

## Лекция 3

### Конденсаторы

Основа конструкции конденсатора — две токопроводящие обкладки, между которыми находится диэлектрик. Конструкции условного и реальных конденсаторов приведены на рисунке.



Слева — конденсаторы для поверхностного монтажа; справа — конденсаторы для объёмного монтажа; сверху — керамические; снизу — электролитические. На танталовых конденсаторах (слева) полоской обозначен «+», на алюминиевых (справа) маркируют «-».



SMD-конденсатор на плате, макрофотография

Конденсáтор (от лат. condensare — «уплотнять», «сгущать» или от лат. condensatio — «накопление») — двухполюсник с постоянным или переменным значением ёмкости и малой проводимостью; устройство для накопления заряда и энергии электрического поля.

Конденсатор является пассивным электронным компонентом. Ёмкость конденсатора измеряется в фарадах.

### История

В 1745 году в Лейдене немецкий каноник Эвальд Юрген фон Клейст и независимо от него голландский физик Питер ван Мушенбрук изобрели конструкцию-прототип электрического конденсатора — «лейденскую

банку»[2]. Первые конденсаторы, состоящие из двух проводников, разделенных непроводником (диэлектриком), упоминаемые обычно как конденсатор Эпинуса или электрический лист, были созданы ещё раньше[3].

### **Конструкция конденсатора**

Конденсатор является пассивным электронным компонентом[4]. В простейшем варианте конструкция состоит из двух электродов в форме пластин (называемых обкладками), разделённых диэлектриком, толщина которого мала. Практически применяемые конденсаторы имеют много слоёв диэлектрика и многослойные электроды, или ленты чередующихся диэлектрика и электродов, свёрнутые в цилиндр или параллелепипед со скруглёнными четырьмя рёбрами (из-за намотки).

### **Свойства конденсатора**

Конденсатор в цепи постоянного тока может проводить ток в момент включения его в цепь (происходит зарядка или перезарядка конденсатора), по окончании переходного процесса ток через конденсатор не течёт, так как его обкладки разделены диэлектриком. В цепи же переменного тока он проводит колебания переменного тока посредством циклической перезарядки конденсатора, замыкаясь так называемым током смещения.

В рамках метода комплексных амплитуд конденсатор обладает комплексным импедансом

$$\underline{Z} = 1 / j \omega C = -j \omega C = -j 2 \pi f C,$$

где  $j$  — мнимая единица,  $\omega$  — циклическая частота (радиан/с) протекающего синусоидального тока,  $f$  — частота в герцах,  $C$  — ёмкость конденсатора (фарад). Отсюда также следует, что реактивное сопротивление конденсатора равно  $X = 1 / \omega C$ . Для постоянного тока частота равна нулю, следовательно, реактивное сопротивление конденсатора бесконечно (в идеальном случае).

При изменении частоты изменяются диэлектрическая проницаемость диэлектрика и степень влияния паразитных параметров — собственной индуктивности и сопротивления потерь. На высоких частотах любой конденсатор можно рассматривать как последовательный колебательный контур, образуемый ёмкостью  $C$ , собственной индуктивностью  $L_c$  и сопротивлением потерь  $R_n$ .

Резонансная частота конденсатора равна

$$\omega_{рез} = (\sqrt{(CR_c - L_c)}) / CR_c \sqrt{L_c} ,$$

где  $C$  – ёмкость конденсатора,  $R_c$  – сопротивление утечки,  $L_c$  – паразитная индуктивность.

При  $\omega > \omega_{рез}$  конденсатор в цепи переменного тока ведёт себя как катушка индуктивности. Следовательно, конденсатор целесообразно использовать лишь на частотах  $\omega < \omega_{рез}$ , на которых его сопротивление носит ёмкостный характер. Обычно максимальная рабочая частота конденсатора примерно в 2—3 раза ниже резонансной.





Конденсатор может накапливать электрическую энергию. Энергия заряженного конденсатора

$$W_c = CU^2/2 ,$$

где  $U$  — напряжение (разность потенциалов), до которого заряжен конденсатор,  $q$  — электрический заряд.

