

Министерство образования Российской Федерации

Томский политехнический университет

В.И. МЕРКУЛОВ

ОСНОВЫ КОНДЕНСАТОРОСТРОЕНИЯ

Учебное пособие

Томск 2001

Литература

- 1 Ренне В.Т. Электрические конденсаторы. – Л.: Энергия, 1969.- 602 с.
- 2 Ренне В.Т. Пленочные конденсаторы с органическим диэлектриком. – Л.: Энергия, 1971.- 269 с.
- 3 Гулевич А.И., Киреев А.П. Производство силовых конденсаторов. – М.: Высшая школа, 1983.- 155 с.
- 4 Карпихин В.В. Технология изготовления слюдяных и стекломале-
вых конденсаторов. – М.: - Л.: Энергия, 1963. – 253 с.
- 5 Кучинский Г.С. Высоковольтные импульсные конденсаторы. - М.:
Энергия, 1973.-256 с.
- 6 Кучинский Г.С. и др. Силовые электрические конденсаторы. – М.: -Л.:
Энергия, 1975. – 541 с.
- 7 Богородицкий Н.П. и др. Высоковольтные керамические конденса-
торы. - М.: Советское радио, 1970. – 345 с.
- 8 Буц В.П. и др. Вакуумные конденсаторы. - Л.: Энергия, 1971. – 350 с.
- 9 Ренне В.Т. и др. Расчет и конструирование конденсаторов. - М.: Тех-
ника, 1966. – 364 с.
- 10 Ануфриев Ю.А., Гусев В.Н., Смирнов В.Ф. Эксплуатационные харак-
теристики и надежность электрических конденсаторов. – М.: Энергия,
1976. – 224 с.
- 11 Закгейм Л.Н. Электролитические конденсаторы. – М.: - Л.: Госэнер-
гоиздат, 1963. – 284 с.

Меркулов В.И. Основы конденсаторостроения: Учебное пособие. – Томск: Изд. ТПУ, 2001. - 121 с.

В учебном пособии рассмотрены физико-химические явления и процессы, происходящие в изоляции конденсаторов под воздействием электрического поля, основные параметры конденсаторов, основы электрического и теплового расчета, классификация конденсаторов, их конструкционные особенности и технология производства.

Пособие подготовлено на кафедре электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника и предназначено для студентов направления «Электромеханика, электротехника и электротехнологии» специальности 180300.

Рецензенты:

Линин Ю.И.

Зав. отделом ОАО
«НИКИ, г.Томск»,
к.т.н.

Анненков Ю.М.

Доцент каф. ЭИКТ,
к.ф.-м.н

Печатается по постановлению Редакционно-издательского Совета Томского политехнического университета

М303010 – 2001

Темплан 2001

© Томский политехнический университет, 2001

Предисловие

Курс «Основы конденсаторостроения» является базовым курсом при подготовке студентов по специальности «Электроизоляционная, кабельная и конденсаторная техника».

Конденсаторостроение представляет собой важную отрасль народного хозяйства, которая удовлетворяет широкие потребности электроэнергетики, электротехнической и радиоэлектронной промышленности в различных видах конденсаторов. В настоящее время область применения конденсаторов очень обширна. Это силовые (косинусные), электротермические и высоковольтные конденсаторы, применяемые в электроэнергетике, конденсаторы связи, автомобильные, телефонные конденсаторы. В электротехнике и радиоэлектронике широко применяются различные виды электролитических, слюдяных, бумажных, керамических и стеклокерамических конденсаторов. Конденсаторы являются важным элементом интегральных схем, применяемых в вычислительной технике.

Основные сведения о конденсаторах, явлениях, происходящих в них при воздействии электрического поля, основах их расчета и конструирования изложены в монографии В.Т.Ренне и других книгах, которые в настоящее время стали библиографической редкостью, что затрудняет процесс обучения студентов. В настоящее время типы конденсаторов, их номенклатура, особенности конструкции и технологии изготовления настолько многообразны, что их невозможно рассмотреть в одной книге.

Данное пособие призвано восполнить недостаток в учебной литературе и, в какой то мере, изложить современные сведения в области конденсаторостроения. Структура данного курса базируется на основе типовой программы «Основы конденсаторостроения», утвержденной учебно-методическим управлением по высшему образованию 02.06.84 г. (индекс УМУ-Т-6/1195).

Глава 1. Общие сведения о конденсаторах и их характеристиках

1.1. Основные этапы в развитии конденсаторостроения

Первые конденсаторы появились в середине XVIII века, т.е. более 200 лет назад. Приоритет в изобретении конденсатора приписывается Ван Мушенброку, профессору Лейденского университета (Голландия). Однако, более правильно, считать изобретателем Эвальда Георга фон Клейста (Германия), заявившего об изобретении конденсатора в октябре 1745 г.

В России первые сведения об использовании конденсаторов относят к исследованиям атмосферного электричества Ломоносовым и Рихтером в 1752 г. Начало технического применения конденсаторов можно отнести к середине XIX века, когда в 1856 г. был выдан патент Исхаму Багесу на использование конденсаторов для зажигания неоновых ламп и целей телеграфирования. В настоящее время трудно назвать область техники, где бы не использовались конденсаторы.

Наиболее широкое применение конденсаторов нашло в радиотехнике после открытия радио Поповым в 1895 г. Вторым важным этапом в развитии конденсаторостроения явилось их использование в различных областях энергетики и электротехники. В 1919 г. состоялся первый массовый выпуск слюдяных конденсаторов фирмой Джeneral-Электрик, а в 1926 г. был выпущен первый силовой конденсатор с синтетической пленкой (Германия). В России первый выпуск конденсаторов (с бумажно-масляной изоляцией) был начат центральной радиолaborаторией в г. Горьком в 1931 г., а выпуск силовых конденсаторов Московским трансформаторным заводом в 1935 г. И только в 1944 г. был построен первый специализированный конденсаторный завод в г. Серпухове по выпуску силовых конденсаторов.

1.2. Классификация конденсаторов

Электрические свойства, конструкция и область применения конденсаторов во многом определяется диэлектриком, разделяющим его обкладки. Поэтому часто классификацию конденсаторов производят по роду диэлектрика:

1. Конденсаторы с газообразным диэлектриком

- а) воздушные;
- б) газонаполненные;
- в) вакуумные.

2. Конденсаторы с жидким диэлектриком

- а) маслonaполненные;
- б) наполненные синтетической жидкостью;
- в) наполненные жидким твердеющим диэлектриком.

3. Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком

- а) стеклянные и стеклопленочные;

- б) стекломалеваые и стеклокерамические;
- в) керамические;
- г) слюдяные;
- д) бентонитовые.

4. Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком

- а) бумажно-пропитанные;
- б) металлобумажные;
- в) пленочные, лакопленочные;
- г) с комбинированным (бумажно-пленочным) диэлектриком.

5. Конденсаторы с оксидным диэлектриком

- а) алюминиевые, танталовые, ниобиевые и др.;
- в) оксидно-полупроводниковые.

По режиму работы конденсаторы можно классифицировать

- 1 для постоянного напряжения;
- 2 для переменного напряжения технической частоты;
- 3 для звуковых частот порядка 100-10000 Гц;
- 4 радиочастотные (0.1-100 МГц);
- 5 импульсные (в схемах ГИТ, ГИН, радиолокации).

По величине воздействующего напряжения они делятся на

- 1 конденсаторы низкого напряжения;
- 2 высоковольтные конденсаторы.

По величине мощности различают

- 1 конденсаторы низкой мощности;
- 2 конденсаторы большой мощности (реактивные).

По конструктивному исполнению и возможности регулирования емкости:

- 1 с постоянной или переменной емкостью;
- 2 герметичные и не герметичные.

Кроме того, конденсаторы можно подразделить по характеру использования на

- 1 силовые, радиочастотные, автомобильные и др.;
- 2 контурные, анодно-разделительные;
- 3 конденсаторы связи.

К основным конструктивным элементам конденсаторов относятся обкладки и основная изоляция между обкладками. Кроме того, в силовых конденсаторах можно также выделить конденсаторные секции, изоляцию между секциями и корпусом, соединительные проводники и межсекционные соединения; выводы (изоляторы), корпус конденсатора, а в электротермических конденсаторах и охлаждающую систему.

1.3. Материалы в конденсаторостроении

Материалы, применяемые в конденсаторостроении, выполняют очень важную роль, т.к. во многом определяют вид и назначение конденсатора, его надежность и долговечность, технологичность, экономичность и т.д. С точки зрения функции, выполняемой материалами, можно выделить четыре основные группы:

- 1 проводниковые материалы;
- 2 электроизоляционные материалы;
- 3 вспомогательные материалы;
- 4 конструкционные материалы.

1.3.1. Проводниковые материалы

Проводниковые материалы в конденсаторах используются для изготовления обкладок, соединения отдельных секций друг с другом, выводов и т.д. Часто в группу проводниковых материалов включают металлические конструкционные материалы, которые применяются для изготовления корпуса конденсатора, различных крепежных изделий и др. элементов.

К основным проводниковым материалам, применяемым для изготовления обкладок, относятся алюминий и медь. В производстве конденсаторов применяются наиболее чистые алюминий и медь с содержанием чистого металла до 99,5 % и выше (марки АО по ГОСТ 618-62 и МО по ГОСТ 859-71). Основные характеристики данных материалов приведены в табл. 1.1.

Из табл. 1.1. видно, что по сравнению с алюминием медь обладает меньшим удельным сопротивлением. Она также более стойка к окислению, но дорогая из-за сложности производства. Поэтому для изготовления конденсаторной фольги в основном применяется алюминий, который легче по сравнению с медью, что уменьшает удельный вес конденсаторов. Алюминий также широко применяется для изготовления металлобумажной изоляции путем вакуумного распыления. В силовом конденсаторостроении используется алюминиевая фольга шириной 10 ÷ 600 мм и толщиной 0,005 ÷ 0,020 мм.

Таблица 1.1

Свойства	Наименование материала			
	Алюминий	Медь	Латунь	Серебро
Плотность d , г/см ³	2,7	8,9	8,5	10,49
Температура плавления, °С	657	1083	900	961
Козфф. теплопроводности λ , ккал/м.ч.град	174	338	90	395
Уд. сопротивление ρ , Ом.мм. ² /м	0,028	0,0172	0,071	0,016
ТКР, 1/град	0,0042	0,0043	0,0017	0.0036

Медь применяется в основном в качестве проводников для изготовления секционных шин, межсекционных соединений, выводов из конденсатора, а также секционных предохранителей. Кроме того, в конденсаторостроении используется также сплав меди - латунь марки ЛС59-1 (табл. 1.1) для изготовления различных крепежных деталей и выводов.

Для изготовления обкладок слюдяных конденсаторов часто применяется оловянно-свинцовая фольга марки МПТУ 2102-49 толщиной $15 \div 30$ мкм и шириной от 10 до 30 мм. Кроме того, в слюдяных конденсаторах в качестве металлизированных обкладок применяется серебро, наносимое испарением в вакууме или методом вжигания.

В качестве конструкционного проводникового материала, как правило, используется низкоуглеродистая отожженная сталь. Тонколистовая сталь толщиной $1 \div 2$ мм применяется для изготовления корпусов, крепежных хомутов. Толстолистовая сталь ($10 \div 16$ мм) применяется для изготовления крышек конденсаторов связи.

В качестве вспомогательных проводниковых материалов, применяемых для гальванического покрытия различных крепежных деталей и корпуса, применяются цинк, никель и олово. Олово и припой на его основе используются также для пайки различных соединений и выводов.

1.3.2. Электроизоляционные материалы

Электроизоляционные материалы выполняют функцию разделительного диэлектрика между обкладками конденсатора, а также для изоляции между отдельными секциями и их изоляции от корпуса. Поэтому электроизоляционные материалы являются наиболее важным элементом в конструкции конденсатора. От правильности выбора диэлектрика во многом зависит качество и надежность конденсатора, его экономичность и удельные характеристики. По своему назначению электроизоляционные материалы подразделяются на основные, играющие роль изоляции между обкладками, и вспомогательные, как дополнительной изоляции между секциями и корпусом конденсатора.

В данном пособии не представляется возможным рассмотреть свойства всех электроизоляционных материалов, применяемых в конденсаторостроении, тем более что виды электроизоляционных материалов зависят от типа конструкции конденсатора и подробно рассмотрены в учебной и справочной литературе [1,2].

Существующие электроизоляционные материалы можно подразделить по агрегатному состоянию на

- 1) газообразные (воздух, азот, элегаз, водород и др.);
- 2) жидкие (нефтяные масла, синтетические жидкости и др.);
- 3) твердые неорганические диэлектрики (слюдяные, стеклянные, керамические, стеклокерамические и др.);
- 4) твердые органические неполярные диэлектрики (полиэтилен, полистирол, фторопласт-4 и др.);

- 5) твердые органические полярные диэлектрики (бумага, лавсан, фторопласт-3 и др.);
- 6) оксидные диэлектрики.

1.3.3. Вспомогательные материалы

В группу вспомогательных материалов входят различные материалы, применяемые в производстве конденсаторов. Это различные флюсы, краски, эмали, растворители, пропиточные массы и материалы для опрессовки конденсаторов. Применение тех или иных вспомогательных материалов обуславливается типом конденсатора и технологией его изготовления.

1.4. Основные свойства и параметры конденсаторов

1.4.1. Поляризационные процессы

Влияние рода диэлектрика на величину емкости конденсатора обусловлено различной интенсивностью проявления в них процессов поляризации.

Согласно определению – поляризация, это процесс смещения упруго-связанных электрических зарядов или ориентация диполей в диэлектрике под воздействием внешнего электрического поля. В соответствии с характером процесса различают медленные и быстропротекающие виды поляризации.

К быстропротекающим видам поляризации относятся: электронная, упругая ионная, упругая дипольная. Эти виды поляризации обусловлены упругим смещением связанных электрических зарядов. Так электронная поляризация обусловлена упругим смещением электронной оболочки относительно ядра, упругая ионная поляризация - упругим смещением ионов относительно узла кристаллической решетки ионных диэлектриков, а упругая дипольная поляризация - упругим смещением полярных молекул-диполей (радикалов) относительно положения равновесия. Эти виды поляризации происходят практически мгновенно за время порядка 10^{-15} с и вследствие упругости протекают без потерь энергии.

К медленным видам поляризации относятся: дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная, структурная, междуслойная, миграционная, спонтанная (доменная) и др. Дипольно-релаксационная поляризация обусловлена ориентацией диполей, а доменная - ориентацией доменов. Ионно-релаксационная, миграционная, междуслойная и структурная поляризации связаны с достаточно большим смещением связанных ионов или радикалов относительно их положения равновесия (узла кристаллической решетки, границы раздела слоев или места расположения неоднородности).

Для этих видов поляризации характерно большое время установления, которое составляет порядка $10^{-3} \div 10^{-6}$ с. Это обстоятельство обуславливает релаксационный характер их проявления, т.е. процесс запаздывания от изменения электрического поля. Кроме того, эти виды поляризации связаны с по-

терями энергии, которые расходятся на преодоление сил межмолекулярного взаимодействия (сил трения) в процессе их проявления.

Способность диэлектрика поляризоваться в электрическом поле характеризуется величиной диэлектрической проницаемости ε , которая определяется отношением заряда, накопленного в конденсаторе с диэлектриком к заряду конденсатора при тех же геометрических размерах, если между обкладками находится вакуум.

$$\varepsilon = \frac{Q_d}{Q_o} = \frac{C_d}{C_o}. \quad (1.1)$$

Величина диэлектрической проницаемости ε зависит от температуры, частоты приложенного напряжения и типа диэлектрика, т.е. протекающих в нем видов поляризации. В табл. 1.2 показаны основные характерные зависимости диэлектрической проницаемости от температуры и частоты для различных типов диэлектрика.

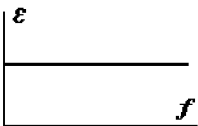
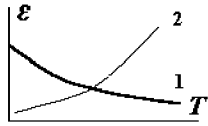
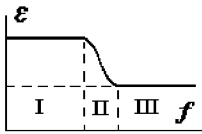
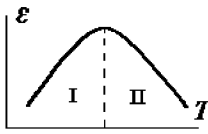
Из таблицы видно, что для неполярных и ионных диэлектриков, в которых наблюдаются быстропротекающие процессы поляризации (электронная и упругая ионная) характерна практическая независимость ε от частоты.

Характер зависимости ε от температуры для этих диэлектриков определяется видом поляризации. Для неполярных диэлектриков, у которых проявляется одна электронная поляризация, значение ε слабо уменьшается с ростом температуры за счет уменьшения их плотности при тепловом расширении. В ионных диэлектриках, у которых ионная упругая поляризация преобладает над электронной, значение ε может возрасти с увеличением температуры за счет увеличения степени смещения (поляризуемости) ионов относительно узла решетки.

В диэлектриках, у которых наблюдаются медленно протекающие виды поляризации, зависимость ε от частоты имеет более сложный вид и характеризуется наличием трех участков. В области низких частот, когда успевают проявляться все виды поляризации, значение ε максимально и практически не зависит от частоты. На средних частотах, когда период приложенного напряжения сопоставим со временем установления поляризации, значение ε начинает уменьшаться с ростом частоты за счет запаздывания процесса поляризации (ориентации диполей, доменов) от изменения напряжения. На последнем участке в области высоких частот медленные виды поляризации уже не успевают следовать за изменением поля и значение ε здесь обуславливается, как правило, только электронной поляризацией.

Зависимость диэлектрической проницаемости от температуры для этих диэлектриков характеризуется наличием максимума, когда наблюдается наибольшая степень поляризуемости. В случае полярных диэлектриков или сегнетоэлектриков возрастание ε с ростом температуры на первом участке связано с увеличением степени ориентации диполей или доменов за счет ослабления сил межмолекулярного взаимодействия при тепловом расширении.

Таблица 1.2

Тип поляризации	Вид диэлектрика	Зависимость $\varepsilon = f(f)$	Зависимость $\varepsilon = f(T)$
Быстро протекающие виды поляризации: (электронная, упругая ионная)	неполярные, ионные с плотной упаковкой ионов		
Медленно устанавливающиеся виды поляризации: (дипольно-релаксационная, ионно-релаксационная, структурная, доменная и др.)	полярные, ионные с неплотной упаковкой ионов, сегнетоэлектрики и др.		

Уменьшение диэлектрической проницаемости на втором участке либо обуславливается разбросом диполей интенсивным тепловым хаотическим движением в случае полярных диэлектриков, либо разрушением доменной структуры в случае сегнетоэлектриков.

Для ионных диэлектриков с неплотной упаковкой ионов величина ε увеличивается с ростом температуры за счет увеличения степени смещения ионов и ослабления сил межмолекулярного взаимодействия. В них, по сравнению с ионными диэлектриками с плотной упаковкой ионов, возрастание ε с увеличением температуры имеет более резкий характер.

1.4.2. Емкость конденсаторов

Емкость конденсатора является одной из важнейших его характеристик и характеризует отношение заряда, накопленного в конденсаторе к величине напряжения, приложенного к обкладкам.

$$C = \frac{Q}{U}, [\Phi]. \quad (1.2)$$

Если диэлектрик, разделяющий обкладки, имеет форму пластинки или плоского диска (слода, керамика и др.), то применяется плоский тип конденсатора (рис.1.1 а), емкость которого находится:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 \cdot S}{d} = \frac{\varepsilon \cdot S}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11} \cdot d} = 0.0885 \frac{\varepsilon \cdot S}{d} [n\Phi], \quad (1.3)$$

где d – толщина диэлектрика, см;

S – активная площадь обкладок, см²;

ε – диэлектрическая проницаемость.

Если плоский конденсатор собран из N обкладок, соединенных через одну параллельно (рис.1.1 б), то его емкость будет равна:

$$C = 0,0885 \frac{\varepsilon \cdot S(N-1)}{d}, [\text{пФ}]. \quad (1.4)$$

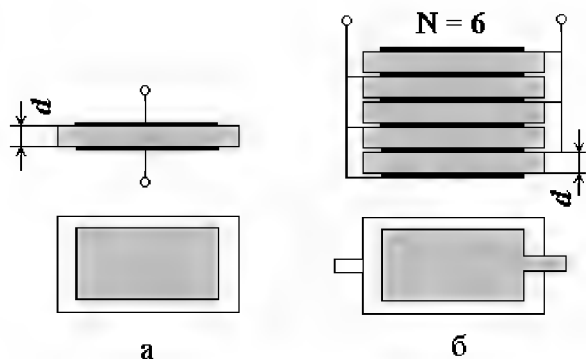


Рис.1.1. Конструкция плоского конденсатора:
а) однопластинчатый;
б) многопластинчатый

Для цилиндрического конденсатора, представляющего собой два коаксиальных цилиндра, разделенных диэлектриком (рис.1.2 а), его емкость определяется:

$$C = 0,241 \frac{\varepsilon \cdot \ell}{\lg \frac{r_2}{r_1}}, [\text{пФ}], \quad (1.5)$$

где ℓ — длина цилиндра (длина обкладки), см;

r_1, r_2 — соответственно внутренний и наружный радиусы обкладок, см.

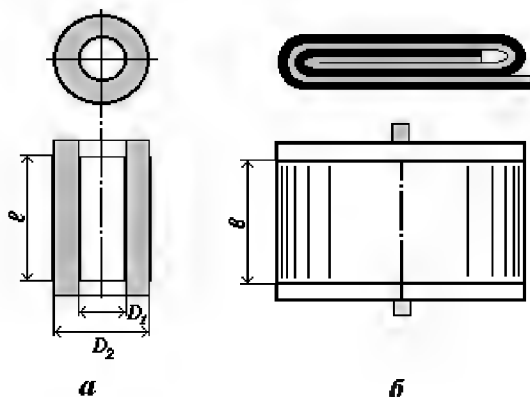


Рис.1.2. Конструкция цилиндрического (а) и спирально-намотанного (б) конденсатора

Для увеличения емкости конденсатора часто применяют спирально намотанные конденсаторы (рис.1.2 б). Емкость такого конденсатора равна удвоенному значению емкости такого же конденсатора, но размотанному в плоскую длинную ленту:

$$C = 0,1768 \frac{\varepsilon \cdot b \cdot \ell}{d}, [\text{пФ}], \quad (1.6)$$

где b – ширина обкладки, см;
 l – длина обкладки, см;
 d – толщина диэлектрика между обкладками, см.

При намотке спиральных конденсаторов необходимо знать зависимость числа витков N от их емкости. Эта зависимость при намотке на цилиндрическую оправку может быть выражена уравнением

$$N = \frac{2.5 \cdot 10^3 (D - D_o)}{d + d_o}. \quad (1.7)$$

Здесь D, D_o – соответственно наружный диаметр конденсатора и диаметр оправки, см;

d, d_o – соответственно толщина диэлектрика и фольговых обкладок, мкм;

Значение D , можно найти $D = \sqrt{D_o^2 + kC}$,

где $k = \frac{0.144(d + d_o)d}{\varepsilon \cdot b}$, а емкость C в мкФ.

При намотке на плоскую оправку, шириной B (в см)

$$N = \sqrt{k_1 C + k_2^2} - k_2, \quad (1.8)$$

где $k_1 = \frac{7.05 \cdot 10^5 d}{\varepsilon \cdot b(d + d_o)}$, а $k_2 = \frac{1.25 \cdot 10^3 B}{d + d_o}$.

В рассмотренных уравнениях не учитывается рассеяние емкости у краев обкладок. Это допустимо для конденсаторов большой емкости, но в конденсаторах малой емкости (дисковых и трубчатых) необходимо учитывать возрастание емкости за счет ее рассеяния у краев обкладок. Обычно для этого используют эмпирические уравнения.

В плоском дисковом конденсаторе, у которого площадь электрода совпадает с площадью диэлектрика, приращение емкости за счет рассеяния можно найти

$$C_k = 1,5 \frac{d}{D} \left[\ln \left(25 \frac{D}{d} \right) - 1.305 \right], \text{ [пФ]}. \quad (1.9)$$

Если имеется закраина, то приращение емкости учитывается коэффициентом, зависящим от формы поля. В этом случае суммарная емкость может быть рассчитана:

- В плоском дисковом конденсаторе

$$C = 0,0694 \frac{\varepsilon(D + kd)^2}{d}, \text{ [пФ]}. \quad (1.10)$$

- В цилиндрическом (трубчатом) конденсаторе

$$C = 0.241 \frac{\varepsilon(l + kd)}{\lg \frac{r_2}{r_1}}, [\text{пФ}]. \quad (1.11)$$

В керамических конденсаторах на высокое напряжение для выравнивания электрического поля применяется утолщение диэлектрика у краев электродов (рис.1.3).

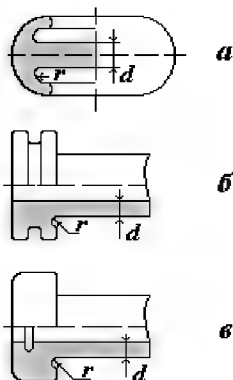


Рис.1.3. Выравнивание электрического поля в керамических конденсаторах утолщением изоляции у краев:

а) для дисковой формы;
б и в) для трубчатой формы

В этом случае увеличение суммарной емкости конденсатора можно учесть поправкой на увеличение диаметра или толщины разделительного диэлектрика.

Для плоского типа

$$\Delta C = 0,41(d + 2r). \quad (1.12)$$

Для трубчатой формы

$$\Delta C = 0.41(d/2 + r). \quad (1.13)$$

Эта поправка растет с ростом толщины диэлектрика и радиуса закругления. Для спирально намотанных конденсаторов отклонения емкости от расчетного значения обусловлены наличием зазоров между диэлектриком и обкладками за счет недостаточной плотности намотки и опрессовки при изготовлении, что сказывается на эффективном значении диэлектрической проницаемости. Для учета этого явления вводится поправочный коэффициент k_n , который определяется опытным путем.

По точности значения, т.е. по величине допустимого отклонения емкости от ее номинального значения, конденсаторы разделяются на четыре основных класса: класс 0; допуск $\pm 2\%$, класс I; допуск $\pm 5\%$, класс II; допуск $\pm 10\%$, класс III; допуск $\pm 20\%$.

Если номинальная емкость отличается от стандартной, то производится подгонка емкости. Для этого конденсатор изготавливается с несколько повышенной емкостью, а затем его емкость снижается до требуемого значения путем удаления части обкладки или специальных подгоночных обкладок (рис. 1.4), образующих ряд дополнительных небольших емкостей.

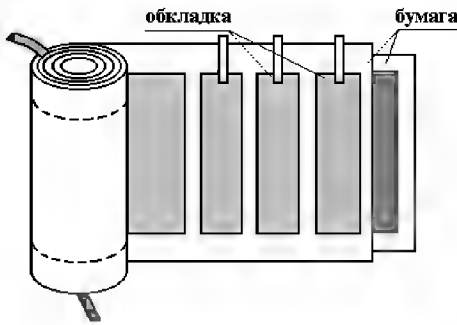


Рис.1.4. Конструкция подгоночных обкладок

1.4.3. Зависимость емкости конденсатора от температуры

Температурную зависимость емкости конденсаторов характеризуют величиной температурного коэффициента емкости α_c (ТКС)

$$\alpha_c = \frac{1}{C} \cdot \frac{dC}{dt}, [\text{град}^{-1}]. \quad (1.14)$$

Если зависимость емкости от температуры носит линейный характер, то величину ТКС можно вычислять по формуле:

$$\alpha_c = \frac{C_2 - C_1}{C_1(t_2 - t_1)}, [\text{град}^{-1}]. \quad (1.15)$$

Здесь C_1 - емкость при комнатной температуре t_1 .

Если зависимость емкости от температуры имеет нелинейный характер, то вместо ТКС часто указывают относительное изменение емкости

$$\Delta C = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \cdot 100\%. \quad (1.16)$$

Характер зависимости емкости конденсатора от температуры во многом определяется характером температурной зависимости ε диэлектрика, разделяющего обкладки.

Покажем это на примере плоского конденсатора. Согласно уравнению (1.3) после его дифференцирования по температуре получим:

$$\frac{dC}{dt} = 0.0885 \left(\frac{\ell^2}{\delta} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{\varepsilon}{\delta} 2\ell \frac{d\ell}{dt} - \frac{\varepsilon \cdot \ell^2}{\delta^2} \frac{d\delta}{dt} \right). \quad (1.17)$$

Разделив левую и правую части уравнения (1.17) на левую и правую части уравнения (1.3), получим:

$$\frac{1}{C} \frac{dC}{dt} = \frac{1}{\varepsilon} \frac{d\varepsilon}{dt} + \frac{2}{\ell} \frac{d\ell}{dt} - \frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dt} \quad (1.18)$$

или

$$\alpha_c = \alpha_\varepsilon + 2\alpha_\ell - \alpha_\delta, \quad (1.19)$$

где α_ε - температурный коэффициент диэлектрической проницаемости;

α_m – коэффициент линейного расширения металла обкладок;

α_d – коэффициент линейного расширения диэлектрика.

Из этого следует, что изменение емкости от температуры в первую очередь определяется изменением с температурой диэлектрической проницаемости и в меньшей степени тепловым расширением диэлектрика и металла обкладок.

1.4.4. Методы термокомпенсации

Для уменьшения ТКС конденсаторов, т.е. повышения стабильности емкости, что особенно важно для конденсаторов, используемых в радиоконтурах, применяют диэлектрики с малыми значениями α_ϵ (воздух, слюда, специальную керамику). В этих случаях величина α_ϵ оказывается соизмеримой с коэффициентом линейного расширения диэлектрика и металла обкладок.

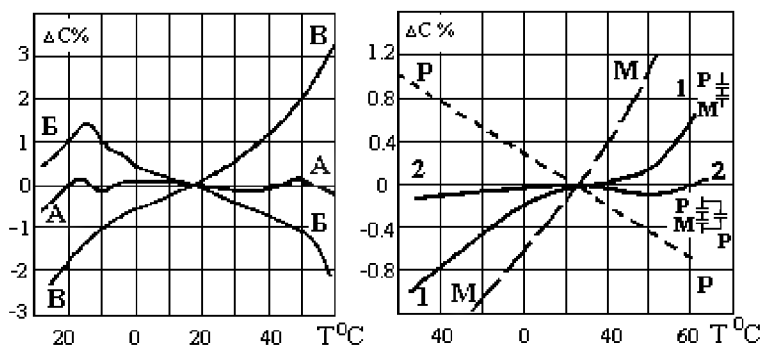


Рис. 1.5. Зависимость емкости от температуры для термокомпенсированных намотанных конденсаторов:
а – бумажный; б – пленочный

А – секции Б и В соединены параллельно, Б – бумага нормальной плотности, В – бумага повышенной плотности, Р – полистирольная пленка, М – пленка «Майлар»

Малые изменения емкости с температурой можно достигнуть путем параллельного соединения двух секций, имеющих величину ТК ϵ разных знаков. В этом случае для получения результирующего значения ТК ϵ , близкого к нулю, необходимые величины емкостей обеих секций определяются из выражения:

$$C_1 = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2} C \quad \text{или} \quad C_2 = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2} C. \quad (1.20)$$

Этот принцип термокомпенсации можно, например, использовать при изготовлении бумажных и пленочных конденсаторов.

В этом случае, наряду с параллельным соединением секций, может применяться и последовательно параллельная схема соединения, что видно из рис.1.5.

1.4.5. Электропроводность в конденсаторах

Сопротивление изоляции

При приложении к конденсатору напряжения U через его изоляцию протекает электрический ток, который с течением времени постепенно уменьшается до некоторого постоянного значения, называемого остаточным током или током утечки (рис.1.6.).

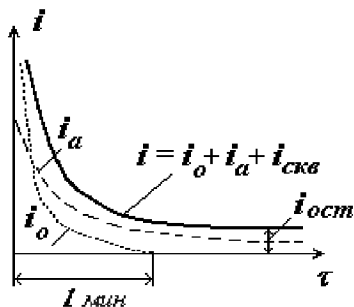


Рис.1.6. Зависимость тока в изоляции конденсатора от времени приложения напряжения τ

i_0 — зарядный ток;
 $i_{скв}$ — ток сквозной проводимости;
 i_a — ток абсорбции.

Как следует из рис.1.6, общая величина тока складывается из зарядного тока (тока зарядки геометрической емкости) — i_0 , тока абсорбции — i_a и тока сквозной проводимости $i_{скв}$. Зарядный ток связан с зарядом конденсатора и обусловлен током смещения за счет быстропротекающих процессов поляризации (электронной и упругой ионной) и поэтому быстро уменьшается до нуля. Величина тока абсорбции обусловлена медленными видами поляризации (дипольно-релаксационной, ионно-релаксационной, структурной и др.), время установления которых достаточно велико. Ток сквозной проводимости обусловлен перемещением в диэлектрике свободных или слабосвязанных зарядов (ионов и электронов).

Часто ток сквозной проводимости отождествляется с остаточным током или током утечки, что не совсем верно, так как остаточный ток может содержать незначительную составляющую тока абсорбции, связанную с очень медленными видами поляризации. Считается, что спустя 1 минуту после приложения напряжения основные поляризационные процессы завершаются, т.е. $i_{ост} = i_{ум} + i_{скв}$.

Исходя из этого, сопротивление изоляции конденсатора можно определить:

$$R_{из} = \frac{U}{i_{ум}} = \frac{U}{i_{скв}}, [\text{Ом}]. \quad (1.21)$$

Измерение сопротивления изоляции обычно производят спустя 1 минуту после приложения напряжения, когда зарядный ток i_0 исчезает, а ток абсорб-

ции i_d очень мал. В реальных конденсаторах поляризационные процессы за этот промежуток еще не успевают завершиться, т.к. требуют времени порядка 30-60 мин, поэтому измеряемое сопротивление изоляции $R_{из}$ с течением времени τ может возрастать.

Кроме того, на величину сопротивления изоляции конденсаторов оказывают влияние вид диэлектрика, температура и значение приложенного напряжения. Так с увеличением напряжения возрастание $R_{из}$ с течением времени τ будет уменьшаться, т.к. часть слабосвязанных ионов с ростом напряжения будет освобождаться (срываться полем) и увеличивать ток сквозной проводимости – $i_{скв}$ (рис. 1.7.).

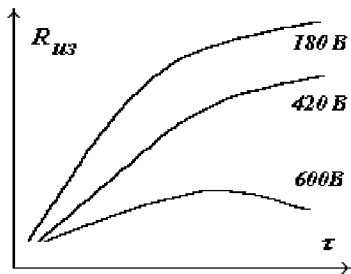


Рис.1.7. Зависимость сопротивления изоляции конденсатора от времени при различных напряжениях для бумаги, пропитанной хлорнафталином

При увеличении температуры за счет термической диссоциации будет освобождаться большее количество ионов, что приведет к росту тока сквозной проводимости – $i_{скв}$, а следовательно и к уменьшению сопротивления изоляции $R_{из}$ (рис.1.8.).

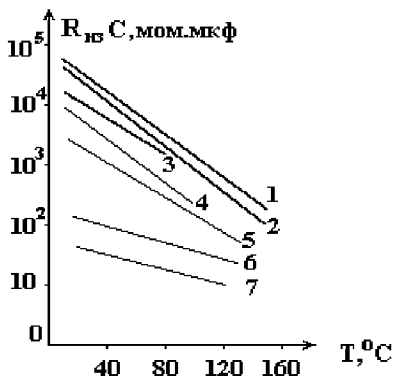


Рис.1.8. Зависимость постоянной времени конденсатора $R_{из}C$ от температуры для различных диэлектриков:

- 1 – ПТФЭ;
- 2 – ПЭТФ;
- 3 – полистирол;
- 4 – полиэтилен;
- 5 – бумага, пропитанная неполярным диэлектриком;
- 6 – окись тантала;
- 7 – окись алюминия

Изменение $R_{из}$ от температуры можно описать уравнением вида

$$\ln R = \ln R_0 - \beta(t - t_0), \quad (1.22)$$

где β - температурный коэффициент, зависящий от материала.

Из табл. 1.3 видно, что его величина находится в пределах от 0,01 до 0,05.

Таблица 1.3

Материал	Значение β
ПЭ	0,040 – 0,045
ПС	0,030 – 0,040
Ф-4	0,025 – 0,03
Пропитанная бумага	0,030 – 0,035
Слюда	0,010 – 0,015

Для конденсаторов малой емкости и малых размеров необходимо учитывать утечку тока по закраинам (т.е. по поверхности).

