

Конденсаторы

Лекция 1

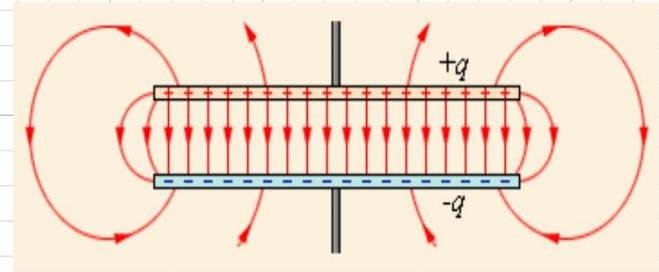
Конденсатор представляет собой устройство для накопления заряда и энергии электрического поля.

- Конденсатор состоит из двух проводников, называемых обкладками, которые разделены между собой диэлектриком.
- Емкость конденсатора является одной из важнейших его характеристик и определяется отношением заряда, накопленного в конденсаторе к величине напряжения, приложенного к обкладкам.

$$C = \frac{Q}{U}, [\Phi].$$

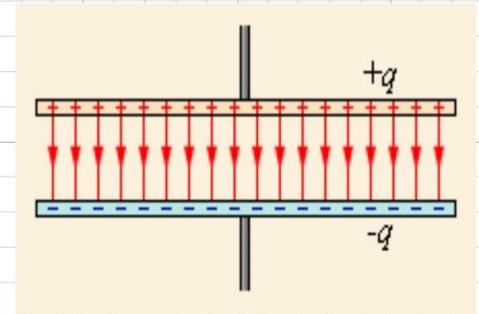
$$1\Phi = 10^6 \text{ мк}\Phi = 10^9 \text{ н}\Phi = 10^{12} \text{ п}\Phi$$

Поле плоского конденсатора:



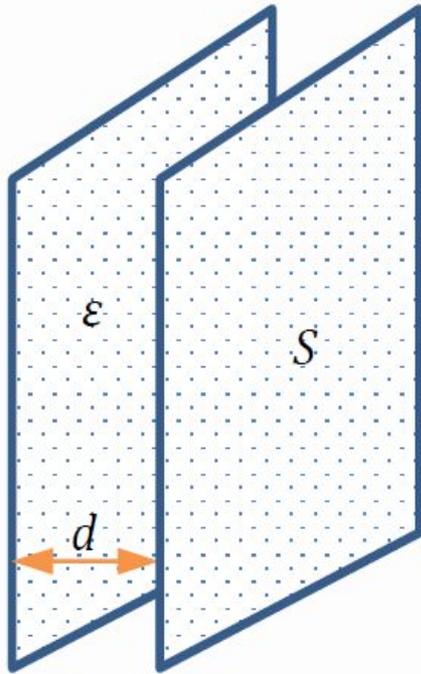
Идеализированное представление поля плоского конденсатора:

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



Конденсаторы

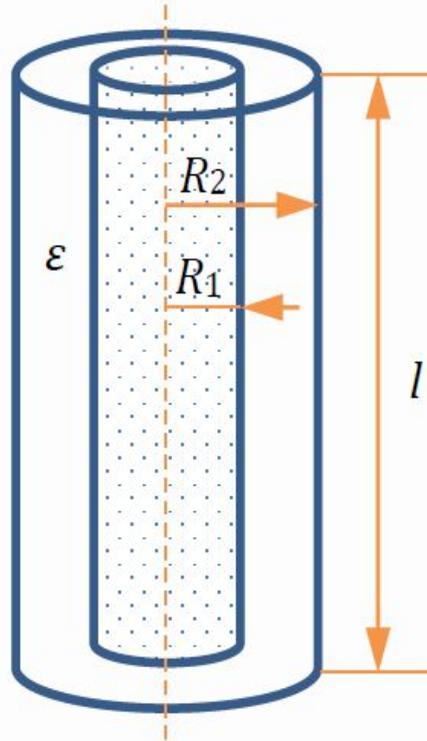
Плоский



$d \ll$ размеров пластин

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

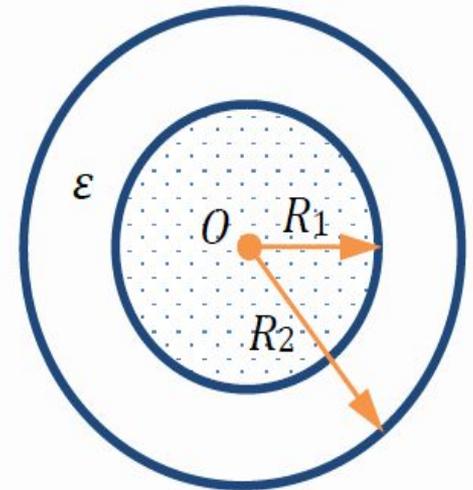
Цилиндрический



$R_2 - R_1 \ll l$

$$C = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon l}{\ln \frac{R_2}{R_1}}$$

Сферический



$$C = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon R_1 R_2}{R_2 - R_1}$$

Основные элементы конденсатора.

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

Классификация конденсаторов

- По роду диэлектрика:

- **Конденсаторы с газообразным диэлектриком**
- а) воздушные; б) газонаполненные; в) вакуумные.
- **Конденсаторы с жидким диэлектриком**
- а) маслonaполненные;
- б) наполненные синтетической жидкостью;
- **Конденсаторы с твердым неорганическим диэлектриком**
- а) стеклянные ;
- б) стеклоэмалевые и стеклокерамические;
- в) керамические;
- г) слюдяные;
- **Конденсаторы с твердым органическим диэлектриком**
- а) бумажно-пропитанные;
- б) металлобумажные;
- в) пленочные, лакопленочные;
- г) с комбинированным (бумажно-пленочным) диэлектриком.
- **Конденсаторы с оксидным диэлектриком**
- а) алюминиевые, танталовые, ниобиевые и др.;
- б) оксидно-полупроводниковые.

По режиму работы конденсаторы можно классифицировать:

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

По величине воздействующего напряжения:

- конденсаторы низкого напряжения;
- высоковольтные конденсаторы.

По величине мощности:

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

По конструктивному исполнению и возможности регулирования емкости:

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

По характеру использования:

- силовые, радиочастотные;
- контурные, анодно-разделительные;
- конденсаторы связи.

Материалы в конденсаторостроении

Материалы, применяемые в конденсаторо-строении, во многом определяют вид и назначение конденсатора, его надежность и долговечность, технологичность, экономичность и т.д.