#### Обозначение конденсаторов на схемах

В России для условных графических обозначений конденсаторов на схемах рекомендуется использовать ГОСТ 2.728-74[5] либо стандарт международной ассоциации IEEE 315—1975:

| Обозначение<br>по ГОСТ 2.728-74   | Описание                                    |
|---|---|
|  | Конденсатор постоянной ёмкости              |
|  | Поляризованный (полярный) конденсатор       |
|  | Подстроечный конденсатор переменной ёмкости |
|  | Варикап                                     |

На электрических принципиальных схемах номинальная ёмкость конденсаторов обычно указывается в микрофарадах ( $1 \text{ мкФ} = 1 \cdot 10^6 \text{ пФ} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ ) и пикофарадах ( $1 \text{ пФ} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$ ), но нередко и в нанофарадах ( $1 \text{ нФ} =$

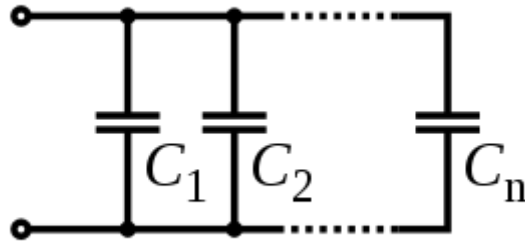
$1 \cdot 10^{-9}$  Ф). При ёмкости не более 0,01 мкФ, ёмкость конденсатора указывают в пикофарадах, при этом допустимо не указывать единицу измерения, то есть постфикс «пФ» опускают. При обозначении номинала ёмкости в других единицах указывают единицу измерения. Для электролитических конденсаторов, а также для высоковольтных конденсаторов на схемах, после обозначения номинала ёмкости, указывают их максимальное рабочее напряжение в вольтах (В) или киловольтах (кВ). Например так: «10 мкФ × 10 В». Для переменных конденсаторов указывают диапазон изменения ёмкости, например, так: «10—180». В настоящее время изготавливаются конденсаторы с номинальными ёмкостями из десятично - логарифмических рядов значений Е3, Е6, Е12, Е24, то есть на одну декаду приходится 3, 6, 12, 24 значения, так, чтобы значения с соответствующим допуском (разбросом) перекрывали всю декаду.

### **Основные параметры Характеристики Ёмкость**

Основной характеристикой конденсатора является его ёмкость, характеризующая способность конденсатора накапливать электрический заряд. В обозначении конденсатора фигурирует значение номинальной ёмкости, в то время как реальная ёмкость может значительно меняться в зависимости от многих факторов. Реальная ёмкость конденсатора определяет его электрические свойства. Так, по определению ёмкости, заряд на обкладке пропорционален напряжению между обкладками ( $q = CU$ ). Типичные значения ёмкости конденсаторов составляют от единиц пикофард до тысяч микрофард. Однако существуют конденсаторы (ионисторы) с ёмкостью до десятков фард.

Ёмкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных металлических пластин площадью  $S$  каждая, расположенных на расстоянии  $d$  друг от друга, в системе СИ выражается формулой  $C = \epsilon_r \epsilon_0 S / d$ , где  $\epsilon_r$  — диэлектрическая проницаемость среды, заполняющая пространство между пластинами,  $\epsilon_0$  — диэлектрическая проницаемость вакуума. Эта формула справедлива, лишь когда  $d$  намного меньше линейных размеров пластин.

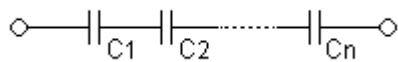
Для получения больших ёмкостей конденсаторы соединяют параллельно. При этом напряжение между обкладками всех конденсаторов одинаково. Общая ёмкость батареи параллельно соединённых конденсаторов равна сумме ёмкостей всех конденсаторов, входящих в батарею.



$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

Если у всех параллельно соединённых конденсаторов расстояние между обкладками и свойства диэлектрика одинаковы, то эти конденсаторы можно представить как один большой конденсатор, разделённый на фрагменты меньшей площади.

