

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ



© 2022 Томский политехнический университет, ОЭЭ ИШЭ

Лектор: к.т.н., доцент Васильева Ольга Владимировна

ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПОТЕРИ

Диэлектрическими потерями называется энергия, рассеиваемая в диэлектрике при воздействии на него электрического поля E и вызывающая *нагрев диэлектрика*.

Диэлектрические потери наблюдаются как при *переменном*, так и при *постоянном напряжении*.

В постоянном поле:

потери **P** в диэлектрике обусловлены выделением тепла Джоуля при прохождении сквозного тока:

$$**$P = U^2/R$** ,$$

R – сопротивление диэлектрика,

U – приложенная разность потенциалов.

В переменном поле:

$$U = U_0 \cdot \sin \omega t$$

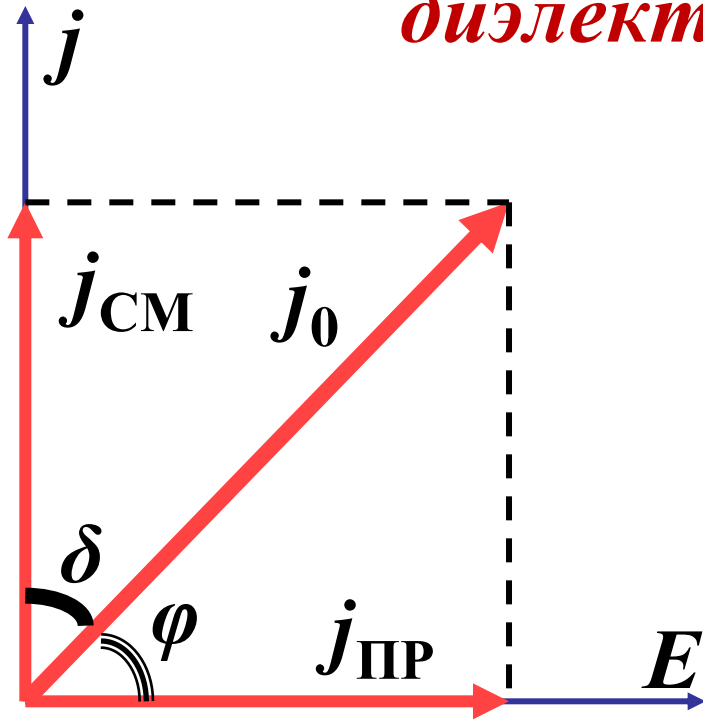
U_0 – амплитуда,

$\omega = 2\pi f$ – круговая частота переменного напряжения.

Энергия поля затрачивается на:

1. выделение тепла Джоуля;
2. медленные виды поляризации.

Векторная диаграмма токов в диэлектрике конденсатора



Полный ток через конденсатор
– $I(j_0)$

$$j_{\text{СМ}} = \varepsilon_0 \varepsilon \omega E \quad \text{А/м}^2$$

$$j_{\text{ПР}} = \gamma E \quad \text{А/м}^2$$

$$\text{tg } \delta = \frac{j_{\text{ПР}}}{j_{\text{СМ}}} = \frac{j_a}{j_c} = \frac{\gamma}{\varepsilon_0 \varepsilon \omega}$$

Добротность:

$$Q = 1/\text{tg } \delta$$

Ток через емкость – $I_c(j_c)$, диэлектрик – конденсатор

В «*идеальном*» диэлектрике ток проводимости $I_a=0$. В переменном поле ток, протекающий через конденсатор — это ток смещения в диэлектрике $I=I_r$.

В «*идеальном*» диэлектрике ток I опережает по фазе вектор напряжения U_c на 90° .

В *хороших диэлектриках* угол сдвига фаз φ близок к 90° .

Угол δ , дополняющий угол φ до 90° :

$$\delta = 90^\circ - \varphi.$$

наз. *углом диэлектрических потерь*.

Отношение активной и реактивной составляющих полного тока:

$$\operatorname{tg} \delta = I_a / I_r,$$

наз. *тангенсом угла диэлектрических потерь*, который м.б. определён экспериментально.

Потери на проводимость: $P = U^2/R$

$$I_a = U/R_a \quad \Rightarrow \quad P = U \cdot I_a ;$$

$$I_a = I_r \operatorname{tg} \delta \quad \Rightarrow \quad P = U \cdot I_r \cdot \operatorname{tg} \delta.$$

$$I_r = U \cdot \omega \cdot C \quad \Rightarrow \quad P = U^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta \quad [\text{Вт}]$$

Чем больше $\operatorname{tg} \delta$ изоляции, тем сильнее она нагревается в переменном поле.

