

Элементная база электронной аппаратуры. Пассивные компоненты

Конденсаторы

Конденсатор – элемент электрической цепи, обладающий электрической емкостью и предназначенный для накопления электрических зарядов.

Емкость – модель конденсатора.

Емкость плоского конденсатора рассчитывается по формуле:

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon \frac{S}{d},$$

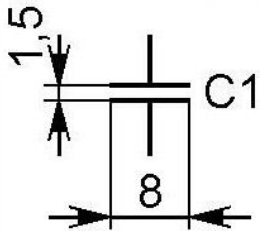
где $\varepsilon_0 = 10^{-9}/36\pi = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – относительная диэлектрическая проницаемость;

ε – абсолютная диэлектрическая проницаемость (справ.);

S – площадь одной пластины, м²;

d – расстояние между пластинами.

Единицы измерения емкости $[C] = [F] = [\Phi] = \left[\frac{\text{сек}}{\text{Ом}} \right]$



УГО постоянного конденсатора

Математическая модель емкости:

$$i_C(t) = \frac{dq(t)}{dt} = C \frac{du_C(t)}{dt}.$$

$$q(t) = C \cdot u_C(t)$$

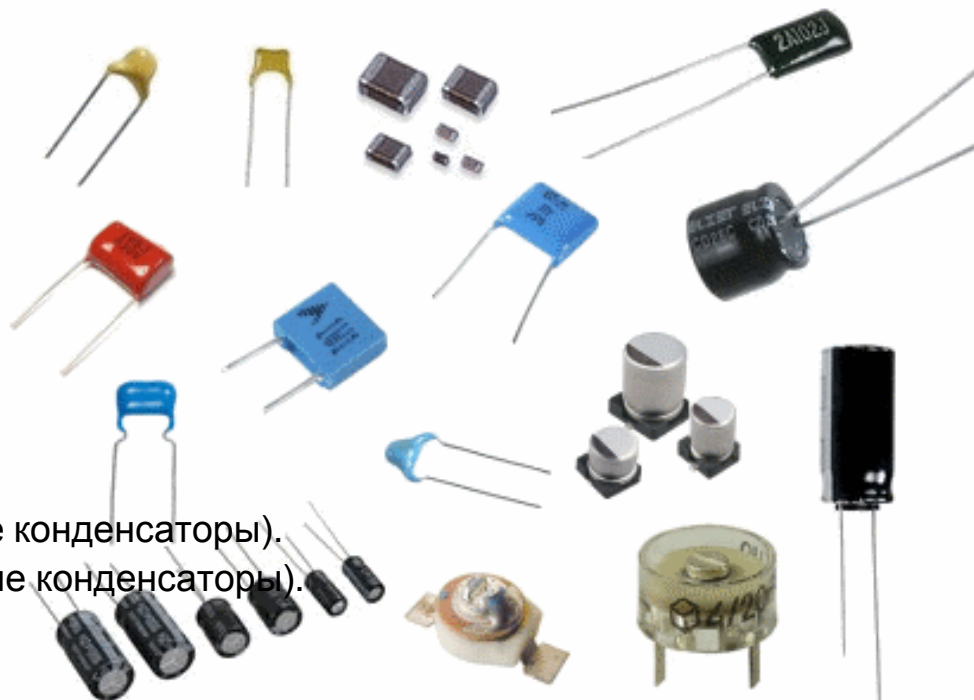
Классификация конденсаторов

По назначению различают конденсаторы:

1. Общего назначения.
2. Специального назначения:
 - а) высоковольтные;
 - б) импульсные;
 - в) помехоподавляющие;
 - г) дозиметрические;
 - д) пусковые и др.

По характеру изменения емкости различают:

1. Конденсаторы постоянной емкости (постоянные конденсаторы).
2. Конденсаторы переменной емкости (переменные конденсаторы).
3. Подстроечные конденсаторы.



Конденсаторы общего назначения – наиболее широко применяемые на практике в большинстве видов аппаратуры. К таким конденсаторам не предъявляются особые требования (наиболее распространенные – низковольтные конденсаторы).

Конденсаторы постоянной емкости обладают фиксированной емкостью, нерегулируемой в процессе эксплуатации.

