

Алюминиевые электролитические конденсаторы,

или Еще раз про надежность

Если рассматривать современную аппаратуру широкого, а не специального применения, то мы сталкиваемся с таким парадоксом: в первом приближении нам нет смысла проводить оценку ее надежности. Дело в том, что надежность большинства современных элементов такова, что моральное старение аппаратуры наступает задолго до ее физического износа. Если ранее разработчики радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) буквально бились за надежность, то сейчас наступило время разумного компромисса — надежность не должна стать самоцелью, ее должно быть ровно столько, сколько надо, и без лишних затрат, то есть не в ущерб цене конечной продукции. И здесь разработчик вынужден буквально идти по тонкому льду.

Владимир Рентюк

Rvk.modul@gmail.com

Введение

Существует несколько определений такого понятия, как «надежность», и в зависимости от того, кому задан вопрос — специалисту по статистике, математику или инженеру, — вы получите различный ответ. Поэтому мы, как инженеры, обратимся к стандарту [1], который гласит, что надежность — это свойство объекта сохранять во времени способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. То есть это комплексное понятие, охватывающее все моменты жизненного цикла объекта (или в теме предлагаемой статьи — изделия), так как под объектом может пониматься и конкретный объект, и представитель группы однотипных объектов, в частности взятый случайным образом элемент выборки, партии, серии, генеральной совокупности. Мы же ограничимся двумя

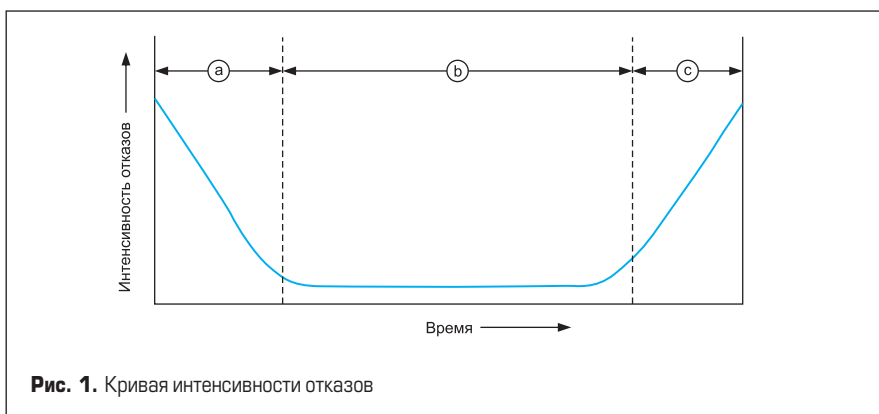
понятиями — такими, как «элемент», то есть объект, для которого в рамках данного рассмотрения не выделяются составные части, и «система», то есть объект, представляющий собой множество взаимосвязанных элементов, рассматриваемых в определенном контексте как единое целое и отделенных от окружающей среды.

Надежность изделия в целом определяется характеристиками надежности входящих в него элементов, а именно их интенсивностью отказов. Так исторически сложилось, что надежность изделий широкого применения, не имеющих резервирования, мы рассматриваем как последовательность элементов, и интенсивность отказов системы может быть сведена к эквивалентному элементу с интенсивностью отказов, равной λ_0 . В этом случае мы имеем:

$$\lambda_0 = \sum_{i=1}^n \lambda_i$$

где λ_i — интенсивность отказов i -го элемента; а n — общее количество последовательных элементов.

Надежность элемента, который не поддается ремонту, в спецификации представляется не через его интенсивность отказов λ_i и не через среднюю наработку между отказами MTBF (Mean time between failures), а наработкой от начала эксплуатации до возникновения первого отказа — MTTF (Mean (operating) time to failures — среднее время до отказа). Параметры λ_i и $MTTF = T_p$ взаимосвязаны: $T_i = 1/\lambda_i$ ¹. Но здесь нужна одна оговорка: эта формула справедлива в устоявшемся режиме, когда время начальной



¹ В англоязычной технической литературе вместо λ часто используется единица вероятной интенсивности отказов электронных компонентов FIT (Failure In Time); 1 FIT равен одному отказу за 1 млрд.

повышенной интенсивности отказов прошло, а время конечной повышенной интенсивности отказов не наступило. Как известно из теории надежности, кривая интенсивности отказов, в англоязычной литературе она известна под термином Bathub Curve (буквально — кривая в виде ванны), имеет вид, приведенный на рис. 1.

И хотя в рамках настоящей статьи нас будут интересовать области b и c кривой, отметим, что область начальной интенсивности отказов a — это фактически производственный брак, вызванный несовершенством конструкции и ошибками при выпуске конденсаторов. У дорожащих своей репутацией изготовителей такие элементы отсеиваются еще на выборочном контроле при приемо-сдаточных испытаниях каждой партии, при наличии бракованной продукции партия изолируется, а сама ситуация рассматривается, как нечто чрезвычайное, требующее принятия самых неотложных мер.

На участке b кривой интенсивности отказов вероятность отказа примерно постоянна. Длительность этого периода и есть, собственно, знакомое нам всем МТТФ. Но здесь срабатывает хорошо всем известное «обжегшись на молоке, дуешь на воду» — и производитель радиокомпонентов в их спецификации часто, для страховки, указывает лишь половину этого времени. Тем не менее и тут есть один важный момент. Некоторые изготовители хитрят в рекламных целях. Так, если интенсивность отказов приведена во взаимосвязи со сроком службы, то это относится к статистическому процентному значению количества компонентов, чьи параметры выходят за пределы заданных технических требований в конце испытания на эксплуатационную долговечность, и ее не следует путать с интенсивностью для случайных отказов.

На участке c — после окончания срока МТТФ-кривая демонстрирует увеличение вероятности отказов. При этом не забываем, что здесь имеется в виду не только отказ элемента как таковой, но и согласно определению стандарта [1] отклонение параметров изделия от заявленных. Это увеличение вероятности отказа обусловлено тем, что элемент достигает своего жизненного предела из-за конструктивных особенностей, например из-за примененных материалов или технологии изготовления, то есть наступает его технологический износ. Вот это и есть та точка, которую разработчик не должен пересечь до времени морального износа проектируемого изделия. Причем, вспоминая то, как мы обжигались на молоке, здесь должен быть предусмотрен некоторый запас.

Одним из самых ранних системных подходов к надежности является справочник армии США “Military Handbook. Reliability Prediction of Electronic Equipment” («Военный справочник. Прогнозирование надежности электронного оборудования»), известный как стандарт MIL-HDBK-217. Он состоит из обширной базы данных по отказам различных компонентов и основан на эмпирическом анализе большого числа эксплуатационных отказов электро-

оборудования, электронных и электромеханических компонентов, осуществленном Мэрилендским университетом. Справочник постоянно обновлялся и совершенствовался вплоть до 1995 года, затем его окончательный вариант был назван «MIL-HDBK-217. Редакция F с Примечанием 2» [2]. В настоящее время стандарт больше не обновляется, но приведенные в нем данные и методики до сих пор не утратили своей актуальности и используются на практике. Основа данной методики именно эксплуатационная надежность, и показатель МТТФ должен быть скорректирован для условий применения элементов, в числе которых учет не только температуры и коэффициентов нагрузки, но и условий эксплуатации и класса или типа аппаратуры.

