

Пассивные электронные компоненты Конденсаторы

КУРС ЛЕКЦИЙ

ООО «РАЗУМНЫЙ ДОМ»

ЧУ ПО «СОЦИАЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОЛЛЕДЖ»

ПРЕПОДАВАТЕЛЬ: БОРИСОВ АЛЕКСЕЙ АЛЬБЕРТОВИЧ

RAZUMDOM



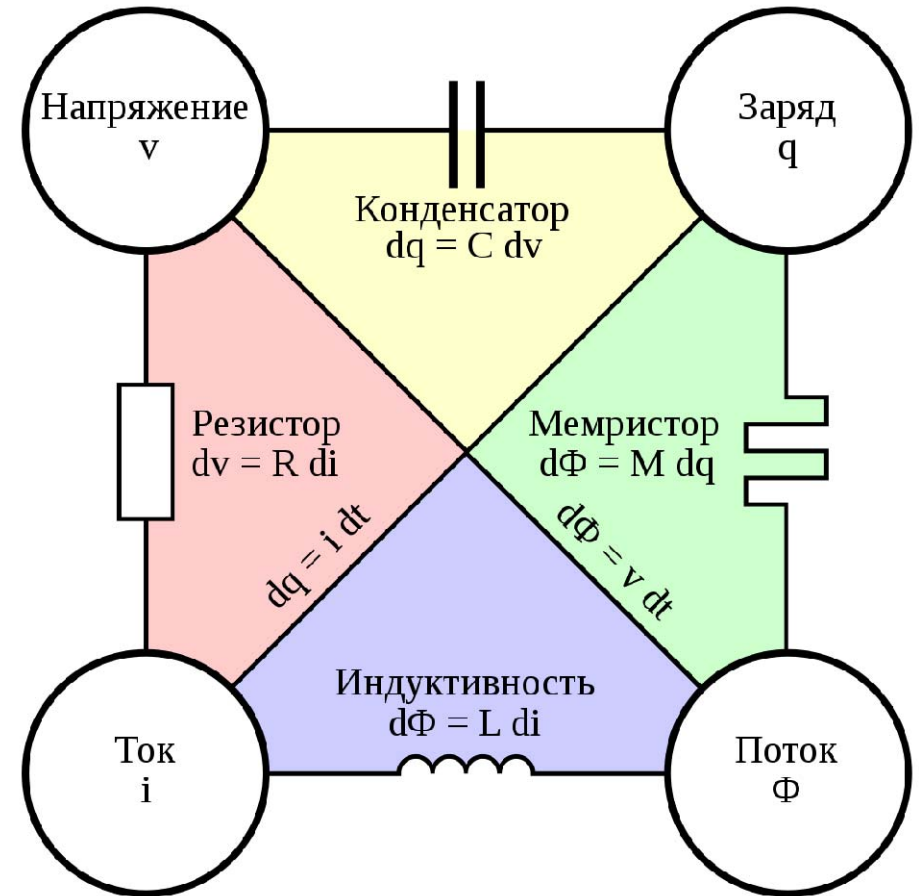
Пассивные компоненты

Компоненты делятся на 3
большие группы:

- 1. Резисторы**
- 2. Конденсаторы**
- 3. Дроссели, трансформаторы**

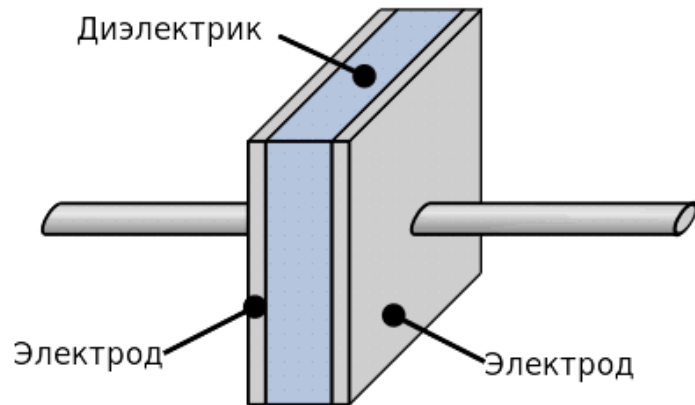
Конденсаторы делятся еще на
несколько групп:

- 1. Постоянные**
- 2. Переменные**
- 3. Нелинейные**



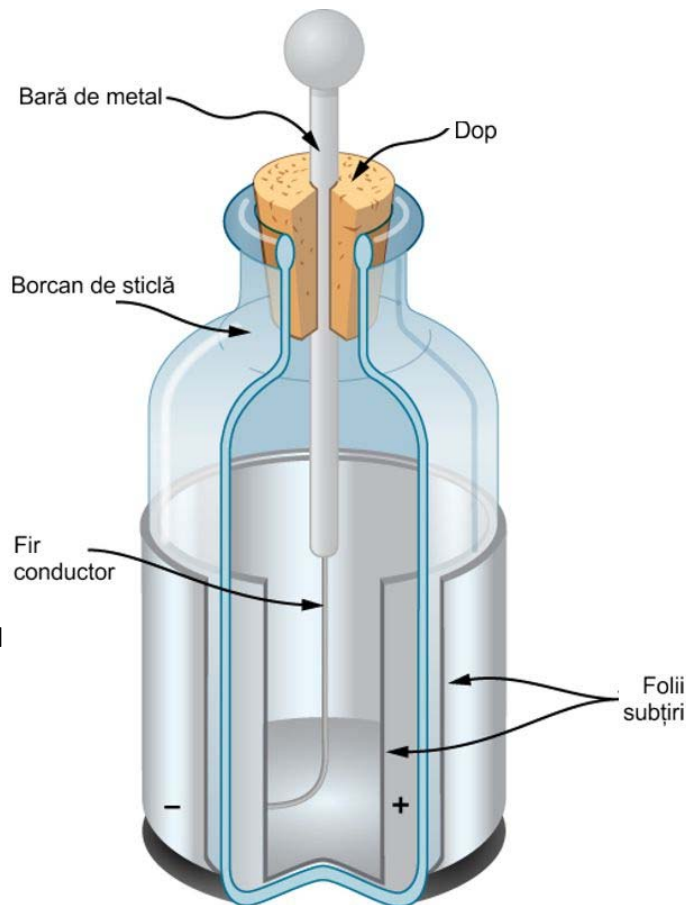
Конденсатор

Конденсатор (от лат. condensare — «уплотнять», «сгущать» или от лат. condensatio — «накопление») — электронный компонент, представляющий собой двухполюсник с постоянным или переменным значением ёмкости и малой проводимостью; устройство для накопления заряда и энергии электрического поля. Конденсатор является пассивным электронным компонентом. В СИ 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». Первые конденсаторы, состоящие из двух проводников, разделенных непроводником (диэлектриком), упоминаемые обычно как конденсатор Эпинуса или электрический лист. Изобретение лейденской банки стимулировало изучение электричества, в частности, скорости его распространения и электропроводящих свойств некоторых материалов. Выяснилось, что металлы и вода — лучшие проводники. Благодаря Лейденской банке удалось впервые искусственным путём получить электрическую искру.

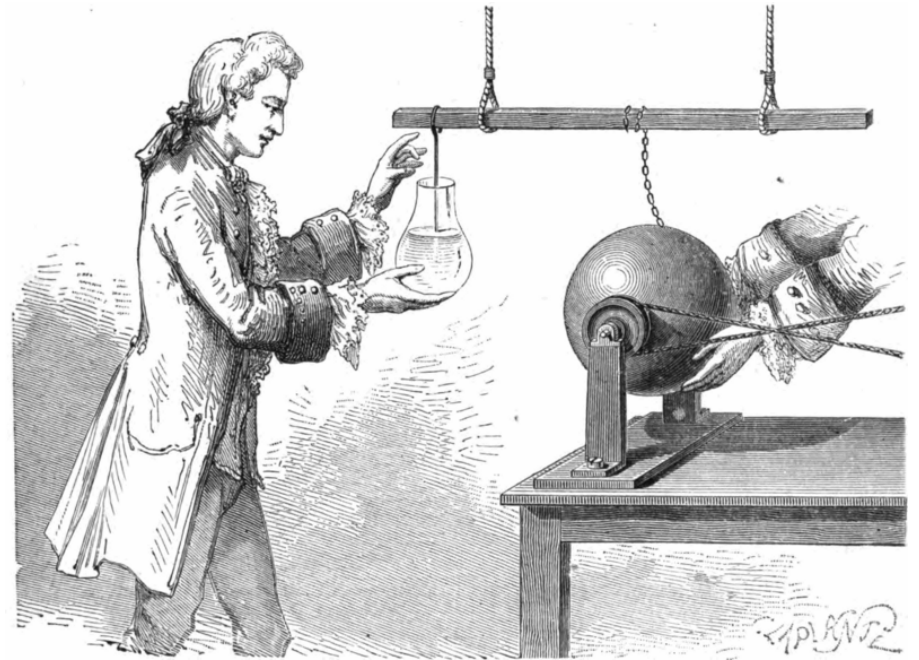


Лейденская банка — первый электрический конденсатор.

Лейденская банка позволяла накапливать и хранить сравнительно большие заряды, порядка микрокулона.

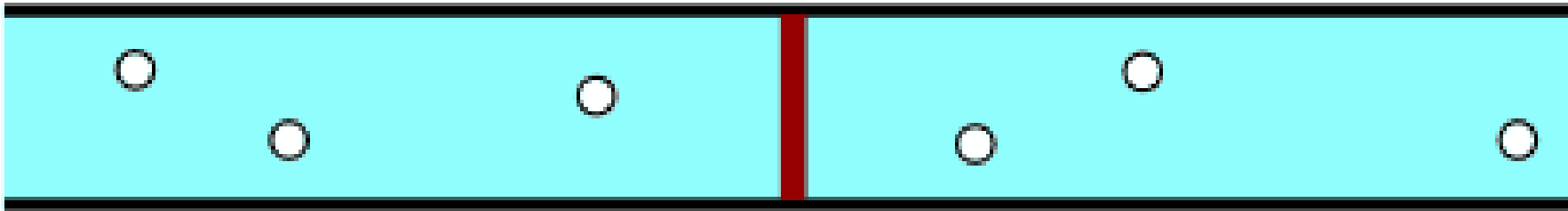
Этот конденсатор имеет форму банки, то есть цилиндра с более или менее широким горлом или же просто цилиндра, обыкновенно стеклянного. Банка оклеена внутри и снаружи листовым оловом (наружная и внутренняя обкладки) примерно до $\frac{2}{3}$ её высоты и прикрыта деревянной крышкой. Банка может не иметь внутренней обкладки, но тогда в ней должна быть жидкость, например вода; банка может не иметь и внешней обкладки, но в таком случае при зарядении надо её обхватить ладонями; такова и была банка в первоначальном виде, когда её устроил (1745) голландский физик Мушенбрук и когда впервые испытал удар от разряда банки лейденский гражданин Кюнеус.

В современном мире лейденская банка применяется только для демонстраций, как компонент электрофорной машины, в электротехнике она вытеснена куда более удобными и ёмкими высоковольтными конденсаторами закрытого типа.

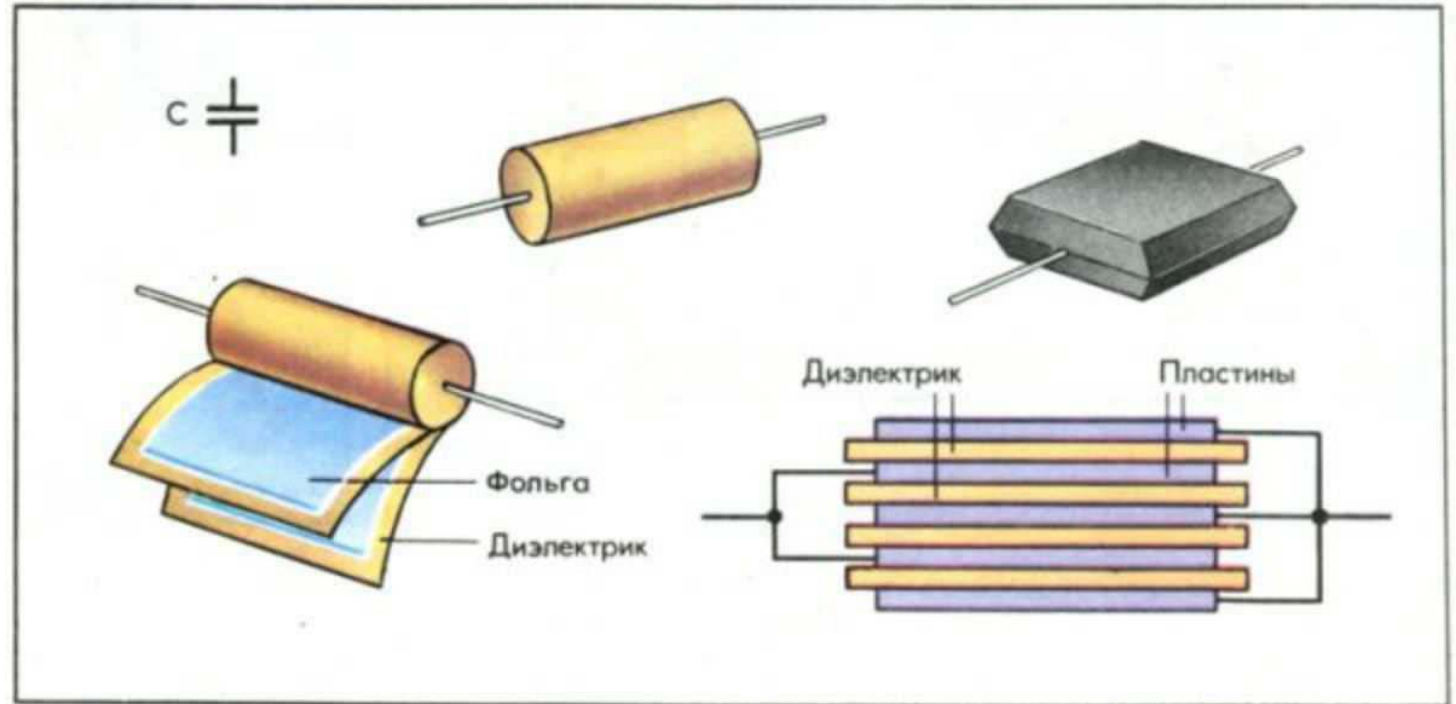


Метод гидравлических аналогий

В методе **гидравлических аналогий** конденсатор — это гибкая мембрана, вставленная в трубу. Анимация демонстрирует мембрану, которая растягивается и сокращается под действием потока воды, что аналогично заряду и разряду конденсатора под действием электрического тока.



Конденсатор является пассивным электронным компонентом. В простейшем варианте конструкция состоит из двух электродов в форме пластин (называемых обкладками), разделённых диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок. 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).



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.

С точки зрения метода комплексных амплитуд конденсатор обладает комплексным импедансом

$$\hat{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = -\frac{j}{\omega C} = -\frac{j}{2\pi f C},$$

где j — мнимая единица,

ω — циклическая частота (радиан/с) протекающего синусоидального тока,

f — частота в герцах,

C — ёмкость конденсатора (фарад).

Отсюда также следует, что реактивное сопротивление конденсатора равно $X_C = 1/\omega C$. Для постоянного тока частота равна нулю, следовательно, для постоянного тока реактивное сопротивление конденсатора формально бесконечно.

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:

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

При $f > f_p$ конденсатор в цепи переменного тока ведёт себя как катушка индуктивности. Поэтому конденсатор целесообразно использовать лишь на частотах $f < f_p$, на которых его реактивное сопротивление носит ёмкостный характер. Обычно максимальная рабочая частота конденсатора примерно в 2—3 раза ниже резонансной.

Конденсатор может накапливать электрическую энергию. Энергия заряженного конденсатора:

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C},$$

где U — напряжение (разность потенциалов), до которого заряжен конденсатор,
 q — электрический заряд на одной из обкладок.

Условное графическое обозначение УГО конденсатора

В России для условных графических обозначений конденсаторов на схемах рекомендуется использовать **ГОСТ 2.728-74** либо стандарт международной ассоциации **IEEE 315—1975**.

В настоящее время изготавливаются конденсаторы с номинальными ёмкостями из рядов значений E3, E6, E12, E24, то есть на одну декаду приходится 3, 6, 12, 24 значения, так, чтобы значения с соответствующим допуском (разбросом) перекрывали всю декаду.

Наименование	УГО	Расшифровка УГО
Конденсатор постоянной ёмкости		Общее обозначение. Рекомендуемый размер. Конденсатор с позиционным обозначением в схеме C1 и ёмкостью 0,1 микрофарады. C2 – оксидный полярный конденсатор ёмкостью 4,7 мкФ и рабочим напряжением 12 В. C3 – конденсатор неполярный C4 – конденсатор пусковой C5 – конденсатор пусковой
Конденсатор переменной ёмкости		C6 – двойной конденсатор переменной ёмкости от 5 до 180 пФ.
Конденсатор подстроечный		C7 – конденсатор с изменяемой ёмкостью от 4 до 15 пФ. C8 – то же, с указанием ротора.
Конденсатор саморегулируемый		CK1 – термистор CU1 – варистор

Условное графическое обозначение УГО конденсатора

На электрических принципиальных схемах номинальная ёмкость конденсаторов обычно указывается в микрофарадах ($1 \text{ мкФ} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$) и пикофарадах ($1 \text{ пФ} = 1 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}$), и в нанофарадах ($1 \text{ нФ} = 1 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$). При ёмкости менее $0,01 \text{ мкФ}$, 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: « $10 \text{ мкФ} \times 10 \text{ В}$ ». Для переменных конденсаторов указывают диапазон изменения ёмкости, например так: « $10-180$ ».



Основные характеристики и параметры конденсаторов

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 пикофарад до тысяч микрофарад. Однако существуют конденсаторы (ионисторы) с ёмкостью до десятков фарад.

Ёмкость плоского конденсатора, состоящего из двух параллельных металлических пластин площадью S каждая, расположенных на расстоянии d друг от друга, в системе СИ выражается формулой:

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d},$$

где ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, заполняющей пространство между пластинами (в вакууме равна единице),

ϵ_0 — электрическая постоянная, численно равная **$8,854187817 \cdot 10^{-12}$ Ф/м**.

Эта формула справедлива, лишь когда d намного меньше линейных размеров пластин.

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.

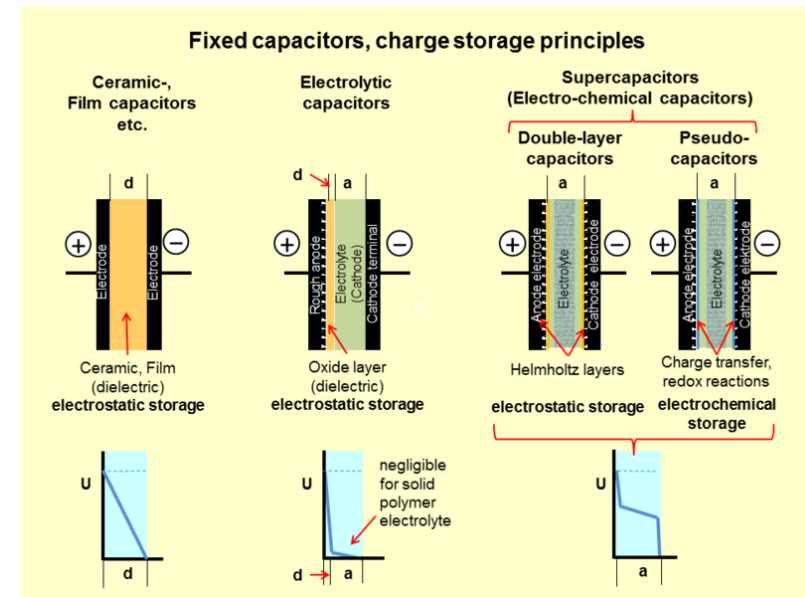
Основные характеристики и параметры конденсаторов

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.



Основные характеристики и параметры конденсаторов

Полярность

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.



Основные характеристики и параметры конденсаторов

Паразитные параметры или Эквивалентная схема

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.

$$Z(\omega) = j \cdot \omega \cdot Li + Rs + \frac{Rd \cdot \left(\frac{1}{j \cdot \omega \cdot Co} \right)}{Rd + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot Co}}$$

$$Z(\omega) = \frac{Rs \cdot Co^2 \cdot Rd^2 \cdot \omega^2 + Rd + Rs}{Co^2 \cdot Rd^2 \cdot \omega^2 + 1} + \frac{\omega \cdot (Li \cdot Co^2 \cdot Rd^2 \cdot \omega^2 - Co \cdot Rd^2 + Li)}{Co^2 \cdot Rd^2 \cdot \omega^2 + 1} \cdot j$$

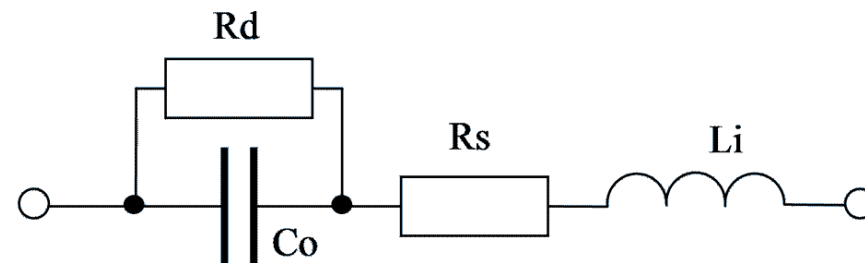
$$|Z| = \sqrt{Rs^2 + Li^2 \cdot \omega^2 + \frac{Rd^2 - 2 \cdot Co \cdot Li \cdot Rd^2 \cdot \omega^2 + 2 \cdot Rs \cdot Rd}{Co^2 \cdot Rd^2 \cdot \omega^2 + 1}}$$

Резонансная частота ω_0 :

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{Co \cdot Rd^2 - Li}}{Co \cdot \sqrt{Li \cdot Rd}}$$

Модуль импеданса на резонансной частоте:

$$|Zo| = \frac{Li + Co \cdot Rd \cdot Rs}{Co \cdot Rd}$$



Основные характеристики и параметры конденсаторов

Электрическое сопротивление изоляции диэлектрика конденсатора, поверхностные утечки и саморазряд

Сопротивление изоляции — это сопротивление конденсатора постоянному току, определяемое соотношением:

$$R_d = U / I_{ym},$$

где U — напряжение, приложенное к конденсатору;

I_{ym} — 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:

$$T = R_d C_0$$

где T — время, за которое начальное напряжение на конденсаторе, неподключённом ко внешней цепи, уменьшится в e раз.

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

Основные характеристики и параметры конденсаторов

Эквивалентное последовательное сопротивление — R_s

Эквивалентное последовательное сопротивление 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 (напр., 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.

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) для измерения этого достаточно важного параметра конденсатора, по которому можно часто определить пригодность его дальнейшего использования в определённых целях. Этот параметр, кроме ёмкости (ёмкость — это основной параметр), часто имеет решающее значение в исследовании состояния старого конденсатора и принятия решения, стоит ли использовать его в определённой.

Основные характеристики и параметры конденсаторов

Эквивалентная последовательная индуктивность

Эквивалентная последовательная индуктивность L_1 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.

Тангенс угла диэлектрических потерь

Тангенс угла диэлектрических потерь — отношение мнимой и вещественной части комплексной диэлектрической проницаемости.

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\varepsilon_{\text{im}}}{\varepsilon_{\text{re}}} = \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_a}.$$

Потери энергии в конденсаторе определяются потерями в диэлектрике и обкладках. При протекании переменного тока через конденсатор векторы напряжения и тока сдвинуты на угол $\varphi = \frac{\pi}{2} - \delta$,

где δ — угол диэлектрических потерь. При отсутствии потерь $\delta = 0$. Тангенс угла потерь определяется отношением активной мощности **P_a** к реактивной **P_p** при синусоидальном напряжении определённой частоты. Величина, обратная **$\operatorname{tg} \delta$** , называется добротностью конденсатора. Термины добротности и тангенса угла потерь применяются также для катушек индуктивности и трансформаторов.

Основные характеристики и параметры конденсаторов

Температурный коэффициент ёмкости (ТКЕ)

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

$$ТКЕ = \frac{\Delta C}{C \Delta T}.$$

где ΔC — изменение ёмкости, вызванное изменением температуры на ΔT .

Таким образом, изменение ёмкости от температуры (при не слишком больших изменениях температуры) выражается линейной функцией:

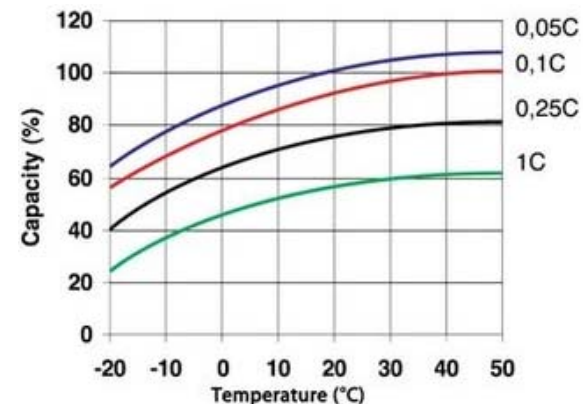
$$C(T) = C_{н.у.} + ТКЕ \cdot C_{н.у.} \cdot \Delta T,$$

где ΔT — изменение температуры в °С или К относительно нормальных условий, при которых специфицировано значение ёмкости,

$C_{н.у.}$ — ёмкость при нормальных условиях.

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

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.

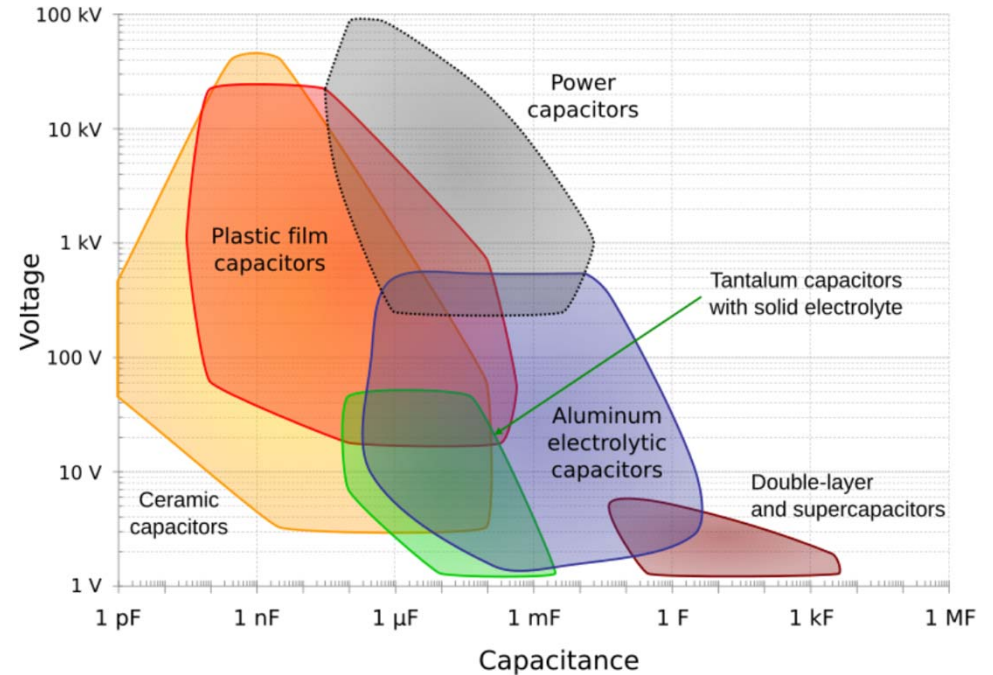


Основные характеристики и параметры конденсаторов

Диапазон емкости и напряжения

Емкость варьируется от пикофарадов до нескольких сотен Фарадов. Номинальное напряжение может достигать 100 киловольт. Как правило, емкость и напряжение зависят от физических размеров и стоимости.

У разных типов конденсаторов есть свой ограниченный диапазон ёмкостей и напряжений. На рисунке изображен график областей зависимости напряжений и ёмкостей в которые попадают определенные типы конденсаторов. Шкала на графике логарифмическая.



Основные характеристики и параметры конденсаторов

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 оказывается, что напряжение на обкладках снова начинает появляться, 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 этого эффекта зависит в основном от свойств диэлектрика конденсатора.

Подобный эффект можно наблюдать практически на всех типах диэлектриков. В электролитических конденсаторах он особенно сильный 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 диэлектрической абсорбцией обладают конденсаторы с неполярными диэлектриками: тефлон (фторопласт), полистирол, полипропилен и т. п.

Величина эффекта зависит от времени зарядки конденсатора, времени закорочивания, иногда от температуры. Количественное значение абсорбции принято характеризовать коэффициентом абсорбции, который определяется в стандартных условиях измерения, описанных в нормативной документации. Существует несколько стандартов для измерения диэлектрической абсорбции, различающихся в методиках измерения.

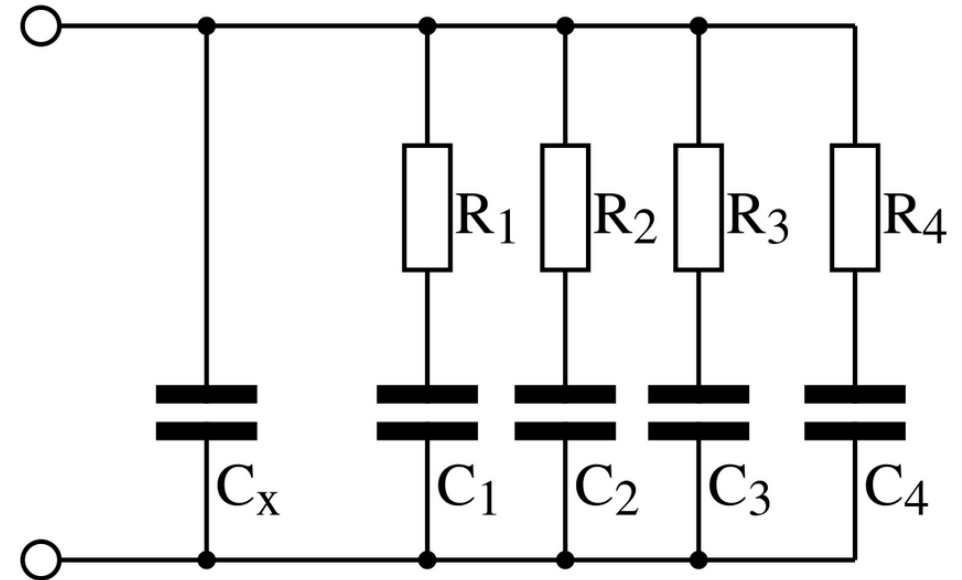
По стандарту **EN 60384-1** для измерения диэлектрической абсорбции конденсатор заряжается до номинального рабочего напряжения и выдерживается в течение 60 минут, затем разряжается в течение 10 секунд через резистор сопротивлением 5 Ом. После отключения разрядного резистора и 15-минутной выдержки измеряют напряжение на конденсаторе. Величина этого напряжения указывается в процентах относительно исходного напряжения.