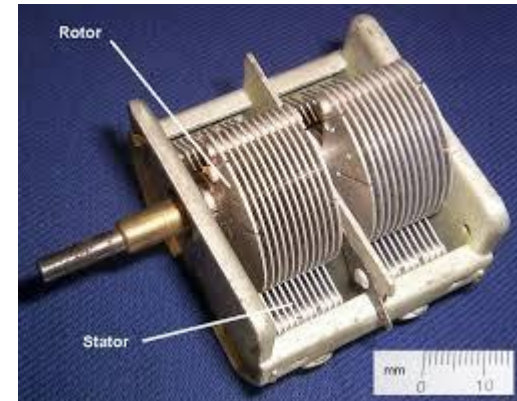
Конденсаторы специального назначения предназначены для выполнения специфических функций (подавление помех, пуск электродвигателя и т.п.) или для работы в особых условиях (высокое напряжение, импульсный ток и т.п.).

Конденсаторы переменной емкости

допускают изменение емкости в процессе функционирования. Управление величиной емкости может осуществляться:

- механически;
- электрическим напряжением (вариконды);
- температурой (термоконденсаторы).

Их применяют для плавной настройки колебательных контуров, в цепях автоматики и т.д.



Внешний вид переменного конденсатора с механической регулировкой емкости

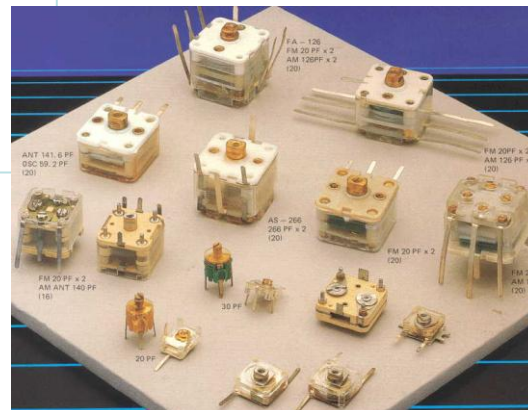
Максимальные значения емкости переменных конденсаторов невелики, как правило, 600÷5000пФ.

Для переменных и подстроечных конденсаторов важны максимальная C_{max} и минимальная C_{min} емкости, коэффициент перекрытия по емкости

$$K_C = C_{max}/C_{min},$$

$\text{tg } \delta$ и закон изменения емкости.

Подстроечные конденсаторы – емкость изменяется при разовой (непериодической) регулировке или настройке и не изменяется в процессе функционирования аппаратуры. Используются в цепях, где требуется незначительное изменение емкости.



Внешний вид построечных конденсаторов



По виду диэлектрика конденсаторы постоянной емкости можно разделить на группы:

1. С газообразным диэлектриком;
2. С неорганическим диэлектриком;
3. С органическим диэлектриком;
4. С оксидным диэлектриком (неорганические) - электролитические.

Конденсаторы с органическим диэлектриком

изготавливаются намоткой тонких длинных лент конденсаторной бумаги, пленок и фольги.

Достоинства:

- могут иметь большую емкость;
- тонкие слои обладают высокой эл. прочностью;
- высокое сопротивление изоляции.

Недостатки:

- плохая температурная стабильность;
- старение в процессе эксплуатации;
- малая удельная емкость;
- высокая стоимость.

Из-за указанных недостатков данный тип конденсаторов занимает примерно 10% от общего производства. Наибольшее распространение получили пленочные конденсаторы.

Конденсаторы с неорганическим диэлектриком

обладают достоинствами:

- высокая механическая прочность;
- способны работать при высоких температурах;
- слабо подвержены старению.

В современной электронике наибольшее распространение получили керамические конденсаторы. Доля в общем объеме всех выпускаемых в мире конденсаторов составляет более 60%.

Назначение конденсаторов в зависимости от вида и материала диэлектрика

Вид диэлектрика	Материал диэлектрика (тип конденсаторов)	Назначение конденсаторов
Газообразный	Воздушные, газонаполненные, вакуумные	Высоковольтные, высокочастотные, (переменные - воздушные).
Неорганический	Керамические, стеклокерамические, стекломалевые, стеклопленочные, тонкослойные из неорганических пленок, слюдяные	Низковольтные: тип 1, тип 2, тип3. Высоковольтные: тип 1, тип 2. Помехоподавляющие. Нелинейные.
Органический	Бумажные, металобумажные, фторопластовые, полиэтиленфталатные, полипропиленовые, лакопленочные, полиэтилентерефталат (лавсан) и т.д.	Низковольтные низкочастотные. Низковольтные высокочастотные. Высоковольтные постоянного напряжения. Высоковольтные импульсные. Дозиметрические. Помехоподавляющие.
Оксидный	Электролитические, оксидно-полупроводниковые, оксидно-металлические (с использованием алюминия, титана, ниобия, сплавов тантала и ниобия)	Общего назначения. Неполярные. Высокочастотные. Импульсные. Пусковые. Помехоподавляющие.