С точки зрения функции, выполняемой материалами, можно выделить четыре основные группы:

- проводниковые материалы;
- электроизоляционные материалы;
- вспомогательные материалы;
- конструкционные материалы.

Проводниковые материалы

- Проводниковые материалы в конденсаторах используются для изготовления обкладок , соединения отдельных секций друг с другом, выводов и т.д.
- основным проводниковым материалам относятся *алюминий* и *медь*. В производстве конденсаторов применяются наиболее чистые алюминий и медь с содержанием чистого металла до 99,5 % и выше
- *алюминий* применяется для изготовления обкладок в виде конденсаторной фольги, а также для изготовления металлобумажной изоляции путем вакуумного напыления.
- *Медь* применяется в качестве проводников для изготовления секционных шин, межсекционных соединений, выводов из конденсатора, а также секционных предохранителей.

Электроизоляционные материалы

- Электроизоляционные материалы выполняют функцию разделительного диэлектрика между обкладками конденсатора (основной диэлектрик), а также для изоляции между отдельными секциями и их изоляции от корпуса (вспомогательная изоляция).
- *В основном используются следующие виды диэлектриков:*
- 1) газообразные (воздух, азот, элегаз, водород и др.);
- 2) жидкие (нефтяные масла, синтетические жидкости и др.);
- 3) твердые:
- *неорганические диэлектрики* (слюда, стеклянные, керамические, стеклокерамические и др.);
- *твердые органические неполярные диэлектрики* (полиэтилен, полистирол, фторопласт-4 и др.);
- *твердые органические полярные диэлектрики* (бумага, лавсан, фторопласт-3 и др.);
- *оксидные диэлектрики.*

Вспомогательные и конструкционные материалы

К вспомогательным можно отнести различные флюсы, краски, эмали, растворители, пропиточные массы и материалы для опрессовки конденсаторов.

В качестве вспомогательных *проводниковых* материалов, применяют *цинк, никель и олово* (гальванические покрытия различных крепежных деталей и корпуса).

Олово и припой на его основе используются также для пайки различных соединений и выводов.

В качестве конструкционных материалов обычно используется *низкоуглеродистая отожженная сталь*. (изготовление корпусов, крепежных хомутов, из толстолистовой стали изготавливают крышки конденсаторов связи. Для изготовления различных крепежных деталей и выводов может использоваться латунь.

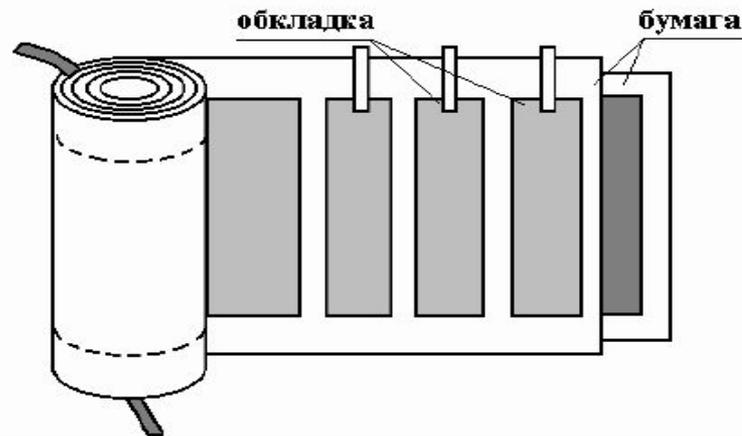
Основные параметры конденсаторов

- **Емкость, (номинальная, фактическая), допустимое отклонение емкости (класс точности конденсатора),**
- **Температурные характеристики емкости,**
- **Сопротивление изоляции, ток утечки, постоянная времени конденсатора,**
- **Запасаемая энергия конденсатора,**
- **Коэффициент абсорбции,**
- **Тангенс угла потерь конденсатора,**
- **Полное комплексное сопротивление,**
- **Рассеиваемая мощность,**
- **Номинальное напряжение конденсатора.**

- **Номинальная емкость** — емкость, значение которой обозначено на конденсаторе или указано в нормативно-технической документации и является исходным для отсчета допускаемого отклонения.
- **Фактические значения емкостей** могут отличаться от номинальных в пределах допускаемых отклонений.
- По величине допустимого отклонения емкости от ее номинального значения, конденсаторы разделяются на четыре основных класса: класс 0; допуск $\pm 2\%$, класс 1; допуск $\pm 5\%$, класс II; допуск $\pm 10\%$, класс III; допуск $\pm 20\%$.
- Если номинальная емкость отличается от стандартной, то производится **подгонка емкости**. Для этого конденсатор изготавливается с несколько повышенной емкостью, а затем его емкость снижается до требуемого значения путем удаления части обкладки или специальных подгоночных обкладок, образующих ряд дополнительных небольших емкостей.

Допуск по емкости определяется:

$$\Delta C_H = \frac{C_{\text{изм}} - C_{\text{ном}}}{C_{\text{ном}}} \cdot 100\%$$



Температурные характеристики емкости

- **Причины температурных изменений емкости:**

- 1. Изменение диэлектрической проницаемости диэлектрика
- 2. Температурные изменения размеров конденсатора.
- Температурные изменения емкости характеризуются температурным коэффициентом емкости (ТКЕ) :

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

- При **линейной зависимости**, пользуются следующей формулой для расчета (ТКЕ):

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

- При **нелинейном характере**, указывают относительное изменение емкости при переходе от комнатной температуры к крайним пределам рабочей температуры:

$$\Delta C = \frac{C_2 - C_1}{C_1} \cdot 100\%.$$

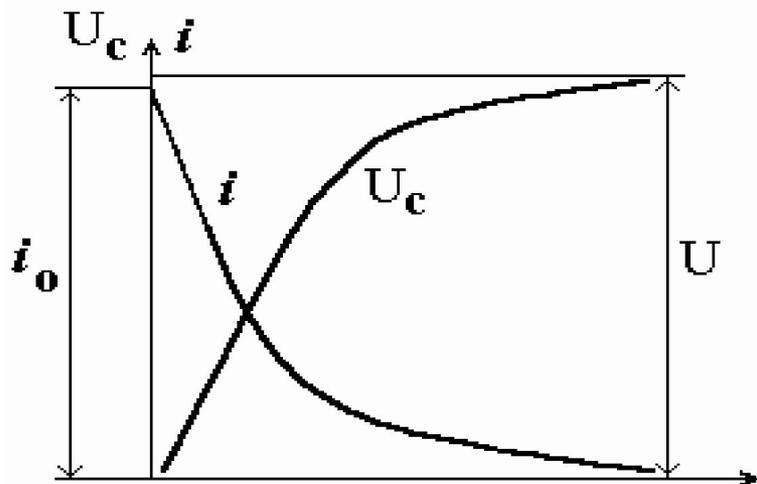
- Изменения емкости могут быть *обратимыми и необратимыми*.

