

Применение и эксплуатация конденсаторов

Эксплуатационные факторы и их воздействие на конденсаторы

Эксплуатационная надёжность конденсаторов в аппаратуре во многом определяется воздействием комплекса факторов, которые по своей природе можно разделить на следующие группы:

- электрические нагрузки (напряжение, ток, реактивная мощность, частота переменного тока);
- климатические нагрузки (температура и влажность окружающей среды, атмосферное давление, биологические факторы и т. д.);
- механические нагрузки (вибрация, удары, постоянно действующее ускорение, акустические шумы);
- радиационные воздействия (поток нейтронов, гамма-лучи, солнечная радиация и др.).

Под воздействием указанных факторов происходит изменение параметров конденсаторов. В зависимости от вида и длительности нагрузки уходы параметров складываются из обратимого (временного) и необратимого изменений.

Обратимые изменения параметров вызываются кратковременным воздействием нагрузок, не приводящих к изменению свойств конструкционных материалов и проявляющихся лишь в условиях воздействия нагрузок. После снятия нагрузки параметры конденсаторов, принимают значения, близкие к начальным.

Климатические нагрузки.

Температура и влажность окружающей среды являются важнейшими факторами, влияющими на надёжность, долговечность и сохраняемость конденсаторов. Длительное воздействие повышенной температуры вызывает старение диэлектрика, в результате чего параметры конденсаторов претерпевают необратимые изменения. Предельно допустимая температура для конденсаторов ограничивается заданием максимальной положительной температуры окружающей среды и величиной электрической нагрузки. Применение конденсаторов в условиях, превышающих эти ограничения, недопустимо, так как может вызвать резкое ухудшение параметров (снижение сопротивления изоляции и электрической прочности, уменьшение ёмкости, увеличение тока и тангенса угла потерь), нарушение герметичности спаев, ухудшение изоляционных и защитных свойств органических покрытий и заливочных материалов, а в ряде случаев может привести к полной потере работоспособности конденсаторов.

Наряду с внешней температурой на конденсаторы в составе аппаратуры может дополнительно воздействовать теплота, выделяемая другими сильно нагревающимися при работе аппаратуры изделиями (мощные генераторные и модуляторные лампы, резисторы и т.п.).

Для многих типов конденсаторов в условиях низких температур характерно снижение ёмкости, особенно у оксидных и керамических конденсаторов типа 2 ([см. статью "классификация конденсаторов"](#)).

У оксидных конденсаторов при низких температурах увеличивается тангенс угла потерь. Все типы оксидных конденсаторов с жидким или пастообразным электролитом при температурах ниже 60°C практически неработоспособны из-за резкого снижения ёмкости и увеличения тангенса угла потерь.

При эксплуатации конденсаторов в условиях сверхнизких температур (до минус 180° C) за счёт повышения хрупкости ряда конструкционных материалов возможно ухудшение механической прочности конденсаторов.

С ростом температуры окружающей среды напряжение на конденсаторе должно снижаться. В условиях повышенной влажности на электрические характеристики конденсаторов влияет как плёнка воды, образующаяся на поверхности (процесс адсорбции), так и внутреннее поглощение влаги диэлектриком (процесс сорбции). Для герметизированных конденсаторов характерны только адсорбционные процессы. У конденсаторов, не имеющих вакуумноплотной герметизации, возможно также внутреннее проникновение влаги.

Длительное воздействие повышенной влажности наиболее сильно сказывается на изменении параметров негерметизированных конденсаторов. Наименьшую влагостойкость имеют негерметизированные бумажные и металлобумажные, а также слюдяные спрессованные конденсаторы. Проникновение влаги внутрь конденсаторов снижает сопротивление изоляции (особенно при повышенных температурах) и электрическую прочность, увеличивает тангенс угла потерь и ёмкость. Особенно опасно для негерметизированных конденсаторов одновременное длительное воздействие повышенной влажности и электрической нагрузки. При этом у керамических конденсаторов с открытым междуэлектродным зазором возможно снижение сопротивления изоляции или электрической пробой за счёт миграции ионов металла обкладок (особенно серебра) по торцу конденсатора, а у металлобумажных конденсаторов разрушение обкладок, за счёт процессов электролиза. После пребывания конденсаторов в нормальных климатических условиях (особенно после подсушки) адсорбированная влага удаляется и герметизированные конденсаторы практически полностью восстанавливают свои параметры.