Основные параметры конденсаторов

Основные параметры конденсаторов:

1. Номинальная емкость – $C_{\text{НОМ}}$;
2. Допускаемое отклонение емкости от номинального значения – допуск (в %);
3. Тангенс угла диэлектрических потерь – $\text{tg } \delta$;
4. Ток утечки – $I_{\text{УТ}}$;
5. Сопротивление изоляции – $R_{\text{ИЗ}}$;
6. Температурный коэффициент емкости – ТКЕ;
7. Номинальное напряжение – $U_{\text{НОМ}}$.

1. Номинальная емкость ($C_{\text{НОМ}}$) – значение электрической емкости, обозначенное на корпусе конденсатора и необходимое для отсчета допускаемого отклонения от этого значения.

Номинальное значение указывается на электрической принципиальной схеме электронного устройства рядом с его УГО.

Номинальные значения емкостей стандартизованы и выбираются из специальных рядов, аналогично сопротивлениям резисторов. Для емкостей используются те же ряды числовых коэффициентов. Для конденсаторов наиболее часто используются ряды: E3, E6, E12 и E24.

2. Допускаемое отклонение емкости от номинального значения.

Фактическое значение емкости конденсатора C_{ϕ} может отличаться от номинального в пределах допускаемых отклонений. сопротивление резистора отличается от номинального.

Допускаемое отклонение емкости в %:

$$\Delta C, \% = \frac{\Delta C}{C_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% = \frac{C_{\phi} - C_{\text{НОМ}}}{C_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%.$$

Допускаемое отклонение указывается в % в соответствии с рядом:

$\pm 10\%$; $\pm 20\%$; $\pm 30\%$; $0\%+50\%$; $-10\%+30\%$; $-10\%+50\%$; $-10\%+100\%$; $-20\%+50\%$; $-20\%+80\%$.

Для конденсаторов с емкостью менее 10пФ допускаемые отклонения указываются в абсолютных значениях: $\pm 0,1$; $\pm 0,25$; $\pm 0,5$; и ± 1 пФ.

3. Тангенс угла диэлектрических потерь - параметр, характеризующий потери в конденсаторе.

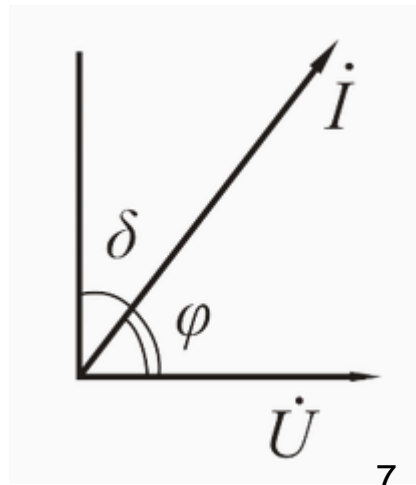
Потери в конденсаторе определяются потерями в диэлектрике и обкладках. Тангенс угла потерь определяется при синусоидальном напряжении определенной частоты и температуре:

$$\text{tg}\delta = \frac{P}{Q} = \frac{UI \cos \delta}{UI \sin \delta} = \frac{\cos(90 - \delta)}{\sin(90 - \delta)},$$

где φ – угол сдвига фаз между током и напряжением конденсатора (в идеале - 90°);

δ – угол потерь, дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ .

Конкретное значение зависит от типа и качества диэлектрика, а также от температуры окр. среды и частоты переменного тока, на которой измеряется. Как правило, $\text{tg} \delta$ имеет минимум в области комнатных температур. С ростом частоты $\text{tg} \delta$ увеличивается. Значения $\text{tg} \delta = \text{доли } \% \div \text{неск. сотен } \%$.



4. Ток утечки ($I_{ут}$) - ток проводимости, проходящий через конденсатор при постоянном напряжении на его обкладках в установившемся режиме. Актуален, в основном, для вакуумных и электролитических конденсаторов.

Обусловлен наличием в диэлектрике свободных носителей заряда и характеризует качество диэлектрика.

5. Сопротивление изоляции конденсатора – электрическое сопротивление конденсатора постоянному току определенного уровня напряжения. Связано с током утечки.