Основные характеристики и параметры конденсаторов

Диэлектрическая абсорбция

Эквивалентная схема конденсатора, моделирующая диэлектрическую абсорбцию. После кратковременного закорачивания выводов конденсатора дополнительные виртуальные конденсаторы не успевают разрядиться, так как включены через виртуальные резисторы, затем перезаряжают основной эквивалентный конденсатор, что выражается в медленном нарастании напряжения на выводах конденсатора после кратковременного закорачивания.

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

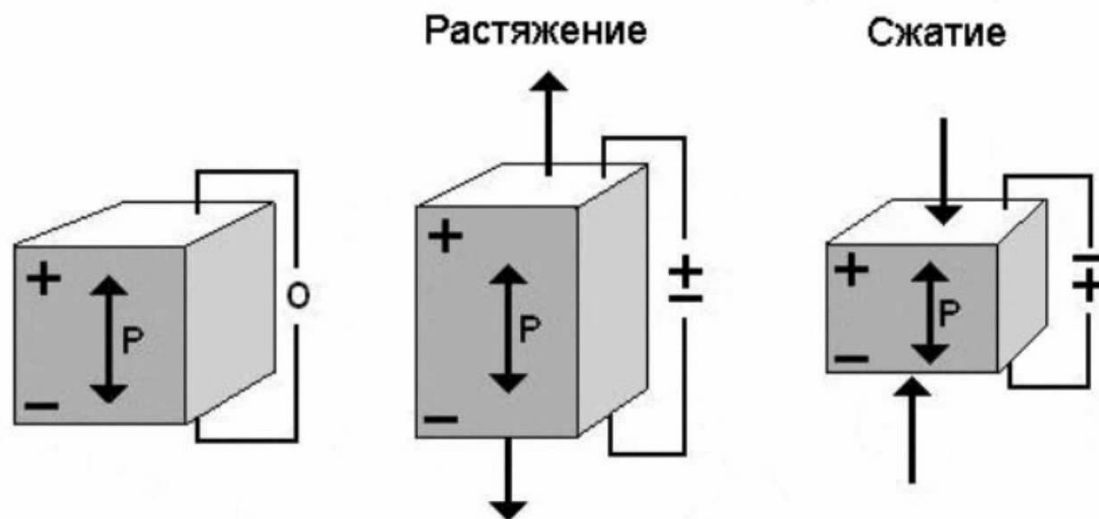


Основные характеристики и параметры конденсаторов

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**».

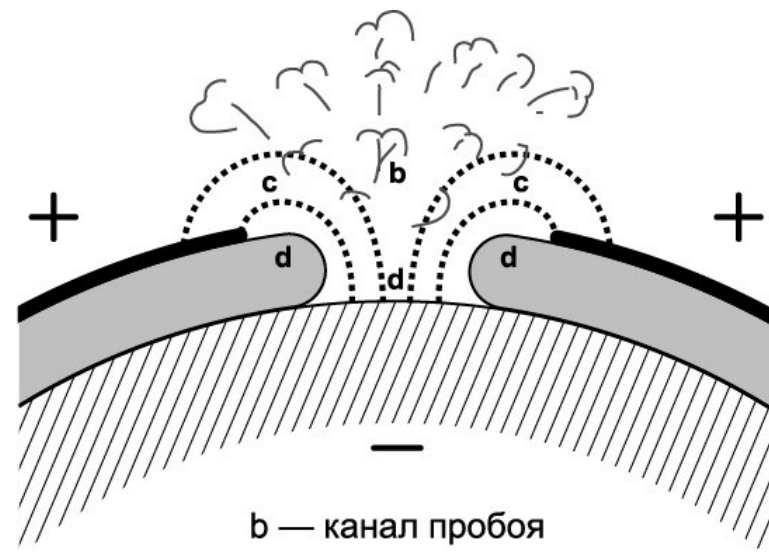
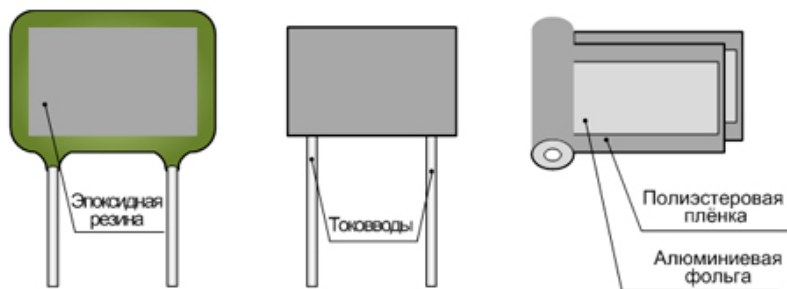
Также подобные диэлектрики проявляют и обратный **пьезоэффект** — при работе в цепи переменного напряжения происходит знакопеременная деформация диэлектрика, генерирующая акустические колебания, порождающие дополнительные электрические потери в конденсаторе.



Основные характеристики и параметры конденсаторов

Самовосстановление

Конденсаторы с металлизированным электродом (бумажный и пленочный диэлектрик) обладают важным свойством самовосстановления электрической прочности после пробоя диэлектрика. Механизм самовосстановления заключается в отгорании металлизации электрода после локального пробоя диэлектрика посредством микродугового электрического разряда.



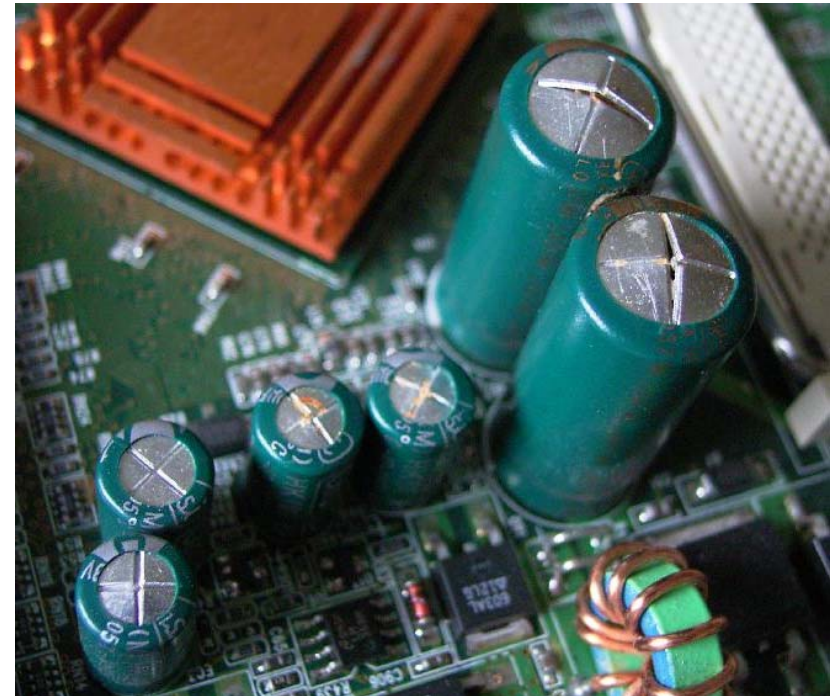
b — канал пробоя
c — течение тока
d — деметаллизированная площадка

Основные характеристики и параметры конденсаторов

Опасность разрушения (взрыва)

Основной причиной взрывов является перегрев конденсатора, вызываемый в большинстве случаев утечкой или повышением эквивалентного последовательного сопротивления вследствие старения. 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 X, Y, K или T на торце цилиндрического корпуса, иногда, на крупногабаритных конденсаторах, она покрыта пластиком). При повышении внутреннего давления вышибается пробка клапана или корпус разрушается по надсечке, пары электролита выходят в виде едкого газа и даже брызг жидкости. При этом разрушение корпуса конденсатора происходит без взрыва, разбрасывания обкладок и сепаратора.

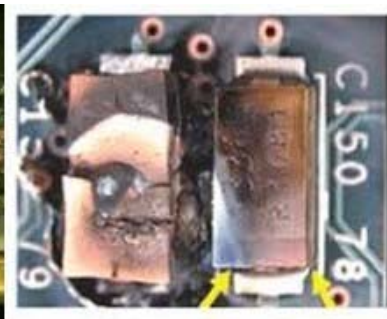


Основные характеристики и параметры конденсаторов

Опасность разрушения (взрыва)

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

В отличие от электролитических, взрывоопасность танталовых (оксидно-полупроводниковых) 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 изменении полярности напряжения, 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.



Классификация конденсаторов

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

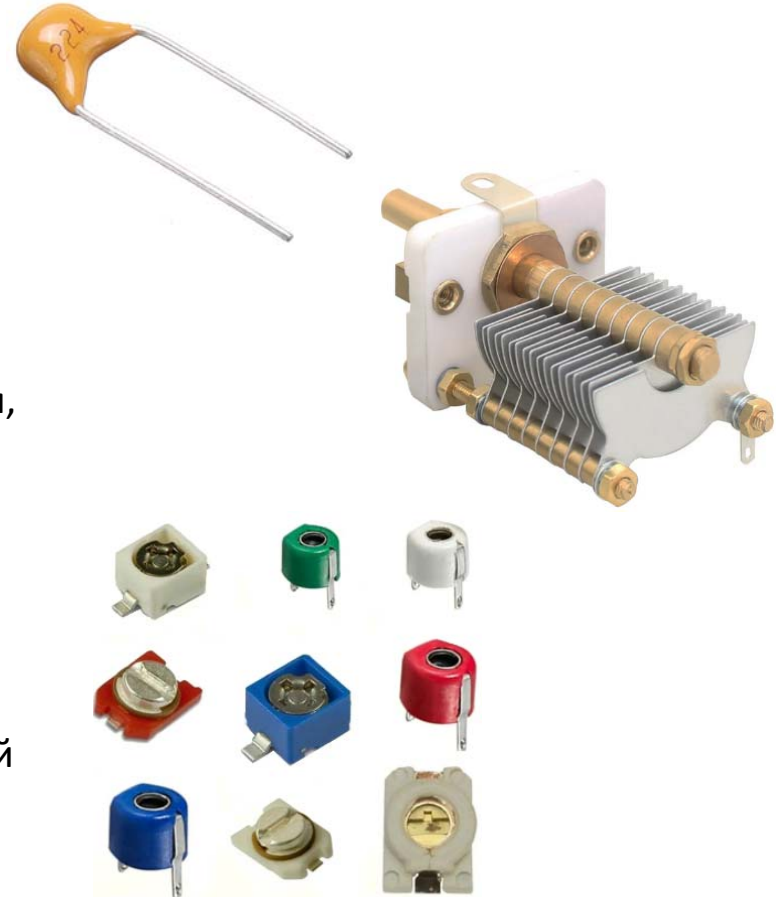
По виду диэлектрика различают:

- *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 большой удельной ёмкостью. В качестве диэлектрика используется оксидный слой на металлическом аноде. Вторая обкладка (катод) — это электролит .
- *Твердотельные конденсаторы* — вместо традиционного жидкого электролита используется специальный токопроводящий органический полимер или полимеризованный органический полупроводник.
- *Тонкоплёночные конденсаторы*

Классификация конденсаторов

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.



Классификация конденсаторов

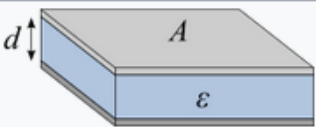
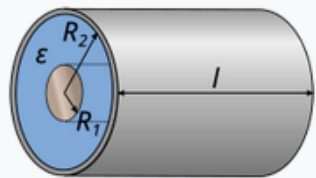
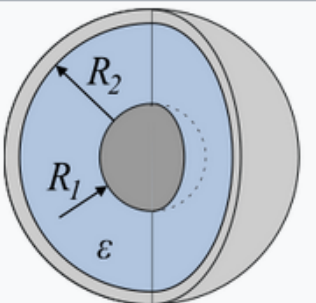
В зависимости от назначения можно разделить конденсаторы на конденсаторы общего и специального назначения.

- *Конденсаторы общего назначения* используются практически в большинстве видов и классов аппаратуры. К ним относят наиболее распространённые низковольтные конденсаторы, к которым не предъявляются особые требования.
- *Специальные конденсаторы* - все остальные конденсаторы. К ним относятся:
 - *высоковольтные,*
 - *импульсные,*
 - *помехоподавляющие,*
 - *дозиметрические,*
 - *пусковые*
 - *и другие конденсаторы.*

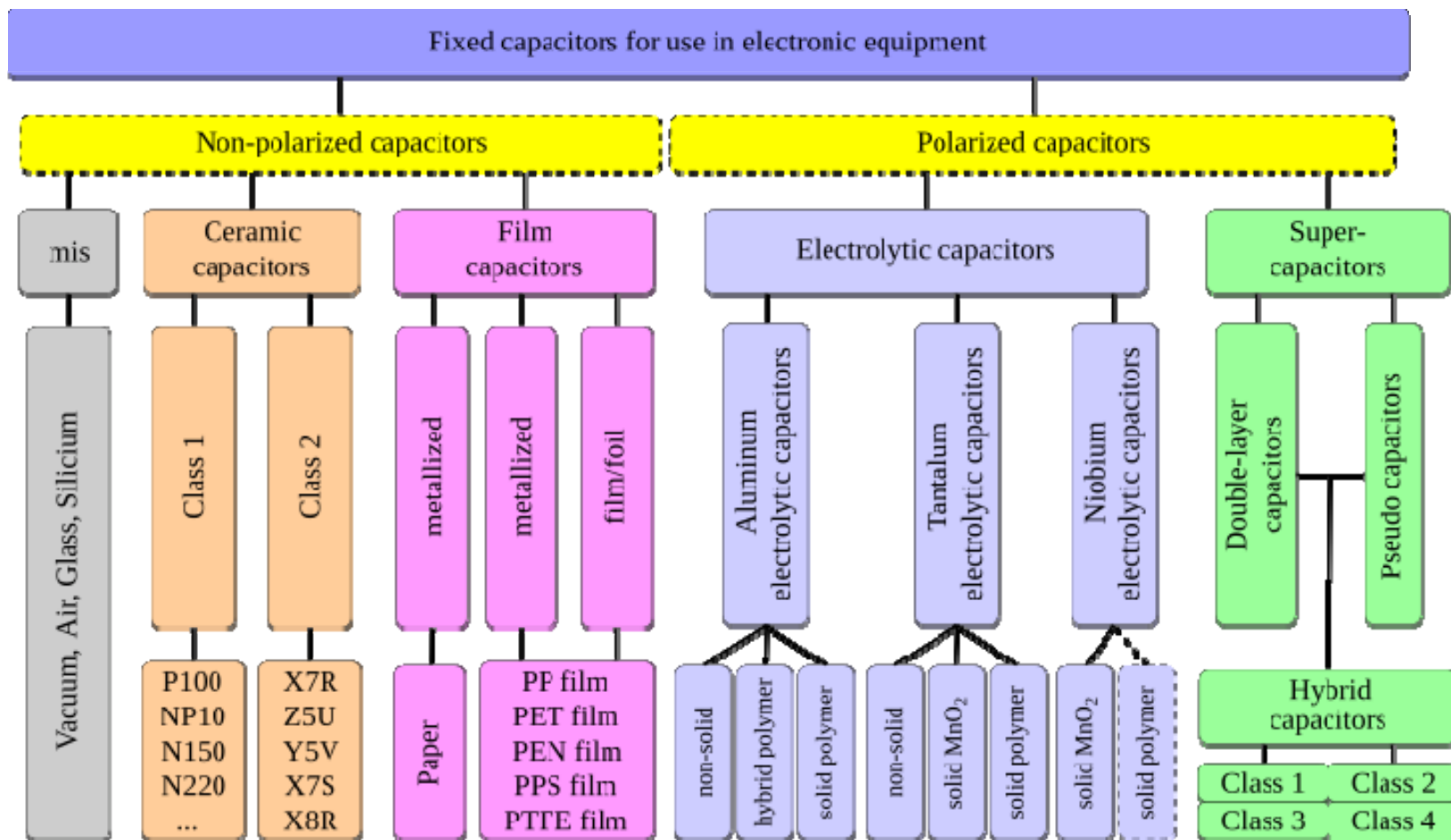


Классификация конденсаторов

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

Название	Ёмкость	Электрическое поле	Схема
Плоский конденсатор	$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d}$	$E = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}$	
Цилиндрический конденсатор	$C = 2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r \frac{l}{\ln(R_2/R_1)}$	$E(r) = \frac{Q}{2\pi r l \varepsilon_0 \varepsilon_r}$	
Сферический конденсатор	$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)^{-1}$	$E(r) = \frac{Q}{4\pi r^2 \varepsilon_0 \varepsilon_r}$	
	$C = 4\pi\varepsilon_0\varepsilon_r R_1$		

Типы конденсаторов постоянной ёмкости



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Вакуумные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

Вакуумные конденсаторы используют стеклянные или керамические колбы с концентрическими цилиндрическими электродами.

Особенности / применения:

Чрезвычайно малые потери. Используются для мощных высоковольтных радиочастотных задач, таких как индукционный нагрев, где даже малые потери приводят к чрезмерному нагреву самого конденсатора. При ограниченном токе искры могут обладать самовосстановлением.

Недостатки:

Очень высокая цена, хрупкость, большой размер, низкая ёмкость.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Стеклянные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

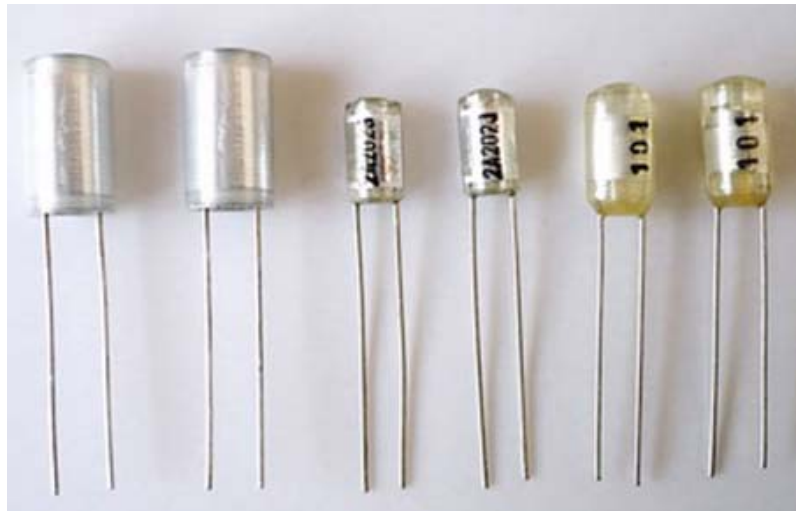
Стекло

Особенности / применения:

Аналогичны слюдяным. Стабильность и частотные характеристики лучше, чем у слюдяных. Очень надёжные, очень стабильные, стойкие к радиации.

Недостатки:

Высокая цена.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Температурно-компенсированные керамические конденсаторы

Используемый диэлектрик:

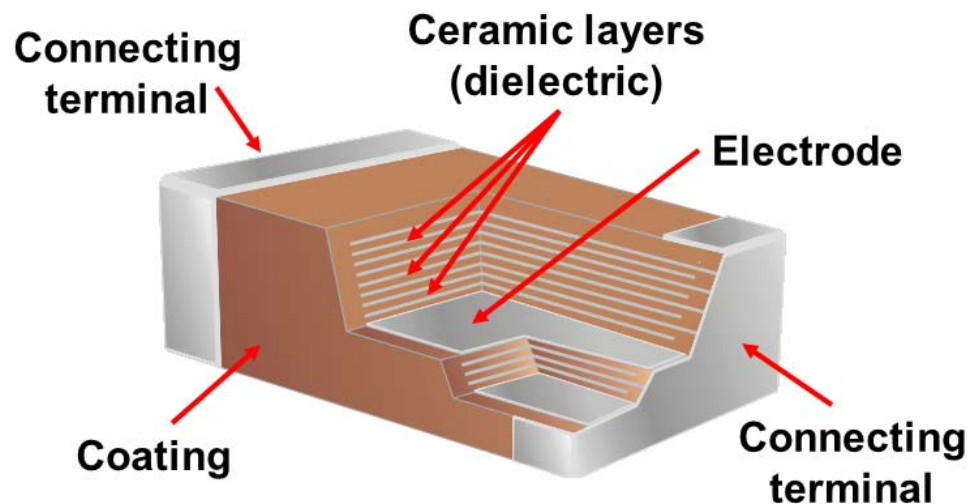
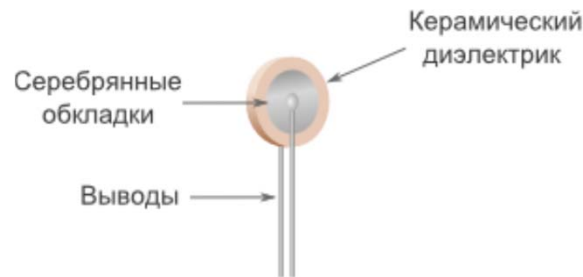
Смесь сложных соединений титанатов

Особенности / применения:

Дешёвые, миниатюрные, обладают превосходными высокочастотными характеристиками и хорошей надёжностью. Предсказуемое линейное изменение ёмкости относительно температуры. Имеются изделия, выдерживающие до 15 кВ.

Недостатки:

Изменение ёмкости при различном приложенном напряжении, частоте, подвержены старению.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Керамические конденсаторы с высокой диэлектрической постоянной

Используемый диэлектрик:

Диэлектрики, основанные на титанате бария

Особенности / применения:

Миниатюрнее температурно-компенсированных конденсаторов из-за большей диэлектрической постоянной. Доступны для напряжений вплоть до 50 киловольт.

Недостатки:

Обладают меньшей температурной стабильностью, ёмкость значительно изменяется при различном приложенном напряжении.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Масляные конденсаторы переменного тока

Используемый диэлектрик:

Промасленная бумага

Особенности / применения:

В основном разрабатывались для обеспечения очень больших ёмкостей для промышленного применения в цепях переменного тока, выдерживая при этом большие токи и высокие пиковые напряжения частотой силовой питающей сети. В их задачи входит пуск и работа электрических моторов переменного тока, разделение фаз, коррекция коэффициента мощности, стабилизация напряжения, работа с контрольным оборудованием и т. д.

Недостатки:

Ограничены низкой рабочей частотой, поскольку на высоких частотах имеют высокие диэлектрические потери.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Масляные конденсаторы постоянного тока

Используемый диэлектрик:

Бумага или её комбинация с ПЭТ

Особенности / применения:

Разработаны для работы при постоянном токе для фильтрации, удвоения напряжения, предотвращения образования дуги, как проходные и разделительные конденсаторы

Недостатки:

При наличии пульсаций требуют уменьшения рабочего напряжения согласно предоставленным производителем графикам. Обладают большими размерами в сравнении с аналогами с полимерными диэлектриками.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Бумажные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

Бумага/пропитанная бумага

Особенности / применения:

Пропитанная бумага широко использовалась в старых конденсаторах. В качестве пропитки использовался воск, масло или эпоксидная смола. Некоторые подобные конденсаторы до сих пор применяются для работы при высоком напряжении, но в большинстве случаев теперь вместо них используют плёночные конденсаторы.

Недостатки:

Большой размер. Большая гигроскопичность, из-за чего они поглощают влагу из воздуха даже при наличии пластикового корпуса и пропитки. Поглощённая влага ухудшает их характеристики, повышая диэлектрические потери и понижая сопротивление изоляции.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Металлизированные бумажные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

Бумага

Особенности / применения:

Меньший размер, чем у бумажно-фольговых конденсаторов

Недостатки:

Подходят только для слаботочных применений. Вместо них стали широко применяться металлизированные плёночные конденсаторы.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Энергонакопительные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

Конденсаторная крафт-бумага, пропитанная касторовым маслом или схожей жидкостью с высокой диэлектрической постоянной, и пластинки из фольги

Особенности / применения:

Разработаны для работы в импульсном режиме с высоким током разряда. Лучше переносят изменение полярности напряжения, чем многие полимерные диэлектрики. Обычно применяются в импульсных лазерах, генераторах Маркса, для импульсной сварки, при электромагнитной формовке и иных задачах, требующих использования импульсов большой мощности.

Недостатки:

Имеют большой размер и массу. Их энергоёмкость значительно меньше, чем у конденсаторов, использующих полимерные диэлектрики. Не способны к самолечению. Отказ подобного конденсатора может быть катастрофичным из-за большого объёма накопленной энергии.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Полиэтилентерефталатные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

Полиэтилентерефталатная плёнка

Особенности / применения:

Меньше, чем бумажные или полипропиленовые конденсаторы со схожими характеристиками. Могут использовать полосы фольги, металлизированную плёнку или их комбинации. ПЭТ конденсаторы почти полностью заменили бумажные для задач, где требуется работа с прямым (постоянным) током. Имеют рабочие напряжения вплоть до 60 киловольт при постоянном токе, а рабочую температуру до 125 °С. Обладают невысокой гигроскопичностью.

Недостатки:

Температурная стабильность ниже, чем у бумажных. Могут применяться при низкочастотном переменном токе, но непригодны при высокочастотном из-за чрезмерного нагрева диэлектрика.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Полиамидные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

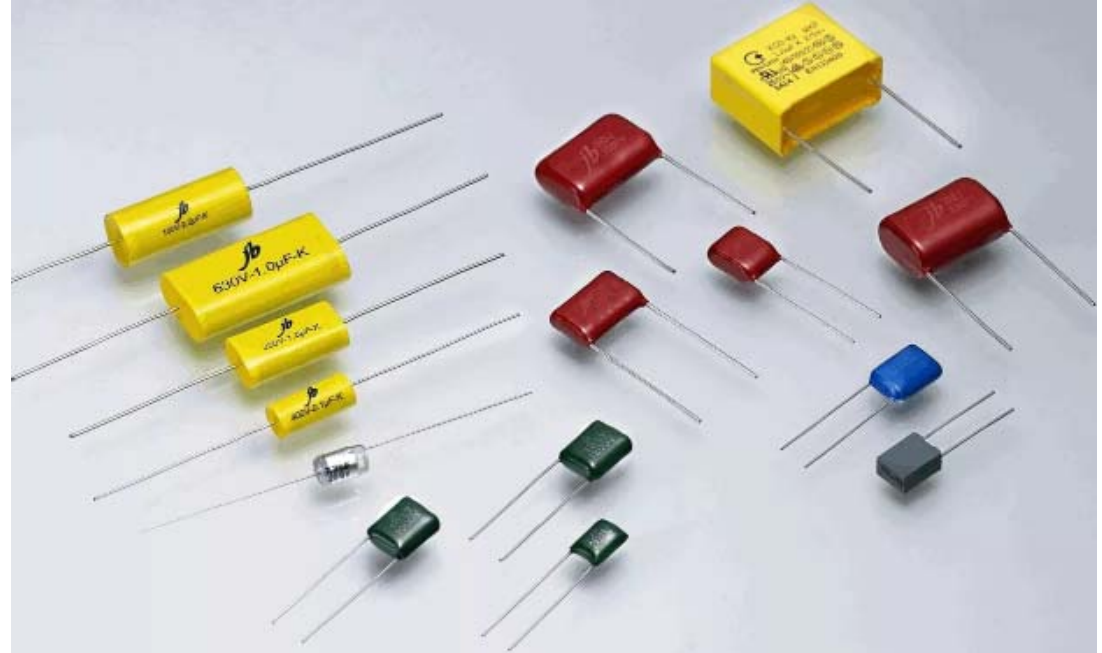
Полиамид

Особенности / применения:

Рабочая температура до 200 °С. Высокое сопротивление изоляции, хорошая стабильность, малый тангенс угла потерь.

Недостатки:

Большие размеры и высокая цена.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Каптоновые конденсаторы

Используемый диэлектрик:

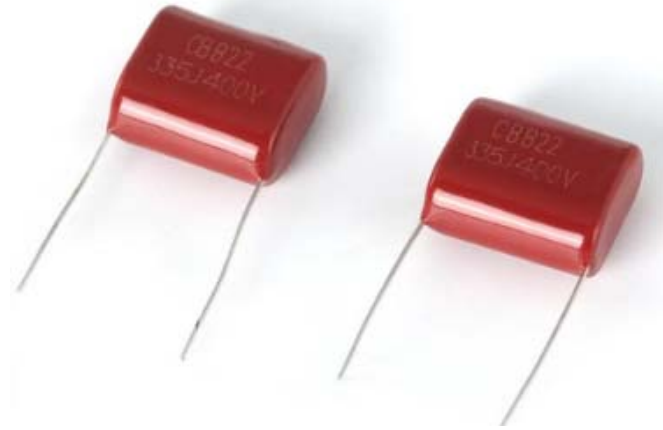
Полиимидная плёнка марки Каптон

Особенности / применения:

Аналогичны ПЭТ, но обладают значительно более высокой рабочей температурой (вплоть до 250 °С).