В этом случае

$$R_{из} = \frac{R_V R_S}{R_S + R_V} = \frac{R_V}{1 + \frac{R_V}{R_S}}, \quad (1.23)$$

где R_V и R_S – соответственно сопротивление объемному и поверхностному току.

Величина поверхностного сопротивления R_S зависит от степени загрязнения поверхности конденсатора и влажности окружающего воздуха.

Согласно рис.1.9. можно выделить 3 группы диэлектриков, для которых зависимость сопротивления R_S от относительной влажности воздуха имеет различный характер. Кроме того, следует отметить, что с ростом приложенного напряжения (особенно для высоковольтных конденсаторов) величина сопротивления изоляции может значительно уменьшаться за счет дополнительного вырывания полем слабосвязанных ионов и появления электронной составляющей.

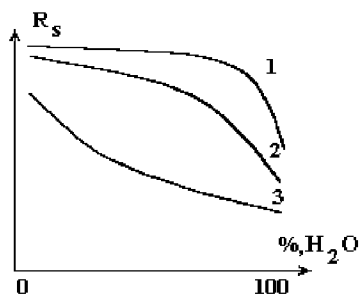


Рис. 1.9. Зависимость поверхностного сопротивления от относительной влажности воздуха для различных диэлектриков:

- 1 – несмачиваемые (слюда, стекло, Ф-4, ПЭ и др.;
- 2 – частично смачиваемые;
- 3 – смачиваемые или обладающие пористой структурой (бумага, керамика и др.)

Зависимость сопротивления изоляции от напряженности электрического поля обычно описывается уравнением Пуля:

$$R_{из} = A e^{-\alpha E}, \quad (1.24)$$

где α – коэффициент Пуля, зависящий от материала диэлектрика;

E – напряженность электрического поля.

Для керамических и ионных диэлектриков, у которых имеет место значительная составляющая электронной проводимости, зависимость сопротивления от напряженности поля описывается уравнением Френкеля:

$$R_{из} = A \cdot e^{\beta \sqrt{E}}. \quad (1.25)$$

Здесь β - коэффициент Френкеля;

A - параметр, зависящий от материала.

На практике большое значение имеет такая характеристика конденсатора, как постоянная времени конденсатора - τ , равная произведению сопротивления $R_{из}$ на емкость C . Действительно

$$R_{из} = \rho_v \cdot \frac{d}{S}, \text{ а } C = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}, \text{ тогда их произведение}$$

$$R \cdot C_{из} = \rho_v \cdot \varepsilon \cdot 0.884 \cdot 10^{-13}, [c]. \quad (1.26)$$

Произведение RC называется *постоянной времени конденсатора*, которая не зависит от его формы и размеров, а определяется только качеством диэлектрика, т.е. его удельным сопротивлением и диэлектрической проницаемостью.

Величина сопротивления изоляции конденсаторов оказывает большое влияние на процессы зарядки и разрядки, на саморазряд конденсатора, его поведение в постоянном и переменном полях, а также на явление диэлектрической абсорбции.

1.4.6. Заряд и разряд конденсатора. Явление диэлектрической абсорбции

Заряд конденсатора

При приложении к конденсатору напряжения в момент его включения происходит бросок тока до величины $-i_0$:

$$i_0 = \frac{U}{r}, \quad (1.27)$$

где r - сопротивление зарядной цепи, состоящее из сопротивления обкладок, выводов, соединительных проводников и внутреннего сопротивления источника (в данном случае не учитывается влияние индуктивности).

Далее сила тока постепенно спадает, стремясь к нулю по уравнению:

$$i = i_0 e^{-\frac{\tau}{rC}}, \quad (1.28)$$

а напряжение на выводах конденсатора возрастает, асимптотически приближаясь до величины U :

$$U_c = U \left(1 - e^{-\frac{\tau}{rC}} \right). \quad (1.29)$$

Изменение напряжения и тока в процессе заряда конденсатора показано на рис.1.10.

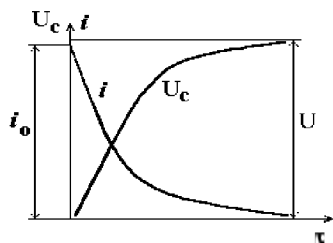


Рис.1.10. Зависимость тока и напряжения на конденсаторе от времени в процессе заряда

При заряде реального конденсатора, как было показано ранее, ток с течением времени спадает не до нуля, а до некоторого конечного значения – тока утечки – i_{um} , который обусловлен наличием в диэлектрике конденсатора свободных (слабосвязанных) ионов.

Протекание в цепи конденсатора зарядного тока приводит к накоплению в конденсаторе некоторого запаса энергии. Учитывая, что ток изменяется с течением времени, величина энергии, затраченная на заряд конденсатора, будет равна энергии, выделенной в виде тепла на сопротивлении в цепи конденсатора при протекании зарядного тока:

$$W_{зар} = \int_0^{\infty} i^2 \cdot r \cdot d\tau, \text{ так как} \quad (1.30)$$

$$i = \frac{U}{r} e^{-\frac{\tau}{r \cdot C}}, \text{ то} \quad (1.31)$$

$$W_{зар} = \frac{U^2}{r} \int_0^{\infty} e^{-\frac{2\tau}{r \cdot C}} d\tau = \frac{CU^2}{2}, \text{ [Дж]}, \quad (1.32)$$

т.е. чтобы зарядить конденсатор до энергии W , необходимо затратить такую же энергию, как на нагрев сопротивления зарядной цепи.

При наличии в зарядной цепи индуктивного сопротивления характер кривых тока и напряжения от времени приобретает колебательный характер (периодический или аperiodический в зависимости от соотношения величин r, L и C).

На рис. 1.11 приведена зависимость тока и напряжения от времени τ при наличии в зарядной цепи конденсатора индуктивного сопротивления.

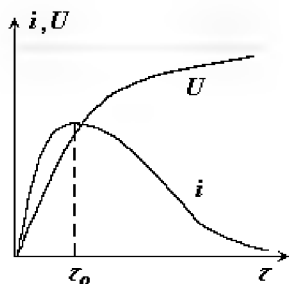


Рис. 1.11. Зависимость тока и напряжения от времени при наличии в зарядной цепи конденсатора индуктивного сопротивления при условии:

$$r \geq 2\sqrt{\frac{L}{C}}, \text{ а } \tau_0 = \frac{2L}{r}$$

Разряд конденсатора

При замыкании обкладок конденсатора с емкостью C на сопротивление разрядной цепи r происходит разряд конденсатора. В этом случае запасенная в нем энергия расходуется на нагрев сопротивления r , а напряжение на конденсаторе быстро снижается до нуля:

$$U_c = U \cdot e^{-\frac{\tau}{rC}}. \quad (1.33)$$

Во время разряда конденсатора ток разряда сначала достигает мгновенного значения i'_0 , а затем уменьшается до нуля, что видно из рис. 1.12.

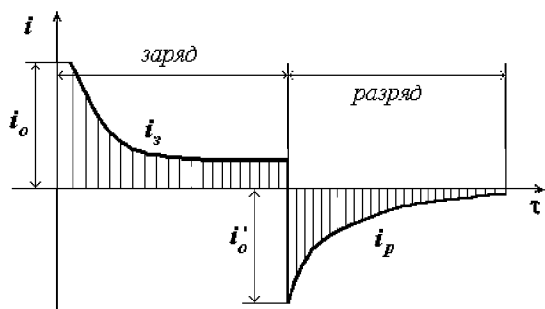


Рис.1.12. Зависимость тока зарядки и разрядки конденсатора от времени

Следует отметить, что величина тока i'_0 может превышать значение i_0 при зарядке конденсатора. Это явление используется на практике в ГИТ для получения вспышек света и для целей электросварки.

Учитывая, что сопротивление разрядной цепи состоит из наружного разрядного сопротивления — $r_{внеш}$ и внутреннего сопротивления конденсатора — $r_{вн}$, энергия при разряде будет частично теряться и на — $r_{вн}$, т.е.

$$W = \frac{CU^2}{2} = r_{внеш} \int_0^{\infty} i^2 d\tau + r_{вн} \int_0^{\infty} i^2 d\tau = W_{внеш} + W_{вн} \quad (1.34)$$

где: $\frac{W_{внеш}}{W_{вн}} = \frac{r_{внеш}}{r_{вн}}$, тогда

$$W_{внеш} = \frac{W}{1 + \frac{r_{вн}}{r_{внеш}}} = K_p \cdot W. \quad (1.35)$$

$$\text{Здесь } K_p = \frac{1}{1 + \frac{r_{вн}}{r_{внеш}}}. \quad (1.36)$$

Для повышения коэффициента K_p необходимо добиваться максимального снижения внутреннего сопротивления конденсатора.

Необходимо отметить, что если конденсатор оставить просто разомкнутым, то будет происходить саморазряд конденсатора за счет тока утечки через сопротивление изоляции — $R_{из}$. Скорость снижения напряжения на кон-

денсаторе в процессе саморазряда определяется постоянной времени $R_{из} C$, т.е.

$$U_c = U \cdot e^{-\frac{\tau}{R_{из} \cdot C}} \quad (1.37)$$

При $\tau = R_{из} \cdot C$ напряжение на конденсаторе уменьшается до значения $U_c = U \cdot e^{-1} \approx 0.37U$, т.е. уменьшается на 37%. Это явление часто используется на практике для оценки сопротивления изоляции конденсатора. Действительно из предыдущего следует, что

$$R_{из} = \frac{\tau}{(\ln U - \ln U_c) \cdot C}, [\text{МОм}]. \quad (1.38)$$

Если полученное значение $R_{из}$ оказывается низким, то это указывает на наличие в изоляции влаги, которая способствует диссоциации молекул на ионы, т.е. повышает величину тока сквозной проводимости (тока утечки).

Диэлектрическая абсорбция

Величина сопротивления изоляции конденсатора, а также процессы, протекающие при его зарядке и разрядке, оказывают большое влияние на явление диэлектрической абсорбции.

При кратковременном замыкании заряженного конденсатора на малое сопротивление (накоротко), напряжение на его выводах быстро уменьшается до нуля, но после размыкания обкладок может снова восстановиться до некоторого значения за счет накопления на его обкладках остаточного заряда. Это явление, свойственное конденсаторам с замедленной поляризацией можно объяснить перераспределением остаточного поляризационного заряда, который не успел уйти с конденсатора C_a за время разрядки.

Согласно схеме конденсатора с абсорбцией (рис.1.13), этот заряд при размыкании перераспределяется между емкостями C и C_a и создает на обкладках конденсатора некоторое напряжение, которое будет тем больше, чем медленнее протекает поляризация (чем больше ток абсорбции при заряде) и тем меньше, чем меньше сопротивление изоляции конденсатора $R_{из}$.

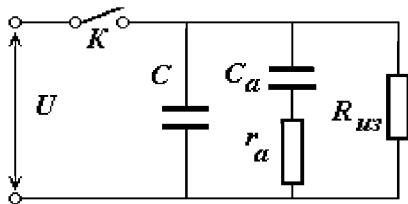


Рис. 1. 13. Схема конденсатора с абсорбцией:

K - ключ;
 C_a - конденсатор с абсорбцией;
 C - конденсатор;
 $R_{из}$ - сопротивление изоляции;
 r_a - сопротивление току абсорбции

Величина остаточного заряда, характеризуемая значением восстанавливающегося напряжения U_a , на обкладках конденсатора по истечении некоторого промежутка времени $\tau_{изм}$ после замыкания и времени разрядки τ_k , называется диэлектрической абсорбцией и выражается в % от зарядного напряжения U_0 до момента разрядки.

Отношение напряжения U_a к напряжению U_0 называется коэффициентом абсорбции - K_a .

В табл. 1.4 приведены значения этого коэффициента при времени короткого замыкания τ_k , равного 2 с.

Таблица 1.4

Наименование диэлектрика	Коэффициент абсорбции $K_a = U_a / U_0$ при $\tau_k = 2$ с	
	$\tau_{изм} = 1$ мин	$\tau_{изм} = 10$ мин
Бумага с полярной пропиткой	2,3 - 2,5	4,0
Бумага с неполярной пропиткой	1,0 - 1,7	3,0
Слюда	0,7	1,5 - 2,0
ПЭТФ с пропиткой	2,0	-
ПЭТФ без пропитки	0,25	-
ПТФЭ	< 0.02	-
ПЭ, ПС	< 0.02	0,07-0,1

На рис. 1.14 показаны изменения коэффициента K_a от времени замыкания τ_k и времени измерения - $\tau_{изм}$.

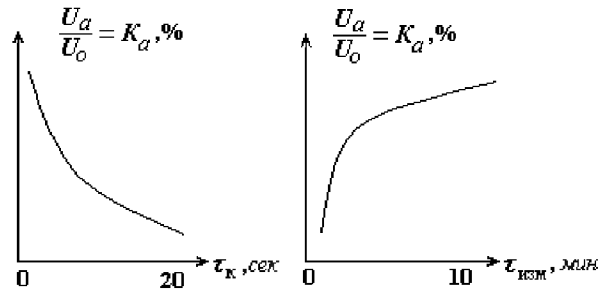


Рис. 1.14. Зависимость коэффициента абсорбции от времени короткого замыкания τ_k и времени измерения $\tau_{изм}$

Конденсатор в цепи переменного тока

При включении конденсатора в цепь переменного тока происходит чередование процессов зарядки конденсатора с ростом напряжения и его разрядки при уменьшении напряжения.

В зависимости от вида зарядной цепи (рис.1.15) происходит смещение кривых тока и напряжения

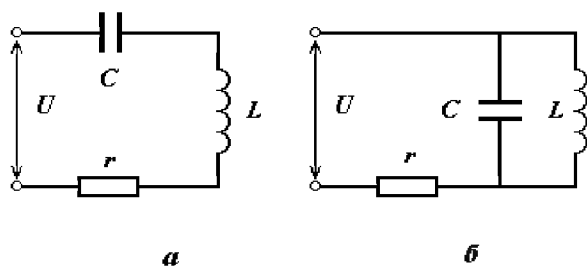


Рис. 1.15. Схемы зарядки конденсатора с индуктивностью:
а) последовательное соединение;
б) параллельное соединение

При равенстве $X_C = X_L$ в случае - а наблюдается резонанс напряжений, т.е. когда ток и напряжения совпадают по фазе (рис.1.16), а в случае - б будет наблюдаться резонанс токов.

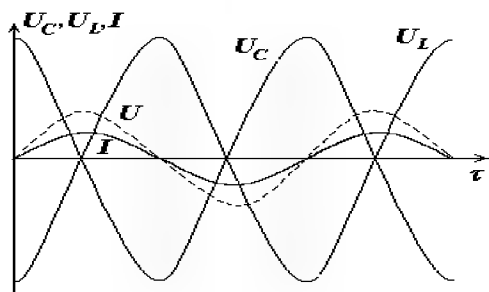


Рис.1.16. Зависимость тока и напряжения от времени при $X_C = X_L$ (резонанс напряжений)

Величина реактивного сопротивления X_C конденсатора зависит от частоты и с её увеличением уменьшается

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}. \quad (1.39)$$

Поэтому с ростом частоты конденсатор пропускает ток все более легко и на высоких частотах почти не оказывает сопротивления, что необходимо учитывать на практике при выборе обкладок.

Действительно, на постоянном токе, когда конденсатор практически не пропускает ток, обкладки несут на себе лишь электрический заряд, а на переменном токе они должны выдерживать значительный ток.

1.4.7. Индуктивность конденсаторов

Для конденсаторов, работающих в переменных электрических полях или в импульсном режиме, большое значение приобретает индуктивность обкладок и выводов. Для последовательной схемы замещения конденсатора полное сопротивление конденсатора будет равно

$$Z = \sqrt{r^2 + (X_C - X_L)^2} = \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}. \quad (1.40)$$

При определенной (резонансной) частоте сопротивление достигает минимального значения (рис. 1.17).

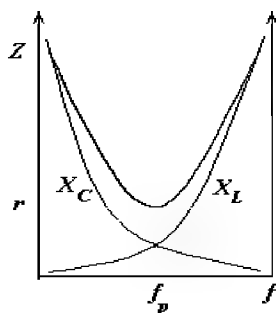


Рис. 1.17. Зависимость полного, индуктивного и емкостного сопротивлений от частоты

Минимальное значение полного сопротивления имеет место при резонансной частоте, когда $X_C = X_L$

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Для большинства радиоконденсаторов небольшой емкости $f_p = 1 \div 10$ МГц, т.е. влияние индуктивности обычно приходится учитывать для конденсаторов, работающих в области верхнего диапазона частот. Для силовых конденсаторов, работающих на частоте 50 герц, индуктивность необходимо учитывать при разработке мероприятий по демпфированию колебательных процессов при включениях и отключениях.

Особенно опасно наличие индуктивности в помехозащищенных конденсаторах, т.к. при $f_{рез}$ они могут пропускать помехи из-за резкого снижения сопротивления.

При работе конденсаторов в импульсном режиме, т.е. при быстром нарастании напряжения (ГИН, ГИТ, делители напряжений и др.) их индуктивность может оказывать влияние на параметры импульсов (их длительность и форму).

Собственная индуктивность конденсаторов складывается из индуктивности обкладок, индуктивности соединительных проводников и выводов. Для уменьшения индуктивности все элементы конденсатора стремятся располагать так, чтобы их магнитные поля *взаимно компенсировались* или их влияние было минимальным. С этой целью проводники с одинаковым направлением токов *располагают как можно на большем расстоянии друг от друга*, а проводники с различным направлением тока *стараятся сблизить*. Сами проводники должны быть как можно короче.

Для уменьшения индуктивности обкладок используют безиндуктивную намотку, когда края обкладок выступают за диэлектрик и их спаивают по краю. Такого же эффекта можно добиться, располагая определенным образом выводы от обкладок. Если выводы расположены как на рис.1.18 а, т.е. совмещены, то индуктивность минимальна т.к. токи противоположны.

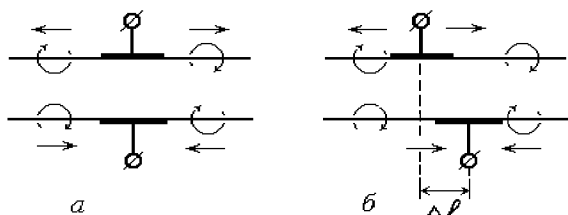


Рис. 1.18. Схема расположения выводов:
а) без смещения;
б) со смещением

Если выводы смещены относительно друг друга, то между ними токи совпадают по направлению и индуктивность будет тем больше, чем больше это смещение. Поскольку сами обкладки обладают определенным активным сопротивлением и индуктивностью, это следует учитывать при расчете полного сопротивления цепи - Z .

Аналогично можно данный способ применить и для цилиндрической намотанной секции с выступающими обкладками (рис.1.19). Разновидностью такой конструкции являются проходные конденсаторы, у которых обкладка секции, выступающая с одного торца, спаяна с центральным токоведущим стержнем, а вторая - с корпусом конденсатора, который отводит на землю протекающие через него токи высокой частоты.

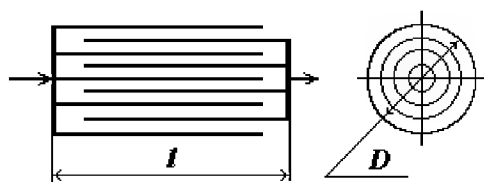


Рис.1.19. Цилиндрическая намотанная секция с выступающей фольгой

Сложность геометрии конденсаторов затрудняет точный расчет их индуктивности. Обычно при расчете выделяют отдельные элементы, вычисляют их индуктивность, а затем составляют эквивалентную схему включения индуктивностей этих элементов. Затем на основе этой схемы вычисляется индуктивность конденсатора в целом.

Для расчета индуктивности плоской секции с двумя обкладками или развернутой в плоскую ленту спирально намотанной секции применяется формула Гровера, которая соответствует индуктивности между двумя проводящими шинами прямоугольного сечения:

$$L = \frac{\mu_o \ell}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} (3\beta - \delta) - \frac{25}{12} \beta^2 - \frac{1}{12} \beta^4 - \frac{1}{12} \beta^2 \delta^2 (\alpha^4 \ln \alpha - \right. \\ \left. - 2\beta^4 \ln \beta + \gamma^4 \ln \gamma - 2\delta^4 \ln \delta) \right], \quad (1.41)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{2d\phi + d}{b}; \quad \beta = \frac{d\phi + d}{b}; \quad \gamma = \frac{d}{b}; \quad \delta = \frac{d\phi}{b}.$$

Здесь d – толщина диэлектрика, см;

b – ширина обкладки, см;
 d_ϕ – толщина обкладки, см;
 l – длина обкладки, см.

В большинстве случаев $b \gg d_\phi$ и $b \gg d$. Тогда в формуле (1.41) можно пренебречь всеми членами, кроме первого, т.е.

$$L = \frac{\mu_o \ell}{\pi} \left[\frac{\pi}{3} (3\beta - \delta) \right] = \frac{\mu_o \ell}{3} \left(\frac{2d_\phi + 3d}{b} \right). \quad (1.42)$$

Во многих случаях можно принять, что $3d \gg 2d_\phi$, тогда

$$L = \frac{\mu_o \ell d}{b}. \quad (1.43)$$

Эти формулы соответствуют случаю совмещения выводов от обкладок, когда токи в обкладках протекают в противоположных направлениях.

Если один вывод смещен относительно другого по длине обкладки, то вычисление индуктивности производится, исходя из схемы замещения, показанной на рис. 1.20. На этой схеме C_1 и L_1 – емкость и индуктивность части секции за пределами выводов, где токи имеют противоположное направление; $C_{AB/2}$ – емкость части секции между выводами А и В; L_2 – индуктивность, на участке секции между выводами А и В, где токи имеют одинаковое направление; L_3 – индуктивность выводов.

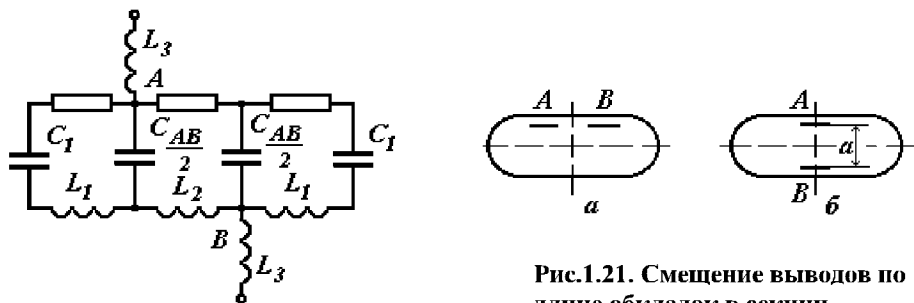


Рис.1.21. Смещение выводов по длине обкладок в секции

Рис.1.20. Эквивалентная схема замещения секции со смещенными обкладками

Значение индуктивности L_2 зависит от степени смещения выводов.

Если выводы сдвинуты по длине обкладки в пределах ширины секции (рис.1.21 а), то:

$$L_2 = \frac{\mu_o \ell_{AB}}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell_{AB}}{b} + \frac{1}{2} \right). \quad (1.44)$$

Если выводы сдвинуты по длине обкладки на половину одного витка (рис.1.21 б), то:

$$L_2 = \frac{\mu_o \ell_{AB}}{3b} (2d_\phi + 3a). \quad (1.45)$$

Если выводы сдвинуты по длине обкладки на длину одного витка, то:

$$L_2 = \frac{\mu_o S}{b}, \quad (1.46)$$

где S – площадь поперечного сечения одного витка фольги.

Как показывают данные расчета, значение индуктивности L_2 по мере смещения по длине обкладок может возрастать от $2,5 \cdot 10^{-9}$ до $16 \cdot 10^{-9}$ Гн.

На практике, для уменьшения индуктивности секций применяют ее деление на несколько подсекций меньшей емкости, наматываемых отдельно и соединяемых параллельно. Кроме того, как уже отмечалось, для уменьшения индуктивности часто применяется безиндукционная намотка секций с выступающей фольгой (рис.1.19).

В этом случае

$$L = \frac{\mu_o \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{4\ell}{D} - 1 \right). \quad (1.47)$$

Расчет индуктивности выводов

В конденсаторных секциях межсекционные соединения и выводы обычно выполняются в виде медных шин и располагаются для уменьшения индуктивности с одного торца.

Можно рассмотреть несколько типов выводов (см. рис. 1.22).

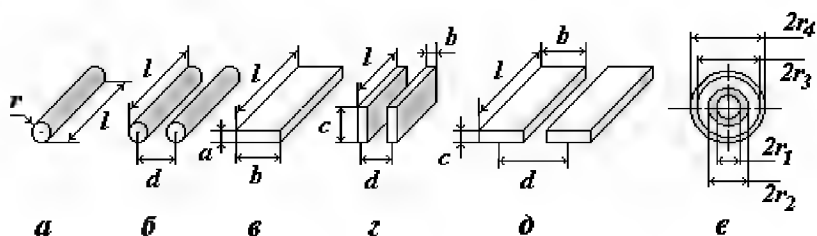


Рис.1.22. Типы проводников в конденсаторах

⇒ Для одиночного проводника круглого сечения (рис.1.22 а)

$$L = \frac{\mu_o \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{4\ell}{D} - 1 \right). \quad (1.48)$$

⇒ Для двух параллельных проводников круглого сечения (рис.1.22 б)

$$L = \frac{\mu_o \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{\ell + \sqrt{\ell^2 + r^2}}{\ell + \sqrt{\ell^2 + d^2}} \frac{d}{2} + \frac{\sqrt{\ell^2 + d^2} - \sqrt{\ell^2 + r^2}}{\ell} + \frac{1}{4} - \frac{d-r}{\ell} \right); \quad (1.49)$$

при условии, что $\ell \gg r$ и $\ell \gg d$, то

$$L = \frac{\mu_o \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{d}{2} + \frac{1}{4} \right). \quad (1.50)$$

⇒ При использовании плоских шинек прямоугольного сечения (рис.1.22 в)

$$L = \frac{\mu_o \ell}{2\pi} \left(\ln \frac{2\ell}{a+b} + 0.5 + 0.223 \frac{a+b}{l} \right). \quad (1.51)$$

⇒ Для двух параллельных шин (рис.1.22 з), если $c > b$

$$L = \frac{\mu_o \ell}{\pi} \left[\ln \frac{d}{b+c} + \frac{\gamma^2 - 1}{2\gamma^2} \ln(1 + \gamma^2) + \frac{2}{\gamma} \operatorname{arctg} \gamma \right], \quad (1.52)$$

$$\text{где } \gamma = \frac{c}{d}.$$

⇒ Для двух параллельных шин (рис.1.22 д), если $c < b$

$$L = \frac{\mu_o \ell}{\pi} \left[\ln \frac{d}{b+c} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\beta} + 1 \right)^2 \ln(\beta + 1) + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)^2 \ln(1 - \beta) \right], \quad (1.53)$$

$$\text{где } \beta = \frac{b}{d}.$$

⇒ Если вывод осуществляется отрезком коаксиального кабеля (рис 1.22 е), то

$$L \cong \frac{\mu_o \ell}{2\pi} \left[\frac{r_2^2 - 3r_1^2}{2(r_2^2 - r_1^2)} + \frac{2r_1^4}{(r_2^2 - r_1^2)^2} \ln \frac{r_2}{r_1} + 2 \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{2}{r_4^2 - r_3^2} \left(\frac{r_4^2}{r_4^2 - r_3^2} \ln \frac{r_4}{r_3} - \frac{3r_4^2 - r_3^2}{4} \right) \right],$$

$$L = \frac{\mu_o \ell}{2\pi} \left[\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{r_3}{r_2} + \frac{2}{r_4^2 - r_3^2} \left(\frac{r_4^4}{r_4^2 - r_3^2} \ln \frac{r_4}{r_3} - \frac{3r_4^2 - r_3^2}{4} \right) \right]. \quad (1.54)$$

При высоких частотах за счет вытеснения тока на поверхность можно считать $r_3 = r_4$, тогда

$$L \cong \frac{\mu_o \ell}{2\pi} \left(\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{r_3}{r_2} \right). \quad (1.55)$$

1.4.8. Потери энергии в конденсаторах

Всякий реальный конденсатор, включенный в электрическую цепь, рассеивает электрическую энергию. Потери энергии складываются из следующих основных составляющих:

1. Потери энергии в диэлектрике конденсатора.
2. Потери энергии в металлических частях.

Потери энергии в диэлектрике обусловлены рассеиванием энергии при движении ионов в процессе электропроводности, при смещении ионов в процессе междуслойной и ионно-релаксационной поляризации, при ориентации диполей или полярных групп - радикалов в процессе дипольно-

релаксационной и дипольно-радикальной поляризации, в результате ионизационных процессов в газовых (воздушных) включениях диэлектрика и ионизации воздуха у краев обкладок.

Потери в диэлектрике обычно оценивают значением $\operatorname{tg} \delta$, который рассчитывается из векторной диаграммы (рис.1.23).

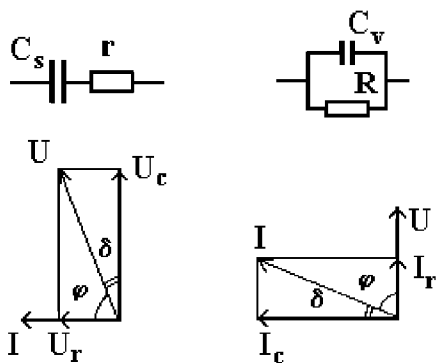


Рис. 1.23. Векторная диаграмма: для параллельной схемы замещения;

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{\frac{U}{R}}{U \cdot j\omega C_V} = \frac{1}{R \cdot j\omega C_V}, \quad (1.56)$$

для последовательной схемы

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{U_r}{U_c} = \frac{I \cdot r}{\frac{I}{j\omega C_s}} = r \cdot j\omega C_s \quad (1.57)$$

Связь между параметрами последовательной и параллельной схемами замещения выражается соотношениями:

$$Z_r = r - j \frac{1}{\omega C_S}; \quad Z_R = \frac{1}{\frac{1}{R} + j\omega C_V} = \frac{R - jR^2\omega C_V}{1 + R^2\omega^2 C_V^2}, \quad (1.58)$$

т.к. $Z_r = Z_R$, то

$$R = r \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right), \quad r = \frac{R}{1 + R^2\omega^2 C_V^2} = \frac{R}{1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}}; \quad (1.59)$$

$$C_V = \frac{C_S}{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}; \quad C_S = \frac{C_V \left(1 + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta} \right)}{\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \delta}} = C_V \left(1 + \operatorname{tg}^2 \delta \right). \quad (1.60)$$

Анализируя схемы замещения конденсатора, можно сказать, что последовательная схема подходит ближе, когда преобладают потери в металлических частях конденсатора, а параллельная схема, к случаю преобладания потерь в диэлектрике конденсатора, хотя обе схемы носят формальный характер.

Зная величину $\operatorname{tg} \delta$, можно вычислить активную мощность, потребляемую конденсатором:

$$P_A = (W) = UI \cos \varphi \approx U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta. \quad (1.61)$$

Как следует из данного выражения, потери мощности наиболее заметно проявляются при высоких частотах, т.к. $\omega = 2\pi f$.

Для успешной работы конденсатора выделяемая мощность не должна вызывать перегрев. В установившемся режиме, количество тепла, отводимого от конденсатора, определяется:

$$P_B = \alpha_T S (T - T_0) , \quad (1.62)$$

где α_T - коэффициент теплоотдачи, [Вт/м²град];

T_0 – температура окружающей среды.

При равенстве P_A и P_B

$$\Delta t = t - t_0 = \frac{P_B}{\alpha_T S} = \frac{U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta}{\alpha_T S} . \quad (1.63)$$

В радиотехнике для оценки качества конденсаторов используют добротность Q . Иногда вместо $\operatorname{tg} \delta$ применяют коэффициент мощности конденсатора $\cos \varphi$. При малом $\operatorname{tg} \delta \Rightarrow \cos \varphi = \operatorname{tg} \delta$, а при большом δ

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}} ; \quad \cos \varphi = \frac{\operatorname{tg} \delta}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \delta}} . \quad (1.64)$$

Расчет потерь в конденсаторах

Активная мощность P_A , выделяемая в конденсаторе в виде тепла, определяется потерями в диэлектрике и потерями в металлических частях конденсатора:

$$P_A = P_d + P_m . \quad (1.65)$$

Потери в диэлектрике - P_d определяются, прежде всего, величиной $\operatorname{tg} \delta$, диэлектрика и частотой поля f :

$$P_d = 2\pi f \cdot U^2 \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta . \quad (1.66)$$

Кроме потерь, в основном диэлектрике есть потери и во вспомогательных диэлектриках (в изоляции от корпуса, выводных изоляторах и т.д.). Величина этих потерь будет определяться значением паразитной емкости C_{Π} , создаваемой электрическим полем рассеяния :

$$P_{d,доб} = 2\pi f \cdot U^2 \cdot C_{\Pi} \cdot \operatorname{tg} \delta_{\Pi} . \quad (1.67)$$

Обычно величина C_{Π} невелика по сравнению со значением емкости C_0 и потери во вспомогательных диэлектриках незначительны. Однако для конденсаторов с малой емкостью C_0 и малым значением $\operatorname{tg} \delta_0$ пренебрегать величиной $P_{d,доб}$ уже нельзя, особенно если $\operatorname{tg} \delta_{\Pi} > \operatorname{tg} \delta_0$. В этом случае, учитывая (1.59) и (1.60)

$$P_{d,полн} = P_{d,осн} + P_{d,доб} = 2\pi f U^2 \left(C_0 \operatorname{tg} \delta_0 + \sum_{i=1}^{i=n} C_{\Pi_i} \operatorname{tg} \delta_{\Pi_i} \right) . \quad (1.68)$$

При этом, можно принять, что $C_0 = C_{н.о.м.}$, т.к. $C_{\Pi} \ll C_0$.

Потери в металлических частях конденсатора определяются, прежде всего, потерями на нагрев обкладок и выводов за счет протекающего по ним тока. Эти потери возрастают при условии плохих контактов между проводниками за счет окисления

$$P_{\text{м}} = I^2(r_o + r_{\text{выв}}) = I^2 r_{\text{м}}, \quad (1.69)$$

где $r_{\text{м}}$ - полное сопротивление металлических частей конденсатора.

При расчете потерь в обкладках необходимо учитывать изменение плотности тока по длине обкладки, т.е. ток будет спадать от контакта вывода с обкладкой к концу этой обкладки (рис.1.24).

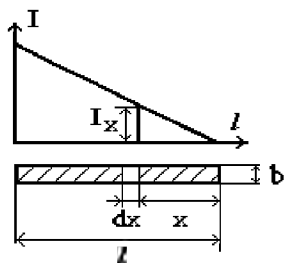


Рис.1.24. Изменение плотности тока по длине обкладки

Исходя из рис.1.24, для сечения dx можно записать:

$$dP = I_x^2 \rho \frac{dx}{bd_o}. \quad (1.70)$$

$$I_x = I \frac{x}{\ell}. \quad (1.71)$$

$$dP = I^2 \frac{\rho}{bd_o \ell^2} x^2 dx. \quad (1.72)$$

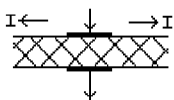
$$P_o = 2I^2 \frac{\rho}{\ell^2 bd_o} \int_0^{\ell} x^2 dx = \frac{2}{3} I^2 \rho \frac{\ell}{bd_o}. \quad (1.73)$$

Учитывая, что $P_o = 2I^2 r_o$, то

$$r_o = \frac{1}{3} \rho \frac{\ell}{bd_o}. \quad (1.74)$$

Из уравнения (1.74) следует, что если учесть распределение тока по длине обкладки ℓ с толщиной d_o и шириной b , то сопротивление обкладки уменьшится в 3 раза по сравнению с величиной сопротивления без учета распределения тока (т.е. по полному току).

Если выводы поставить в середине обкладок (рис.1.25), то, учитывая распределение тока по длине обкладок, получим:



$$r_o = \frac{1}{6} \rho \frac{\ell}{bd_o}, \quad (1.75)$$

Рис.1.25

т.е. в этом случае сопротивление уменьшится в 6 раз.

