

2.3 Конденсаторы в радиосистемах и устройствах.

Современные тенденции в развитии технологий изготовления конденсаторов, основные типы и их характеристики, а также указания по применению

Конденсатор – изделие, обладающее сложным комплексом потребительских параметров. Изготовить универсальный идеальный конденсатор невозможно. Но это не мешает создавать и применять конденсаторы, близкие к идеалу, для различных специальных применений. Вот почему особенности проектирования, выбора и применения конденсаторов представляют большой интерес.



Рис.2.3.1 Транзисторы

Конструктивно конденсатор состоит из двух или более электродов (обкладок), разделённых слоем диэлектрика.

Конденсаторы различаются: по типу диэлектрической системы – на керамические, металлоплёночные, электролитические (алюминиевые и танталовые) и др.;

- по форме электродов – на плоские, цилиндрические, сферические и др.;
- по функциональному назначению – на помехоподавляющие (в том числе проходные), силовые (фильтровые, сглаживающие, снабберные, косинусные) и др.
- по виду диэлектрика:

1. С газообразным диэлектриком
2. С оксидным диэлектриком
3. С неорганическим диэлектриком
4. С органическим диэлектриком

Выбор конденсатора не определяется однозначно его ёмкостью и рабочим напряжением. В эквивалентную схему конденсатора, помимо полезной ёмкости, входят такие паразитные элементы, как активное сопротивление (потери в диэлектрике, сквозные токи утечки), определяемое тангенсом угла диэлектрических потерь на рабочей частоте; активная составляющая сопротивления обкладок и выводов; индуктивность обкладок и выводов. Влияние этих паразитных элементов на работу электронного устройства может свести на нет все усилия разработчика, неправильно выбравшего конденсатор.

Важнейшая задача при проектировании конденсаторов – разработка конструкции с минимальным значением паразитных параметров. Только конденсатор с малой индуктивностью обкладок сможет эффективно, без резонансных явлений, работать в заданной полосе частот и пропускать большой переменный ток.

Основные электрические параметры и характеристики конденсаторов

Для удобства дадим разъяснения важнейших терминов и параметров конденсаторов:

- номинальная ёмкость – ёмкость, значение которой обозначено на конденсаторе или указано в нормативно-технической документации и является исходным для отсчёта допускаемого отклонения;
- номинальное напряжение – значение напряжения, обозначенное на конденсаторе или указанное в НТД, при котором он может работать в заданных условиях в течение срока службы с сохранением параметров в допустимых пределах;
- амплитуда переменного напряжения не должна превышать значения напряжения, рассчитанного исходя из допустимой реактивной мощности;
- тангенс угла потерь характеризует потери энергии в конденсаторе и определяется отношением активной мощности к реактивной при синусоидальном напряжении определённой частоты;

- электрическое сопротивление конденсатора постоянному току называется сопротивлением изоляции конденсатора. Сопротивление изоляции характеризует качество изготовления конденсатора и зависит от типа диэлектрика. Для конденсаторов, допускающих касание корпусом шасси и токоведущих шин, вводится понятие сопротивление изоляции между корпусом и соединёнными вместе выводами;

- ток проводимости, проходящий через конденсатор при постоянном напряжении на его обкладках в установившемся режиме, называют током утечки;

- величина, применяемая для характеристики конденсаторов с линейной зависимостью ёмкости от температуры и равная относительному изменению ёмкости при изменении температуры окружающей среды на один градус Цельсия (Кельвина), называется температурным коэффициентом ёмкости;

- явление, обусловленное замедленными процессами поляризации в диэлектрике, приводящее к появлению напряжения на электродах после кратковременной разрядки

конденсатора, называется диэлектрической абсорбцией;

- под полным сопротивлением конденсатора понимают сопротивление конденсатора переменному синусоидальному току определённой частоты, обусловленное наличием у реального конденсатора наряду с ёмкостью также активного сопротивления и индуктивности. Значения активного сопротивления и индуктивности зависят от характеристик используемых материалов и конструктивного исполнения конденсатора;

- понятие реактивной мощности введено для высокочастотных и особенно высоковольтных конденсаторов и используется для установления допустимых электрических режимов эксплуатации. При этом в области низких частот ограничения определяются допустимой амплитудой напряжения переменного тока, а на высоких частотах – допустимой реактивной мощностью конденсатора. Таким образом, реактивная мощность характеризует нагрузочную способность конденсатора при наличии на нём больших напряжений высокой частоты;

- вносимое затухание и сопротивление связи – это величины, характеризующие способность помехоподавляющих конденсаторов и фильтров подавлять помехи переменного тока заданной частоты. Вносимое

затухание и сопротивление связи зависят от частоты переменного тока, ёмкости, индуктивности, добротности и конструкции конденсаторов и фильтров, а также от выходного сопротивления генератора и сопротивления нагрузки.