Недостатки:

Дороже ПЭТ. Температурная стабильность ниже, чем у бумажных конденсаторов. Также могут применяться только при низкочастотном переменном токе, так как при высоких частотах происходит сильный нагрев диэлектрика.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Поликарбонатные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

Поликарбонат

Особенности / применения:

Имеют лучшее сопротивление изоляции, тангенс угла потерь и диэлектрическую адсорбцию в сравнении с полистирольными конденсаторами. Обладают лучшей влагостойкостью. Температурный коэффициент примерно ± 80 ppm. Выдерживают полное рабочее напряжение на всём температурном диапазоне (от $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $125\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Недостатки:

Максимальная рабочая температура ограничена на уровне $125\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Полисульфоновые конденсаторы

Используемый диэлектрик:

Полисульфон

Особенности / применения:

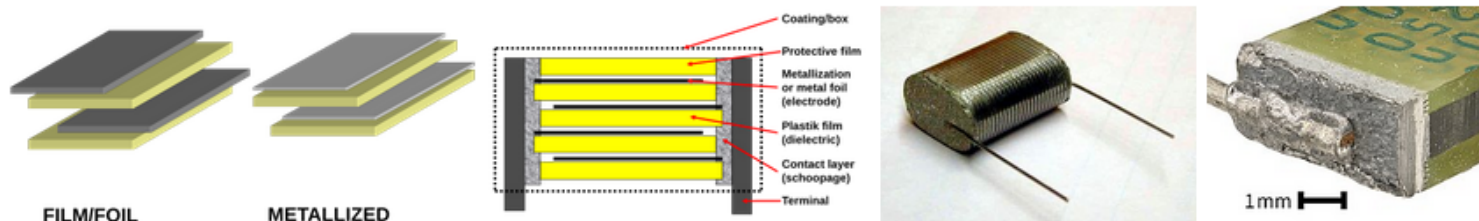
Аналогичны поликарбонатным. Могут выдерживать полное номинальное напряжение на сравнительно высоких температурах. Поглощение влаги около 0,2 %, что ограничивает их стабильность.

Недостатки:

Малая доступность и высокая стоимость.



Внутренние устройства пленочных конденсаторов



Схематическое изображение для сравнения внутренних компонентов пленочных и металлизированных пленочных конденсаторов

Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Полипропиленовые конденсаторы

Используемый диэлектрик: Полипропилен

Особенности / применения:

Чрезвычайно низкий тангенс угла потерь, более высокая диэлектрическая прочность, чем у поликарбонатных и ПЭТ конденсаторов. Низкая гигроскопичность и высокое сопротивление изоляции. Могут использовать полоски фольги, металлизированную плёнку или их комбинации. Плёнка совместима с технологией самовосстановления, повышающей надёжность.

Могут работать на высоких частотах, в том числе при большой мощности, например, для индукционного нагрева (часто вместе с водяным охлаждением), благодаря очень низким диэлектрическим потерям. При более высоких ёмкостях и рабочем напряжении, например от 1 до 100 мкФ и напряжением до 440 В переменного тока, могут применяться как пусковые для работы с некоторыми типами однофазных электрических моторов.

Недостатки:

Более чувствительны к повреждениям от кратковременных перенапряжений или переполюсовке, чем пропитанные маслом бумажные конденсаторы.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Полистирольные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

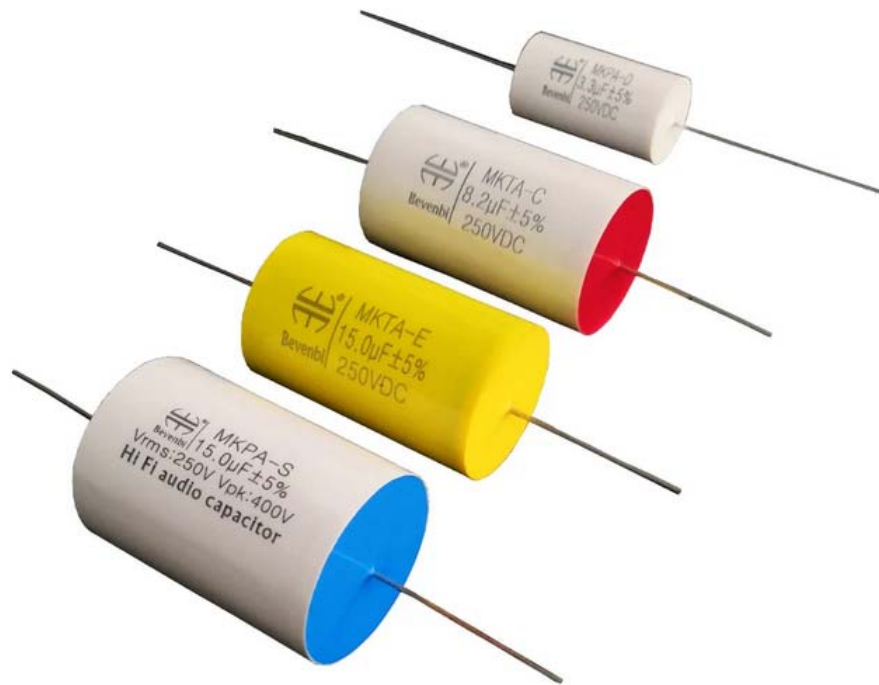
Полистирол

Особенности / применения:

Отличные плёночные высокочастотные конденсаторы общего применения. Имеют отличную стабильность, высокую влагостойкость и малый отрицательный температурный коэффициент, позволяющий использовать их для компенсации положительного температурного коэффициента других компонентов. Идеальны для маломощных высокочастотных и прецизионных аналоговых задач.

Недостатки:

Максимальная рабочая температура ограничена 85 °С. Сравнительно большие по размеру.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Фторопластовые конденсаторы

Используемый диэлектрик:

Политетрафторэтилен

Особенности / применения:

Отличные плёночные высокочастотные конденсаторы общего применения. Очень низкие диэлектрические потери. Рабочая температура до 250 °С, очень высокое сопротивление изоляции, хорошая стабильность.

Используются в критичных задачах, в фильтрах электродвигателей, в передатчиках.

Недостатки:

Большой размер из-за низкой диэлектрической постоянной, более высокая цена в сравнении с другими конденсаторами.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Металлизированные полиэтилентерефталатные и поликарбонатные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

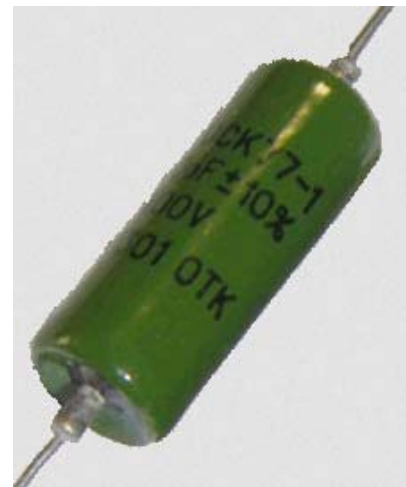
ПЭТ или Поликарбонат

Особенности / применения:

Надёжные и значительно меньшие по размеру. Тонкая металлизация может использоваться для придания им свойства самовосстановления.

Недостатки:

Тонкая металлизация ограничивает максимальный ток.

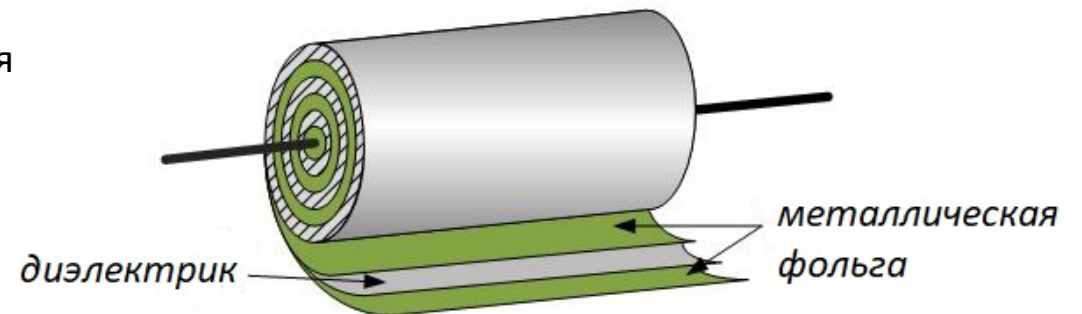


Пленочные конденсаторы

Вопрос: что означают черные полосы на корпусе пленочных конденсаторов, изображенных на рисунке?



Ответ: у пленочных конденсаторов, скрученных в рулон есть завершающая внешняя обкладка, которая выполняет роль экрана. Этот вывод и обозначается полоской или иногда точкой. В импульсных схемах правильное подключение внешней обкладки может уменьшить электро-магнитные излучения



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Многоуровневые пластинчатые слюдяные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

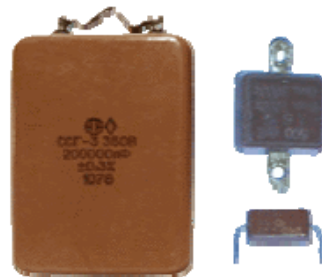
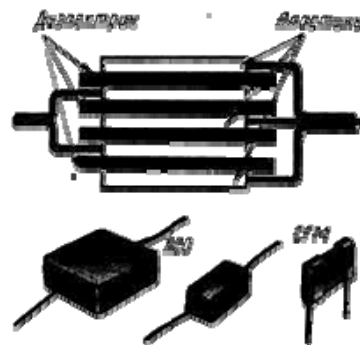
Слюда

Особенности / применения:

Преимущества данных конденсаторов основаны на том, что их диэлектрик инертен. Он не изменяется со временем ни физически, ни химически, а также имеет хорошую температурную стабильность. Обладают очень высокой стойкостью к коронным разрядам.

Недостатки:

Без правильной герметизации подвержены влиянию влажности, что ухудшает их параметры. Высокая цена из-за редкости и высокого качества диэлектрика, а также ручной сборки.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Металлизированные или серебряные слюдяные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

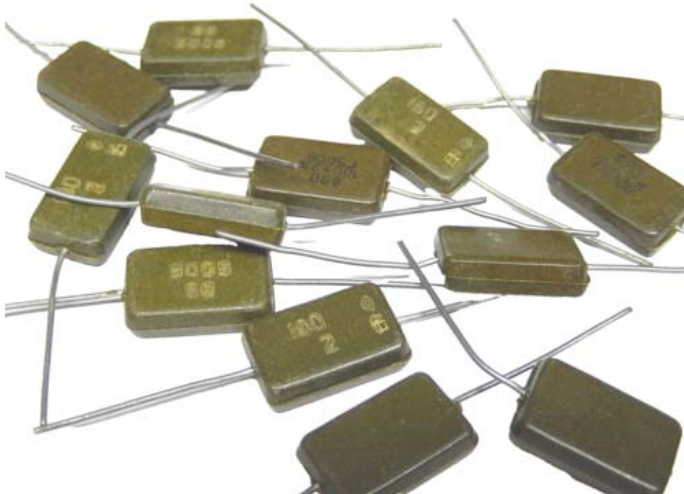
Слюда

Особенности / применения:

Те же преимущества, в дополнение обладают большей устойчивостью к влаге.

Недостатки:

Более высокая цена.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Печатные конденсаторы

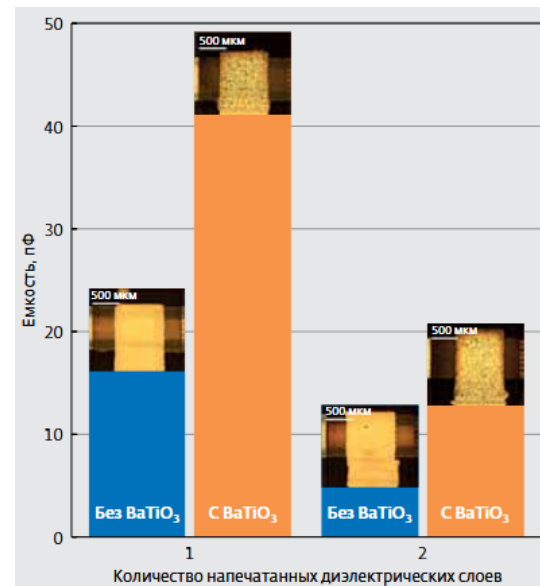
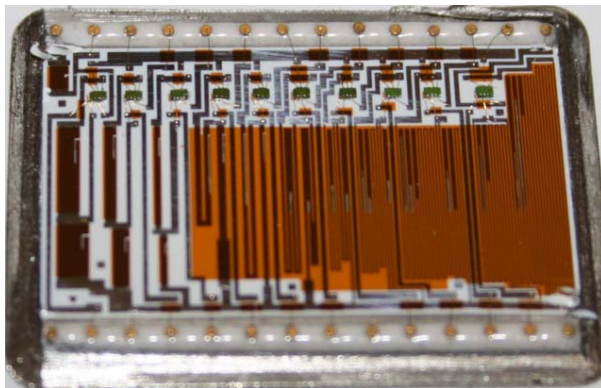
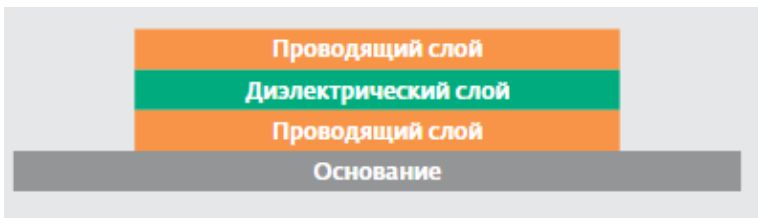
Используемый диэлектрик: печатный диэлектрик

Особенности / применения:

Конденсатор выполняется на печатной плате методом печати. Используется такой конденсатор в микросборках. Ёмкость таких конденсаторов не превышает 1 нано Фарад.

Для изготовления требуются не только токопроводящие, но и диэлектрические чернила. Печать конденсатора на гибком основании проводится в следующем порядке: печать нижней токопроводящей площадки, затем диэлектрического слоя и верхней площадки конденсатора.

Параметры печатного конденсатора, как и классического, зависят от типа применяемого диэлектрического материала. В качестве примера можно привести изменение емкости печатного конденсатора при добавлении в диэлектрический материал титаната бария (BaTiO_3).



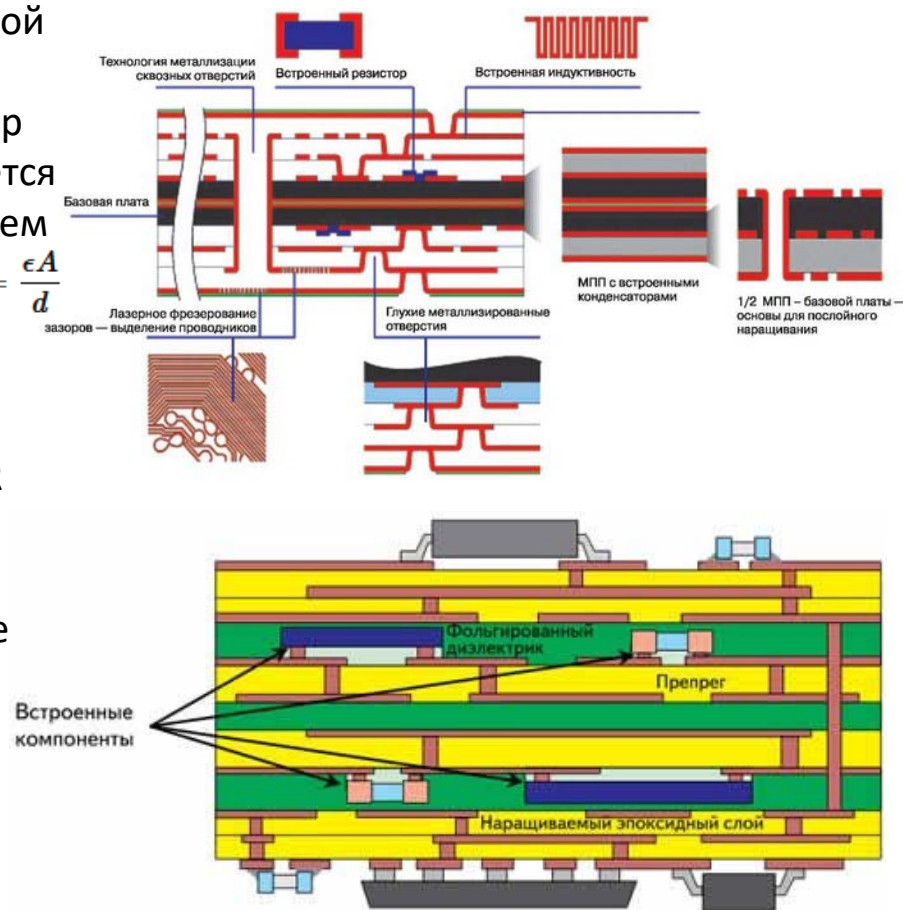
Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Печатные конденсаторы

Используемый диэлектрик: стеклотекстолит

Особенности / применения: Конденсатор выполняется на печатной плате методом печати проводящих слоев. Используется такой конденсатор на печатных платах. Но чаще всего такой конденсатор является паразитным, т.к. любое пересечение проводников является конденсатором. Ёмкость приблизительно определяется уравнением ёмкости параллельных пластин и измеряется в пико-Фарадах: $C = \frac{\epsilon A}{d}$

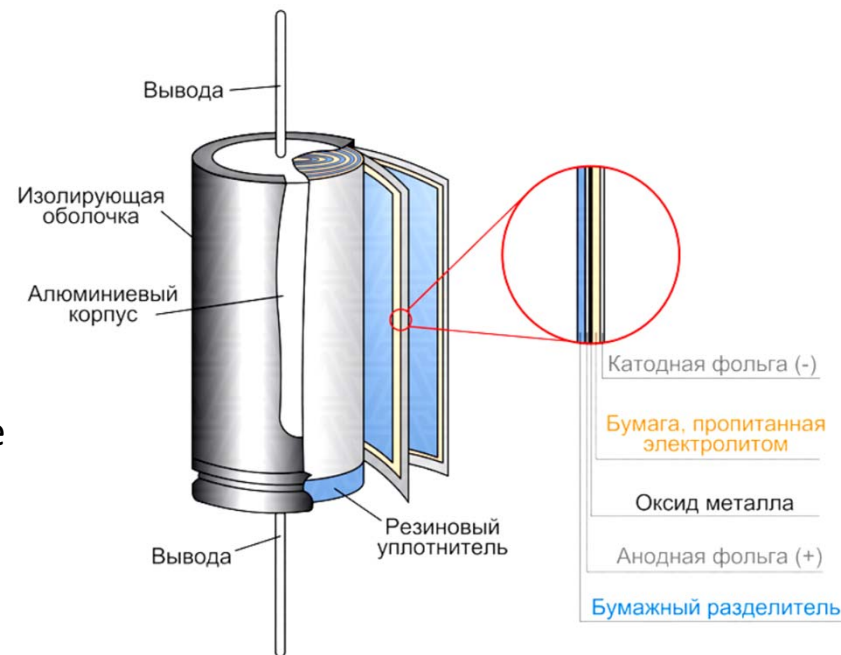
Конденсаторы с ёмкостью в пикофарадах нередко изготавливают из параллельных медных пластин, но обычно это делают на многослойных платах, где значение d может быть намного меньше. Конденсаторы такого типа могут иметь более низкое ESR и ESL, чем дискретные конденсаторы, поэтому они применяются для фильтрации ЭМИ источников питания в высокочастотных схемах. Существуют также компании, производящие специальные материалы, которые можно ламинировать в многослойную печатную плату, чтобы получить слой с высокой диэлектрической проницаемостью, что позволяет создавать конденсаторы ещё большей ёмкости с помощью металлизации. Такие конденсаторы часто называют встроенными или скрытыми.



Электролитические конденсаторы

Конденсаторы у которых 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. 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.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Алюминиевые электролитические конденсаторы

Используемый диэлектрик:

Оксид алюминия

Особенности / применения:

Огромное отношение ёмкости к объёму, недорогие, полярные. В основном применяются как сглаживающие и питающие конденсаторы в источниках питания. Нарботка на отказ конденсатора с максимально допустимой рабочей температурой 105 °С при расчёте составляет до 50 000 часов при температуре 75 °С

Недостатки:

Высокие токи утечки, большое эквивалентное последовательное сопротивление и индуктивность ограничивают возможность использования их на высоких частотах. Имеют низкую температурную стабильность и плохие отклонения параметров. Могут взорваться при превышении допустимых параметров и/или перегреве, при приложении обратного напряжения. Максимальное напряжение около 500 вольт.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Танталовые конденсаторы

Используемый диэлектрик:

Оксид тантала

Особенности / применения:

Большое отношение ёмкости к объёму, малый размер, хорошая стабильность, большой диапазон рабочих температур. Широко используются в миниатюрном оборудовании и компьютерах.

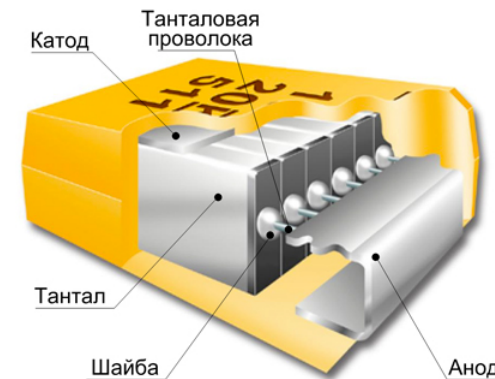
Доступны как в полярном, так и неполярном исполнении.

Твёрдотельные танталовые конденсаторы имеют намного лучшие характеристики по сравнению с имеющими жидкий электролит. На корпусе полоской обозначается анод – плюс.

Недостатки:

Дороже алюминиевых электролитических конденсаторов. Максимальное напряжение ограничено планкой около 50 В.

Взрываются при превышении допустимого тока, напряжения или скорости нарастания напряжения, а также при подаче напряжения неправильной полярности.



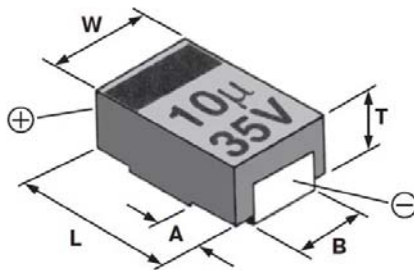
Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Ниобиевые конденсаторы

Электролитический конденсатор, анод (+) которого изготовлен из ниоби. Твердый электролит на поверхности оксидного слоя служит катодом конденсатора (–).

Что бы уменьшить диффузию кислорода из диэлектрика (Nb_2O_5) в металлический ниобиевый анод либо легируют металлический ниобиевый порошок нитридом для получения пассивированного нитрида ниобия, либо используют оксид ниобия (NbO) в качестве материала анода. Ниобий является родственным металлом танталу. Материалы и процессы, используемые для производства конденсаторов с ниобиевым диэлектриком, те же, что и для существующих конденсаторов с танталовым диэлектриком. Ниобий в качестве сырья встречается в природе гораздо чаще, чем тантал, и стоит дешевле. Характеристики ниобиевых электролитических конденсаторов и танталовых электролитических конденсаторов примерно сопоставимы.

В отличие от алюминиевых на корпусе танталовых и ниобиевых конденсаторов полоской обозначается анод – плюс.



Тип корпуса	Размер, мм				
	L	W	T	B	A
A	3.2	1.6	1.6	1.2	0.8
B	3.5	2.8	1.9	2.2	0.8
C	6.0	3.2	2.5	2.2	1.3
D	7.3	4.3	2.8	2.4	1.3

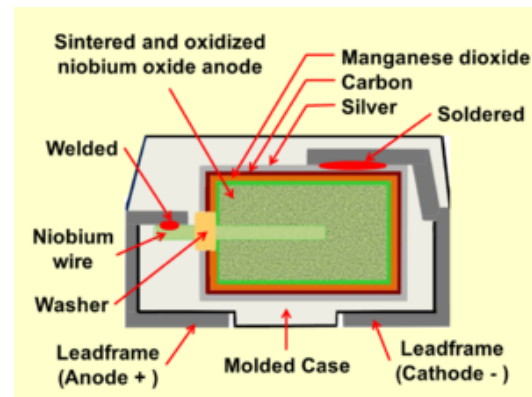
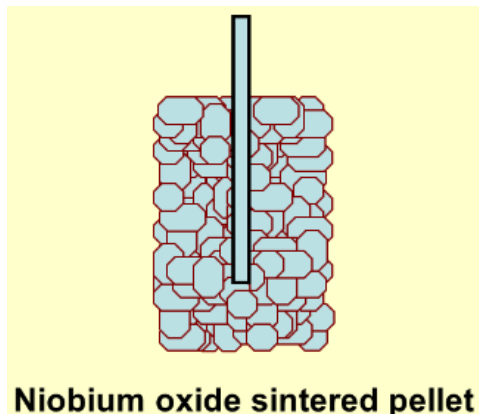
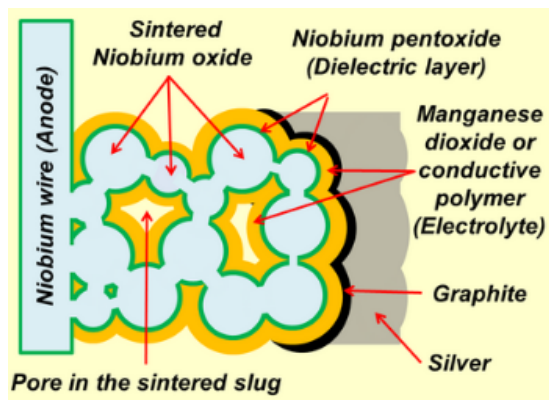


Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Ниобиевые конденсаторы

Оксид ниобия — это твёрдый керамический материал, характеризующийся высокой металлической проводимостью. Порошок оксида ниобия может иметь такую же структуру, как и порошок тантала, и может обрабатываться аналогичным образом для производства конденсаторов. Он также может быть окислен путём анодного окисления для создания изолирующего диэлектрического слоя. Таким образом, на рынке представлены два типа ниобиевых электролитических конденсаторов: с пассивированным ниобиевым анодом и с анодом из оксида ниобия. В обоих типах в качестве диэлектрического слоя используется пятиокись ниобия (Nb_2O_5). Ниобиевые конденсаторы были разработаны в Соединенных Штатах и Советском Союзе в 1960-х годах.

Типичный ниобиевый конденсатор представляет собой чип-конденсатор и состоит из порошка ниобия или оксида ниобия, спрессованного и спечённого в таблетку в качестве анода конденсатора, с оксидным слоем пятиоксида ниобия в качестве диэлектрика и твёрдым диоксидом марганца электролита в качестве катода.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Твердотельные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

Оксид алюминия, оксид тантала

Особенности / применения:

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.

Недостатки:

Дороже обычных. При 105 °С срок службы как у обычных электролитических. Рабочие напряжения до 35 В.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Конденсаторы с двойным электрическим слоем (ионисторы, суперконденсаторы)

Используемый диэлектрик:

Тонкий слой электролита и активированный уголь

Особенности / применения:

Огромная ёмкость относительно объёма, маленький размер. Доступны номиналы в сотни фарад. Обычно используются для временного питания оборудования при замене батарей. Могут заряжаться и разряжаться большими токами, чем батареи, имеют очень большое число циклов заряд-разряд. Полярные, имеют низкое номинальное напряжение (вольт на конденсаторную ячейку). Группы ячеек соединяются последовательно для повышения общего рабочего напряжения, при этом обязательно применение устройств для балансировки напряжений.

Недостатки:

Относительно высокая стоимость, высокое эквивалентное последовательное сопротивление (малые разрядные токи), большие токи утечки.



Типы конденсаторов постоянной ёмкости

Литий-ионные конденсаторы

Используемый диэлектрик:

Ион лития.

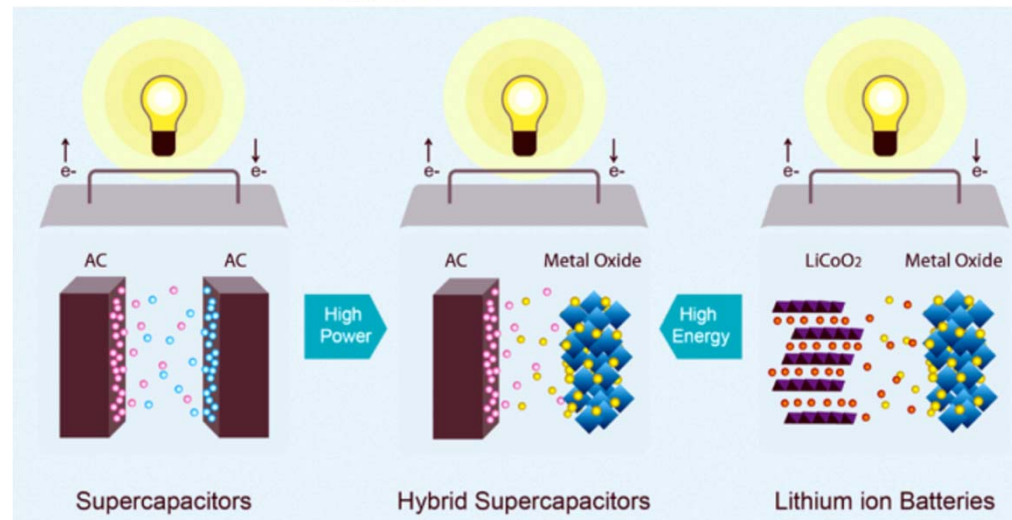
Гибридная технология, использующая элементы ионистора и литий-ионного аккумулятора.

Особенности / применения:

Литий-ионные конденсаторы обладают большей энергоёмкостью, сравнимой с батареями, безопаснее в сравнении с батареями (литиевых гальванических элементов или литий-ионных аккумуляторов), в которых начинается бурная химическая реакция при высокой температуре. По сравнению с ионисторами они имеют большее выходное напряжение. Удельная мощность у них сравнима, но плотность энергии у Li-ion-конденсаторов гораздо выше.

Недостатки:

Новая технология, пока не получившая широкого распространения.