При последовательном соединении конденсаторов общая ёмкость батареи последовательно соединённых конденсаторов



всегда меньше минимальной ёмкости конденсатора, входящего в батарею. Однако при последовательном соединении уменьшается возможность пробоя конденсаторов, так как на каждый конденсатор приходится лишь часть разницы потенциалов источника напряжения.

Если площадь обкладок всех конденсаторов, соединённых последовательно, одинакова, то эти конденсаторы можно представить в виде одного большого конденсатора, между обкладками которого находится стопка из пластин диэлектрика всех составляющих его конденсаторов.

### Удельная ёмкость

Конденсаторы также характеризуются удельной ёмкостью — отношением ёмкости к объёму (или массе) диэлектрика. Максимальное значение удельной ёмкости достигается при минимальной толщине диэлектрика, однако при этом уменьшается его напряжение пробоя.

### Плотность энергии

Плотность энергии электролитического конденсатора зависит от конструктивного исполнения. Максимальная плотность достигается у больших конденсаторов, где масса корпуса невелика по сравнению с массой

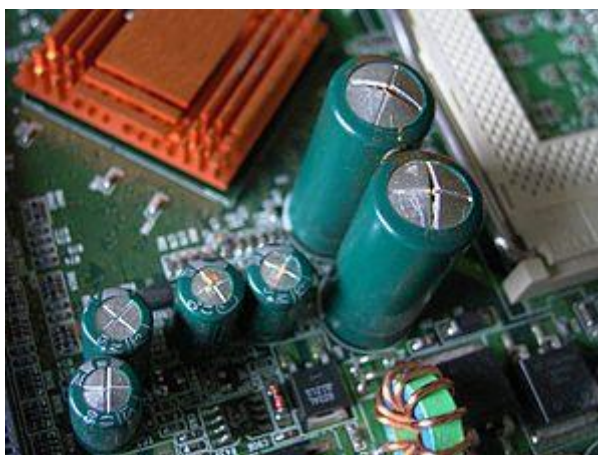
обкладок и электролита. Например, у конденсатора EPCOS B4345 с ёмкостью 12 000 мкФ, максимально допустимым напряжением 450 В и массой 1,9 кг плотность энергии при максимальном напряжении составляет 639 Дж/кг или 845 Дж/л. Особенно важен этот параметр при использовании конденсатора в качестве накопителя энергии, с последующим мгновенным её высвобождением, например, в пушке Гаусса.

### **Номинальное напряжение**

Другой не менее важной характеристикой конденсаторов является номинальное напряжение — значение напряжения, обозначенное на конденсаторе, при котором он может работать в заданных условиях в течение срока службы с сохранением параметров в допустимых пределах.

Номинальное напряжение зависит от конструкции конденсатора и свойств применяемых материалов. Эксплуатационное напряжение на конденсаторе должно быть не выше номинального.

### **Полярность**



Современные конденсаторы, разрушающиеся без взрыва благодаря специальной разрывающейся конструкции верхней крышки. Разрушение возможно из-за нарушения режима эксплуатации (температуры, напряжения, полярности) или старения. Конденсаторы с разорванной крышкой практически неработоспособны и требуют замены, а если она просто вздувшаяся, но ещё не разорвана, то, скорее всего, скоро он выйдет из строя или сильно изменятся параметры, что сделает его использование невозможным.

Многие конденсаторы с оксидным диэлектриком (электролитические) функционируют только при корректной полярности напряжения из-за химических особенностей взаимодействия электролита с диэлектриком. При

обратной полярности напряжения электролитические конденсаторы обычно выходят из строя из-за химического разрушения диэлектрика с последующим увеличением тока, вскипанием электролита внутри и, как следствие, с вероятностью взрыва корпуса.

### **Опасность разрушения (взрыва)**

Взрывы электролитических конденсаторов — довольно распространённое явление. Основной причиной взрывов является перегрев конденсатора, вызываемый в большинстве случаев утечкой или повышением эквивалентного последовательного сопротивления вследствие старения (актуально для импульсных устройств). В современных компьютерах перегрев конденсаторов — частая причина выхода их из строя вследствие близкого расположения с источниками тепла, например, рядом с радиатором охлаждения.