Необратимое изменение емкости характеризуется
исходного значения емкости.

$$\Delta C_{\text{ост}} \text{ \% от}$$

Конденсатор в цепи постоянного тока. Зарядка конденсатора

Зависимость тока и напряжения на конденсаторе от времени в процессе заряда (при отсутствии индуктивности)



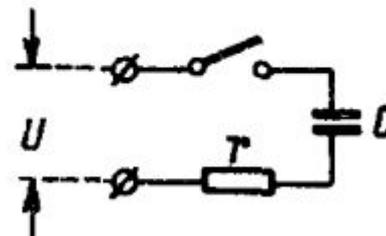
$$i = i_0 e^{-\frac{t}{rC}}, \quad i_0 = \frac{U}{r};$$

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

где r – сопротивление зарядной цепи, состоящее из сопротивления обкладок, выводов, соединительных проводников и внутреннего сопротивления источника.

Протекание в цепи конденсатора зарядного тока приводит к накоплению в конденсаторе некоторого запаса энергии. [Дж]

$$W = \frac{CU^2}{2}$$



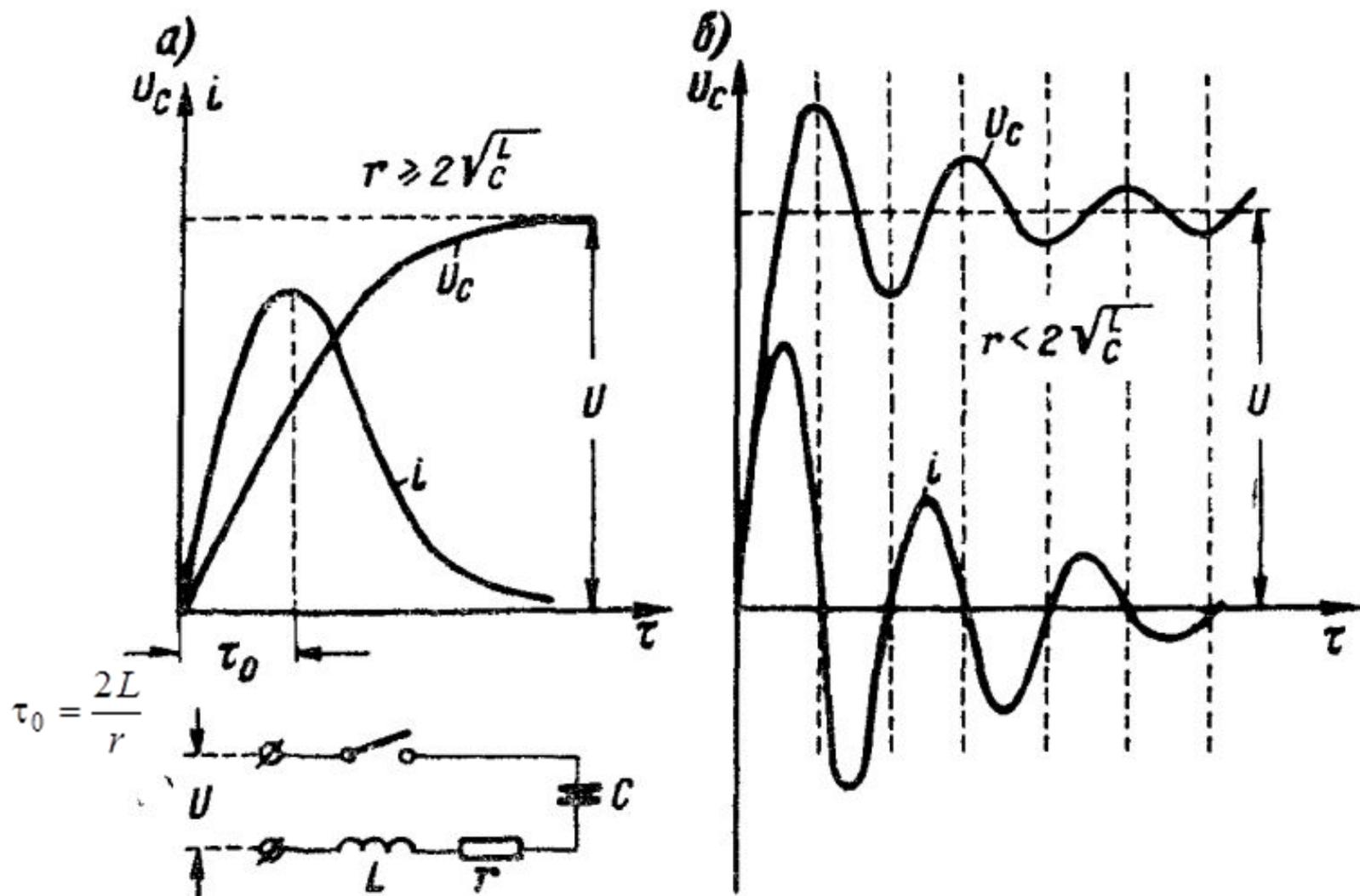


Рис. 10. Заряд конденсатора в цепи постоянного напряжения при наличии индуктивности: а — аperiodический процесс; б — периодический процесс.

Сопротивление изоляции, ток утечки, постоянная времени конденсатора.

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

Сопротивление изоляции можно определить

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

$$R_{из} = \frac{R_V R_S}{R_S + R_V}$$

Произведение $K_{из} C$ называется **постоянной времени конденсатора**, которая не зависит от его формы и размеров, а определяется только качеством диэлектрика, т.е. его удельным сопротивлением и диэлектрической проницаемостью.