Для неоднородного диэлектрика или поля, формула даёт среднее значение потерь по всему объёму диэлектрика - ***полные диэлектрические потери.***

Емкость изоляции коаксиального кабеля
(цилиндрического конденсатора) C :

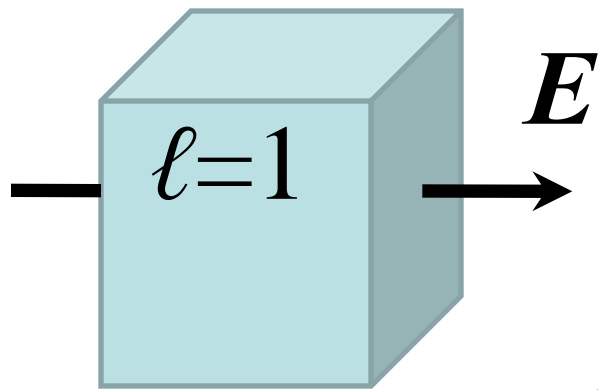
$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot l}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)} \text{ [Ф]},$$

где:

l – длина кабеля [м];

D, d – внешний и внутренний диаметры [м].

Удельными диэлектрическими потерями p называется мощность, рассеиваемая в данном единичном *объёме диэлектрика*.



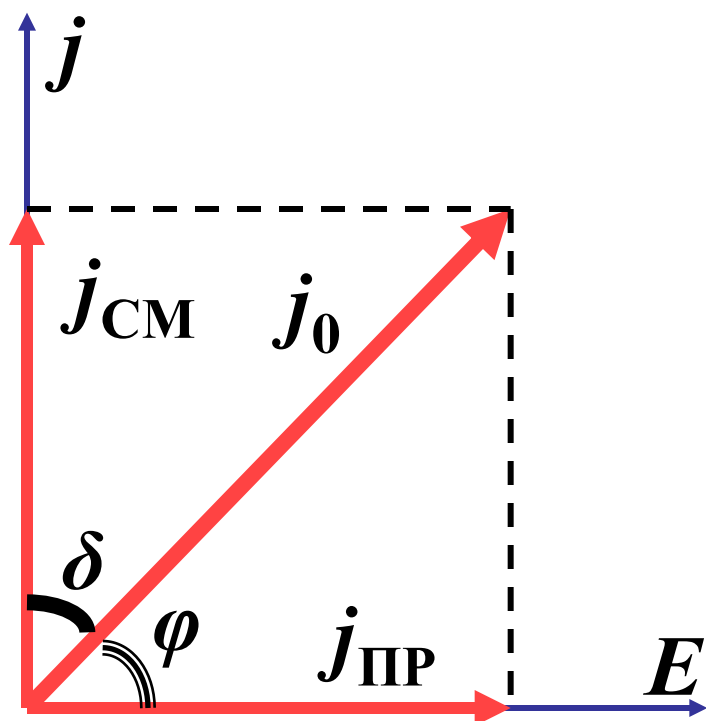
$$C = \varepsilon\varepsilon_0 \cdot \Delta, \quad \Delta = S/l,$$
$$U = E \cdot l$$

$$p = E^2 \cdot \omega \cdot \varepsilon\varepsilon_0 \cdot \operatorname{tg} \delta \quad [\text{Вт/м}^3].$$

Чем больше ε и $\operatorname{tg} \delta$, тем больше потери p в данном месте диэлектрика.

$\varepsilon \cdot \operatorname{tg} \delta$ – коэффициент диэлектрических потерь.

Чтобы понять **причину возникновения потерь** в диэлектрике, необходимо **выяснить причину возникновения фазового опережения** тока I от приложенного переменного напряжения U_c .



Стремятся **снизить** $\text{tg}\delta$ диэл. материалов, что возможно, если **известна природа диэлектрических потерь**.

Тангенс угла диэлектрических потерь в зависимости от температуры $\text{tg}\delta_T$:

$$\text{tg } \delta_T = \text{tg } \delta_0 \exp[\alpha(T - T_0)]$$

где:

$\text{tg}\delta_0$ – тангенс угла диэл. потерь при T_0 ;

α – температурный коэффициент $\text{tg}\delta$ [K^{-1}];

T – текущая температура [$^{\circ}\text{C}$];

$T_0=20$ [$^{\circ}\text{C}$].