Кроме непосредственного влияния на электрические характеристики конденсаторов влага вызывает коррозию металлических деталей и контактной арматуры конденсаторов, облегчает условия развития различных плесневых грибов. Появление плесени может вызвать обесцвечивание и разрушение защитных покрытий и маркировки, ухудшение изоляционных свойств органических материалов, способствует образованию слоя влаги на конденсаторах.

В морских районах вредное влияние влаги усиливается за счёт присутствия в атмосфере солей, входящих в состав морской воды, что увеличивает электропроводность увлажнённых поверхностей, изоляционных материалов, облегчает условия электролиза и коррозии металлов.

В промышленных районах конденсируемая на поверхности конденсаторов влага может содержать растворы сернистых и других агрессивных соединений, усиливающих вредное действие влаги.

При снижении внешней температуры внутри блоков аппаратуры могут создаваться условия, благоприятные для образования инея и выпадения росы. Воздействие инея и росы практически не сказывается на работоспособности низковольтных конденсаторов. Однако наличие влаги на поверхности конденсаторов при выпадении росы может увеличить поверхностную проводимость и привести к снижению сопротивления изоляции, а у высоковольтных конденсаторов — к снижению электрической прочности. После испарения росы электрические характеристики конденсаторов восстанавливаются. Время восстановления зависит от габаритов, конструкции, теплоёмкости и других характеристик изделия. Полностью сохраняют работоспособность при воздействии инея и росы конденсаторы с оксидным диэлектриком.

Конденсаторы не подвергаются непосредственному воздействию солнечной радиации, атмосферных осадков, песка и пыли. Однако пыль и песок способствуют коррозии металлических деталей и развитию плесени, а попадая в зазоры между трущимися частями подстроечных конденсаторов, ускоряют их износ.

Повышенное (до 3 атм) давление не оказывает существенного влияния на работу конденсаторов. В условиях низкого давления снижается электрическая прочность воздушного промежутка и создаются условия для пробоев и перекрытия. Для избежания пробоев и перекрытия при пониженном атмосферном давлении необходимо снижать

напряжение на конденсаторе. Кроме того, при пониженном атмосферном давлении ухудшается отвод теплоты от конденсатора, а в условиях глубокого вакуума (давление менее 1,3-10⁶ Па) возможна сублимация (испарение) твёрдых материалов. В условиях низкого давления у негерметичных оксидных конденсаторов с жидким или пастообразным электролитом за счёт испарения легко летучих компонентов происходит интенсивная потеря электролита, что резко снижает срок их службы. Ухудшение механической прочности и эластичности органических материалов узла уплотнения за счёт сублимации увеличивает скорость потери электролита.

Применение и эксплуатация конденсаторов (часть 2)

Механические нагрузки.

При эксплуатации и транспортировании аппаратуры конденсаторы подвергаются воздействию различного вида механическим нагрузкам: вибрации, одиночным и многократным ударам, линейному ускорению, акустическим нагрузкам. Наиболее опасными являются вибрационные и ударные нагрузки.

Воздействие механических нагрузок, превышающих допустимые нормы, может вызвать обрывы выводов и внутренних соединений, увеличение тока утечки у оксидных конденсаторов, появление трещин в керамических корпусах и изоляторах, снижение электрической прочности, изменение установленной ёмкости у подстроенных конденсаторов. Высокие уровни разрушающих усилий могут возникать при воздействии ударных нагрузок, если составляющие спектра ударного импульса совпадают с собственными резонансными частотами конденсатора.

Воздействие механических нагрузок на вакуумные конденсаторы может вызвать изменение ёмкости, синхронное с частотой вибрации $2R$ и моментом воздействия ударных нагрузок. У оксидных конденсаторов (особенно у танталовых с жидким электролитом) во время воздействия вибрационных и ударных нагрузок возможны кратковременные броски тока утечки из-за локальных разрушений оксидного слоя.

Радиационные воздействия.

Развитие атомной энергетики и освоение космоса выдвигает требование по устойчивости комплектующих элементов (в том числе конденсаторов) к воздействию ионизирующих излучений, глубокого вакуума и сверхнизких температур. Воздействие ионизирующих излучений может как непосредственно вызвать изменение электрических и эксплуатационных характеристик конденсаторов, так и способствовать ускоренному старению конструкционных материалов при последующем воздействии других факторов. Характер и скорость изменения параметров зависят от дозы, интенсивности и энергетического спектра излучения и в значительной мере определяются видом рабочего диэлектрика и конструкцией конденсатора.

Процессы, протекающие в конденсаторах в условиях воздействия ионизирующих излучений, коренным образом отличаются от процессов старения в обычных условиях эксплуатации. В результате воздействия ионизирующих излучений в конденсаторах также могут возникать явления, приводящие к обратимым или остаточным изменениям их электрических параметров.