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

Разряд конденсатора

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

$$U_c = U \cdot e^{-\frac{t}{rC}}$$

- Следует от $U_c = U \cdot e^{-\frac{t}{rC}}$ как разряда` может превышать значение тока при зарядке конденсатора. Это явление используется на практике в ГИТ (для получения вспышек света) и для целей электросварки.
- Сопротивление разрядной цепи состоит из *наружного разрядного сопротивления и внутреннего сопротивления конденсатора*,
- Добиваются максимального снижения внутреннего сопротивления конденсатора.

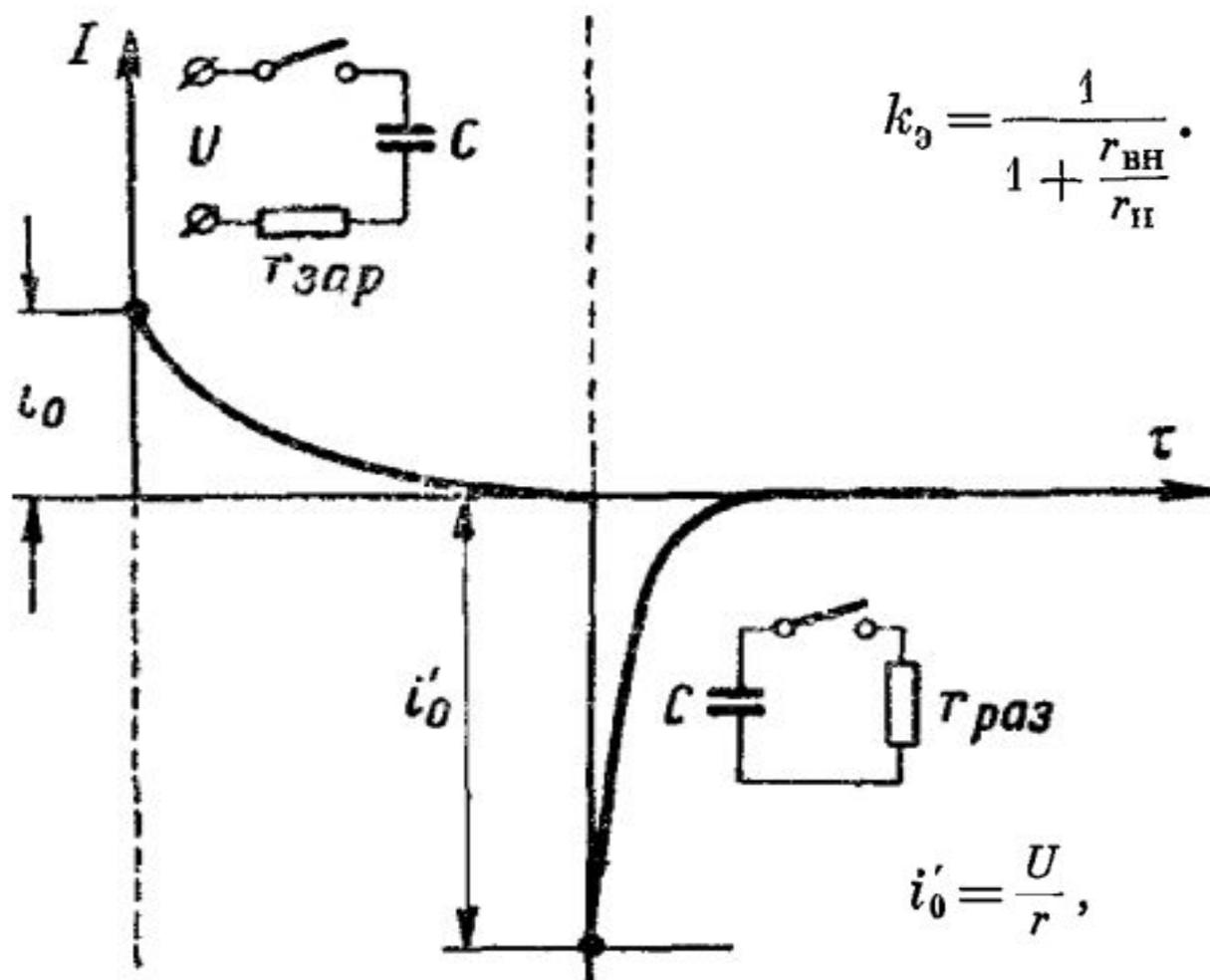


Рис. 14. Изменение тока в процессе заряда и разряда, когда сопротивление разрядной цепи меньше сопротивления в цепи заряда ($r_{раз} < r_{зар}$).

Саморазряд конденсатора

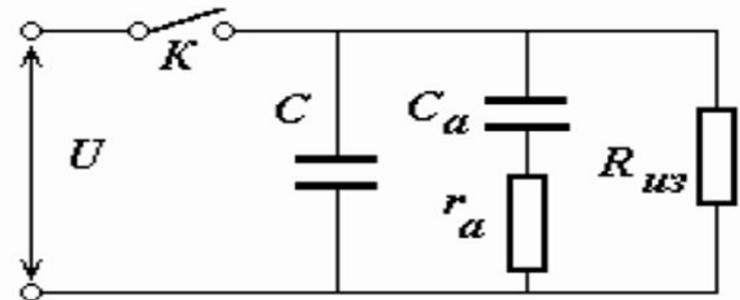
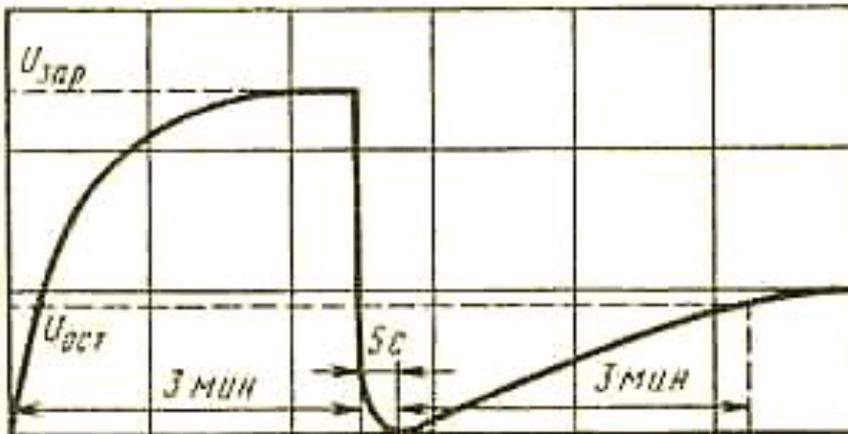
- Если конденсатор оставить просто разомкнутым, то будет происходить саморазряд конденсатора за счет тока утечки через сопротивление изоляции - $R_{из}$. Скорость снижения напряжения на конденсаторе в процессе саморазряда определяется *постоянной времени*.

$$U_c = U \cdot e^{-\frac{\tau}{R_{из} \cdot C}} \quad \text{При } \tau = \tau_c \text{ имеем:}$$
$$U_c = U e^{-1} = \frac{U}{e} \approx 0,37U.$$

- **Постоянная времени конденсатора** численно выражается числом секунд, необходимых для того, чтобы напряжение на выводах конденсатора в процессе саморазряда упало на 37% от начального значения.
- **Постоянная времени конденсаторов** лежит в пределах от 10^3 до 10^4 сек., у лучших пленочных конденсаторов до 10^6 сек.