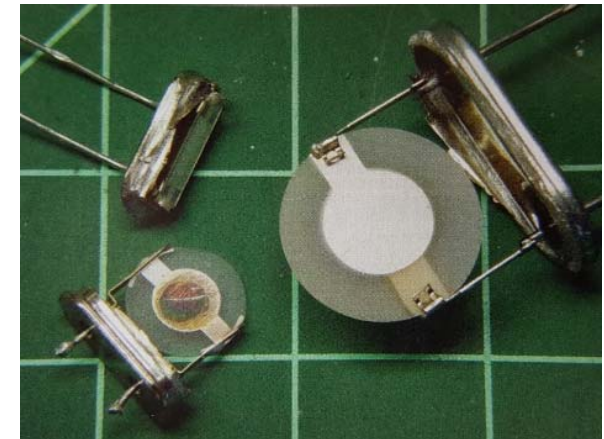
Разновидности конденсаторов

Кварцевый резонатор (жарг. «кварц») — компонент, в котором пьезоэлектрический эффект и явление механического резонанса используются для построения высокочастотного резонансного элемента электронной схемы. Он отличается от конденсаторов с пьезо-эффектом, использующие специальную керамику.

Принцип действия

На пластинку, тонкий цилиндр, кольцо или брусок, вырезанные из кристалла кварца с определённой ориентацией относительно кристаллографических осей монокристалла нанесены 2 или более электродов — проводящие металлические полоски, выполненные напылением в вакууме или вжиганием плёнки металла на заданные поверхности кристалла.

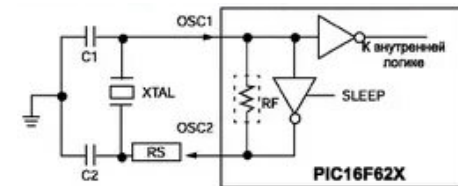
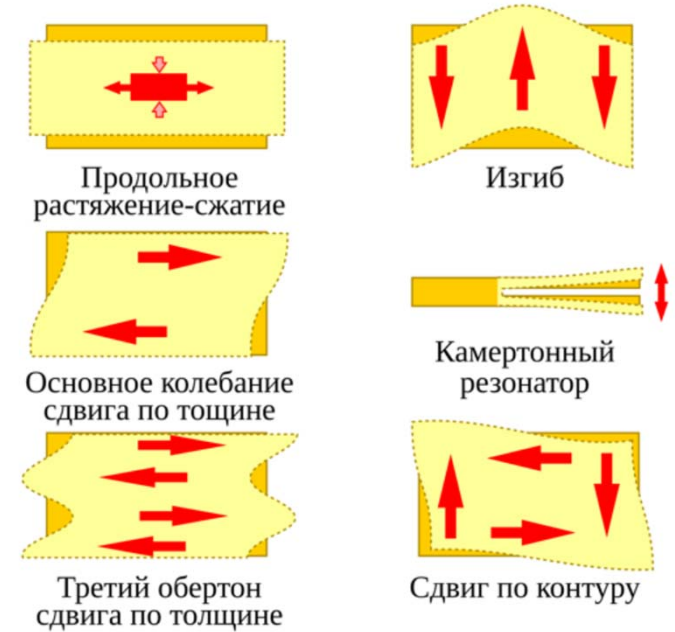
Резонатор механически крепится в узлах рабочей моды колебаний, чтобы снизить потери колебательной энергии через крепление кристалла. Для иных мод колебаний узлы собственных колебаний расположены в иных местах кристалла и поэтому иные моды колебаний подавлены. Для рабочей моды колебаний кристалл имеет некоторую собственную резонансную частоту механических колебаний, причем на этой частоте добротность механического резонатора очень высока.



Разновидности конденсаторов

Кварцевый резонатор

При подаче напряжения на электроды благодаря обратному пьезоэлектрическому эффекту происходит изгиб, сжатие или сдвиг в зависимости от того, каким образом вырезан кристалл относительно кристаллографических осей, конфигурации возбуждающих электродов и расположения точек крепления. Собственные колебания кристалла в результате пьезоэлектрического эффекта наводят на электродах дополнительную ЭДС и поэтому кварцевый резонатор электрически ведёт себя подобно резонансной цепи — колебательному контуру, составленному из конденсаторов, индуктивности и резистора, причем добротность этой эквивалентной электрической цепи очень велика и близка к добротности собственных механических колебаний кристалла. Если частота подаваемого напряжения равна или близка к частоте собственных механических колебаний пластинки, затраты энергии на поддержание колебаний пластинки оказываются намного ниже, нежели при большом отличии частоты. Это тоже соответствует поведению электрического колебательного контура.

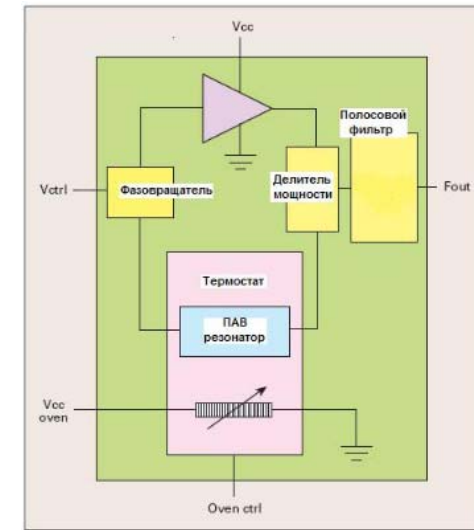
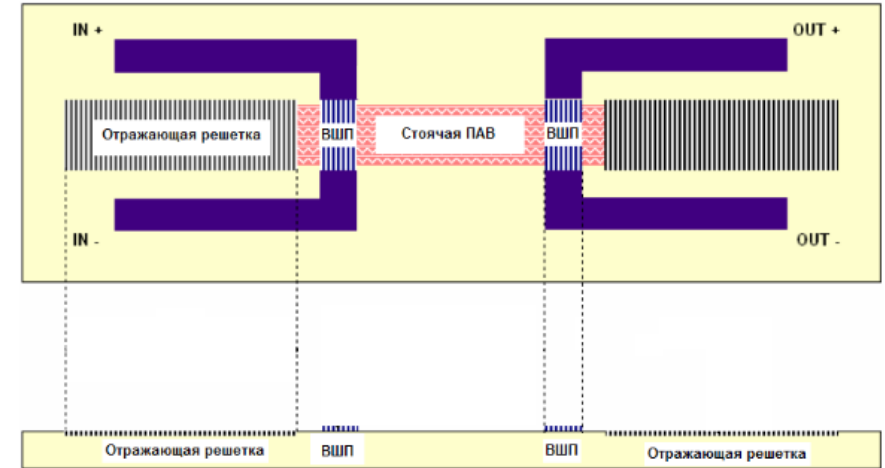


Разновидности конденсаторов

Резонатор на поверхностных акустических волнах ПАВ

Современный ПАВ резонатор представляет собой планарную структуру на кварцевой подложке, образованную тонкопленочными встречно штыревыми преобразователями (ВШП) и отражающими решетками. Частота резонанса здесь определяется не толщиной подложки, как у кварцевых резонаторов, а шириной линий топологического рисунка. Современный уровень фотолитографии позволяет достичь частот 1- 3 ГГц при уровнях добротности близких к физическим ограничениям материала подложки.

ПАВ генератор. Включение ПАВ резонатора в цепь обратной связи малошумящего усилителя при соблюдении баланса фаз и амплитуд обеспечивает автогенерацию в диапазоне частот близком к полосе пропускания резонатора. Настройка частоты такого генератора. обеспечивается фазовращателем, который может управляться напряжением, превращая опорный генератор в ГУН.



Разновидности конденсаторов

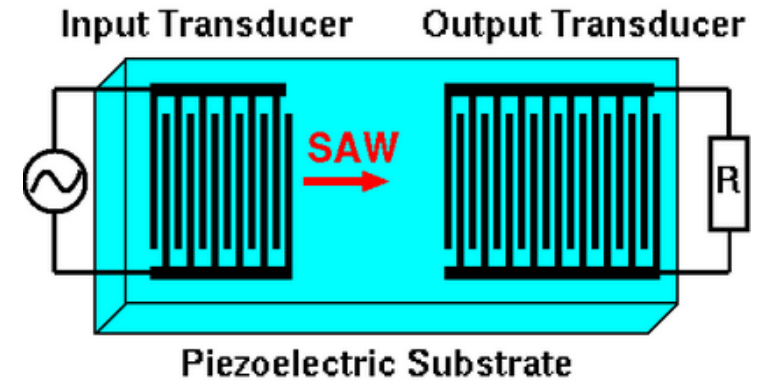
Встречно-штыревой преобразователь, ВШП, также встречно-гребёнчатый преобразователь — устройство, состоящее из двух взаимосвязанных, имеющих форму гребёнки, металлических покрытий (наподобие застёжки-молнии), которые применяются на пьезоэлектрической подложке из кварца, ниобата и танталата лития, а также ряда других ориентированных монокристаллов.

Используется для преобразования электромагнитных волн в поверхностные акустические волны (ПАВ). Устройства на поверхностных акустических волнах применяются, главным образом, в радиоэлектронике. Наиболее распространёнными устройствами на поверхностных акустических волнах являются резонаторы и фильтры. В зависимости от геометрического нанесения (ВШП), выходные показатели устройств будут отличаться.

Если ВШП имеет период p , то центральная частота равна:

$$\omega_0 = \frac{2\pi v_0}{p},$$

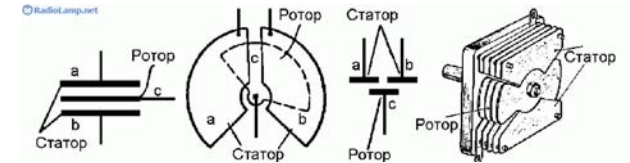
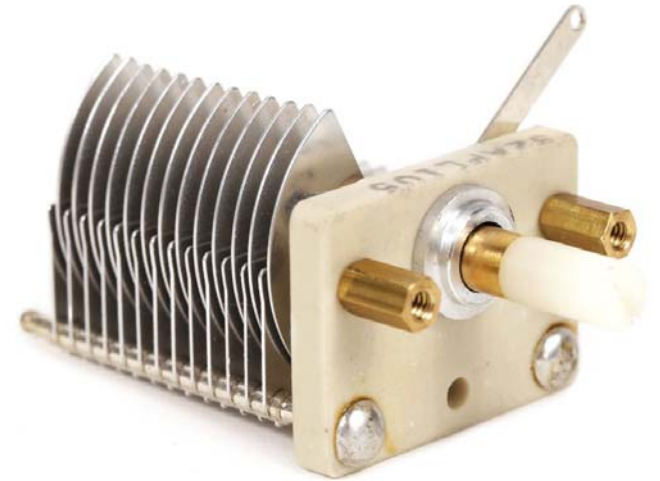
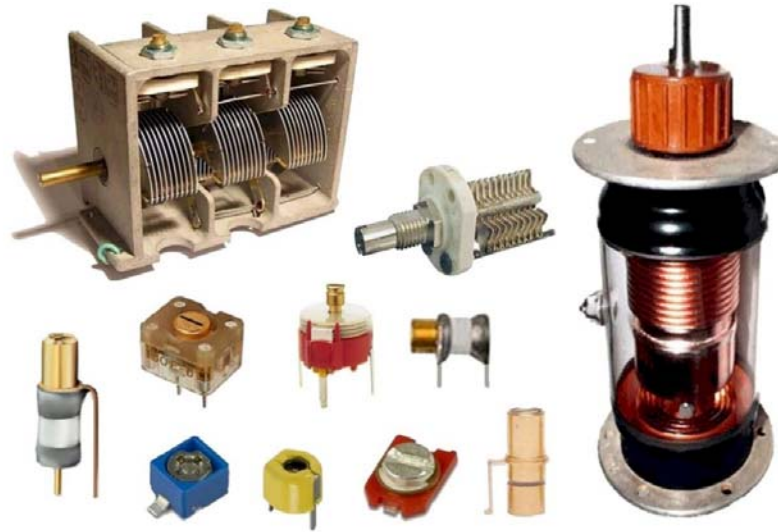
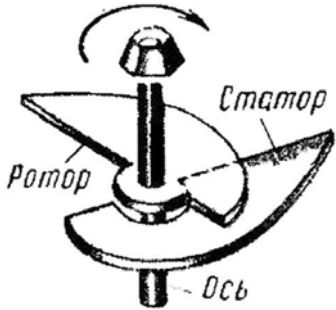
где v_0 — скорость волны под ВШП.



Переменные конденсаторы

Переменный воздушный конденсатор.

В наиболее распространённой конструкции группа полукруглых металлических пластин расположена на вращающейся оси («ротор»), которая находится в зазорах между набором неподвижных пластин («статор»), так что площадь перекрытия можно изменять, вращая ось. В качестве обкладок выступают алюминиевые пластины. В качестве изолятора выступает воздушный зазор.



Переменные конденсаторы

Переменный керамический конденсатор.

В качестве обкладок выступают напыление на керамической пластине.
В качестве изолятора – керамический корпус подвижной части.



Переменные конденсаторы

Переменный пленочный конденсатор.

В пленочном переменном конденсаторе, как и в воздушном, группа полукруглых металлических пластин расположена на вращающейся оси («ротор»), которая находится в зазорах между набором неподвижных пластин («статор»), так же площадь перекрытия можно изменять, вращая ось. В качестве обкладок выступают алюминиевые или медные пластины, покрытые тонкой пленкой. В качестве изолятора выступает воздушный зазор между пластинами, покрытыми пленкой.



Основные характеристики переменных конденсаторов

- *Диапазон изменения ёмкости.* У переменных конденсаторов большая разница между минимальной и максимальной ёмкостью. Для оценки диапазона изменения ёмкости используют коэффициент перекрытия по ёмкости — частное от деления максимальной ёмкости на минимальную.
- *Закон изменения ёмкости.* Эта характеристика определяет характер изменения частоты колебательного контура при его настройке. По виду закона изменения ёмкости переменные конденсаторы делятся на прямоёмкостные, прямоволновые, прямочастотные и логарифмические.
- *Номинальное напряжение.* Это максимальное напряжение, при котором конденсатор может работать в течение гарантированного срока службы в условиях, указанных в нормативно-технической документации.
- *Температурный коэффициент ёмкости.* Характеризует температурную стабильность конденсатора и равен относительному изменению ёмкости конденсатора при изменении температуры на один градус.
- *Сопротивление изоляции.* Указывается отдельно для минимального и максимального значения ёмкости. Этот параметр определяет способность конденсатора сохранять заряд.
- *Диапазон рабочих температур.* Это такой температурный диапазон, в котором конденсатор не только сохраняет работоспособность, но гарантированно обеспечивает параметры, заявленные производителем и указанные в технической документации.

Нелинейные конденсаторы, ёмкостные датчики

Это преобразователь параметрического типа, в котором изменение измеряемой величины преобразуется в изменение ёмкости конденсатора. Основные преимущества ёмкостных датчиков: высокий порог чувствительности и небольшая инерционность. Основные недостатки: сильное влияние внешних электромагнитных полей. Специальная схема преобразует изменение ёмкости в пороговый или аналоговый сигнал датчика. В простейших датчиках это обычно мультивибратор, преобразователь «частота или скважность-напряжение» и компаратор.

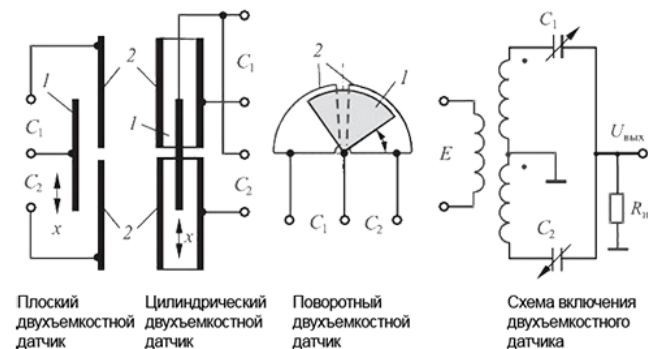
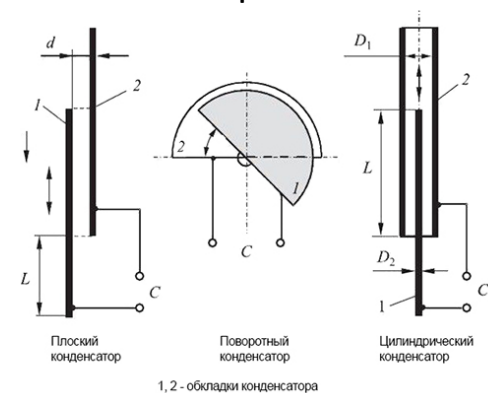
По типу исполнения могут быть одноёмкостные и двухёмкостные.

Одноёмкостные

Простейшее устройство, которое представляет собой переменный конденсатор. Датчики чувствительны к внешним факторам, таких как влага, перепады температур и др.

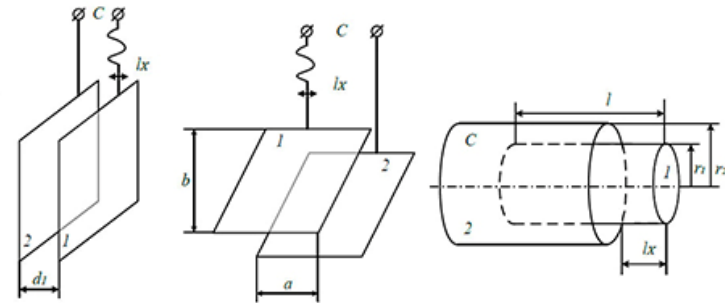
Двухёмкостные

В схеме таких датчиков используются два переменных конденсатора. Они могут быть дифференциальными, обладающие высокой устойчивостью к внешним факторам, стабильностью и точностью при работе, и полудифференциальными в более простых схемах.

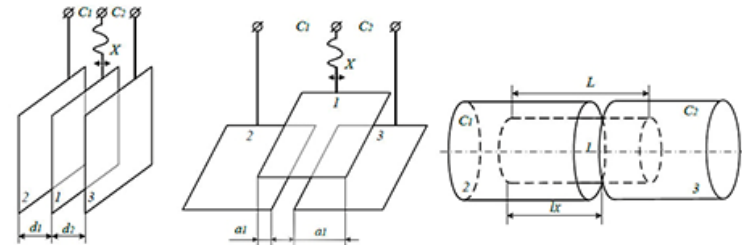


Нелинейные конденсаторы, ёмкостные датчики

- **Датчики линейных перемещений.** В таких датчиках линейное перемещение объекта преобразуется пропорционально в перемещение пластин конденсатора, что приводит к изменению емкости. По значению емкости можно вычислить расстояние, на которое переместился объект.

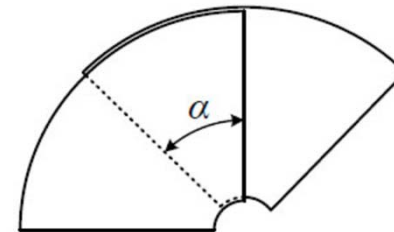


Однородные датчики линейных перемещений



Двухемкостные датчики линейных перемещений

- **Датчики угловых перемещений.** Принцип действия такой же, как у датчика линейных перемещений. Отличие в том, что в данном устройстве идет зависимость емкости от углового перемещения.



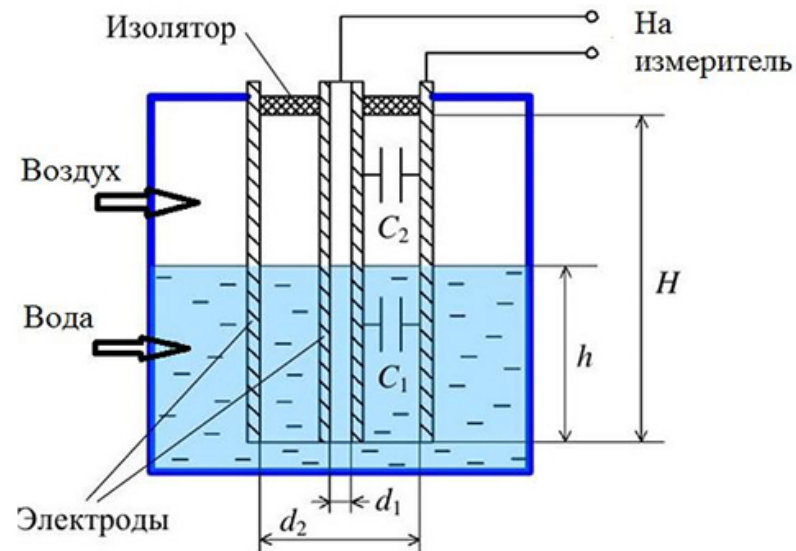
Нелинейные конденсаторы, ёмкостные датчики

• датчики уровня жидкости

Он представляет собой пару вставленных друг в друга металлических цилиндров, погруженных в воду или топливо. Принцип действия датчиков основан на том, что ёмкость прямо пропорциональна диэлектрической проницаемости изолятора, а ϵ у воздуха и жидкости различается. В результате при заполнении бака жидкостью возрастает реактивное сопротивление датчика.

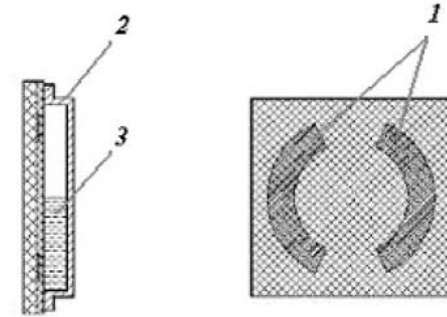
При этом датчики емкостного типа работают, как с жидкостями различной вязкости, так и с сыпучими материалами. Также такие датчики надежно работают в самых сложных ситуациях, при которых идет большое запыление в емкости или образование конденсата.

Может применяться в качестве датчика контроля жидкости в закрытом пакете.



Нелинейные конденсаторы, ёмкостные датчики

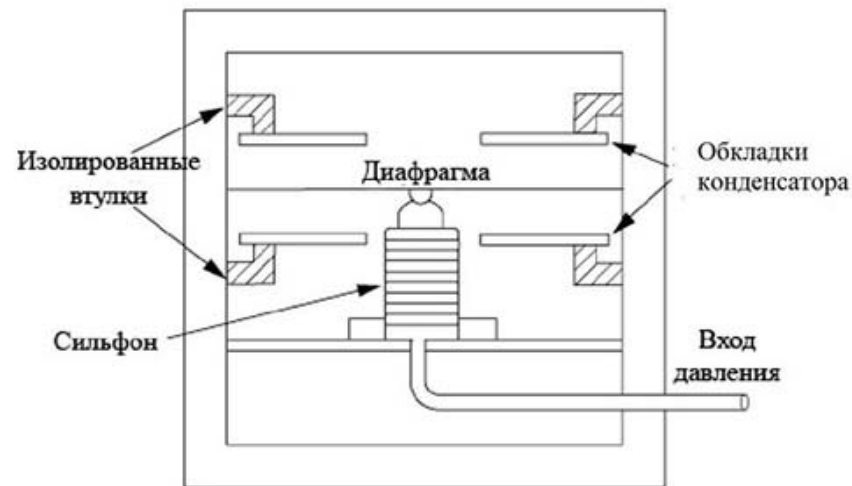
• **Инклинометры.** Данный тип датчиков применяется для контроля наклона или крена. Основным элементом является капсула, которая располагается в подложке с планарными электродами. В качестве чувствительного электрода выступает проводящая жидкость, которая располагается внутри корпуса. В совокупности оба эти электрода являются дифференциальным конденсатором. Величина сигнала на выходе датчика пропорциональна емкости этого конденсатора, которая зависит от того, где находится корпус по вертикали. То есть угол наклона, который определяется по вертикальному положению, прямо пропорционален емкости конденсатора. Такие датчики обладают высокой точностью измерения, имеют компактный корпус и небольшой вес, и в целом отличное соотношение цена/качество/функциональность.



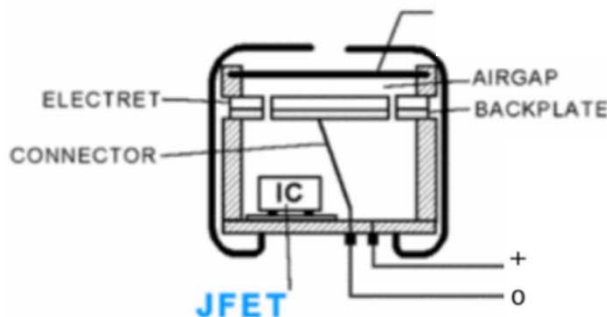
1 - планарные изолированные электроды на подложке
2 - капсула, закрепленная поверх подложки
3 - токопроводящая жидкость

Нелинейные конденсаторы, ёмкостные датчики

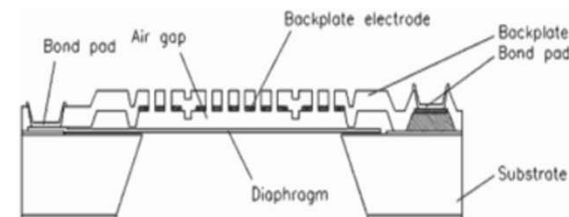
• **Датчики давления.** Конструкция подобных датчиков давления бывает одностаторная или двухстаторная. В одностаторных устройствах используется металлическая ячейка, которая делится на части плоской диафрагмой со статичным электродом. Диафрагма и электрод представляют собой переменный конденсатор. При деформации диафрагмы изменяется значение емкости, которое пропорционально приложенному давлению. В двухстаторных приборах диафрагма может двигаться в обе стороны, за счет этого может измеряться дифференциальное давление. Датчики подобного типа имеют незначительную погрешность.



• **Электретный микрофон** является разновидностью датчика давления.



cross section of an electret microphone



cross section of a MEMS microphone

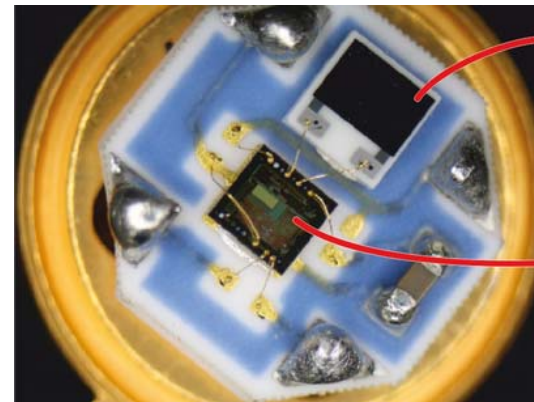
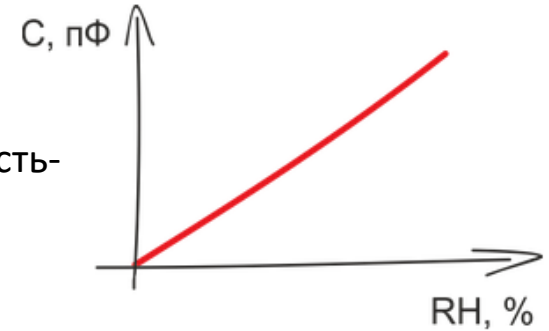
Нелинейные конденсаторы, ёмкостные датчики

• Датчики влажности

Большинство современных датчиков относительной влажности имеют емкостный чувствительный элемент. Принципы работы датчика это преобразователь «влажность-емкость».

- Чувствительный элемент представляет собой конденсатор, емкость которого изменяется пропорционально относительной влажности окружающей среды.
- В качестве диэлектрика используется слой полимера, диэлектрическая проницаемость которого зависит от количества абсорбированной им влаги.
- Зависимость влажность-емкость носит линейный характер и позволяет проводить измерения в диапазоне от 0 до 100 % RH.

В зависимости от назначения чувствительного элемента выпускаются преобразователи с различными характеристиками, выполненные на базе полимеров с различными параметрами.



Емкостный преобразователь относительной влажности P14

ИС со встроенным датчиком температуры

Нелинейные конденсаторы, ёмкостные датчики

• Датчики влажности

Ёмкостный датчик представляет собой керамическую подложку, на которой последовательно располагаются нижний проводящий электрод, абсорбирующий влагу полимер и верхний электрод. Выходная характеристика преобразователя определяется типом полимера, а также его толщиной и площадью:

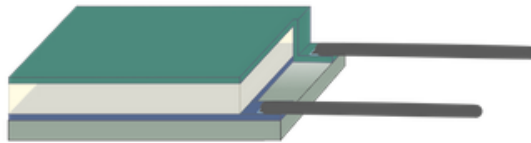
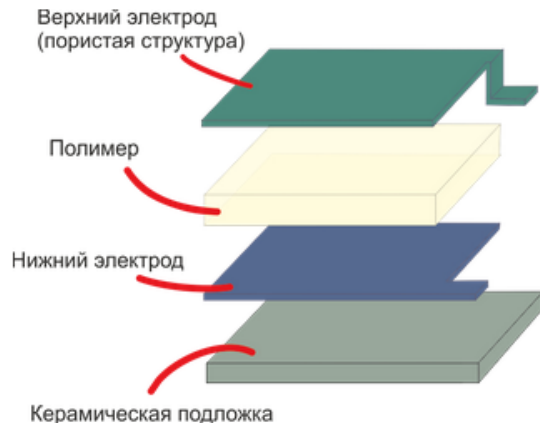
$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

A — Площадь полимера

d — Толщина полимера

ε_0 — Электрическая постоянная. $\varepsilon_0 \approx 8,85418781762039 \cdot 10^{-12} \text{ м}^{-3} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^2$.