Обратимые изменения связаны с процессами ионизации диэлектрических материалов и воздуха и сопровождаются в основном резким снижением сопротивления изоляции и увеличением тока утечки вследствие образования поверхностных и внутренних объёмно-распределённых зарядов. Увеличивается также тангенс угла потерь, особенно на низких частотах. После прекращения облучения сопротивление изоляции (ток утечки оксидных конденсаторов) в большинстве случаев восстанавливается. Время восстановления зависит от типа диэлектрика, дозы и мощности излучения.

Остаточные изменения параметров связаны в основном с устойчивыми нарушениями структуры рабочего диэлектрика, а также защитных и заливочных материалов. При воздействии ионизирующих излучений наиболее сильно изменяются структура и механические свойства полимерных материалов, применяемых в плёночных и комбинированных конденсаторах. Структурные изменения сопровождаются, как правило, интенсивным газовыделением. Сравнительно быстрым изменениям подвергаются пропитывающие составы, и целлюлоза, являющаяся основным компонентом конденсаторной бумаги. Поэтому конденсаторы с органическим диэлектриком более чувствительны к воздействиям излучения, чем конденсаторы с неорганическим диэлектриком. Наиболее устойчивы к воздействию ионизирующих излучений керамические конденсаторы типа 1 ([см. статью "классификация конденсаторов"](#)).

Радиационные нарушения структуры материалов могут приводить и к ухудшению основных эксплуатационных характеристик конденсаторов — срока службы, механической и электрической прочности, влагостойкости.

Электрические нагрузки

Наибольшие необратимые изменения параметров вызываются длительным воздействием электрической нагрузки, при которой происходят процессы старения, ухудшающие электрическую прочность. Это необходимо учитывать, выбирая значение рабочего напряжения, особенно при длительной эксплуатации конденсаторов.

При постоянном напряжении основной причиной старения являются электрохимические процессы, возникающие в диэлектрике под действием постоянного поля и усиливающиеся с повышением температуры и влажности окружающей среды. Степень их влияния на параметры конденсаторов определяется видом диэлектрика и конструктивным исполнением конденсатора. При этом суммарное изменение параметров конденсаторов не превышает значений, гарантируемых на период минимальной наработки, приведенных в справочных данных.

При переменном напряжении и импульсных режимах основной причиной старения являются ионизационные процессы, возникающие внутри диэлектрика или у краёв обкладок, преимущественно в местах газовых включений. Данное явление характерно в основном для высоковольтных конденсаторов. Ионизация разрушает органические диэлектрики в результате бомбардировки их возникающими ионами и электронами, а также за счет агрессивного действия на диэлектрик образовавшихся озона и окислов азота. Для керамических материалов ионизация в закрытой поре вызывает сильный местный разогрев, в результате которого появляются механические напряжения, сопровождающиеся растрескиванием керамики и пробоем по трещине.

Несмотря на то что допускаемое значение напряжённости электрического поля в диэлектрике конденсатора при его испытаниях выбирается с некоторым запасом, эксплуатация под электрической нагрузкой, превышающей номинальное напряжение, резко снижает надёжность конденсаторов.

Превышение допустимой переменной составляющей напряжения может вызвать нарушения теплового равновесия в конденсаторе, приводящего к термическому разрушению диэлектрика. Развитие этого явления обусловлено тем, что активная проводимость диэлектрика возрастёт с повышением температуры.

Наиболее устойчивы к воздействию электрических эксплуатационных нагрузок и стабильны защищенные керамические конденсаторы типа 1 ([см. статью "классификация конденсаторов"](#)).

Среди оксидных конденсаторов наиболее стабильны оксидно-полупроводниковые герметизированные конденсаторы. Низкая стабильность электролитических оксидных конденсаторов объясняется наличием в них жидкого или пастообразного электролита, сопротивление которого в большей степени зависит от температуры окружающей среды, чем у оксидно-полупроводниковых конденсаторов. Длительное воздействие

электрической нагрузки, особенно при повышенных температурах, вызывает испарение летучих фракций электролита, что ещё больше повышает сопротивление электролита и резко ухудшает температурную и частотную зависимости ёмкости и тангенса угла потерь. Наиболее интенсивно этот процесс протекает у алюминиевых конденсаторов малых габаритов с электролитом на основе диметилформамида.