Явление абсорбции в конденсаторах

- Явления, обусловленные замедленными процессами поляризации в диэлектрике, приводящее к появлению напряжения на электродах после кратковременной разрядки конденсатора называется *диэлектрической абсорбцией*.



- Коэффициент абсорбции определяется как отношение остаточного напряжения к зарядному: $K_a = (U_{ост}/U_{зар}) \cdot 100\%$,

значения коэффициента абсорбции при времени короткого замыкания равного 2 с.

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

Конденсатор в цепи переменного тока

При включении конденсатора в цепь переменного тока происходит чередование процессов **зарядки** конденсатора с ростом напряжения и его **разрядки** при уменьшении напряжения. Если считать конденсатор чистой емкостью (не учитывать индуктивность и акт. сопротивление), то величина реактивного сопротивления X_c конденсатора зависит от частоты и с её увеличением уменьшается.

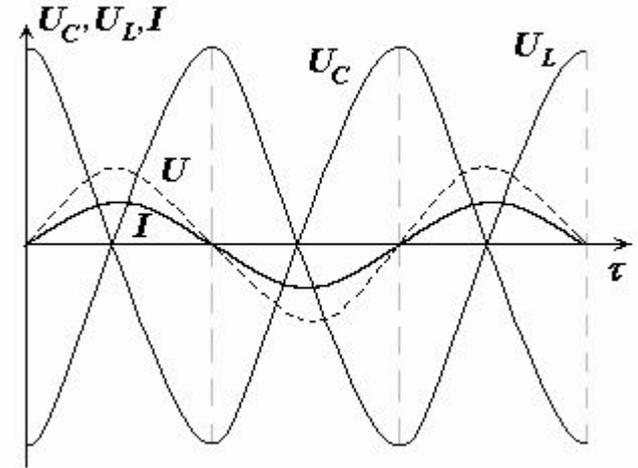
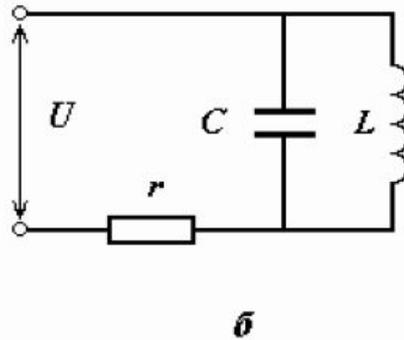
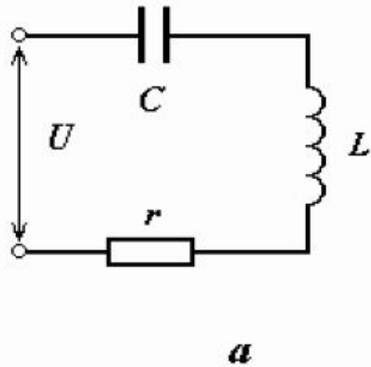
$$X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Поэтому с ростом частоты конденсатор пропускает ток все более легко и на высоких частотах почти не оказывает сопротивления.

На практике это свойство конденсаторов используется для создания *электрических фильтров*. Такие фильтры часто используются для *разделения постоянной и переменной составляющей выпрямленного напряжения, разделение токов различной частоты, подавления радиопомех и др.*

Резонанс токов и напряжений в цепи с конденсатором

В зависимости от вида зарядной цепи происходит смещение кривых тока и напряжения



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

Полное сопротивление конденсатора.

- Применяя конденсаторы на переменном напряжении необходимо учитывать, что конденсатор имеет некоторое *активное сопротивление* и некоторую *индуктивность*.
- Вместо реактивного сопротивления X_C необходимо пользоваться *полным сопротивлением конденсатора* Z .
- Для последовательной схемы замещения конденсатора полное сопротивление конденсатора определяется как:

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

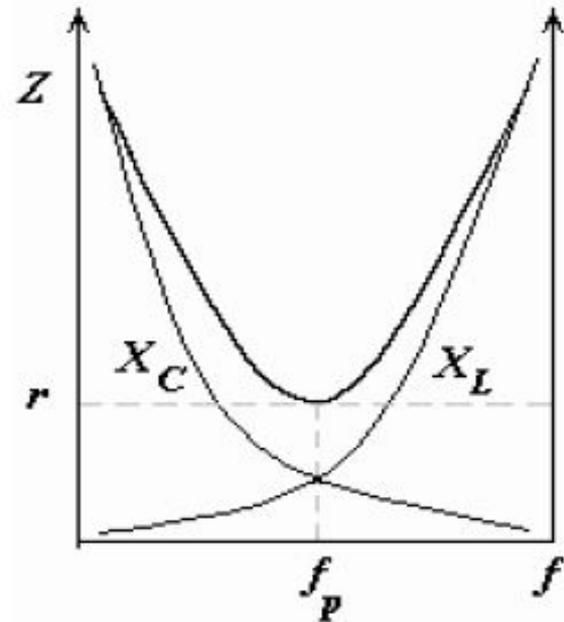
Зависимость полного, индуктивного и емкостного сопротивлений от частоты.

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

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

Собственная индуктивность конденсаторов складывается из индуктивности обкладок, индуктивности соединительных проводников и выводов.

Для уменьшения индуктивности все элементы конденсатора стремятся располагать так, чтобы их магнитные поля взаимно компенсировались или их влияние было минимальным.