Еще больше снизить потери в обкладках можно, применив несколько пар контактов, поставленных равномерно по длине обкладки (рис.1.26).

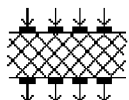


Рис.1.26

$$\text{В этом случае } r_o = \frac{1}{6n^2} \rho \frac{\ell}{bd_o}, \quad (1.76)$$

где n - число пар выводов от обкладки .

Резко снизить потери в обкладках можно применением безиндукционной намотки с выступающей фольгой.

В этом случае

$$r_o = \frac{2}{3} \rho \frac{\ell_o}{\ell d_o}. \quad (1.77)$$

Так как отношение ℓ_b достигает 100, то снижение сопротивления достигает 10000 раз. Формула (1.77) не учитывает закраину Δb фольги, в которой ток имеет постоянное значение. После уточнения

$$r_o = 2\rho \frac{\Delta b + \frac{b_o}{3}}{\ell d_o}. \quad (1.78)$$

Эта же формула может быть использована для намотанных металлизированных конденсаторов с выступающей фольгой. В этом случае, учитывая малое значение d_o , можно записать:

$$r_o = 2r_{\text{слоя}} \cdot \frac{\Delta b + \frac{b_o}{3}}{\ell}. \quad (1.79)$$

Для многопластинчатого конденсатора (рис.1.27), состоящего из M - параллельно соединенных емкостей

$$r_o = \frac{2}{3} \cdot \frac{2M-5}{M^2} \rho \frac{\ell_o + 3\Delta\ell}{bd_o}. \quad (1.80)$$

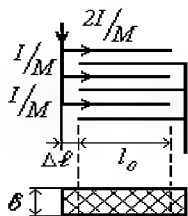


Рис.1.27

Здесь учитывается, что ток растекается по всем обкладкам с величиной I/M , при этом его плотность спадает до нуля на длине обкладки ℓ_o . На участке $\Delta\ell$ ток не изменяется.

Для цилиндрического конденсатора трубчатой формы (рис.1.28):

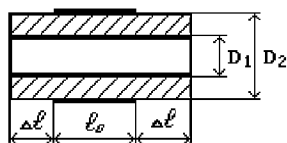
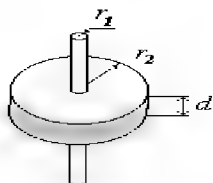


Рис.1.28

$$r_o = \frac{2}{3} \rho \frac{\ell_o + 3\Delta\ell}{\pi D_{cp} d_o}. \quad (1.81)$$

Для конденсатора дисковой формы (рис. 1.29)



$$r_o = \frac{\rho}{2\pi d_o} \left[\left(1 + \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right)^2 \cdot \ln \frac{r_2^2}{r_1^2} + \frac{r_1^2 + 3r_2^2}{4(r_2^2 - r_1^2)^2} \right] \quad (1.82)$$

Рис.1.29

Для электролитических конденсаторов сопротивление обкладок определяется сопротивлением промежуточной среды, пропитанной электролитом. При длине анода - L , ширине - b и толщине прокладки - d_{np} электролита, удельном сопротивлении $\rho_{электр}$ с учетом коэффициента проницаемости прокладки - φ величина

$$r_o = \varphi \cdot \rho_{эл} \cdot \frac{d_{np}}{L \cdot b}. \quad (1.83)$$

Сопротивление выводных и соединительных проводников определяет потери в них. Для круглых проводников

$$r_{выв} = \rho \frac{4\ell}{\pi D^2} \cdot F(\alpha). \quad (1.84)$$

С ростом частоты сопротивление проводников возрастает за счет поверхностного эффекта, что можно учесть введением поправочного коэффициента $F(\alpha)$, который приближенно рассчитывается так:

$$F(\alpha) = \frac{\sqrt{2\alpha + 1}}{4}, \text{ где } \alpha = kD\sqrt{f};$$

k - коэффициент, зависящий от материала проводника (для меди

$k=0,106$, для серебра - $0,111$ и для алюминия - $0,0843$);

D - диаметр проводника, см;

f - частота, Гц.

Полные потери в конденсаторе можно определить

$$P_A = P_D + P_M = 2\pi f U^2 C (tg\delta_D + tg\delta_M) = 2\pi f U^2 C tg\delta, \quad (1.85)$$

где $tg\delta = tg\delta_D + tg\delta_M$.

Это означает, что если рассчитывается конденсатор, имеющий аналоги среди уже выпускающихся, то потери по их составляющим элементам можно не вычислять, а сразу учесть нормированным значением $tg\delta$.

Если напряжение отличается от синусоидального, то необходимо определять суммарные потери от каждой отдельной гармоник.

$$P_A = \sum_{K=1}^{K=n} P_{Ak} = \eta \omega_1 C U^2 tg\delta_1, \quad (1.86)$$

где η - коэффициент возрастания потерь за счет наличия внешних гармоник;

$U = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}$ - действующее значение несинусоидального напряжения.

1.4.9. Электрическая прочность конденсатора

Электрическая прочность конденсатора, прежде всего, зависит от толщины и качества диэлектрика, разделяющего обкладки, а также от площади обкладок, температуры, условий теплоотвода, вида и частоты воздействующего напряжения.

В случае однородного электрического поля электрическая прочность характеризуется величиной пробивной напряженности поля:

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{d}, [B / м]. \quad (1.87)$$

Механизм пробоя диэлектрика определяется типом диэлектрика и условиями его испытания. В соответствии с этим следует рассматривать закономерности пробоя газообразных, жидких и твердых диэлектриков.

Пробой газообразных диэлектриков носит ионизационный характер и связан с ударной ионизацией молекул газа электронами. Различают однолавиный, многолавиный и стримерный механизмы пробоя. Согласно теории ударной ионизации, пробой газа происходит при условии, когда кинетическая энергия свободных электронов становится достаточной для ударной ионизации атомов и молекул:

$$W_E = q \lambda E \geq W_{ион}. \quad (1.88)$$

Скорость движения электронов зависит не только от напряженности внешнего электрического поля, но и от длины свободного пробега - λ .

Поскольку величина λ зависит от давления газа, то и электрическая прочность газа также зависит от давления, что видно из рис.1.30.

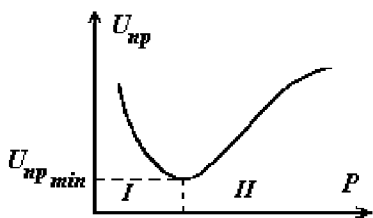


Рис.1.30. Зависимость пробивного напряжения газа от давления

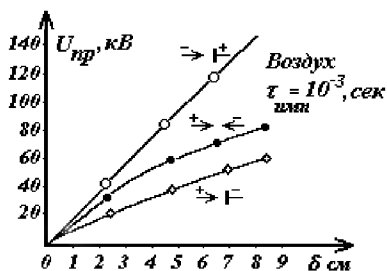


Рис.1.31. Зависимость пробивного напряжения воздуха от расстояния между электродами в резко неоднородном поле при различной полярности импульса

Из приведенного рисунка видно, что при определенном давлении, близком к атмосферному, наблюдается минимальное значение $U_{пр}$. При повышенных давлениях и в области вакуума наблюдается увеличение пробивного напряжения в несколько раз, что учитывается при проектировании газонаполненных и вакуумных конденсаторов.

При проектировании импульсных конденсаторов необходимо также учитывать зависимость пробивного напряжения газа от степени неоднородности электрического поля и полярности приложенного напряжения (импульса).

Так из рис.1.31 видно, что в случае электродов «игла – плоскость» наименьшее пробивное напряжение наблюдается при положительной полярности иглы, где образующийся возле иглы положительный объемный заряд способствует развитию пробоя.

На практике для вычисления пробивного напряжения газа используются эмпирические формулы или имеющиеся в литературе графические зависимости $U_{пр} = f(l)$.

Для равномерного или слабонеравномерного поля в системе электродов «плоскость-плоскость»

$$U_{пр} = 2,46 \cdot \delta \cdot \ell + 2,11 \sqrt{\delta \cdot \ell} \quad [\text{кВ}], \text{ при } l \leq 120 \text{ мм.}, \quad (1.89)$$

где

$$\delta = \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T} = \frac{P(273 + 20)}{1.013 \cdot 10^5 (273 + t)} = 2.89 \cdot 10^{-5} \left(\frac{P}{T} \right).$$

В системе коаксиальных цилиндрических электродов

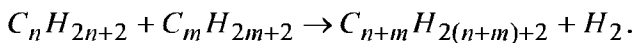
$$\bar{U}_{пр} = 2,55 \cdot r \left(r + \frac{1.8}{\sqrt{r}} \right) \ln \frac{R}{r}, [\text{кВ}]. \quad (1.90)$$

Пробой жидких диэлектриков, если они не содержат механических примесей (загрязнений), газа и влаги, также можно объяснить с точки зрения ионизационной теории. Учитывая более высокую плотность жидкостей по сравнению с газами, они имеют меньшее значение λ и поэтому обладают более высокой электрической прочностью по сравнению с газами при нормальном давлении.

Для жидких диэлектриков, содержащих какие-либо примеси, значения $E_{пр}$ значительно ниже, чем для чистой жидкости. Это связано с тем, что примеси под действием электрического поля располагаются в виде цепочки между электродами и образуют слабые места (проводящие мостики) по которым и происходит пробой. С увеличением количества примесей образование

таких цепочек (мостиков) облегчается, что вызывает соответственно и снижение величины E_{np} , при которой происходит пробой. Характерной чертой жидких диэлектриков, как и газов, является восстанавливаемость ее электрической прочности после пробоя. Однако для конденсаторов, использующих жидкие диэлектрики в качестве основной изоляции или как пропитывающей жидкости, необходимо учитывать изменение ее свойств в процессе эксплуатации.

По мнению Флоренского и Волькенштейна электрическое поле стимулирует реакцию между разными углеводородами, входящими в состав жидкости, протекающую с образованием водорода и более тяжелого углеводорода по схеме:



Образовавшийся углеводород сам вступает в реакцию с одним из присутствующих углеводородов, в результате чего образуется снова водород и еще более тяжелый углеводород. В результате этого процесса происходит повышение вязкости масел, а сам процесс получил название вольтализации. При длительном воздействии электрического поля увеличение вязкости может быть значительным и сопровождается образованием твердого осадка.

На практике для вычисления пробивного напряжения жидкого диэлектрика, как и газа, используются различные эмпирические формулы.

В твердых диэлектриках различают электрический пробой (при котором E_{np} не зависит от температуры и времени воздействия напряжения), тепловой пробой (при котором наблюдается резкое снижение E_{np} с ростом температуры и времени воздействия напряжения), электрохимический пробой или электрическое старение.

Чисто электрический пробой связан с нарушением внутренних связей в диэлектрике и появлением высокой электронной проводимости за счет развития ударной ионизации. В настоящее время для объяснения механизма электрического пробоя в основном применяют квантовомеханические теории, основанные на рассмотрении электрической проводимости.

В случае неоднородных диэлектриков пробой облегчается за счет создания высоких локальных напряженностей поля в местах неоднородностей. Поэтому с ростом толщины неоднородного диэлектрика и площади электродов (обкладок) электрическая прочность E_{np} уменьшается.

Для слоистых диэлектриков (бумага, пленки) (рис.1.32 кривая 2) первоначально может наблюдаться некоторое увеличение E_{np} за счет перекрытия дефектов, имеющих в материале, а затем ее уменьшение за счет

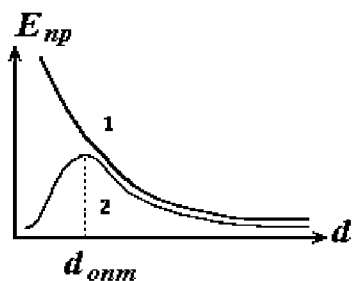


Рис. 1.32. Зависимость электрической прочности слоистых диэлектриков от толщины

увеличения вероятности совпадения этих дефектов. Исходя из этого, при проектировании конденсаторов определяют оптимальное число слоев изоляции между обкладками, чтобы E_{np} было максимальным. Следует отметить, что чрезмерное увеличение толщины диэлектрика нежелательно из-за возможности развития теплового пробоя в больших толщинах. Кроме того, это приводит и к увеличению габаритных размеров конденсатора.

Тепловой пробой наблюдается при большой длительности воздействия приложенного напряжения и связан с нарушением теплового равновесия в слабых местах диэлектрика, приводящего к катастрофическому нарастанию количества тепла, выделяемого за счет диэлектрических потерь и к чисто термическому разрушению последнего.

В настоящее время строгая теория теплового пробоя разработана Фоком и Семеновым из условия термодинамического равновесия.

Для плоского конденсатора пробивное напряжение при тепловом пробое может быть выражено уравнением:

$$U_{np} = \varphi(c) \sqrt{\frac{33,6 \lambda}{a \gamma_o}}, \text{ где} \quad (1.91)$$

λ - коэффициент теплопроводности диэлектрика, $\text{кал/см} \cdot \text{град} \cdot \text{с}$;

γ_o - активная проводимость диэлектрика при температуре окружающей среды, $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$;

a - температурный коэффициент изменения проводимости диэлектрика:

$$\gamma = \gamma_o e^{a(T - T_o)}; \quad (1.92)$$

$\varphi(c)$ - функция параметра c , характеризующего влияние геометрических размеров конденсатора и условий его охлаждения на величину E_{np} .

$$c = \frac{\lambda_{\text{электродов}} \cdot \alpha_T \cdot d}{2\lambda(\lambda_{\text{электродов}} + \alpha_T d_{\text{электродов}})}, \text{ где} \quad (1.93)$$

$\lambda_{\text{электр}}$ - теплопроводность материала электродов, $\text{кал/см} \cdot \text{град} \cdot \text{с}$;

α_T - коэффициент теплоотдачи, $\text{кал/см}^2 \cdot \text{град} \cdot \text{с}$;

d - толщина диэлектрика, см ;

$d_{\text{электр}}$ - толщина электродов, см .

- При постоянном напряжении

$$E_{np} = \frac{U_{np}}{d} = 5,8 \frac{\varphi(c)}{d} \sqrt{\frac{\lambda \rho_o}{a}}, \text{ где} \quad (1.94)$$

$$\rho_o = \frac{RC}{0,884\varepsilon} \cdot 10^{13}, [\text{Ом} \cdot \text{см}]. \quad (1.95)$$

- При переменном напряжении

$$\gamma = \frac{\varepsilon \cdot f \cdot \text{tg} \delta}{1,8 \cdot 10^{12}}, \text{ тогда} \quad (1.96)$$

$$E_{np} = 7,78 \cdot 10^6 \frac{\varphi(c)}{d} \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{a \cdot f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta_o}}. \quad (1.97)$$

В данном выражении необходимо учитывать зависимость

$$\ln \operatorname{tg} \delta = A + a(T - T_o) = \ln \operatorname{tg} \delta_o + a(T - T_o). \quad (1.98)$$

При оценке кратковременной электрической прочности диэлектриков (при электрическом и тепловом пробое) необходимо также учитывать разброс величин E_{np} . Разброс значений E_{np} можно характеризовать интегральной кривой распределения пробивных напряжений (рис. 1.33).

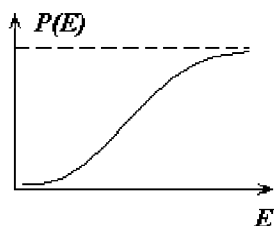


Рис.1.33. Интегральная кривая распределения пробивных напряженностей электрического поля

На основании данной кривой можно точнее определить (выбрать) испытательное напряжение, т.е. такое напряжение, которое выдержит конденсатор, не пробиваясь в течение определенного промежутка времени.

Воздействию таким испытательным напряжением подвергаются все конденсаторы для отбраковки дефектных. Следует, однако, отметить, что такие испытания не являются гарантией надежности оставшихся не пробитых конденсаторов.

При определении электрической прочности изоляции конденсатора следует учитывать также зависимость E_{np} от площади обкладок, температуры и частоты приложенного напряжения.

Пробой по закраине конденсатора также является частой причиной его выхода из строя. По существу пробой по закраине представляет (перекрытие) поверхностный пробой, когда на величину U_{nep} оказывает влияние влажность окружающего воздуха, состояние поверхности (ее загрязненность), степень неравномерности электрического поля на краю обкладок.

Неравномерность электрического поля у краев обкладок приводит к появлению двух составляющих напряженности поля - тангенциальной (вдоль поверхности) и - нормальной (перпендикулярно поверхности). Это приводит к появлению у краев обкладок сначала короны, а затем и скользящих разрядов.



Рис. 1.34. Схема замещения

Исходя из эквивалентной схемы замещения плоского диэлектрика (рис.1.34), М.И.Мантров получил выражение:

на постоянном напряжении

$$U = E_o \sqrt{\frac{\rho_{об} \cdot d}{\rho_{нов}}} + th \left(\sqrt{\frac{\rho_{нов}}{\rho_{об} \cdot d}} \cdot \Delta \ell \right), \quad (1.99)$$

на переменном напряжении

$$U = E_o \sqrt{\frac{k \varepsilon_c d}{\varepsilon_d}} + th \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_d}{k \varepsilon_c d}} \cdot \Delta \ell \right), \text{ где} \quad (1.100)$$

E_o - напряженность поля у края обкладки, соответствующая началу развития короны и скользящего разряда;

$\varepsilon_d, \varepsilon_c$ - соответственно диэлектрическая проницаемость диэлектрика и среды;

k - коэффициент формы поля.

При работе на воздухе

$$U_{ск} = \frac{1,355 \cdot 10^{-4}}{C_d^{0,44}}, \text{ [кВ]}, \text{ а} \quad (1.101)$$

$$U_{кор} = 164 \left(\frac{d}{\varepsilon_d} \right)^{0,46}, \text{ [В]}. \quad (1.102)$$

При выборе закраины необходимо исходить из недопустимости перекрытия по закраинам при воздействии испытательного напряжения, т.е. чтобы выполнялось условие $U_{исп} < (0,75 \div 0,8) U_{ск}$ или $U_{раб} < U_{кор}$.

Длительная электрическая прочность

При длительном воздействии напряжения для большинства типов конденсаторов наблюдается постепенное снижение электрической прочности, известное под названием процесса электрического старения.

В результате этого процесса величина E_{np} уменьшается со временем до некоторого значения E_{dl} , которое может быть в несколько раз меньше кратковременной электрической прочности - $E_{np.кр}$.

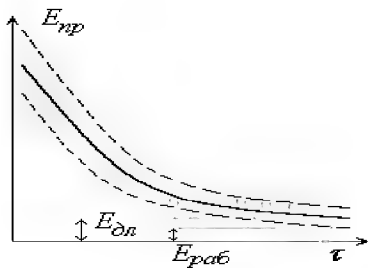


Рис. 1.35. Зависимость электрической прочности от времени старения

Поэтому при выборе рабочей напряженности поля $E_{раб}$ необходимо учитывать значение E_{dl} и брать ее с некоторым коэффициентом запаса - $K_{зат}$, который учитывает разброс ее значений (рис.1.35):

$$K_{зат} = \frac{E_{dlm}}{E_{раб}}. \quad (1.103)$$

Исходя из зависимости $E_{np} = f(\tau)$ (рис.1.35), необходимо учитывать также разброс значений τ - времени до пробоя при постоянстве дейст-

вующей напряженности поля.

Практически стремятся выбрать $E_{раб}$ с таким расчетом, чтобы в пределах гарантированного срока службы имели место лишь отдельные случайные пробой конденсаторов.

Сущность процесса старения заключается в возникновении и развитии в диэлектрике конденсатора различных физико-химических процессов, вызванных воздействием электрического поля и приводящих к ухудшению диэлектрических свойств и снижению электрической прочности. Это разрушение диэлектрика можно рассматривать как самостоятельную форму пробоя, вызванную различными процессами. Изучение процесса старения диэлектриков позволило установить две основные формы этого пробоя - *ионизационный* и *электрохимический*.

Ионизационный пробой

Эта форма пробоя связана с развитием процесса старения диэлектрика под действием частичных разрядов (ЧР), развивающихся в воздушных включениях.

За счет развития ионизации происходят:

- ⇒ Химическое разрушение диэлектрика под воздействием продуктов ионизации - озона и окислов азота.
- ⇒ Непосредственное воздействие на диэлектрик бомбардировки ионами и электронами.
- ⇒ Воздействие высокой температуры, созданной в зоне ионизации за счет местного увеличения потерь энергии на ионизацию и проводимость.

Если представить воздушное включение в виде полости, вытянутой вдоль слоев (рис.1.36), то можно рассмотреть процесс ЧР из следующей эквивалентной схемы.

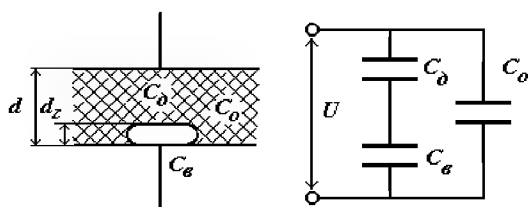


Рис.1.36. Эквивалентная схема замещения диэлектрика с воздушным включением:

C_d - емкость диэлектрика;
 $C_ε$ - емкость воздушного включения;
 $C_ε$ - емкость диэлектрика без поры

При достижении напряжения $U - U_{н.и.}$, падение напряжения на поре достигает $U_{пр.ε}$, т.е. происходит пробой емкости поры (ЧР).

$$U_{н.и.} = U_ε \left(1 + \frac{d - d_z}{ε \cdot d_z} \right) \text{ или} \quad (1.104)$$

$$E_{н.и.} = \frac{U_ε}{ε \cdot d_z} \left(1 + \frac{d_z (ε - 1)}{d} \right). \quad (1.105)$$

Для устранения ионизации необходимо, чтобы выполнялось условие $E_{пр} < E_{н.и.}$.

При ионизационном пробое снижение $E_{пр}$ с течением времени можно описать эмпирической формулой:

$$E_{пр} = \frac{A_1}{\sqrt[m]{\tau}}, \text{ или } \tau = \frac{A_2}{E^m}. \quad (1.106)$$

Здесь A и m – постоянные, зависящие от материала диэлектрика (для бумажно-масляной изоляции $m = (7 \div 8)$).

Электрохимический пробой обусловлен необратимыми электрохимическими процессами, протекающими в диэлектрике под воздействием приложенного напряжения. Интенсивность этих процессов заметно возрастает с увеличением температуры. Механизм электрохимических процессов, приводящих к электрическому старению, многообразен и зависит от материала диэлектрика, однако, можно указать следующие основные закономерности:

а) образование химически активных продуктов при ионной проводимости (взаимодействие ионов с металлом электродов, развитие дендритов);

б) процессы электролиза и электролитического разложения продуктов загрязнения, воды, пропиточной массы, (взаимодействие их с материалом электродов);

в) разрыв химических связей, образование свободных радикалов и их последующее взаимодействие с основным диэлектриком.

При электрохимическом пробое снижение $E_{пр}$ с течением времени описывается эмпирическим выражением:

$$E_{пр} = A \cdot \tau^{-n}, \quad (1.107)$$

$$\text{где } n = \frac{1}{m}.$$

Зависимость срока службы от температуры можно выразить уравнением

$$\tau = A \cdot 10^T, \quad (1.108)$$

или в виде

$$\ln \tau_1 - \ln \tau_2 = \beta(T_2 - T_1), \quad (1.109)$$

где β – температурный коэффициент (для б.м. изоляции $\beta = 0,03 \div 0,04$).

Глава 2. Основы расчета конденсаторов

2.1. Основные принципы расчета и расчетное задание

Расчет любого конденсатора сводится к нахождению оптимальных размеров, которые бы обеспечивали получение заданных (требуемых) значений электрических характеристик конденсатора, надежность его работы, минимальные затраты на его производство. Обычно при расчете конденсаторов исходят из технического задания, которым определяется назначение конден-

сатора, условия его работы (верхний предел рабочей температуры, влажность окружающей среды), емкость, ее точность, мощность, величина номинального напряжения, тип диэлектрика и др.

Если известен тип диэлектрика, то в большинстве случаев это определяет и тип конструкции конденсатора (тип секции - плоская, цилиндрическая или спирально - намотанная). В техническом задании в этом случае должны быть указаны номинальная емкость - $C_{ном}$, рабочее напряжение - $U_{раб}$, рабочая частота - $f_{раб}$.

⇒ Для конденсаторов, предназначенных для работы на постоянном (выпрямленном) напряжении, необходимо знать частоту и амплитуду переменной составляющей, которая будет вызывать заметный нагрев изоляции и может привести к ионизационным процессам.

⇒ При работе конденсаторов в цепях переменного тока необходимо также знать частоту и амплитудное значение высших гармоник, которые наиболее резко выражены в кривой напряжения. Наличие высших гармоник опасно вследствие увеличения потерь и дополнительного нагрева изоляции.

⇒ При работе конденсаторов на импульсном напряжении необходимо знать форму импульсов, их полярность и частоту следования.

Если в расчетном задании не указан тип диэлектрика, то расчет надо начинать с его выбора. Эта задача облегчается тем, что сочетание заданных значений C_n , U_p , f_p уже предопределяет определенные требования к диэлектрику (обычно этим условиям удовлетворяют несколько типов диэлектриков). На практике при анализе ограничиваются двумя - тремя типами диэлектриков, а окончательный расчет производится на основе оптимального варианта.

Основным моментом при расчете конденсатора является правильный выбор толщины диэлектриков, т. к. от нее зависят габаритные размеры конденсатора и его надежность. Как правило, при выборе толщины диэлектрика приходится идти на компромиссные условия, т.к. повышение надежности требует увеличения толщины, а обеспечение экономичности, наоборот, уменьшение толщины.

Для конденсаторов постоянного тока или низкой частоты толщина диэлектрика устанавливается на основе расчета электрической прочности изоляции конденсатора. Для высокочастотных конденсаторов толщина диэлектрика определяется из теплового расчета и проверяется потом из условия электрической прочности. При выборе толщины диэлектрика необходимо также ориентироваться на минимальные значения толщины соответствующих материалов (бумага, синтетические пленки, и др.), установленных ГОСТом или ТУ.

После определения толщины диэлектрика выбирается конструкция конденсаторной секции. В соответствии с ее конструкцией выбирается расчетная формула, связывающая значения емкости, толщины диэлектрика и размеры обкладок. При установлении размеров конденсаторной секции приходится дополнительно выбирать размеры закраин, исходя из условий перекрытия и основываясь на технологических соображениях. После установления разме-

ров конденсаторной секций (пакета секций) определяются размеры конденсатора исходя из расчета изоляции от корпуса, теплового расчета и конструктивного оформления.

Если к конденсатору предъявляются определенные требования по обеспечению надежности, то в техническом задании должно оговариваться максимальное допустимое значение интенсивности отказов - λ или срок службы конденсаторов - $T_{ср}$.

Для того, чтобы можно было провести тепловой расчет конденсатора, необходимо требовать указания в расчетном задании величины - T_{max} , при которой будет работать конденсатор. Значение T_{max} необходимо знать и при выборе варианта конструктивного оформления.

Так, если при расчете (при d_{omm}) допустимое значение - $U_{раб}$ получается большим и его не удастся снизить путем форсированного (воздушного или водяного) охлаждения, то приходится увеличивать габаритные размеры и толщину диэлектрика. За счет этого приходится уменьшать значение - $E_{раб}$ или же разбивать конденсатор на отдельные элементы, соединенные параллельно, или перейти к конденсаторной батарее вместо единичного конденсатора.

2.2. Основы электрического расчета

2.2.1. Выбор рабочей напряженности электрического поля

При рассмотрении явления пробоя было показано, что электрическая прочность диэлектрика уменьшается в процессе эксплуатации до некоторого значения $E_{пл}$ за счет процессов электрохимического и теплового старения, а также под действием ЧР.

Кратковременная электрическая прочность диэлектрика также зависит от его толщины, площади электродов, температуры окружающей среды и степени однородности электрического поля. Наряду с этим следует учитывать и статистический разброс значений длительной и кратковременной электрической прочности.

Поэтому при выборе рабочей напряженности электрического поля данного диэлектрика необходимо предусмотреть:

- 1.Отсутствие необратимых ухудшений свойств данного диэлектрика в процессе эксплуатации за счет электрического старения и под действием ЧР.
- 2.Отсутствие возможности пробоя изоляции при воздействии кратковременных перенапряжений.
- 3.Обеспечение требований экономичности и получение высоких удельных характеристик конденсатора.
- 4.Устранение возможности теплового пробоя.

Если диэлектрик конденсатора мало подвержен процессу старения (слода, керамика), то рабочую напряженность поля выбирают исходя из значений кратковременной электрической прочности $E_{пр}$.

$$E_{\text{раб}} \leq \frac{E_{\text{исп}}}{K_1}, \text{ где } E_{\text{исп}} \leq \frac{E_{\text{нр.сп}}}{K_2}. \quad (2.1)$$

Здесь $K_1 = 1,5 \div 2$ – коэффициент запаса прочности;

$K_2 = 1,2 \div 1,8$ – коэффициент, учитывающий разброс значений $E_{\text{нр}}$.

Если диэлектрик конденсатора подвержен процессу старения (особенно для высоковольтных конденсаторов), то рабочую напряженность поля выбирают исходя из значений длительной электрической прочности – $E_{\text{дл}}$.

$$E_{\text{раб}} \leq \frac{E_{\text{исп}}}{K_1}, \text{ где } E_{\text{исп}} = \frac{E_{\text{нр.дл}}}{K_2}. \quad (2.2)$$

В реальных условиях эксплуатации конденсатор может подвергаться воздействию различных перенапряжений, вследствие чего значение рабочей напряженности поля – $E_{\text{раб}}$ необходимо выбирать как из условия длительной электрической прочности, так и с учетом возможности пробоя при кратковременном воздействии перенапряжения. Поэтому расчет производится по обоим уравнениям, а затем берется наименьшее значение $E_{\text{раб}}$.

$$E_{\text{раб}} \leq \frac{E_{\text{исп}}}{K_1 K_{\text{П}}}, \quad (2.3)$$

где $K_{\text{П}}$ – коэффициент, учитывающий воздействие перенапряжения.

Для повышения удельных характеристик конденсатора желательно выбирать большее значение рабочей напряженности поля, т.к. между удельной энергией конденсатора $-W_{\text{уд}}$ и величиной $E_{\text{раб}}$ существует прямая связь

$$W_{\text{уд}} = \frac{W_{\text{к}}}{V} = \frac{U_{\text{раб}}^2 C}{2V} = E_{\text{раб}}^2 \varepsilon \varepsilon_0, \quad (2.4)$$

где $W_{\text{к}}$ – энергия, накопленная конденсатором;

V – его объем;

ε – диэлектрическая проницаемость.

Следует отметить, что повышение $E_{\text{раб}}$ не всегда возможно как с учетом вышесказанного, так и из экономических соображений.

Для бумажно-масляной изоляции, обычно содержащей воздушные включения, выбор рабочей напряженности должен производиться также с учетом возможности развития в них частичных разрядов (ЧР).

$$E_{\text{раб}} = \left(\frac{P_{\text{чр}}}{A} \right)^{\frac{1}{a}}, \text{ где} \quad (2.5)$$

$P_{\text{чр}}$ – мощность частичных разрядов;

A, a – постоянные ($a \approx 5 \div 8$).

При известных размерах воздушного включения

$$E_{\text{раб}} \leq E_{\text{н.и}} = \frac{U_{\text{с}}}{\varepsilon_{\text{д}} d_{\text{д}}} \left[\varepsilon_{\text{д}} + \frac{(\varepsilon_{\text{д}} - \varepsilon_{\text{с}}) d_{\text{с}}}{d_{\text{д}}} \right]. \quad (2.6)$$

Здесь $\varepsilon_v, \varepsilon_d$ – соответственно диэлектрическая проницаемость воздуха и диэлектрика, а d_v, d_d – толщина воздушного включения и диэлектрика.

Для толщины изоляции $0.03 \div 1.0$ мм можно принять

$$E_{\text{раб}} \leq E_{\text{ч.р}} = 3,6 \cdot d^{-0.5}, \text{ [МВ/м]}. \quad (2.7)$$

Для конденсаторной бумаги КОН-1 толщиной $10 \div 12$ мм, пропитанной маслом:

$$E_{\text{раб}} \leq E_{\text{ч.р}} = 3,3 \cdot d^{0.58}, \text{ [МВ/м]}. \quad (2.8)$$

Для изоляции, пропитанной хлордифенилом, величина $E_{\text{раб}}$ может быть увеличена:

$$E_{\text{раб}} \leq E_{\text{ч.р}} = 4,3 \cdot d^{0.58}, \text{ [МВ/м]}. \quad (2.9)$$

2.2.2. Определение толщины изоляции

Выбрав рабочую напряженность поля, определяют требуемую для заданного напряжения толщину изоляции:

$$d_{\text{из}} = \frac{U_{\text{раб}}}{E_{\text{раб}}}, \quad \text{или} \quad d_{\text{из}} = \frac{U_{\text{исп}}}{E_{\text{исп}}}. \quad (2.10)$$

Полученное значение толщины изоляции может оказаться достаточно большим или значительно отличаться от оптимальной толщины для слоистой (бумажно-масляной и пленочной) изоляции, учитывая зависимость $E_{\text{пр}} = f(d)$.

Кроме того, ЭИМ выпускаются промышленностью с определенной (регламентированной ГОСТом) толщиной, которая может не соответствовать найденной толщине.

В этом случае первоначально определяют $E_{\text{исп.онм}}$ при $E_{\text{пр.онм}}$:

$$E_{\text{исп.онм}} = \frac{E_{\text{пр.онм}}}{K_1}; \quad E_{\text{раб}} = \frac{E_{\text{исп.онм}}}{K_2}; \quad (2.11)$$

$$U_{\text{исп.онм}} = E_{\text{исп.онм}} \cdot d_{\text{онм}},$$

$$\text{где } d_{\text{онм}} = d_1 \cdot n_{\text{онм}};$$

d_1 - толщина одного слоя изоляции;

$n_{\text{онм}}$ - число оптимальных слоев, соответствующих $E_{\text{пр.мах}}$.

После этого можно определить рабочее напряжение отдельной секции:

$$U_{\text{раб.сек}} = E_{\text{раб}} \cdot d_{\text{онм}}. \quad (2.12)$$

Число последовательно соединенных секций найдем из соотношения

$$N = \frac{U_{\text{раб}}}{U_{\text{раб.сек}}} \quad \text{или} \quad N = \frac{U_{\text{исп}}}{U_{\text{исп.сек}}}. \quad (2.13)$$

Если секции наматываются из изоляции с различной толщиной между обкладками, то расчет N можно выполнить согласно:

$$N = \frac{U_{\text{раб}}}{E_{\text{раб}}(n_1\delta_1 + n_2\delta_2)}, \quad (2.14)$$

где n_1, n_2 - число листов бумаги между обкладками соответственно с толщиной листа δ_1, δ_2 .

Расчет числа последовательно соединенных секций должен производиться из условия обеспечения номинальной емкости конденсатора:

$$N = \frac{C_{\text{сек}}}{C_{\text{ном}}}, \quad (2.15)$$

т.е. емкость одной секции оказывается больше номинальной емкости.

Поскольку увеличение емкости приводит к увеличению площади обкладок, то это, в свою очередь, может привести к снижению $E_{\text{пр}}$ и соответственно к снижению $E_{\text{раб}}$. Поэтому конденсатор большой емкости набирают из параллельно соединенных секций, сохраняя оптимальную толщину и выбранную рабочую напряженность поля $E_{\text{раб}}$.

Число параллельных секций находим согласно

$$N_{\text{пар}} = \frac{C_{\kappa}}{C_{\text{сек}}} \cdot N_{\text{посл}}, \quad (2.16)$$

где C_{κ} - емкость конденсатора.

Число параллельных секций должно быть целым числом. Если оно не равно целому, то значение $N_{\text{пар}}$ принимается равным ближайшему целому и далее пересчитывается емкость секции и размеры секции.

2.2.3. Расчет закраины конденсатора

Размер закраины выбирается из условия перекрытия по закраине и условия отсутствия скользящих разрядов.