Отдадим должное: такой подход был реализован в СССР еще в 80-х годах прошлого столетия уже не существующим, но нашедшим своего места в новой России Ленинградским ВНИИРПА им. А. С. Попова. Институтом была проведена масштабная научно-исследовательская работа «Надежность-84» по оценке надежности РЭА широкого применения, основной итог которой — это также введение понятия «эксплуатационная наработка на отказ» [3]. До этого оценка времени безотказной работы ограничивалась учетом заявленной изготовителем наработки на отказ и коэффициентов нагрузки элементов, что, особенно в условиях качества компонентов РЭА в СССР, было, мягко говоря, не совсем корректно. Автор настоящей статьи, работая вторым Главным Конструктором одного из предприятий и отвечая за разработку и внедрение новой техники, принимал участие в НИР «Надежность-84» в части уточнения и внедрения методики.

С 1990-х годов ситуация по оценке и прогнозированию надежности в общем плане мало изменилась. Так, на территории Российской Федерации стандарт по основным положениям и расчету надежности, действующий по настоящее время [4], имеет редакцию 1995 года и в части методики ссылается на устаревшую версию MIL-HDBK-217 в редакции E от 1991 года и столь же древнюю техническую литературу. Это вынуждает изготовителей компонентов для РЭА уточнять методики и предлагать свои решения. Как результат — разработчикам необходимо держать руку на пульсе, все время отслеживая публикуемую информацию, и выбирать методики

применительно к выбранной элементной базе того или иного изготовителя. К счастью, еще остались русскоязычные инженерные технические журналы.

Если мы принимаем за основу, что надежность РЭА широкого применения должна находиться в пределах, определяемых не ее физическим, а моральным старением, то ее повышение не должно быть самоцелью. В этом случае разработчикам необходимо руководствоваться принципом разумной достаточности и по крайней мере предпринимать шаги, чтобы в погоне за призрачной надежностью на свалку не попадали ценные природные ресурсы и в изделия не использовались элементы, производство которых наносит значительный вред окружающей среде. И вот здесь мы опять возвращаемся к вопросу надежности, но уже под другим углом зрения, чтобы в погоне за удешевлением РЭА, решением вопросов экологии и бережного отношения к природным ресурсам с водой не выплеснуть и ребенка.

Принцип разумной надежности — определение слабого звена

Как говорит нам наука, надежность аппаратуры определяется ее самым слабым звеном. А вот экономика в свою очередь подталкивает нас в сторону функционально-стоимостного анализа. Получается такой Тяни-Толкай, персонаж Хью Лофтинга, более знакомый нам по сказке Корнея Чуковского, но и он, как мы помним, действовал слаженно — две головы ему не мешали. Одна голова хорошо, а две лучше. Так и тут.

Самое слабое звено современной РЭА — организация питания, поскольку здесь мы не можем достичь 100%-ной интеграции, наш максимум — это модули в виде гибридных решений, но они дорогие, а потому не всегда подходят для РЭА массового применения, поскольку имеют большую скорость морального старения. Поэтому здесь в основном используются дискретные решения. Чтобы найти слабое звено в слабом звене, в качестве примера давайте посмотрим на оценку надежности простейшего типового изолированного DC/DC-преобразователя малой мощности компании Resom, приведенную в таблице [5].

Из данных, приведенных в таблице, мы увидим, что слабым звеном в условиях нормальной и повышенной температуры среды, кроме,

Таблица. Пример расчета МТБФ по составляющим компонентам для разных температур окружающей среды (T_{amb})

№ п/п	Компоненты	Количество элементов	Интенсивность отказов ($10^{-6}/ч$) при $T_{amb} = +25^{\circ}C$	Интенсивность отказов ($10^{-6}/ч$) при $T_{amb} = +85^{\circ}C$
1	Транзисторы	2	0,0203	0,0609
2	Диоды	2	0,1089	0,5443
3	Резисторы	3	0,0370	0,1716
4	Конденсаторы	5	0,1699	1,7000
5	Дроссель	1	0,2256	1,9200
6	Плата, выводы	2	0,0092	0,0092
Общая интенсивность отказов $10^{-6}/ч$			0,5708	4,4060
МТБФ, ч (по MIL-HDBK-217F)			1 751 927	226 963
Условия оценки	Вход		Номинальное напряжение	Номинальное напряжение
	Выход		Полная нагрузка	Полная нагрузка

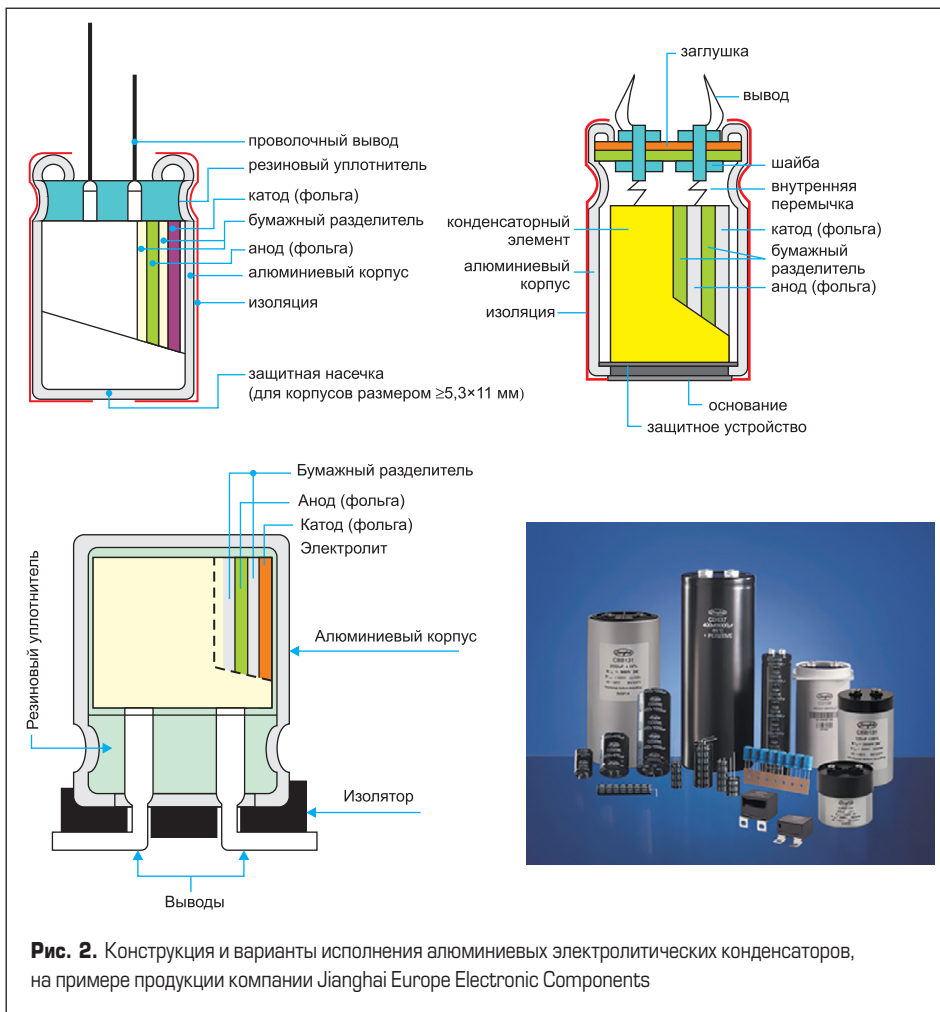


Рис. 2. Конструкция и варианты исполнения алюминиевых электролитических конденсаторов, на примере продукции компании Jianghai Europe Electronic Components

естественно, трансформатора с его обмотками из микропровода, являются конденсаторы. В первую очередь речь здесь идет об электролитических конденсаторах в цепях питания, без которых современная высоко интегрированная РЭА обойтись не может и которые будут использованы невзирая на дискретное или модульное исполнение преобразователя. Так что именно эти элементы, учитывая их коли-

чество, будут критическими для надежности конечного продукта.