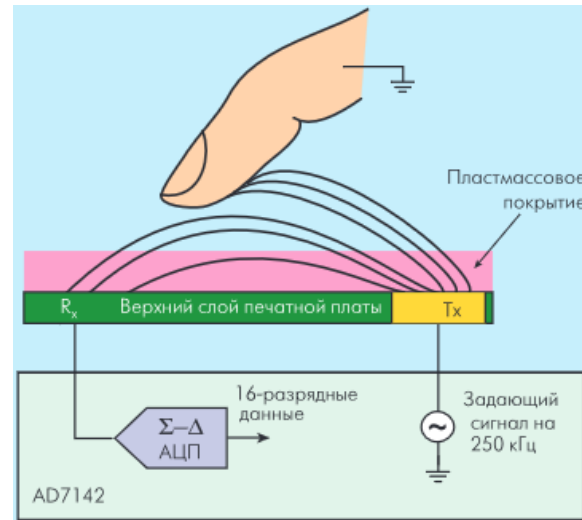
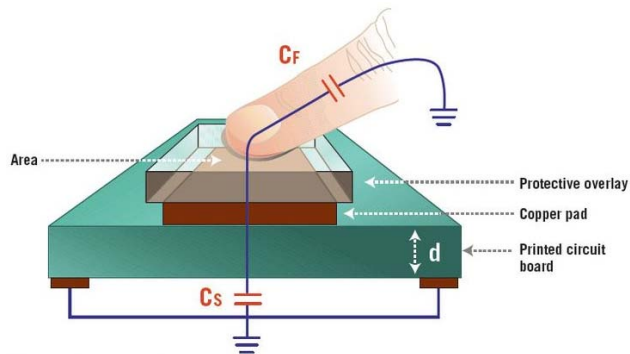
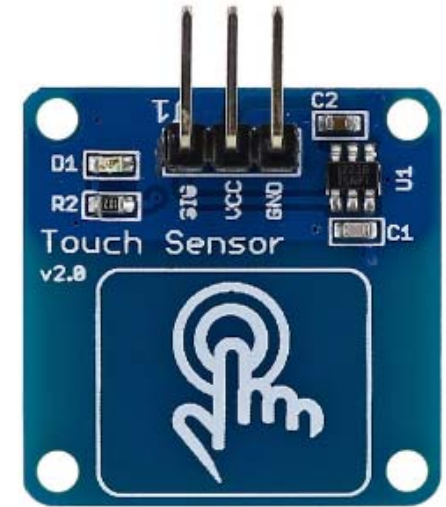
ε_r — Диэлектрическая проницаемость полимера, изменяющаяся пропорционально количеству поглощенной влаги



Нелинейные конденсаторы, ёмкостные датчики

- Датчики прикосновения и приближения

Ёмкостные датчики. Используются для измерения изменения ёмкости при касании. Состоят из двух слоёв проводящего материала, разделённых изоляционным слоем - стеклотекстолитом. При касании пальцем или другим проводящим объектом происходит изменение ёмкости между слоями, которое затем измеряется схемой. Такой датчик встраивается внутри прокуса под крышку, относительно дешёвый, не имеет подвижных частей, имеет высокую герметичность и долговечность. Но такой тип датчика сложно настраивать, постоянно потребляет энергию, имеет ЭМ излучения, чувствительный к типу пластикового корпуса и внешним ЭМ полям.

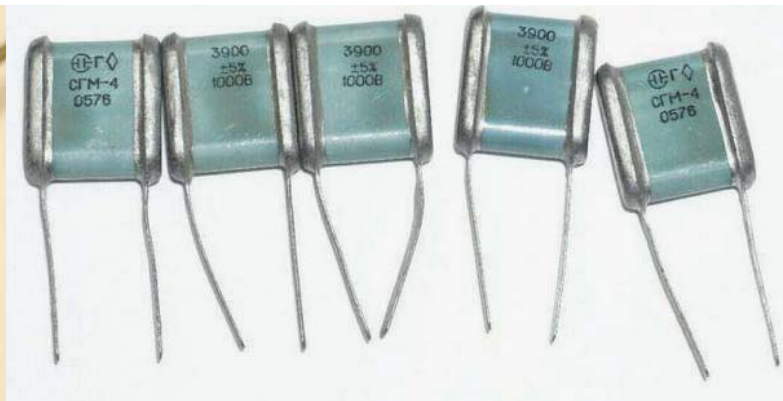


Маркировка конденсаторов

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

Буквенная маркировка

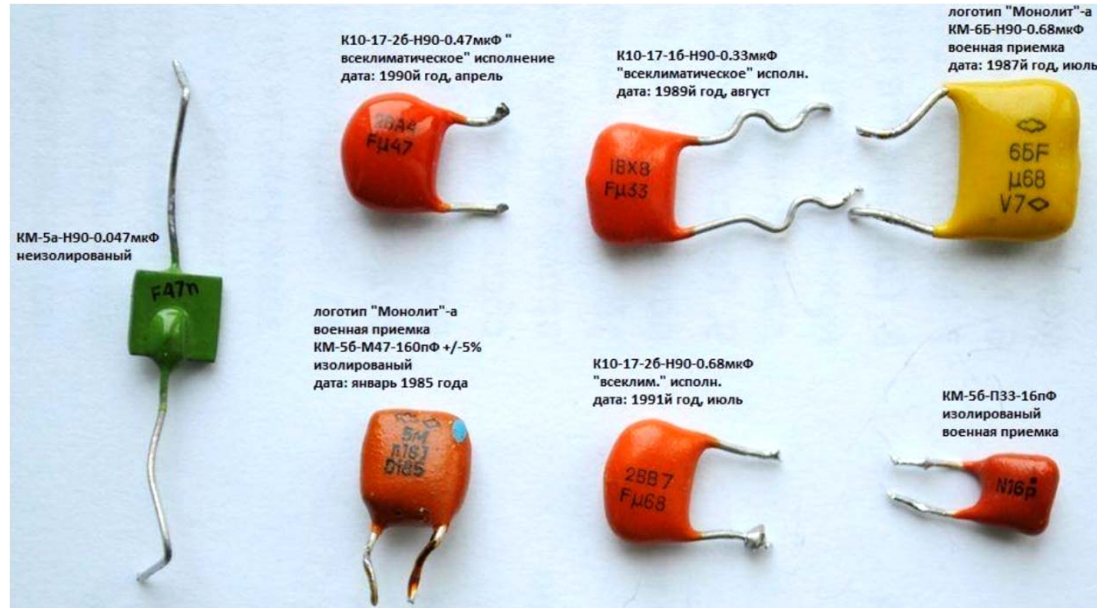
Буквенная система распространяется на конденсаторы, разработанные до 1960 года. В этой системе первая буква К означает конденсатор, вторая — тип диэлектрика (Б — бумажный, С — слюдяной, К — керамический, Э — электролитический и так далее...), третья — конструктивные особенности (герметичность исполнения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



Маркировка конденсаторов

Цифровая маркировка

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», дальше следует цифра, обозначающая вид диэлектрика, и буква, указывающая, в каких цепях может использоваться конденсатор; после неё стоит номер разработки или буква, указывающая вариант конструкции.



Ряды номиналов

Номинальные значения параметров компонентов (сопротивление резисторов, ёмкость конденсаторов, индуктивность небольших катушек индуктивности) организованы международным стандартом в специальные ряды, представляющие собой геометрические прогрессии.

- Существует 7 рядов, состоящие из буквы Е и числа, равного количеству значений ряда в диапазоне от 1 до 10: **E3, E6, E12, E24, E48, E96, E192**.
- Умножив на 10^n можно получить значения любого порядка.
- Каждый следующий ряд содержит в себе все предыдущие.
- Каждый ряд соответствует определённому допуску в номиналах деталей. Так, детали из ряда E6 имеют допустимое отклонение от номинала $\pm 20\%$, из ряда E12 — $\pm 10\%$, из ряда E24 — $\pm 5\%$

Знаменатель геометрической прогрессии ряда E_a вычисляется по формуле:

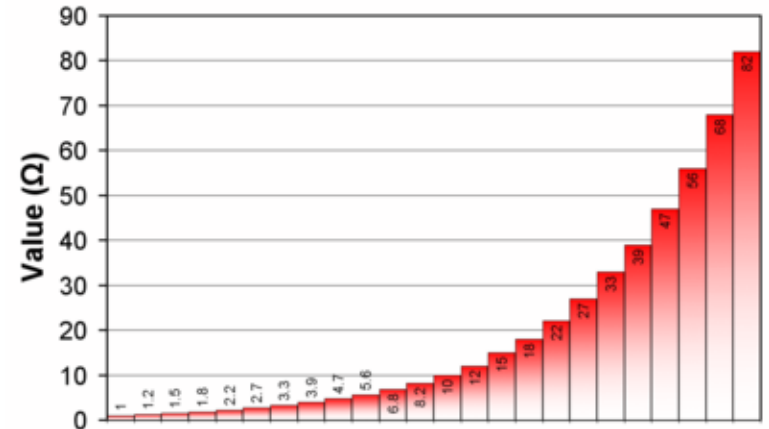
$$m = \sqrt[a]{10}$$

например: E6: $m = \sqrt[6]{10} = 1.47$, E12: $m = \sqrt[12]{10} = 1.21$

Каждый член ряда может быть найден по формуле:

$$N = m^b$$

где b — целое число. Вычисленные значения округляются.



Ряды номиналов

E3 ±30%	E6 ±20%	E12 ±10%	E24 ±5%
1,0	1,0	1,0	1,0
			1,1
		1,2	1,2
			1,3
	1,5	1,5	1,5
			1,6
		1,8	1,8
			2,0
2,2	2,2	2,2	2,2
			2,4
		2,7	2,7
			3,0

E3 ±30%	E6 ±20%	E12 ±10%	E24 ±5%
	3,3	3,3	3,3
			3,6
		3,9	3,9
			4,3
4,7	4,7	4,7	4,7
			5,1
		5,6	5,6
			6,2
	6,8	6,8	6,8
			7,5
		8,2	8,2
			9,1

Параметры выносливости

Электрическая прочность

Зависимость между пробивным напряжением U_{pr} и временем T , в течение которого это напряжение приложено к зажимам конденсатора. Определяется эмпирической формулой $T = A / U_{pr}^n$, где — постоянный коэффициент, зависящий от свойств диэлектрика, $n = 3 \dots 8$.

Надежность конденсатора

Интенсивность отказов за 1 час работы в нормальных условиях. Среднее время до первого внезапного отказа: $T_{sr} = B (U_d / U_r)^n$, где B — постоянный коэффициент, зависящий от свойств диэлектрика, $n = 4 \dots 7$, U_d — допускаемое напряжение, U_r — рабочее напряжение.

Срок службы

Влияние температуры на срок службы выражается формулой: $T_1 = T_2 a^{\frac{t_2 - t_1}{10}}$, где $a = 2$ для бумажных, слюдяных и керамических конденсаторов постоянной ёмкости, $a = 4 \dots 6$ для стеклоплёночных, T_1 и T_2 — сроки службы конденсатора при температурах t_1 и t_2 соответственно.

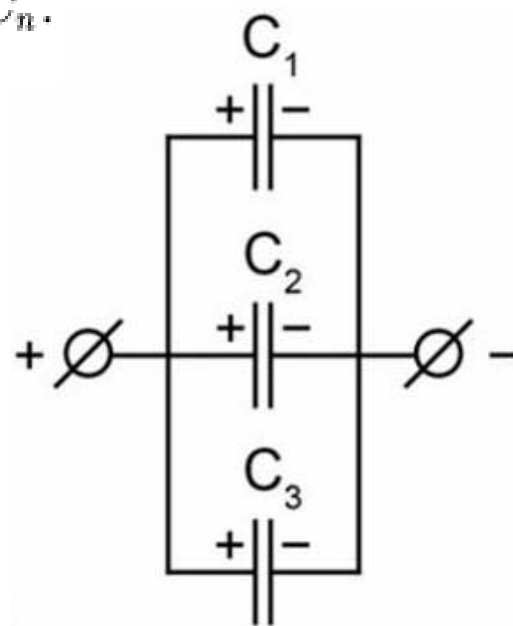
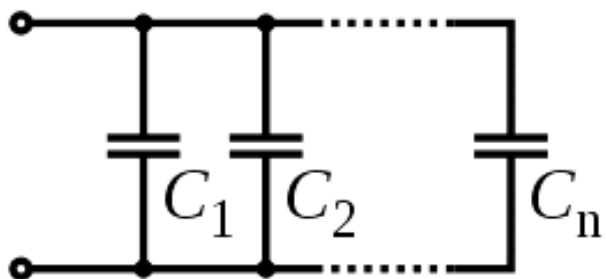
Цепи, состоящие из конденсаторов

Параллельное соединение

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:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \text{ или } C = C_1 + C_2 + \dots + C_n.$$

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.



$$q = q_1 + q_2 + q_3$$

$$C \cancel{U} = C_1 \cancel{U} + C_2 \cancel{U} + C_3 \cancel{U}$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3$$

Цепи, состоящие из конденсаторов

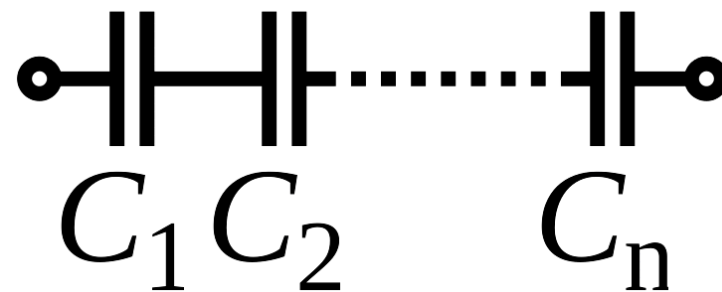
Последовательное соединение

При последовательном соединении конденсаторов заряды всех конденсаторов одинаковы, так как от источника питания они поступают только на внешние электроды, а на внутренних электродах они получают только за счёт разделения зарядов, ранее нейтрализовавших друг друга. Общая ёмкость батареи последовательно соединённых конденсаторов равна:

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \Rightarrow C = \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \right)^{-1},$$

или:

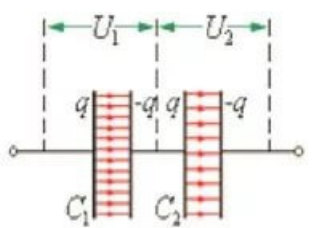
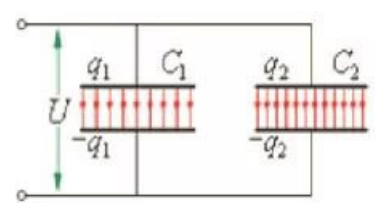
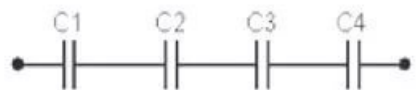
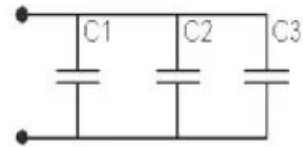
$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$



Эта ёмкость 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.

Цепи, состоящие из конденсаторов

Последовательное соединение	Параллельное соединение
	
	
$U = U_1 + U_2 + \dots + U_i$	$U = U_1 = U_2 = \dots = U_i$
$q = q_1 = q_2 = \dots = q_i$	$q = q_1 + q_2 + \dots + q_i$
$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_i}$	$C = C_1 + C_2 + \dots + C_i$

Цепи, состоящие из конденсаторов

Емкостной делитель напряжения

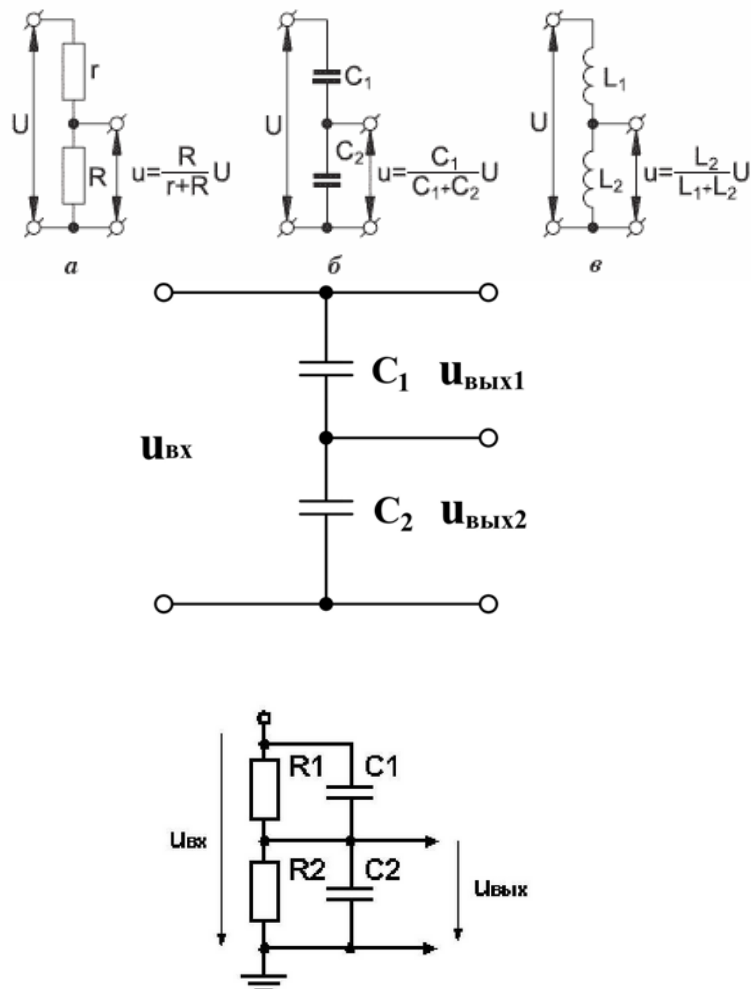
Делители напряжения собирают на резисторах, конденсаторах и дросселях.

Делитель постоянного напряжения на конденсаторах чаще всего применяют в источниках питания, в многоуровневых инверторах напряжения, регуляторах, АЦП и др.

Емкостной делитель напряжения состоит из двух последовательно соединенных конденсаторов и используется для снижения величины $U_{вх}$ на отдельных элементах электрической цепи $U_{вых1}$ и $U_{вых2}$.

Сложность применения такой схемы заключается в невозможности обеспечения равномерного разряда конденсаторов, вследствие чего напряжения на них будет распределяться не поровну. Чем сильнее разряжен один конденсатор по сравнению с другим, тем большая разница в U будет на них.

Для уравнивания напряжения в схему добавляют параллельно включенный резисторный делитель.



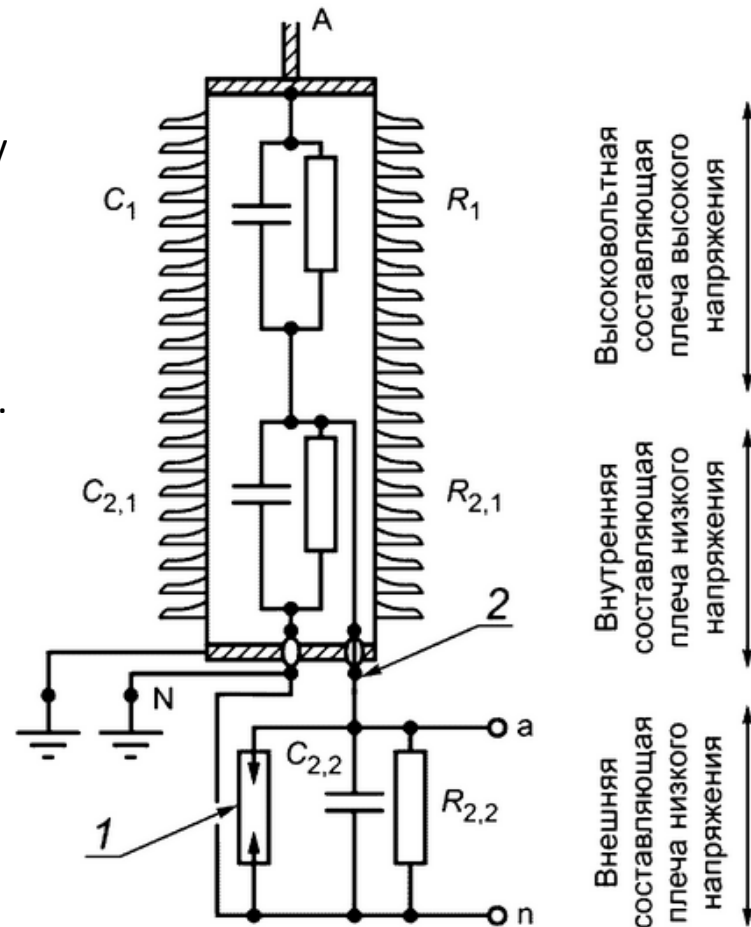
Цепи, состоящие из конденсаторов

Емкостной делитель переменного напряжения

Чаще всего в схемах применяют емкостные делители переменного напряжения.

Конденсатор, как и катушка индуктивности, относится к реактивному элементу, то есть потребляет реактивную мощность от источника переменного тока, в отличие от резистора, который является активным элементом и потребляет исключительно активную мощность.

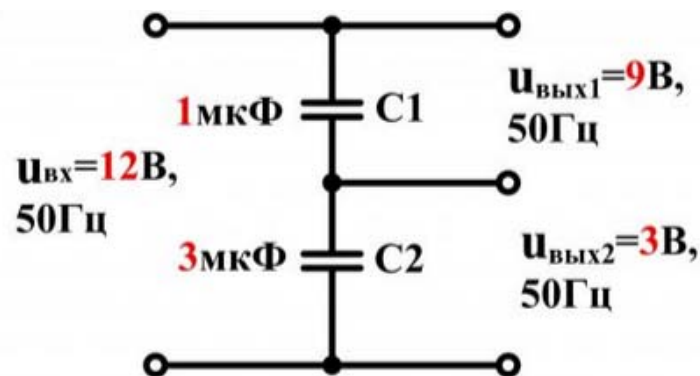
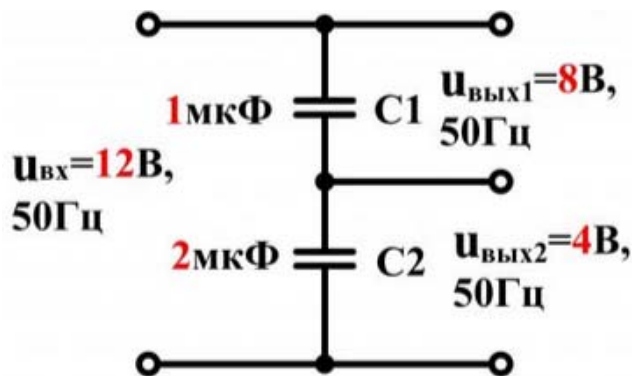
Реактивная мощность проявляется только в цепях переменного тока. Реактивная мощность в отличие от активной, не потребляется нагрузкой, а циркулирует между источником питания и нагрузкой. Поэтому конденсаторы и катушки индуктивности являются реактивными элементами, не потребляющими активную мощность.



Цепи, состоящие из конденсаторов

Расчет сопротивления делителя напряжения на конденсаторах заключается в определении необходимых значений сопротивлений. Сопротивление конденсатора X_C является величиной не постоянной и зависит от частоты переменного тока f и емкости C : сопротивление снижается с увеличением частоты и емкости. Для постоянного тока, частота которого равна нулю, сопротивление стремится к бесконечности, поэтому, рассматриваемая далее схема емкостного делителя напряжения не применяется постоянном токе.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

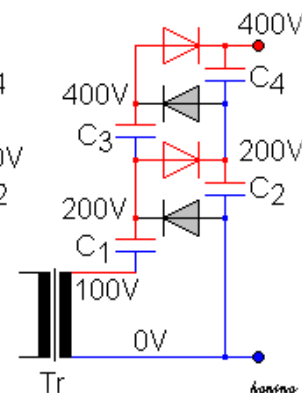
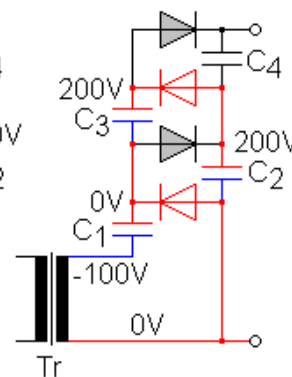
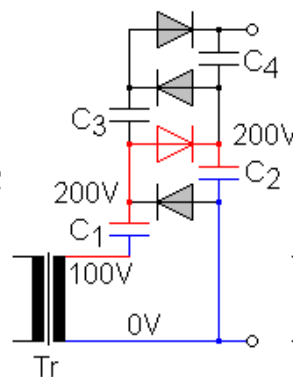
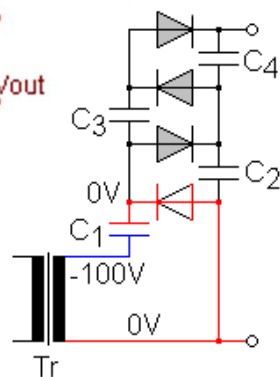
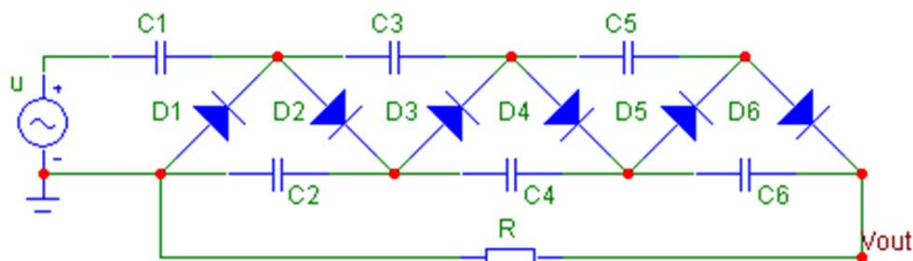


Цепи, состоящие из конденсаторов

Ёмкостной умножитель переменного напряжения

Умножитель напряжения — это электрическая цепь, которая преобразует переменный ток с более низким напряжением в более высокий постоянный ток, обычно с помощью сети конденсаторов и диодов.

Умножители напряжения могут использоваться для создания напряжения от нескольких вольт для электронных устройств до миллионов вольт для таких целей, как эксперименты в области физики высоких энергий и испытания на молниезащиту. Наиболее распространённым типом умножителя напряжения является полуволновой последовательный умножитель, также называемый каскадом Виллар (но на самом деле изобретённым Генрихом Грайнахером).



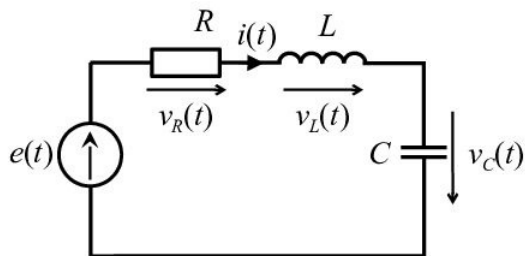
Цепи, состоящие из конденсаторов

Колебательный контур

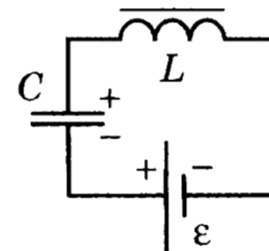
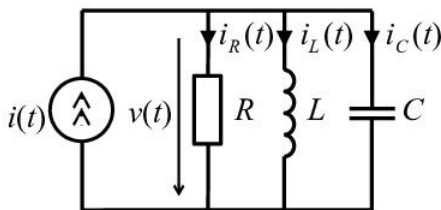
Колебательный контур — состоит из катушки индуктивности, конденсатора и источник электрической энергии.

При последовательном соединении элементов цепи колебательный контур называется последовательным, при параллельном — параллельным.

Последовательный



Параллельный



Колебательный контур это система, в которой могут происходить свободные электромагнитные колебания (при отсутствии в ней источника электрической энергии).

Резонансная частота контура определяется формулой Томсона:

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

Циклическая частота собственных колебаний или собственная частота гармонического осциллятора.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Цепи, состоящие из конденсаторов

Принцип действия колебательного контура

Пусть конденсатор ёмкостью C заряжен до напряжения U_0 . Энергия электрического поля, запасённая в конденсаторе, составляет:

$$E_C = \frac{CU_0^2}{2}.$$

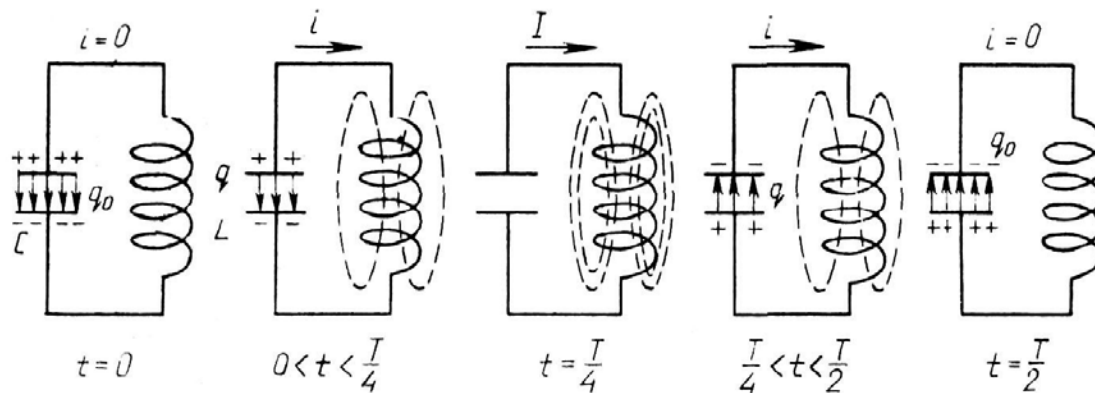
При соединении конденсатора с катушкой индуктивности в цепи потечёт ток I , что вызовет в катушке электродвижущую силу (ЭДС) самоиндукции, направленную на уменьшение тока в цепи. Ток, вызванный этой ЭДС, в начальный момент будет равен току разряда конденсатора, то есть результирующий ток будет равен нулю. Магнитная энергия катушки в начальный момент равна нулю.

Затем результирующий ток в цепи будет возрастать, а энергия электрического поля конденсатора будет переходить в энергию магнитного поля катушки до полного разряда конденсатора. В этот момент энергия электрического поля конденсатора $E_C = 0$. Энергия магнитного поля катушки индуктивности, напротив, максимальна и равна:

$$E_L = \frac{LI_0^2}{2},$$

где L — индуктивность катушки, I_0 — максимальное значение тока.

После этого начнётся перезарядка конденсатора, то есть конденсатор будет заряжаться напряжением другой полярности.



Цепи, состоящие из конденсаторов

Принцип действия колебательного контура

Перезарядка будет происходить до тех пор, пока энергия магнитного поля в катушке индуктивности не перейдёт в энергию электрического поля конденсатора. Конденсатор в этом случае будет заряжен до напряжения – U_0 . В результате периодического перехода энергии электрического поля в энергию магнитного поля в цепи возникают колебания, затухающие в реальном контуре, длительность которых будет обратно пропорциональна потерям в нем энергии. Процессы в *параллельном* колебательном контуре называются *резонанс токов*, а процессы в *последовательном* контуре называются *резонанс напряжений*.