Специфические параметры подстроечных и вакуумных конденсаторов

Подстроечные и переменные конденсаторы наряду с основными параметрами имеют дополнительные, учитывающие особенности их функционального назначения и конструктивное исполнение:

- вместо параметра номинальная ёмкость используются параметры максимальная и минимальная ёмкости.

Это максимальное и минимальное значение ёмкости конденсатора, которое может быть получено перемещением его подвижной системы;

- момент вращения – минимальный момент, необходимый для непрерывного перемещения подвижной системы конденсатора;

- цикл перестройки ёмкости – перестройка ёмкости от минимальной до максимальной и обратно;

- износостойчивость – способность конденсатора сохранять свои параметры (противостоять изнашиванию) при многократных сражениях подвижной системы;

- электрическая прочность – способность конденсаторов выдерживать в течение определённого времени (до нескольких минут) приложенное к нему напряжение выше номинального без изменения его эксплуатационных характеристик и пробоя диэлектрика.

Применение и эксплуатация конденсаторов

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

- электрические нагрузки;
- климатические нагрузки;
- механические нагрузки;
- радиационное воздействие.

Под воздействием указанных факторов происходит изменение параметров конденсаторов. В зависимости от вида и длительности нагрузки, уходы параметров складываются из обратимого (временного) и необратимого изменения. Обратимые изменения – это явление, которое заключается в том, что после снятия нагрузки параметры конденсаторов принимают значения, близкие к начальным параметрам.

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. Наряду с внешней температурой на конденсаторы в составе аппаратуры может дополнительно воздействовать теплота, выделяемая другими нагревающимися элементами. С ростом температуры окружающей среды максимальное напряжение на конденсаторе следует снижать.

В условиях повышенной влажности на электрические характеристики конденсаторов влияет как плёнка воды, образующаяся на поверхности, так и внутреннее поглощение влаги диэлектриком. Длительное воздействие повышенной влажности наиболее сильно сказывается на изменении параметров негерметизированных конденсаторов. Проникновение влаги внутрь конденсатора снижает его сопротивление и электрическую прочность. Влага вызывает коррозию металлических деталей и контактной арматуры конденсаторов, облегчает развитие различных плесневых грибов.

Механические нагрузки

При эксплуатации и транспортировке аппаратуры конденсаторы подвергаются воздействию различного вида механических нагрузок: 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, появление трещин в корпусах и изоляторах, снижение электрической прочности, изменение установленной ёмкости у подстроечных конденсаторов.

Радиационные воздействия

Воздействие ионизирующих излучений может вызывать как непосредственно изменение электрических и эксплуатационных характеристик конденсаторов, так и способствовать ускоренному старению конструкционных материалов при последующем воздействии других факторов. Процессы, протекающие в конденсаторах в условиях воздействия ионизирующих излучений, коренным образом отличаются от процессов старения в обычных условиях эксплуатации. В результате этого воздействия в конденсаторах также могут возникать явления, приводящие к обратимым или остаточным изменениям их параметров. Радиационные нарушения структуры материалов могут приводить и к ухудшению основных 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.

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.

При переменном напряжении и импульсных режимах основной причиной старения являются ионизационные процессы, возникающие внутри диэлектрика или у краёв обкладок, преимущественно в местах газовых включений.

Напряжение электрического поля в диэлектрике конденсатора при его испытаниях выбирается с некоторым запасом, однако эксплуатация под электрической нагрузкой, превышающей номинальное напряжение, резко снижает надёжность конденсаторов.

Указания по выбору и эксплуатации

Эксплуатационная надёжность конденсаторов во многом определяется правильным выбором типов конденсаторов при проектировании аппаратуры и использовании их в режимах, не превышающих допустимые.

