

Продолжение. Начало в № 2'2015

Вопросы надежности и срока службы алюминиевых электролитических конденсаторов при аномальных напряжениях

Алексей ПОПОВ
Сергей ПОПОВ

В предыдущей части статьи рассмотрены основные факторы, определяющие надежность и срок службы алюминиевых электролитических конденсаторов при напряжениях, не выходящих за пределы диапазона (0... $U_{ном}$). Показано, что в этих условиях алюминиевые электролитические конденсаторы имеют высокую надежность, особенно если они применяются с достаточным запасом относительно максимально допустимой рабочей температуры наиболее нагретой области конденсатора. При этом отказы конденсаторов носят параметрический характер, то есть проявляются как постепенное уменьшение емкости и /или увеличение тангенса угла потерь. Хотя имеются явно выраженные процессы старения, эффективный срок службы достаточно велик, особенно у алюминиевых электролитических конденсаторов с большими размерами корпуса.

Однако в целом ряде применений этих конденсаторов заманчиво иметь возможность допускать кратковременные превышения номинального напряжения или же появления небольшого напряжения обратной полярности. Потенциально это способно вести к катастрофическим отказам или резкому сокращению срока службы, что особенно неприятно именно для крупногабаритных конденсаторов — на фоне их высокой надежности в отношении параметрических отказов и, как правило, значительного ущерба при выходе из строя. Поэтому целесообразно более подробно проанализировать обширные экспериментальные результаты, их интерпретацию и рекомендации, сделанные специалистами Evox Rifa [3] для аномальных режимов применения.

Частичные разряды являются первопричиной и основным источником опасности катастрофических отказов алюминиевых электролитических конденсаторов [3]. Причем экспериментально показано, что в нормальных условиях слабые и редкие частичные разряды случаются даже у вновь изготовленных, полностью исправных конденсаторов, происходит это при напряжениях, равных и даже несколько меньших номинального (рис. 1) [3]. Более того, при повышенных рабочих температурах граничное напряжение возникновения частичных разрядов еще значительно снижается — на 10–15% (рис. 2) [3], и у некоторых производителей алюминиевых электролитических конденсаторов эта граница (по сравнению с заявленным номинальным напряжением) проходит ниже, чем у конденсаторов Evox Rifa, на которых проводились основные эксперименты [3].

Таким образом, можно утверждать, что при неблагоприятных условиях небольшие частичные разряды возникают у высоковольтных конденсаторов при напряжениях, существенно ниже номинального. Однако весь огромный опыт испытаний и применения алюминиевых электролитических конденсаторов подтверждает их весьма высокую надежность, в том числе в отношении катастрофических отказов, если напряжение не превышает номинального. Более того, для многих типов конденсаторов изготовители официально разрешают работу при повторяющихся кратковременных напряжениях на 8–30% выше номинального, когда интенсивность частичных разрядов еще существенно возрастает (как видно на рис. 1, частота возникновения частичных разрядов у высоковольтного конденсатора при превышении номинального напряжения на 8% увеличивается примерно в 30–40 раз). Но основным ограничением для режима повторяющихся кратковременных перенапряжений является сохранение приемлемого теплового режима конденсатора с учетом