Далее в дело вступает функционально-стоимостной анализ, который нам говорит, что при заданной лимитной цене изделия и учитывая скорость морального старения, мы должны использовать самый дешевый вариант решения, даже в ущерб долгосрочной надежности. И такой вариант есть — это алю-

миниевые электролитические конденсаторы. Использовать такие конденсаторы никто не отказывается, поскольку их свойства уникальны. Как минимум это высокая удельная емкость, отсутствие падения емкости при наличии постоянного напряжения (чем грешат керамические многослойные конденсаторы) и цена, которая намного ниже его конкурентов, например полимерных или танталовых (ниобиевые тут вообще вне конкуренции, но это уже экзотика, а пленочные конденсаторы в рассматриваемом случае проигрывают по максимальной емкости, не говоря уже об удельной, ну и по габаритам). Кроме того, примитивные алюминиевые электролитические конденсаторы обладают весьма полезным свойством — самоэкранированием, что при их использовании в ряде случаев помогает в решении проблем с электромагнитными помехами (ЭМП).

Но в то же время у недорогих алюминиевых электролитических конденсаторов обычного, а не специального исполнения самая низкая надежность в сравнении со всеми остальными компонентами РЭА широкого применения, а также весьма высока уязвимость к перегрузкам по току и напряжению. Причем их надежность, как и любого элемента, зависит от уровня приложенного напряжения, рабочего тока и особенно от температуры, причем не только и не столько внешней. Так что просто взять любой алюминиевый электролитический конденсатор из имеющихся под рукой и поставить его в схему источника питания — не получится. Здесь нужна инженерная оценка.

Конструкция и особенности алюминиевых электролитических конденсаторов

Для того чтобы понять, с чем мы имеем дело, давайте вспомним технологию изготовления и заглянем внутрь типового алюминиевого электролитического конденсатора. Электролитический конденсатор — это не последнее слово в радиоэлектронике. Его история началась с открытия, сделанного «польским Эдисоном» Каролом Поллаком (Karol Pollak) в далеком в 1896 году, принципа его работы, а первый патент на электролитический конденсатор на основе алюминиевой фольги и тетрабората натрия был получен в 1897 году. Как известно, емкость конденсатора зависит от трех составляющих, и, чтобы ее увеличить, есть три пути: повысить относительную диэлектрическую проницаемость, что напрямую связано с материалом диэлектрика для его изготовления, увеличить эффективную площадь обкладок и уменьшить расстояние между ними. Идея, заложенная в основу простейшего электролитического конденсатора, первоначально заключалась в том, чтобы увеличить площадь обкладок и кардинально уменьшить расстояние между самими обкладками. Для этого, собственно, и использовался электролит, который выполнял роль одной из обкладок и помогал сформир-

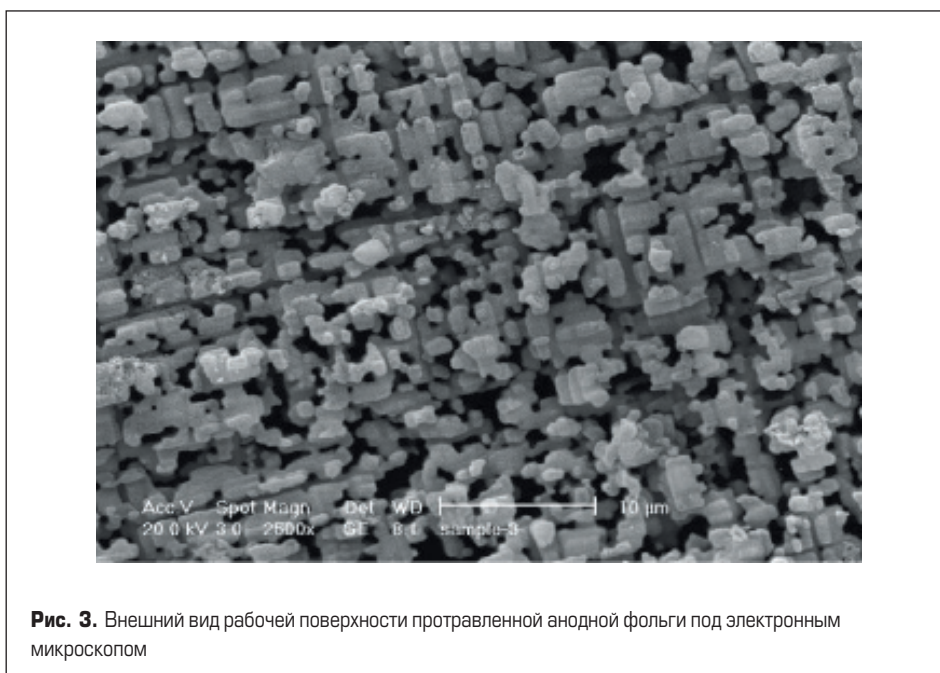


Рис. 3. Внешний вид рабочей поверхности протравленной анодной фольги под электронным микроскопом

ровать слой разделительного диэлектрика на аноде. С тех пор идея осталась, менялась только технология и усовершенствовалась конструкция (рис. 2) [6].

В современных алюминиевых электролитических конденсаторах для анода и катода используется специально протравленная алюминиевая фольга высокой степени чистоты толщиной 20–100 мкм. Протравка, в сравнении с его геометрической поверхностью, увеличивает физическую площадь поверхности материала анода до коэффициента 140 (рис. 3) [7]. Таким образом решается задача увеличения площади обкладок.

Далее анодная фольга подвергается анодному окислению, или формованию, то есть созданию на ее поверхности диэлектрического слоя, состоящего из оксида алюминия (Al_2O_3), который наносится поверх анодной фольги посредством электрохимического процесса. Качество формования, а именно однородность и полнота покрытия площади поверхности, является крайне важным фактором для достижения заданных электрических характеристик, таких как номинальная емкость, рабочее напряжение, допустимый ток пульсаций и ток утечки, а также надежности конденсатора в процессе его эксплуатации. Чем выше напряжение формования по сравнению с номинальным напряжением, тем меньше вероятность диэлектрического пробоя. Так, типовые значения отношения напряжения формования к номинальному напряжению для конденсаторов компании Jianghai Europe Electronic Components GmbH (далее — Jianghai) находятся в диапазоне от 1,25 для низковольтных и до 1,6 для высоковольтных конденсаторов. При этом толщина диэлектрического слоя составляет приблизительно 1,4 нм/В, что для электролитического конденсатора с рабочим напряжением 450 В составляет около 900 нм, а это менее 1/100 толщины человеческого волоса [7].