Данное сопротивление характеризует качество диэлектрика и качество изготовления конденсаторов, зависит от типа диэлектрика:

$$R_{из} = \frac{U_0}{I_{ут}},$$

где U_0 – постоянное напряжение, приложенное к конденсатору, вызвавшее $I_{ут}$.

6. Температурный коэффициент емкости (ТКЕ) – параметр, учитывающий изменение емкости в зависимости от температуры:

$$\text{ТКЕ, \%} = \frac{\Delta C}{C_{\text{норм}} \cdot \Delta t} \cdot 100\%,$$

$$\Delta C = C_{\text{пред}} - C_{\text{норм}}$$

$$\Delta t = T_{\text{пред}}, K - T_{\text{норм}}, K$$

где $C_{\text{норм}}$ – емкость при нормальной температуре $T_{\text{норм}}$;

$C_{\text{пред}}$ – емкость при предельной температуре $T_{\text{пред}}$.

ТКЕ показывает изменение емкости при изменении температуры окружающей среды на 1К.

В зависимости от материала диэлектрика ТКЕ может быть: **положительным, нулевым, отрицательным.**

7. Номинальное напряжение ($U_{\text{ном}}$) – значение напряжения, обозначенное на конденсаторе или указанное в НТД (нормативно-технической документации), при котором он может работать в заданных условиях в течение срока службы с сохранением параметров в допустимых пределах.

Рабочее напряжение при эксплуатации конденсатора не должно превышать паспортного значения!

Для конденсаторов с номинальным напряжением 10кВ и менее значения номинальных напряжений устанавливаются согласно ГОСТ 9665-77 из ряда:

1; 1,6; 2,5; 3,2; 4; 6,3; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 350; 400; 450; 500; 630; 800; 1000; 1600; 2000; 2500; 3000; 4000; 5000; 6300; 8000; 10000В.

Система условных обозначений и маркировка конденсаторов

Система условных обозначений предусматривает полное и сокращенное условные обозначения. Полное обозначение состоит из четырех элементов, например:

K10–25–100пФ±10% M47-НМ-В ТУ.

K10-25 – сокращенное обозначение вида конденсатора;

(100пФ±10%M47-НМ) – параметры конденсатора: 100пФ – ном. емкость, ±10% - допустимое отклонение емкости, M47 – группа по ТКЕ, НМ – с отсутствием мерцания емкости обозначения и величины основных параметров и характеристик;

В – обозначение климатического исполнения (В – всеклиматическое, Т - тропическое);

ТУ – обозначение документа на поставку.

Сокращенное обозначение состоит из трех элементов.

Первый элемент – буква (или сочетание букв), обозначающая подкласс конденсаторов:

К – постоянной емкости;

КТ – подстроечные;

КП – переменной емкости;

КС – конденсаторные сборки.

Второй элемент – цифры, обозначающие тип диэлектрика и назначение конденсатора, т.е. его группу;

Третий элемент – порядковый регистрационный номер разработки, например K10-**25**.

Кодированное обозначение показывает: значение номинальной емкости, допустимого отклонения, группы по температурной стабильности. Номинальная емкость описывается цифрами и буквой, указывающей множитель, на который умножается цифровое обозначение и положение запятой десятичного знака.

Для обозначения емкости используются буквы:

Русское	П	Н	М	И	Ф
Латинское	<i>p</i>	<i>n</i>	<i>μ</i>	<i>m</i>	<i>F</i>
Множитель	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	1

Примеры: $10\text{nF} = 10\text{нФ}$; $100\text{пФ} = 100\text{pF} = \text{n}10$; $\mu 10 = 100\text{нФ} = 100\text{n}$; $3\mu 3 = 3,3\text{мкФ}$.

Существует несколько стандартов для обозначения допустимого отклонения. В таблице приведено соответствие допустимого отклонения емкости и его кодирования буквой по МЭК (публикация 62).

Допускаемое отклонение, %	$\pm 0,1$	$\pm 0,25$	$\pm 0,5$	± 1	± 2	± 5	± 10	± 20	± 30	-10+30	-10+50	-20+50	-20+80
Кодированное обозначение	B	C	D	F	G	I	K	M	N	Q	T	S	Z

Допускаемое отклонение, пФ	±0,1	±0,25	±0,5	±1
Кодированное обозначение	B	C	D	F

Пример маркировки конденсатора:
100nI = 100нФ±5%.