Потери энергии в конденсаторах

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

$$P_A = P_\delta + P_M$$

- Потери энергии в диэлектрике конденсатора.

$$P_\delta = 2\pi f \cdot U^2 \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta .$$

- Потери энергии в металлах обкладочных пластин.

$$P_M = I^2 (r_o + r_{\text{выв}}) = I^2 r_M ,$$

- Потери в металлических частях, связанные с поверхностным эффектом:

- $$P_B = I^2 \cdot \frac{l_B}{d_B \cdot \pi \cdot \gamma_M \cdot \Delta}$$
 , где

d , L_B – диаметр и длина вывода;

γ_M – удельная проводимость металла;

Δ - глубина проникновения
электромагнитного поля

Угол потерь конденсатора

В идеальном конденсаторе $P_A = U \cdot I \cdot \cos \varphi = 0$, так как $\varphi = 90^\circ$. В реальном конденсаторе $P_A \neq 0$ и следовательно $\cos \varphi \neq 0$ и $\varphi \neq 90^\circ$. Угол δ , дополняющий до 90° угол сдвига фаз между током и напряжением называется углом потерь конденсатора.

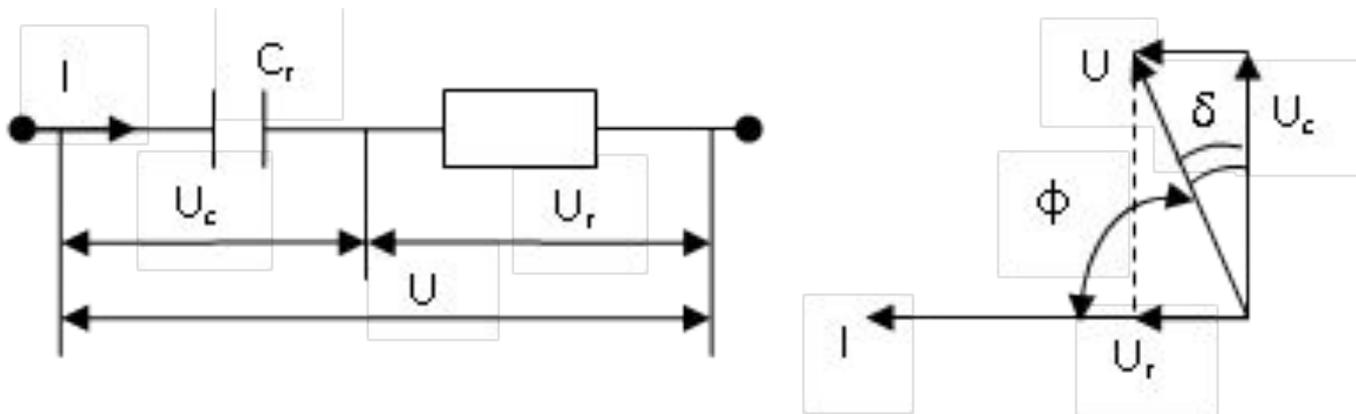


Рис.39. Последовательная схема, эквивалентная конденсатору с потерями

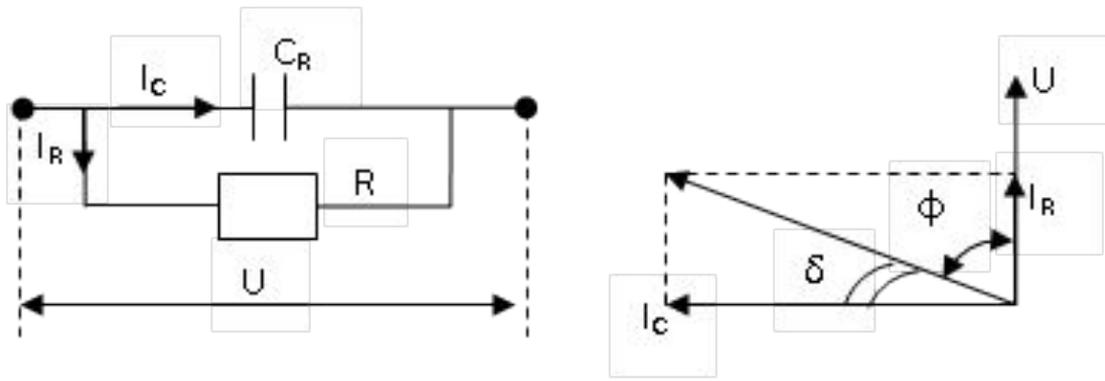


Рис.40. Параллельная схема, эквивалентная конденсатору с потерями

Потери в конденсаторе складываются из потерь в диэлектрике и потерь в металле:

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{P_A}{P_R} = \frac{P_D + P_M}{P_R} = \frac{P_D}{P_R} + \frac{P_M}{P_R} = (\operatorname{tg}\delta)_D + (\operatorname{tg}\delta)_M \quad [128]$$

При низких частотах определяющей является $(\operatorname{tg}\delta)_D$, а при высоких частотах $(\operatorname{tg}\delta)_M$.

Зависимость угла потерь от частоты определяется характером зависимости $\text{tg}\delta_D$ и $\text{tg}\delta_M$ от частоты