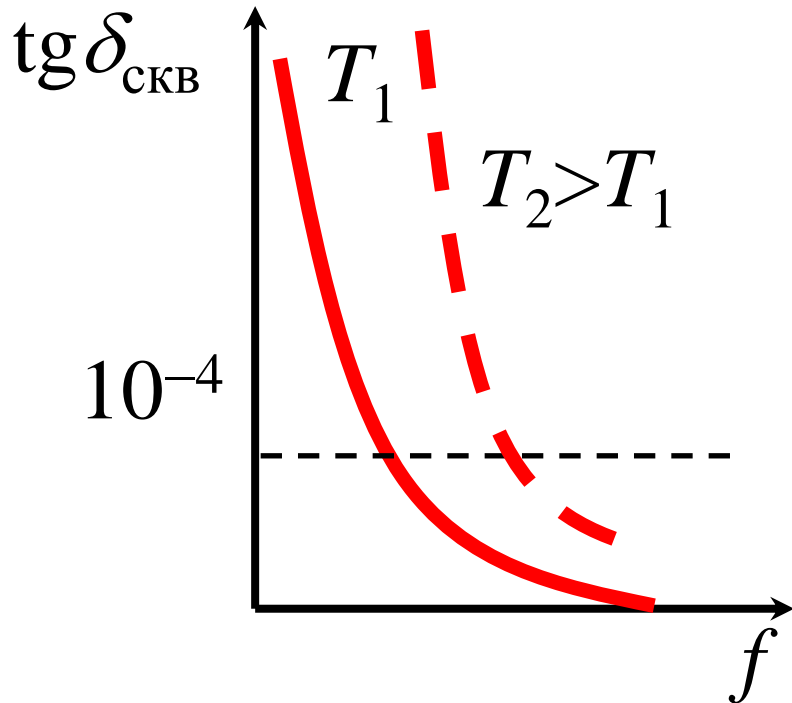
Виды диэлектрических потерь

- *Потери на сквозную электропроводимость.*
- *Потери на медленные виды поляризации.*
- *Потери на неоднородность структуры диэлектрика.*
- *Ионизационные потери.*
- *Резонансные потери.*

Диэлектрические потери на сквозную электропроводимость

наблюдаются **во всех** диэлектриках

$$P_{\text{СКВ}} = \gamma \cdot E^2 \quad \text{tg } \delta_{\text{СКВ}} = \frac{\gamma_{\text{СКВ}}}{\omega \epsilon \epsilon_0} = \frac{1,8 \cdot 10^{-10}}{f \epsilon \rho_v}$$



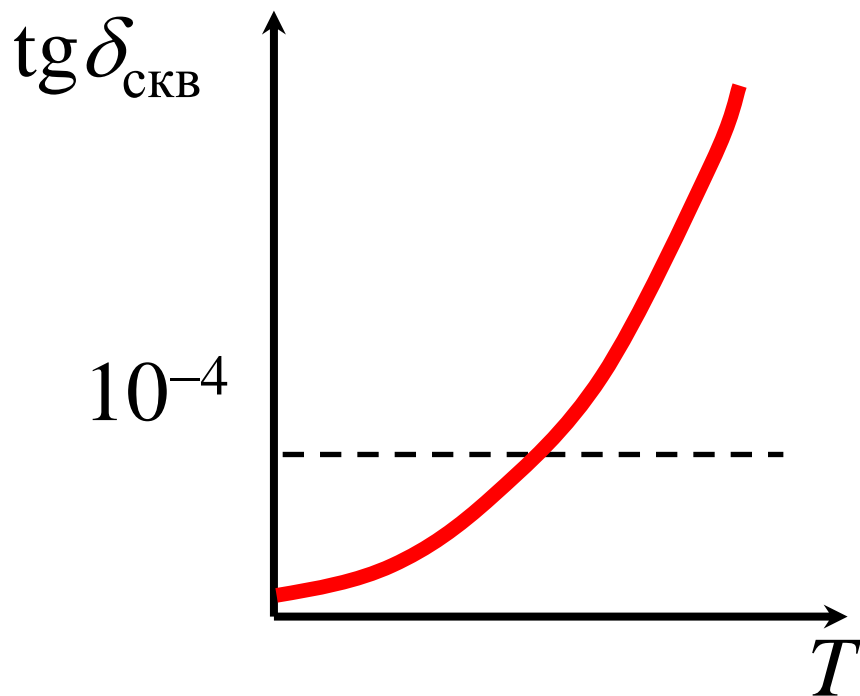
При $\rho > 10^{10}$ Ом·м и $f > 10$ кГц,
 $\text{tg } \delta_{\text{СКВ}} < 10^{-4}$.

Потери существенны лишь при $50 < f < 1000$ Гц, при повышенных $T (> 100^\circ \text{C})$ и при снижении ρ (увлажнение).