В обозначении ТКЕ буквы обозначают знак:

М – минус; П – плюс; МП – близкое к нулю; Н - ненормировано.

Цифры после букв показывают значение ТКЕ,

например П100 (ТКЕ = $100 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$), М750 (ТКЕ = $-750 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$).

Буква Н указывает, что для данного конденсатора ТКЕ не нормируется, а цифры после нее – на возможное изменение емкости в диапазоне допустимых температур, например

Н50 – изменение емкости относительно измеренной при 20°C не более ±50%.

Условное обозначение групп ТКЕ	Допускаемое относительное изменение емкости в интервале рабочих температур, %
Н10	±10
Н20	±20
Н30	±30
Н50	±50
Н70	±70
Н90	±90

Группы керамических конденсаторов типа 2 по допускаемому изменению емкости.

Обозначение групп ТКЕ	Номинальное значение ТКЕ при 20-85°C (ТКЕ×10 ⁻⁶ , 1/°C)
П100 (П120)	+100 (+120)
П60	+60
П33	+33
МПО	0
М33	-33
М47	-47
М75	-75
М150	-150
М220	-220
М330	-330
М470	-470
М750 (М700)	-750 (-700)
М1500 (М1300)	-1500 (-1300)
М2200	-2200
М3300	-3300

Группы ТКЕ конденсаторов с линейной или близкой к ней зависимостью емкости от температуры.

Для обозначения ТКЕ часто используют цветовой код.

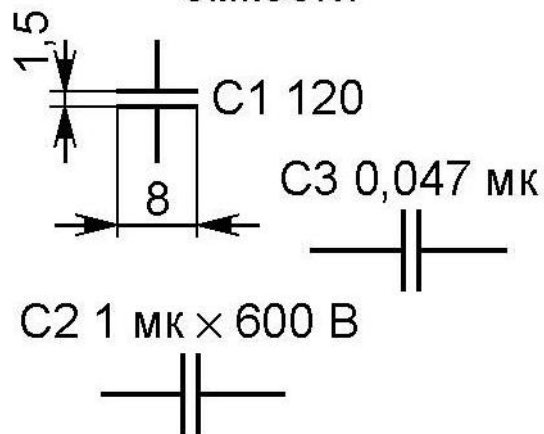
Цвет покрытия корпуса конденсатора указывает на знак ТКЕ, а цвет кодировочного знака – на его значение, например:

синий и серый цвета корпуса соответствуют положительному ТКЕ; **голубой** – близкий к нулю;

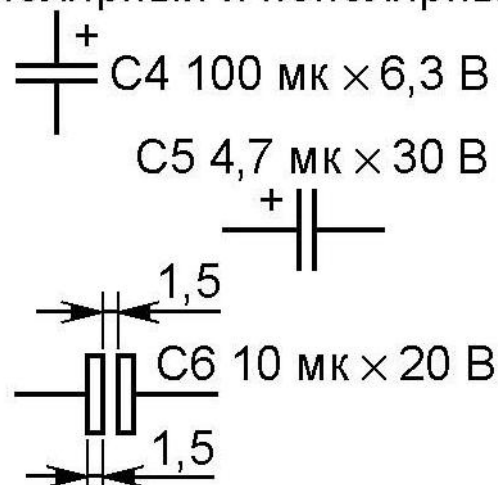
красный и зеленый – отрицательный ТКЕ.

Условное графическое обозначение конденсаторов

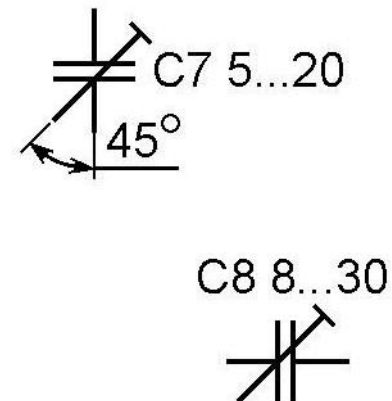
Конденсатор постоянной емкости



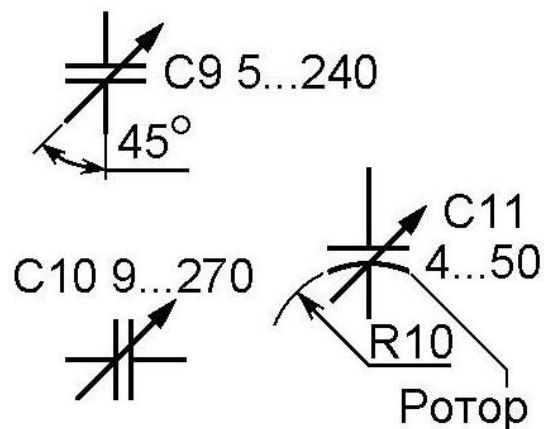
Конденсаторы оксидные полярный и неполярный