Для уменьшения повреждений других деталей и травматизма персонала в современных конденсаторах большой ёмкости устанавливают вышибной предохранительный клапан или выполняют надсечку корпуса (часто её можно заметить в виде креста или в форме букв Х, К или Т на торце цилиндрического корпуса, иногда, на больших конденсаторах, она покрыта пластиком). При повышении внутреннего давления вышибается пробка клапана или корпус разрушается по насечке, пары электролита выходят в виде едкого газа и, даже, брызг жидкости. При этом разрушение корпуса конденсатора происходит без взрыва, разбрасывания обкладок и сепаратора.



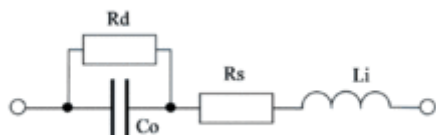
Взорвавшийся электролитический конденсатор на печатной плате жидкокристаллического монитора. Видны волокна бумажного сепаратора обкладок и развернувшиеся фольговые алюминиевые обкладки.

Старые электролитические конденсаторы выпускались в герметичных корпусах и в конструкции их корпусов не предусматривалась взрывобезопасность. Скорость разлёта осколков при взрыве корпуса устаревших конденсаторов может быть достаточной для того, чтобы травмировать человека.

В отличие от электролитических, взрывоопасность оксиднополупроводниковых (танталовых) конденсаторов связана с тем, что такой конденсатор фактически представляет собой взрывчатую смесь: в качестве горючего служит тантал, а в качестве окислителя — двуокись марганца, и оба этих компонента в конструкции конденсатора перемешаны в виде тонкого порошка. При пробое конденсатора или при его случайной переполусовке выделившееся при протекании тока тепло инициирует реакцию между данными компонентами, протекающую в виде сильной вспышки с хлопком, что сопровождается разбрасыванием искр и осколков корпуса. Сила такого взрыва довольно велика, особенно у крупных конденсаторов, и способна повредить не только соседние радиоэлементы, но и плату. При тесном расположении нескольких конденсаторов возможен прожог корпусов соседних конденсаторов, что приводит к одновременному взрыву всей группы.

### Паразитные параметры

Реальные конденсаторы, помимо ёмкости, обладают также собственными последовательным и параллельным сопротивлением и индуктивностью. С достаточной для практики точностью, эквивалентную схему реального конденсатора можно представить как показано на рисунке, где все двухполюсники подразумеваются идеальными.



Эквивалентная схема реального конденсатора и некоторые формулы.

|       |   |               |                  |                |
|-------|---|---------------|------------------|----------------|
| $C_0$ | —   | собственная   | ёмкость          | конденсатора;  |
| $R_d$ | —   | сопротивление | изоляции         | конденсатора;  |
| $R_s$ | —   | эквивалентное | последовательное | сопротивление; |
| $L_i$ | — эквивалентная последовательная индуктивность. |               |                  |                |



## **Электрическое сопротивление изоляции диэлектрика конденсатора, поверхностные утечки и саморазряд**

Сопротивление изоляции — это сопротивление конденсатора постоянному току, определяемое соотношением  $R_d = U / I_{ут}$ , где  $U$  — напряжение, приложенное к конденсатору,  $I_{ут}$  — ток утечки.

Из-за тока утечки, протекающего через слой диэлектрика между обкладками и по поверхности диэлектрика, предварительно заряженный конденсатор с течением времени теряет заряд (саморазряд конденсатора). Часто, в спецификациях на конденсаторы, сопротивление утечки определяют через постоянную времени  $T$  саморазряда конденсатора, которая численно равна произведению ёмкости на сопротивление утечки:

$$T = R_d C_0$$

$T$  — это время, за которое начальное напряжение на конденсаторе, неподключенном ко внешней цепи, уменьшится в  $e$  раз.

Хорошие конденсаторы с полимерными и керамическими диэлектриками имеют постоянные времени саморазряда достигающие многих сотен тысяч часов.