При изготовлении конденсаторов еще один важный момент, влияющий на надежность, — так называемое выжигание, направленное на устранение возможных дефектов изготовления, а именно контактов по краям рулонов анодной и катодной фольги. Проблема здесь в том, что фольга протравливается большими заготовками, а потом разрезается на ленты необходимой длины и ширины, которые сматываются с разделительным сепаратором (бумагой, пропитанной электролитом) и формируют тело конденсатора (рис. 2). В спецификациях вы обычно не найдете данных по напряжению формования, поэтому использовать этот параметр в качестве показателя надежности затруднительно. Однако, уточняя информацию у поставщика электролитических конденсаторов и сравнивая их по току утечки, можно сделать выводы в отношении особенностей технологии, используемой их производителем. С учетом изменения политики по отношению к ресурсам некоторые производители при изготовлении конденсаторов широкого применения используют уменьшение напряжений формования. С точки зрения обеспечения качества, компа-

нии, дорожащие своим гудвилл, в том числе и Jianghai, считают такие меры по оптимизации затрат неприемлемыми [7].

Что же влияет на надежность, как мы определили, критического для большинства современной РЭА массового спроса, широко используемого элемента — алюминиевого электролитического конденсатора, и с какими проявлениями и причинами отказа мы сталкиваемся? Причины и проявления отказов весьма детально рассмотрены и проанализированы в публикации [7], представляемой компанией Jianghai. Мы же в своем общем рассмотрении ограничимся тремя факторами. Первый — это его природа, второй — его конструктивное воплощение, третий — условия применения.

На природу мы повлиять не можем, собственно, из-за нее мы его и выбрали. Алюминиевые электролитические конденсаторы, сохраняя компактные размеры, работают в диапазоне напряжений 6,3–700 В плюс имеют широкий диапазон электрических емкостей от 1 мкФ и до сотен тысяч микрофарад. Что касается конструктивного исполнения, тут у нас возможностей больше. И главное помнить, что экономия должна быть разумной, а желание «гоняться за дешевизной», как в известной сказке, может иметь далеко идущие и весьма печальные последствия. Дело в том, что алюминиевые электролитические конденсаторы в некоторых решениях (причем необязательно высоковольтных) и при определенных условиях отказа (коротком замыкании или переполусовке из-за ошибок в маркировке) имеют склонность к взрыву. Однажды увидев такое, запомнишь навечно. Можете поверить горькому опыту автора, полученному при применении электролитических конденсаторов советского качества: два из таких отказов в серийно выпускаемой аппаратуре закончились травмами.

Кроме того, алюминиевые электролитические конденсаторы склонны к естественной потере электролита, вызванной электрохимическими реакциями в диэлектрическом слое и диффузией через изоляционный слой. Высыхание электролита приводит к утрате конденсатором емкости, что также является отказом. А если к этому добавляются и конструктивные недостатки, например некачественная герметизация, то может произойти более ранний, чем естественное моральное старение, выход из строя конечной РЭА.

Жидкий электролит — ахиллесова пята алюминиевых электролитических конденсаторов. Протекание электрического тока через электролит происходит за счет ионов. Повышение температуры электролита увеличивает подвижность носителей заряда, что в свою очередь уменьшает эквивалентное последовательное сопротивление конденсатора, играющего важную роль в его эксплуатационной надежности. Именно температура кипения электролита определяет верхний предел рабочей температуры и, соответственно, накладывает ограничение

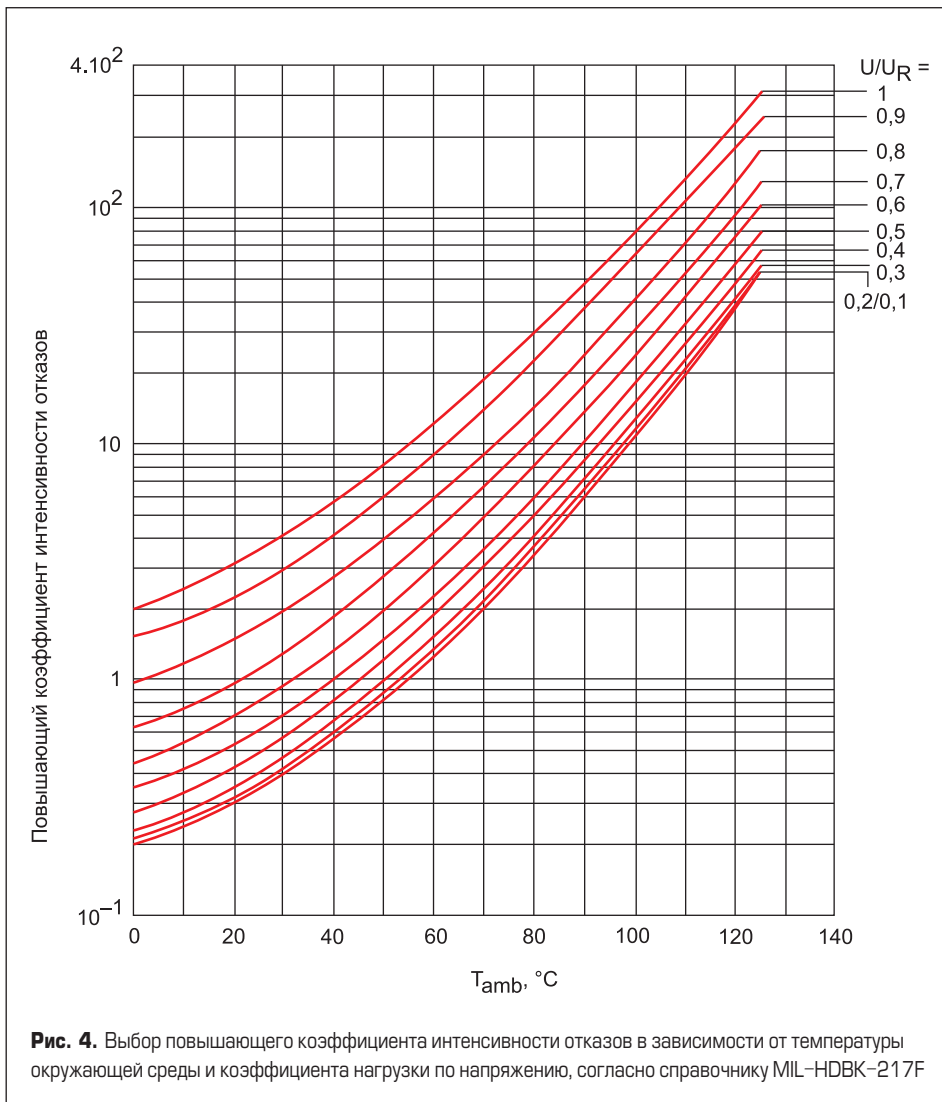
на его внутренний самогрев, вызванный током пульсаций. Вот теперь мы подошли к проблемам применения алюминиевых электролитических конденсаторов и их связи с надежностью.