Сквозной электрический ток существует не только на постоянном, но и на переменном напряжении.

С ростом T *потери* экспоненциально *возрастают* из-за *роста проводимости* γ :

$$P_T = P_0 \cdot \exp(\alpha T)$$



P_T – потери при T ;
 P_0 – потери при
 $T = 0^\circ\text{C}$ (или 20°C);
 α – постоянная,
определяемая свойствами
диэлектрика.

Тепловые флуктуации (увеличение T) приводят к *диссоциации некоторых молекул* или *вырыванию слабозакрепленных ионов* из узлов решетки ➡ электропр-ть растет.

Потери на электропроводность ничтожно малы у электроизоляционных материалов *с высоким удельным сопротивлением* (полиэтилен, политетрафторэтилен и т.п.), а на высоких и сверхвысоких частотах – практически у всех материалов.

Однако *их необходимо учитывать* в изоляции, работающей *при повышенных температурах* (выше 100°C), а также *при увлажнении* и прочих условиях, приводящих *к снижению удельного сопротивления*.

Диэлектрические потери на медленные виды поляризации

проявляются в *полярных* диэлектриках и только в переменных электрических полях

Работа, синусоидального поля E на поляризацию единицы объема диэлектрика за один период определяется интегралом по замкнутому контуру $P(E)$ и равна площади петли $P(E)$:

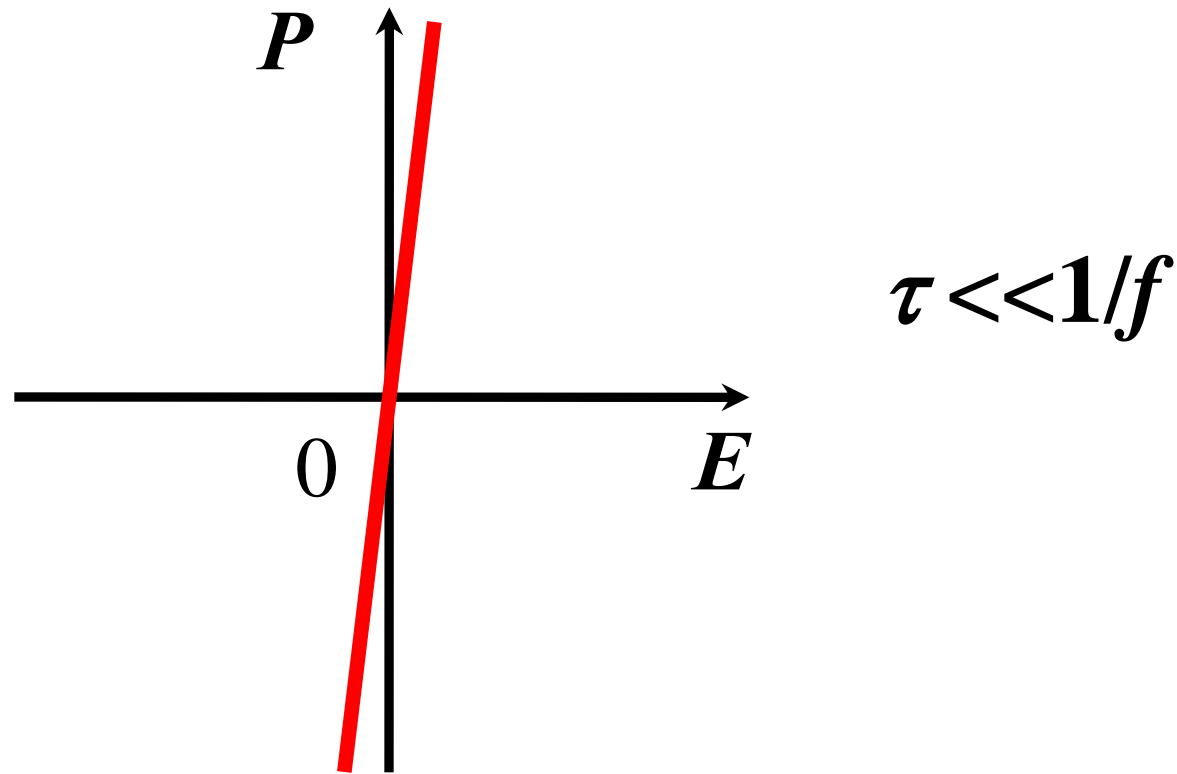
$$\omega = \oint P dE$$

В *неполярных* диэлектриках (*собственный электр. момент p равен 0*) нет медленных видов поляризации.