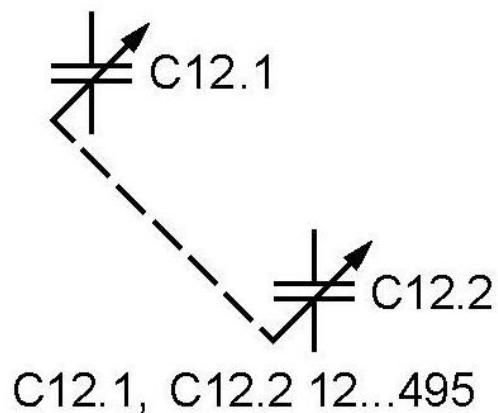
Конденсатор подстроечный



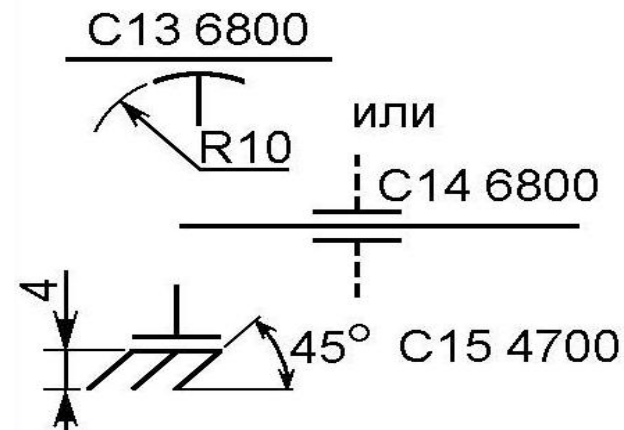
Конденсатор переменной емкости (КПЕ)



Сдвоенный блок КПЕ



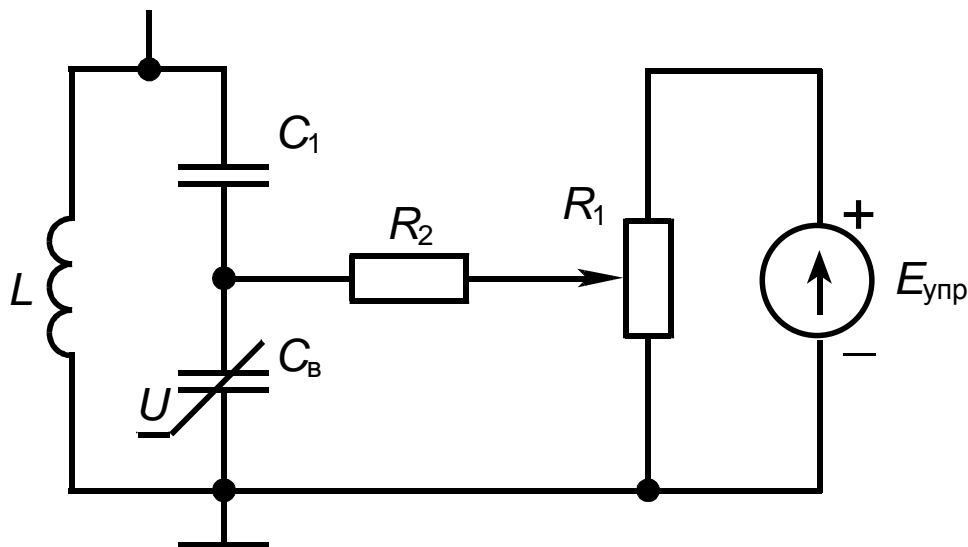
Конденсаторы проходной и опорный



Нелинейные конденсаторы

Вариконд – нелинейный конденсатор, величина емкости которого зависит от напряжения, приложенного к его диэлектрику.

Диэлектрик – сегнетодиэлектрик.



$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC_{\text{ЭКВ}}}}$$

$$C_{\text{ЭКВ}} = \frac{C_1 \cdot C_V}{C_1 + C_V}$$

Напряжение, прикладываемое к C_V регулируется резистором R_1 .

Резистор R_2 служит для придания источнику $E_{\text{упр}}$ высокого внутреннего сопротивления.