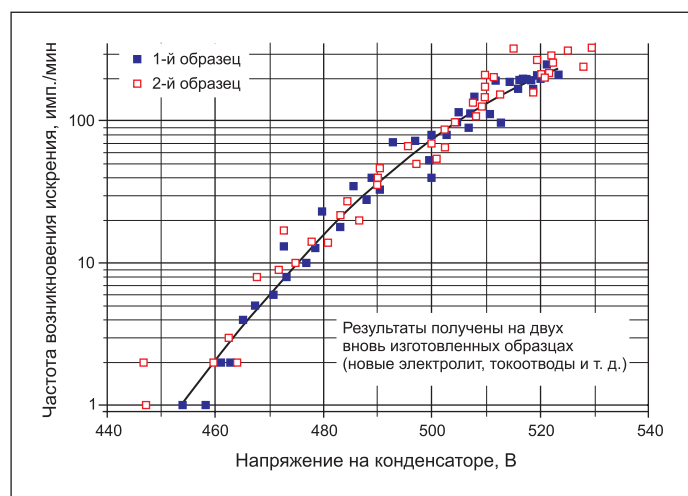
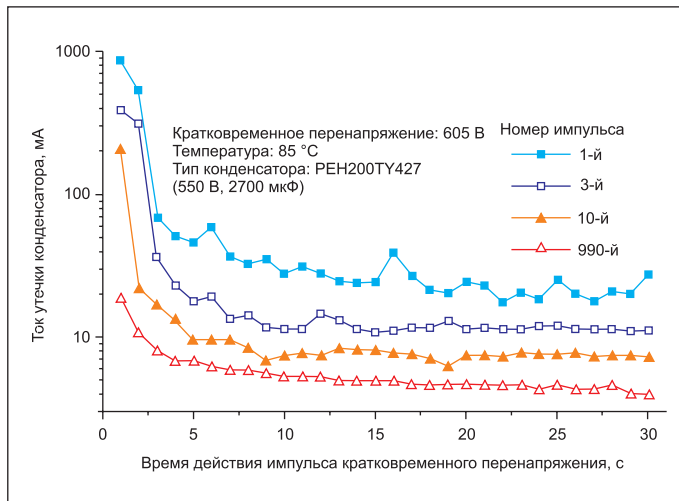
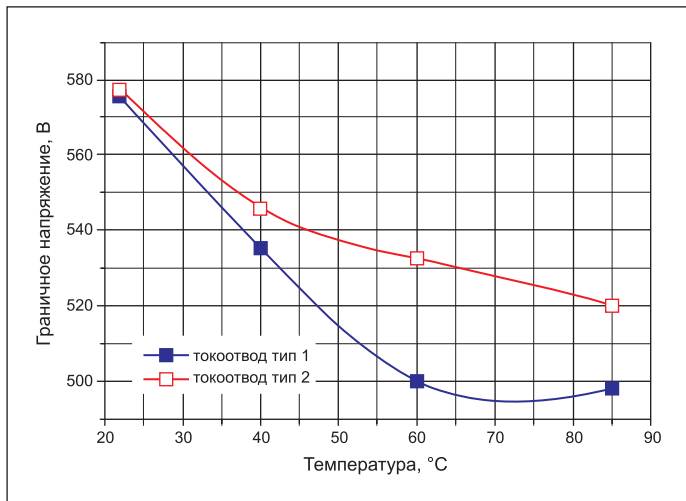


Рис. 1. Типичные зависимости частоты следования частичных разрядов у вновь изготовленных высоковольтных алюминиевых электролитических конденсаторов от приложенного напряжения (два образца конденсаторов с номинальным напряжением 450 В)



возможного значительного повышения тока утечки (рис. 3) [3] и, соответственно, мощности потерь, а не опасность катастрофического отказа. Вот почему изготовитель допускает такие перенапряжения в течение ограниченного времени импульса и при достаточно малом коэффициенте заполнения. Но при этом суммарное время действия повторяющихся перенапряжений за срок службы алюминиевого электролитического конденсатора может быть значительным, без драматического ухудшения его надежности, в том числе в отношении катастрофических отказов.