Если $\tau \ll 1/f$

(*область очень низких частот поля*),

То P успевает следовать за E , и $\oint P dE = 0$.



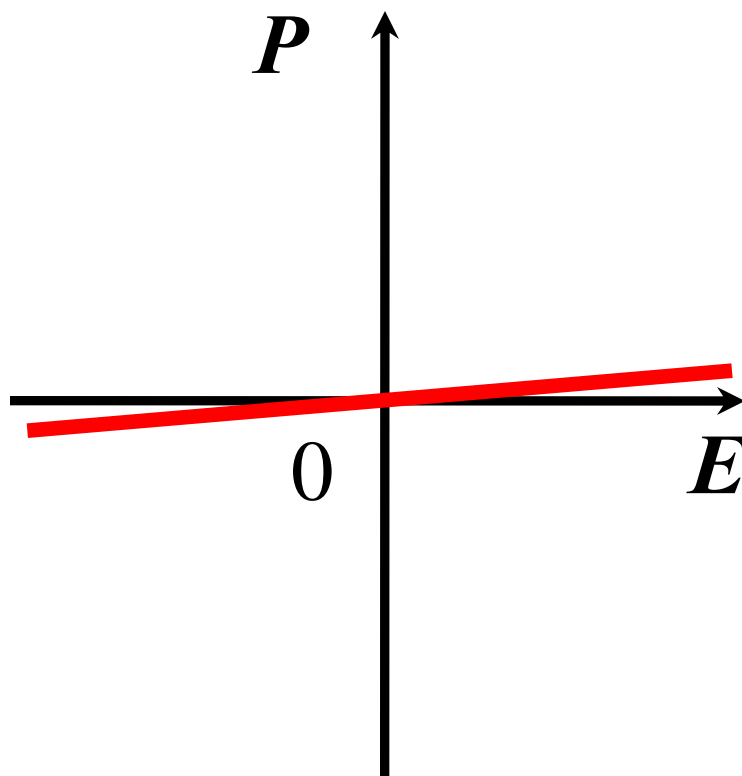
Поляризация P успевает установиться за полупериод изменения эл. поля E , τ - время установления поляризации, $1/f$ - период изменения эл. поля.

Если $\tau \gg 1/f$,

(*область очень высоких частот поля*), то поляризация не успевает установиться

за полупериод изменения E ,

$$P=0 \text{ и } \oint P dE=0.$$



$$\tau \gg 1/f$$

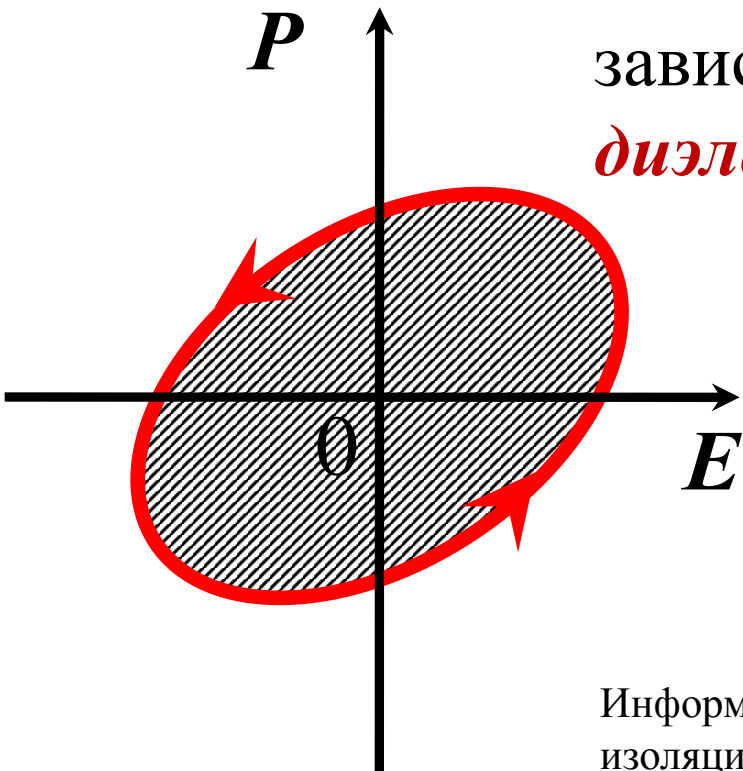
Если $\tau \approx 1/f$,

то P отстает по фазе от E , и $\oint P dE > 0$.

На поляризацию затрачивается энергия поля E , переходящая в диэлектрические потери.