Указания по монтажу и креплению

Крепёжные приспособления должны быть выполнены таким образом, чтобы они не повреждали корпус и защитные покрытия конденсаторов. Устройства для крепления не должны ухудшать условий отвода теплоты от конденсаторов. Не разрешается использовать лепестковые выводы конденсаторов для припайки к ним других деталей. Крепить конденсаторы при установке в аппаратуру следует без перекосов. Пайку следует производить бескислотными флюсами; при этом не должно происходить опасного перегрева выводных узлов конденсатора.

При монтаже неполярных конденсаторов с оксидным диэлектриком необходимо обеспечить изоляцию их корпусов от других компонентов и шасси.

При плотном монтаже конденсаторов для обеспечения изоляции корпусов допускается надевать на них изолирующие трубки. При этом они не должны нарушать покрытие конденсаторов, ухудшать электрические характеристики, вызывать перегрев конденсаторов сверх допустимой нормы. Особую осторожность следует соблюдать при установке конденсаторов в микросборки и на малогабаритные печатные платы.

Защита конденсаторов от воздействия механических нагрузок

Максимальная нагрузка на конденсатор достигается при резонансе, когда частота вибраций равна частоте собственных колебаний конденсатора. Кроме изменения частоты конденсатора, применяют дополнительные способы крепления.

Защита конденсаторов от воздействия повышенной влажности

Наиболее эффективным способом защиты является герметизация в металлическом или керамическом корпусе. Другие способы защиты (покрытие эпоксидными компаундами, опрессовка пластмассами и др.) менее эффективны. При недостаточной собственной защите применяется герметизация блоков аппаратуры или всей аппаратуры. Чтобы избежать повышения влажности и выпадения росы, внутри герметизированных блоков необходимо помещать влагопоглощающие вещества.

Указания по применению конденсаторов при повышенном или пониженном атмосферном давлении

Повышенное (до 3 атм.) давление не влияет на работоспособность конденсаторов, однако резкие его изменения могут вызвать нарушение

герметизации и уплотнения корпусов. Во избежание перегрева у конденсаторов необходимо снижать допустимую мощность рассеяния.

Система обозначений и маркировка конденсаторов

В настоящее время принята система обозначений конденсаторов постоянной емкости, состоящая из ряда элементов: на первом месте стоит буква К, на втором месте - двузначное число, первая цифра которого характеризует тип диэлектрика, а вторая - особенности диэлектрика или эксплуатации (табл. 2.3.1), затем через дефис ставится порядковый номер разработки.

Таблица 2.3.1. Система обозначений конденсаторов

Обозначение	Тип конденсатора
K10	Керамический низковольтный ($U_{раб} < 1600$ В)
K15	Керамический высоковольтный ($U_{раб} > 1600$ В)
K20	Кварцевый
K21	Стекланный
K22	Стеклокерамический
K23	Стеклоэмалевый
K31	Слюдяной малой мощности
K32	Слюдяной большой мощности
K40	Бумажный низковольтный ($U_{раб} < 2$ кВ) с фольговыми обкладками
K41	Бумажный высоковольтный ($U_{раб} > 2$ кВ) с фольговыми обкладками
K42	Бумажный с металлизированными обкладками
K50	Электролитический фольговый алюминиевый
K51	Электролитический фольговый танталовый, ниобиевый и др.
K52	Электролитический объемно-пористый
K53	Оксидно-полупроводниковый
K54	Оксидно-металлический
K60	С воздушным диэлектриком
K61	Вакуумный
K71	Пленочный полистирольный
K72	Пленочный фторопластовый
K73	Пленочный полиэтилентерефталатный
K75	Пленочный комбинированный
K76	Лакопленочный
K77	Пленочный поликарбонатный

Например, обозначение K10-17 означает керамический низковольтный конденсатор с порядковым номером разработки 17. Кроме того, применяют обозначения, указывающие на конструктивные особенности: КСО - конденсатор слюдяной опрессованный, КЛГ - конденсатор литой герметизированный, КТ - керамический трубчатый и т. д.

Подстроечные конденсаторы обозначают буквами КТ, переменные - буквами КП.

Затем следует цифра, указывающая тип диэлектрика: 1 - вакуумные; 2 - воздушные; 3 -- газонаполненные; 4 - твердый диэлектрик; 5 -- жидкий диэлектрик.