### **Эквивалентное последовательное сопротивление — $R_s$**

Эквивалентное последовательное сопротивление (ЭПС) обусловлено, главным образом, электрическим сопротивлением материала обкладок и выводов конденсатора и контактов между ними, а также учитывает потери в диэлектрике. Обычно ЭПС возрастает с увеличением частоты тока, протекающего через конденсатор, вследствие поверхностного эффекта.

В большинстве практических случаев этим параметром можно пренебречь, но, иногда (например, в случае использования электролитических конденсаторов в фильтрах импульсных блоков питания), достаточно малое его значение существенно для надёжности и устойчивости работы устройства. В электролитических конденсаторах, где один из электродов является электролитом, этот параметр при эксплуатации со временем деградирует, вследствие испарения растворителя из жидкого электролита и изменения его химического состава, вызванного взаимодействием с металлическими обкладками, что происходит относительно быстро в низкосортных изделиях («конденсаторная чума»).

Некоторые схемы (например, стабилизаторы напряжения) критичны к диапазону изменения ЭПС конденсаторов в своих цепях. Это связано с тем, что при проектировании таких устройств инженеры учитывают этот параметр в фазочастотной характеристике (ФЧХ) обратной связи стабилизатора. Существенное изменение со временем ЭПС применённых конденсаторов изменяет ФЧХ, что может привести к снижению запаса устойчивости контуров авторегулирования, и, даже, к самовозбуждению.

Существуют специальные приборы (ESR-метр (англ.)) для измерения этого достаточно важного параметра конденсатора, по которому можно часто определить пригодность его дальнейшего использования в определённых целях. Этот параметр, кроме собственно ёмкости (ёмкость — это основной параметр) — часто имеет решающее значение в исследовании состояния старого конденсатора и принятия решения, стоит ли использовать его в определённой схеме, или он прогнозируемо выйдет за пределы допустимых отклонений.

### **Эквивалентная последовательная индуктивность — $L_i$**

Эквивалентная последовательная индуктивность обусловлена, в основном, собственной индуктивностью обкладок и выводов конденсатора. Результатом этой распределенной паразитной индуктивности является превращение конденсатора в колебательный контур с характерной собственной частотой резонанса. Эта частота может быть измерена и обычно указывается в параметрах конденсатора либо в явном виде, либо в виде рекомендованной максимальной рабочей частоты.

### **Саморазряд**

Предварительно заряженный конденсатор с течением времени теряет запасённую энергию за счёт тока утечки, протекающего через слой диэлектрика между обкладками. Часто в справочниках на конденсаторы приводится постоянная времени саморазряда конденсатора, численно равная произведению ёмкости на сопротивление утечки. Это время, за которое начальное напряжение на отключенном конденсаторе уменьшится в  $e$  раз.

### **Тангенс угла диэлектрических потерь**

Тангенс угла диэлектрических потерь — отношение вещественной части и мнимой части комплексного сопротивления конденсатора.

Потери энергии в конденсаторе определяются потерями в диэлектрике и обкладках. При протекании переменного тока через конденсатор векторы напряжения и тока сдвинуты на угол ( $\varphi = \pi/2 - \delta$ ), где  $\delta$  — угол диэлектрических потерь. При отсутствии потерь  $\delta = 0$ . Тангенс угла потерь определяется отношением активной мощности  $P_a$  к реактивной  $P_r$  при синусоидальном напряжении определённой частоты. Величина, обратная  $\tan \delta$ , называется добротностью конденсатора. Термины добротности и тангенса угла потерь применяются также для катушек индуктивности и трансформаторов.

### **Температурный коэффициент ёмкости (ТКЕ)**

ТКЕ — относительное изменение ёмкости при изменении температуры окружающей среды на один градус Цельсия (кельвин). ТКЕ определяется так:

$$ТКЕ = \Delta C / C \Delta T$$

где  $\Delta C$  — изменение ёмкости, вызванное изменением температуры на  $\Delta T = T_{\text{макс}} - T_{\text{мин}}$ .