Один из важных параметров колебательного контура **Добротность** — параметр колебательной системы, определяющий ширину резонанса и характеризующий, во сколько раз запасы энергии в системе больше, чем потери энергии за время изменения фазы на 1 радиан. Обозначается символом Q от англ. quality factor.

Добротность обратно пропорциональна скорости затухания собственных колебаний в системе. То есть, чем выше добротность колебательной системы, тем меньше потери энергии за каждый период и тем медленнее затухают колебания.

Ещё один параметр колебательного контура - **Комплексное сопротивление (импеданс)**.

Колебательный контур может быть рассмотрен как двухполюсник. Комплексное сопротивление такого двухполюсника можно записать как:

$$\hat{z}(i\omega) = \frac{i\omega L}{1 - \omega^2 LC},$$

где i — мнимая единица.

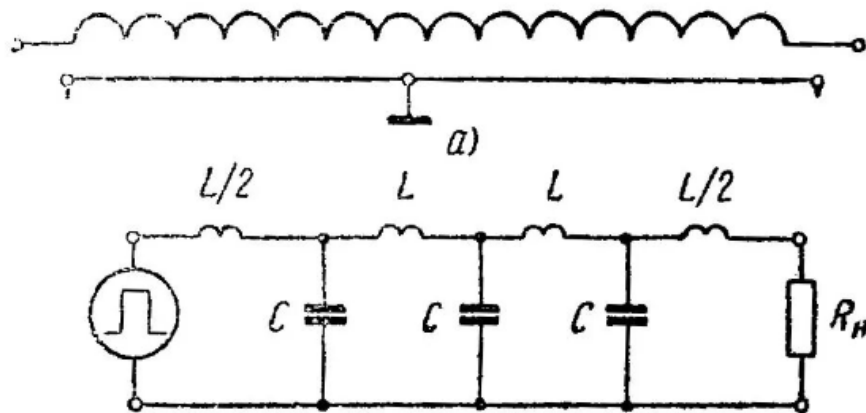
Для такого двухполюсника может быть определена характеристическая частота или резонансная частота, когда импеданс колебательного контура стремится к бесконечности (знаменатель дроби стремится к нулю). Эта частота совпадает по значению с собственной частотой колебательного контура.

$$\omega_h = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

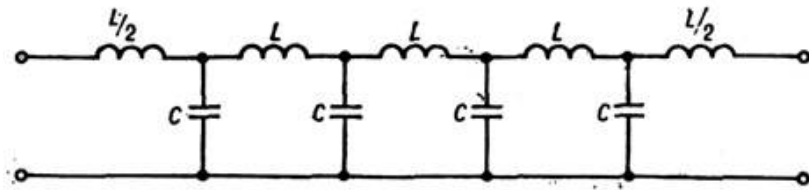
Цепи, состоящие из конденсаторов

Линия задержки

Линия задержки (ЛЗ) — устройство, предназначенное для задержки электрических и электромагнитных сигналов на заданный промежуток времени



Электрическая линия задержки с сосредоточенными параметрами представляет собой цепочку из одинаковых звеньев (ячеек), состоящих из катушек индуктивности и конденсаторов. Задержка сигнала обусловлена развитием переходного процесса.



Х и Y конденсаторы

Х конденсаторы обычно используются совместно с Y конденсаторами и применяются в качестве помехоподавляющих элементов фильтров. Конденсаторы класса Х и конденсаторы класса Y используются во входных цепях источника питания переменного тока.

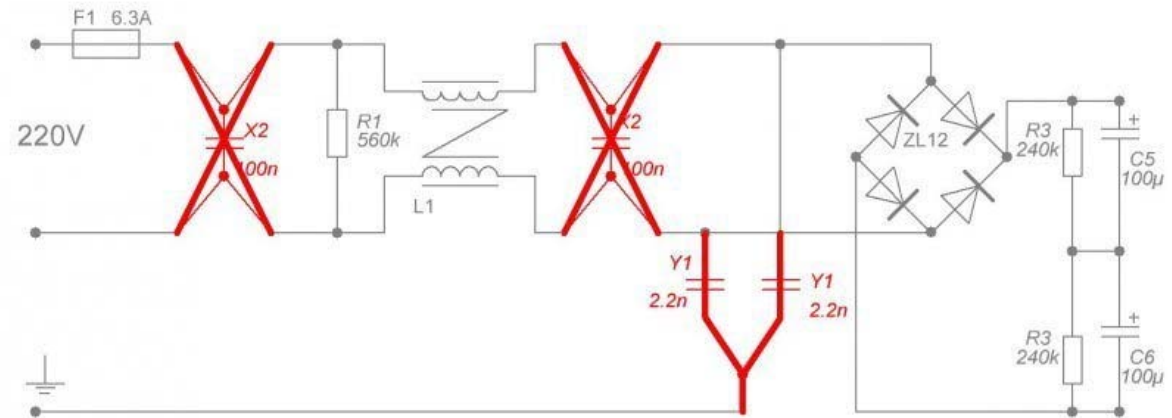
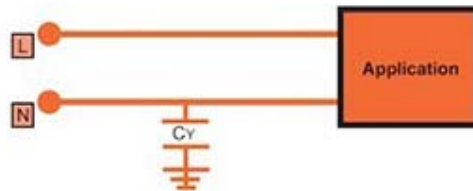
Откуда произошло название Х и Y конденсаторов?

Если обвести эти проводники посильнее, то можно увидеть, что включение Х конденсатора напоминает букву Х, а Y конденсаторов, соответственно букву Y.

Class X Capacitor (Line - to -Line)



Class Y Capacitor (Line - to -Ground)

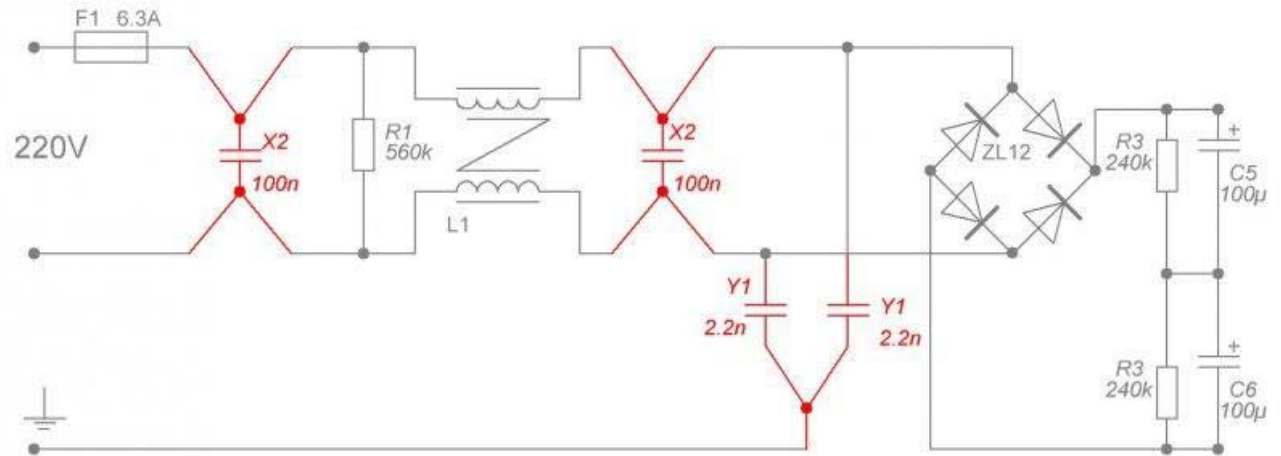


Существуют различные стандарты и связанные с ними подклассы (X1, X2, X3 и Y1, Y2, Y3, Y4), которые указывают возможности и пороговое значение конденсаторов безопасности. Стандарты : IEC 60384-14, UL 1414, UL 1283, CAN/CSA C22.2 No.1 и CAN/CSA 384-14.

Х и Y конденсаторы

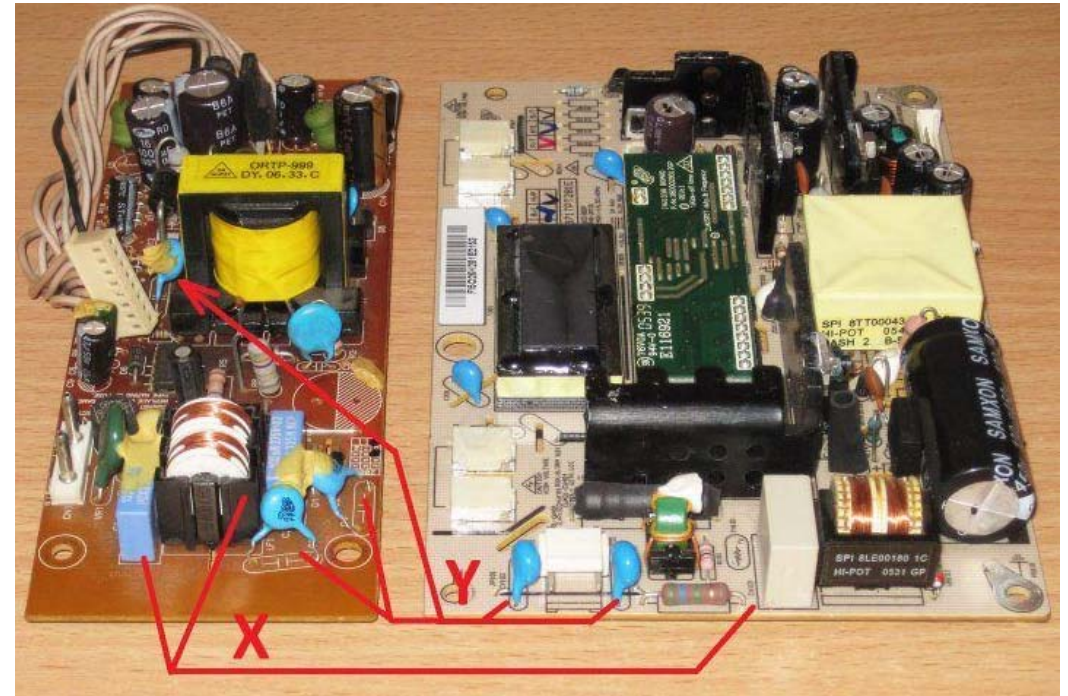
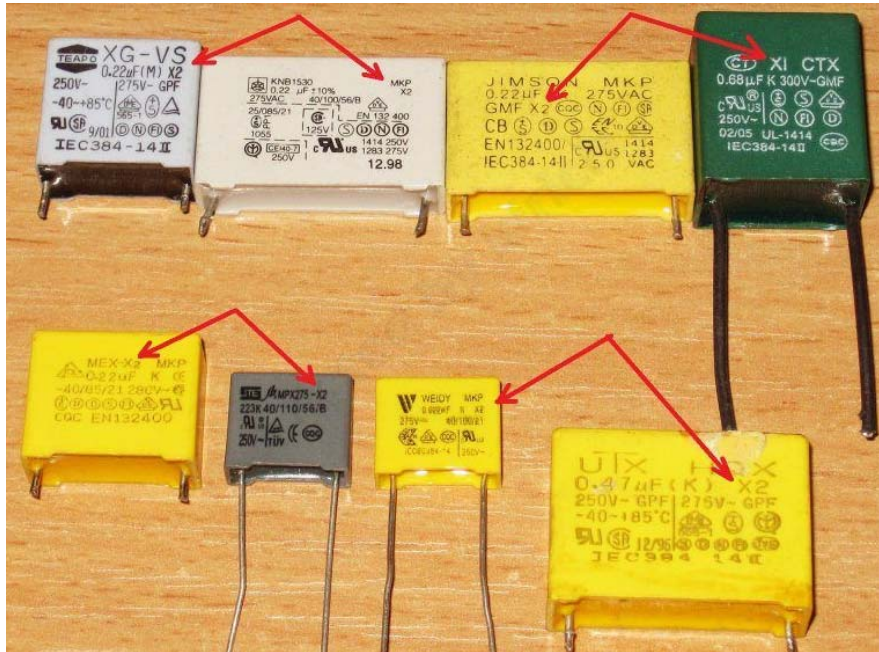
Конденсаторы класса Х используются для минимизации электромагнитных помех, вызванных дифференциальным шумом в источнике питания переменного тока, и часто называются конденсаторами «линия-линия» или «через линию». Они размещаются между соединениями «линия» переменного тока (черный) и «нейтраль» переменного тока (белый) для минимизации неблагоприятных эффектов из-за кондуктивных помех, скачков перенапряжения и переходных напряжений.

Конденсаторы класса Y обычно называются конденсаторами «линия-земля» или «линия-байпас». Они размещаются между источником переменного тока и землей для устранения электромагнитных помех, вызванных синфазными помехами в линии переменного тока.



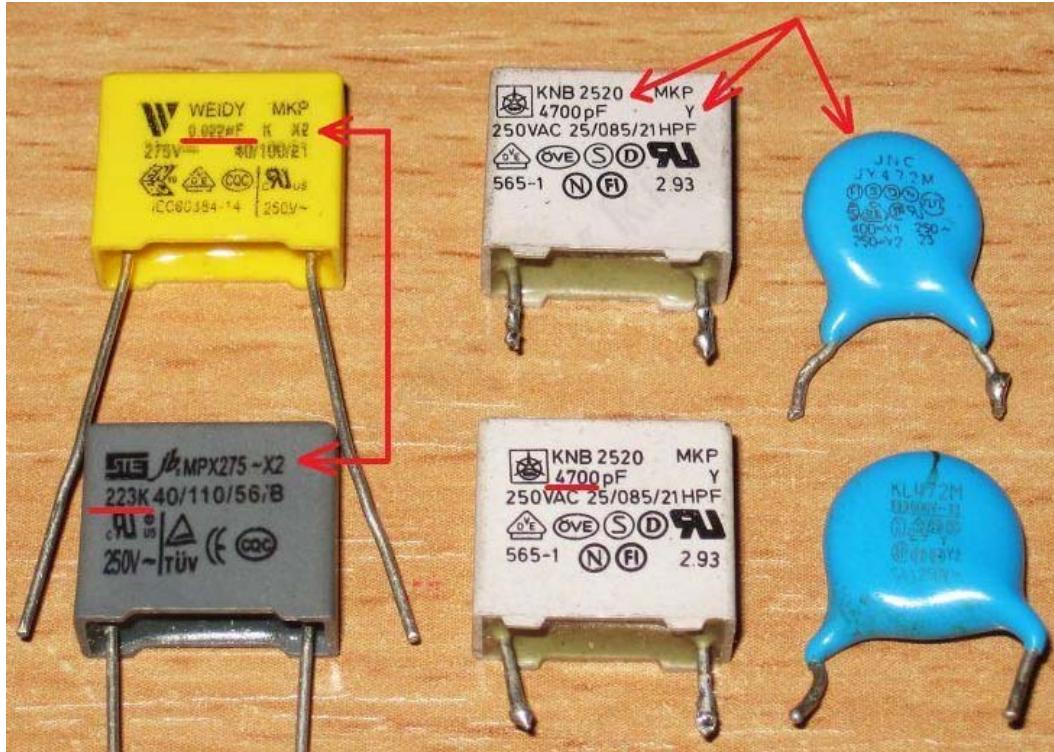
Х и Y конденсаторы

На каждом конденсаторе класса X и конденсаторы класса Y обязательно должна присутствовать соответствующая маркировка. Чаще всего класс X выполнен в пластиковом прямоугольном корпусе с названием X2.

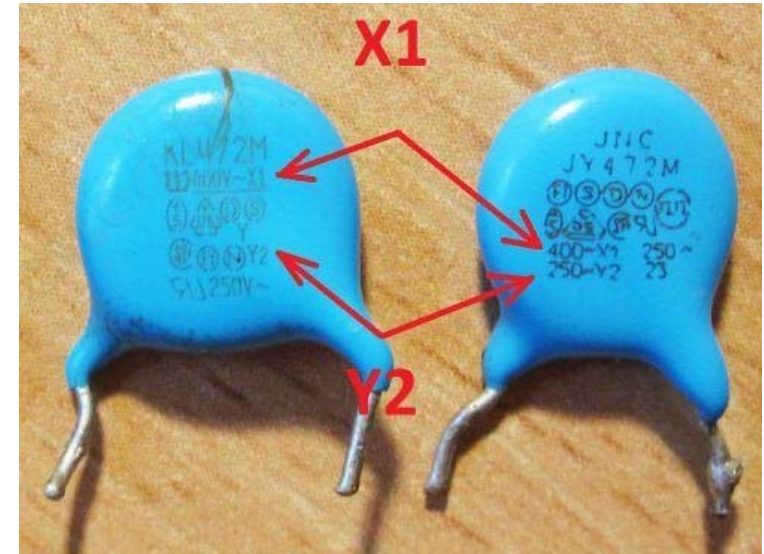


Х и Y конденсаторы

Класс Y чаще всего выполнен в круглом залитом компаундом корпусе с обозначением Y. Но встречаются и в пластиковом прямоугольном корпусе.



Конденсаторы Y типа можно использовать вместо X типа, мало того, иногда указывается даже двойная маркировка. Причем даже конденсатор Y2 можно смело применять вместо X1.



Схемы на переключаемых конденсаторах

Схемы на переключаемых конденсаторах — обширный класс схемотехнических решений, основанный на периодической коммутации конденсаторов.

1. Схемы с накачкой заряда

- Умножители напряжения
- Делители напряжения

2. Фильтры

- Фильтр низких частот
- Полосовой фильтр

3. АЦП и ЦАП

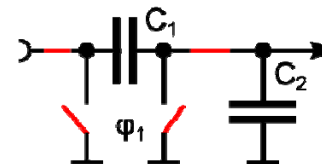
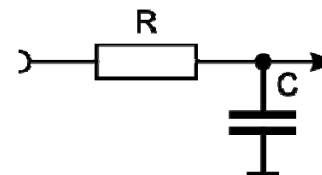
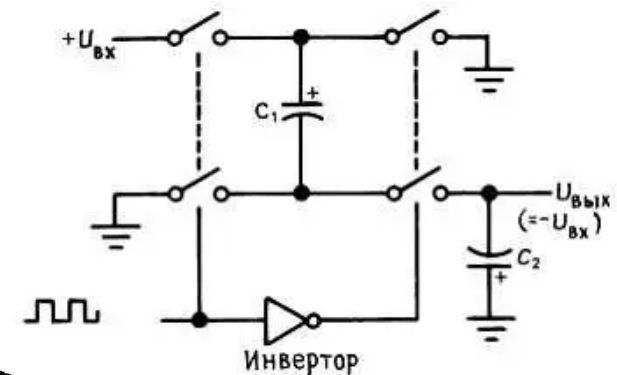
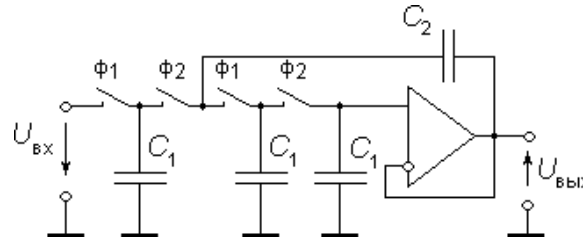
- Сигма-дельта АЦП и ЦАП
- АЦП с двойным интегрированием
- Преобразователи напряжение-частота

4. Устройство выборки и хранения

5. Усилители стабилизированные прерыванием

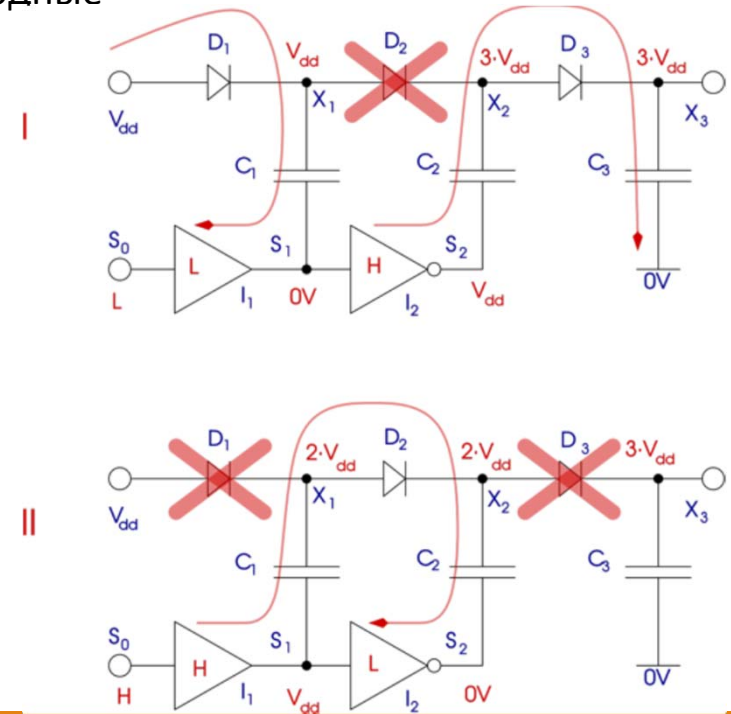
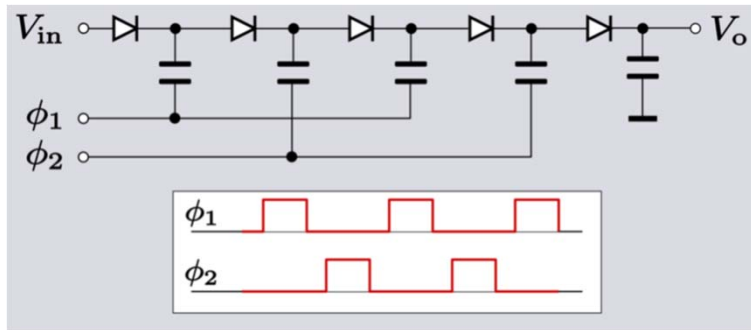
6. Замена резисторов в интегральном исполнении

7. Сдвиг (перенос) напряжения



Схемы на переключаемых конденсаторах

Схемы с накачкой заряда (англ. charge pump, зарядовый насос) относятся к одному из видов преобразователей постоянного напряжения в постоянное (DC-DC converters). Этот вид преобразователей использует конденсаторы в качестве накопителей заряда, который переносится от одного конденсатора к другому с помощью системы переключателей. Название **«зарядовый насос»** обычно означает маломощный повышающий преобразователь, в котором конденсаторы подключены к источнику тактовых импульсов, а роль переключателей выполняют диоды. Два логических состояния тактового импульса («0» или «1») задают две фазы переключения (топологии) схемы с накачкой заряда. К двухфазным зарядовым насосам относятся все диодные умножители напряжения, а также некоторые сложные преобразователи, такие как Fibonacci Charge Pump и Multiple-Lift Luo Converters. Существуют также схемы с несколькими фазами переключения (multi-phase). В случае если зарядный насос понижает напряжение и имеется какой-либо механизм его плавной регулировки используется название преобразователь на переключаемых конденсаторах (ППК).



Схемы на переключаемых конденсаторах

Фильтр низких частот

На рисунке справа представлен классический фильтр низких частот на RC-цепочке. Частота среза RC-цепочки рассчитывается по формуле:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C}$$

Для схемы на переключаемых конденсаторах частота среза рассчитывается с учётом замены резистора по формуле:

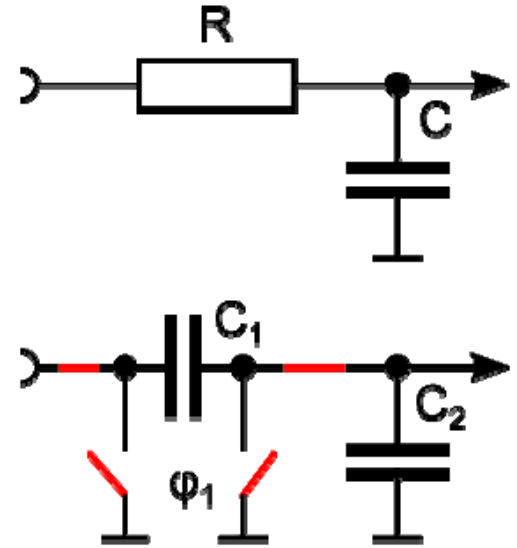
$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot R \cdot C_2} = f_c \frac{C_1}{2\pi \cdot C_2}$$

где:

f_0 — частота среза фильтра,

C_1 и C_2 — ёмкости конденсаторов,

f_c — частота переключения конденсатора.



Схемы на переключаемых конденсаторах

Замена резисторов в интегральном исполнении

Известно, что сила тока I в проводнике прямо пропорциональна приложенному напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению R проводника (Закон Ома для однородного участка цепи). В то же время сила тока I равна отношению заряда ΔQ , переносимого через проводник за интервал времени Δt .

где:

$$I = \frac{U}{R} \text{ и } I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \quad (1)$$

I — сила тока,

U — напряжение или разность потенциалов,

R — сопротивление.

Сопротивление цепи рассчитывается по формуле:

$$R = \frac{U \cdot \Delta t}{\Delta Q} \quad (2)$$

Перенос заряда через конденсатор по схеме на рис.2 можно рассчитать по формуле

$$Q = C \cdot U \quad (3)$$

где:

Q — заряд конденсатора, C — ёмкость конденсатора,

U — разность потенциалов на обкладках конденсатора.

Используя равенства (2) и (3) получаем

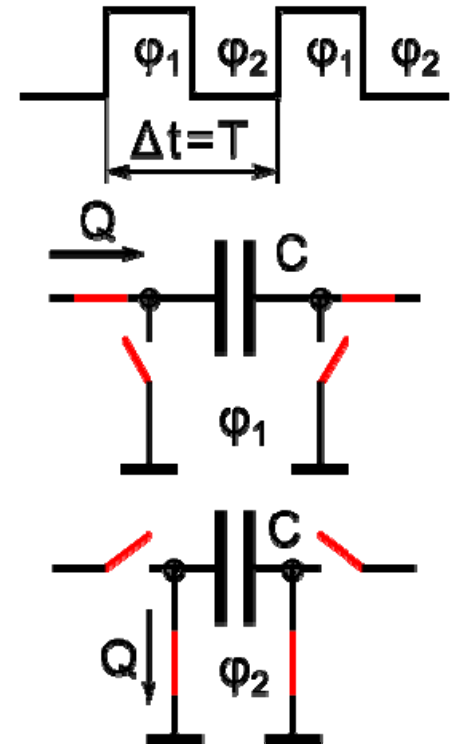
$$R = \frac{U \cdot T}{C \cdot U} = \frac{T}{C} = \frac{1}{f \cdot C}$$

где:

T — период переключения конденсатора, C — ёмкость конденсатора,

f — частота переключения конденсатора.

Следовательно, сопротивление цепи с переключаемым конденсатором обратно пропорционально произведению частоты переключения конденсатора на значение его ёмкости.



Схемы на переключаемых конденсаторах

Сдвиг (перенос) напряжения

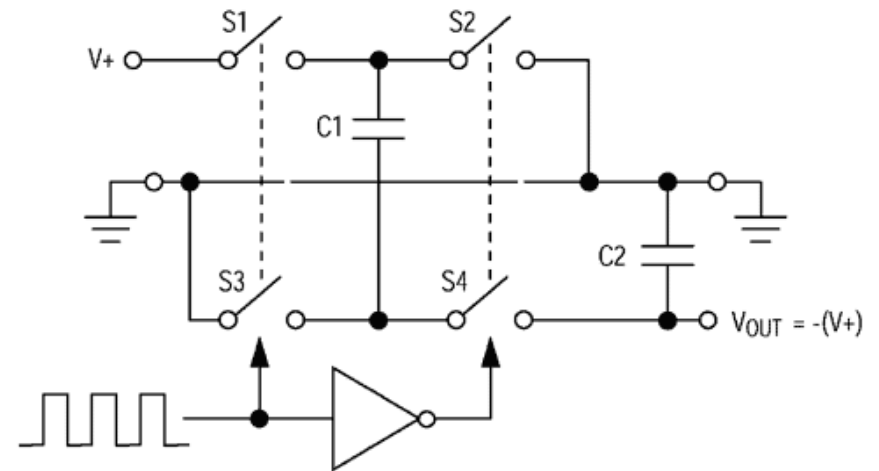
Принцип работы схемы в режиме **идеального инвертора напряжения**.

При замыкании ключей S1 и S3 и размыкании ключей S2 и S4 во время первой половины цикла внешний конденсатор C1 заряжается от источника питания до напряжения V_+ , а при замыкании ключей S2 и S4 и размыкании ключей S1 и S3 во время второй половины цикла конденсатор C1 передает частично свой заряд внешнему конденсатору C2, обеспечивая на выводе VOUT микросхемы напряжение $-V_+$. Указанные значения напряжения соответствуют установившемуся режиму.

Энергия, передаваемая конденсатором C1 за один цикл, определяется с помощью выражения:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C1 \cdot (V_1^2 - V_2^2),$$

где V_1 (V_2) - напряжение на конденсаторе C1 в конце первой (второй) половины цикла.



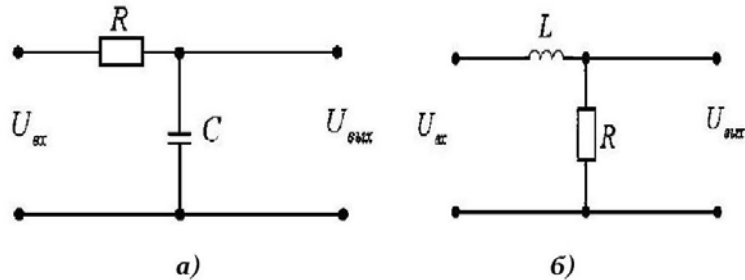
Интегрирующая цепь

Интегрирующей называется цепь, величина выходного напряжения которой пропорциональна интегралу по времени от величины входного напряжения.