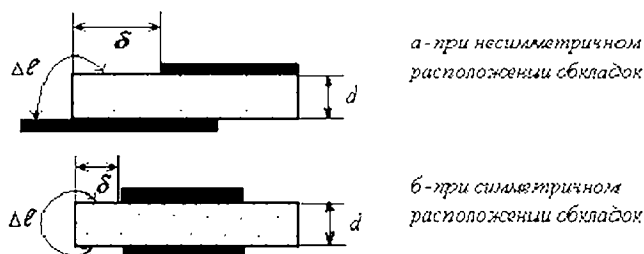


Рис.2.1. Схема расположения обкладок

ляющего диэлектрика.

В этот размер входит и толщина диэлектрика - d :

а) $\Delta l = \delta + d$;

б) $\Delta l = 2\delta + d$.

В секции конденсаторов закраины могут быть двух типов в зависимости от взаимного расположения обкладок (рис.2.1.). В обоих случаях путь перекрытия - Δl измеряется как расстояние между обкладками по поверхности раздела

Обычно $\Delta l \gg d$, поэтому в расчетах значением d можно пренебречь. Длина закраины Δl выбирается из условия

$$\Delta l = \frac{U_{исп}}{E_{исп}}, \text{ при этом } U_{исп} < U_p \quad (2.17)$$

$$\text{или } U_{исп} = \frac{U_{раб}}{K_1}, \quad (2.18)$$

где K_1 - коэффициент запаса прочности из условия перекрытия.

В резко неоднородном поле у края обкладки перекрытию по закраине предшествует развитие скользящего разряда и короны. Скользящие разряды, даже при кратковременном действии, могут вызывать науглероживание поверхности диэлектрика и частичное ее разрушение.

Поэтому $U_{исп} < U_{ск}$; $U_{раб} < U_{ск}$.

Действие коронных разрядов, возникающих у края обкладок, также может вызывать разрушение поверхности. Это особенно существенно для органических диэлектриков, имеющих низкую короностойкость.

В этом случае $U_{исп} < U_{кор}$; $U_{раб} < U_{кор}$.

При выборе Δl необходимо учитывать зависимость $\Delta l = f(U_p, U_{ск}, U_{кор}) = f(\Delta l)$, которая имеет вид, как показано на рис.2.2.

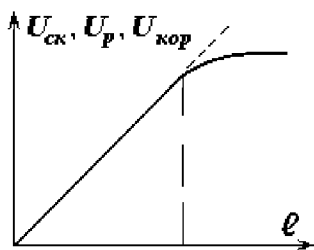


Рис.2.2. Зависимость напряжения перекрытия от величины закраины

Как следует из рис.2.2 вначале с ростом Δl значения U_p , $U_{ск}$ и U_k возрастают линейно, а затем их рост замедляется. Поэтому увеличение размера закраины не дает ощутимого эффекта роста U_p , $U_{ск}$, U_k .

В этом случае для конденсаторов высокого напряжения емкость разбивают на ряд последовательных секций, в которых напряжение, приходящееся на одну секцию, снижается до величины, соответствующей прямолинейному участку зависимости $U_p, U_{ск}, U_k = f(\Delta l)$.

Учитывая прямолинейность зависимости, можно найти:

$$\Delta l = k_3 U_{исп}, \quad (2.19)$$

где k_3 - коэффициент закраины, [мм/в].

2.2.4. Расчет изоляции между секциями и изоляции от корпуса

При расчете электрической прочности конденсатора следует учитывать возможность пробоя изоляции между отдельными секциями и изоляции ме-

жду секциями и корпусом. В случае последовательного соединения секций (рис.2.3) два вывода соседних секций соединяются накоротко, а между двумя другими выводами возникает напряжение, равное удвоенному напряжению каждой секции:

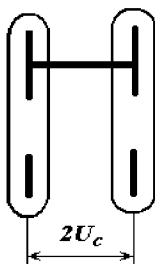


Рис. 2.3

$$2U_c = \frac{2U_{ном}}{N}, \quad (2.20)$$

где N - число последовательно соединенных секций.

Тогда из условия электрической прочности можно записать

$$2U_{исп} = E_{пр} \cdot \Delta_{сек}, \quad (2.21)$$

где $E_{пр}$ - кратковременная электрическая прочность для изоляции между секциями;

$\Delta_{сек}$ - толщина изоляции между секциями.

Тогда
$$2U_c = \frac{2U_{исп}}{K_1}, \quad (2.22)$$

где K_1 - коэффициент запаса прочности.

Обычно изоляцию между секциями из соображений механической прочности берут увеличенной толщины (вместо конденсаторной бумаги применяют кабельную бумагу, электрокартон и т.д.).

При использовании металлического корпуса необходимо принять меры к изоляции секций от корпуса. Величина напряжения, приходящаяся на эту изоляцию, может достигать значения номинального напряжения. Поэтому расчет толщины изоляции от корпуса должен, прежде всего, производиться из условия кратковременной электрической прочности с учетом возможности перенапряжений, т.е.

$$U_{исп} = \frac{E_{пр.ср} \cdot \Delta_{корп}}{K_1 \cdot K_n}, \quad (2.23)$$

где $E_{пр}$ - электрическая прочность изоляции с учетом разброса $E_{пр}$;

K_1 - коэффициент, учитывающий разброс значений $E_{пр}$;

K_n - коэффициент учитывающий рост действительного значения напряжения за счет перенапряжений;

Δ_k - толщина изоляции между секциями и корпусом.

С учетом возможности механического повреждения изоляции при сборке конденсаторов величину Δ_k берут несколько больше (на величину $\Delta_{дон}$)

$$\Delta_k = \frac{U_{исп} K_1 K_n}{E_{пр.ср}} + \Delta_{дон}. \quad (2.24)$$

Обычно толщина дополнительной изоляции - $\Delta_{дон}$ берется в пределах 0.5÷1 мм. Необходимо отметить, что увеличение толщины изоляции между

секциями и корпусом по сравнению с толщиной активной изоляции между обкладками приводит к понижению уровня напряжения возникновения ионизации -ЧР, т.к. с ростом d уменьшается и величина допустимой напряженности поля. Поэтому эту изоляцию часто разбивают на ряд последовательно соединенных слоев, разделенных друг от друга прокладками из фольги, т.е. типа конденсаторных обкладок изоляции проходных изоляторов.

В этом случае происходит перераспределение напряженности поля, за счет чего напряженность поля, приходящаяся на каждый отдельный слой, может быть увеличена, что вызывает и увеличение напряжения, при котором может возникать – ЧР. Кроме того, при расчете изоляции от корпуса также следует иметь ввиду, что чрезмерное увеличение ее толщины ухудшает условия теплоотвода, что может вызвать перегрев конденсатора и развитие теплового пробоя в основной изоляции между обкладками.

2.3. Основы теплового расчета конденсаторов

2.3.1. Коэффициент теплоотдачи конвекцией

Целью теплового расчета является оценка правильности выбранных размеров конденсатора с точки зрения обеспечения допустимого перегрева по отношению к температуре окружающей среды. Если исходить из теории теплового пробоя, то тепловое равновесие между выделенным и отведенным количеством тепла достигается при определенном значении приложенного напряжения и некоторой максимальной температуре внутри конденсатора

$$P_a = 2\pi f \cdot U^2_{раб} \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta = \alpha_T S (T_K - T_o). \quad (2.25)$$

Так как величина рабочего напряжения определяется техническим заданием, то данная задача сводится к определению максимальной температуры внутри конденсатора и сравнению ее со значением допустимой температуры для используемой изоляции из условия термического разрушения.

Согласно уравнению (2.25) найдем

$$T_K = \frac{2\pi f \cdot U^2_{раб} \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta}{\alpha_T S} + T_o, \quad (2.26)$$

где α_T – коэффициент теплоотдачи с поверхности конденсатора, $\text{Вт/м}^2 \cdot \text{град}$;

T_o – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$;

S – поверхность охлаждения, м^2 .

При естественном воздушном охлаждении конденсаторов, имеющих металлический корпус, можно использовать для ориентировочных расчетов значение $\alpha_T = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$. Фактически величина коэффициента теплоотдачи зависит от формы и размеров конденсатора и от температуры перегрева.

Величину коэффициента теплоотдачи с учетом охлаждения за счет конвекции воздуха можно найти теоретически на основе методов подобия, кото-

рые предполагают наличие некоторых величин, сохраняющих постоянное значение для подобных между собой явлений. В теплотехнике при рассмотрении теплоотдачи за счет конвекции такими критериями являются критерии Грасгофа, Прандтля и Нуссельта.

Критерий Грасгофа применим для механического подобия движущейся жидкости и газа, когда разность плотностей определяется разностью температур:

$$Gr = \beta \cdot \Delta T \frac{gl^2}{\nu^2}, \quad (2.27)$$

где β - коэффициент объемного расширения, град⁻¹;

g - ускорение силы тяжести, м/с²;

ν - коэффициент кинематической вязкости, м²/с;

l - размер поверхности, м.

Критерий Прандтля характеризует физические свойства рабочей жидкости (газа):

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\nu}{\frac{\lambda}{\gamma \cdot C_p}} = \frac{\nu \cdot \gamma \cdot C_p}{\lambda}, \quad (2.28)$$

где α - коэффициент температуропроводности, м²/час;

C_p - теплоемкость, ккал/кг·град;

λ - коэффициент теплопроводности, ккал/м·час·град;

γ - удельный вес, кг/м³.

Критерий Нуссельта характеризует тепловое подобие:

$$Nu_L = \frac{\alpha_K \cdot \ell}{\lambda}, \quad (2.29)$$

где α_K - коэффициент теплоотдачи, ккал/м²·час·град.

Обобщенная критериальная формула позволяет связать для теплового подобия все критерии:

$$\lg Nu_T = f(\lg Gr \cdot Pr)_T \quad (2.30)$$

Графически эту зависимость можно представить в виде 4-х ломаных линий (рис.2.4), которые соответствуют 4-м режимам движения воздуха вдоль охлаждаемой поверхности (1-плёночному, 2-слоистому, 3-локонообразному, и 4-вихреобразному).

Тогда можно записать

$$Nu_T = C(Gr \cdot Pr)_T^n, \quad (2.31)$$

где значение коэффициентов C и n определяют вид участка.

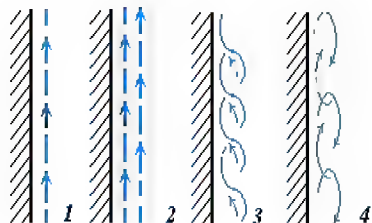
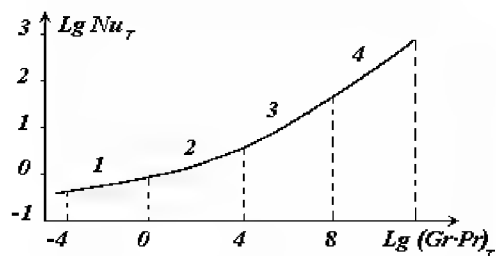


Рис. 2.4. Зависимость $Lg Nu$ от Lg произведения $Gr \cdot Pr$

Решая совместно 2.27-2.31, можно найти значение коэффициента α_g :

$$\alpha_k = C(\beta \cdot g \cdot Pr_T)^n \cdot \frac{\gamma_T}{\nu_T^{2n}} \left(\frac{\Delta T}{\frac{1}{\ell^n} - 3} \right)^n. \quad (2.32)$$

Для каждого участка можно записать

$$\begin{aligned} 1) \alpha_k &= 0,5 \frac{\ell}{\lambda}; & 2) \alpha_k &= A_1 \left(\frac{\Delta T}{\ell^5} \right)^{0,125}; \\ 3) \alpha_k &= A_2 \left(\frac{\Delta T}{\ell} \right)^{0,25}; & 4) \alpha_k &= A_3 (\Delta T)^{0,33}. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Порядок величин $A_1; A_2; A_3$ при различных температурах приведен в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Значение A	Определяющая температура, С			
	0	50	100	200
A1	0.25	0.27	0.28	0.31
A2	1.19	1.18	1.17	1.15
A3	1.48	1.4	1.38	1.21

Определяющим размером l для вертикальной стенки является ее высота, а для горизонтально расположенного цилиндра - его диаметр.

Определяющей температурой является средняя температура пограничного слоя воздуха у охлаждаемой поверхности:

$$T_T = \frac{T_K + T_0}{2}; \quad (2.34)$$

$$\Delta T = T_K - T_0. \quad (2.35)$$

Чтобы определить α_k , необходимо знать вид участка или можно вычислить произведение $Gr \cdot Pr$ при данной температуре по уравнениям (2.27, 2.28).

Постоянные C и n зависят от режима свободного движения воздуха (ламинарного, переходного или турбулентного) и являются функцией произведения $Gr \cdot Pr$ (табл. 2.2). Физические параметры воздуха и воды приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.2

$Gr \cdot Pr$	C	n
$1 \cdot 10^{-3} \div 5 \cdot 10^2$	1.18	0.125
$5 \cdot 10^2 \div 2 \cdot 10^7$	0.54	0.25
$2 \cdot 10^7 \div 1 \cdot 10^{13}$	0.135	0.33

Таблица 2.3

	$T, ^\circ C$	γ кг/м ³	$C_p \cdot 10^3$ Дж/кг $^\circ C$	$\lambda \cdot 10^2$ Вт/м ² ч	$\alpha \cdot 10^4$ м ² /ч	$\mu \cdot 10^6$ Па·С	$\nu \cdot 10^6$ м ² /с	β 1/ $^\circ C$	Pr
Воз- Дух	-40	1,515	1,013	2,117	4,46	15,20	10,04	1/273	0,728
	0	1,293	1,005	2,442	6,77	17,16	13,28	1/273	0,707
	40	1,128	1,005	2,756	8,75	19,12	16,96	1/273	0,699
Вода	0	999,9	4,211	55,1	4,71	1788	1.789	-0,63	13.67
	40	992,2	4,174	63,4	5,51	653,1	0,659	3,87	4,31
	80	971,8	4,195	67,5	5,96	355,0	0,365	6,32	2,21

При охлаждении воздухом $Pr \approx 0,72$.

Кинематическая вязкость ν зависит от температуры, как показано на рис.2.5.

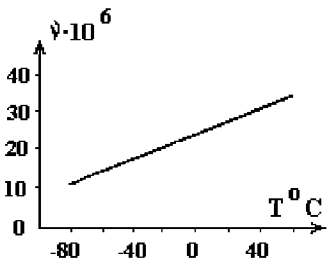


Рис. 2.5. Зависимость кинематической вязкости воздуха от температуры

Обычно для силовых конденсаторов движение воздуха является турбулентным, поэтому $C = 0,135$ а $n = 1/3$. Можно показать, что это будет соответствовать третьему участку, когда:

$$\alpha_k = 1,37 \cdot 10^{-4} \left(\frac{\Delta T}{\ell} \right)^{0,25}, \text{ [Вт/см}^2 \cdot \text{град]}. \tag{2.36}$$

Для горизонтально расположенных плит для расчета α_k можно воспользоваться эмпирическим уравнением:

$$\alpha_k = 2,5 \cdot 10^{-4} \Delta T^{0,25}, \text{ [Вт/см}^2 \cdot \text{град]}. \quad (2.37)$$

Для вертикально расположенных цилиндров вычисление α_k можно про-
извести:

$$\alpha_k = 5,88 \cdot 10^{-4} \beta \left(\frac{\Delta T}{D} \right)^{0,25}, \text{ [Вт/см}^2 \cdot \text{град]}. \quad (2.38)$$

где β - коэффициент, зависящий от высоты цилиндров H ;
 D - диаметр цилиндров, мм.

2.3.2. Коэффициент теплоотдачи излучением

Коэффициент теплоотдачи излучением - α_u зависит от физических ха-
рактеристик излучающего тела, его температуры и температуры окружаю-
щей среды. Для его определения можно воспользоваться соотношением, сле-
дующим из закона Стефана-Больцмана

$$\alpha_u = \frac{C_0 K_u}{T_K - T_0} \left[\left(\frac{T_K}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{100} \right)^4 \right], \quad (2.39)$$

где $C_0 = 5,77 \text{ Вт/м}^2 \text{К}^4$ - константа излучения абсолютно черного тела;
 K_u - коэффициент лучеиспускательной способности тела (степень
черноты тела).

Значения коэффициента K_u для различных материалов приведены в
табл. 2.4.

Таблица 2.4

Материал	K_u
Сталь полированная	0,052 – 0,064
Сталь оцинкованная	0,22 – 0,88
Сталь лакированная	0,87
Al шероховатый	0,055
Al полированный	0,039 – 0,05

Для конденсаторов с высотой корпуса порядка $H = 350 \text{ мм}$ получена эм-
пирическая формула:

$$\alpha_T = 9,5 + 0,39 \Delta T, \text{ [Вт/м}^2 \cdot \text{град]}. \quad (2.40)$$

Коэффициент теплоотдачи можно увеличить форсированным охлажде-
нием ребрами или обдувом. В этом случае можно воспользоваться критери-
альным уравнением М.А.Михеева:

$$Nu_0 = 0,032 Re_0^{0,8}, \quad (2.41)$$

где v - скорость движения воздуха;

ν - кинематическая вязкость воздуха;

$Re = \frac{v \cdot l}{\nu}$ - критерий Рейнольдса.

Зная критерии Nu и Re , найдем:

$$\alpha_K = \frac{B_1 \cdot \nu^{0.8}}{\ell^{0.2}}, \text{ где } B_1 = \frac{3.2 \cdot 10^{-2} \lambda}{\nu^{0.8}}. \quad (2.42)$$

В табл. 2.5 приведены значения коэффициента B_1 при разных температурах.

Таблица 2.5

$t, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80
B_1	98,4	94,2	91,6	87,9	84,7

В случае принудительного охлаждения можно также воспользоваться критериальным уравнением:

$$Nu_c = 2.3 \cdot 10^{-2} Re_c^{0.8} \cdot Pr_c^{0.4}. \quad (2.43)$$

После определения критериев Nu_c , Re_c , Pr_c и приняв плотность воды (равной единице), найдем:

$$\alpha_k = \frac{B \cdot \nu^{0.8}}{d^{0.2}}, \text{ [Вт/м}^2 \cdot \text{град]}, \quad (2.44)$$

где d - диаметр трубы, м;

ν - скорость движения воды, м/с.

Значения коэффициента B приведены в табл. 2.6.

Таблица 2.6.

$t, ^\circ\text{C}$	0	20	40	60	80
B	5,70	7,48	9,26	10,8	12,2

2.3.3. Определение коэффициента теплопроводности

Конструкция конденсатора по своим теплофизическим свойствам неоднородна. Он состоит из секций, которые, в свою очередь, обладают неоднородностью расположения бумаги и фольги по отношению к тепловому потоку (они располагаются или параллельно $\parallel$, или перпендикулярно $\perp$). Кроме того, секция характеризуется различной степенью обжатия изоляции, различным отношением толщины бумаги к толщине фольги, наличием пропиточного состава, что обуславливает различие теплопроводности отдельных ее участков.

В зоне параллельного теплоотвода, когда слои изоляции $\parallel$ вектору теплового потока можно рассматривать три слоя - пропитанная бумага, фольга и пропиточный состав, которые характеризуются коэффициентами λ_b , λ_f , $\lambda_{жс}$. Поскольку толщина слоев мала, конвективная теплопередача в пропиточной

жидкости отсутствует. В этом случае можно записать уравнение теплопроводности с $\parallel$ расположением компонентов:

$$\lambda_{II} = \frac{[d_{\phi} \lambda_{\phi} + nd_1 \lambda_{\delta} + \frac{1-k}{k} nd_1 \lambda_{жс}]}{\left(\frac{nd_1}{k} + d_{\phi}\right)}, \quad (2.45)$$

приняв, что $\xi = \frac{nd_1}{d_{\phi}}$, получим:

$$\lambda_{II} = \frac{\left[\lambda_{\phi} + \left(\lambda_{\delta} + \frac{1-k}{k} \lambda_{жс}\right) \xi\right]}{\left(\frac{\xi}{k} + 1\right)}; \quad (2.46)$$

при $k = 1$

$$\lambda_{II} = \frac{(\lambda_{\phi} + \xi \lambda_{\delta})}{\left(\frac{\xi}{k} + 1\right)}. \quad (2.47)$$

Для зоны перпендикулярного теплоотвода

$$\lambda_{\perp} = \frac{\left(\frac{\xi}{k} + 1\right) \lambda_{\phi} \lambda_{\delta} \lambda_{жс}}{\left(\lambda_{\delta} \lambda_{жс} + \xi \lambda_{\phi} \lambda_{жс} + \frac{1-k}{k} \lambda_{\delta} \lambda_{жс}\right)}; \quad (2.48)$$

при $k = 1$

$$\lambda_{\perp} = \frac{(\xi + 1) \lambda_{\delta} \lambda_{\phi}}{(\lambda_{\delta} + \xi \lambda_{\phi})}. \quad (2.49)$$

Для практических расчетов используют приближенные формулы:

$$\lambda_{II} = \frac{\lambda_{\phi}}{\xi + 1} \quad \text{и} \quad \lambda_{\perp} = \frac{\lambda_{\delta} (\xi + 1)}{\xi}. \quad (2.50)$$

Рассмотрим определение коэффициента λ на примере секции с расположением начала координат в центре секции (рис.2.6). Оси Y, Z параллельны ее сторонам, а ось X перпендикулярна ее плоскости. Вдоль оси Y теплоотвод из секции сначала идет по участку с λ_{II} , а затем с $\lambda_{\perp}$. При этом длина участка с λ_{II} больше чем с $\lambda_{\perp}$. Вдоль оси Z теплоотвод из секции всегда $\parallel$ слоям, т.е. λ_{II} . По оси X теплоотвод всегда $\perp$ слоям, т.е. с $\lambda_{\perp}$.

Используя методы теории теплового подобия, можно найти значение эквивалентного коэффициента теплопроводности λ_* .

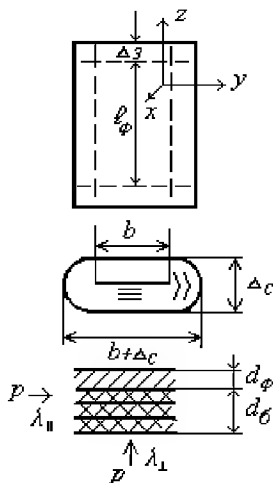


Рис. 2.6

$$\lambda_{экв} = \frac{\left(1 + \frac{b}{\Delta_C}\right)^2}{\frac{1}{\lambda_{II}} \left(\frac{b}{\Delta_C}\right)^2 + \frac{4b}{\pi \Delta_C \lambda_{\perp}} + \frac{1}{2\lambda_{\perp}}} \quad (2.51)$$

При расчете коэффициентов λ_{II} и $\lambda_{\perp}$ следует учитывать, что значение λ_{δ} необходимо брать с учетом пропитки бумаги пропиточным составом.

Используя принцип последовательно-параллельного расположения компонентов, коэффициент теплопроводности многослойной бумажной изоляции можно определить по уравнению:

$$\lambda_{\delta} = \frac{\lambda_k \lambda_{ж}}{\lambda_k \left(1 - \frac{\gamma_{\delta}}{\gamma_k}\right) + \lambda_{жс} \cdot \frac{\gamma_{\delta}}{\gamma_k}} = \frac{\lambda_k \lambda_{жс}}{\lambda_k - \frac{\gamma_{\delta}}{\gamma_k} (\lambda_k - \lambda_{жс})}, \quad (2.52)$$

где λ_k - коэффициент теплопроводности клетчатки;

$\lambda_{жс}$ - коэффициент теплопроводности пропитки;

γ_{δ} - плотность бумаги;

γ_k - плотность клетчатки.

2.3.4. Максимальная температура внутри конденсатора

Определение максимальной температуры внутри конденсатора является конечной задачей теплового расчета, т.к. позволяет определить возможность тепловой устойчивости конденсатора. Точный расчет температурного поля в конденсаторе весьма сложен и громоздок. Поэтому на практике обычно используют приближенный метод.

В общем случае на пути теплового потока от секций конденсатора к его наружной поверхности имеется несколько изолирующих слоев - это изоляция между самими секциями, изоляция от корпуса и т.д. Выражая этот поток через потери в конденсаторе P_A как отношение перепада температур на слой изоляции к тепловому сопротивлению этого слоя изоляции, получим:

$$P_A = \frac{\Delta t_1}{\left(\frac{\Delta_1}{\lambda_1 S_1}\right)} = \frac{\Delta t_2}{\left(\frac{\Delta_2}{\lambda_2 S_2}\right)} = \dots \quad (2.53)$$

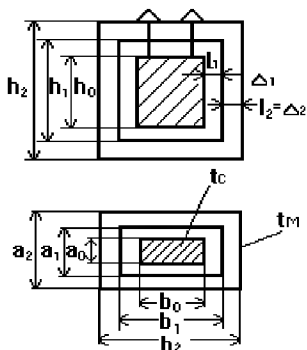


Рис.2.7. Схема расположения секций конденсатора в корпусе

Это выражение не совсем точное, т.к. в слоях изоляции между секциями и корпусом конденсатора также могут быть потери. Однако в большинстве случаев ими можно пренебречь в сравнении с потерями в пакете секций.

Можно также предположить, что тепловой поток распространяется только от поверхности секций к боковым стенкам корпуса. Теплоотдачей крышки конденсатора можно также пренебречь, т.к. значительная ее часть занята изоляторами.

В этом случае можно записать:

$$S_1 = 0.5(h_0 + h_1)(a_0 + a_1 + b_0 + b_1); \quad (2.54)$$

$$S_2 = 0.5(h_1 + h_2)(a_1 + a_2 + b_1 + b_2),$$

где S_1 и S_2 — средние значения поверхности, по которой проходит тепловой поток.

Из уравнения (2.53) можно найти перепады температур на слоях изоляции:

$$\Delta t_1 = \frac{P_A \Delta_1}{\lambda_1 S_1}, \quad \Delta t_2 = \frac{P_A \Delta_2}{\lambda_2 S_2}. \quad (2.55)$$

Тогда температура на поверхности секции будет равна

$$t_c = t_k = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_n. \quad (2.56)$$

За счет перепада температур внутри пакета секций максимальная температура внутри конденсаторной секции будет превышать значение t_c . Определение этого перепада осложняется тем, что внутри секции тепло не только отводится, но и выделяется за счет потерь в активном диэлектрике и в обкладках. Для простейшего случая плоского керамического конденсатора по Д.М.Казарновскому значение t_{max} можно определить:

$$t_{max} = \frac{P_{y\partial} d^2}{S \lambda} + t_k, \quad (2.57)$$

где d — толщина диэлектрика;

λ — коэффициент теплопроводности керамики;

t_k — температура поверхности.

$$P_{y\partial} = \frac{f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2}{1.8 \cdot 10^{12}}, \text{ [Вт/см}^3\text{]}. \quad (2.58)$$

Определение максимальной температуры внутри бумажно-масляного силового конденсатора было проведено М.И.Мантровым и С.К.Медведевым.

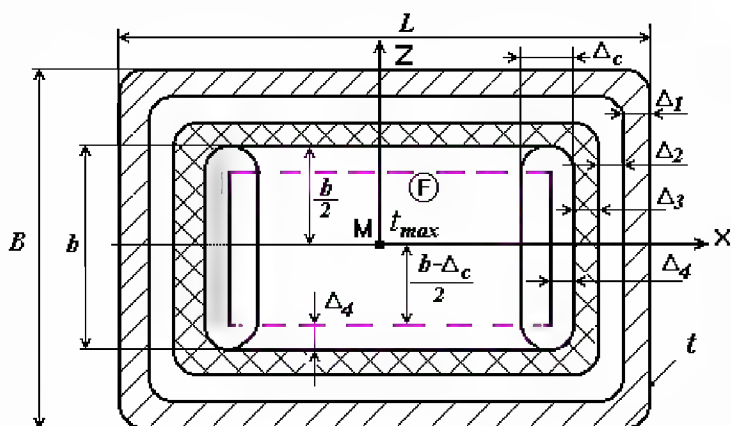


Рис.2.8. Схема распределения температуры внутри конденсатора

Были сделаны следующие допущения:

1. Отвод тепла происходит только в сторону боковой поверхности корпуса. Теплоотводом в сторону дна и крышки конденсатора пренебрегаем.
2. Поверхность пакета секции рассматривается как изотермическая, т.е. как поверхность равных температур.
3. Градиент температуры на высоте конденсатора постоянен и равен нулю.
4. Тепловой поток внутри объема, ограниченного поверхностью F , протекает только $\parallel$ слоям бумаги и фольги.
5. Тепловой поток между поверхностью F и корпусом конденсатора протекает только $\perp$ стенкам корпуса и слоям бумаги и фольги.

При тепловом равновесии можно записать

$$Q_T = \alpha_T S(t_k - t_o), \quad (2.59)$$

где

$$Q_T = 0.24 U^2 2\pi f C t g \delta \quad \text{на переменном напряжении;} \quad (2.60)$$

$$Q_T = 0.24 \frac{U^2 C}{\tau} \quad \text{на постоянном токе.} \quad (2.61)$$

Если высота корпуса конденсатора H , то

$$S = 2H(L + B). \quad (2.62)$$

При условии непрерывности теплового потока и $S \cong S_1 \approx S_2 \approx \dots = S_n$.

$$\frac{Q_T}{S} = \lambda_1 \frac{t_1 - t_k}{\Delta_1} = \lambda_2 \frac{t_2 - t_k}{\Delta_2} = \lambda_3 \frac{t_3 - t_k}{\Delta_3}. \quad (2.63)$$

Из уравнения (2.59) следует, что температура наружной поверхности корпуса равна:

$$t_k = \frac{Q_T}{\alpha_T S} + t_o. \quad (2.64)$$

В этом случае из уравнений (2.63-2.64) найдем:

$$\begin{aligned} t_1 &= \frac{A_1 Q_T}{\alpha_1 S} + t_k = \frac{Q_T}{S} \left(\frac{A_1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_T} \right) + t_0 ; \\ t_2 &= \frac{A_2 Q_T}{\alpha_2 S} + t_1 = \frac{Q_T}{S} \left(\frac{A_1}{\lambda_1} + \frac{A_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_T} \right) + t_0 ; \\ t_3 &= \frac{A_3 Q_T}{\alpha_3 S} + t_2 = \frac{Q_T}{S} \left(\frac{A_1}{\lambda_1} + \frac{A_2}{\lambda_2} + \frac{A_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_T} \right) + t_0 . \end{aligned} \quad (2.65)$$

Чтобы найти максимальную температуру t_{max} в точке М (рис.2.8), надо знать зависимость температуры в активной части конденсатора от параметра z (на расстоянии от точки М до боковой стенки конденсатора).

Для объема, ограниченного изотермической поверхностью, можно считать, что тепловой поток движется II слоям бумаги и фольги. Тогда коэффициент теплопроводности секции в этом направлении:

$$\lambda_{II} = \lambda_{\delta} \frac{nd_{\delta}}{nd_{\delta} + d_{\phi}} + \lambda_{\phi} \frac{d_{\phi}}{nd_{\delta} + d_{\phi}} , \quad (2.66)$$

где λ_{δ} d_{δ} - коэффициент теплопроводности и толщина бумаги;

λ_{ϕ} , d_{ϕ} - коэффициент теплопроводности и толщина фольги.

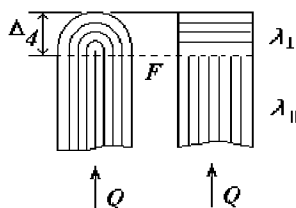


Рис. 2.9

На участке Δ_4 (рис.2.9) тепловой поток будет двигаться перпендикулярно слоям.

В этом случае

$$\lambda_{\perp} = \frac{\lambda_{\delta} \lambda_{\phi} (nd_{\delta} + d_{\phi})}{\lambda_{\phi} nd_{\delta} + \lambda_{\delta} d_{\phi}} . \quad (2.67)$$

Выделим мысленно в активном объеме конденсатора площадку ABCD, расположенную $\perp$ направлению теплового потока Q (рис. 2.10).

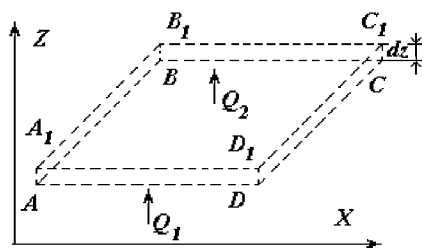


Рис. 2.10

Рис.2.10. Количество тепла Q_1 , входящее в данную площадку за 1с равно:

$$Q_1 = -\lambda_{II} \left(\frac{dt}{dz} \right)_1 . \quad (2.68)$$

Знак (-) означает, что тепловой поток распространяется в сторону увеличения Z .

Количество тепла, выходящее из площадки, определяется:

$$Q_2 = -\lambda_{II} \left(\frac{dt}{dz} \right)_2. \quad (2.69)$$

При этом $Q_2 > Q_1$ на количество тепла, выделенного за счет диэлектрических потерь в слое dz :

$$Q_2 = Q_1 + \Delta Q. \quad (2.70)$$

Величину ΔQ можно найти через удельные потери $P_{y\partial}$.

На переменном напряжении

$$P_{y\partial} = \frac{P_A}{V} = \frac{2\pi U^2 C \operatorname{tg} \delta}{V} = \frac{2\pi f U^2 \cdot 0.0885 \varepsilon \cdot S \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot 10^{-12}}{d \cdot V}$$

или

$$P_{y\partial} = 0.55 \cdot 10^{-12} f \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta \cdot E^2 = \gamma_a \cdot E^2. \quad (2.71)$$

На постоянном напряжении

$$P_{y\partial} = \frac{P_A}{V} = \frac{U^2}{R_{us} V} = \frac{U^2 S}{\rho \cdot d \cdot V} = \gamma_a \cdot E^2, \quad (2.72)$$

тогда

$$\Delta Q = 0.24 P_{y\partial} dz = 0.24 \cdot \gamma \cdot E^2 \cdot dz. \quad (2.73)$$

Используя уравнения (2.69-2.70), найдем:

$$-\lambda_{II} \left(\frac{dt}{dz} \right)_2 = -\lambda_{II} \left(\frac{dt}{dz} \right)_1 + 0.24 \cdot \gamma E^2 \cdot dz \quad (2.74)$$

или после преобразований получим

$$\lambda_{II} \frac{1}{dz} \left[\left(\frac{dt}{dz} \right)_2 - \left(\frac{dt}{dz} \right)_1 \right] + 0.24 \cdot \gamma E^2 = 0, \quad (2.75)$$

или

$$\lambda_{II} \frac{d^2 t}{dz^2} + 0.24 \cdot \gamma E^2 = 0, \quad (2.76)$$

т.е. получили одномерное дифференциальное уравнение теплопроводности.

Считая величину γ постоянной, а значение E не зависящей от температуры и z , дважды проинтегрируем выражение (2.76)

$$\lambda_{II} \frac{dt}{dz} + 0.24 \cdot \gamma E^2 z = C_1;$$

$$\lambda_{II} \cdot t + 0.12 \cdot \gamma E^2 z^2 = C_1 z + C_2. \quad (2.77)$$

Постоянные интегрирования C_1 и C_2 найдем из условия, что при $z = 0$, $t = t_{max}$. В этом случае $C_2 = \lambda_{II} \cdot t_{max}$. Кроме того, при $z = 0$ и $t = t_{max}$ касательная к кривой $t = f(z)$ должна быть параллельна оси z ,

$$\text{т.е. } \frac{dt}{dz} = 0 \text{ и } C_1 = 0.$$

После подстановки в уравнение (2.77) получим

$$\lambda_{II} t + 0.12 \cdot \gamma E^2 z^2 = \lambda_{II} t_{\max}. \quad (2.78)$$

Решая (2.78) относительно t , найдем

$$t = t_{\max} - \frac{0.12 \cdot \gamma E^2 z^2}{\lambda_{II}}. \quad (2.79)$$

На изотермической поверхности F $z = \frac{b - \Delta_C}{2}$, а $t = t_4$, т.е. равна температуре на границе раздела активного объема и изоляции от корпуса.

$$t_4 = t_{\max} - \frac{0.12 \cdot \gamma E^2 (b - \Delta_C)^2}{4 \lambda_{II}}, \text{ а} \quad (2.80)$$

$$t_{\max} = t_4 + \frac{0.03 \cdot \gamma E^2 (b - \Delta_C)^2}{\lambda_{II}}, \quad (2.81)$$

т.е. выражение (2.81) позволяет определить $t_{\max}$, если известно значение t_4 .

Для этого найдем перепад температуры в слое Δ_4 , отделяющего изотермическую поверхность F от поверхности пакета секций.