Электролитические конденсаторы и общие принципы надежности

Как уже было сказано, время не стоит на месте и ведущие компании — изготовители компонентов РЭА сами взялись за решение вопросов прогнозирования надежности своих компонентов. Хорошо это или плохо — однозначно сказать сложно. С одной стороны, у изготовителей больше информации о поведении их элементов, как при изготовлении, так и с мест их эксплуатации. Но с другой — лучше бы этим занимались независимые эксперты, чтобы не получилось, как в известном анекдоте про игру в карты («джентльменам у нас верят на слово»). Впрочем, учитывая число поставщиков и номенклатуру компонентов, это просто нереально. По сведениям компании Jianghai, численная величина интенсивности отказов компонентов, приведенная в MIL-HDBK-217F, для текущих версий алюминиевых электролитических конденсаторов широкого применения отличается от реальной эксплуатационной надежности в 10–100 раз [7]. Однако данные справочника и приведенные в нем схемы расчетов дают много важной информации. Например, на основании справочника можно получить представление о зависимости интенсивности отказов от температуры окружающей среды и коэффициента нагрузки по напряжению (рис. 4) [7].

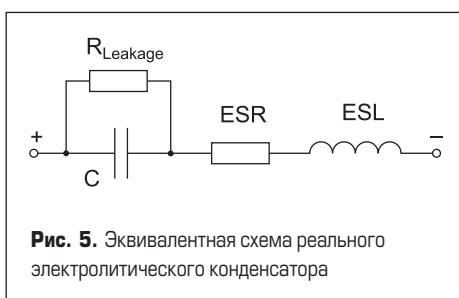
Для того чтобы получить достоверные данные по надежности, потребуются огромные затраты времени и ресурсов, так как для этого понадобится или огромное время, или огромная выборка. Потому большинство ответственных компаний, в том числе и Jianghai, вместо этого используют информацию о фактических эксплуатационных отказах вместе с типовыми условиями применения (температура, ток пульсаций, рабочее напряжение), получая такие сведения от клиентов. Исходя из этой информации и данных по объему выпуска, учитывая, естественно, и результаты лабораторных испытаний, можно провести оценку интенсивности отказов при вполне разумных затратах. Порядок величин оцениваемых интенсивностей отказов в эксплуатационных условиях находится в пределах 0,5–20 интенсивности отказов [7].

Как уже было сказано, применительно к интересующим нас алюминиевым электролитическим конденсаторам основными факторами, так или иначе влияющими на их надежность, являются ток пульсаций, температура и рабочее напряжение по отношению к номинальному. Последние две характеристики как раз и учитывает график, приведенный на рис. 4, а температура является производной величиной от тока



пульсаций и температуры окружающей среды. При этом здесь часто допускается ошибка, когда за максимальную температуру среды, где используется конкретный элемент, принимается максимально допустимая рабочая температура PЭА, в которой этот элемент установлен. В чем же тут ошибка? Ну, представим, что наш конденсатор конструктивно размещен рядом с радиатором инвертора или вплотную к силовому дросселю DC/DC-преобразователя даже средней мощности. А с другой стороны он, что вполне возможно, попадает в воздушный поток системы принудительного охлаждения.

Область применения большинства алюминиевых электролитических конденсаторов ограничивается частотами до 150 кГц. Это связано с особенностями их природы



и конструкции. К тому же более высокие частоты, как правило, не требуют конденсаторов столь больших емкостей. Основная причина, ограничивающая использование электролитических конденсаторов, состоит в том, что его полное сопротивление не является чисто емкостным, а носит комплексный характер. Упрощенная эквивалентная схема конденсатора показана на рис. 5.

Здесь:

- ESL — это эквивалентная последовательная индуктивность (Equivalent series inductance), образованная индуктивностью намотки обкладок и исполнением выводов конденсатора.
- $R_{Leakage}$ — сопротивление, определяющее ток утечки и характеризующее качество и состояние диэлектрического слоя.
- C — емкость конденсатора.
- ESR — эквивалентное последовательное сопротивление (Equivalent series resistance), которое равно сумме трех сопротивлений $R_0 + R_d + R_e$, где:
 - R_0 — неизменяемое постоянное сопротивление, равное 10 мОм [9];
 - R_d — зависящее от частоты сопротивление диэлектрического слоя

$$R_d(f) = \frac{tg\delta}{2\pi fC}$$

($tg\delta$ — потери, f — частота, C — фактическая, а не номинальная емкость конденсатора);

- R_e — зависящее от температуры сопротивление раствора электролита в комбинации с сепаратором, может быть оценено по реальной внутренней температуре конденсатора относительно его известного значения при температуре +25 °C по формуле [9]:

$$R_e(T) = R_e(25^\circ C) \times 2^{\left[\frac{T-25}{A}\right]}$$

В состав этой формулы входят два параметра A и B , согласно [9], их типовые значения для электролитических конденсаторов с электролитами на основе этилен-гликоля составляют соответственно 40 и 0,6.

Как показано выше, ESR имеет зависимость от температуры и частоты. Эта зависимость разная для различных типов конденсаторов. Как правило, при увеличении частоты ESR асимптотически уменьшается до некоторого предельного значения, а при уменьшении температуры увеличивается. Для упрощения использования такого важного для разработчиков PЭА параметра, как ESR электролитического конденсатора, учитывая его частотную и температурную и даже, как уже было сказано, временную зависимость, компания Jianghai в дополнение к типовым значениям ESR приводит еще и его максимальные значения. Это помогает при выборе компонентов и оценке их надежности в том или ином конкретном приложении.

Дело в том, что эквивалентное последовательное сопротивление и является тем генератором тепла, повышающим температуру внутри конденсатора, на нем при наличии тока пульсаций рассеивается мощность и в соответствии с законом Джоуля — Ленца выделяется тепло. Увеличение ESR приводит к повышению рассеиваемой мощности конденсатором, повышению его внутренней температуры и деградации параметров.

Итак, изготовители компонентов для PЭА сейчас сами решают вопросы прогнозирования надежности своих компонентов, а разработчики вынуждены сами отслеживать такую информацию. В качестве примера относительно простой методики, использующей данные по применению алюминиевых электролитических конденсаторов конкретного типа и конкретного производителя, рекомендуется публикация [6]. Ее достоинство — простота расчета, а недостаток — необходимость исследования прототипа устройства и ряд упрощений. Есть и более тщательные подходы к решению интересующей нас в рамках настоящей статьи проблемы, которые можно использовать еще до непосредственного создания прототипа конечной PЭА [8], на котором потребовалось бы уточнить уже чисто конструктивные моменты. Не стараясь объять необъятное, остановимся еще на одной методике, предлагаемой компанией Jianghai [9].