Фактически основным фактором риска является не частота следования частичных разрядов (экспоненциально зависящая от приложенного к конденсатору напряжения), а протекающий при этом через зону лавинного пробоя электрический заряд и, соответственно, выделяющаяся энергия. Они, так же как и частота возникновения частичных разрядов, очень сильно увеличиваются по мере роста напряжения на конденсаторе. Эта проблема существует для любых алюминиевых электролитических конденсаторов, но она приобретает все большую значимость при увеличении их номинальных напряжений и отчасти емкостей. Высоковольтные конденсаторы большой емкости запасают весьма значительные величины энергии. При местном пробое толстого оксидного слоя высоковольтного алюминиевого электролитического конденсатора (с лавинным размножением носителей) часть запасенной энергии за весьма короткое время выделяется в ограниченном объеме, что приводит к его адиабатическому нагреву. Пробой прекращается после снижения напряжения на этом участке фольги до уровня, при котором напряженность поля в оксидном слое становится недостаточной для поддержания лавинного размножения носителей заряда. Это ограничивает величину энергии, выделяющейся в зоне пробоя. В значительной мере она определяется удельным сопротивлением электролита, применяемого в конденсаторе. Сопротивление электролита ограничивает пиковый ток местного пробоя оксидного слоя, а также скорость поступления заряда (энергии) с соседних участков электродов, частично компенсирующих местное снижение напряжения. После окончания пробоя сопротивление электролита (то есть внутреннее сопротивление конденсатора) определяет время перераспределения зарядов и выравнивания напряжения по всей площади электродов. Данный процесс длится несколько десятков микросекунд, что на несколько порядков медленнее, чем продолжительность собственно пробоя. Удельное сопротивление электролита определяет долю заряда и энергии, которая вовлекается в процесс лавинного пробоя, и, соответственно, возможное пиковое локальное повышение температуры. При до-

статочно большой энергии пробоя это может вызывать необратимое местное повреждение оксидного слоя и уменьшение его способности выдерживать приложенное напряжение (это видно, например, на рис. 46 [3] — осциллограмма напряжения, начиная с отметки 900 мкс). Если энергия лавинного пробоя велика, но недостаточна для немедленного катастрофического отказа, она все же вызывает серьезную деградацию оксидного слоя, и в нем образуются слабые места, что значительно увеличивает вероятность последующих катастрофических отказов конденсатора. Это характерно для пиковых перенапряжений на высоковольтном конденсаторе, превышающих $1,25 \times U_{НОМ}$. Частичные же разряды с весьма малыми величинами протекающего заряда и выделяющейся энергии, характерные для уровней напряжения $(0,9-1,1) \times U_{НОМ}$, практически не оказывают заметного остаточного влияния на состояние изоляции. Поэтому напряжение в пределах номинального является абсолютно безопасным, а повторяющиеся 10%-ные перенапряжения не критически влияют на надежность высоковольтных конденсаторов.

Частичные разряды и ток утечки не имеют непосредственной связи между собой [3], а только косвенную, поскольку оба явления одновременно усиливаются по мере роста приложенного напряжения. При напряжении на высоковольтном алюминиевом электролитическом конденсаторе в пределах номинального вклад частичных разрядов в полный ток утечки пренебрежимо мал. Это важно иметь в виду при последовательном соединении нескольких конденсаторов для увеличения допустимого прикладываемого напряжения. В установившемся режиме напряжения на каждом из таких конденсаторов распределяются неравномерно, обратно пропорционально их токам утечки, величины которых имеют значительный разброс. Напряжение на конденсаторе с наименьшей утечкой может существенно превысить номинальное, попадая в зону режимов работы, где энергия единичных частичных разрядов уже достаточно велика для заметной деградации оксидного слоя, быстрого увеличения количества слабых мест и последующего катастрофического отказа. При этом средний ток утечки такого конденсатора, несмотря на интенсивные частичные разряды, будет все еще слишком малым и не способным к выравниванию распределения напряжений. Для предотвращения подобной опасности необходимо шунтировать каждый из последовательно включенных конденсаторов выравнивающими резисторами с достаточно малыми одинаковыми сопротивлениями.

При быстром увеличении напряжения, приложенного к батарее последовательно включенных конденсаторов, приращения напряжений на отдельных конденсаторах распределяются неравномерно, обратно пропорционально их емкостям. Если напряжение на кон-