Схема представляет перестраиваемый колебательный контур с резонансной частотой f_0 .

Номинальное напряжение варикондов достигает 250-300В.

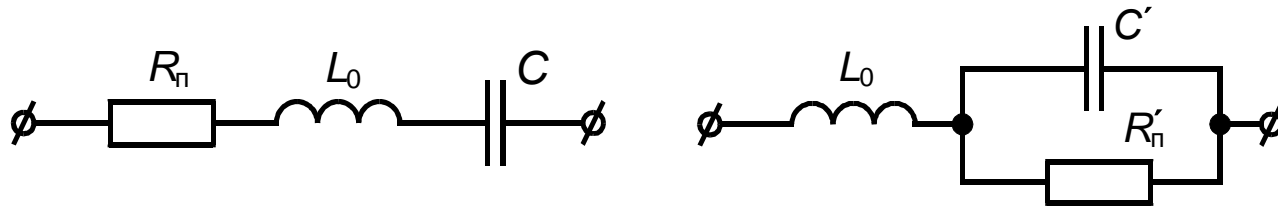
Пример обозначения варикондов: КН75-5,

где 75 – конденсатор из материала с температурой точки Кюри 75°С;

5 – номер разработки.

Эквивалентные схемы конденсаторов

Известны две схемы замещения конденсаторов: последовательная и параллельная.



$$\operatorname{tg} \delta = \frac{P}{Q} = \omega C R_{\text{II}} = \frac{1}{\omega C' R'_{\text{II}}}$$

R_{II} – сопротивление потерь – учитывает потери (утечка) в диэлектрике;

L_0 – паразитная (собственная) индуктивность обусловлена конструкцией конденсатора.

Обе схемы представляют собой колебательные контуры. Поэтому конденсаторы используются на частотах, где индуктивность L_0 не оказывает существенного влияния.

Например: у воздушных конденсаторов максимальная частота $2,5 \div 3,6$ МГц;

у слюдяных – $150 \div 200$ МГц; у бумажных – $50 \div 80$;

у керамических дисковых – $200 \div 2000$ МГц;

у керамических трубчатых – $5 \div 200$ МГц.

Примерные значения L_0 :

- керамические (+стеклокерамические) – $1 \div 5$ нГн;

- слюдяные – $5 \div 15$ нГн;

- бумажные фольговые и металлизированные – $6 \div 20$ нГн;

- оксидные: для $0,033 - 10$ мкФ – $3 \div 10$ нГн;

для $10 - 100$ мкФ – $15 \div 40$ нГн.

Рекомендации по применению конденсаторов

Вид диэлектрика	Назначение конденсаторов	Область применения
Газообразный	Высоковольтные	Высоковольтная и высокочастотная аппаратура (вакуумные), искусственные линии формирования.
	Высокочастотные	Высокочастотная аппаратура (вакуумные), передающие устройства и работа на частотах до 30-80МГц. В колебательных контурах, фильтрах, в качестве разделительных и блокирующих цепях.
Неорганический	Низковольтные: тип 1 (высокочастотные)	В резонансных контурах, где требуются малые потери и высокая стабильность емкости, высокочастотные цепи до сотен МГц, а некоторые до ГГц.
	Низковольтные: тип 2 (низкочастотные)	Фильтры, цепи блокировки и развязки, в цепях, где не требуются малые потери и высокая стабильность емкости. Низкочастотные цепи.
	Низковольтные: тип 3 (низкочастотные)	То же, что и тип 2, но меньше сопротивление изоляции и больше tg δ. Низкочастотные цепи.
	Высоковольтные: тип 1 (высокочастотные)	То же, что и для низковольтных типов 1 и 2.
	Высоковольтные: тип 2 (низкочастотные)	При повышенных токовых нагрузках (слюдяные).
	Помехоподавляющие (керамические)	Подавление промышленных и ВЧ помех от промышленных и бытовых приборов, выпрямителей, от атмосферных помех – т.е. фильтры НЧ.
Органический	Низковольтные (1600В) низкочастотные	Работа на частотах до 10^4 - 10^5 Гц, tg δ зависит от рабочей частоты.
	Низковольтные высокочастотные	Рабочая частота до 10^5 - 10^7 Гц, малый tg δ и не зависит от рабочей частоты.
	Высоковольтные (свыше 1600В) постоянного напряжения	В цепях постоянного напряжения.
	Высоковольтные импульсные	В цепях, где требуется малая паразитная индуктивность (чтобы не исказить формы импульсов), сравнительно большие емкости. Способны допускать быстрые разряды, т.е. пропускать большие токи.
	Дозиметрические	В цепях с низким уровнем токовых нагрузок. Обладают малым саморазрядом, большим сопротивлением изоляции.
	Помехоподавляющие	Для ослабления электромагнитных помех в широком диапазоне частот. Они имеют малую паразитную индуктивность, высокую прочность изоляции. (в основном лавсановые)