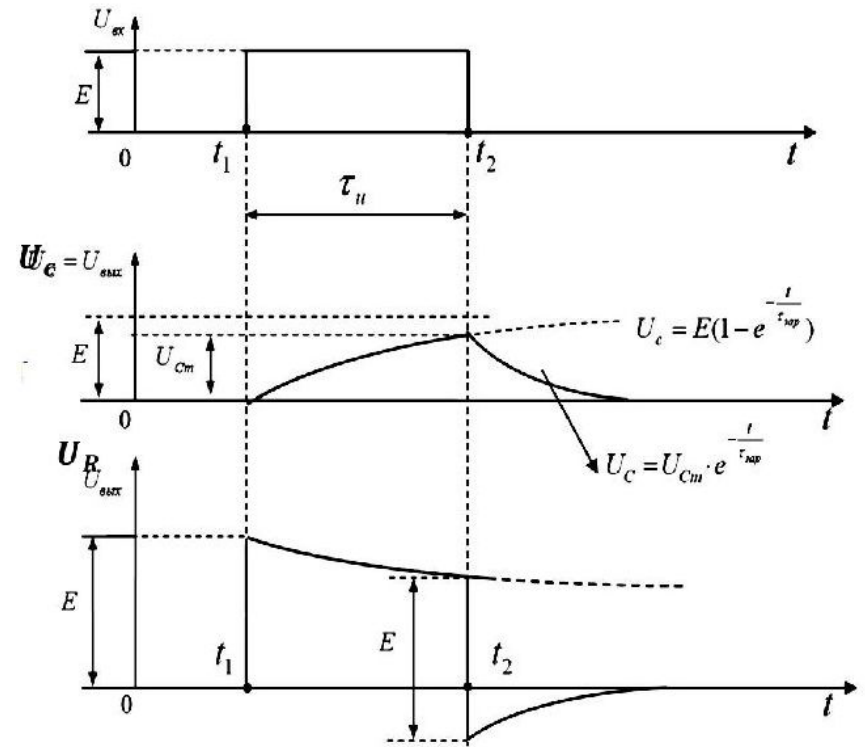
Математически это выражается формулой:

$$U_{\text{ВЫХ}}(t) = k \int_0^t U_{\text{ВХ}}(t) dt$$

Виды интегрирующих цепей



Цепи, состоящие из конденсаторов



Интегрирующая цепь

Напряжение на конденсаторе и ток, протекающий через него, связаны зависимостью:

$$U_c(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_c(t) dt$$

Интегрирующая цепь представляет собой делитель напряжения, ток через который равен:

$$i_c = \frac{U_{вх}}{R + x_c}$$

Отсюда следует:

$$U_c = \frac{1}{C} \int_0^t \frac{U_{вх}}{R + x_c} dt$$

Цепи, состоящие из конденсаторов

Если выбрать $R \gg x_c$ для высшей гармоники ω_B прямоугольного импульса, т.е. $R \gg \frac{1}{\omega_B C}$, то $U_R \gg U_c$ и, следовательно, $U_{вых} \ll U_{вх}$

Тогда последнее выражение примет вид: $U_c = U_{вых} \approx \frac{1}{RC} \int_0^t U_{вх} dt$

Это выражение показывает, что чем точнее выполняется неравенство $U_{вых} \ll U_{вх}$, тем точнее выполняется условие интегрирования. Для выполнения этого условия необходима достаточно большая величина постоянной времени $\tau = RC$. Поэтому для интегрирования всегда требуется выполнение неравенства $\tau \gg \tau_{и}$

Интегрирующая цепь

ИЦ как фильтр нижних частот

Существенное изменение формы входного импульса при интегрировании можно объяснить с помощью спектрального анализа. Действительно, при

$$\tau \gg \tau_{\text{и}}$$

реактивное сопротивление конденсатора большой ёмкости

$x_c = \frac{1}{\omega C}$ **становится значительно меньшим величины R не только для высокочастотных гармоник, определяющих фронты импульса, но и для низкочастотных гармоник, формирующих его плоскую вершину.**

Следовательно, большая часть напряжения всех участков входного импульса падает на сопротивлении R , а не на выходе цепи.

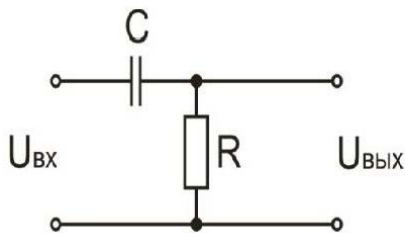
Поэтому интегрирующую цепь можно рассматривать как фильтр нижних частот.

Дифференцирующая цепь

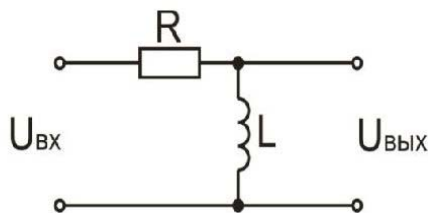
Цепи, состоящие из конденсаторов

Дифференцирующей называется цепь, на выходе которой напряжение пропорционально первой производной от входного напряжения.

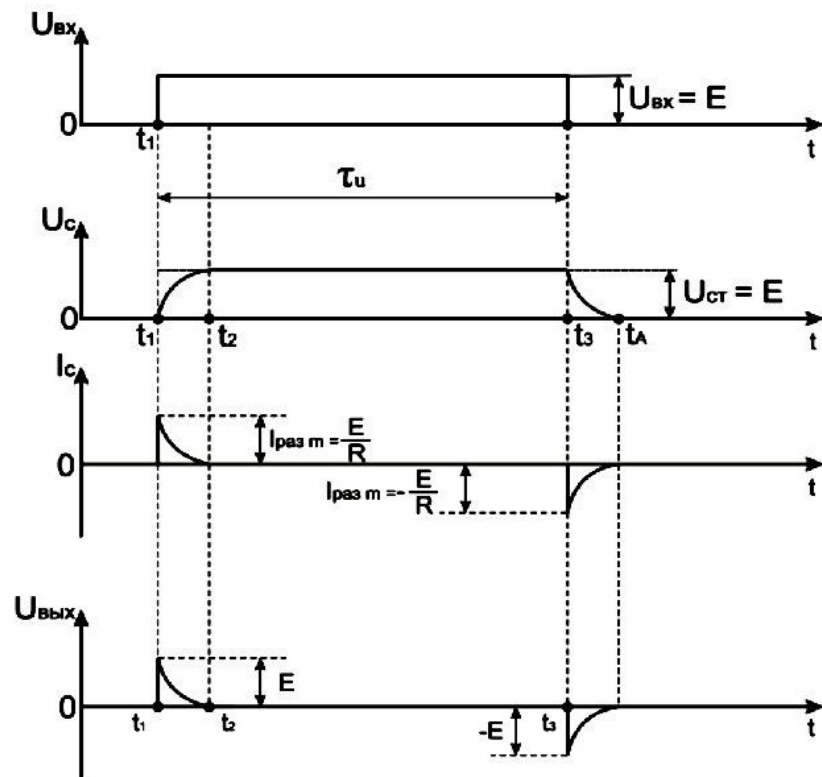
$$U_{\text{ВЫХ}} = k \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}$$



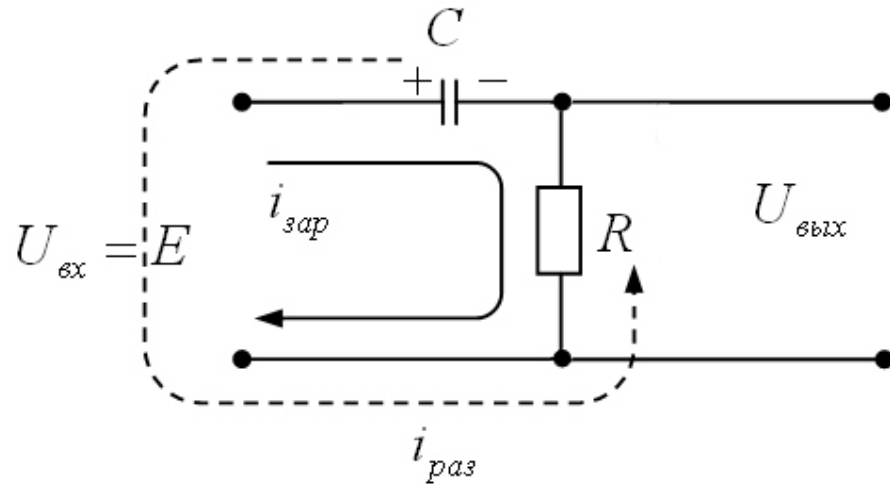
а) ёмкостная



б) индуктивная



Дифференцирующая цепь



Ёмкостная дифференцирующая цепь

Ток, протекающий через ёмкость: $i_c = C \frac{dU_c}{dt}$ (2)

Из схемы ДЦ видно, что $U_{\text{вх}} = U_c + U_R$

$$U_c = U_{\text{вх}} - U_R = U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}}$$

Выходное напряжение $U_{\text{вых}} = U_R = i_c \cdot R$ (3)

Подставив (1) в (2), получим: $U_{\text{вых}} = RC \frac{d(U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})}{dt}$ (4)

Если выбрать достаточно малую величину R , чтобы

$$U_{\text{вых}} = U_R \ll U_{\text{вх}},$$

то получим приближённое равенство:

$$U_{\text{вых}} \approx RC \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} \text{ (5)}$$

Дифференцирующая цепь

ДЦ как фильтр верхних частот

Изменение формы импульса на выходе дифференцирующей цепи можно объяснить с точки зрения спектрального анализа.

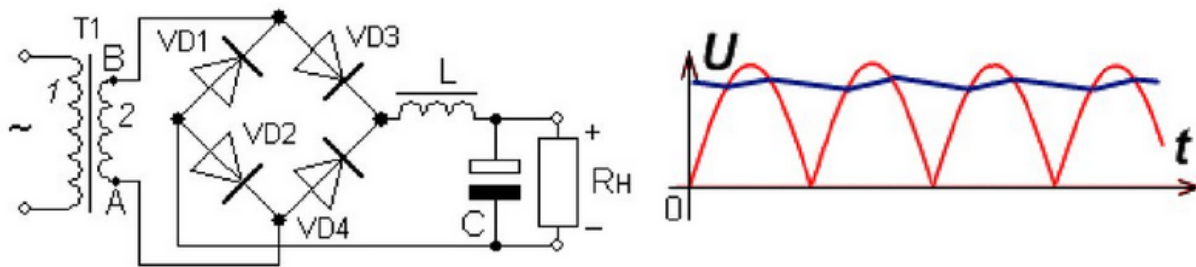
***Каждая гармоника входного импульса делится между R и C .
Для гармоник низких частот, определяющих вершину входного импульса, конденсатор представляет большое сопротивление, т.к.***

$$x_c = \frac{1}{\omega_n C} \gg R$$

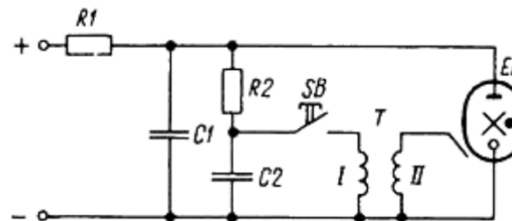
На выход плоская вершина входного импульса почти не передаётся. Фронт и срез входного импульса на выход передаются практически без ослабления. Эти соображения позволяют определить дифференцирующую цепь как фильтр верхних частот.

Примеры применения конденсаторов

- Конденсаторы (совместно с катушками индуктивности 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.

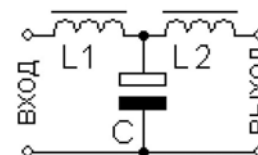


- При быстром разряде конденсатора можно получить импульс большой мощности, например, в фотовспышках, электромагнитных ускорителях, импульсных лазерах с оптической накачкой, генераторах Маркса, (ГИН; ГИТ), генераторах Кокрофта-Уолтона и т. п.

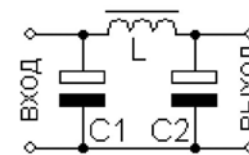


Основные схемы сглаживающих фильтров питания

3. Т-образный

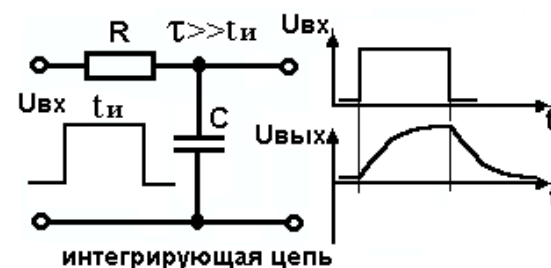
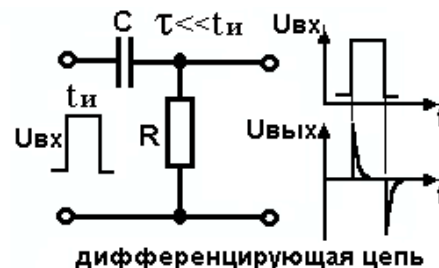
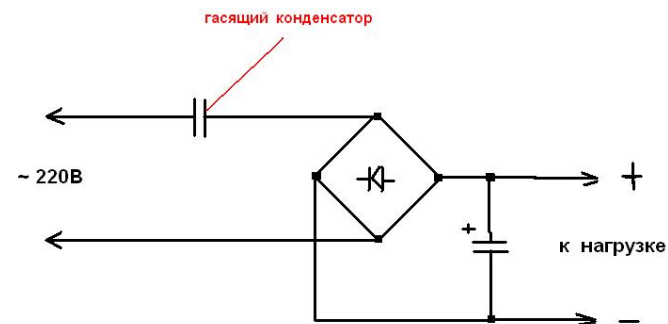


4. П-образный



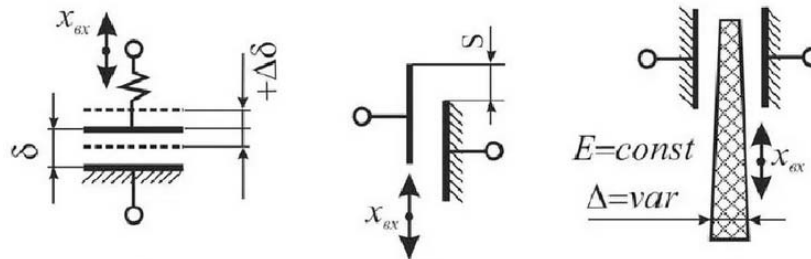
Примеры применения конденсаторов

- 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.).

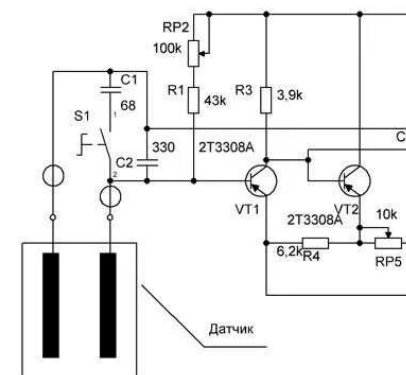
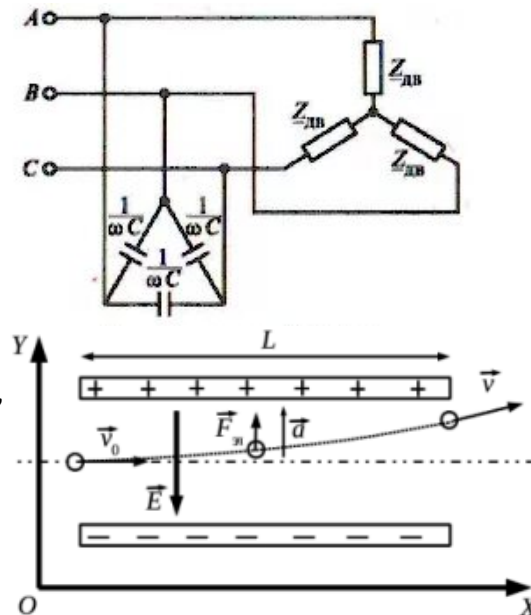


Применение конденсаторов

- 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 (см. генератор Ван де Граафа).
- *Измерительный преобразователь малых перемещений*: малое изменение расстояния между обкладками очень заметно сказывается на ёмкости конденсатора.

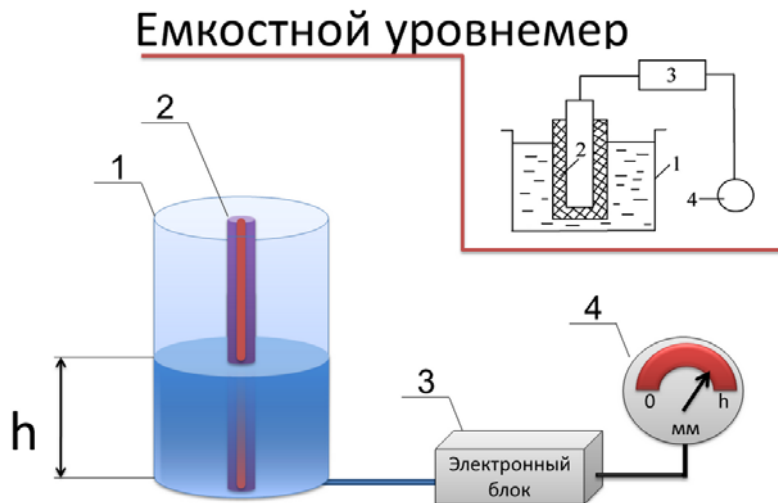


- *Измерительный преобразователь влажности воздуха, древесины* (изменение состава диэлектрика приводит к изменению ёмкости).

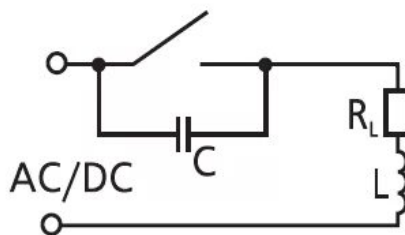


Применение конденсаторов

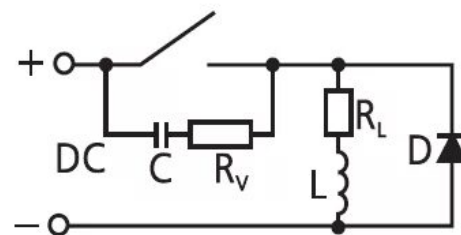
- В схемах РЗиА конденсаторы используются для реализации логики работы некоторых защит. В частности, в схеме работы АПВ использование конденсатора позволяет обеспечить требуемую кратность срабатывания защиты. Искрогасящие цепи на конденсаторах.
- Измерителя уровня жидкости. Непроводящая жидкость заполняет пространство между обкладками конденсатора, и ёмкость конденсатора меняется в зависимости от уровня.



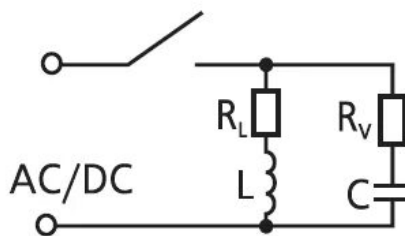
Конденсатор



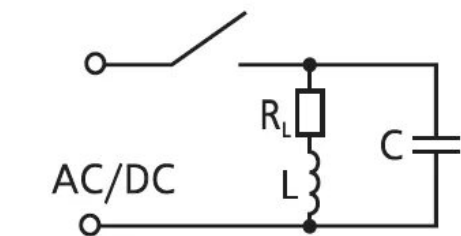
RCD - схема



RC - цепь

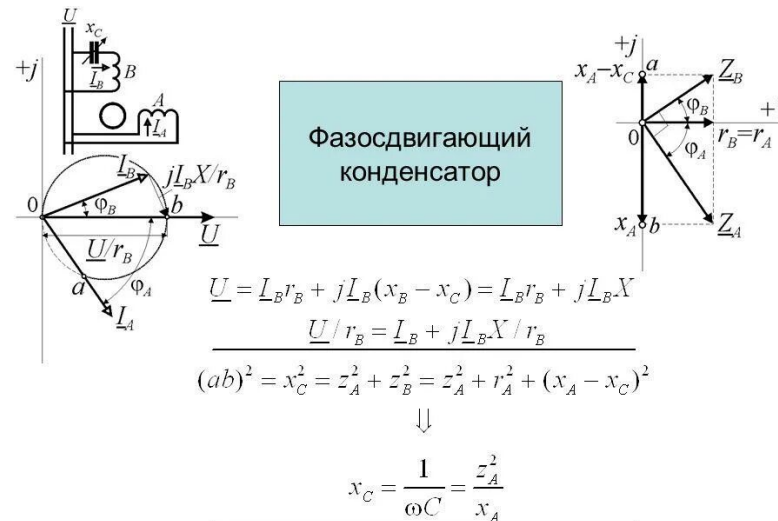


Конденсатор



Применение конденсаторов

- 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 должны 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.



Конденсаторы, выпускаемые промышленностью

Для разработки электронного устройства можно конденсаторы изготовить самостоятельно, например, в виде полигона на печатной плате, но подавляющее большинство конденсаторов будут использоваться промышленного производства. Конденсаторы выпускаются предприятиями в Америке, в Европе, в Азии и в России.

Sanyo, Rubycon, Nippon Chemi-Con, Nichicon, Fujitsu, EPCOS, CapXon, Jamicon, Matsushita (Panasonic), Hitachi, HITANO, ELNA, Vishay, SAMWHA.

Конденсаторы азиатского производства:
Teapo, OST, D.S (VENT), Chhsi (HK(M), WG(M)), G-LUXON (SM), GSC, Fuhjyyu, HEC, Jackcon, Jee, Li-con (Licon), Jenpo, JPCON, JODEN, Rulycon, Rubysun, Tayeh, Lelon, Ltec, E.V.A.TOP, JunFu (WG, HK), FULLTEC, KYS, SOWA, Su'scon, KSC, EASICON, Gjt, Elite, TREC, SC или CS, GLORIA (GAE), MK (M)P8, Samxon.

Российские производители конденсаторов

АО «БПСЗ»

ООО «ВКЗ»

АО "НИИ" Гириконд"

ООО "СКЗ"КВАР"

ООО "КЗК"

ООО «Кулон»

ОАО "Завод "Мезон"

ОАО "ВЗРД "Монолит"

ООО НЗК

ООО «Нюкон»

АО «НЗР «Оксид»

АО "ПЗР "Плескава"

ООО "Поликонд"

ООО "ЗВЭК "Прогресс"

ОАО «Завод «Реконд»

ООО «СКЗ»

АО "Элеконд"

ЗАО "Элкод"

Российские производители конденсаторов

Новосибирский Завод Конденсаторов <https://po-nzk.ru/>



Плёночные
Конденсаторы



Металлобумажные
конденсаторы



Силовые
конденсаторы



Полимерные
Конденсаторы



Полипропиленовые
конденсаторы



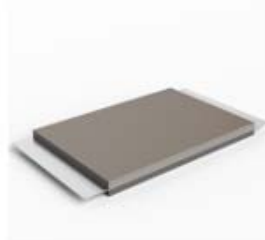
Помехоподавляющие
конденсаторы



Пусковые
Конденсаторы

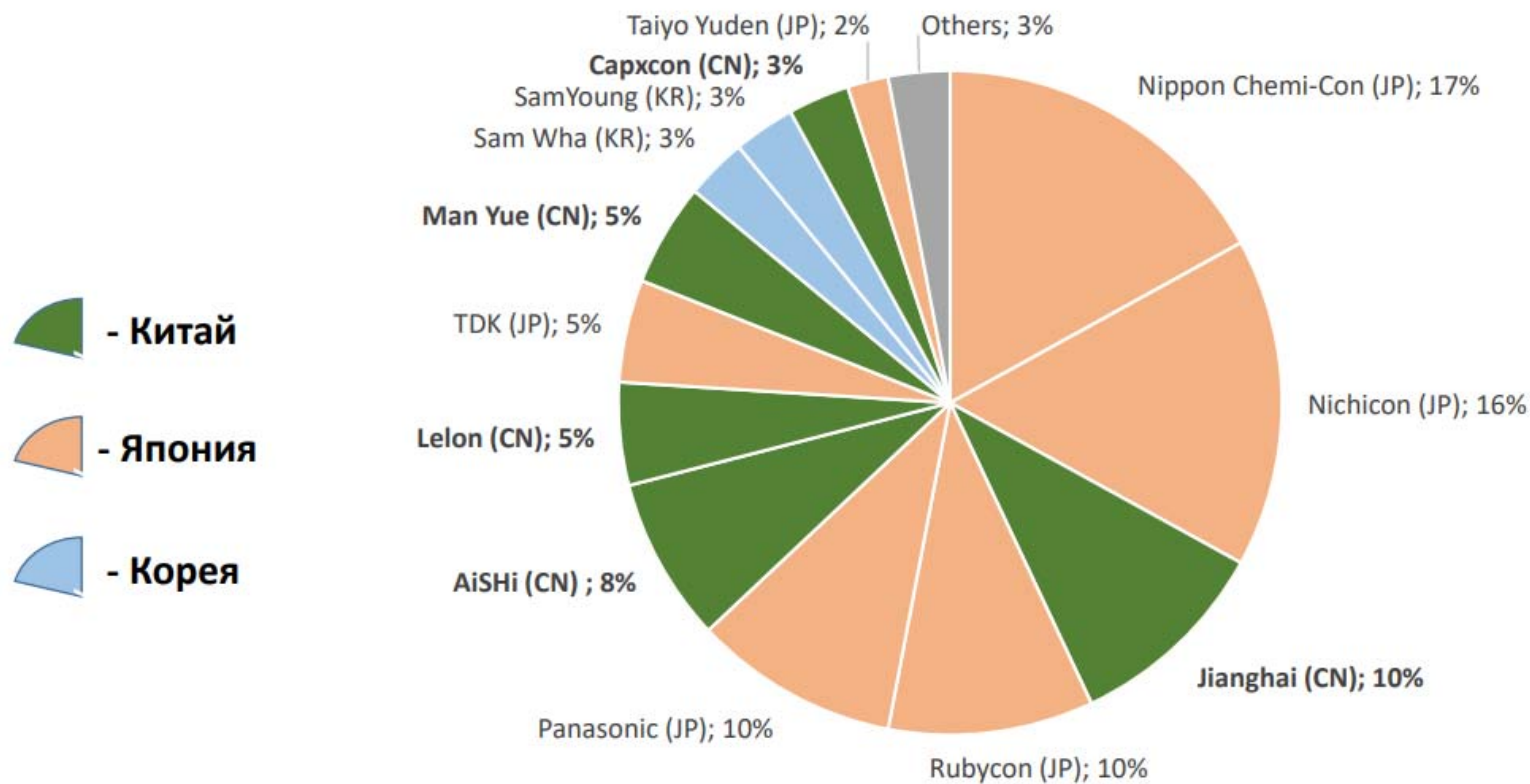


Проходные
конденсаторы



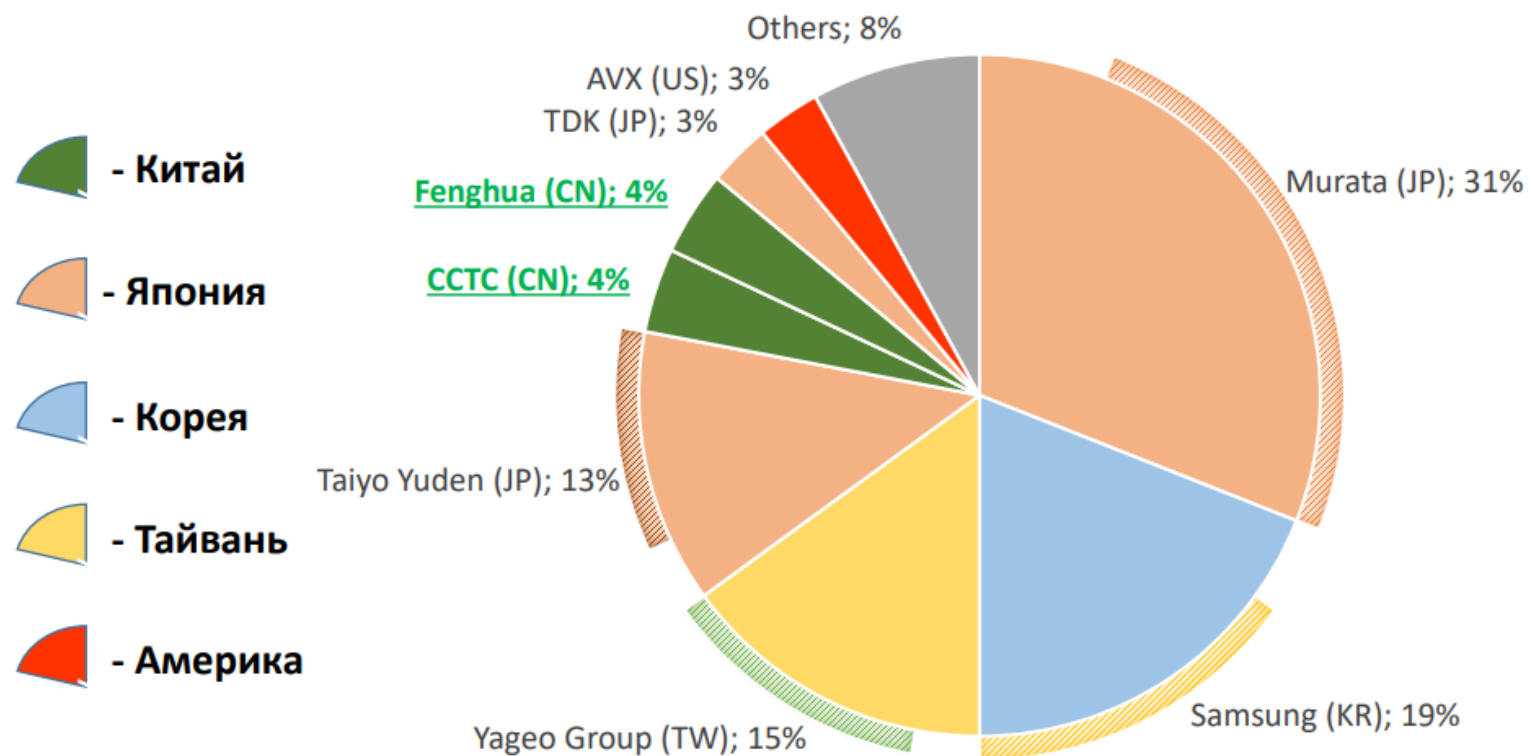
Слюдяные
конденсаторы

Китайские производители алюминиевых электролитических конденсаторов на Мировой арене