Вариант методики прогнозирования надежности алюминиевых электролитических конденсаторов от компании Jianghai

В большинстве приложений, в которых используются электролитические конденсаторы, имеется переменная составляющая, ее, собственно, и необходимо с их помощью эффективно подавить. Эта переменная составляющая называется пульсациями напряжения, которые вызывают пульсацию тока, а ток в свою очередь, воздействуя на ESR конденсатора, приводит к его самонагреву. Здесь нас будет интересовать среднеквадратичное значение тока пульсаций, поскольку его форма не является синусоидальной, так что в нагреве конденсатора участвуют все гармонические составляющие тока [9]. На практике из-за сложности вычисления, связанной именно с формой тока, применяются результаты моделирования. Почему бы ток пульсаций в конденсаторе просто не замерить на макете? Если вы про такое прочитаете, то это от лукавого. Внесение даже 100 мОм в цепь конденсатора из-за соизмеримости с ESR меняет картину до неузнаваемости. Здесь поступают как раз с точностью до наоборот — измеряют превышение температуры и, зная ESR, рассчитывают среднеквадратичный ток пульсаций.

Предлагаемая в [9] формула для расчета среднеквадратичного тока имеет вид (здесь и далее условные обозначения, кроме оговоренных особо, соответствуют приведенным в [9]):

$$I_A = \sqrt{\left(\frac{I_{f1}}{F_{f1}}\right)^2 + \left(\frac{I_{f2}}{F_{f2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{I_{fn}}{F_{fn}}\right)^2},$$

где: $I_1 \dots I_n$ — среднеквадратичные значения токов пульсаций на частотах $f_1 \dots f_n$; $F_{f1} \dots F_{fn}$ — поправочный коэффициент для токов пульсаций на частотах $f_1 \dots f_n$, то есть

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

здесь $ESR(f_0)$ — это значение ESR на частоте, выбранной в качестве базовой для конденсатора конкретного типа.

Как можно видеть, при расчете имеется одна тонкость: для различных частот, исходя из частотной зависимости ESR, необходимо применить поправочные множители. Для простоты использования некоторые изготовители в своих спецификациях вместо значений ESR для различных частот приводят поправочные множители для токов определенных частот, сводя их в таблицы. Поведение ESR зависит и от номинального напряжения, так что в некоторых спецификациях приведены таблицы поправочных множителей для определенных диапазонов рабочих напряжений. В качестве примера можно взять спецификацию на конденсатор серии CD 297 BB компании Jianghai [10]. Здесь необходи-

мые данные приведены в таблице Multiplier for Ripple Current, Frequency Coefficient («Зависимость поправочного коэффициента для тока пульсаций от частоты»).

В процессе работы температура электролитического конденсатора поднимается выше температуры среды, что связано с потерями мощности. Температура внутренней части электролитического конденсатора превышает температуру его внешней поверхности. В установившемся режиме приложенная электрическая мощность P_{el} соответствует тепловой мощности P_{th} , рассеиваемой в окружающую среду. Способность излучать тепло в инфракрасном спектральном диапазоне основано на свойствах материала и площади поверхности A электролитического конденсатора. По отношению к абсолютно черному телу электролитический конденсатор с внешней изоляцией (рис. 2) имеет коэффициент лучистой теплоотдачи $\epsilon = 0,85$, в то время как конденсатор без изоляции имеет ϵ всего лишь 0,4 [9].

Тепловое излучение подчиняется закону Стефана — Больцмана:

$$P_{rad} = \epsilon \sigma A (T_s^4 - T_a^4) = h_{rad} \times A \times \Delta T,$$

где: ϵ — коэффициент лучистой теплоотдачи для изолированного конденсатора 0,85; σ — постоянная Стефана — Больцмана, $5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$; A — площадь поверхности электрического конденсатора (без изоляции); $h_{rad} = \epsilon \sigma (T_s + T_a)(T_s^2 + T_a^2)$ — коэффициент теплоотдачи лучистым излучением; T_s — температура поверхности конденсатора; T_a — температура окружающей среды; $\Delta T = T_s - T_a$ — разность температур поверхности конденсатора и окружающей его среды.

Для естественной конвекции согласно [9] имеем:

$$P_{conv} = h_{free} \times A \times \Delta T.$$

Здесь

$$h_{free} = 1,32 \times \left(\frac{\Delta T}{D}\right)^{0,25}$$

коэффициент теплоотдачи при естественной конвекции; D — диаметр электролитического конденсатора.

Для естественной конвекции совместно с тепловым излучением численные значения коэффициента полного теплопереноса $h_{total} = h_{free} + h_{rad}$ согласно [9] находятся в пределах $13,5 - 17 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-1}$. В случае принудительного воздушного охлаждения со скоростью потока воздуха v (в м/с) общий коэффициент теплопереноса h_{total} может быть аппроксимирован как $h_{total} \cong 5 + 17 \times (v + 0,1)^{0,66}$.

Естественно, при более эффективном охлаждении конденсатор можно использовать на более высоких токах пульсаций. Поправочный коэффициент можно взять из графика, приведенного на рис. 6.

Кроме рассмотренных вариантов, для охлаждения можно использовать медные проводники печатной платы, но такой подход может быть применим только к электролитическим конденсаторам небольшой емкости с аксиальными выводами. Для конденсаторов большой мощности для отвода тепла в ряде случаев могут использоваться охлаждающие жидкости.

Недостаток многих методик прогнозирования надежности алюминиевых электролитических конденсаторов заключается в том, что они не учитывают их внутреннюю температу-