ТКЕ применяется для характеристики конденсаторов с практически линейной зависимостью ёмкости от температуры. Однако ТКЕ указывается в спецификациях не для всех типов конденсаторов.

Для конденсаторов, имеющих существенно нелинейную зависимость ёмкости от температуры и для конденсаторов с большими изменениями ёмкости от воздействия температуры окружающей среды в спецификациях нормируются относительное изменение ёмкости в рабочем диапазоне температур или в виде графика зависимости ёмкости от температуры.

### **Диэлектрическая абсорбция**

Если заряженный конденсатор быстро разрядить до нулевого напряжения путём подключения низкоомной нагрузки, а затем снять нагрузку и наблюдать за напряжением на выводах конденсатора, то мы увидим, что напряжение на обкладках снова появится как если бы мы разрядили конденсатор не до нуля. Это явление получило название диэлектрическая абсорбция (диэлектрическое поглощение). Конденсатор ведёт себя так, словно параллельно ему подключено множество последовательных RC-цепочек с различной постоянной времени. Интенсивность проявления этого эффекта зависит в основном от свойств диэлектрика конденсатора.

Подобный эффект можно наблюдать практически на всех типах диэлектриков. В электролитических конденсаторах он особенно ярок и является следствием химических реакций между электролитом и обкладками. У конденсаторов с твердым диэлектриком (например, керамических и слюдяных) эффект связан с остаточной поляризацией диэлектрика. Наименьшим диэлектрическим поглощением обладают конденсаторы с неполярными диэлектриками: тефлон (фторопласт), полистирол, полипропилен и т. п.

Данный эффект зависит от времени зарядки конденсатора, времени закорочения, иногда от температуры. Количественное значение абсорбции принято характеризовать коэффициентом абсорбции, который определяется в стандартных условиях.

Особое внимание в связи с указанным эффектом следует уделять измерительным цепям постоянного тока: прецизионным интегрирующим усилителям, устройствам выборки-хранения, некоторым схемам на переключаемых конденсаторах.

### **Паразитный пьезоэффект**

Многие керамические материалы, используемые в качестве диэлектрика в конденсаторах (например, титанат бария, обладающий очень высокой диэлектрической проницаемостью в не слишком сильных электрических полях) проявляют пьезоэффект — способность генерировать напряжение на обкладках при механических деформациях. Это характерно для конденсаторов с пьезоэлектрическими диэлектриками. Пьезоэффект ведёт к возникновению электрических помех, в устройствах, где использованы такие конденсаторы при воздействии акустического шума или вибрации на конденсатор. Это нежелательное явление иногда называют «микрофонным эффектом».

Также подобные диэлектрики проявляют и обратный пьезоэффект — при работе в цепи переменного напряжения происходит знакопеременная деформация диэлектрика, генерирующая акустические колебания, порождающие дополнительные электрические потери в конденсаторе.

### **Самовосстановление**

Конденсаторы с металлизированным электродом (бумажный и пленочный диэлектрик) обладают важным свойством самовосстановления электрической прочности после пробоя диэлектрика. Механизм самовосстановления

закljučается в отгорании металлизации электрода после локального пробоя диэлектрика посредством микродугового электрического разряда.

### **Классификация конденсаторов**



Слюдяной герметичный конденсатор в металлостеклянном корпусе типа «СГМ» для навесного монтажа

Основная классификация конденсаторов проводится по типу диэлектрика в конденсаторе. Тип диэлектрика определяет основные электрические параметры конденсаторов: сопротивление изоляции, стабильность ёмкости, величину потерь и др.

По виду диэлектрика различают:

Конденсаторы вакуумные (между обкладками находится вакуум).

Конденсаторы с газообразным диэлектриком.

Конденсаторы с жидким диэлектриком.

Конденсаторы с твёрдым неорганическим диэлектриком: стеклянные (стеклоэмалевые, стеклокерамические, стеклоплёночные), слюдяные, керамические, тонкослойные из неорганических плёнок.

Конденсаторы с твёрдым органическим диэлектриком: бумажные, металlobумажные, плёночные, комбинированные — бумажноплёночные, тонкослойные из органических синтетических плёнок.