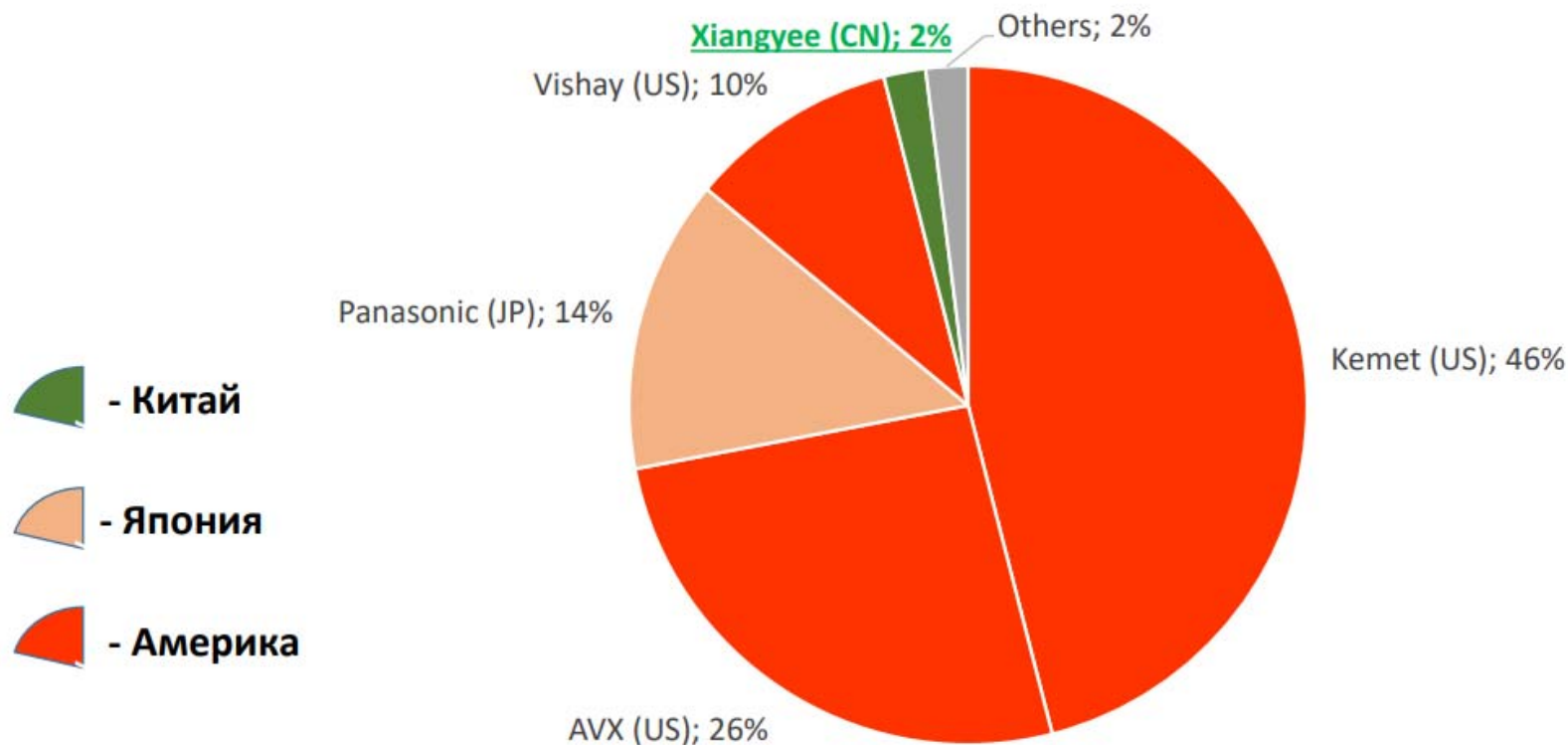
Примерный объем мирового рынка — 6.05 млрд. \$

Китайские производители многослойных керамических конденсаторов на Мировой арене



Примерный объем мирового рынка – 5.7 млрд. \$

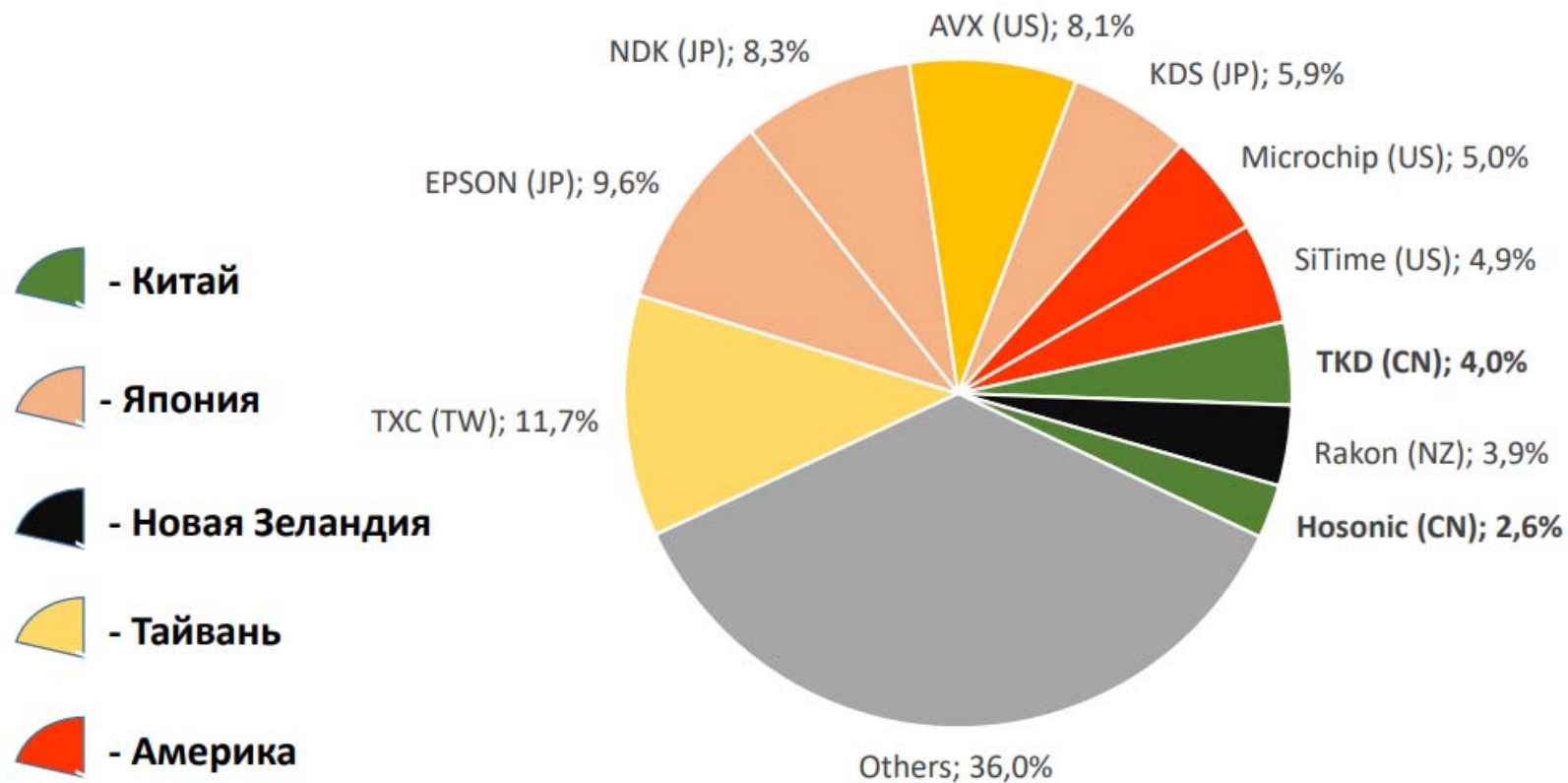
Китайские производители танталовых конденсаторов на Мировой арене



Примерный объем мирового рынка – 1.6 млрд. \$ (гражданское применение)

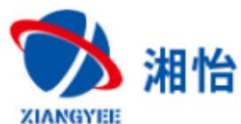
Компания Xiangyee является OEM производителем для AVX и Kemet.

Китайские производители тактирующих компонентов на Мировой арене



Примерный объем мирового рынка — 4.4 млрд. \$

Обзор производств



[Видео с производства
компании Xiangyee
\(rutube.ru\)](#)



[Видео с производства
компании Fuantronics
\(rutube.ru\)](#)

LINK-PP



[Видео с производства
компании YXC \(rutube.ru\)](#)



Ведущий производитель
широкого спектра пассивных
компонентов на рынке Китая

Все оборудование
Китайского производства



Более **20 000** замен на US, EU, KR, JP и TW бренды по товарным группам:

- Резисторы постоянные и сборки
- Конденсаторы керамические
- Индуктивные компоненты
- Варисторы



Более **700** клиентов уже
сделали свой выбор в пользу
продукции **Fenghua**

Действующая складская программа с **Fenghua**
по **Варисторам** и **Чип-Индуктивностям**



Обзор производителя Xiangyee



Ведущий производитель
танталовых конденсаторов
на рынке Китая



Более **950 клиентов** уже
сделали свой выбор в пользу
продукции **Xiangyee**

Все оборудование
Китайского
производства



Более **4 000** замен на
US и JP бренды



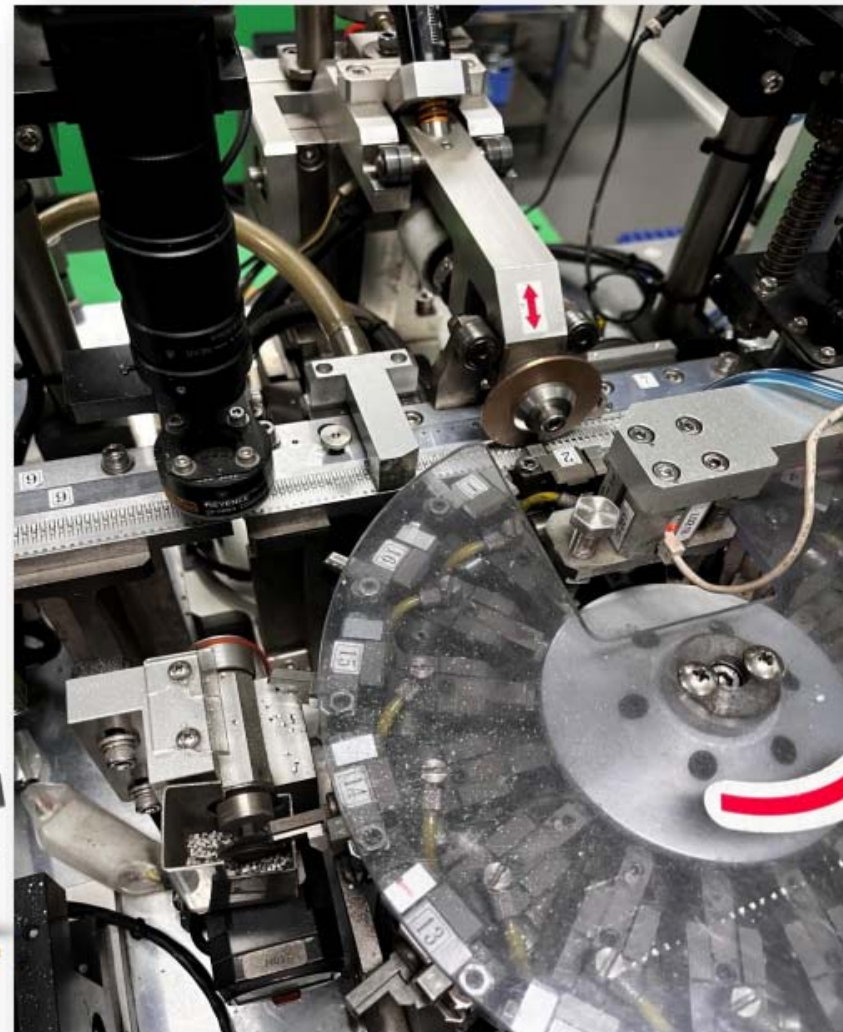
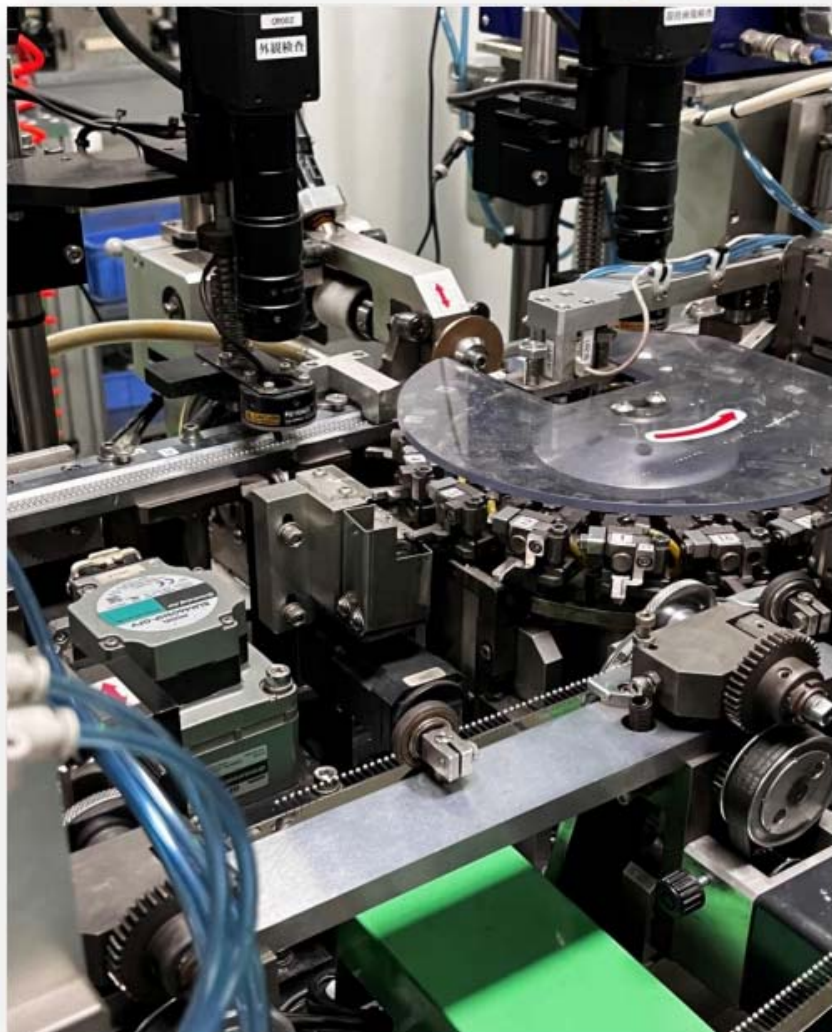
Действующая складская программа с
Xiangyee по **Танталовым**
конденсаторам на **300 тыс. \$**



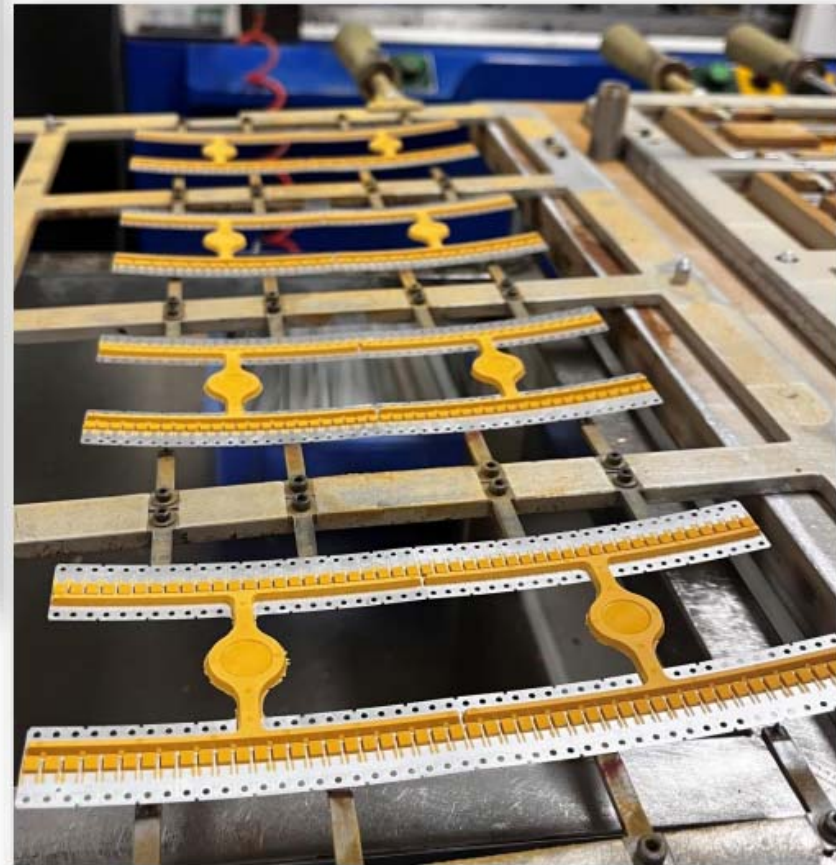
Производственный цех

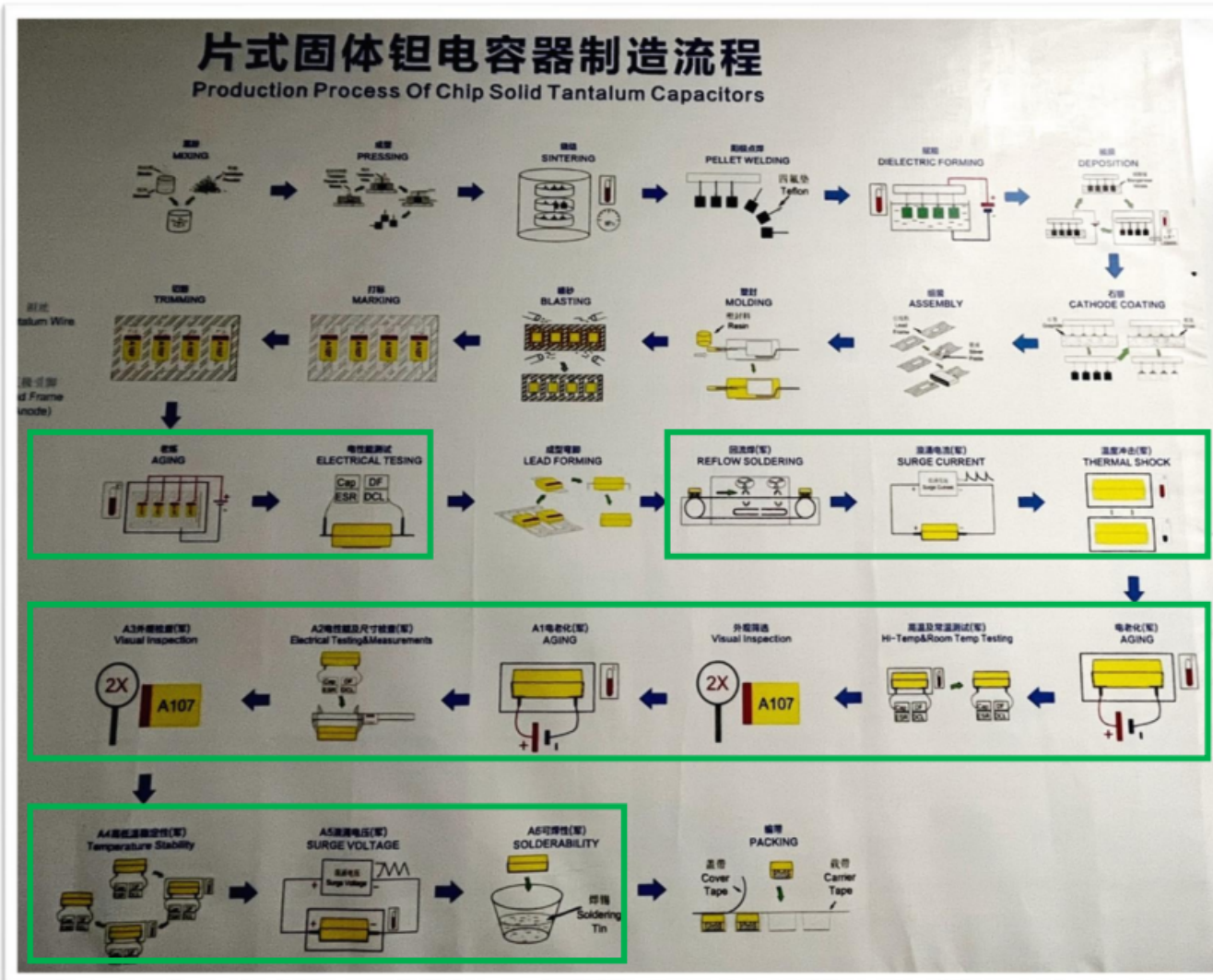


Покрывание катода и сборка



Формовка и корпусирование





28 производственных этапов

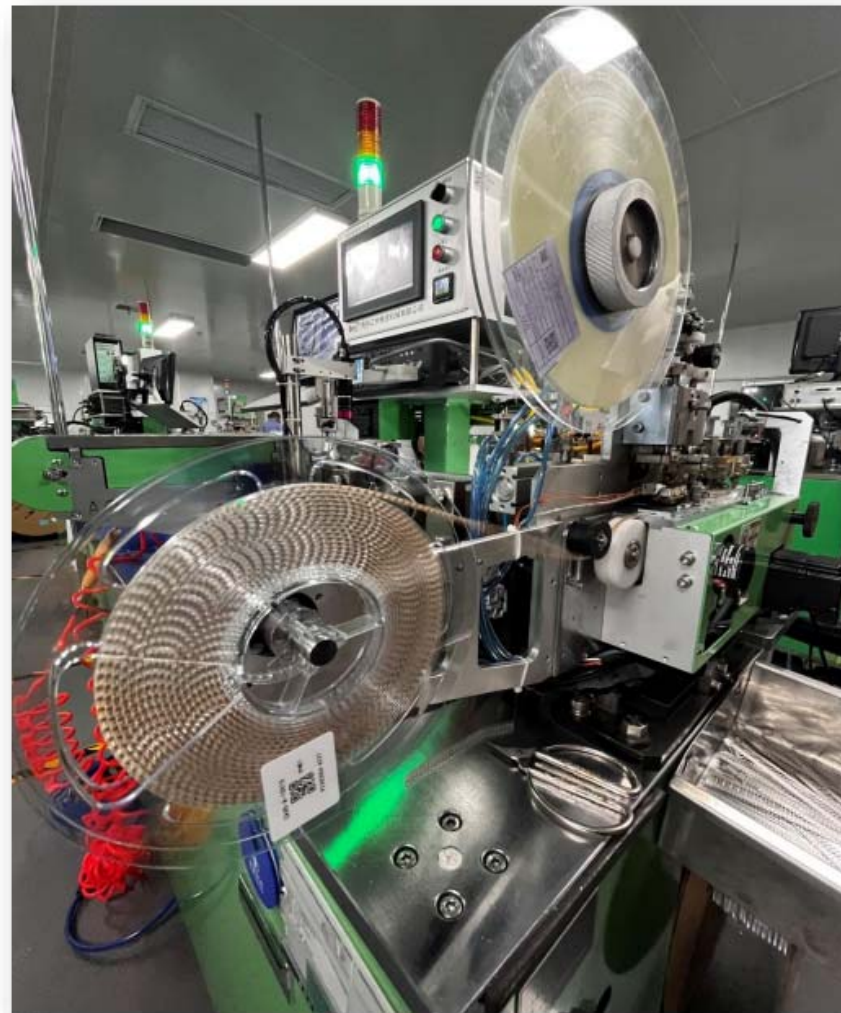
14 из которых – связаны с тестированием и качеством:

- наработка под рабочим напряжением
- измерение параметров (C\ESR\DF\DCCL)
- паяемость
- пиковый ток
- градиент температур
- визуальный контроль
- пиковое напряжение

Все **100%** конденсаторов проходят тестирование!

Отбраковка идет на каждом этапе.

Финальное тестирование и упаковка в катушки





Обзор производителя YXC



**Первый Китайский
производитель**
специализирующийся на
программируемых **MEMS**
генераторах

Все оборудование
Китайского
производства



Более **400** замен на
US, EU и JP бренды



Более **700** клиентов уже
сделали свой выбор в пользу
продукции **YXC**

Действующая складская программа с **YXC** по
Тактирующим компонентам
Доступен **склад готовой продукции напрямую от
производителя** общей стоимостью более **1 млн. \$**



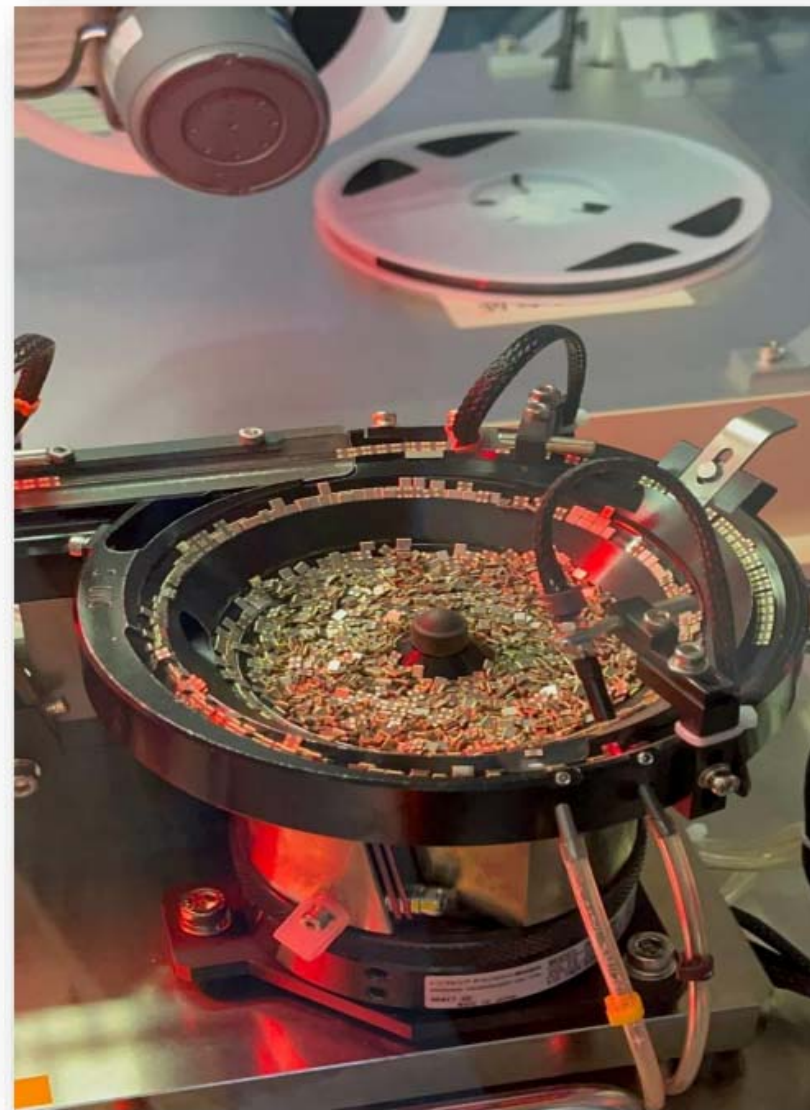
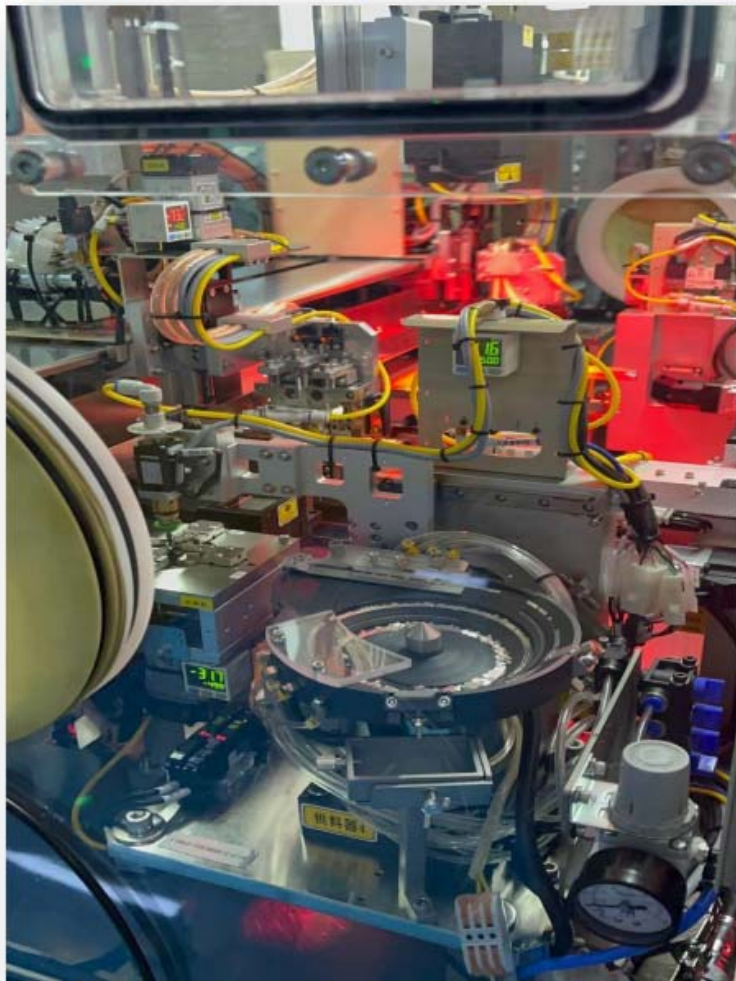
Тестирование



Нанесение
маркировки



Завершающий процесс тестирования, маркировка и упаковка в катушку



Программирование по заданным параметрам



Программирование вручную кастомных позиций

Спасибо за внимание

ООО «Разумный дом»

ЧУ ПО «Социально-технологический колледж»

Преподаватель: Борисов Алексей Альбертович