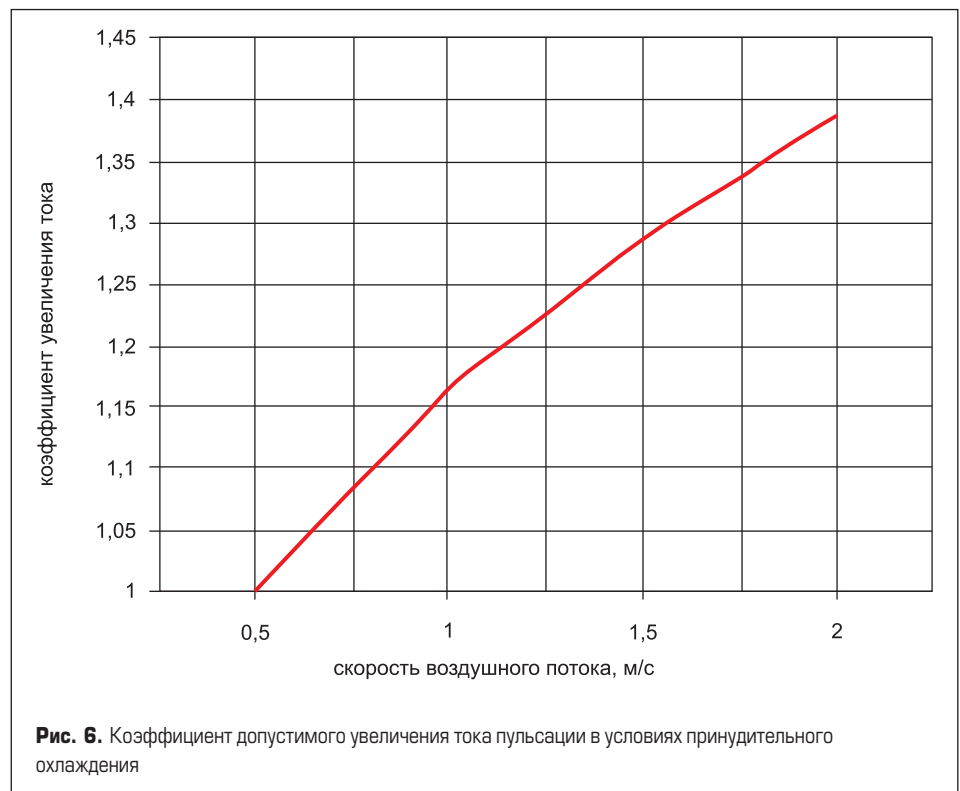
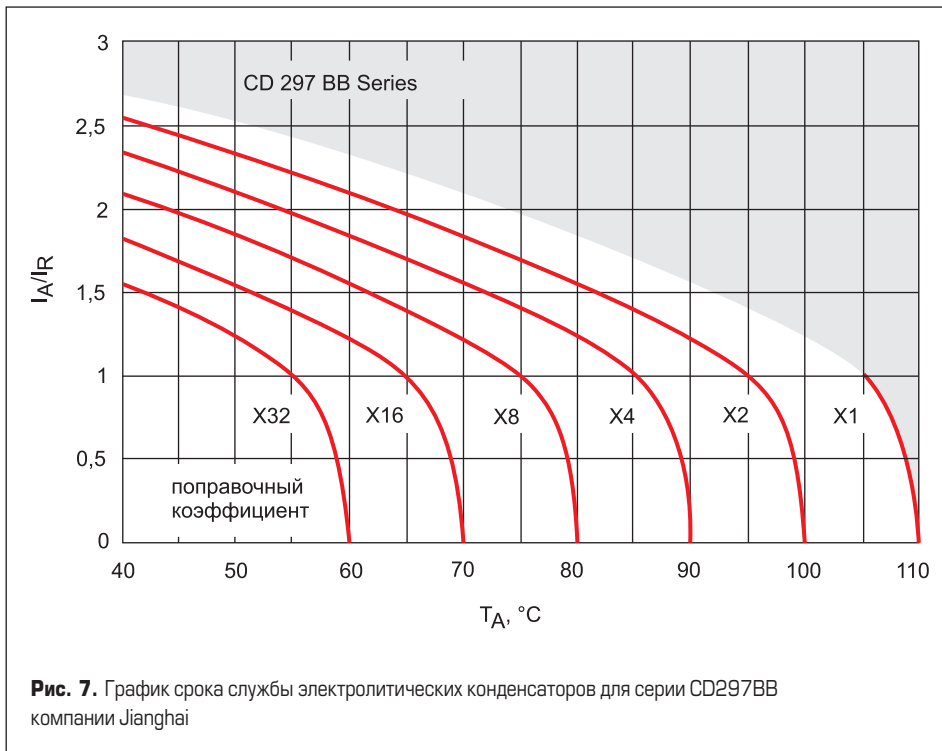


Рис. 6. Коэффициент допустимого увеличения тока пульсации в условиях принудительного охлаждения



ру, а, как мы видим, именно она влияет на его надежность. Внутренняя температура алюминиевых электролитических конденсаторов может быть предварительно оценена по методике [8], но здесь мы становимся заложниками коэффициентов, определенных изготовителем для своих конденсаторов, и насколько они универсальны — сказать трудно. Можно, конечно, поступить по известному принципу «на безрыбье и рак рыба». Знание внутренней температуры позволяет использовать для прогнозирования надежности стандартные методики, а уменьшение внутренней или внешней температуры конденсатора всего на 10 °C при прочих равных условиях приводит к двукратному повышению расчетного срока службы [6, 8].

В рассматриваемой методике [9] расчет внутренней температуры основан на знании тепловых сопротивлений. При этом индивидуальные эквивалентные тепловые сопротивления каждого из путей отвода тепла могут быть суммированы в одно эквивалентное тепловое сопротивление R_{th} . Исходя из этого разность температур ΔT электролитического конденсатора с площадью поверхности A при протекании через него среднеквадратичного тока пульсаций I можно определить как:

$$\Delta T = I^2 \times ESR \times R_{th}, \text{ где } R_{th} = 1/(h_{total} \times A).$$

А температура внутренней части T_c может быть с достаточной точностью оценена как:

$$T_c = \Delta T \frac{R_{th}^{insite}}{R_{th}} + T_s,$$

где суммарное тепловое сопротивление в осевом и радиальном направлении численно составляет примерно

$$R_{th}^{insite} \cong (1-3) \text{ К/Вт}.$$

Учитывая важность знания внутренней температуры, особенно когда дело касается мощных конденсаторов, компания Jianghai по отдельной заявке предоставляет электролитические конденсаторы с уже предварительно установленной термопарой.

Если вы остановили свой выбор на алюминиевых электролитических конденсаторах компании Jianghai, то сможете дать оценку их надежности в вашей РЭА, используя разработанную компанией вычислительную модель срока службы и приведенные в спецификациях графики срока службы Multiplier for Lifetime, Lifetime Diagram (для справки [10]). Пример такого графика приведен на рис. 7.

В качестве входных данных модели срока службы (аналогично методике [2] с рядом уточнений на основании статистических данных, накопленных компанией Jianghai) используют некоторые параметры, характерные для данного типа электролитических конденсаторов, и учитывают конкретную температуру среды, окружающей конденсатор, его нагрузку по току пульсаций и фактически приложенное напряжение (опять-таки, не забываем — с учетом пульсаций). В случае вынужденного охлаждения необходимо соответствующим образом скорректировать возможность нагрузки тока пульсаций согласно графику, приведенному на рис. 6.

Для расчета прогнозируемого срока службы L используется следующая модель:

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

где:

- L_0 — срок службы согласно спецификации при номинальных значениях тока пульсаций и максимальной рабочей температуре;

- K_T — коэффициент, учитывающий влияние температуры среды,

$$K_T = 2^{\frac{T_0 - T_A}{10K}},$$

здесь T_0 — это максимальная рабочая температура, а T_A — температура среды, в которой находится данный конденсатор;

- K_R — коэффициент, предусматривающий уровень тока пульсаций, учитывающих внутренний самонагрев:

$$K_R = K_i \frac{\Delta T_0}{10K}.$$

Здесь:

$$A = 1 - \left(\frac{I_A}{I_R} \right)^2,$$

I_A — среднеквадратичный ток пульсаций в конкретном приложении, I_R — номинальный среднеквадратичный ток пульсаций при максимальной рабочей температуре, ΔT_0 — повышение внутренней температуры электролитического конденсатора (обычно 5 К при $T_0 = +105$ °C и 10 К при $T_0 = +85$ °C), K_i — эмпирический коэффициент, выбираемый из следующих условий: для конденсаторов категории +105 °C при условии $I > I_R$ $K_i = 4$, при условии $I < I_R$ $K_i = 2$, для конденсаторов категории +85 °C $K_i = 2$;

- K_V — коэффициент, учитывающий влияние фактически приложенного напряжения. Для малогабаритных алюминиевых электролитических конденсаторов с радиальными выводами согласно модели [9] $K_V = 1$. Для конденсаторов среднего и большого размеров с защелкивающимися и винтовыми терминалами

$$K_V = \left(\frac{U_A}{U_R} \right)^{-n},$$

здесь: U_A — напряжение на конденсаторе, U_R — номинальное рабочее напряжение согласно спецификации, n — показатель степени функции, выбираемый из условий $n = 2,5$, если

$$0,6 \leq \frac{U_A}{U_R} \leq 1$$

$n = 3,59$, если

$$0 \leq \frac{U_A}{U_R} \leq 0,6.$$

Пояснение выбора показателя степени и сравнение с вариантами, предлагаемыми другими поставщиками, приведено в [9].