Электролитические и оксидно-полупроводниковые конденсаторы. Такие конденсаторы отличаются от всех прочих типов, прежде всего, большой удельной ёмкостью. В качестве диэлектрика используется оксидный слой на металлическом аноде. Вторая обкладка (катод) — это или электролит (в электролитических конденсаторах), или слой полупроводника (в оксидно-полупроводниковых), нанесённый непосредственно на оксидный слой. Анод изготавливается, в зависимости от типа конденсатора, из алюминиевой,

ниобиевой или танталовой фольги или спечённого порошка. Время наработки на отказ типичного электролитического конденсатора 3000—5000 часов при максимально допустимой температуре, качественные конденсаторы имеют время наработки на отказ не менее 8000 часов при температуре 105 °С[6]. Рабочая температура — основной фактор, влияющий на продолжительность срока службы конденсатора. Если нагрев конденсатора незначителен из-за потерь в диэлектрике, обкладках и выводах, (например, при использовании его во времязадающих цепях при небольших токах или в качестве разделительных), можно принять, что интенсивность отказов снижается вдвое при снижении рабочей температуры на каждые 10 °С вплоть до +25 °С. При работе конденсаторов в импульсных сильноточных цепях (например, в импульсных источниках питания) такая упрощённая оценка надёжности конденсаторов некорректна и расчёт надёжности более сложен[7].

Твердотельные конденсаторы — вместо традиционного жидкого электролита используется специальный токопроводящий органический полимер или полимеризованный органический полупроводник. Время наработки на отказ около 50 000 часов при температуре 85 °С. ЭПС меньше чем у жидко-электролитических и слабо зависит от температуры. Не взрываются.



Керамический подстроечный конденсатор

Кроме того, конденсаторы различаются по возможности изменения своей ёмкости:

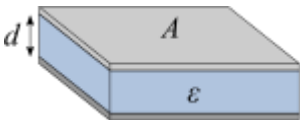
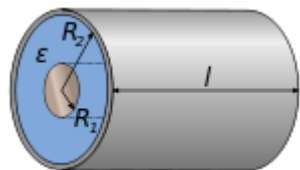
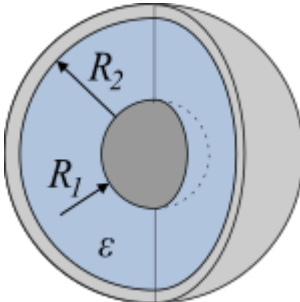
Постоянные конденсаторы — основной класс конденсаторов, не меняющие своей ёмкости (кроме как в течение срока службы).

Переменные конденсаторы — конденсаторы, которые допускают изменение ёмкости в процессе функционирования аппаратуры. Управление ёмкостью может осуществляться механически, электрическим напряжением (вариконды, варикапы) и температурой (термоконденсаторы). Применяются, например, в радиоприёмниках для перестройки частоты резонансного контура.

Подстроечные конденсаторы — конденсаторы, ёмкость которых изменяется при разовой или периодической регулировке и не изменяется в процессе

функционирования аппаратуры. Их используют для подстройки и выравнивания начальных ёмкостей сопрягаемых контуров, для периодической подстройки и регулировки цепей схем, где требуется незначительное изменение ёмкости.

Также различают конденсаторы по форме обкладок: плоские, цилиндрические, сферические и другие.

| Название                   | Электрическое поле                               | Схема  |
|----------------------------|--|--|
| Плоский конденсатор        | $E = Q \varepsilon_0 \varepsilon_r A$            |   |
| Цилиндрический конденсатор | $E(r) = Q 2 \pi r_1 \varepsilon_0 \varepsilon_r$ |   |
| Сферический конденсатор    | $E(r) = Q 4 \pi r^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r$ |  |

В зависимости от назначения можно условно разделить конденсаторы на конденсаторы общего и специального назначения. Конденсаторы общего назначения используются практически в большинстве видов и классов аппаратуры. Традиционно к ним относят наиболее распространённые низковольтные конденсаторы, к которым не предъявляются особые требования. Все остальные конденсаторы являются специальными. К ним относятся высоковольтные, импульсные, помехоподавляющие, дозиметрические, пусковые и другие конденсаторы.