В конструкторской документации помимо типа конденсатора указывают емкость, рабочее напряжение и ряд других параметров. Например, обозначение КП2 означает конденсатор переменной емкости с воздушным диэлектриком, а обозначение КТ4 - подстроечный конденсатор с твердым диэлектриком.

На принципиальных схемах конденсаторы обозначают в виде двух параллельных черточек и дополнительных элементов. На рис. 2.3.2, а показан конденсатор постоянной емкости, на рис. 2.3.2, б - полярный (электролитический) конденсатор, на рис. 2.3.2, в -- конденсатор переменной емкости, на рис. 2.3.2, г - подстроечный конденсатор, на рис. 2.3.1, д - варикап, на рис. 2.3.2, е - вариконд.

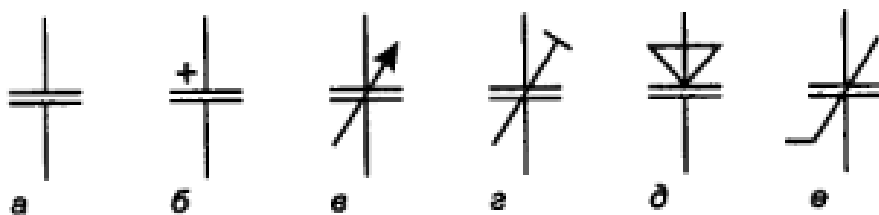


Рис 2.3.2 Обозначения различных видов конденсаторов

На принципиальных схемах около конденсатора ставится буква С с порядковым номером конденсатора, например С26, и указывается емкость. Около подстроечных и переменных конденсаторов указывают минимальную и максимальную емкости. Например, обозначения 5...25 означают, что емкость изменяется от 5 до 25 пФ.

На корпусе конденсатора указывают его основные параметры. В малогабаритных конденсаторах применяют сокращенную буквенно-кодировую маркировку. При емкости конденсатора менее 100 пФ ставят букву П. Например, 33 П означает, что емкость конденсатора составляет 33 пФ. Если емкость лежит в пределах от 100 пФ до 0,1 мкФ, то ставят букву Н (нанофарада). Например, 10 Н означает емкость в 10 нФ или 10 000 пФ. При емкости более 0,1 мкФ ставят букву М, например, 10 М означает емкость в 10 мкФ. Слитно с обозначением емкости указывают буквенный индекс, характеризующий класс точности. Для ряда Е6 с точностью $\pm 20\%$ ставят индекс В, для ряда Е12 - индекс С, а для ряда Е24 - индекс И. Например,

маркировка 1Н5С означает конденсатор емкостью 1,5 нФ (1500 пФ), имеющий отклонение от номинала $\pm 10\%$.

Ионисторы

Ионисторы (рис.2.3.3) – это двухслойные электролитические конденсаторы – устройства аккумулирования энергии. По характеристикам ионисторы представляют собой нечто среднее между алюминиевыми электролитическими конденсаторами и аккумуляторами. Они рассчитаны на несколько сот тысяч циклов заряда/разряда. Их отличает высокая ёмкость, большая плотность рассеиваемой мощности и долгий срок службы.



Рис.2.3.3 Ионисторы

Применение ионисторов:

- автомобильная промышленность: электромобили, пуск двигателя, рекуперативное торможение, стартер, система запираания дверей;
- бытовая электроника: пульты дистанционного управления, резервное питание, цифровые камеры;
- промышленная электроника: измерительные приборы, лифты, аварийное освещение, системы бесперебойного питания, медицинское оборудование, ветряные мельницы, элементы, использующие солнечную энергию;
- телекоммуникации: резервное питание, системы бесперебойного питания для радиостанций.

В таблице 2.3.2 приведены основные технические характеристики ионисторов компаний Panasonic и Epcos. Ионисторы компании Panasonic обладают меньшими размерами, имеют более широкий диапазон емкостей и корпусов.