Для этого слоя, аналогично (2.73) и (2.74), составим дифференциальное уравнение

$$\lambda_{\perp} \frac{d^2 t}{dz^2} + 0.24 \cdot \gamma E^2 = 0. \quad (2.82)$$

После интегрирования получим

$$\lambda_{\perp} t + 0.12 \cdot \gamma E^2 z^2 = C_1 z + C_2. \quad (2.83)$$

$$\text{При } z = 0, \quad \frac{dt}{dz} = 0 \text{ и } C_1 = 0.$$

$$\text{При } z = \frac{b}{2}, \quad t = t_3, \text{ тогда } C_2 = \lambda_{\perp} t_3 + 0.12 \cdot \gamma E^2 \frac{b^2}{4}.$$

После подстановки в уравнение (2.83) получим

$$\lambda_{\perp} t + 0.12 \cdot \gamma E^2 z^2 = \lambda_{\perp} t_3 + 0.12 \cdot \gamma E^2 \frac{b^2}{4};$$

$$\lambda_{\perp} t = \lambda_{\perp} t_3 + 0.12 \cdot \gamma E^2 \frac{b^2}{4} - 0.12 \cdot \gamma E^2 z^2, \text{ а} \quad (2.84)$$

$$t = t_3 + \frac{0.12 \cdot \gamma E^2}{\lambda_{\perp}} \left(\frac{b^2}{4} - z^2 \right). \quad (2.85)$$

Из уравнения (2.85) при $z = \frac{b - \Delta_C}{2}$ найдем значение t_4 на изотермической поверхности F

$$t_4 = t_3 + \frac{0.12 \cdot \gamma E^2}{\lambda_{\perp}} \left(\frac{b^2}{4} - \frac{(b - \Delta_C)^2}{4} \right) =$$

$$= t_3 + \frac{0.03 \cdot \gamma E^2}{\lambda_{\perp}} (2b \cdot \Delta_C - \Delta_C^2)$$
(2.86)

После подстановки (2.86) в уравнение (2.81) получим

$$t_{\max} = t_3 + \frac{0.03 \cdot \gamma E^2}{\lambda_{\perp}} (2b \Delta_C - \Delta_C^2) + \frac{0.03 \cdot \gamma E^2}{\lambda_{\parallel}} \cdot (b - \Delta_C)^2 =$$

$$= t_3 + 0.03 \cdot \gamma E^2 \left[\frac{2b \Delta_C - \Delta_C^2}{\lambda_{\perp}} + \frac{(b - \Delta_C)^2}{\lambda_{\parallel}} \right]$$
(2.87)

Значение температуры t_3 найдем из уравнения (2.65)

$$t_3 = \frac{Q_T}{S} \left(\frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta_2}{\lambda_2} + \frac{\Delta_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_T} \right) + t_0 = \frac{Q_T \cdot K_3}{\alpha_T \cdot S} + t_0, \text{ где}$$

$$K_3 = 1 + \alpha_T \left(\frac{\Delta_1}{\lambda_1} + \frac{\Delta_2}{\lambda_2} + \frac{\Delta_3}{\lambda_3} \right).$$
(2.88)

После подстановки получим

$$t_{\max} = \frac{Q_T \cdot K_3}{\alpha_T \cdot S} + 0.03 \cdot \gamma E^2 \left[\frac{2b \Delta_C - \Delta_C^2}{\lambda_{\perp}} + \frac{(b - \Delta_C)^2}{\lambda_{\parallel}} \right] + t_0.$$
(2.89)

Учитывая, что $Q_T = 0.24 \cdot \gamma E^2 \cdot V$ и вводя коэффициент $K = K_3 \cdot 8V$, получим

$$t_{\max} = 0.03 \cdot \gamma E^2 \left[\frac{2b \Delta_C - \Delta_C^2}{\lambda_{\perp}} + \frac{(b - \Delta_C)^2}{\lambda_{\parallel}} + \frac{K}{\alpha_T \cdot S} \right] + t_0.$$
(2.90)

2.4. Удельные характеристики конденсатора

Удельные характеристики конденсатора применяются для оценки качества конденсатора и правильности проведения его расчета и конструирования и являются одним из показателей его экономичности. Чаще всего используют для этого значения удельной емкости, удельной энергии и удельной реактивной мощности, отнесенные к единице объема.

Под удельной емкостью понимают отношение:

$$C_{y\phi} = \frac{C}{V},$$
(2.91)

где C – емкость, Ф;

V – объем, м³.

$$C_{y\phi} = \frac{0,0885 \cdot \varepsilon \cdot S}{(dS)d} = 0.0885 \frac{\varepsilon}{d^2}, \text{ [пФ/см}^3\text{]}.$$
(2.92)

При малых значениях рабочего напряжения толщина изоляции минимальна и определяется технологическими возможностями ее изготовления. Поэтому C_{y0} практически не зависит от рабочего напряжения. При достаточно больших рабочих напряжениях (больших $U_{кр}$) для обеспечения условий электрической прочности необходимо увеличивать толщину изоляции. Это вызывает соответственно увеличение объема и уменьшение C_{y0} .

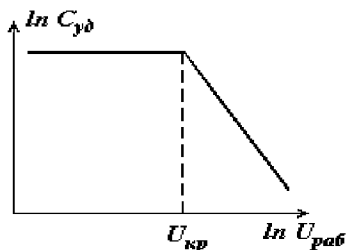


Рис. 2.11. Зависимость логарифма удельной емкости от логарифма рабочего напряжения

В этом случае величина

$$C_{y0} = 0,0885 \frac{\varepsilon \cdot E^2}{U^2}. \quad (2.93)$$

Из уравнения (2.93) следует, что величина C_{y0} обратно пропорциональна квадрату рабочего напряжения при условии $E = const$.

Учитывая это, для получения максимальных значений C_{y0} , необходимо либо использовать минимальные толщины изоляции (что не всегда возможно), либо увеличивать ε , т.е. использовать диэлектрики с большим значением ε .

Для оценки качества конденсатора высокого напряжения обычно используют величину удельной энергии:

$$W_{y0} = \frac{W}{V} = \frac{CU^2}{2V} = \frac{0.0885 \cdot \varepsilon \cdot U^2}{2 \cdot d^2} = 0.0442 \cdot 10^{-10} \cdot \varepsilon \cdot E^2. \quad (2.94)$$

Как следует из данного выражения, увеличение удельной мощности может быть достигнуто за счет увеличения значения ε и электрической прочности $E_{пр}$. Увеличение значения $E_{пр}$ более эффективно, т.к. она входит в выражение W_{y0} во второй степени. Поэтому при высоких рабочих напряжениях для получения высоких значений W_{y0} лучше применять бумажно-масляную и пленочную изоляцию, которые обеспечивают высокое значение $E_{пр}$ при высоких значениях $U_{раб}$. Однако при уменьшении $U_{раб}$ до $U_{кр}$ и ниже мы не можем уменьшать толщину меньше d_{min} , что обуславливает уменьшение E и, соответственно, W_{y0} . Поэтому зависимость $W_{y0} = f(U_{раб})$ будет иметь вид, показанный на рис.2.12.

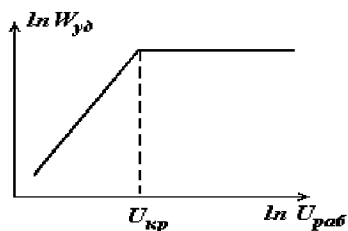


Рис. 2.12. Зависимость логарифма удельной мощности от логарифма рабочего напряжения

Для оценки качества конденсаторов с большой реактивной мощностью, применяемых при технической частоте, а также на средних частотах обычно используют величину удельной реактивной мощности:

$$P_{y\partial} = \frac{P_{реакт}}{V}, [\text{Вар/см}^3]. \quad (2.95)$$

Принимая $\sin \varphi = 1$, можем записать:

$$\begin{aligned} P_{y\partial} &= \frac{U^2 \cdot \omega C}{V} = \frac{2\pi f \cdot C U^2}{V} = \\ &= \frac{2\pi \cdot 0.0885 \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon \cdot f \cdot U^2}{d^2} = 5.55 \cdot 10^{-13} \cdot \varepsilon \cdot f \cdot E^2. \end{aligned} \quad (2.96)$$

Из выражения (2.96) следует, что величина $P_{y\partial}$ зависит от ε, E и частоты f , что видно из рис.2.13.

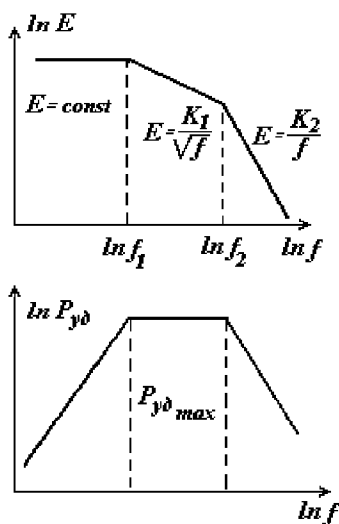


Рис. 2.13. Зависимость логарифма напряженности поля и удельной мощности от логарифма частоты

из (2.97) должна уменьшаться обратно пропорционально $\sqrt{f}$. Поскольку в уравнении (2.96) величина E стоит во второй степени, то значение $P_{y\partial}$ на данном участке будет оставаться постоянным.

При частотах выше f_2 начнет проявляться зависимость $\text{tg} \delta = f(f)$, поэтому можно записать:

$$E = \frac{K'}{f}, \quad \text{а} \quad P_{y\partial} = \frac{K''}{f}.$$

Это обуславливает уменьшение E и, соответственно, и $P_{y\partial}$.

При условии обеспечения постоянства объема величина E на малых частотах определяется только электрической прочностью диэлектрика, поэтому $E = \text{const}$ (т.к. нагрев еще не значителен).

В этом случае согласно (2.96) величина $P_{y\partial}$ будет возрастать пропорционально частоте f .

При частотах больше f_1 становится заметным нагрев конденсатора за счет потерь. Поэтому для обеспечения теплового равновесия необходимо снижать значение E , чтобы температура нагрева Δt не превысила допустимого значения. Можно записать из условия теплового равновесия:

$$E = \frac{U}{d} = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{\alpha_T \cdot S \cdot \Delta t}{2\pi f \cdot C \cdot \text{tg} \delta}} = \frac{K}{\sqrt{f}}. \quad (2.97)$$

Считая приближенно, что на этом участке $\text{tg} \delta$ не зависит от частоты, величина E

Для определения $P_{y\partial \max}$ подставим (2.97) в (2.96).

$$P_{y\partial \max} = 5.55 \cdot 10^{-13} \cdot \varepsilon \cdot f \frac{\alpha_T S_{\text{охл}} \cdot \Delta t \cdot d}{d^2 \cdot 2\pi f \cdot 0.0885 \cdot \varepsilon \cdot S \cdot \text{tg}\delta \cdot 10^{-12}} \\ = \frac{\alpha_T S_{\text{охл}} \cdot \Delta t}{V \cdot \text{tg}\delta} \quad (2.98)$$

Из полученного выражения (2.98) следует, что величина $P_{y\partial \max}$ зависит от активного объема конденсатора V , коэффициента теплоотдачи α_T , поверхности охлаждения - $S_{\text{охл}}$ и температуры перегрева и тем больше, чем меньше $\text{tg}\delta$ (от ε не зависит).

Если принять, что поверхность охлаждения больше поверхности обкладок (для плоского конденсатора), то можно записать:

$$P_{y\partial} = \frac{2\alpha_T \Delta t}{d \cdot \text{tg}\delta} \quad (2.99)$$

Из (2.99) следует, что удельная реактивная мощность будет возрастать с уменьшением d .

Полученные формулы учитывают только активный объем диэлектрика. Для учета наличия закраин и их влияния на удельную емкость необходимо ввести поправочный коэффициент K .

Тогда для плоского конденсатора:

$$C_{y\partial} = \frac{8,85 \cdot \varepsilon}{K \cdot d^2} \quad (2.100)$$

Для многопластинчатого конденсатора

$$K = \left(1 + \frac{2\Delta\ell}{\ell} + \frac{2\Delta b}{b} + \frac{4\Delta\ell \cdot \Delta b}{\ell \cdot b} \right) \left[1 + \frac{(M+1)d_o}{Md} \right], \quad (2.101)$$

где ℓ – активная длина обкладки;

b – ее активная ширина;

$\Delta\ell$ – размер закраины в направлении длины;

Δb – размер закраины в направлении ширины ;

d_0 – толщина обкладки;

d – толщина диэлектрика;

M – количество обкладок.

Для намотанного спирального конденсатора

$$K = \left(1 + \frac{d_o}{d} \right) \left(1 + \frac{2\Delta b}{b} \right). \quad (2.102)$$

Для электролитических конденсаторов $d_0 \gg d$;

$$d_o = d_s + 0,5(d_a + d_k), \quad (2.103)$$

где d_s – толщина прокладки, пропитанной электролитом;

d_a – толщина анодной фольги;

d_k – толщина катодной фольги.

Используя (2.100) и (2.102) и пренебрегая значением d^2 в сравнении с d_0d , запишем:

$$C_{y\partial} = \frac{8,85 \cdot \varepsilon}{d \cdot d_0 \left(1 + \frac{2\Delta b}{b}\right)}. \quad (2.104)$$

Учитывая, что толщина оксидного слоя зависит от формовочного напряжения U_ϕ ($d = aU_\phi$), получим:

$$C_{y\partial} = \frac{8,85 \cdot \varepsilon}{aU_\phi [d_\partial + 0,5(d_a + d_k)] \left(1 + \frac{2\Delta b}{b}\right)}. \quad (2.105)$$

Таким образом, выполнив расчет конденсатора и определив его удельные характеристики, необходимо провести их сравнение с их значениями для известных типов конденсаторов. Это позволит определить, не допущено ли при проектировании какой-либо ошибки и все ли приняты меры для улучшения этих характеристик, свидетельствующих об экономии материалов и снижении его объема и веса.

2.5. Надежность силовых конденсаторов

Под надежностью изделия (конденсатора) понимают его свойство выполнять заданные функции в заданных условиях эксплуатации в течение требуемого промежутка времени, сохраняя свои эксплуатационные показатели в заданных пределах. Силовые конденсаторы относятся к неремонтируемым изделиям, поэтому их надежность определяется только их долговечностью и безотказностью.

Для подавляющего числа конденсаторов различных типов их долговечность определяется ресурсом, т.е. временем τ , в течение которого произойдет полный износ его изоляции. Он зависит от качества и свойств применяемых материалов, конструкции и технологии изготовления конденсаторов и от режима работы. Можно поэтому считать, что:

$$\tau = f(E_{\text{раб}}, T).$$

Аналитический расчет времени τ сложен, поэтому испытания и опыт эксплуатации являются пока основным источником информации о надежности конденсаторов. Наиболее общим показателем надежности конденсаторов является вероятность безотказной работы $P(\tau)$ в течение времени, соответствующего его сроку службы.

Обозначая плотность распределения вероятности отказов через $f_i(\tau)$, можно записать:

$$P_i(\tau) = 1 - \int f_i(\tau) d\tau. \quad (2.106)$$

Для партии из N конденсаторов

$$P(\tau) = 1/N \sum P_i(\tau), \quad (2.107)$$

т. е. вероятность безотказной работы можно приближенно оценить при испытании выборки n -го количества конденсаторов из партии.

Объем выборки можно определить

$$n = \frac{\lg(1 - p^*)}{\lg(1 - q)}, \quad (2.108)$$

где q - допустимая доля выхода конденсаторов к концу срока службы ($q = 0.1$);

p^* - вероятность того, что $q \leq 0.1$ или ($p^* = 0.9$).

Изменение интенсивности отказов во времени в процессе эксплуатации можно изобразить графиком (рис. 2.14).

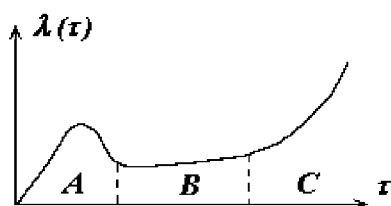


Рис. 2.14

На участке А интенсивность отказов может возрасти за счет отбраковки конденсаторов, дефекты которых не были выявлены при испытаниях (период приработки). На участке В (нормальная эксплуатация) интенсивность отказов незначительна и практически постоянна.

Выход из строя конденсаторов на данном участке происходит в основном за счет старения изоляции в процессе эксплуатации. На участке С интенсивность отказов вновь резко возрастает за счет износных отказов, обусловленных выработкой ресурса при значительном старении изоляции.

Существующие данные по эксплуатации конденсаторов показывают, что основными причинами, вызывающими износные отказы конденсаторов, являются тепловое, электрохимическое и ионизационное старение изоляции.

С учетом воздействия температуры и напряженности электрического поля срок службы конденсаторов можно описать уравнением

$$\tau = \tau_0 e^{-bt} (E_0 / E)^a, \quad (2.109)$$

где τ_0 - срок службы при напряженности поля E_0 ;

a, b - константы.

На надежность реального конденсатора большое влияние оказывает вид схемы внутренних соединений секций. Можно выделить следующие виды соединений:

- а) параллельно последовательное соединение;
- б) параллельно последовательное соединение с индивидуальными предохранителями;
- в) последовательно параллельное соединение;
- г) последовательно параллельное соединение с индивидуальными предохранителями.

В соответствии с особенностями межсекционных соединений и наличием межсекционной и корпусной изоляции меняется толщина изоляции. В зависимости от схемы соединения отдельных секций может возникать паразитная ёмкость, величина которой будет зависеть от толщины изоляции и от характера взаимного соединения наружной и внутренних обкладок соседних секций друг с другом. Можно выделить три случая:

- а) соединение наружных обкладок;
- б) соединение наружной и внутренней обкладок;
- в) соединение внутренних обкладок.

В случае (а), когда у соседних секций соединены наружные обкладки, паразитная ёмкость минимальна. Для случаев (б и в) образуется паразитная ёмкость $C_{пар}$ между наружными обкладками.

$$C_{пар} = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}, \quad (2.110)$$

где d — толщина изоляции, входящая в паразитную ёмкость.

Различают:

$C_{нс}$ — паразитную ёмкость между соседними секциями в группе;

$C_{нгр}$ — паразитную ёмкость между последовательными группами;

$C_{нк}$ — паразитную ёмкость на корпус.

Так как изоляция, входящая в паразитную ёмкость, обладает более худшими диэлектрическими свойствами по сравнению с изоляцией между обкладками, то срок службы конденсаторов будет зависеть от параметров паразитной ёмкости. На рис.2.15 и рис.2.16 представлены данные о выходе из строя силовых конденсаторов в зависимости от схемы соединения секций и обкладок.

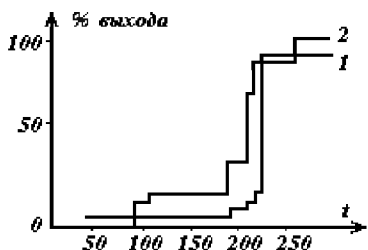


Рис. 2.15. Выход из строя (%) при ускоренных испытаниях на срок службы при $E=40$ кВ/мм и $f=50$ Гц для конденсаторов при соединении внутренних обкладок двух последовательных секций с бумажно - трихлордифениловой изоляцией:
1 - $d_{пар}$ секц. - 40 мкм;
2 - $d_{пар}$ секц. - 80 мкм

Срок службы изоляции таких конденсаторов можно описать эмпирическим уравнением, которое отражает зависимость $\tau - f(E, d)$:

$$\tau = \frac{a \cdot b}{U^n d^{(m-n)}}. \quad (2.111)$$

Здесь a, b, m, n — коэффициенты, зависящие от особенностей конструкции и технологии изготовления.

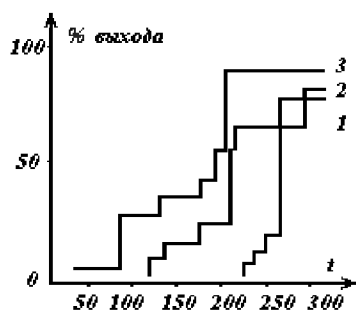


Рис. 2.16. Выход из строя (%) в течение ускоренных испытаний на срок службы при $E = 40$ кВ/мм и $f = 50$ Гц для силовых конденсаторов с бумажно-трихлордифениловой изоляцией с 2-мя последовательными группами секций при различном соединении обкладок:

1 - наружные с наружными;

2 - наружные с внутренними;

3 - внутренние с внутренними

Для конденсаторной бумажно-масляной изоляции установлены:

$$a = 10^{(A_1 - A_2 d)}; \quad n = N_1 - N_2 d;$$

$$b = 10^{\left(B_1 - B_2 \frac{U}{d_{из}}\right)}; \quad m = M_1 - M_2 \frac{U}{d_{из}}.$$

Здесь $A_1 = 19.54$; $B_1 = 21.9$; $N_1 = 11.6$; $A_2 = 0.133$; $B_2 = 0.236$; $N_2 = 0.856$; $M_1 \approx 10$; $M_2 \approx 0.1$.

Значения параметров для различных схем соединения приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7

Схема соединения	$U_{раб}$, [кВ]	m	L	Математическое ожидание - τ , год
а	1.05	1	30	38.5
	3.15	3	10	39.0
	6.3	6	5	40.7
	10.50	10	3	41.1
б	1.05	1	30	435.0
	3.15	3	10	38.6
	6.30	6	5	33.6
	10.5	10	3	24.0
в	1.05	1	30	38.5
	3.15	3	10	4.3
	6.30	6	5	5.9
	10.5	1	3	8.6
г	1.05	1	30	435.0
	3.15	3	10	130.0
	6.30	6	5	58.5
	10.5	10	3	45.5

Здесь m - число последовательных групп или секций;

L - число параллельных групп или секций.

Из данных расчёта следует, что при используемых величинах m и L наиболее надёжна схема (г), т.е. при последовательно – параллельном соединении секции с индивидуальными предохранителями в секции.

Математическое ожидание срока службы определялось по уравнению

$$T_0 = T_i \sum_{i=1}^{i=\ell} \frac{1}{i} = \frac{1}{\lambda} \sum_{z=0}^{z=m-1} \frac{1}{(m-z) \left(\frac{m}{m-z} \right)^n} \sum_{i=1}^{i=\ell} \frac{1}{i}. \quad (2.112)$$

Здесь

$$T_i = \frac{1}{\lambda_c} \sum_{z=0}^{z=m-1} \frac{1}{(m-z) \left(\frac{m}{m-z} \right)^n}. \quad (2.113)$$

Изменение коэффициента теплопроводности от температуры для различных материалов можно описать следующими эмпирическими уравнениями:

- $\lambda = (0.0974 + 0.00018 t)$, Вт/м.град - для трихлордифенила;
- $\lambda = (0.114 - 0.00022 t)$, Вт/м.град - для конденсаторного масла;
- $\lambda = (0.166 + 0.00227 t)$, Вт/м.град - для клетчатки;
- $\lambda = (0.073 + 0.0011 t)$, Вт/м.град - для полипропилена.

Для комбинированной многокомпонентной изоляции происходит перераспределение напряжённостей электрического поля.

$$E_i = \frac{E}{\varepsilon_i \sum_{m=1}^{m=n} \frac{x_m}{\varepsilon_m}}. \quad (2.114)$$

Здесь: x_m – объёмная доля компоненты;

ε_m – диэлектрическая проницаемость компоненты.

Срок жизни рассчитывается

$$\tau = 10 \left[a + b \left(\frac{tg \delta^1}{\lambda} \right) \right]. \quad (2.115)$$

Здесь

a, b – постоянные коэффициенты;

$tg \delta^1 / \lambda$ – теплофизический фактор;

$tg \delta^1$ – фактор мощности.

$tg \delta^1 = \varepsilon tg \delta$, где

$$\varepsilon = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{x_i}{\varepsilon_i}}, \quad tg \delta = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon \cdot tg \delta_i x_i}{\sum_{i=1}^{i=n} \varepsilon_i}, \quad \lambda = \frac{1}{\sum_{i=1}^{i=n} \frac{x_i}{\lambda_i}}.$$

Для оценки срока службы комбинированной изоляции в литературе более известна формула

$$\tau = \frac{A}{E^n}. \quad (2.116)$$

Здесь A – постоянный коэффициент, зависящий от материала;

n — показатель степени, зависящий от стабильности изоляции и её толщины.

Расчёты по этим двум формулам дают схожие результаты.

Глава 3. Основные типы конденсаторов

3.1. Конденсаторы с газообразным и жидким диэлектриком

Конденсаторы с газообразным диэлектриком нашли широкое применение в высокочастотной и измерительной технике, а конденсаторы с жидким диэлектриком — в качестве импульсных накопителей электрической энергии.

Основной особенностью данных типов конденсаторов является восстанавливаемость их электрической прочности после пробоя. После отключения конденсатора от источника электрической энергии происходит погасание искры разряда и практически полное восстановление его электрической прочности. Конденсатор снова готов к нормальной работе.

Это возможно, если при пробое не произошло повреждения обкладок конденсатора, его крепежных изоляционных элементов, а также при условии, что продукты разряда, образующиеся при пробое, не вызвали резкого ухудшения свойств диэлектрика. Как правило, устанавливая в таких конденсаторах поглотители продуктов разложения газа или жидкости, можно добиться практически полного восстановления их свойств после пробоя.

Другой особенностью газообразного и жидкого диэлектриков является невозможность их использования для закрепления обкладок, что обуславливает необходимость применения жестких обкладок, закрепляемых с помощью изоляционных элементов из твердого диэлектрика. Эта же особенность позволяет регулировать емкость путем взаимного перемещения обкладок относительно друг друга, т.е. создавать конденсаторы переменной емкости.

К основным характеристикам газообразного диэлектрика относятся весьма малая проводимость, малый угол диэлектрических потерь ($tg\delta < 10^{-5}$), небольшой $TK\varepsilon$ ($-2 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), независимость ε от частоты и весьма слабая зависимость ее от температуры. Это обуславливает возможность создания образцовых (эталонных) конденсаторов для электроизмерительных приборов, работающих в широком диапазоне частот. Однако следует отметить, что низкое значение ε газов затрудняет создание конденсаторов с большой удельной емкостью.

Жидкий диэлектрик по сравнению с газообразным имеет более высокую электрическую прочность и большее значение ε . Недостатком жидкого диэлектрика являются более высокие значения $tg\delta$ (более 10^{-4}) и $TK\varepsilon$ (порядка $0,003 \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), что ограничивает возможности его использования. Кроме того, жидкие диэлектрики стареют со временем и требуют перед использованием тщательной очистки. В этом отношении более стабильными характеристиками обладают полярные жидкие диэлектрики. Высокие значения $E_{пр}$ и ε ,

слабая зависимость их от загрязнения позволяет использовать такие конденсаторы в импульсных накопителях.

Кроме воздуха и жидких диэлектриков в качестве изоляции часто используется вакуум, который как и воздух обладает малым значением $\varepsilon \approx 1,0$, но характеризуется более высокими значениями $E_{пр}$ при сохранении способности к самовосстановлению электрической прочности после пробоя.

В качестве диэлектриков, закрепляющих пластины конденсатора применяют материалы с высоким удельным сопротивлением, малым $ТК\varepsilon$ и обладающие высокой электрической прочностью (кварц, керамика, слюда, микалекс и др.). В качестве материала обкладок применяют материалы с малым значением коэффициента линейного расширения и высокой механической прочностью (бронза, латунь, дюралюминий).

3.1.1. Воздушные конденсаторы постоянной емкости

Воздушные конденсаторы постоянной емкости применяют как образцовые конденсаторы на напряжение до 10кВ в электроизмерительной технике, в контурах радиопередатчиков, работающих в ВЧ диапазоне.

Малое значение ε и необходимость использовать большие зазоры между пластинами (обкладками) для исключения возможности пробоя обуславливают ограничения предельного значения емкости таких конденсаторов на уровне $1000\text{пФ} \div 0,01\text{мкФ}$.

Образцовые воздушные конденсаторы низкого напряжения рассчитаны на работу при температурах $15 \div 25^\circ\text{C}$ и относительной влажности до 70%.

Изменение ε воздуха от температуры и влажности можно описать уравнением Вольперта [1]

$$\varepsilon - 1 = \frac{P}{T} \left[211 + \frac{\varphi \cdot P_n}{T} \left(\frac{10160}{T} - 29,4 \right) \right] 10^{-6}, \quad (3.1)$$

где φ - относительная влажность воздуха;

T - температура в К;

P - давление в мм рт.ст.;

P_n - упругость насыщенных паров воды в мм рт.ст.

Поскольку для сухого воздуха изменения ε с ростом температуры очень малы, величина $ТК\varepsilon$ воздушных конденсаторов определяется в основном изменением их конструктивных размеров. Для вычисления $ТК\varepsilon$ воздушного конденсатора можно воспользоваться выражением

$$ТК\varepsilon \approx 2\alpha_1 - \alpha_2,$$

где α_1 - коэффициент линейного расширения металла обкладок;

α_2 - коэффициент линейного расширения металла разделительных втулок.

Стабильность емкости воздушного конденсатора во времени и при колебаниях температуры зависит от точности его сборки и деформации деталей

за счет внутренних механических напряжений. Для стабилизации емкости используют предварительный прогрев конденсатора, позволяющий устранить внутренние механические напряжения.

Конденсаторы такого типа изготавливаются в различных модификациях КВЧ, КВМ и КВС емкостью 50÷4000 пФ. В конструктивном исполнении они могут быть многопластинчатыми, цилиндрическими и кольцеобразными. В качестве обкладок чаще всего берут бронзу, которая не окисляется и имеет меньшие внутренние механические напряжения, чем алюминий, медь и латунь. Конденсаторы типа КВЧ коаксиальной конструкции на емкость 25÷200 пФ и резонансной частотой до 3000 МГц были разработаны А.Л.Грохольским.

Расчет конденсатора такого типа обычно начинают с выбора зазора между пластинами, исходя из условия электрической прочности воздуха и величины номинального (рабочего) напряжения. При этом необходимо учитывать зависимость электрической прочности воздуха от давления и расстояния между электродами. При атмосферном давлении в равномерном электрическом поле и расстоянии порядка 1÷10 мм значение $E_{пр} = 2÷3$ кВ/мм. В реальных конденсаторах электрическое поле нельзя считать однородным даже при самой тщательной обработке поверхности и закруглении пластин обкладок, т.е.

$$E_{\text{раб}} = \frac{E_{\text{пр}}}{K}, \tag{3.2}$$

где K - коэффициент запаса прочности, учитывающий неоднородность электрического поля ($K=2÷3$).

Тогда
$$\Delta_{\text{из}} = \frac{U_{\text{раб}}}{E_{\text{раб}}}. \tag{3.3}$$

Полученное значение $\Delta_{\text{из}}$ округляют до большего значения. Определив $\Delta_{\text{из}}$, выбирают тип конструкции и размер пластин.

- 1) Для пластинчатых конденсаторов используют или круглые, или квадратные пластины (табл.3.1).

Таблица 3.1

Диаметр или сторона, мм	Площадь обкладок, см ²	
	квадратные	круглые
45	20,25	15,9
55	30,25	23,8
100	100	78,5
200	400	314,0

Используя формулу многопластинчатого конденсатора, находим число пластин:

$$M = \frac{C \cdot \Delta_{из}}{\varepsilon_o S_a}, \quad (3.4)$$

где S_a - активная площадь одной пластины.

Активную площадь можно определить, если из общей площади вычесть площадь под отверстия для болтов, потери площади за счет округления краев пластины и изготовления вырезов (рис.3.1).

Поправка под болты:

$$\Delta S_1 = \frac{\pi}{4} n d_{болт}^2. \quad (3.5)$$

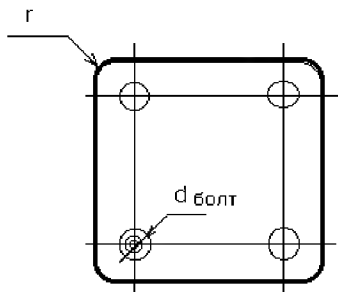


Рис. 3.1

Здесь $d_{болт} = d_б + 2\Delta_p + 4\Delta_{из}$,

где $d_{болт}$ - диаметр отверстия под болт;

$d_б$ - диаметр болта;

Δ_p - толщина разделительной втулки;

$\Delta_{из}$ - толщина изоляции между пластинами.

Поправка на округление углов:

$$\Delta S_2 = 4 \left(r^2 - \frac{\pi r^2}{4} \right) = (4 - \pi) r^2, \quad (3.6)$$

где r - радиус округления углов ($3 \div 10$ мм).

Одновременно с уменьшением за счет отверстий под болты и округление углов активная площадь обкладок несколько увеличивается за счет емкости краев пластины, т.е. за счет поля рассеяния.

Это можно учесть как приращение длины (стороны) обкладок на величину

$$\Delta a = 0,11 \cdot \Delta_{из}, \quad \text{т.е.} \quad a_K = a + 0,11 \cdot \Delta_{из}.$$

Тогда для прямоугольных пластин

$$S_a = (a + 0,11\Delta_{из})^2 - \frac{\pi}{4} n (d_б + 2\Delta_p + 4\Delta_{из})^2 - (4 - \pi) r^2. \quad (3.7)$$

Для круглых пластин

$$S_a = \frac{\pi}{4} (D + 0,441\Delta_{из})^2 - \frac{\pi}{4} n (d_б + 2\Delta_p + 4\Delta_{из})^2. \quad (3.8)$$

Количество пластин (зазоров) должно быть целым. Если оно получается дробным, то его округляют до целого, а для обеспечения заданной емкости в

пластинах делают вырезы, уменьшающие активную площадь обкладок и, соответственно, емкость.

Для уменьшения $ТКЭ$ часто применяют метод термокомпенсации, основанный на применении сборки пластин конденсатора со смещением от центральной оси и креплением пластин разного знака на стойках из металлов с различным коэффициентом линейного расширения. Это позволяет уменьшить $ТКЭ$ до $2 \cdot 10^{-6} \text{град}^{-1}$.

3.1.2. Воздушные конденсаторы переменной емкости

В колебательных контурах необходимо применение конденсаторов с переменной емкостью, что может быть легко реализовано в воздушных конденсаторах взаимным перемещением обкладок относительно друг друга.

Применяя ту или иную форму очертания пластин ротора или статора, можно обеспечить получение требуемого закона изменения емкости с углом поворота ротора. Наиболее широкое распространение получили пластинчатые конденсаторы с полукруглыми пластинами (прямоемкостный конденсатор) - рис.3.2.

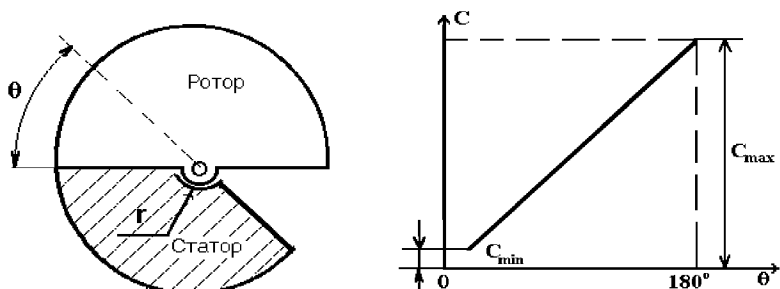


Рис.3.2. Прямоемкостной конденсатор

Зависимость величины радиуса ротора R_θ от угла поворота θ может быть описана уравнением

$$R_\theta = 10,7 \sqrt{k_1 \frac{dC_\theta}{d\theta} + k_2}. \quad (3.9)$$

⇒ Для линейного изменения емкости от угла поворота $C_\theta = (a\theta + b)$

$$R_\theta = 10,7 \sqrt{ak_1 + k_2} = \text{const}, \quad (3.10)$$

т.е. пластина ротора должна иметь форму полукруга.

⇒ В случае прямоугольного (квадратичного) конденсатора, когда длина волны колебательного контура пропорциональна квадратному корню из емкости, т.е. $C_\theta = (a\theta + b)^2$, получим:

$$R_\theta = 10,7 \sqrt{2k_1 a(a\theta + b) + k_2}. \quad (3.11)$$

В этом случае мы имеем равномерную шкалу не в единицах емкости, а в единицах длины волны.