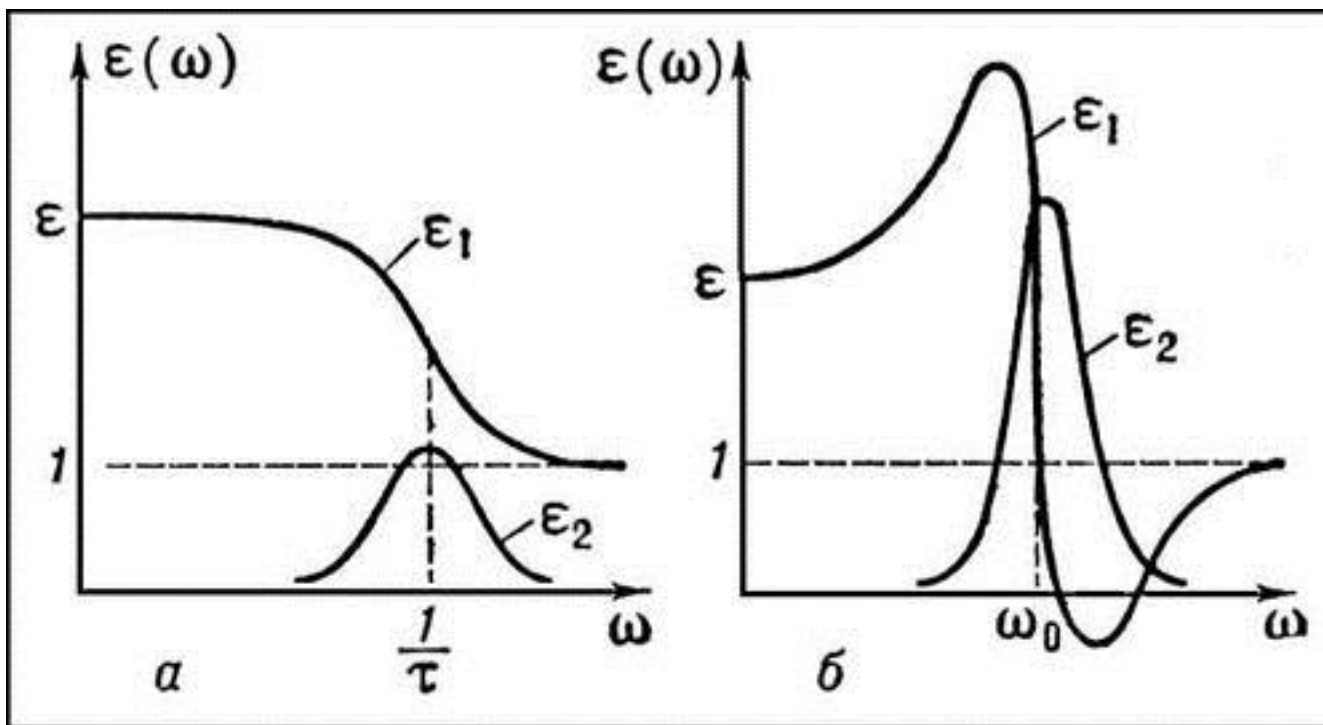
В области частот $f \approx 1/\tau$ наблюдается зависимость ϵ от частоты, называемая *диэлектрической дисперсией*.

Условие максимума потерь:
 $\tau \approx 1/f$



Информация важна для специалистов, работающих с изоляционными системами.