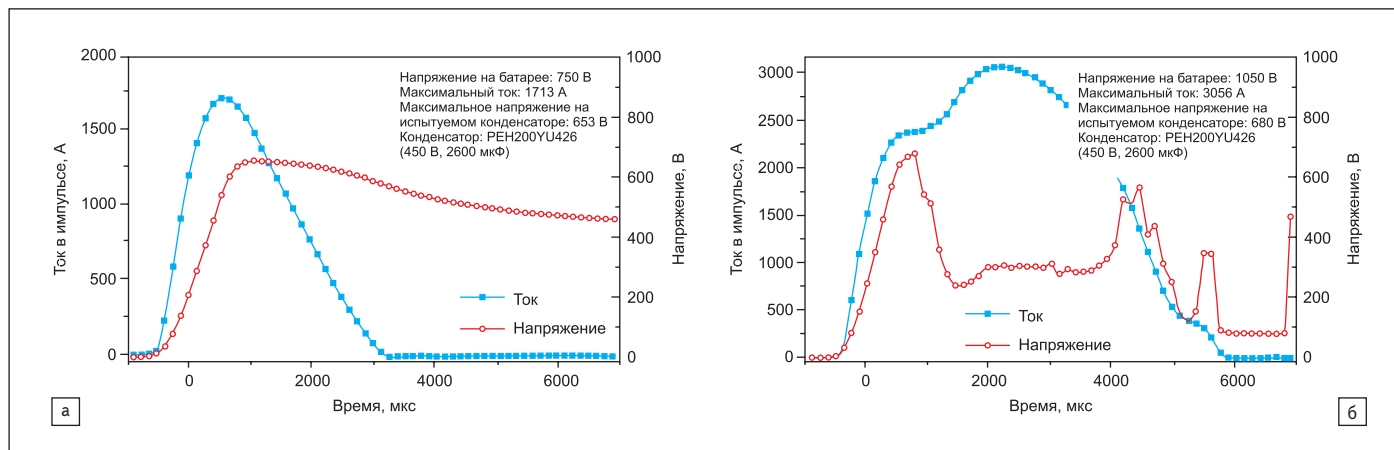


Рис. 4. Типичные примеры успешного и неуспешного испытаний высоковольтного алюминиевого электролитического конденсатора неповторяющимся переходным перенапряжением (для одного и того же конденсатора)

денсаторе, имеющем значительно меньшую емкость, достигает опасных в отношении катастрофического отказа значений, его срок службы резко сокращается. Причем релаксация напряжения к менее опасным значениям происходит медленно (единицы и десятки секунд), заметно съедая ресурс конденсатора в каждом цикле перенапряжений. Особую опасность представляет нештатная разбалансировка по емкости, например в случае последовательно-параллельной схемы батареи конденсаторов и обрыва одного из конденсаторов. Для защиты от таких режимов можно комбинировать подбор последовательно включаемых алюминиевых электролитических конденсаторов с минимальным разбросом по емкости и увеличение запаса по напряжению. Однако высокая стоимость селективной сборки, непредсказуемый дрейф емкостей отдельных конденсаторов в течение срока службы и значительное ухудшение технических и экономических характеристик оборудования при недоиспользовании конденсаторов по напряжению стимулируют разработку и применение особо высоковольтных (до 630 В номинального напряжения) алюминиевых электролитических конденсаторов большой емкости, позволяющих заменить целую батарею параллельно и последовательно включенных конденсаторов.

Принципиальное различие режимов применения алюминиевых электролитических конденсаторов:

- 1) в составе оборудования, питающегося от стабильного напряжения;
- 2) при непосредственном воздействии сетевых (атмосферных и коммутационных) перенапряжений.

В первом варианте конденсаторы работают в хорошо определенных условиях. Даже если они подвергаются перенапряжениям, их параметры (амплитуда, продолжительность, частота повторений) заранее известны. В этом случае высоковольтные конденсаторы в продолжительном режиме могут использоваться без излишних запасов отно-

сительно номинального напряжения, а также вполне приемлемы повторяющиеся перенапряжения до $1,1 \times U_{НОМ}$. Допускать воздействие напряжений сверх $1,1 \times U_{НОМ}$ не имеет смысла: надежность ощутимо уменьшится без серьезного улучшения технико-экономических характеристик аппаратуры. Для повышения надежности работы и исключения чрезмерных бросков тока при повторяющихся перенапряжениях (рис. 3) может быть целесообразна тренировка конденсатора до более высокого напряжения, чем это обычно применяется, — до проектного уровня перенапряжений.

