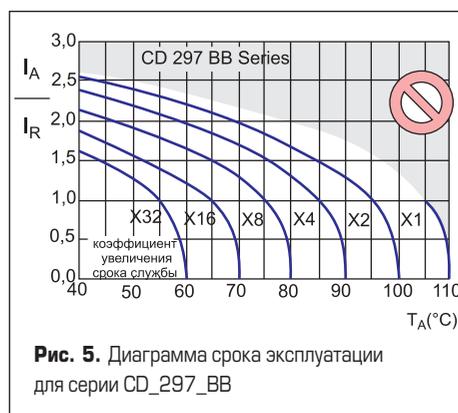


Рис. 5. Диаграмма срока эксплуатации для серии CD_297_BB

С другой стороны, математическая модель срока эксплуатации дает оценку времени работы конденсатора в выбранном приложении. Исходными параметрами модели являются данные из документации на конденсатор и параметры эксплуатации, такие как температура окружающей среды, импульсные токи и диапазон прилагаемого в процессе эксплуатации напряжения. В случае применения принудительного охлаждения максимально допустимые импульсные токи должны быть также уточнены. Структура модели срока эксплуатации:

$$L_X = L_0 \times K_T \times K_R \times K_V,$$

где L_X — искомый срок эксплуатации; L₀ — исходный срок эксплуатации при номинальном импульсном токе и максимальной температуре (берется из документации); K_T — температурный фактор (определяемый температурой окружающей среды); K_R — фактор импульсного тока, связанный с внутренним нагревом конденсатора; K_V — фактор напряжения, связанный с рабочим напряжением в процессе эксплуатации.

Температурный фактор K_T

Срок эксплуатации электролитического конденсатора связан с температурой окружающей среды правилом «10 Кельвинов», широко при-

меняемым в отрасли: снижение температуры окружающей среды на 10 К приводит к увеличению срока эксплуатации в два раза [1, 3, 4, 6, 9]. Формула для расчета K_T = 2^{(T₀-T_a)/10K}, где T₀ — максимально допустимая температура; T_a — максимальная температура в выбранном приложении.

Импульсный ток

Jianghai оценивает вклад импульсных токов, приводящих к внутреннему нагреву конденсатора, по следующей формуле:

$$K_R = K_i^{A \times \Delta T_0 / 10K},$$

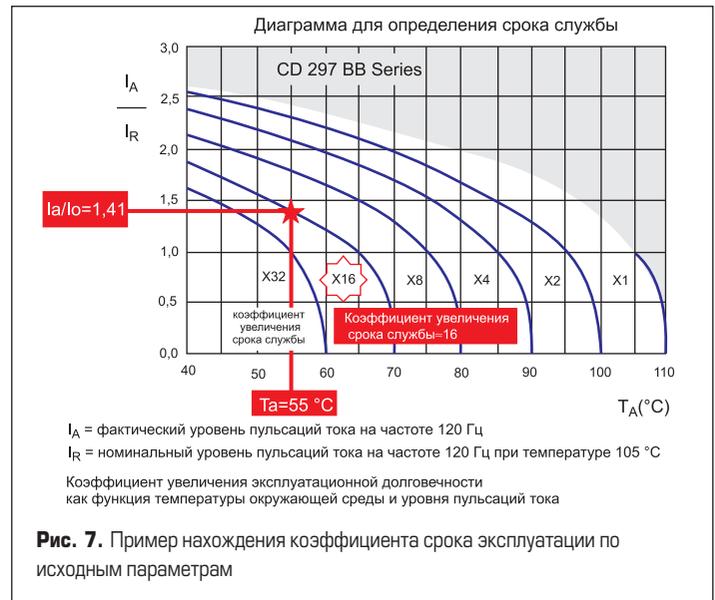
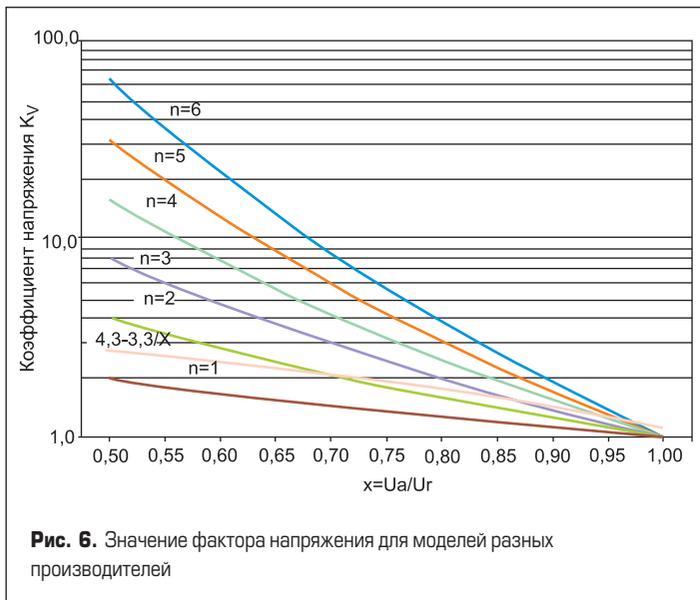
где A = 1 - (I_a/I₀)²; I_a — импульсный ток в выбранном приложении; I₀ — номинальный импульсный ток при максимально допустимой температуре; ΔT₀ — приращение температуры внутри конденсатора (ΔT₀ = 5 К при T₀ = 105 °C и ΔT₀ = 10 К при T₀ = 85 °C); K_i — эмпирический фактор надежности (при T₀ = 105 °C: I > I₀, K_i = 4; I ≤ I₀, K_i = 2; при T₀ = 85 °C K_i = 2).

Фактор напряжения K_V

Для малых конденсаторов с радиальным исполнением выводов основным фактором, определяющим срок эксплуатации, являются потери в электролите, обусловленные температурным режимом (на основании математической модели — уравнении Аррениуса). Таким образом, фактор напряжения K_V для малых конденсаторов принимается равным 1.

Для средних и больших конденсаторов (с выводами под клеммы или под винт) значение приложенного напряжения сказывается на сроке эксплуатации, поскольку присутствие напряжения ниже максимального значения облегчает нагрузку на диэлектрик. С другой стороны, чем выше приложенное напряжение и чем оно ближе к максимально допустимому значению, тем больше расходуется электролита на «самоизлечение» микродефектов в диэлектрике. Таким образом, рабочее напряжение ниже максимально допустимого значения может существенно продлить срок жизни конденсатора [4].

Jianghai оценивает величину вносимого фактора напряжения для конденсаторов с клеммами и под винт на основании эмпирической формулы. Значения напряжения менее половины максимального значения редко применяются на практике, поэтому они не учтены



в данной модели. По сравнению с моделями других производителей, Jianghai использует значения $n = 3$ и $n = 5$, что является средними или умеренными величинами (рис. 6):

$$K_V = (U_A / U_R)^{-n},$$

где U_R — максимальное напряжение; U_A — рабочее напряжение; n — коэффициент, определяемый как:

$$0,5 \leq (U_A / U_R) < 0,8 \rightarrow n = 3,$$

$$0,8 \leq (U_A / U_R) < \text{или} = 1 \rightarrow n = 5.$$

Пример оценки срока эксплуатации конденсатора

Следующий пример показывает, каким образом могут быть применены диаграммы и математическая модель для определения срока эксплуатации конденсатора.

Допустим, что конденсатор серии CD_297_BB на 390 мкФ, 400 В, с максимальной рабочей температурой 105 °С и корпусом 35×45 мм эксплуатируется при температуре окружающей среды 55 °С при импульсном токе 2,51 А RMS на частоте 20 кГц. Рабочее напряжение равно номинальному 400 В, поэтому на срок эксплуатации влияют только импульсный ток и температура. Охлаждение происходит естественным путем за счет конвекции и рассеяния.