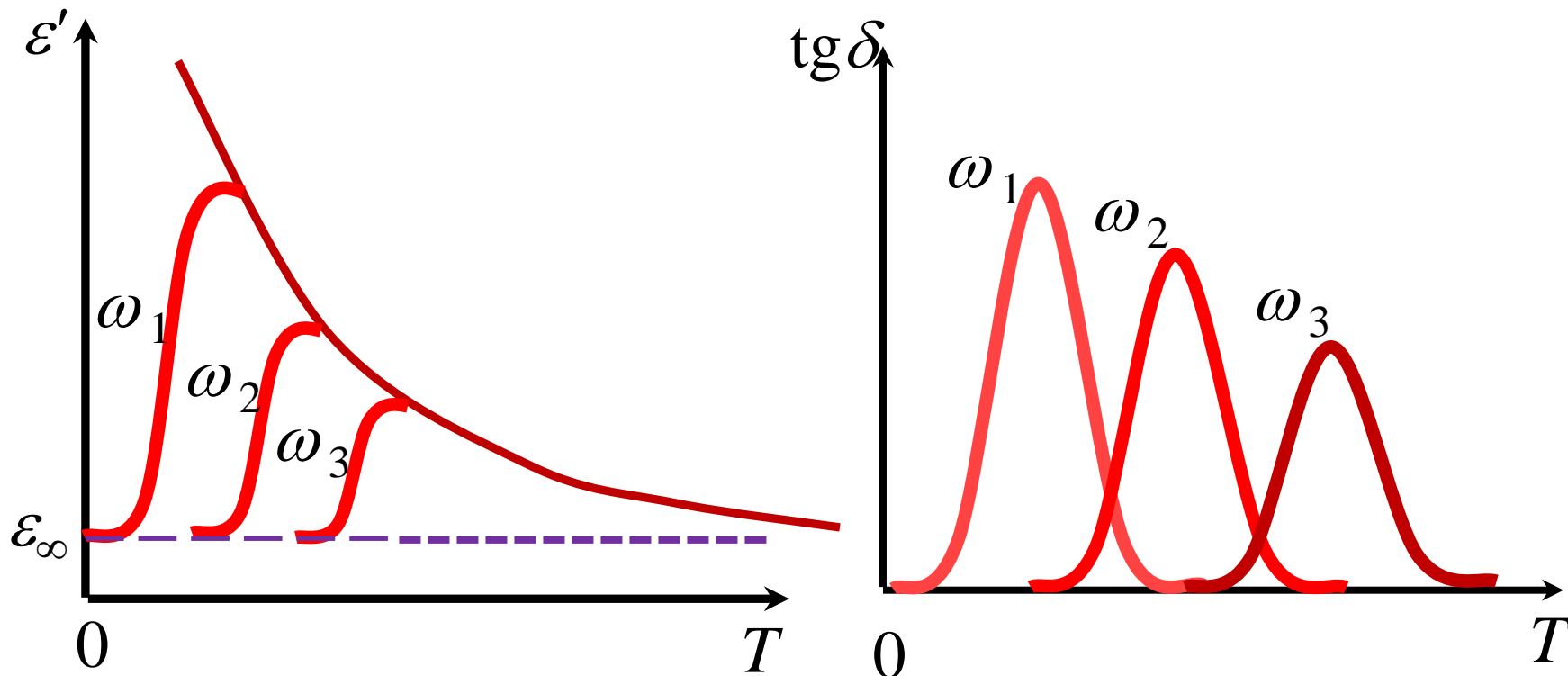
Диэлектрическая дисперсия МОЖЕТ НОСИТЬ **релаксационный** (ϵ монотонно снижается с ростом ω) или **резонансный** характер (ϵ с ростом частоты проходит через максимум и минимум).



Диэл. дисперсия: *a* - релаксационный характер; *b* – резонансный характер

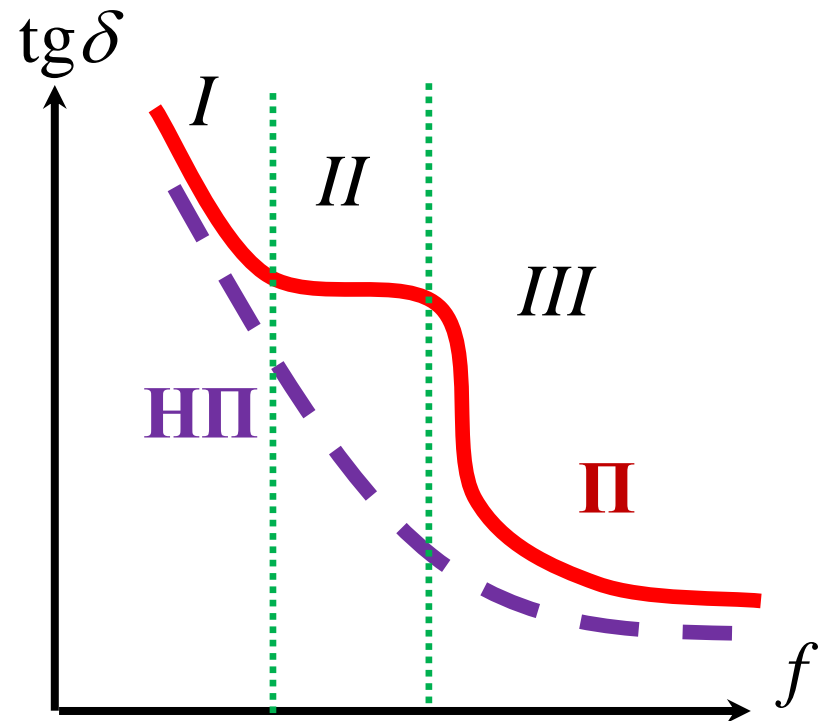
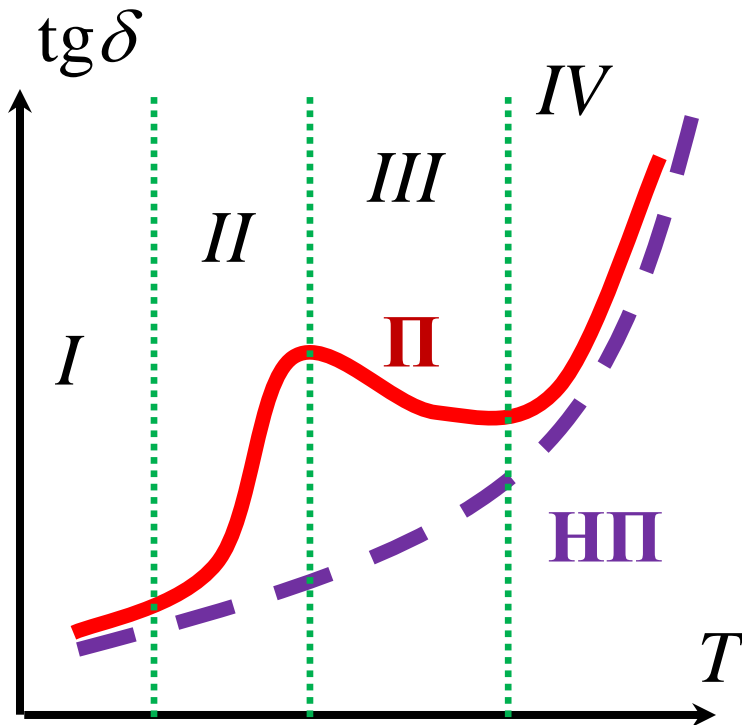
Время установления τ релаксационных видов поляризации уменьшается с ростом температуры \Rightarrow с ростом T максимум диэлектрической дисперсии смещается в область более высоких частот электрического поля.