Производитель	Ёмкость, Ф	Напряжение, В	Минимальные размеры, мм
Panasonic	0,022...70	2,3...5,5	6,1 × 1,2
Epcos	4...200	2,5	22,75 × 14,75

Ионисторы Panasonic производятся в корпусах типа «монета», «ролик», «таблетка»; для поверхностного монтажа и для монтажа в отверстия. Диапазон емкостей – от 22 мФ до 70 Ф. Современные конденсаторы Gold Cap компании Panasonic создают конкуренцию аккумуляторам и батареям. Это происходит благодаря большой допустимой ёмкости и преимуществам, которые присущи всем конденсаторам:

- быстрое время зарядки;
- более 300 тыс. циклов заряда/разряда;
- экологическая безопасность;
- не требуется контроль зарядки;
- длительный срок службы.

Однако если разработчику требуются крайне большие значения ёмкости, а размеры ионистора не критичны, следует использовать изделия фирмы Epcos.

Потери в конденсаторах

Конденсаторы переменного тока выполняют следующие основные функции:

- 1) компенсируют реактивную мощность на частоте основной гармоники переменного напряжения;
- 2) накапливают энергию для принудительной коммутации тиристоров;
- 3) формируют траектории переключения электронных ключей в составе цепи формирования траектории переключения (ЦФТП);
- 4) фильтруют высшие гармоники тока и напряжения в силовых цепях переменного тока.

В компенсаторах и регуляторах реактивной мощности конденсаторы обычно работают при синусоидальных напряжениях на промышленной частоте. В этом случае их применение осуществляется в соответствии с общепринятыми правилами эксплуатации электротехнического силового оборудования. В то же время существуют схемы компенсаторов реактивной мощности, в которых периодическая коммутация силовых ключей вызывает протекание высших гармоник тока. В таких схемах при расчете и выборе типа конденсатора необходимо учитывать влияние высших гармоник тока.

Коммутирующие конденсаторы, как правило, работают в режимах быстрых перезарядов из одной полярности в другую в процессе коммутации тиристоров. Такие режимы работы приводят к воздействию на конденсатор импульсных токов с достаточно крутыми фронтами импульсов. Форма напряжения при этом приближается к трапецеидальной. На рис. 2.3.4 приведены диаграммы тока и напряжения при коммутации. Конденсаторы в составе фильтрокомпенсирующих устройств имеют меньшую емкость, чем коммутирующие. Но они обычно работают в диапазоне более высоких частот, соответствующих спектральному составу напряжений в процессах переключения. При этом они должны иметь слабую зависимость основных параметров от частоты. В частности, их конструкция должна обеспечивать минимальное значение индуктивности, которая может оказывать отрицательное влияние на переходные процессы при выключении ключей.

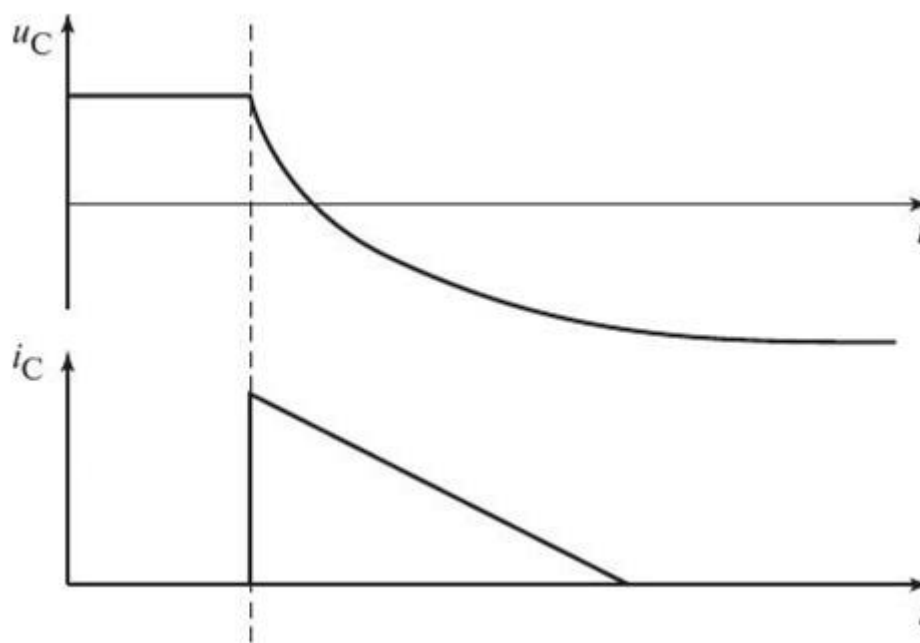


Рис. 2.3.4 Диаграммы тока и напряжения при коммутации конденсатора

В конденсаторах фильтров высших гармоник также протекают несинусоидальные токи, спектральный состав которых необходимо учитывать при выборе типа и параметров конденсаторов.