При длительной эксплуатации под электрической нагрузкой некоторых типов танталовых электролитических конденсаторов возможно снижение ёмкости за счёт пассивации катода, а также возникновение отказов, связанных с разрушением серебряного корпуса и вытеканием вследствие этого электролита. Повышение амплитуды переменной составляющей напряжения ускоряет этот процесс. Новые типы конденсаторов с танталовым корпусом лишены этого недостатка и имеют повышенную стабильность параметров и более высокую долговечность.

Применение и эксплуатация конденсаторов (часть 3)

Частотные свойства конденсаторов и особенности их работы в импульсных режимах

При выборе конденсаторов для работы в цепях переменного или пульсирующего тока необходимо учитывать их частотные свойства, определяемые рядом конструктивных факторов: типом диэлектрика, значениями индуктивности и эквивалентного последовательного сопротивления, конструкцией и др. Работоспособность конденсаторов при переменном напряжении ограничивают в основном следующие факторы:

- тепловыделение, пропорциональное средней мощности, которое может резко возрасти при превышении допустимых режимов эксплуатации и создавать условия для теплового пробоя конденсатора;
- напряжённость электрического поля, действующего на диэлектрик конденсатора и вызывающего его электрическое старение;
- ток, протекающий через конденсатор, при большой плотности которого возможны локальный перегрев и разрушение контактных узлов, выгорание металлизированных обкладок и т.п.;
- температура окружающей среды.

Наиболее высокими частотными свойствами обладают керамические конденсаторы типа 1 ([см. статью "классификация конденсаторов"](#)), слюдяные и конденсаторы из неполярных плёнок (полистирольные, полипропиленовые и др.).

В связи с тем, что с повышением частоты растут потери энергии в конденсаторе, для сохранения теплового баланса в конденсаторе и исключения возможности возникновения пробоя с повышением частоты необходимо снижать амплитуду переменной составляющей.

У керамических и слюдяных конденсаторов допустимая величина переменной составляющей напряжения определяется исходя из допустимой реактивной мощности.

У ряда групп конденсаторов с повышением частоты может заметно снижаться эффективная ёмкость. Уменьшение ёмкости с ростом частоты происходит как за счёт снижения диэлектрической проницаемости диэлектрика, так и за счёт увеличения эквивалентного последовательного сопротивления (ЭПС).

ЭПС обусловлено потерями в конденсаторе — в диэлектрике, в металлических частях, в переходных контактных сопротивлениях, в электролите (у оксидных конденсаторов). В обычных конденсаторах ЭПС достаточно мало (доли ома) и снижение ёмкости с частотой можно заметить лишь в области высоких частот. Наиболее сильная зависимость ёмкости от частоты имеет место у оксидных конденсаторов (особенно с жидким электролитом) из-за большого удельного сопротивления электролита и его зависимости от частоты. Для этих конденсаторов снижение ёмкости с частотой наблюдается, начиная с сотен герц.

В импульсных режимах могут быть использованы конденсаторы, специально сконструированные для этих целей и общего применения. Однако в любом случае при выборе конденсаторов должны быть учтены особенности их работы при импульсных нагрузках. Учёт особенностей должен производиться с двух сторон: способен ли конденсатор данного типа обеспечить формирование или передачу импульса, не является ли такой режим разрушающим для конденсатора.

Существенное влияние на форму импульса, а также на коэффициент полезного действия устройства, в котором установлен конденсатор, могут оказывать потери энергии в диэлектрике и арматуре конденсатора. Поэтому при выборе конденсаторов для импульсных режимов следует учитывать их температурно-частотные зависимости ёмкости, тангенса угла потерь и полного сопротивления. Для решения вопроса о том, не является ли данный импульсный режим разрушающим для конденсаторов, необходимо учитывать явления, связанные с нагревом конденсатора за счёт импульсных токов, с ионизационным старением диэлектриков и пр. Указанные явления могут привести к нарушению электрической прочности конденсатора и выходу его из строя. Поэтому допустимая импульсная нагрузка, на конденсаторе определяется исходя из следующих параметров импульсного режима: значений положительных и отрицательных пиков напряжения и тока, размаха переменного напряжения на конденсаторе, длительности нарастания и спада напряжения, периода и частоты следования импульсов, наличия постоянной составляющей.

Выбор конкретных допустимых импульсных нагрузок конденсаторов производится по номограммам, приведённым в нормативной документации, исходя из параметров импульсного режима.

При применении полярных конденсаторов с оксидным диэлектриком в импульсных режимах и при пульсирующем напряжении необходимо учитывать, что постоянная составляющая напряжения должна иметь значение, исключающее возможность появления на конденсаторе напряжения обратной полярности, а сумма постоянного и амплитуды переменного или импульсного напряжения не должна превышать номинального напряжения.