При воздействии сетевых перенапряжений невозможно точно указать их предельно возможную амплитуду и вольсекундный интеграл. Зачастую даже максимальное напряжение продолжительного режима известно лишь ориентировочно. Поэтому необходимо тем или иным способом обеспечить ограничение тока при больших перенапряжениях, что достигается за счет адекватной величины импеданса питающей сети, преобразовательного трансформатора или установкой специальных токоограничивающих реакторов. Эти меры должны обеспечить приемлемые уровни ударного тока и энергии, которые может надежно выдержать используемый ограничитель перенапряжений. Как правило, в качестве таких ограничителей применяются специализированные приборы, с нормированной стойкостью: мощные стабилитроны и оксидно-цинковые варисторы. При этом напряжение ограничения при расчетном ударном токе должно быть безопасным для защищаемого оборудования, в том числе высоковольтного алюминиевого электролитического конденсатора (батареи конденсаторов) на шине постоянного тока. По мере роста номинальной мощности оборудования приходится допускать все большие величины ударных токов, возникающих при сетевых перенапряжениях. К тому же быстро растут требования к допустимой ве-

личине энергии, которую должен быть способен безопасно поглотить и рассеять ограничитель напряжения. При ударном токе порядка нескольких килоампер и поглощаемой энергии в несколько килоджоулей мощные стабилитроны не применимы, а варисторы резко растут в цене (из-за больших сложностей обеспечения приблизительно равномерного распределения ударного тока по площади прибора). Одновременно ухудшаются гарантии на кратность отношения напряжения ограничения к номинальному напряжению шины. Интересным выходом из положения может стать использование высоковольтного алюминиевого электролитического конденсатора, являющегося накопителем-фильтром на шине постоянного тока, в качестве ограничителя перенапряжений. Имеется в виду, что он отрабатывает только наиболее тяжелые сетевые перенапряжения, то есть данный режим наступает считанное число раз за срок службы. При этом очень важно ограничить ударный ток и энергию. Приемлемые величины не сильно зависят от размеров и параметров конденсаторов и примерно соответствуют рис. 4а. Косвенно удовлетворительную надежность этого режима подтверждает огромный опыт успешного применения миллиардов экземпляров сетевых бестрансформаторных источников питания, которые не имеют другой защиты от перенапряжений, кроме высоковольтного алюминиевого электролитического конденсатора, являющегося накопителем-фильтром в цепи постоянного тока. Для работы в качестве ограничителя напряжения нежелательно использовать low ESR-конденсаторы, поскольку они в большей степени склонны к локализации энергии пробоя в малом объеме оксидного слоя и, соответственно, к катастрофическому отказу.

Обратная полярность напряжения на алюминиевом электролитическом конденсаторе допустима, если ее величина не превышает 1–2 В [3]. Такой режим значительно проще

обеспечить по сравнению с типовым требованием полного запрета переполюсовки конденсатора. Если при этом не нужно ограничивать обратный ток во внешней цепи, вполне достаточно шунтировать конденсатор кремниевым диодом.

Заключение

При использовании в щадящих режимах работы алюминиевые электролитические конденсаторы обеспечивают весьма высокую надежность и имеют большой срок службы. Для этого надо соблюдать правильную полярность приложенного к ним постоянного напряжения, не превышать номинальной величины напряжения и удерживать достаточно невысокую температуру внутри конденсатора. При неправильной полярности приложенного напряжения и/или значительном превышении номинального напряжения возникает опасность катастрофического отказа. Однако в обоснованных случаях кратковременная работа в этих режимах может быть приемлема. ■

Литература

1. Гуревич В. Электролитические конденсаторы: особенности конструкции и проблемы выбора // Компоненты и технологии. 2012. № 5.
2. Радюшкин О. Методы оценки срока эксплуатации электролитических конденсаторов // Силовая электроника. 2010. № 5.
3. Klug O., Bellavia A. High voltage aluminum electrolytic capacitors: where is the limit? Evox Rifa, 2001.