Несинусоидальные токи и напряжения приводят к росту потерь мощности в конденсаторе, а также изменению ряда важнейших параметров. Известно, что при синусоидальном напряжении потери в конденсаторе

пропорциональны тангенсу угла потерь в диэлектрике δ . При этом в расчетах часто принимают значение $\operatorname{tg} \delta$ неизменным, в то время как на него влияют различные условия эксплуатации и в значительной мере частота приложенного напряжения. Зависимость δ от частоты необходимо учитывать при выборе конденсаторов, работающих при несинусоидальных напряжениях. Приводимые в технических условиях зависимости δ от частоты позволяют учесть дополнительные потери мощности при воздействии напряжений повышенной частоты. Типовые зависимости δ от частоты для конденсаторов неполярного типа показывают слабое его изменение от частоты в диапазоне от 50 до 1000 Гц и значительное возрастание примерно в 10 раз при увеличении частоты от 1000 до 10 000 Гц. Изменение температуры в меньшей мере влияет на δ для таких типов конденсаторов. В целом же точная оценка потерь в конденсаторах на повышенных частотах даже при синусоидальном напряжении является достаточно сложной задачей.

Еще более сложной задачей является оценка потерь в конденсаторе при несинусоидальных токах и напряжениях. Среди известных методов следует выделить наиболее общий, но весьма приближенный, основанный на частотном анализе напряжения или тока. При расчетах этим методом потери мощности в конденсаторе от каждой гармоники приложенного к нему напряжения суммируются:

$$P_C = C \omega_1 \sum_{n=1}^{\infty} n U_n^2 \operatorname{tg} \delta_n,$$

где n — номер гармонической составляющей напряжения; ω_1 — угловая частота 1-й гармоники напряжения; U_n — действующее значение напряжения n -й гармоники; $\operatorname{tg} \delta_n$ — тангенс угла потерь на частоте n -й гармоники.

Используя методы гармонического анализа, например, преобразования Фурье, можно определить наиболее существенные гармоники в несинусоидальном напряжении и оценить по формуле представленной выше потери мощности. Аналогичные методы можно применить при заданной форме несинусоидального тока конденсатора.

Увеличение потерь активной мощности приводит к необходимости снижать при повышении частоты допустимое действующее значение напряжения на конденсаторе. Увеличение действующих значений токов высших гармоник создает опасность выхода из строя контактных выводов и других элементов конструкции конденсатора, что также приводит к

необходимости снижения допустимых действующих значений напряжений на конденсаторе с ростом частоты. Типичная зависимость допустимого действующего значения напряжения синусоидальной формы на конденсаторе переменного тока приведена на рис. 2.3.5

В зависимости от частоты и формы напряжения при выборе требуемого типа конденсатора может преобладать тот или иной ограничивающий фактор. Например, при трапецидальной форме напряжения на конденсаторе при низких частотах и малой длительности фронтов ограничивающим фактором является амплитудное значение импульсного тока, а при повышенных частотах синусоидального напряжения (свыше 1 кГц) — дополнительная мощность потерь. В качестве ограничивающего фактора при выборе конденсатора выступает также его кратковременная электрическая прочность, в соответствии с которой нормируются значения номинальных напряжений. Допустимое действующее значение напряжения может также выбираться из условия ограничения мощности частичного разряда, исходя из ограничения максимальной температуры при постоянстве потерь.

Поскольку реактивная мощность конденсатора переменного тока непосредственно зависит от частоты, удельные показатели конденсаторов (отношение реактивной мощности к объему, массе или другому параметру) также являются функциями частоты. На рис. 2.3.6 приведены зависимости удельной реактивной мощности некоторых отечественных типов конденсаторов переменного тока от частоты.