⇒ В случае линейной зависимости частоты f от угла поворота θ :

$$C_{\theta} = \frac{1}{(a\theta + b)^2}, \quad R_{\theta} = 10,7 \sqrt{\frac{2k_1 a}{(a\theta + b)^3} + k_2}, \quad (3.12)$$

$$\text{где } k_1 = \frac{d}{0,0884(N-1)}, \text{ а } k_2 = \frac{r^2}{114,6}.$$

Здесь d – зазор, N – число пластин, r – радиус в узле крепления ротора.

⇒ В ряде случаев желательно иметь такой переменный конденсатор, у которого точность отсчета емкости одинакова по всей шкале, т.е. когда относительное приращение емкости имеет постоянное значение. Конденсатор с таким законом изменения емкости носит название логарифмического.

В этом случае уравнение кривой очертания пластины ротора имеет вид

$$R_{\theta} = 10,7 \sqrt{k_1 a b e^{b\theta} + k_2}, \quad (3.13)$$

$$\text{где } C_{\theta} = a e^{b\theta}.$$

Постоянные коэффициенты a и b , входящие в уравнения кривой $R_{\theta} = f(\theta)$, зависят от значений начальной и максимальной емкости для данных типов конденсаторов.

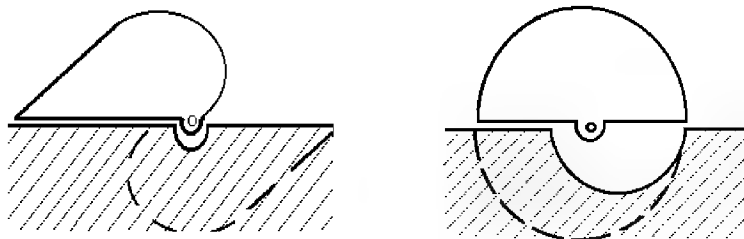


Рис. 3.3. Способы регулирования емкости:

а) с переменным радиусом ротора;

б) с переменным радиусом выреза в статоре

Такие методы изменения емкости можно реализовать либо изменяя форму ротора, либо форму выреза в статоре в соответствии с изменением радиуса, что отражено на рис.3.3,а и рис. 3.3,б.

3.1.3. Полуперемennые (подстроечные) воздушные конденсаторы

В радиопромышленности широкое применение находят полуперемennые (подстроечные) конденсаторы для подгонки резонансных частот связанных контуров. Такие конденсаторы обычно изготавливаются на малую емкость от 0.5 до 100 пФ.

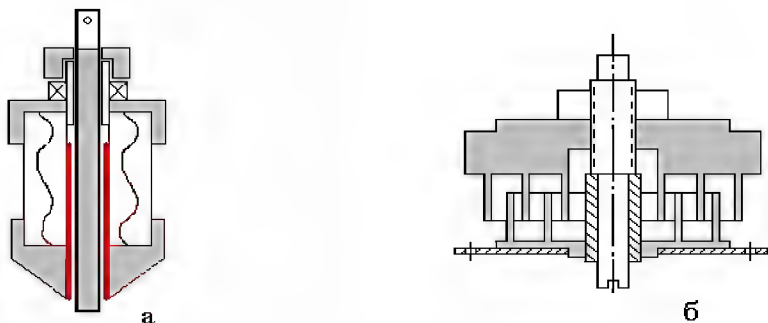


Рис. 3.4. Подстроечные воздушные конденсаторы
а) цилиндрические; б) многопластинчатые

В конструктивном исполнении они изготавливаются или цилиндрическими (рис.3.4,а), или многопластинчатыми (рис.3.4,б) с фиксацией выбранного положения подвижной части типа МПК.

В таких конденсаторах изменение емкости производится путем вдвигания и выдвигания обкладок или металлического стержня относительно неподвижных обкладок или корпуса.

В настоящее время более широкое применение нашли керамические подстроечные конденсаторы, которые более удобны в технологическом и конструктивном исполнении, но обладают более худшими характеристиками, менее стабильны и имеют большое значение $ТК\epsilon$.

3.1.4. Газонаполненные конденсаторы

Вместо воздуха в конденсаторах такого типа может использоваться газ при повышенном давлении. Учитывая, что в однородном электрическом поле электрическая прочность газа возрастает пропорционально давлению (в 2÷3 раза при $P = 15\text{атм.}$), это позволяет повышать рабочее напряжение конденсаторов. В качестве газообразного диэлектрика используют сжатый азот или элегаз. Сжатый воздух не используется, так как вызывает сильное окисление элементов конденсатора. В США, кроме элегаза, используются перфторуглероды (C_7F_4 , ClO_3F), обладающие высокой нагревостойкостью и химической инертностью. На рис.3.5 показана зависимость пробивного напряжения для азота и элегаза от давления на постоянном и переменном напряжении в случае неоднородного электрического поля.

Проектирование газонаполненных конденсаторов начинают с выбора газа, его давления и схемы конструкции. В конструктивном исполнении газонаполненные конденсаторы могут быть многопластинчатыми и цилиндрическими (рис.3.6).

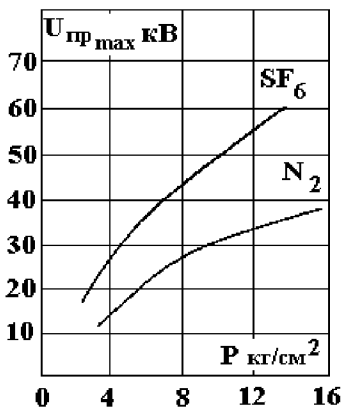


Рис. 3.5а. Зависимость $U_{пр} = f(P)$ в неоднородном поле на постоянном напряжении

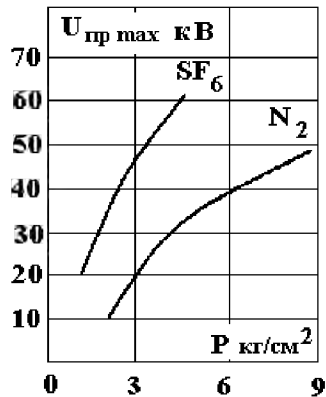


Рис. 3.5б. Зависимость $U_{пр} = f(P)$ в неоднородном поле на переменном напряжении

В качестве корпуса используется стальной бак, способный выдержать большое давление. Для контроля давления в баке делается вентиль, присоединяемый к манометру.

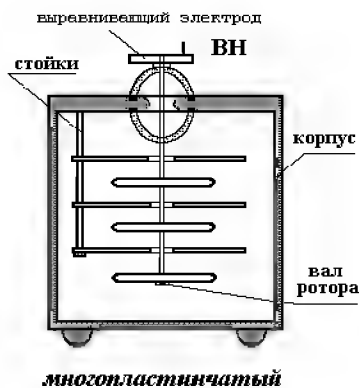
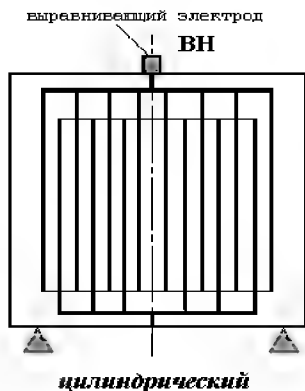


Рис. 3.6. Конструкции газонаполненных конденсаторов

При расчете такого конденсатора зазор между пластинами выбирается из условия воздействия кратковременного испытательного напряжения с учетом возможных перенапряжений:

$$U_{исп} = kU_{пер}. \quad (3.14)$$

$$\Delta_{зaz} = \frac{U_{исп}}{E_{раб}}. \quad (3.15)$$

Для азота при $P \approx 15$ атм $E_{исп} \approx 8-10$ кВ/мм, $E_{раб} \approx 3-5$ кВ/мм.
 Для элегаза при $P \approx 5$ атм $E_{раб} \approx 5$ кВ/мм.

В большинстве случаев газонаполненные конденсаторы применяют в качестве образцовых в технике высоких напряжений и в контурах мощных радиостанций. Обычно такие конденсаторы рассчитаны на напряжения от 10 до 500 кВ, емкостью от 50 до 1500 пФ и реактивной мощностью порядка $1000 \div 1500$ кВар. При изготовлении газонаполненных конденсаторов на меньшую емкость резко уменьшаются их удельные характеристики, что невыгодно.

3.1.5. Вакуумные конденсаторы

Использование вакуума в качестве изоляции основано на резком возрастании электрической прочности газа при малых давлениях.

Современные вакуумные конденсаторы при небольших размерах обладают высокой электрической прочностью и малыми $\lg \delta$ и ε . Это позволяет, не опасаясь перегрева, использовать их при больших частотах при воздействии высокой нагрузки. По удельной мощности при высоких частотах вакуумные конденсаторы значительно превосходят все остальные типы конденсаторов, в том числе и газонаполненные. Это хорошо видно из рис.3.7.

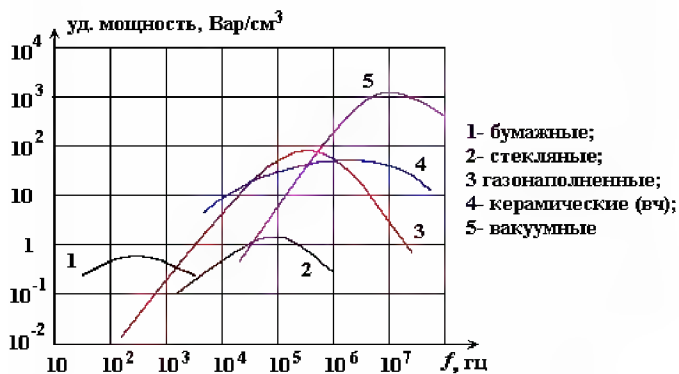


Рис. 3.7 Зависимость удельной мощности от частоты для различных типов конденсаторов

В конструктивном исполнении вакуумные конденсаторы выполняются цилиндрического типа в специальных вакуумных колбах. В качестве электродов (обкладок) в них используют никель, тантал или оксидированный алюминий, которые обладают коэффициентами линейного расширения, близкими к стеклу. Все соединения выполняются клеей или сваркой, а также пайкой припоями с высокой температурой плавления (ПСр72, ПСр50).

Могут изготавливаться как с постоянной, так и с переменной емкостью (с сильфоном) величиной от 50 до 5000 пФ на напряжение от 5 до 35 кВ. Рабочее напряжение конденсатора при высоких частотах определяется допустимым нагревом и его приходится снижать при росте частоты. Перед эксплуатацией конденсаторы проходят тренировку, постепенно увеличивая прикладываемое напряжение до испытательного напряжения. При этом на про-

межуточных стадиях могут возникать отдельные разряды, исчезающие со временем.

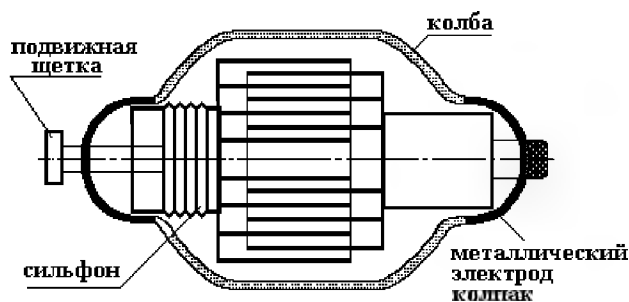


Рис.3.8. Конструкция цилиндрического вакуумного конденсатора

Расчет вакуумных конденсаторов ведется с учетом глубины вакуума (остаточного давления), рабочего напряжения и номинальной емкости.

Величина зазора между пластинами выбирается в этом случае из условия электрической прочности, которая зависит от качества обработки электродов, их материала и конструктивных особенностей. Более высокую электрическую прочность обеспечивают никелевые электроды. Обычно $E_{пр}$ выбирается в пределах $15 \div 20$ кВ/мм при толщине зазора от 1 до 3 мм и остаточном давлении порядка 10^{-6} мм.рт.ст.

Длина электродов и их диаметр определяются размерами колбы с учетом зазора между торцами электродов и основанием

$$\ell_{ст} = \ell_{э} + \Delta \ell. \quad (3.16)$$

Для получения точного значения $C_{ном}$ применяются подгоночные электроды, которые могут иметь меньшую длину.

Для вакуумных конденсаторов, которые, как правило, используются как высокочастотные, большое значение приобретает расчет потерь для проверки тепловой устойчивости. Обычно температура перегрева для них принимается равной $50 \div 60$ °С.

3.1.6. Конденсаторы с жидким диэлектриком

Необходимо различать конденсаторы, заполненные жидким диэлектриком, и конденсаторы, залитые жидким отвердевшим диэлектриком. Основной областью применения этой группы конденсаторов являются контуры высокочастотных электротермических установок. Поскольку жидкий диэлектрик, как правило, имеет значение ε более чем в 2 раза выше, чем у газообразных, то это позволяет увеличить емкость таких конденсаторов, по крайней мере, также в 2 раза. Однако при проектировании конденсаторов с жидким диэлектриком нужно учитывать зависимость электрической прочности $E_{пр}$ от площади электродов и времени старения масел. Поэтому значение $E_{раб}$ таких конденсаторов при одинаковых габаритных размерах может оказаться даже

ниже, чем в газах. Это часто сводит на нет их преимущество в большей величине ε и приводит к снижению их удельной реактивной мощности.

Из этой группы наиболее известны конденсаторы с жидким диэлектриком – лектронолом (дибутилсебагинатом, т.е. двойного эфира себаиновой кислоты $\text{COOH}-(\text{CH}_2)_8-\text{COOH}$ и бутилового спирта $\text{C}_4\text{H}_9\text{OH}$). Обладая слабой зависимостью $\text{tg}\delta$ от частоты, лектроноловые конденсаторы могут конкурировать с керамическими конденсаторами.

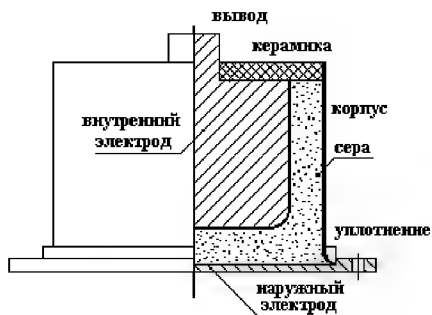


Рис. 3.9

Конденсаторы, залитые жидким отвердевающим диэлектриком, по своим электрическим свойствам подобны конденсаторам с твердым диэлектриком. Однако в конструктивном исполнении они ближе к конденсаторам с жидким диэлектриком.

К таким конденсаторам относятся «серные, полистирольные и капроновые конденсаторы. Это конденсаторы небольшой емкости $50 \div 150$ пФ с высокой удельной реактивной мощностью до 50 квар, рассчитанные на напряжение до 10 кВ в диапазоне частот $1 \div 10$ МГц. Конструкция серного конденсатора представлена на рис.3.9.

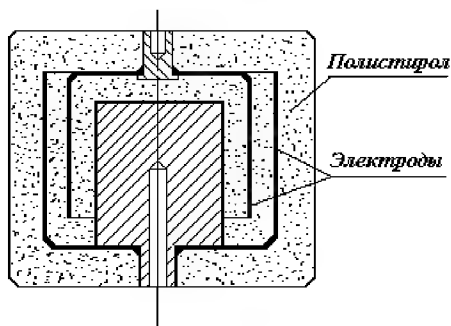


Рис. 3.10

Другим примером являются полистирольные конденсаторы (рис.3.10), залитые расплавленным полистиролом. Такие конденсаторы изготавливаются емкостью $10 \div 50$ пФ на напряжение до 35 кВ.

3.2. Конденсаторы с твёрдым неорганическим диэлектриком

В настоящее время конденсаторы с твёрдым неорганическим диэлектриком находят широкое применение в радиоэлектронной промышленности. Большая нагревостойкость и твёрдость неорганических диэлектриков обеспечивает неизменность расстояния между обкладками и, тем самым, стабильность ёмкости и малое значение TKC . К достоинствам неорганических диэлектриков относятся также их химическая стабильность, высокое значение

ние ε , незначительность старения во времени. Это обуславливает их использование в конденсаторах для высокочастотной аппаратуры. Основным недостатком указанных материалов является трудность получения малых толщин, что обуславливает низкие значения E_{np} и затрудняет создание конденсаторов с повышенной емкостью.

Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком классифицируют по типу материала, области применения, конструктивным особенностям и уровню рабочего напряжения. В зависимости от вида неорганического диэлектрика и условий работы различают:

1. Слюдяные конденсаторы

- а) слюдяные конденсаторы для радиоаппаратуры малой мощности;
- б) слюдяные конденсаторы для радиоаппаратуры большой мощности;
- в) образцовые слюдяные конденсаторы;
- г) бентонитовые конденсаторы.

2. Керамические конденсаторы

- а) керамические конденсаторы низкого напряжения и малой мощности;
- б) керамические высокочастотные конденсаторы высокого напряжения;
- в) керамические подстроечные конденсаторы.

3. Стекланные конденсаторы

- а) стеклоэмалевые конденсаторы;
- б) стеклокерамические конденсаторы.

В конструктивном исполнении они могут быть

- а) пластинчатые;
- б) трубчатые;
- в) горшковые;
- г) дисковые.

3.2.1. Слюдяные конденсаторы

Слюдяные конденсаторы изготавливают на основе слюды, которая представляет собой природный минерал, способный расщепляться на тонкие пластинки с достаточно высокой механической и электрической прочностью, а также относительно высокой ε . По своему составу слюда относится к группе алюмосиликатов, т.е. содержит Al_2O_3 и SiO_2 . Различают слюду мусковит, содержащую K_2O -11.8%, Al_2O_3 -38.5%, SiO_2 -42.5% и H_2O -4.6%, а также флогопит - железомagneзиальную слюду.

В конденсаторостроении в основном используется слюда мусковит, обладающая более высокими электрическими свойствами. Из слюды-сырца после очистки и обрезки вырубают прямоугольные пластинки - шаблонки размерами от 4×9 до 50×60 мм, соответствующими № 5÷7. Толщина пластинок слюды составляет $0.02 \div 0.06$ мм. Более толстые пластинки с толщиной $100 \div 300$ мкм применяют для изоляции конденсаторных секций от корпуса или изоляции между секциями.

В однородном электрическом поле электрическая прочность слюды может достигать высоких значений до 700 кВ/мм. Однако, ввиду наличия в слюде различных дефектов (вкрапления кварца, царапины, трещины, проколы), электрическая прочность слюды значительно уменьшается и принимается 100÷150 кВ/мм. Величина $tg\delta$ для чистой слюды составляет $(1\div1.5)\times10^{-4}$, однако, в реальных пластинках из-за наличия воздушных включений, а также пятнистости слюды значение $tg\delta$ возрастает. Это же приводит к уменьшению удельного объёмного сопротивления. Поэтому слюда обычно маркируется на группы в зависимости от качества и области применения на низкочастотную, высокочастотную и СВЧ. Наряду с природной слюдой для изготовления конденсаторов применяется также синтетическая слюда (фторфлогопит - $KMg_3(SiAlO_{10})F_2$).

3.2.1.1. Слюдяные конденсаторы малой мощности

Слюдяные конденсаторы с небольшой реактивной мощностью до 0.1÷0.15 кВар нашли широкое применение в радиоприёмной и телевизионной аппаратуре. Это обусловлено малым значением $tg\delta$, высокой стабильностью ёмкости и относительно небольшими габаритами при значениях $C_{пол}$ 0.01÷0.1 мкФ.

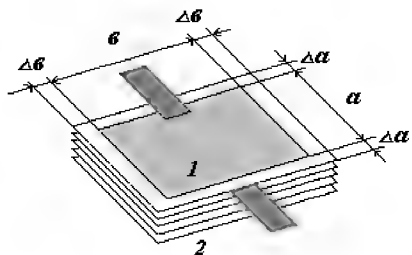


Рис. 3.11. Сечение пластин слюды (2) с напыленными обкладками (1)

12 и КСО-13. В конструктивном исполнении конденсаторы типа КСО показаны на рис. 3.11.

Перед изготовлением конденсаторов слюдяные пластинки предварительно калибруются по толщине и поступают на автомат для серебрения методом вжигания или напыления в вакууме (рис.3.12).

После напыления электродов пластинки слюды поступают на автомат сборки секции, где используется принцип присоса для захвата пластинок слюды и прокладочной фольги. После сборки секции поступают на операцию вакуумной сушки и пропитки церезином, которая проводится в вакуумном баке при $T=110\div120^{\circ}C$ и остаточном давлении 5 мм.рт.ст.

После операции сушки, пропитки и удаления избытка церезина производится опрессовка секции.

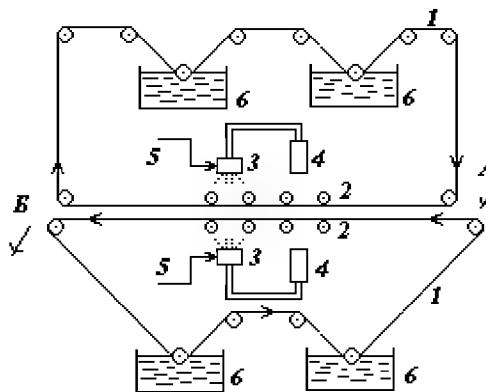


Рис. 3.12
Схема автомата
для серебрения слюды
методом окисления:
1. Конвейерная лента.
2. Нажимные ролики.
3. Пульверизаторы.
4. Резервуары с пастой.
5. Сжатый воздух.
6. Ванны для очистки
конвейерных лент.
А-Укладка слюды.
Б-Сброс пластин

Для опрессовки конденсаторов применяется термореактивная пластмасса в виде пресспорошка "фенопласт" марки К-2Н-34 (связующее - фенолоанилино-формальдегидная смола, наполнитель - полевой шпат). Прессование производится под прессом в специальных гнёздах при давлении 300 кг/см^2 и температуре $175 \div 185^\circ\text{C}$. Предварительно таблетки пресспорошка подогреваются до $T = 90 \div 100^\circ\text{C}$.

Амплитудное напряжение таких конденсаторов выбирается из условия, чтобы исключить возможность заметного нагрева конденсатора потерями:

$$U_{\approx} = 565 \cdot 10^3 \sqrt{\frac{P_R}{f \cdot C}}, \quad (3.17)$$

где P_R – реактивная мощность, Вар;

f – частота, Гц;

C – номинальная ёмкость, пФ.

Допустимые значения тока находят с учётом потерь в металле:

$$P_M = I^2 \cdot r_M. \quad (3.18)$$

$$I = \sqrt{\frac{P_M}{k_1 \cdot \sqrt{f}}} = \frac{k}{\sqrt[4]{f}}, \quad (3.19)$$

где $k=2,4,6$ соответственно для КСО 1,2,5; КСО 6,7,8 и КСО 10,12,13

В этом случае

$$U_{\approx} \leq 2.25 \cdot 10^5 \cdot \frac{I}{f \cdot C_{ном}}. \quad (3.20)$$

При работе конденсаторов в цепи пульсирующего напряжения должно соблюдаться правило

$$U_{и} + U_{\approx} \leq U_{ном}. \quad (3.21)$$

Далее конденсаторы проходят температурную тренировку при трехкратном нагреве до $T=120^\circ\text{C}$ в течение часа и снова пропитываются церезином для заполнения возможных трещин в пластмассе и придания ей влагоотталкивающих свойств. После этого конденсаторы проходят проверку на пробой,

величину сопротивления $R_{из}$ и разбраковку по емкости. Проверка $ТКЭ$ и $tg\delta$ производится выборочно.

Верхний предел рабочей температуры конденсаторов КСО определяет пластмасса и составляет $70^{\circ}\text{C} \div 125^{\circ}\text{C}$ (70° -церезин, 125° -пластмассой). Более высокая температура конденсаторов этого типа может быть получена при опрессовке более теплостойким компаундом. Однако при этом следует учитывать температурную зависимость $ТКЭ$.

Для длительной работы при высокой влажности созданы герметизированные слюдяные конденсаторы типов КСГ, КСМ. Конденсаторы КСГ изготавливаются в паянных металлических корпусах с впаянными в крышку стеклянными изоляторами. Конденсаторы СГМ с меньшим пределом емкости изготавливаются в керамических трубках овального сечения с торцами, закрытыми металлическими колпачками, припаянными к керамике. Секции конденсаторов КСГ и СГМ также пропитываются церезином.

Герметизированные конденсаторы изготавливаются только из серебряной слюды по классам точности 0,1,11,111. $U_{исп}=2U_{ном}$ и составляет $500 \div 1000\text{В}$. Эти виды герметизированных конденсаторов показали большую стабильность в работе и находят применение не только в ответственной радиоаппаратуре, но и в измерительной аппаратуре дальней связи.

3.2.1.2. Слюдяные конденсаторы для аппаратуры большой мощности

Ранее такие конденсаторы являлись основным типом конденсаторов для работы как в радиопередаточных устройствах, так и электротермических высокочастотных установках с ламповыми генераторами. В настоящее время из колебательных контуров радиостанций слюдяные конденсаторы вытесняются газонаполненными, а из электротермических установок керамическими конденсаторами.

В мощном колебательном контуре конденсатор работает в тяжелых условиях, так как подвергается воздействию высокого напряжения высокой частоты. Чтобы в этих условиях потери в конденсаторе и вызываемый ими нагрев не достигали опасных значений, необходимо добиваться малых значений $tg\delta$ и исключения возможности развития ионизации, а также обеспечивать сильное его сжатие, чтобы устранить добавочные потери на вибрацию обкладок.

Для устранения мерцания и получения достаточной стабильности емкости, необходимой для стабилизации частоты контура, также нужно сильно сжимать конденсаторные секции с фольговыми обкладками.

В этом случае конденсатор должен проверяться на отсутствие ионизации при $U_{исп}$ и нагрев под нагрузкой. Отечественной промышленностью выпускается контурный конденсатор марки КВ, показанный на рис.3.13.

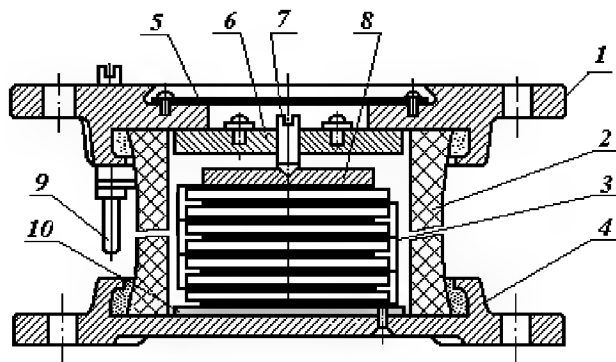


Рис.3.13. Контурный конденсатор КВ:

- 1-верхняя крышка;
- 2-керамический корпус;
- 3-пакет секций;
- 4-нижний фланец;
- 5-щиток с маркировкой;
- 6-стальная прижимная планка;
- 7-нажимной винт;
- 8-стальная подушка;
- 9-защитный разрядник;
- 10-нижняя подушка

В этом случае пакет секций 3 помещается между пластинами 8,10 и зажимается винтом 7. Конденсатор имеет керамический корпус 2 с двумя массивными литыми крышками 1,4 из силунита. После сборки конденсатор пропитывают битумом через отверстие крышки. Промышленностью выпускаются конденсаторы с $C_{ном} = 470 \div 300000$ пф, $U_{ном} = 3 \div 60$ кВ и $P_{ном} = 8 \div 80$ кВт. Удельные характеристики таких конденсаторов могут быть улучшены при заливке не битумом, а маслом, что соответственно позволяет повысить $U_{раб}$.

3.2.1.3. Слюдяные образцовые конденсаторы и магазины емкостей

По своим параметрам слюдяные образцовые конденсаторы не уступают воздушным и расширяют диапазон емкости от 4000 до 0,4мкФ. Секции таких конденсаторов собирают из серебряной слюды. Поверх слоя серебра накладываются фольговые обкладки, края которых перекрывают края серебряного слоя и исключают влияние неровностей его краев, могущие вызвать изменение емкости от напряжения. Собранные секции дополнительно сжимаются в специальных обжимках, что повышает стабильность емкости. После этого секции пропитываются церезином и помещаются в герметизированный корпус.

Конденсаторы данного типа изготавливаются отдельными комплектами от 0,01 до 0,4 мкФ и рассчитаны на применение при температурах от +10 до +30⁰С и влажности до 80%. Из таких конденсаторов собирается магазин емкостей, позволяющий изменять емкость ступенями по 0,001мкФ в пределах от 0,001 до 1 мкФ. В качестве секций магазина емкостей могут применяться герметизированные конденсаторы типа КСТ, а для подгонки емкости конденсаторы типа КСО. Важным элементом конструкции слюдяных магазинов емкостей является переключающее устройство, в качестве которого применяется рычажная декадная система со скользящим щеточным контактом. Более совершенной считается контроллерная система переключения, что позволяет автоматизировать процесс настройки.

3.2.1.4. Бентонитовые конденсаторы

В таких конденсаторах в качестве диэлектрика применяется бентонитовая глина, основной составной частью которой является минерал монтмориллонит $Al_2O_3 \cdot 5SiO_2 \cdot (Mg, Ca)O \cdot nH_2O$. Он отличается от обычного каолина увеличенным содержанием SiO_2 и наличием окиси магния и кальция. Основной кристаллической структуры бентонита, как и слюды, являются кремнекислородные тетраэдры, расположенные в одной плоскости. В отличие от слюды толщина элементарного слоя тетраэдров в бентоните снижена до $7,2 \text{ \AA}$. При увлажнении бентонит набухает, а при размешивании в воде образует суспензию, при отливе которой на подложку образуется бентонитовая пленка толщиной $10 \div 200 \text{ мкм}$. После просушки при температуре $100 \div 110^\circ \text{C}$ она легко снимается с подложки. Ее прочность может быть увеличена за счет обработки раствором уксуснокислого свинца или другими электролитами. В этом случае за счет ионно-обменных реакций происходит замена гидроксильных групп пленки на гидроокиси. В США бентонитовые пленки получили название «диаплекс» или «амплифилм». Они имеют $\varepsilon = 4,8 \div 4,9$ и $\tan \delta = 25 \cdot 10^{-4}$. Это позволяет создавать конденсаторы на напряжение $3 \div 15 \text{ кВ}$ и $C_{\text{ном}}$ от $1500 \div 2200 \text{ пФ}$ до $0,03 \div 0,05 \text{ мкФ}$. Отличительной особенностью бентонитовых конденсаторов является повышенная удельная емкость. Недостатком бентонитовых пленок является хрупкость и сложность изготовления, что ограничивает область их применения.

3.2.2. Стекланные конденсаторы

Как известно, стекло являлось первым диэлектриком, который использовался при изготовлении конденсаторов (лейденская банка). Однако по мере появления керамических, слюдяных и бумажных конденсаторов, стекланные конденсаторы были вытеснены из производства. Тем не менее, стекло продолжает привлекать внимание работников конденсаторостроения.

С точки зрения конденсаторостроения, основными преимуществами стекла является его дешевизна и возможность получения высокой электрической прочности при небольших толщинах по сравнению, например, с керамикой. К недостаткам обычного стекла относятся относительно большие потери, резко возрастающие с температурой; большая хрупкость и невысокое значение удельного сопротивления. Вследствие этого на постоянном токе происходит образование дендритов у катода за счет легко подвижных ионов щелочных металлов. Кроме того стекла обладают низкой короностойкостью. Большую опасность при развитии ионизации играют мелкие газовые поры, которые практически невозможно устранить.

Следует отметить, что в настоящее время появилась возможность изготовления тонких гибких стекланных пленок толщиной $\sim 20 \text{ мкм}$. Это позволяет изготавливать стекланные конденсаторы путем набора секций с очень ма-

лым ТКЕ и высокой стабильностью. Поэтому стекло все еще остается перспективным материалом.

3.2.3. Стеклоэмалевые и стеклокерамические конденсаторы

Измельчая стекло в порошок с последующим спеканием его при высоких температурах, можно получить эмалевые покрытия. На этом принципе изготавливаются стеклоэмалевые конденсаторы. При небольших значениях емкости (500нФ), конденсаторы этого типа приближаются по качеству к слюдяным конденсаторам малой мощности типа КСО и даже могут конкурировать с ними в условиях автоматизированного производства при снижении их стоимости.

Увеличение ε стекла путем введения в состав мелкоизмельченной керамики, типа тиконд, привело к созданию стеклокерамических конденсаторов. В США для производства стеклоэмалевых конденсаторов применяется мокрый способ, который сводится к следующему. На стальные листы, покрытые слоем этилцеллолозного лака (для устранения прилипания стеклоэмали), наносится с помощью пульверизатора слой стеклоэмали, растворенной в воде. Толщина слоя регулируется подачей стеклоэмали в пульверизатор.

После покрытия эмалью стальной лист по конвейеру идет в сушильную печь, где под воздействием лучей инфракрасных ламп слой эмали высыхает до консистенции сыра. После этого на слой эмали наносится слой серебряной пасты методом печатания. Далее стальной лист возвращается под пульверизатор для вторичного покрытия стеклоэмалью, снова идет в сушилку и т.д., до получения нужного числа слоев диэлектрика и обкладок. Далее заготовка разрезается на части, которые подвергаются процессу спекания при температуре 600÷ 800°С. При спекании образуется монолитная остеклованная структура. После зачистки торцов и обнажения обкладок к ним припаивают выводы. Обычно размеры заготовок составляют 150×225мм при толщине 3мм, а размеры секций 7.5×7.5, 12.5×12.5 мм. Емкость соответственно равна 50 и 350пФ.

Такие конденсаторы имеют $TK\varepsilon = +105 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, стабильность емкости во времени высока, изменение ее не превышает 0.02%, рабочее напряжение до 500В. В СССР для производства стеклоэмалевых конденсаторов разработана методика сухого способа. По этому способу стеклоэмалевая масса в виде порошка засыпается в бункер автоматического пресса, из которого она подается в засыпную лапу, совершающую возвратно-поступательное движение. Из засыпной лапы стеклоэмаль засыпается через вырезы в матрицу, которая подводится затем под пресс. После прессования матрица подводится к пульверизационному устройству, которое наносит поверх слоя стеклоэмали, слой серебряной пасты через окно в трафаретной ленте.

После этого матрица возвращается в исходное положение, снова принимает слой порошка стеклоэмали и вновь подается под пуансон, который

спрессовывает второй слой эмали и т.д. Эти операции повторяются нужное число раз до получения требуемого числа слоев диэлектрика и обкладок. Таблетки, полученные на автомате, затем поступают в конвейерную печь с определенным распределением температуры по длине печи. В первой зоне происходит выгорание органических веществ, во второй зоне при максимальной температуре происходит спекание стеклоэмали, а в третьей зоне таблетки охлаждаются. Спеченные таблетки собираются в кассеты и поступают на операцию зачистки торцов на пескоструйном аппарате.

После зачистки торцы таблеток серебрятся на механизированном устройстве с последующим отжигом пасты в конвейерной печи. Далее на контрольных автоматах производится проверка емкости таблеток и их испытание на пробой. Отечественные стеклоэмалевые конденсаторы, типа КС рассчитаны на работу при температурах от -60 до 100°C , относительной влажности до 98% и давлении воздуха до 40 мм.рт.ст.

Конденсаторы изготавливаются с величиной емкости до 500 нФ, точно-стью емкости по 0, I, II, III классам, $TK\varepsilon -65 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ и $tg\delta -15 \cdot 10^{-4}$ при частоте 1 МГц и 20°C . Для увеличения емкости стеклоэмалевых конденсаторов в состав стеклоэмали добавляют мелко измельченный порошок керамики с высоким значением ε . Это позволяет увеличить емкость до 6800 нФ при рабочем напряжении 500 В постоянного тока.

3.2.4. Керамические конденсаторы

Керамические материалы, применяемые для изготовления керамических конденсаторов, подразделяются на высокочастотные с малым углом потерь и на низкочастотные с большим углом потерь.

Высокочастотные материалы подразделяются на

1. Материалы с небольшой величиной ε и положительным $TK\varepsilon$ (установочная керамика типа ультрафарфор и радиостеатит), применяемые для производства конденсаторов малой емкости.
2. Материалы с высокой ε и большим отрицательным $TK\varepsilon$ (конденсаторная керамика на основе двуокиси титана), применяемые для изготовления конденсаторов различной емкости, как заменителей слюды.
3. Материалы со средней величиной ε и малым положительным или отрицательным значением $TK\varepsilon$ (термокомпенсированная или термостабильная керамика), применяемая для изготовления конденсаторов с повышенной температурной стабильностью емкости.