Документация на конденсатор содержит значение номинального импульсного тока при 120 Гц и 105 °С, равное 1,27 А RMS, а коэффициент корректировки от частоты равен 1,4 для частот выше 10 кГц и напряжения 315–450 В. Срок эксплуатации для номинальных значений из документации составляет 7000 ч.

Отношение рабочего импульсного тока, с поправкой на частоту, к номинальному импульсному току:

$$I_a / I_0 = (2,51 A_{RMS} / 1,4) / (1,27 A_{RMS}) = 1,41.$$

Из диаграммы срока эксплуатации (рис. 7) находим значение коэффициента, связанного с рабочей температурой и импульсным током, который равен 16.

Проведем оценку срока эксплуатации конденсатора в выбранном приложении:

$$L_X = L_0 \times 16 = 7000 \times 16 = 112\,000 \text{ ч,}$$

или ~13 лет.

В другом случае воспользуемся математической моделью и сравним полученные значения:

$$L_X = L_0 \times K_T \times K_R \times K_V,$$

где $L_0 = 7000$ ч, $T_0 = 105$ °С, $T_a = 55$ °С, $K_i = 4$, $I_a = 2,51 A_{RMS} / 1,4 = 1,79 A_{RMS}$, $I_0 = 1,27 A_{RMS}$, $\Delta T_0 = 5$ К, $U_r = U_a \rightarrow n = 5$,

$$L_X = 7000 \times 32 \times 0,5 \times 1 = 112\,000 \text{ ч,}$$

или 13 лет.

Результат, полученный с помощью диаграмм и математического расчета, совпал.

Заключение

Алюминиевые электролитические конденсаторы очень часто определяют срок эксплуатации электронных устройств. Хорошее понимание основных технических параметров и особенностей данных компонентов необходимо для эффективного проектирования электронной техники с гарантированной надежностью и сроком эксплуатации.

Электрические и температурные параметры электролитических конденсаторов являются определяющими для оценки надежности и срока эксплуатации всего изделия. Разработчикам аппаратуры доступно два способа оценки надежности: с помощью графических диаграмм и с помощью расчета.

Применимость оценочных значений, полученных при расчете или из диаграмм, и показатели надежности будут определяться еще

и спецификой конкретного приложения. Наиболее достоверные результаты оценки надежности будут получены только после консультации с производителем, после подтверждения расчетов и условий эксплуатации с его стороны (особенно для «тяжелых» условий применения).

Приведенный пример показывает метод оценки надежности в конкретных, типичных условиях эксплуатации конденсатора.

Литература

- Both J. Aluminium-Elektrolytkondensatoren // BC Components. 2000. February.
- Gasperi M. L. A Method for Predicting the Expected Life of Bus Capacitors // IEEE Industry Applications Society, Annual Meeting. 1997.
- Mirsky G. Determining end-of-life, ESR, and lifetime calculations for electrolytic capacitors at higher temperatures. // EDN. 2008. August.
- Parler S. G. Deriving Life Multipliers for Aluminum Electrolytic Capacitors // IEEE Power Electronics Society Newsletter. 2004. Vol. 16, № 1.
- Parler S. G. Thermal Modeling of Aluminum Electrolytic Capacitors // IEEE Industry Applications Society Conference. 1999.
- Stiny L. Handbuch passiver elektronischer Bauelemente. Franzis Verlag, Poing. 2007.
- Thiesbürger K. H. Der Elektrolytkondensator. Roederstein, Landshut. 1991.
- Van de Steeg T. Selecting electrolytic capacitors for power supplies // Electronics & Communications Technology. 2001.
- Venet P., Lahyani A., Grellet G., Ah-Jaco A. Influence of aging on electrolytic capacitors function in static converters: Fault prediction method // Eur. Phys. J. AP 5, 71-83. 1999
- <http://www.jianghai-europe.com/>
- Albertsen A. Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation. JIANGHAI EUROPE GmbH.