Рекомендации по применению конденсаторов (продолжение)

Вид диэлектрика	Назначение конденсаторов	Область применения
Оксидный (электролитические)	Общего назначения: полярные	Низковольтные с относительно большими потерями, но в отличие от других типов низковольтных конденсаторов имеют несравнимо большие емкости (единицы÷сотни тысяч мкФ). Используются в фильтрах источников питания, цепях развязки, шунтирующих цепях полупроводниковых устройств на низких частотах и т.п. Требуют соблюдения полярности при включении в цепь.
	Неполярные	Для работы в цепях постоянного и пульсирующего тока без соблюдения полярности.
	Высокочастотные (алюминиевые жидкостные, танталовые оксидно-полупроводниковые)	В источниках вторичного электропитания в качестве накопительных и фильтрующих элементов в цепях развязок полупроводниковых устройств в диапазоне пульсирующего тока десятки Гц ÷ сотни кГц. По частотным характеристикам - не одно и то же, что и конденсаторы с неорганическим диэлектриком.
	Импульсные (оксидно-электролитические алюминиевые до 500В)	В цепях с относительно длительным зарядом и быстрым разрядом (устройства фотовспышек и др.)
	Пусковые (неполярные)	В асинхронных двигателях для улучшения пускового момента.
	Помехоподавляющие (проходные)	В фильтрах низких частот. За счет большой емкости сдвигает частотную характеристику в область низких частот (танталовые).

Выбор конденсаторов

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

Правильный выбор конденсаторов осуществляется на основе требований, предъявляемых к аппаратуре. В результате анализа условий работы каждого конденсатора определяются:

- **эксплуатационные факторы:** интервал рабочих температур, величины механических нагрузок и относительной влажности окружающей среды и др.;
- **значения номинальных параметров и их допустимые изменения в процессе эксплуатации:** емкость, напряжение, сопротивление изоляции и др.;
- **допустимые режимы и рабочие электрические нагрузки:** диапазон рабочих частот, амплитуда и частота переменной составляющей напряжения, реактивная мощность, параметры импульсного режима и др.
- **показатели надежности, долговечности, сохраняемости конденсаторов;**
- **конструкция конденсаторов, способы монтажа, габариты и масса.**

Рекомендация. В целях повышения надежности и долговечности конденсаторов не эксплуатируйте конденсаторы в предельно-допустимых режимах. Используйте облегченные режимы по сравнению допустимыми.

ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ! При использовании полярных конденсаторов с оксидным диэлектриком соблюдайте полярность при включении их в схему. Подача напряжения обратной полярности недопустима!

Частотные свойства конденсаторов

При выборе конденсаторов для работы в цепях переменного или пульсирующего тока необходимо учитывать их частотные свойства.

Наиболее высокими частотными свойствами обладают керамические конденсаторы типа 1, слюдяные и конденсаторы из неполярных пленок (полистирольные, полипропиленовые и др.) Ориентировочные значения рабочих частот различных конденсаторов от 50кГц (электролитические танталовые) до 10ГГц (керамические типа 1 и подстроечные).

При оценке возможности работы конденсаторов в импульсном режиме необходимо учитывать, что при малых длительностях формируемых импульсов даже малая собственная индуктивность L_0 представляет большое индуктивное сопротивление ($X_{L0}=\omega L_0$), что сказывается на форме импульса.

Кроме этого, существенное влияние на форму импульса, а также на КПД устройства, в котором установлен конденсатор, могут оказывать потери энергии в диэлектрике и armатуре конденсатора. Поэтому при выборе конденсаторов для импульсных режимов следует учитывать и температурно-частотные зависимости емкости, $\text{tg}\delta$ и полного сопротивления.

Ссылки

1. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. Электроника и микропроцессорная техника: учебник для вузов — Москва: КноРус, 2013. — 798 с.
2. Справочник по электрическим конденсаторам / под ред. И.И.Четверткова. — Москва: Радио и связь, 1983. — 576 с.