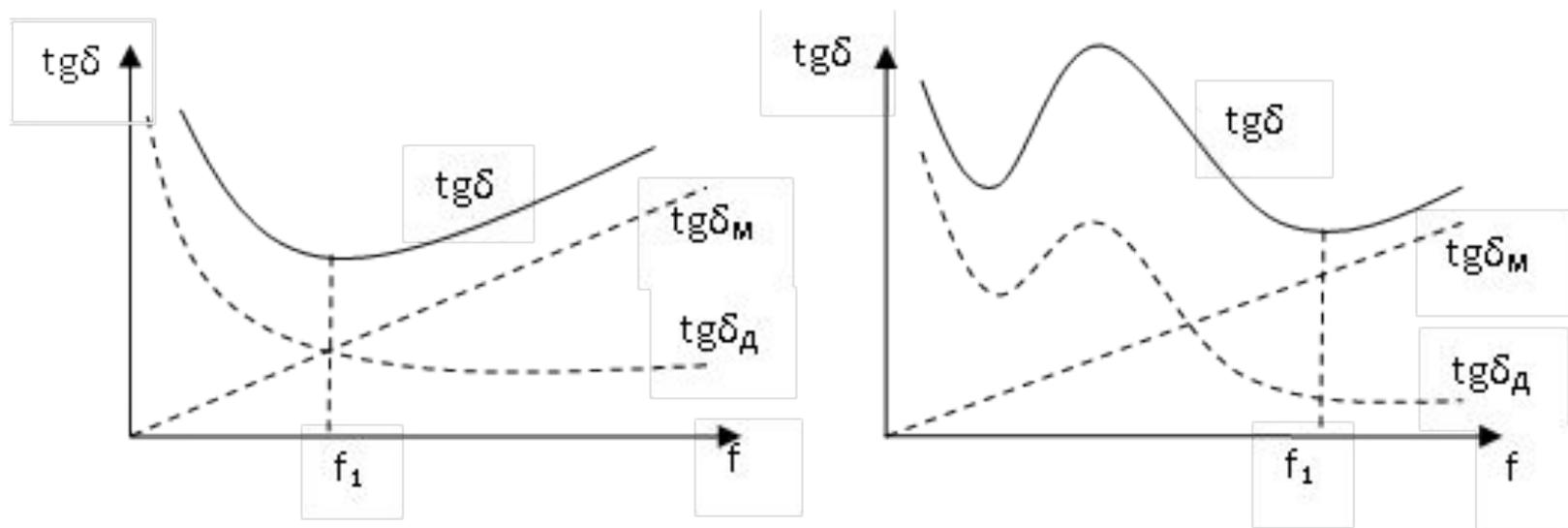


Рис.42. Зависимость угла потерь конденсатора от частоты.

*а - конденсатор с
неполярным*

*б - конденсатор с
полярным диэлектриком*

Зависимость угла потерь конденсаторов от температуры

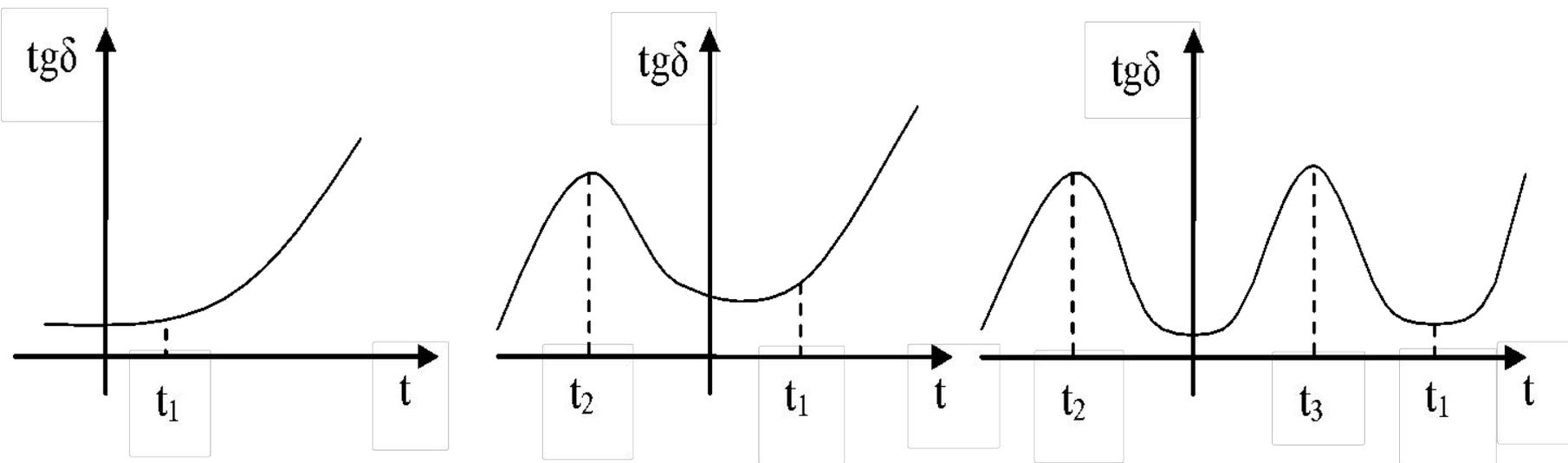


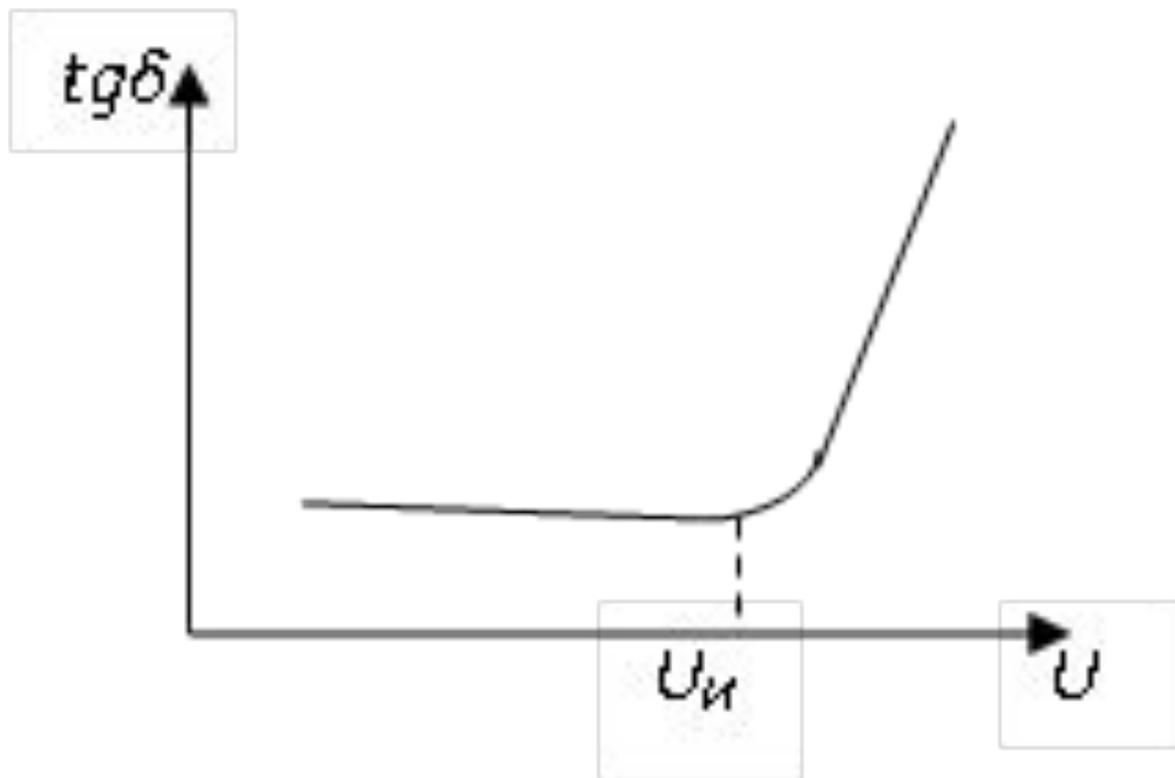
Рис.41. Зависимостью угла потерь диэлектрика от температуры

а - неполярный диэлектрик

б - полярный диэлектрик с дипольной поляризацией

в - высокомолекулярный полярный диэлектрик

Зависимость угла потерь конденсатора от напряжения



Мощность конденсатора

Существуют следующие обозначения мощности:

кажущаяся мощность $P = UI$;

реактивная мощность $P_R = UI \sin \varphi$;

активная мощность $P_A = UI \cos \varphi$.