Для иллюстрации практического применения данной методики в [9] предложен практический пример оценки надежности использования в реальных условиях конденсатора серии CD 297 BB [10]. Если же необходимо быстрое оценочное определение срока службы (useful life), который ГОСТ 27.002-2015 [1] определяет как «календарная продолжительность эксплуатации от начала эксплуатации

объекта до момента достижения предельного состояния», то можно воспользоваться графическим методом. Для этого на графике срока службы (рис. 7) в точке пересечения температуры окружающей конденсатор среды и отношения тока пульсаций I_A/I_R находят приближенное значение множителя срока службы. Затем на этот множитель увеличивается приведенное в спецификации значение срока службы при указанной температуре. И хотя в [9] утверждается и приводится в качестве примера полное совпадение расчета срока службы по вычислительной модели с упрощенным вариантом, лучше для принятия окончательного решения остановиться на первом способе.

Важно помнить и о том, что в изделии имеется не один конденсатор, поэтому интенсивности отказов необходимо суммировать, о чем было сказано в самом начале статьи, и в зависимости от того, подлежит ли проектируемое нами устройство ремонту или нет, определить среднюю наработку между отказами МТБФ или среднюю наработку до отказа МТТФ. Оба показателя не представляют собой гарантированный минимальный срок до появления отказа. Вероятность безотказной работы определяется формулой $e^{-T/MTTF}$. Если время T равно значению МТТФ, то уравнение сводится к значению e^{-1} , что дает нам вероятность 37%. Это можно интерпретировать так: при $T = \text{МТТФ}$ будут работоспособны только 37% наших изделий, или вероятность, что все наши изделия будут по-прежнему работоспособны к концу периода времени T , равного МТТФ, составляет только 37%. Если мы упрощаем себе задачу и ограничиваемся оценкой потенциально самого ненадежного в нашем изделии компонента — алюминиевого электролитического конденсатора, то, получив фантастические цифры МТТФ = 13 лет, необходимо перевести их в приемлемую вероятность к прогнозируемому маркетологами моменту морального старения проектируемого изделия. Если полученная таким оценочным путем наработка на отказ при заданном риске превышает заказанную маркетологами, то в этом случае можно со спокойной душой и чистой совестью переходить к более дешевым конденсаторам. Естественно, не забыв перепроверить расчеты надежности с вновь выбранными компонентами.

Заключение

Задача разработчика РЭА широкого применения — с одной стороны, обеспечить ее безотказное функционирование в течение времени, за которое по прогнозу маркетологов изделие морально устареет, что позволит сэкономить на его гарантийном обслуживании, а с другой стороны, не вложить в его надежность излишних материальных средств, чтобы не проиграть на рынке дышащим в спину конкурентам. Или вы действительно считаете, что спроектированный вами продукт, именно такой, каким вы его видите, будет использоваться 15–20 лет?



Рис. 8. Судьба морально устаревшей РЭА

Думаю, что это нереально даже для априори требующей высокой надежности, правда, уже с другой целью, телекоммуникационной аппаратуры и аппаратуры специального назначения. Ну разве что вы разрабатываете новый Pioneer-10, который должен проработать в условиях открытого космоса 32 года, или не менее легендарный, запущенный в 1977-м и действующий до сих пор Voyager-1 [11].

Наш мир — это мир потребления, и с этим нечего не поделаешь. Как пример можно привести сохранившийся у многих знаменитый мобильный телефон Nokia-1100. Гарантирую, что он работает до сих пор, ну если только в нем надо заменить аккумуляторную батарею. Но за время, прошедшее с 2005 года — пика его популярности, вы, наверное, сменили уже как минимум три модели и подумываете, а не купить ли вот этот крутой новенький смартфон? Отличие его от имеющегося у вас заключается лишь в том, что он новый. И где все эти миллионы сверхпопулярных и в большинстве вполне рабочих Nokia-1100? А вот здесь на свалке (рис. 8), там же, где и миллионы широко разрекламированных телевизоров HD-Ready, MP3-плееров, CD-проигрывателей и т. д. и т. п. Конечно, в российской глубинке и сегодня могут работать сто раз отремонтированные советские «Рубины» и «Электроны», но мы говорим об общей мировой тенденции. Так давайте будем использовать принцип разумной надежности, не наживаться на потребителях, получать свою долю прибыли на рынке и при этом с умом расходовать ценные ресурсы, не используя там, где в этом нет насущной необходимости, дорогие высоконадежные элементы, изготовление которых уже само по себе наносит вред окружающей среде. ■

Литература

1. ГОСТ 27.002-2015 «Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения». www.docs.cntd.ru/document/1200136419.

- Military Handbook Reliability Prediction of Electronic Equipment MIL-HDBK-217F. www.nebulos.mit.edu/projects/reference/MIL-STD/MIL-HDBK-217F-Notice2.pdf
- Справочный материал НИР «Надежность-84» ВНИИРПА им. А. С. Попова. Руководитель Дементьев В. В. № Гос. рег. У97903, Л., 1984.
- ГОСТ 27.301-95 «Надежность в технике (ССНТ). Расчет надежности. Основные положения». www.docs.cntd.ru/document/1200001365
- Roberts S. DC/DC BOOK OF KNOWLEDGE: Practical tips for the User. Third Edition, 2017. www.recom-power.com/emea/downloads/bok.html
- Рентюк В. Зависимость времени наработки на отказ электролитических конденсаторов от реальных условий их эксплуатации // Компоненты и технологии. 2014. № 7.
- Dr. Albertsen A. Reliability of Electrolytic Capacitors. 2012-10-30 Jianghai Europe Electronic Components GmbH. www.jianghai-europe.com/wp-content/uploads/2-Jianghai-Europe-E-Cap-Reliability-AAL-2012-10-30.pdf
- Рентюк В. Проблема оптимального выбора комбинации входных и выходных конденсаторов для подавления пульсаций и помех DC/DC-преобразователей. Часть 2 // Компоненты и технологии. 2016. № 12.
- Dr. Albertsen A. Electrolytic Capacitor Lifetime Estimation. 2012-10-30 Jianghai Europe Electronic Components GmbH. www.jianghai-europe.com/wp-content/uploads/1-Jianghai-Europe-E-Cap-Lifetime-Estimation-long-AAL-2016-02-25.pdf
- CD 297 BB Series Jianghai Europe Electronic Components GmbH 2017 v1. www.jianghai-europe.com/wp-content/uploads/JE18_CD_297_BB.pdf
- www.innotechnews.com/reviews/521-voyadzher-i-pioner-sputniki-pokinuvshiesolnechnuyu-sistemu