Низкочастотные материалы с большим значением $tg\delta$ подразделяются на

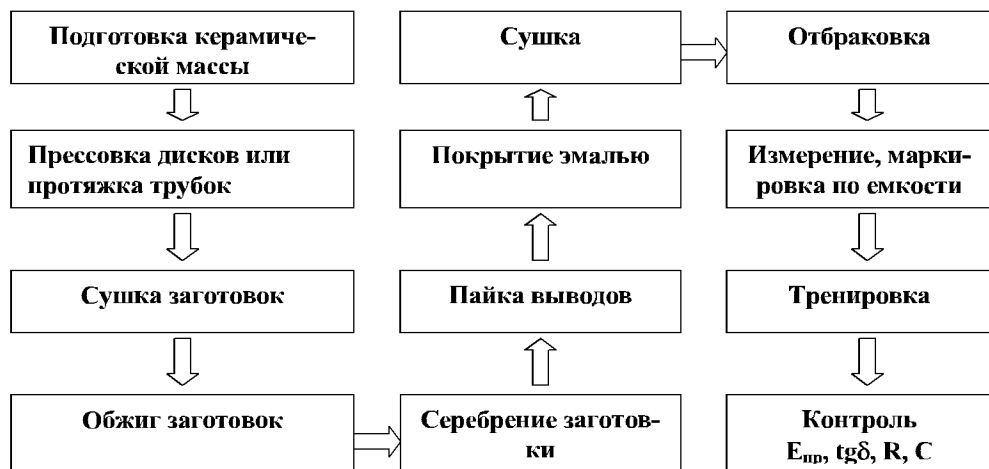
1. Материалы со сверхвысоким значением ε , нелинейно зависящим от температуры и напряжения (сегнетокерамика), применяемые для изготовления специальных видов нелинейных конденсаторов, емкость которых зави-

сит от напряжения (вариконды), а также конденсаторов повышенной емкости, для которых стабильность емкости не играет большой роли.

2. Материалы с очень высоким значением ε , зависящим от температуры, но не зависящим от напряжения, применяемые для изготовления конденсаторов повышенной емкости, работающих в цепях постоянного тока или низкой частоты.

Наибольший интерес представляет рассмотрение конденсаторной керамики на основе двуокиси титана, свойства которой зависят от соотношения составляющих компонентов. Изменяя их тип и соотношение, можно получить термокомпенсированные массы с величиной $TK\varepsilon$ не выше, чем у лучших слюдяных конденсаторов. Они также имеют малый $tg\delta$ и не уступают слюдяным конденсаторам по стабильности емкости. Однако при изготовлении конденсаторов емкостью выше $200 \div 300$ пФ из-за малого значения ε их преимущества теряются. Керамические массы с более высоким значением ε уступают слюдяным конденсаторам в стабильности емкости и по величине $tg\delta$.

Для получения керамической массы нужного состава производится измельчение и смешивание входящих в нее компонентов на шаровой мельнице (обычно мокрый помол). Измельченная масса – шликер обезвоживается на фильтрпрессе и в виде коржей подается на операцию провялки, где их влажность уменьшается до $5 \div 10\%$. Из коржей методом прессования изготавливаются диски различных размеров или путем протяжки трубки разного диаметра. Отформованные и просушенные керамические заготовки поступают на обжиг, в процессе которого формируется кристаллическая структура и происходит образование необходимых химических соединений. Обожженные керамические заготовки (трубки и диски) подвергаются далее серебрению методом вжигания или напыления в вакууме для образования обкладок, к которым припаиваются выводы. После этого конденсаторы покрываются защитным слоем эмали, проходят операции сушки, тренировки и контроля согласно представленной технологической схеме.



3.2.4.1. *Керамические конденсаторы низкого напряжения малой мощности*

1. *Высокочастотные конденсаторы постоянной емкости*

К этой группе относятся конденсаторы типа КТК (трубчатые) и КДК (дисковые), применяемые в качестве контурных, разделительных и сеточных в радиоэлектронной и электротехнической промышленности. По величине ТКС они делятся на группы Д, М, Р и С [Д – ТКС = $-(700 \pm 100)$, М – ТКС = $-(50 \pm 20)$, Р – ТКС = $+(30 \pm 20)$ и С – ТКС = $+(110 \pm 30)$], а по классу точности 0, I, II и III, но не точнее $\pm 0,4$ пФ. Данные конденсаторы рассчитаны на напряжение 500В постоянного тока и 250В на высокой частоте и рабочую температуру от -60 до 80°C .

С появлением керамической массы Т-150 с повышенной величиной ϵ были разработаны конденсаторы типа КЭТ и КЭД по классу точности I, II на напряжение 150÷250В. Для особо ответственных случаев при работе в условиях повышенной влажности разработаны герметизированные конденсаторы типа КГК. Конструктивное оформление данных конденсаторов показано на рис.3.14.

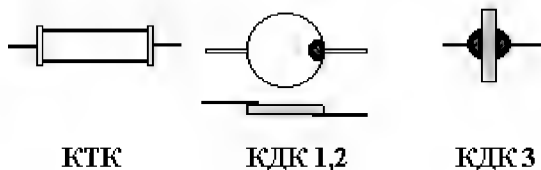


Рис.3.14. Высокочастотные керамические конденсаторы

2. *Подстроечные керамические конденсаторы*

Подстроечные керамические конденсаторы типа КПК (полупеременные) предназначены для применения в радиоэлектронной промышленности для подгонки емкости в радиочастотных контурах (рис.3.15). Они состоят из статора (основания), изготовляемого из установочной керамики с малой величиной ϵ .

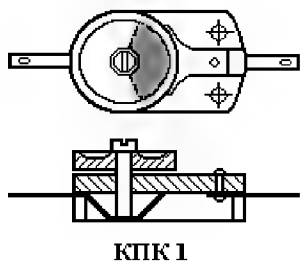


Рис. 3.15

На статоре укреплен поворачивающийся на оси диск (ротор) из титановой керамики с высокой ϵ . Соприкасающиеся поверхности шлифуются и на статорную поверхность наносится слой серебра (обкладка) в виде сектора с углом меньше 90° методом вжигания.

Вторая обкладка также в виде сектора наносится на наружную поверхность ротора.

При этом обкладка статора отделена от обкладки ротора слоем конденсаторной керамики и небольшим воздушным зазором, за

счет которого несколько снижается ТКЭ .

По величине подстроечной емкости различают КПК1 ($C=2\div 30\text{пФ}$), КПК2 ($C=6\div 150\text{пФ}$), КПК3 ($C=6\div 150\text{пФ}$) и КПК5 ($C=25\div 175\text{пФ}$). Данные конденсаторы рассчитаны на напряжение от 15 до 500В и работу при температурах от -60 до $+80^\circ\text{C}$.

3. Низкочастотные керамические конденсаторы

К этой группе относятся сегнетокерамические конденсаторы типа КДС, КПК, КДО, КПС, КПТС и др. (рис.3.16), изготавливаемые на основе сегнетокерамической массы, обладающей высоким значением ε . Значение емкости таких конденсаторов может достигать величины порядка $1000\div 40000\text{пФ}$. Однако эти конденсаторы имеют большие потери. Так при $f = 1\text{кГц}$ значение $\text{tg}\delta$ составляет 0,04, тогда как для бумаги $\text{tg}\delta = 0,01$.

Одной из разновидностей сегнетокерамических конденсаторов (на основе керамической массы ВК) являются вариконды, обладающие нелинейной зависимостью емкости от напряжения (рис.3.17).

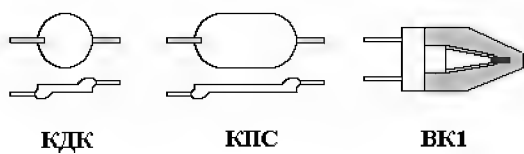


Рис.3.16. Типы сегнетокерамических конденсаторов

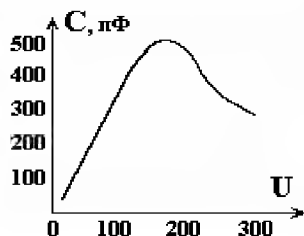
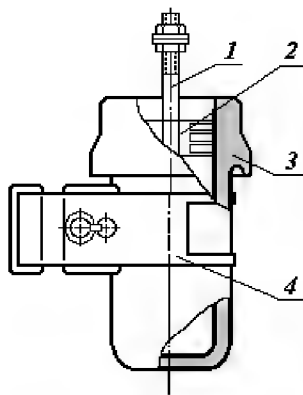


Рис.3.17. Зависимость $C=f(U)$ для варикондов ВК1

4. Керамические высокочастотные конденсаторы высокого напряжения

Возможность выравнивания электрического поля у края обкладок керамических конденсаторов путем создания специальных выступов (юбок) позволяет поднять напряжение развития короны до значения разрядного напряжения и, тем самым, повысить их рабочее напряжение до $10\div 30\text{кВ}$.

В настоящее время наиболее широкое распространение нашли три конструктивные формы таких конденсаторов: горшковая (КВКТ), трубчатая (КВКТ) и боченочная (КВКБ). На рис.3.18 представлен высоковольтный керамический конденсатор горшкового типа КВКТ1 с реактивной мощностью 12 квар.



KBKГ1-12

Рис.3.18. Керамический горшковый конденсатор типа KBKГ1-12:
1 – центральный стержень токоподвода;
2 – контактная пластина из бронзы;
3 – керамический корпус;
4 – крепежный хомут

Такие конденсаторы изготавливаются на основе керамических масс из ультрафарфора или тиконда Т-80. На наружную и внутреннюю поверхности керамического корпуса наносятся обкладки из алюминия или серебра методом вжигания. На наружную поверхность дополнительно наносится эмалевое покрытие для придания влагозащитных свойств.

Более высокий уровень испытательных напряжений обеспечивает горшковая конструкция, а наилучшие условия теплоотвода бочоночная форма, которая позволяет получать наименьший объем на единицу емкости.

При расчете керамических конденсаторов высокого напряжения, предназначенных для работы в области высоких частот, М.П.Богородицким и И.Д.Фридбергом предложено определять толщину диэлектрика из условия тепловой устойчивости:

$$d = 1.11 \cdot 10^{-12} \cdot KU^2 f \cdot \varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta, \quad (3.22)$$

где K - коэффициент, зависящий от условий теплоотдачи - α_m и допустимого перегрева - Δt ,

$$K = \frac{1}{2k\alpha_m \Delta t}. \quad (3.23)$$

Здесь k - коэффициент конфигурации (для горшка $k = 1.5$, для диска $k = 2$, для бочонка $k = 4-5$).

Из приведенных уравнений видно, что при больших частотах и высоком напряжении лучше использовать установочную керамику с меньшим значением ε . При более низких частотах лучшие результаты дает конденсаторная керамика с высоким значением ε . После проведения теплового расчета выбранную толщину изоляции проверяют из условия электрической прочности.

5. Конденсаторы типа К-10У-5

Это разновидность керамических конденсаторов на полупроводниковой основе, которая имеет принципиальное отличие от всех других, ранее известных керамических конденсаторов, заключающееся в том, что они обладают большей удельной емкостью, близкой к электролитическим конденсаторам.

Конденсаторы представляют собой керамический диск из сегнетокерамического материала, который восстановлен в водороде до высокой электропроводности. После восстановления диск окисляется в воздушной среде и на его поверхности образуется тонкий диэлектрический слой исходного материала. На поверхность окисленной заготовки наносится серебряный электрод, к которому крепятся медные посеребренные выводы. Затем конденсатор покрывается компаундом. Для них характерна простая технология изготовления, применение дешевого, не дефицитного сырья, что обеспечивает их низкую стоимость. Однако область их применения сравнительно узка. Конденсаторы могут использоваться только в цепях, где сопротивление изоляции и тангенс угла потерь не играют существенной роли.



Рис.3.19. Конденсаторы типа К-10 У-5

Такие конденсаторы предназначены для работы в интервале температур от -60 до $+85^{\circ}\text{C}$ в цепях постоянного, переменного и импульсного токов.

6. Конденсаторы типа К-10-У-2

Это клиновидные конденсаторы, предназначенные только для печатного монтажа. Они являются безиндукционными и представляют собой прессованную, с последующим обжигом керамику, на которую нанесены серебряные обкладки, служащие выводами при монтаже.

Учитывая малую теплостойкость керамических материалов, режим пайки их должен исключать термоудар, для чего они перед пайкой предварительно нагреваются. В зависимости от температурного коэффициента емкости конденсатора изготавливаются шесть групп: М47, М75, М750, М1500, Н20, Н90. Причем группа Н90 может работать при температуре окружающего воздуха от -60 до $+85^{\circ}\text{C}$, а остальные при температуре от -60 до $+125^{\circ}\text{C}$.



Рис.3.20. Конденсаторы типа К-10 У-2

Данные конденсаторы рассчитаны на номинальное напряжение постоянного тока, равного 480В , и могут работать в цепях постоянного, переменного и импульсного токов. При использовании конденсаторов в цепях с напряжением переменного тока максимальное значение его не должно превышать величины, определяемой допустимой реактивной мощностью конденсатора.

7. Высоковольтные конденсаторы типа К15-4, К15-5

До настоящего времени группу низкочастотных высоковольтных конденсаторов (кроме серии КВИ) представляли конденсаторы типа КОБ и КВДС с ограниченным рядом номиналов по емкости и напряжению.

На основе КОБ (керамические – высоковольтные – бочоночные) были разработаны конденсаторы типа К15-4, а на основе КВДС (керамические, высоковольтные, дисковые сегнетокерамические) конденсаторы типа К15-5.

Одной из основных характеристик низкочастотных керамических конденсаторов является их удельная энергия. Исходя из этого, для обеспечения малых размеров конденсаторов, керамика должна обладать наибольшей диэлектрической проницаемостью и E_{np} . Этому в наибольшей степени соответствует материал Т-4000, обладающий $\epsilon \sim 4000 \div 5000$.

Конструктивно К15-4 (рис.3.21) представляют собой цилиндр, на торцы которого методом вжигания серебряной пластины нанесены электроды. К электродам припаяны аксиальные стержневые выводы. Защитная композиция выполнена из расплавленной органической массы способом пресс литья под давлением.

К15-5. Выполнены в форме дисков на плоскости которых с зазором по краю для увеличения разрядного промежутка нанесены серебряные электроды. После пайки выводов конденсатор покрывается защитным компаундом.

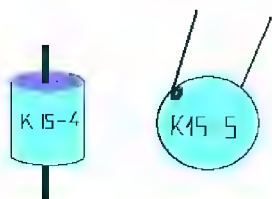


Рис. 3.21. Высоковольтные керамические конденсаторы типа К15-4, К15-5

Эти конденсаторы предназначены для работы в цепях постоянного и пульсирующего токов в температурном диапазоне $-20 \div 70^\circ\text{C}$ при относительной влажности воздуха до 98%.

8. Керамические конденсаторы типа К107-А, К-107-В

Конденсаторы серии К-107-А представляют собой прямоугольную пластину с нанесенными на ней серебряными электродами с зазором по краю. В блок конденсатора собирается не более трех пластин, причем только для блока самого большого видоразмера. Остальные видоразмеры состоят только из одной пластины, что повышает их технологичность. Конденсаторы серии А имеют толщину пленки порядка $0.35 \div 0.40$ мм и рассчитаны на напряжение 250В.

Конденсаторы серии В относятся к так называемой «без зазорной» конструкции, они не имеют межэлектродных промежутков на плоскости пластины, т.е. эта особенность позволяет в полном объеме использовать керамическое тело для повышения удельной емкости.

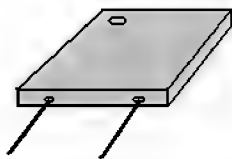


Рис.3.22. Керамические конденсаторы типа К10-7А

9. Высоковольтные импульсные конденсаторы

Эти конденсаторы нашли в настоящее время широкое распространение во многих отраслях науки и техники. Они используются в установках для испытания высоковольтных импульсных и силовых трансформаторов, кабелей, внешней изоляции линий электропередачи, в генераторах коммутационных перенапряжений, в генераторах импульсных токов и др. Емкостные накопители энергии, изготовленные на основе таких конденсаторов, применяются для получения и исследования плазмы, создания сверхмощных магнитных полей и импульсных токов, в лазерной и в ракетной технике.

Исходя из этого, импульсные конденсаторы должны обладать

- 1.Возможно большим запасом энергии в единице объема.
- 2.Малой внутренней индуктивностью и относительно высокой добротностью.
- 3.Высокой динамической устойчивостью внутренних соединений секций и контактных соединений.
- 4.Минимально возможными меньшими габаритами и весом, а также конструкцией, обеспечивающей удобное соединение конденсаторов в батареи с малой индуктивностью.
- 5.Достаточным сроком службы в режиме многократных разрядов на малую индуктивность.

Большинство малоиндуктивных импульсных конденсаторов выполняется в металлическом баке либо с металлической крышкой, имеющий специальный малоиндуктивный коаксиальный вывод, либо с изоляционной крышкой, имеющей выводы в виде двух рядов болтов, разделенных изоляционной перегородкой.

10. Тонкопленочные керамические конденсаторы

Развитие радио и электронной техники, использование в них печатного монтажа и микросхем обусловило разработку и изготовление малогабаритных керамических конденсаторов с различными параметрами. В настоящее время широкое развитие получили тонкопленочные конденсаторы, изготов-

ляемые путем послойного нанесения обкладок, изоляции между обкладками и выводов на специальные керамические подложки. После разрезки заготовки конденсаторы покрываются слоем эмали для защиты от влаги и обеспечения механической прочности.

3.3. Конденсаторы с твёрдым органическим диэлектриком

Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком нашли самое широкое распространение в различных областях техники. Это различные радио-конденсаторы, силовые конденсаторы для повышения $\cos\varphi$, конденсаторы связи, импульсные конденсаторы и т.д.

В качестве диэлектриков таких конденсаторов применяется бумага и различные синтетические (полимерные пленки). В зависимости от назначения, конструктивных особенностей и типа диэлектрика их можно подразделить на следующие группы.

1. Конденсаторы с бумажной изоляцией

- а) силовые бумажные конденсаторы;
- б) конденсаторы связи;
- в) импульсные бумажно-масляные конденсаторы;
- г) электротермические конденсаторы;
- д) бумажные радиоконденсаторы;
- е) защитные конденсаторы;
- ж) проходные конденсаторы;
- з) телефонные конденсаторы;
- и) автомобильные конденсаторы;
- к) металлобумажные конденсаторы.

2. Конденсаторы с синтетическим диэлектриком

2.1. На основе неполярных плёнок

- а) полиэтиленовые;
- б) полистирольные;
- в) политетрафторэтиленовые;
- г) ацетатные.

2.2. На основе полярных плёнок

- а) лакопленочные;
- б) политрифторхлорэтиленовые;
- в) полиэтилентерефталатные.

В качестве основного диэлектрика большинства силовых конденсаторов по-прежнему остается бумага, которая обладает хорошими электроизоляционными и технологическими свойствами и более дешёвая по сравнению с другими твердыми органическими диэлектриками.

Основной особенностью бумаги, как и других пленочных диэлектриков, является возможность получения очень тонких лент, обуславливающих их намотку в виде отдельных секций. Возможность получения малых толщин диэлектрика обуславливает повышение уровня рабочих напряженностей поля, что, даже при небольших значениях ϵ (порядка $3 \div 6$), позволяет, в свою очередь, получать большие значения удельной емкости и удельной мощности конденсаторов при сравнительно небольших габаритных размерах. В связи с этим диапазон значений номинальной ёмкости таких конденсаторов резко расширен по сравнению с ранее описанными конденсаторами. Кроме того, процесс изготовления намотанных секций из пленочных диэлектриков и бумаги позволяет автоматизировать практически все операции от намотки до контроля.

Внедрение в конденсаторостроение неполярных синтетических плёнок, имеющих невысокое значение Igd (как и у слюды), позволяет расширить область использования таких конденсаторов в сторону высоких частот. Кроме того, возможность получения синтетических плёнок с очень высоким удельным сопротивлением позволяет изготавливать конденсаторы с высокой постоянной времени, достигающей значения 1000000 мОм.мкФ. Такие конденсаторы оказались очень удобными для использования в счётно-решающих устройствах и другой техники.

Однако следует отметить, что конденсаторы с органическим диэлектриком имеют и недостатки. Это низкая нагревостойкость органических материалов, повышенный коэффициент линейного расширения, который может в 10 раз превышать значения, характерные для неорганических материалов. Это затрудняет создание конденсаторов со стабильным значением ёмкости, увеличивает их ТКС и обуславливает снижение их рабочих температур. Кроме того, органическим диэлектрикам свойственно старение в электрическом поле, приводящее к постоянному снижению E_{np} с течением времени. Это обстоятельство заставляет брать в расчётах повышенный коэффициент запаса электрической прочности, что заметно снижает $E_{раб}$ в сравнении с E_{np} .

Тем не менее, конденсаторы с органическим диэлектриком благодаря их положительным характеристикам находят всё более широкое применение в промышленности. Основными видами таких конденсаторов являются бумажные, бумажно-плёночные и плёночные конденсаторы с фольговой обкладкой или металлизированные.

3.3.1. Бумажные конденсаторы

Для изготовления бумажных конденсаторов применяют специальную конденсаторную бумагу, отличающуюся весьма малой толщиной, высокой плотностью и малым содержанием неорганических примесей. Отечественная бумага выпускается трех сортов по плотности КОН-1 (объёмный вес $1,0 \text{ гр/см}^3$), КОН-2 (объёмный вес $1,2 \text{ гр/см}^3$) и КОН-3 (объёмный вес $1,3 \text{ гр/см}^3$).

Первый из этих сортов в основном применяется для конденсаторов переменного напряжения. Временное сопротивление конденсаторной бумаги разрыву составляет до $1000 \div 1200 \text{ кг/см}^2$, а пробивная напряжённость электрического поля непропитанной бумаги лежит в пределах от 30 до 50 кВ/мм (при частоте 50 гц). Основные характеристики конденсаторной бумаги приведены в табл. 3.2.

Основным сырьём для производства конденсаторной бумаги является *сульфатная древесная целлюлоза* (крафт-целлюлоза), полученная обработкой древесной (сосновой) щепы путём варки в щелочной среде для удаления лигнина. Остаточное содержание лигнина допускается не более $3 \div 3.5\%$. В сульфатной целлюлозе содержится также около 0.5% смол и других растворимых веществ и около 0.3% золы, т.е. неорганических веществ.

Для получения конденсаторной бумаги с высокой электрической прочностью нужны некоторые оптимальные условия размола. «Недомолоченная» масса дает бумагу с большой воздухопроницаемостью и низкой электрической прочностью. В «перемолотой массе» большое содержание слизи закрывает сквозные поры, но образует слабые места с пониженной электрической прочностью.

Таблица 3.2

Свойства	Вид и марка бумаги					
	КОН-1	КОН-2	Силкон - 0.8	Силкон-1	Силкон-2	МКОН
Плотность, г/см ³	1	0,9	0.8	1	1.7	1
Пробивное напряжение сухой бумаги в В не менее	430	450	420	460	490	460
tg δ сухой бумаги не более:						
при 60 ⁰ С	0.0016	0.0018	0.0009	0.0012	0.0015	
при 100 ⁰ С	0.0028	0.0035	0.0010	0.0015	0.0020	0.0020
Число токопроводящих включений на 1 м ² бумаги не более	100	130	10	15	30	15

Непропитанная конденсаторная бумага содержит 20÷25% воздуха (по объему) и 6÷9% воды (по весу). Для улучшения ее электрических характеристик производят сушку для удаления воды и пропитку для замены воздуха, находящегося в порах бумаги, жидким или твердеющим диэлектриками. Обычно эти операции проводят после намотки конденсаторных секций.

Исходя из последовательной схемы расположения слоев клетчатки и воздушных пор, можно рассчитать значения, $tg\delta$ и E_{np} пропитанной бумаги:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_K \varepsilon_n}{(1-x)\varepsilon_n + x\varepsilon_K} = \frac{\varepsilon_K}{1-x+x \frac{\varepsilon_K}{\varepsilon_n}}, \quad (3.24)$$

где x – относительный объем, занимаемый порами во всем объеме бумаги

$$x = 1 - \frac{\gamma}{\gamma_K}.$$

Здесь γ, γ_K – соответственно плотность бумаги и клетчатки ($\gamma_K=1,55 \text{ г/см}^3$).

В случае непропитанной бумаги, полагая $\varepsilon_n = 1$, получим:

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_K}{1+x(\varepsilon_K-1)}. \quad (3.25)$$

На рис.3.23 показана зависимость диэлектрической проницаемости пропитанной бумаги от величины ε пропиточного состава, откуда видно, что $\varepsilon_{\text{прон. бум}}$ возрастает не линейно с ростом ε_n ,



Рис. 3.23

При пропитке бумаги твердеющими диэлектриками, дающими усадку, часть пор остается незаполненной, что приводит к уменьшению ε .

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_K}{x(1-\gamma) \frac{\varepsilon_K}{\varepsilon_n} + x(\gamma \varepsilon_K - 1) + 1}, \quad (3.26)$$

где γ – относительная объемная усадка пропиточной массы.

Аналогично можно получить выражения для расчета $\text{tg} \delta$ и $E_{\text{пр}}$:

$$\text{tg} \delta = \frac{\text{tg} \delta_K}{1 + \frac{\varepsilon_K x}{\varepsilon_n (1-x)}} + \frac{\text{tg} \delta_n}{1 + \frac{\varepsilon_n (1-x)}{\varepsilon_K x}}; \quad (3.27)$$

$$E_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр.поры}}}{d} \left[1 + \frac{\varepsilon_n \gamma}{\varepsilon_K (\gamma_K - \gamma)} \right]. \quad (3.28)$$

Следует иметь в виду, что даже в пропитанном состоянии емкость конденсатора и другие его параметры будут изменяться в зависимости от плотности намотки и обжатия (опрессовки) конденсаторных секций. Прессование секций применяется для увеличения удельной емкости конденсаторов за счет сближения обкладок. Наряду с этим наблюдается также и повышение электрической прочности изоляции за счет уменьшения объема пропитывающего состава, что затрудняет развитие пробоя.

Сушка и пропитка бумажных конденсаторов является наиболее ответственным этапом технологического процесса, от которого зависит как качество

готовых конденсаторов, так и его стоимость. Для ускорения процесс сушки проводят при максимально допустимой температуре и при минимальном остаточном давлении. Часто для ускорения процесса сушки наряду с внешним обогревом используют внутренний обогрев током высокой частоты, пропускаемым по обкладкам.

3.3.2. Бумажные радиоконденсаторы

Бумажные радиоконденсаторы применяются в радиопромышленности, устройствах проводной связи, в схемах автоматики и телемеханики наряду с металлобумажными и пленочными конденсаторами.

Отечественной промышленностью бумажные радиоконденсаторы выпускаются в различных вариантах, рассчитанных на напряжение от 200 до 4000В, емкостью от 100 пФ до 1,0 мкФ. В зависимости от конструкции различают конденсаторы КБГ-И (герметизированные в керамическом изоляционном корпусе), КБГ-М (в металлическом корпусе), КБГ-МП (плоские в металлическом штампованном корпусе), КБГ-МН (в паяном корпусе). Для работы при напряжениях выше 1500В выпускаются конденсаторы типа КБГ-Ц (цилиндрического типа) и КБГ-П (прямоугольной формы).

Конденсаторы типа КБГ рассчитаны на работу при температурах от 60 до +70°C при влажности до 98% и давлении воздуха до 40 мм.рт.ст. при рабочих напряжениях 1500, 2000 и 4000В. Конденсаторы изготавливаются с точностью емкости по I, II и III классу ($\pm 20\%$), $\tan \delta$ не выше 0,01, постоянной времени при $C_{ном} > 0,25$ мкФ не ниже 2000 мОм.мкФ и $E_{раб} = 12,5 \div 30$ кВ/мм.

Для работы в устройствах автоматики при температурах выше 70°C была разработана серия конденсаторов типа БГТ (бумажные термостойкие герметизированные). В дополнении к серии БГТ была разработана серия конденсаторов БГМТ малой емкости на температуру до 100°C (в металлическом корпусе).

С учетом требований микроэлектроники была разработана серия малогабаритных бумажных конденсаторов типа КБГИ-70, КГГМ-60 и БГМТ-50, рассчитанные на напряжение до 300В с удельной емкостью до 15 см³/мкФ.

3.3.3. Специальные виды бумажных конденсаторов

■ Защитные конденсаторы типа КЗ

Защитные конденсаторы применяются в силовых распределительных щитах станций и подстанций и других устройствах с целью защиты от радиопомех. По своим характеристикам данные конденсаторы подобны конденсаторам КБГ и рассчитаны на напряжение до 500В постоянного тока и 200В переменного тока. Они изготавливаются с одним изолированным выводом, второй вывод соединен с корпусом. Внутри конденсатора размещается плавкий предохранитель, отключающий его в момент пробоя.

▪ **Проходные конденсаторы КПБ**

Проходные конденсаторы предназначены для подавления промышленных радиопомех и рассчитаны на работу в цепях постоянного тока до 1500В и переменного тока напряжением до 500В. Изготавливаются в различных конструктивных исполнениях – КБП-Р (с креплением на резьбе), КБП-Ф (с фланцем), КПБ-С (с креплением скобой). По своим электрическим характеристикам подобны конденсаторам КБГ.

▪ **Телефонные конденсаторы типа БП-II**

Телефонные конденсаторы рассчитаны на относительно мягкие условия работы (в закрытых помещениях), поэтому изготавливаются в открытом исполнении, пропитанные парафином. Изготавливаются емкостью от 0,25 до 1,0 мкФ на напряжение 200В постоянного тока с удельным объемом 22,5 см³/мкФ.

▪ **Автомобильные конденсаторы**

Автомобильные конденсаторы используются в схемах электрооборудования автомобилей для шунтирования контактов прерывателя с целью уменьшения их износа и улучшения условий зажигания. Они рассчитаны на работу при температурах от -40 до +65°C при напряжении от 6 до 24В и изготавливаются емкостью от 0,1 до 0,25 мкФ.

3.3.4. Силовые бумажные конденсаторы

Силовые конденсаторы (*power capacitors*) или силовоточные предназначены для улучшения коэффициента мощности или регулирования напряжения при технической частоте 50 гц. В России силовым конденсаторам дается более широкое понимание и к ним относят все типы конденсаторов, которые предназначены для улучшения коэффициента мощности, для продольной емкостной компенсации линий электропередачи, для сварки, для конденсаторных электродвигателей, для отбора энергии от линий электропередач, конденсаторы связи, конденсаторы электротермических установок. Среди них основное место по производству занимают «косинусные» конденсаторы, предназначенные для улучшения коэффициента мощности промышленных установок. Развитие «косинусных» конденсаторов шло по пути замены нефтяного масла пентахлордифенилом, обладающим более высоким значением диэлектрической проницаемости, что позволяло резко повысить удельные характеристики и реактивную мощность.

Такие «косинусные» конденсаторы, пропитанные пентахлордифенилом, выпускались в России с удельной мощностью 25÷50 кВар и удельными характеристиками при напряжении 3÷10 кВ – 1,5 дцм³/кВар и 2,3 кг/кВар, при напряжении 230 В – 4,0 дцм³/кВар и 4,6÷6 кг/кВар. В настоящее время косинусные конденсаторы выпускаются с пропиткой экологически безопасными жидкостями.

Косинусные конденсаторы рассчитаны на работу внутри помещений при температуре от -35 до $+35^{\circ}\text{C}$ на высоте не более 1000 м над уровнем моря с относительной влажностью до 80% . При наружной установке они размещаются в металлических шкафах в виде конденсаторных батарей. Для намотки секций косинусных конденсаторов обычно используют конденсаторную бумагу типа КОН1 толщиной $10\div 14$ мкм. После намотки секции подвергаются опрессовке, сушке и пропитке, после чего они собираются в пакеты и помещаются в металлический корпус, который затем герметизируется. Недостатком таких конденсаторов является низкая устойчивость к воздействию ионизационных процессов при переменном напряжении.

Новым применением силовых конденсаторов является их использование для последовательного включения в линии электропередачи с целью компенсации индуктивности этой линии (серийные конденсаторы типа КПМ-0,6-50-1 с номинальным напряжением 600 В, мощностью 50 кВар, емкостью 442 мкФ).

3.3.5. Конденсаторы связи

Конденсаторы связи собираются в виде стопки из большого числа последовательно включаемых секций, зажатых между двумя металлическими щеками, стянутыми изоляционными планками (из текстолита, гетинакса и др.). Такая стопка помещается в фарфоровый корпус (покрышку), закрываемый с торцов металлическими фланцами. Для компенсации изменения объема масла в таких конденсаторах используются сильфоны, которые поддерживают давление масла в пределах $1,4\div 1,5$ атм. при температуре $+65^{\circ}\text{C}$.

Для обеспечения надежности таких конденсаторов рабочая напряженность поля при расчетах берется ниже, чем в косинусных конденсаторах и составляет $E_{\text{раб}} = 8\div 9$ кВ/мм. Рабочее напряжение на одну секцию берется в пределах $700\div 800$ В, что дает число секций в пакете порядка $70\div 80$ штук. Секции наматываются из бумаги уменьшенной ширины (140 мм) на оправку увеличенного диаметра ($120\div 130$ мм), чтобы получить форму, близкую к квадрату, вписывающегося в круглое отверстие фарфоровой покрышки.

Промышленностью выпускаются конденсаторы типа СМР-55-0,0044 номинальным напряжением 55 кВ. При напряжении 110 кВ берется два таких элемента, а при 220 кВ - четыре элемента, собираемые в колонну. Наряду с конденсаторами СРМ применяются также конденсаторы СМР¹³³_{√3}, которые

предназначены для связи и отбора мощности на линиях электропередачи напряжением 400 кВ. Каждая фаза конденсатора состоит из трех элементов с номинальным напряжением $\frac{133}{\sqrt{3}}$ В, емкостью 18600 пФ и одного элемента

емкостью 5400 пФ на напряжение 35 кВ.

3.3.6. Импульсные бумажно-масляные конденсаторы

Такие конденсаторы рассчитаны, как правило, для работы в закрытых помещениях и должны обладать высокой удельной энергией. В табл. 3.3 приведены основные типы импульсных конденсаторов серии ИМ и их характеристики.

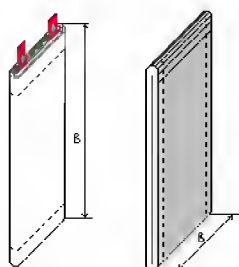
Таблица 3.3

Обозначение	Номинальные данные		Размеры в мм		Удельная энергия, дж/дцм ³
	$U_{ном}, кВ$	$C, мкФ$	Высота	Диаметр	
ИМ 110-0,012	110	0,0022	595	155	1,18
ИМ 110-0,011	110	0,011	415	220	5,38
ИМ 110-0,022	110	0,022	725	220	6,16
ИМ 60-0,03	60	0,03	525	172	5,81
ИМ 40-0,03	40	0,03	405	172	2,5

Такие конденсаторы собираются из большого числа последовательно соединенных секций подобно конденсаторам СРМ. Пакеты секций помещаются в изоляционный корпус (гетинаксовый цилиндр) и закрывают крышками из силумина.

3.3.7. Электротермические конденсаторы

Бумажно-масляные электротермические конденсаторы нашли применение в контурах установок для нагрева металла токами высокой частоты от 1 до 10 Кгц. В связи с резким увеличением потерь при повышении частоты при конструировании таких конденсаторов большое внимание уделяется вопросам улучшения условий теплоотвода и снижения температуры перегрева. С этой целью секции конденсатора наматываются из узкой бумаги (шириной 95 мм) на оправке увеличенного диаметра с выступающей фольгой увеличенной толщины 16 мк вместо 7÷8 мк (рис.3.25).