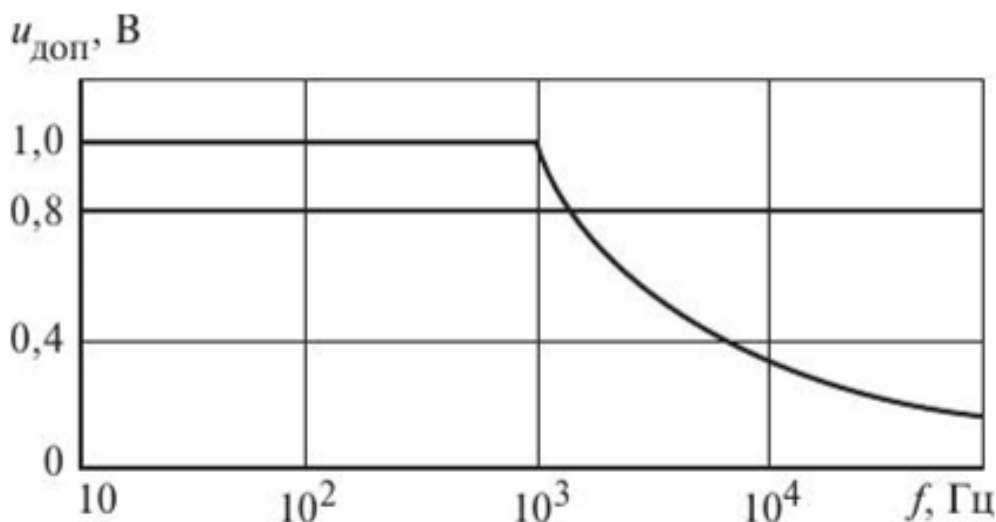


Рис. 2.3.5 Зависимость амплитуды допустимого напряжения конденсатора от частоты

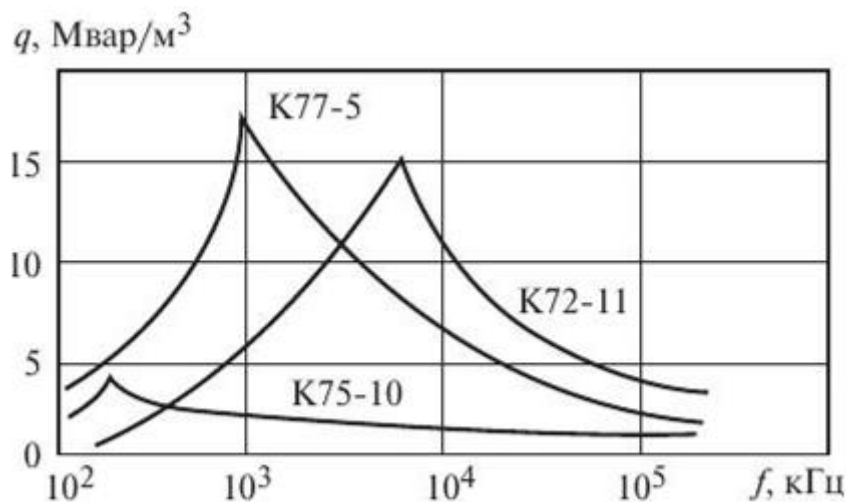


Рис. 2.3.6 Зависимость удельной реактивной мощности конденсаторов от частоты

Из рис. 2.3.6 видно, что для конкретного типа конденсатора существует оптимальная частота приложенного напряжения, при которой его объем будет минимальным.

Электролитические конденсаторы являются основными элементами фильтров постоянного тока и накопителей. В рабочем режиме конденсаторы находятся под постоянным воздействием как постоянной, так и переменной составляющих напряжения. Обычно в технических условиях па электролитические конденсаторы в качестве основных параметров кроме значений емкости указываются номинальное значение постоянной составляющей и допустимое значение переменной в виде синусоидального напряжения частотой $f = 50$ Гц. Однако при более высоких частотах следует учитывать и другие факторы, вызывающие уменьшение проводимости конденсатора как элемента в целом и, как следствие, снижение его фильтрующей способности. Так, при синусоидальном токе фильтрующая способность определяется полным сопротивлением конденсатора Z_C , которое соответствует схеме замещения, представленной на рис. 2.3.7, а. Согласно схеме замещения при частоте f