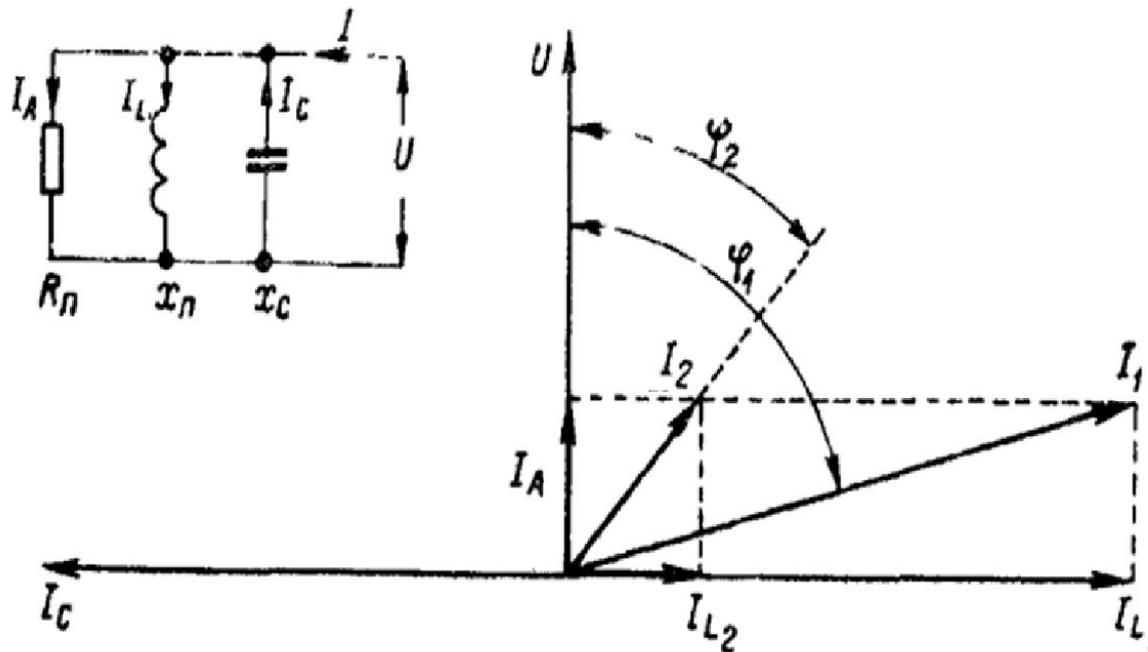
Выражая U в *кв* и I в *а*, получаем: P — в киловольтамперах (*квa*), P_R — в киловольт-амперах реактивных (*квар*) и P_A — в киловаттах (*квт*).

Для доброкачественных конденсаторов угол φ весьма близок к 90° , а $\sin \varphi$ близок к единице; поэтому

$$P_R \approx P = UI \approx U^2 \omega C, \quad (78)$$

можно считать, что мощность конденсатора — чисто реактивная.

Если считать положительной реактивную мощность индуктивных приемников (ток отстает от напряжения), то реактивная мощность конденсатора является отрицательной и конденсаторы могут использоваться для *улучшения коэффициента мощности (компенсация реактивной мощности)* промышленных установок с индуктивной нагрузкой.



Уменьшение угла сдвига фаз индуктивного приемника при параллельном включении конденсатора.

- При параллельном включении конденсатора в цепь с индуктивным приемником вектор емкостного тока I_C опережает на 180 градусов вектор индуктивного тока, поэтому подбирая емкость батареи можно получить или полную компенсацию, то есть довести значение сдвига фаз приемника до нуля, или уменьшить этот сдвиг от значения φ_1 , до заданного значения угла φ_2 , снизив реактивную составляющую тока нагрузки. При этом уменьшается полный ток, что снижает потери в линии и разгружает источник энергии (генератор, трансформатор), от которого питается приемник.

Применение конденсаторов

- Для создания колебательных контуров, их настройки, блокировки, разделения цепей с различной частотой, в фильтрах выпрямителей и т.д. ,
- для создания образцов емкости, получения переменной емкости (магазины емкости и лабораторные переменные конденсаторы), создания измерительных приборов на емкостном принципе, различных датчиков..
- Для получения импульсов большей мощности, формирования импульсов и т.д.
- Блоки питания: в качестве сглаживающих фильтров при преобразовании пульсирующего тока в постоянный.
- Звуковоспроизводящая техника: создание при помощи RC-цепочек элементов схем, пропускающих звуковые сигналы одних частот и задерживая остальные. За счет этого удается регулировать тембр и формировать амплитудно-частотные характеристики устройств.
- В электроэнергетике:
 - для улучшения коэффициента мощности и промышленных установок (косинусные или шунтовые конденсаторы);
 - для продольной емкости компенсации дальних линий передач и для регулирования напряжения в распределительных сетях (серийные конденсаторы);
 - для емкостного отбора энергии от линий передач высокого напряжения и для подключения к линиям передач специальной аппаратуры связи и защитной аппаратуры (конденсаторы связи);
 - для защиты от перенапряжений;
 - для применения в схемах импульсов напряжения (ГИН) и генераторов мощных импульсов тока (ГИТ), используемых при испытаниях электротехнической аппаратуры;
 - для электрической сварки разрядом;
 - для пуска конденсаторных электродвигателей (пусковые конденсаторы) и для создания нужного сдвига фаз в дополнительной обмотке этих двигателей;
 - в устройствах освещения люминесцентными лампами;
 - для подавления радиопомех, создаваемых электрическими машинами и подвижным составом электрифицированного транспорта.

Спасибо за внимание