Секция силовых конденсаторов на 50 гц

Секция электротермических конденсаторов

Рис.3.25. Внешний вид секций для силового (а) и электротермического (б) конденсаторов: здесь b – ширина бумажной ленты)

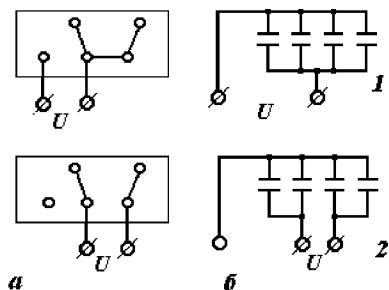


Рис. 3.26. Типы перемычек (а) и схема соединений секций электро-термического конденсатора (б):
1) – параллельное соединение;
2) – параллельно - последовательная схема

3.3.8. Металлобумажные конденсаторы

Разработка технологии термовакuumного распыления металлов привела к появлению металлобумажных конденсаторов, в которых в качестве обкладок используется тонкий слой металла, нанесенный методом испарения в вакууме. Если в фольговых конденсаторах между обкладками необходимо было использовать не менее $2 \div 3$ слоев бумаги, чтобы избежать короткого замыкания из-за наличия в ней проводящих частиц или дефектов, то в металлобумажных конденсаторах между обкладками можно применять только один слой бумаги, т.к. возле точки пробоя происходит выгорание обкладки и самовосстановление электрической прочности.

Переход к одному слою бумаги, т.е. уменьшение толщины диэлектрика между обкладками, позволяет уменьшить удельный объем конденсатора в 4 раза по сравнению с фольговыми конденсаторами. Уменьшение удельного объема достигается также и за счет уменьшения толщины обкладки. Так при толщине бумаги 8 мкм удельный объем конденсаторов на напряжение 200 В снижается от 28 до 5,6 см³/мкФ. При повышении рабочего напряжения секций необходимо использовать уже $2 \div 3$ слоя бумаги. Однако и в этом случае рабочее напряжение в металлобумажных конденсаторах может быть повышено по сравнению с обычными конденсаторами, т.к. пробой по слабым местам, опасный для фольговых конденсаторов, менее опасен для металлобумажных конденсаторов за счет самовосстановления прочности. При напряжениях выше 1500 В, требующих применение повышенной толщины изоляции, преимущество металлобумажных конденсаторов перед фольговыми становится несущественным. Для ослабления разрушения диэлектрика в местах короткого замыкания при случайном пробое металлизированные обкладки могут наноситься в виде гребенки, т.е. с изолирующими промежутками (рис. 3.27).

В этом случае при случайном пробое происходит выгорание тонкого металлизированного слоя обкладки без существенного воздействия на изоляцию.

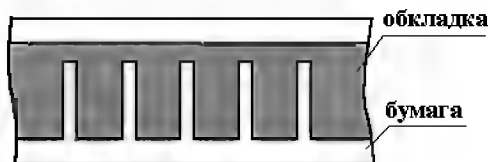


Рис. 3.27. Тип обкладок металлобумажных конденсаторов

Однако при длительном воздействии перенапряжений, превышающих $U_{ном}$, начинают происходить часто повторяющиеся пробой и при этом выгорает как обкладка, так и бумага. Это приводит к уменьшению площади обкладки, а в ряде случаев и к полному ее обрыву, т.е. потери конденсатором емкости. Недостатком металлобумажных конденсаторов также являются снижение постоянной времени $R_{из}C$ и нестабильность емкости со временем за счет электролитического разрушения металлизированного слоя токами утечки. Скорость этого процесса может быть описана уравнением Мак Лина:

$$-\frac{d\delta}{d\tau} = \frac{U \cdot \varepsilon \cdot M}{160n\gamma d R_{из}C}, \quad (3.29)$$

где δ - толщина металлизированного слоя в ангстремах;

τ - время в сутках;

U - приложенное напряжение, В;

ε - диэлектрическая проницаемость;

n - валентность металла;

γ - плотность металла;

d - толщина диэлектрика в тысячных дюйма;

$R_{из}C$ - постоянная времени конденсатора, мОм.мкФ.

В настоящее время промышленностью выпускаются металлобумажные конденсаторы типа МБМ (металлобумажные), МБГО (металлобумажные герметизированные, однослойные), МБГП и МБГЦ (прямоугольной и цилиндрической формы). По своему конструктивному исполнению они подобны бумажным конденсаторам типа КГБ.

Для устранения возможности проникновения металла при напылении вглубь бумаги вводится операция лакировки бумаги этилцеллюлозным лаком. Лакирование бумаги также позволяет повысить постоянную времени конденсатора и дополнительно заливает случайные дефекты (отверстия) в бумаге. Другой их особенностью, учитывая специфику металлизированного слоя, является использование выступающих обкладок. Торцы обкладок для контактирования с выводами подвергаются процессу шоопирования (распылению металла на торцы).

В случае однослойной и двухслойной изоляции конденсаторы подвергаются после изготовления операции тренировки в две ступени. На первой ступени на конденсатор подается напряжение небольшой величины (порядка

100 В) от источника тока с большой емкостью на выходе. В этом случае изолируются от обкладок слабые места с повышенной проводимостью. На второй ступени подается напряжение $1,5U_{ном}$ от источника, имеющего на выходе емкость порядка 10мкФ. В этом случае изолируются от обкладок слабые места, имеющие низкую электрическую прочность с малой электропроводностью.

Для пропитки секций металлобумажных конденсаторов в зависимости от величины напряжения применяют как неполярные массы (церезин, вазелин и др.), так и полярные массы с повышенным значением ϵ . Сравнительные характеристики различных типов металлобумажных конденсаторов приведены в табл. 3.4.

Из приведенной таблицы видно, что наиболее лучшими характеристиками обладают конденсаторы типа МБГП и МБГЦ. Конденсаторы типа МБГТ имеют более высокую допустимую рабочую температуру.

Таблица 3.4

Тип конденсатора	Рабочее напряжение, В	Удельная емкость, см ³ /мкФ	Удельная энергия, дж/дцм ³	Удельный вес, г/мкФ	Предельная рабочая температура, °С
МБГП, МБГЦ	200	5,6		9,6	-60÷+70
	400	15,2		28	
	600	37,4		60	
	1000	51		80	
	1500	74	15,2	120	
МБГО	160	3,15		6	-60÷+70
	300	4,3		7,7	
	400	7,0		12,5	
	500	8,8		15	
	600	12,8		23	
МБМ	>160	4.5		10	-60÷+70
МБГТ	160	9,7		16	-60÷+100
	300	15,8		28	
	500	33,5		62	
	750	45		85	
	1000	78,5		135	

3.3.9. Конденсаторы на основе неполярных пленок

Неполярные синтетические пленки характеризуются небольшой величиной $\epsilon = 2\div2,5$, практически не зависящей от частоты, отрицательным значением ТК ϵ , весьма малым tg δ , достаточно высоким значением удельного электрического сопротивления ($10^{17}\div10^{18}$ Ом.см) и по сравнению с бумагой

обладают весьма высокой электрической прочностью, достигающей 100 кВ/мм. К таким пленкам относятся: полиэтиленовая, полистирольная, политетрафторэтиленовая и др.

3.3.9.1. Полистирольные конденсаторы

Полистирольная пленка, применяемая в конденсаторостроении, изготавливается толщиной 20÷100 мк, ее плотность равна 1,04÷1,06 г/см³, а сопротивление разрыву 800÷900 кг/см². Обычно в конденсаторах применяют 1-3 слоя пленки, которые предварительно металлизуются путем испарения металла в вакууме. После намотки секции подвергаются процессу термической обработки (запеканию), при которой происходит значительная усадка пленки, сопровождаемая обжатием секции с вытеснением воздуха из зазоров. После запекания секции подвергаются температурной тренировке для улучшения температурной стабильности емкости.

Нашей промышленностью выпускаются несколько типов полистирольных конденсаторов для различных областей применения ПМ, ПГТ, ПОВ, ПСО и др. Сравнительные характеристики таких конденсаторов представлены в табл. 3.5.

Таблица 3.5

Тип конденсатора	Рабочее напряжение, В	Емкость, пФ	Удельный объем, см ³ /мкФ	Рабочая температура, °С	R _{из} , МОм
ПГТ	200÷250	1 ÷ 2	305÷ 330	0 ÷ +60	
ПО	300	100÷30000		-40 ÷ +50	10 ⁷ ÷ 10 ⁸
ПСО	500	470÷10000		0 ÷ +60	10000
ПОВ	10÷30	380		0 ÷ +60	10 ⁴ ÷ 10 ⁵
ПМ	50÷100	100÷1000		-60 ÷ +70	

3.3.9.2. Полиэтиленовые конденсаторы

Полиэтиленовые пленки по своим свойствам близки к полистирольным, однако, отличаются повышенной нагревостойкостью. Они обладают более высокими значениями ТК_ε, поэтому не могут использоваться для конденсаторов с повышенной стабильностью емкости. Полиэтиленовые конденсаторы наиболее целесообразно использовать в тех случаях, когда надо иметь конденсатор небольшой емкости с малыми потерями, высокой постоянной времени и малой абсорбцией заряда.

3.3.9.3. Политетрафторэтиленовые конденсаторы

Конденсаторы с пленкой ПТФЭ изготавливаются намоткой в секции с использованием мягкой отожженной алюминиевой фольги, чтобы избежать про-

колов. Для стабилизации емкости намотанные секции подвергают запеканию при температуре $250\div 300^{\circ}\text{C}$. По конструкции различают конденсаторы открытого – ФТ и герметичного – ФГТИ исполнения. Отличительной особенностью конденсаторов с ПТЭФ пленкой является их высокая нагревостойкость, однако, это дорогие конденсаторы, поэтому они применяются в тех случаях, когда другие не могут быть использованы.

3.3.10. Конденсаторы на основе полярных пленок

Полярные синтетические пленки отличаются от неполярных пленок прежде всего повышенным значением ε , что позволяет уменьшить удельный объем конденсаторов. С другой стороны, они характеризуются повышенным значением $\text{tg}\delta$, что ограничивает область их применения в цепях переменного тока.

К таким конденсаторам относятся ацетатные конденсаторы на напряжение до 1000 В с удельной энергией $20\div 40$ дж/дцм³, политрифторхлорэтиленовые конденсаторы на основе пленки Ф-3, обладающие повышенной рабочей температурой и полиэтилентерефталатные конденсаторы на основе лавсановой пленки.

3.4. Электролитические конденсаторы

Электролитические конденсаторы представляют особый тип конденсатора, который резко отличается от рассмотренных ранее конструкций. В электролитическом конденсаторе диэлектриком служит тонкая оксидная пленка, образуемая окисдированием металлической (алюминиевой или танталовой) обкладки. Второй обкладкой обычно служит электролит, соприкасающийся с оксидной пленкой. В электролитических конденсаторах наличие электролита в жидком, полужидком или пастообразном состоянии является необходимым условием для обеспечения высокой электрической прочности оксидного слоя, достигающей несколько сотен киловольт на 1 мм. В оксидно-полупроводниковых электролитических конденсаторах роль второй обкладки играет полупроводниковый слой, наносимый на оксидный слой.

Большое сопротивление второй обкладки (электролит, полупроводник) накладывает особый отпечаток на электрические характеристики электролитических конденсаторов, вызывая повышение $\text{tg}\delta$, по сравнению с обычными типами конденсаторов с твердым диэлектриком. По этой же причине в электролитических конденсаторах наблюдается возрастание $\text{tg}\delta$ и снижение емкости с ростом частоты. С другой стороны, поскольку при получении оксидного слоя металл находится под положительным потенциалом, т.е. служит анодом, к которому движутся отрицательно заряженные ионы кислорода, то и при работе в электролитическом конденсаторе он также должен находиться под положительным потенциалом. При подачи на него отрицательного по-

тенциала проводимость оксидного слоя резко возрастает и через конденсатор будет проходить большой ток, который может привести к его разрушению. Таким образом, оксидная пленка имеет униполярную проводимость, что делает обычный электролитический конденсатор *«полярным»* конденсатором, имеющим положительный и отрицательный выводы. Однако при замене неоксидированной фольги (катода) второй оксидированной фольгой (вторым анодом) получается электролитический конденсатор *«неполярного»* типа.

Можно предположить, что причиной униполярной проводимости оксидной пленки является различный характер ее контакта с электродами (металл оксид - электролит). При катодном включении, когда на вентильный металл подан отрицательный потенциал, может иметь место холодная эмиссия электронов из металла обкладки, так как у поверхности последнего из-за неоднородности оксидной пленки может возникнуть высокая напряженность электрического поля порядка 10^9 В/м даже при невысоких значениях рабочего напряжения. При анодном включении, когда на вентильный металл подан положительный потенциал, ток резко падает, так как электроны проводимости могут поставляться только из электролита, что затруднено из-за ионного характера его проводимости.

Свойства оксидной пленки, ее толщина зависят от способа получения и вида вентильного металла. Образование естественной оксидной пленки на алюминии происходит при простом его соприкосновении с кислородом воздуха. При комнатной температуре толщина этой пленки составляет около 0,01 мкм. Нагревая алюминий до 500°C , можно повысить толщину оксидной пленки до $0,1 \div 0,15$ мкм.

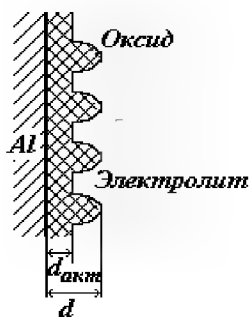


Рис. 3.28

Следует различать активную и полную толщину оксидной пленки (рис.3.28).

Данные исследований показывают, что окисление при нагреве дает более неоднородную пленку, для которой отношение активной толщины к полной составляет $0,1 \div 0,5$.

Толщину оксидной пленки можно увеличить искусственно, используя различные методы обработки поверхности (механическая, электрохимическая, химическая и др.).

■ *Механическая обработка* может проводиться одним из следующих методов: а) отбивка песком, б) царапание металлической щеткой, в) прокатка на медных вальцах с абразивом, г) прокатка на стальных фигурных вальцах.

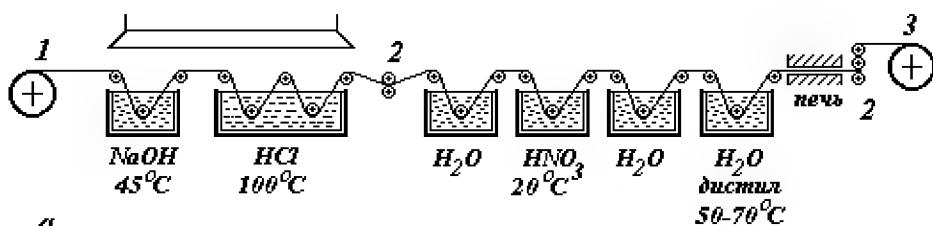
Механическая обработка дает возможность увеличить удельную емкость анодов $C_{\text{уд}}$ не более чем в $2 \div 2,5$ раза по сравнению с гладкими анодами. Недостатком данного метода является увеличение хрупкости анода и трудность удаления частиц металла и абразива после обработки.

■ *Химическая обработка* представляет собой травление анодной фольги в растворах, разъедающих металл. Для травления алюминиевой фольги чаще всего используют такие варианты травящих растворов:

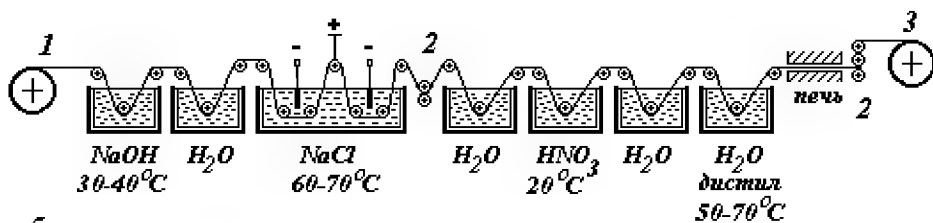
- а) $400-600 \text{ см}^3 \text{ HCl}$ на $1000 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$ при $70-90^\circ\text{C}$;
- б) $250-600 \text{ см}^3 \text{ HCl}$ и $0,15-1,25 \text{ гр CuCl}_2$ на $1000 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$ при $65-85^\circ\text{C}$;
- в) $200-300 \text{ см}^3 \text{ HCl}$ и $150-200 \text{ см}^3 \text{ HNO}_3$ на $1000 \text{ см}^3 \text{ H}_2\text{O}$ при $90-95^\circ\text{C}$.

Химическая обработка позволяет получить увеличение $C_{уд}$ анодов до $8-10$ раз по сравнению с гладкими анодами. Дальнейшее увеличение удельной емкости возможно только при более глубоком травлении, что требует применения более толстой анодной фольги и затрудняет отмывку ионов хлора, остающихся в порах после травления.

■ *Электрохимическая обработка* является более прогрессивным методом увеличения удельной емкости анодов. В этом случае на анодную фольгу, проходящую через раствор, содержащий ионы хлора, подается небольшой положительный потенциал. За счет этого отрицательные ионы хлора устремляются к фольге и интенсивность разъедания ее поверхности резко усиливается. Это позволяет повысить скорость травления при одновременном уменьшении температуры травильного раствора.



Химический метод динамического травления



Электрохимический метод динамического травления

Рис. 3.29. Схема динамического травления

- 1 - необработанная фольга;
- 2 - тянущие валики;
- 3 - обработанная фольга

Кроме того, это также позволяет перейти к использованию в качестве травящей среды раствора поваренной соли NaCl . Такая замена удешевляет травящий раствор и устраняет его вредность. Преимуществом электрохимического травления является также возможность регулирования этого процесса путем изменения величины тока в ванне, т.е. изменения количества ионов хлора,

подводимых к поверхности анодной фольги. В настоящее время применяется схема непрерывного динамического травления, представленная на рис.3.29. В этом случае анодная фольга, сматываясь с рулона, проходит ванну с обезжиривающим раствором NaOH, далее после промывки проходит через ванну с травящим раствором NaCl, подогретом до температуры $60 \div 70^\circ\text{C}$. После промывки фольга подается в ванну с раствором HNO_3 для удаления отдельных включений меди и железа, которые могут содержаться в фольге, или попасть на ее поверхность в процессе предыдущих операций.

▪ *Металлизация путем распыления алюминия.* Этот способ был разработан для изготовления анодов на основе металлизированных тканей. В этом случае крупинки алюминия, покрывая нити ткани и забивая отверстия между ними, образуют на поверхности ткани слой чистого алюминия с сильно развитой поверхностью. Это позволяет добиться увеличения удельной емкости в $10 \div 20$ раз по сравнению с гладкими анодами. Однако для таких конденсаторов приходится резко снижать величину допустимой переменной составляющей тока и ограничивать верхний предел рабочей температуры из-за перегрева, что практически ограничило их применение.

Процесс формовки анодов

Процесс создания оксидного слоя на поверхности анодов при электрохимическом травлении носит название формовки. Различают формовку при постоянном напряжении, при постоянной плотности тока и комбинированную. Характеристики процесса формовки показаны на рис.3.30.

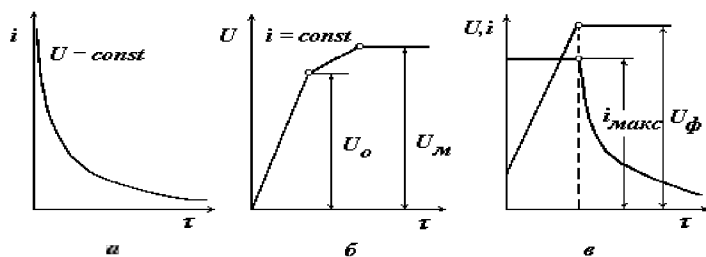


Рис.3.30. Статический метод формовки:
 а) при постоянном напряжении;
 б) при постоянной плотности тока;
 в) смешанная формовка

Из приведенного рисунка видно, что если в процессе формовки поддерживать на ванне постоянное напряжение (рис.3.30а), то вследствие образования оксидного слоя на аноде сопротивление ванны возрастает, а ток резко уменьшается. Если же поддерживать постоянным ток (рис.3.30б), то вследствие возрастания сопротивления ванны требуется непрерывно повышать приложенное к ней напряжение. При этом напряжение будет линейно возрастать до значения U_0 , называемого искровым напряжением. При достижении максимального напряжения формовки U_M вся поверхность анода покрывается искрами. За счет этого может наблюдаться разрушение целостности оксидного слоя. Следует отметить, что с ростом формовочного напряжения растет

толщина оксидного слоя и снижается ток утечки, но вместе с тем падает и величина удельной емкости, рассчитанной на единицу площади анода. Для гладких анодов можно записать

$$C_{yd}U_{\phi} = k_{\phi}, [\text{мкФ} \cdot \text{В}/\text{см}^2], \quad (3.30)$$

где k_{ϕ} - коэффициент формовки, равный $5 \div 6 \text{ мкФ} \cdot \text{В}/\text{см}^2$.

Для травленых анодов полученное значение k_{ϕ} необходимо умножить на коэффициент травления k_{mp} .

Статический метод формовки не позволяет получить большую плотность тока в начале формовки, увеличивает продолжительность ее проведения и, кроме того, обладает низким коэффициентом использования источника энергии. Большими преимуществами обладает динамический метод формовки, когда анодная фольга непрерывно движется и проходит сразу все стадии процесса. Согласно данным Л.Н.Закгейма изменение плотности тока по длине фольги может быть описано уравнением

$$j_m = \frac{I}{2b \left[\frac{v}{\beta} \left(1 - e^{-\frac{\beta l}{v}} + \alpha l \right) \right]} \approx \frac{I}{2b \left(\frac{v}{\beta} + \alpha l \right)}, \quad (3.31)$$

где I - ток, потребляемый ванной, в А;

l - длина ленты фольги, в см;

$\alpha\beta$ - постоянные коэффициенты ($\alpha = 0,01 \div 0,02$; $\beta = 0,3$);

v - скорость прохождения фольги через ванну, см/с.

Следует иметь в виду, что в процессе динамической формовки, когда напряжение формовки составляет несколько сотен вольт, при большой плотности тока при входе фольги в ванну, выделение мощности в начальном участке фольги может вызвать перегрев электролита и даже сжигание фольги током.

3.4.1. Жидкостные электролитические конденсаторы

Конденсаторы с жидким электролитом нашли применение в схемах выпрямления переменного напряжения. При изготовлении таких конденсаторов могут применяться как массивные аноды из тантала, так и аноды из алюминиевой и танталовой фольги, прошедшие операцию формовки. В случае намотанных спиральных анодов в них пробиваются отверстия для уменьшения длины пути тока от корпуса (катода). В качестве рабочего электролита обычно применяется водный раствор борной кислоты и бората аммония $(\text{NH}_4)_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot \text{H}_2\text{O}$. Такой электролит замерзает при температуре около 0°C и емкость конденсатора при этом практически падает до нуля.

При повышении напряжения сверх рабочего ток утечки жидкостного электролитического конденсатора резко возрастает, что может быть использовано для ослабления перенапряжения в цепи питания радиоаппаратуры. Исходя из этого, был даже разработан специальный тип регулирующего кон-

денсатора, обладающий еще более резким возрастанием тока. Однако большим их недостатком являлось невозможность точно воспроизводить заданное значение регулирующего напряжения, из-за чего они быстро вышли из употребления.

3.4.2. Сухие электролитические конденсаторы

В отличие от жидкостных сухие электролитические конденсаторы изготавливаются путем намотки из анодной и катодной фольги с разделительной прокладкой из бумаги или ткани. После намотки секции сухих конденсаторов подвергают пропитке рабочим электролитом. Для этой цели обычно используют или вакуумную пропитку, или пропитку на центрифугах. В качестве рабочего электролита используется водный раствор аммиака NH_4OH , борной кислоты H_3BO_3 и этиленгликоля $\text{C}_2\text{H}_4(\text{OH})_2$, который повышает вязкость электролита, препятствуя его вытеканию, и понижает температуру его замерзания. Проводимость электролита определяется содержанием в нем воды и аммиака. Рабочий электролит должен иметь реакцию, близкую к нейтральной. Перегрев электролита в процессе его варки вызывает полимеризацию электролита и превращение его в твердую стекловидную массу, негодную для пропитки. Надо иметь в виду, что сопротивление волокнистой прокладки, пропитанной электролитом, всегда больше, чем сопротивление слоя электролита той же толщины. Согласно данным Закгейма сопротивление прокладки, пропитанной электролитом, можно вычислить по формуле:

$$r = \varphi \cdot \rho \cdot \frac{d_{np}}{2S_a}, [\text{Ом}] \quad (3.32)$$

где ρ - удельное сопротивление электролита, Ом·см;

d_{np} - толщина прокладки, см;

φ - коэффициент проницаемости прокладки;

S_a - площадь анода, см^2 .

Величина φ зависит от типа прокладки: для бумаги $\varphi = 25 \div 50$, для ткани $\varphi = 5 \div 10$. Поэтому замена бумаги тканью позволяет заметно снизить величину

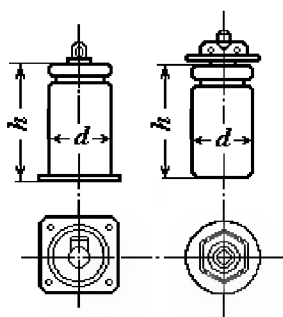


Рис. 3.31

ну r , а, следовательно, уменьшить $\text{tg} \delta$ конденсатора и улучшить его морозостойкость. После намотки и пропитки секция сухого конденсатора имеет резко увеличенный ток из-за частичного разрушения оксидного слоя при намотке. Для заформовки поврежденных участков производится операция тренировки (вторичной формовки). Внешний вид различных электролитических конденсаторов сухого типа (КЭ-1, КЭ-2, КЭ-3) показан на рис.3.31.

Можно отметить, что при напряжениях

выше 160 В и емкости порядка 30 мкФ электролитические конденсаторы имеют удельный объем в 2 раза и удельный вес в 4 раза меньше по сравнению с бумажными и металлобумажными конденсаторами. Однако, если перейти к малым рабочим напряжениям, то положение изменяется.

3.4.3. Неполарные электролитические конденсаторы

Неполарные электролитические конденсаторы можно изготовить, заменяя катодную (не оксидированную) фольгу вторым анодом - оксидированной фольгой. Емкости двух оксидных слоев в таком конденсаторе соединены последовательно, а потому его удельная емкость соответственно снижена, т.е. неполарный конденсатор обладает свойствами системы из двух встречно - последовательно включенных полярных конденсаторов. При изготовлении неполарных конденсаторов каждый анод рассчитывают на полное рабочее напряжение, так как при любой полярности поданного напряжения один из его анодов всегда находится при полном напряжении, поскольку сопротивление оксидного слоя на втором аноде при этом резко снижено. После сборки такой конденсатор должен проходить вторичную формовку дважды в двух противоположных направлениях, чтобы обеспечить заформовку обоих анодов. В остальном изготовление неполарных конденсаторов подобно изготовлению обычных полярных сухих конденсаторов. Схема неполарного конденсатора и изменение напряжения на его анодах при включении в цепь переменного тока показана на рис. 3.32

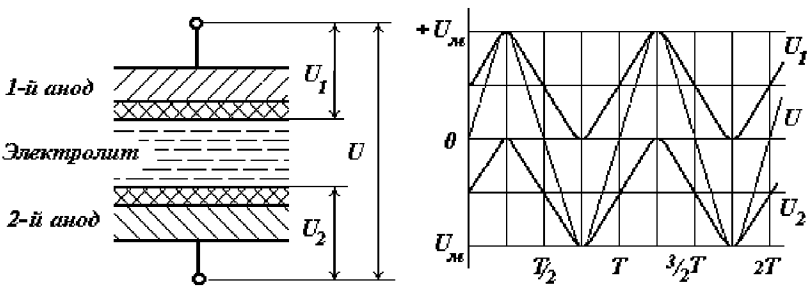


Рис.3.32

Конденсаторы этого типа могут применяться для пуска конденсаторных двигателей, используемых в холодильниках, пылесосах и др., а также в аппаратуре, рассчитанной на питание от сети постоянного тока, где легко может иметь место перемена полярности, например при включении штепсельной вилки.

3.4.4. Танталовые электролитические конденсаторы

Замена алюминия танталом при изготовлении электролитических конденсаторов позволяет значительно улучшить их электрические характеристики и сблизить электролитический конденсатор с бумажным или полярным пленочным диэлектриком. Это объясняется тем, что пленка окиси тантала Ta_2O_5 обладает исключительно высокой химической стабильностью и практически нерастворима в электролитах, разрушающих окись алюминия. Это позволяет применять в качестве рабочих электролитов растворы серной кислоты H_2SO_4 и даже хлористого лития $LiCl$, обладающие малым удельным сопротивлением. При прочих равных условиях танталовый конденсатор дает повышение удельной емкости анода в 2,5 раза в сравнении с алюминиевым конденсатором. Это обусловлено большей величиной диэлектрической проницаемости окиси тантала ($\epsilon=25$) по сравнению со значением $\epsilon=11,5$ окиси алюминия, а также уменьшением толщины окисного слоя при том же формовочном напряжении. Особенно большее увеличение удельной емкости танталовых конденсаторов наблюдается при переходе к объемно-пористым анодам, полученным спеканием из порошка тантала. Удельная поверхность таких анодов может быть в $40 \div 60$ раз больше, чем поверхность сплошных анодов.

Емкость заформованного спеченного анода в виде таблетки высотой h и площадью основания S , составленной из n слоев зерен тантала может быть рассчитана

$$C = mC = 0,0885\pi \frac{\epsilon Sh}{2rd} = 0.139 \frac{\epsilon Sh}{rd}, [\text{пФ}], \quad (3.33)$$

где d – толщина оксидного слоя, см;

r – радиус зерна тантала, см.

$$d = 1,68 \cdot 10^{-7} U_{\phi} [\text{см}]. \quad (3.34)$$

Из приведенной формулы следует, что увеличение емкости может быть достигнуто путем уменьшения радиуса зерен. Однако для мелкодисперсного порошка приходится снижать температуру спекания, чтобы обеспечить большую пористость. При этом возникает опасность увеличения остаточного содержания примесей в тантале, которые увеличивают ток утечки.

По конструктивному исполнению различают следующие виды танталовых электролитических конденсаторов:

- Танталовые жидкостные конденсаторы с объемно-пористыми анодами.
- Танталовые конденсаторы сухого типа.
- Танталовые конденсаторы твердого типа (окисно-полупроводниковые).

Наибольший интерес представляет рассмотрение танталовых окисно-полупроводниковых конденсаторов, нашедших широкое применение в различных областях радиоэлектронной промышленности.

Принципиальная схема устройства твердого электролитического конденсатора представлена на рис.3.33, а конструктивное исполнение на рис. 3.34.

По предположению Тэйлора и Хэринга, разработавших данный тип конденсатора, между слоями окиси тантала и окиси марганца, представляющего собой электронный полупроводник, имеется тонкий переходный слой кислорода (дырочный полупроводник), образованный за счет восстановления окиси марганца. На границе между полупроводящими слоями с электронной и дырочной проводимостью возникает запирающий слой с повышенным сопротивлением, как в полупроводниковых диодах.

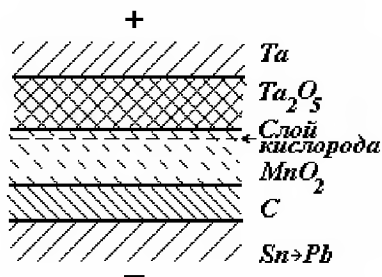


Рис.3.33. Принципиальная схема твердого танталового электролитического конденсатора

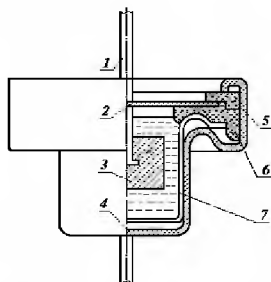


Рис.3.34. Танталовый электролитический конденсатор с объемно-пористым анодом:
1- вывод, 2 – крышка, 3 – анод, 5 – уплотнение, 6 – изоляционная прокладка, 7 – металлический корпус

Если на тантал подан положительный потенциал, то «дырки» – носители положительного заряда в кислородном слое – движутся к запирающему слою и нейтрализуют электроны как носителей отрицательного заряда в слое окиси марганца, которые подходят к запирающему слою со стороны слоя MnO_2 . За счет этого запирающий слой расширяется и его сопротивление возрастает, обеспечивая резкое снижение тока утечки. Если на тантал подан отрицательный потенциал, то запирающий слой сужается, сопротивление его уменьшается и ток через запирающий слой возрастает, т.е. он перестает работать как конденсатор.

Особенностью окисно-полупроводниковых конденсаторов является неизменность их угла потерь в области низких температур и малое снижение емкости при охлаждении, а также их стабильность в частотном ходе.

Предисловие	3
Глава 1. Общие сведения о конденсаторах и их характеристиках	4
1.1. Основные этапы в развитии конденсаторостроения	4
1.2. Классификация конденсаторов	4
1.3. Материалы в конденсаторостроении	6
1.3.1. <i>Проводниковые материалы</i>	6
1.3.2. <i>Электроизоляционные материалы</i>	7
1.3.3. <i>Вспомогательные материалы</i>	8
1.4. Основные свойства и параметры конденсаторов	8
1.4.1. Поляризационные процессы	8
1.4.2. Емкость конденсаторов	10
1.4.3. Зависимость емкости конденсатора от температуры	14
1.4.4. Методы термокомпенсации	15
1.4.5. Электропроводность в конденсаторах	16
1.4.6. Заряд и разряд конденсатора. Явление диэлектрической абсорбции.	19
1.4.7. Индуктивность конденсаторов	24
1.4.8. Потери энергии в конденсаторах	29
1.4.9. Электрическая прочность конденсатора	35
Глава 2. Основы расчета конденсаторов	42
2.1. Основные принципы расчета и расчетное задание	42
2.2. Основы электрического расчета	44
2.2.1. <i>Выбор рабочей напряженности электрического поля</i>	44
2.2.2. <i>Определение толщины изоляции</i>	46
2.2.3. <i>Расчет закраины конденсатора</i>	47
2.2.4. <i>Расчет изоляции между секциями и изоляции от корпуса</i>	48
2.3. Основы теплового расчета конденсаторов	50
2.3.1. <i>Коэффициент теплоотдачи конвекцией</i>	50
2.3.2. <i>Коэффициент теплоотдачи излучением</i>	54
2.3.3. <i>Определение коэффициента теплопроводности</i>	55
2.3.4. <i>Максимальная температура внутри конденсатора</i>	57
2.4. Удельные характеристики конденсатора	63
2.5. Надежность силовых конденсаторов	67
Глава 3. Основные типы конденсаторов	72
3.1. Конденсаторы с газообразным и жидким диэлектриком	72
3.1.1. <i>Воздушные конденсаторы постоянной емкости</i>	73
3.1.2. <i>Воздушные конденсаторы переменной емкости</i>	76
3.1.3. <i>Полупеременные (подстроечные) воздушные конденсаторы</i>	77
3.1.4. <i>Газонаполненные конденсаторы</i>	78
3.1.5. <i>Вакуумные конденсаторы</i>	80
3.1.6. <i>Конденсаторы с жидким диэлектриком</i>	81

3.2. Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком	82
3.2.1. Слюдяные конденсаторы	83
3.2.2. Стеклянные конденсаторы	88
3.2.3. Стеклоэмалевые и стеклокерамические конденсаторы	89
3.2.4. Керамические конденсаторы	90
3.3. Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком	98
3.3.1. Бумажные конденсаторы	99
3.3.2. Бумажные радиоконденсаторы	102
3.3.3. Специальные виды бумажных конденсаторов	102
3.3.4. Силовые бумажные конденсаторы	103
3.3.5. Конденсаторы связи	104
3.3.6. Импульсные бумажно-масляные конденсаторы	105
3.3.7. Электротермические конденсаторы	105
3.3.8. Металлобумажные конденсаторы	106
3.3.9. Конденсаторы на основе неполярных пленок	108
3.3.10. Конденсаторы на основе полярных пленок	110
3.4. Электролитические конденсаторы	110
3.4.1. Жидкостные электролитические конденсаторы	114
3.4.2. Сухие электролитические конденсаторы	115
3.4.3. Неполярные электролитические конденсаторы	116
3.4.4. Танталовые электролитические конденсаторы	117
4. Литература	119

Валерий Иванович Меркулов

ОСНОВЫ КОНДЕНСАТОРОСТРОЕНИЯ

Учебное пособие

Научный редактор канд.тех.наук, доцент В.М. Аникеенко

Редактор Р.Д.Игнатова

Подписано к печати 15.10.2001

Формат 60х84/16. Бумага ксероксная

Плоская печать. Усл.печ.л. 7.2 уч.-изд.л. 6.53.

Тираж 100 экз. Заказ Цена С. 13

ИПФ ТПУ. Лицензия ЛТ №1 от 18.07.94.

Типография ТПУ. 634034, Томск, пр.Ленина, 30