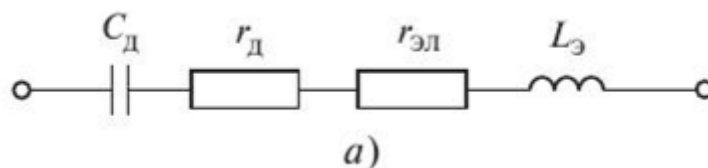


Рис.2.3.7

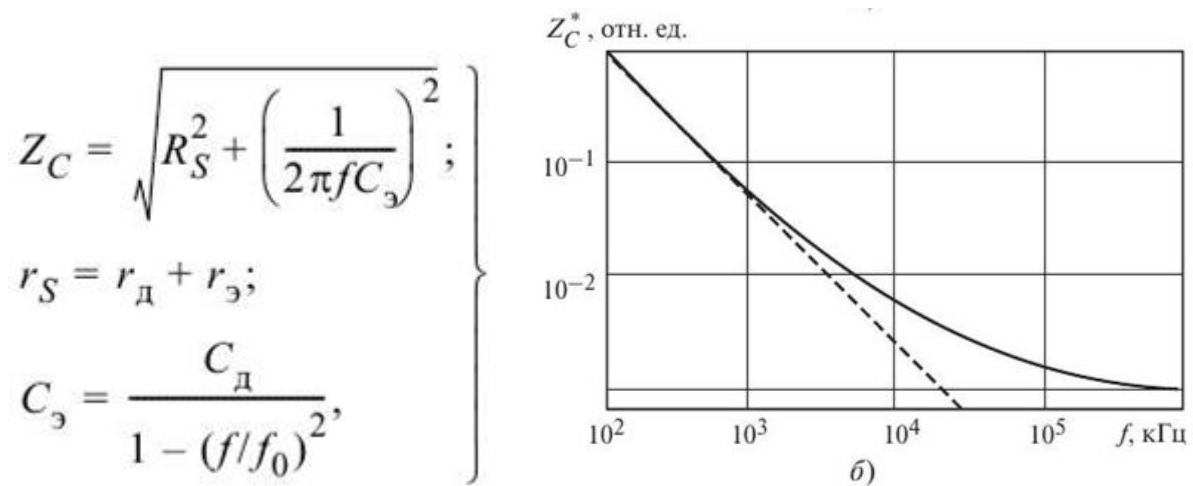


Рис.2.3.7

Схема замещения электролитического конденсатора на повышенной частоте (а) и зависимость относительного значения полного сопротивления от частоты конденсатора К50-20 (б)

Рис. 2.3.7 Схема замещения электролитического конденсатора на повышенной частоте (а) и зависимость относительного значения полного сопротивления от частоты конденсатора К50-20 (б):

C_d — емкость, обусловленная диэлектриком; r_d , r_3 — активные сопротивления, соответствующие потерям в диэлектрике и электролите, C_3 — эквивалентная индуктивность секции и выводов

где индекс «s» — обозначает последовательно эквивалентное сопротивление;

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_3 C_d}}.$$

При расчетах необходимо учитывать зависимости параметров схемы замещения от различных факторов. Значение C_d зависит от типа конденсатора, его параметров и частоты. Индуктивность C_3 является стабильной величиной. Тангенс угла потерь и другие параметры имеют частотную, временную и температурную зависимости. Кроме того, существуют технологические разбросы параметров, носящих обычно случайный характер. Учитывая влияние указанных факторов на проводимость конденсаторов, оценку и сопоставление их удельных

показателей при повышенных частотах следует производить по так называемому эффективному значению емкости

На рис. 2.3.7, б качестве примера приведена зависимость относительного значения от частоты для конденсаторов типа К50-20 при температуре окружающей среды 25 °С. Штриховой линией показана частотная характеристика идеального конденсатора.

Из приведенных зависимостей следует, что фильтрующая способность конденсаторов К50-20 начинает снижаться при частотах свыше 10 кГц, а при частотах более 20 кГц применение их становится нецелесообразным. При частотах выше указанных следует использовать конденсаторы с органическим или керамическим диэлектриком.

При воздействии на конденсаторы пульсаций напряжения несинусоидальной формы их фильтрующие и нагрузочные способности изменяются от спектрального состава этих пульсаций. Поэтому на некоторые типы оксидно-электролитических конденсаторов кроме указанных выше частотных зависимостей в технических условиях иногда приводятся номограммы, позволяющие определить допустимую амплитуду напряжения конкретной несинусоидальной формы, например трапецеидальной, в функции частоты.