12 пФ, 20 кВ вакуумный конденсатор постоянной ёмкости.

Пример конденсатора специального назначения

### **Применение конденсаторов и их работа**

Конденсаторы находят применение практически во всех областях электротехники. Конденсаторы (совместно с катушками индуктивности и/или резисторами) используются для построения различных цепей с частотно-зависимыми свойствами, в частности, фильтров, цепей обратной связи, колебательных контуров и т. п.

Во вторичных источниках электропитания конденсаторы применяются для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения.

При быстром разряде конденсатора можно получить импульс большой мощности, например, в фотовспышках, электромагнитных ускорителях, импульсных лазерах с оптической накачкой, генераторах Маркса, (ГИН; ГИТ), генераторах Кокрофта-Уолтона и т. п.

Так как конденсатор способен длительное время сохранять заряд, то его можно использовать в качестве элемента памяти (см. DRAM, Устройство выборки и хранения).

Конденсатор может использоваться как двухполюсник, обладающий реактивным сопротивлением, для ограничения силы переменного тока в электрической цепи (см. Балласт).

Процесс заряда и разряда конденсатора через резистор (см. RC-цепь) или генератор тока занимает определённое время, что позволяет использовать конденсатор во времязадающих цепях, к которым не предъявляются высокие требования временной и температурной стабильности (в схемах генераторов одиночных и повторяющихся импульсов, реле времени и т. п.).

В электротехнике конденсаторы используются для компенсации реактивной мощности и в фильтрах высших гармоник.



Конденсаторы способны накапливать большой заряд и создавать большую напряжённость на обкладках, которая используется для различных целей, например, для ускорения заряженных частиц или для создания кратковременных мощных электрических разрядов (генератор Ван де Граафа).

Измерительный преобразователь малых перемещений: малое изменение расстояния между обкладками очень заметно сказывается на ёмкости конденсатора.

Измерительный преобразователь влажности воздуха, древесины (изменение состава диэлектрика приводит к изменению ёмкости).

Измерителя уровня жидкости. Непроводящая жидкость заполняет пространство между обкладками конденсатора, и ёмкость конденсатора меняется в зависимости от уровня.

Фазосдвигающего конденсатора. Такой конденсатор необходим для пуска, а в некоторых случаях и работы однофазных асинхронных двигателей. Также он может применяться для пуска и работы трёхфазных асинхронных двигателей при питании от однофазного напряжения.

Аккумуляторов электрической энергии (см. Ионистор). В этом случае на обкладках конденсатора должно быть достаточно постоянные значения напряжения и тока разряда. При этом сам разряд должен быть значительным по времени. В настоящее время идут опытные разработки электромобилей и гибридов с применением конденсаторов. Также существуют некоторые модели трамваев, в которых конденсаторы применяются для питания тяговых электродвигателей при движении по обесточенным участкам.

## **Маркировка конденсаторов**

Маркировка советских и российских конденсаторов

Существуют две системы обозначения советских/российских конденсаторов: буквенная (старая) и цифровая (новая).

Старая система обозначений

Буквенная система распространяется на конденсаторы, разработанные до 1960 года. В этой системе первая буква К означает конденсатор, вторая — тип диэлектрика (Б — бумажный, С — слюдяной, К — керамический, Э — электролитический и так далее...), третья — конструктивные особенности (герметичность исполнения или условия эксплуатации). Для упрощения

системы обозначений часто первую букву К пропускают, оставляя вторую и последующие.

#### Новая система обозначений

В соответствии с новой (цифровой) системой маркировки конденсаторы делятся на группы по виду диэлектрика, назначению и варианту исполнения. Согласно этой системе, первая буква «К» означает «конденсатор», далее следует цифра, обозначающая вид диэлектрика, и буква, указывающая, в каких цепях может использоваться конденсатор; после неё стоит номер разработки или буква, указывающая вариант конструкции.