$$\omega_1 < \omega_2 < \omega_3$$



Диэлектрические потери в **полярных** диэлектриках складываются из потерь на **электропроводность** и **релаксационных потерь**.

Зависимости $\text{tg}\delta$ от T и f для полярного (II) и неполярного (НII) **жидкого** диэлектрика:



Зависимость $\text{tg}\delta$ от T

I область – у **П** и **НП** диэл-в $\text{tg}\delta$ *увеличивается*, т.к. *велики силы межмолекулярного взаимодействия* (вязкость велика), *не достаточно тепловой эн-и*, чтобы молекулы успевали ориентир. вслед за полем; только эл. поляризация.

II область – у **П** диэл-ка, кроме эл. поляризации, еще релаксацион. поляризации, $\text{tg}\delta$ *увеличивается сильнее*, *силы еще высоки* (вязкость снижается), *тепловая эн-я не так высока*, эл. полю необходимо затратить *больше энергии*, чтобы дипольные молекулы сориентир. вслед за полем; *потери на «трение»* в вязкой среде.

Зависимость $\text{tg}\delta$ от T

III область – ослаблены силы межмолекулярного взаимодействия (вязкость мала), **достаточно тепловой эн-и**, чтобы дипольные молекулы успевали ориентир. вслед за полем **без «трения»**; f колебаний молекул совпадает с f поля; **$\text{tg}\delta$ уменьшается**, т.к. силовым является тепловое поле, а эл. лишь указывает направление ориентации **без затрат энергии**.

IV область – область высоких T , только эл. поляризация, т.к. резко возрастает активная составляющ. тока I_a , Π диэл-к приближается к Π диэл-ку.

Зависимость $\text{tg}\delta$ от f

I область – $\text{tg}\delta$ *уменьшается*, т.к. за полупериод изменения E все *дипольные молекулы успевают переориентироваться* вслед за полем, I_a *не* *меняется*, I_c *увеличивается* с ростом f .

II область – II молекула за полупериод изменения E *не успевает переориентироваться* вслед за полем; происходит дополнительное рассеяние энергии (запаздывание), I_a *возрастает*.

III область – II молекулы *не принимают участия* в поляризации (перестают реагировать на изменение эл. поля.), II диэл-к приближается к **III** диэл-ку.

Диэлектрические потери на неоднородность структуры

характерны для *композиционных*
диэлектриков и диэлектриков *с примесями*
(в том числе и проводящими)

гетинакс, текстолит, слюдопласты, керамика,
компаунды, пропитанные материалы и т.д.

Миграционная поляризация обусловлена миграцией зарядов *в проводящих включениях* и их накоплением на *границах неоднородностей*. Время установления τ очень велико.

Для композиционных материалов, состоящих из хороших диэлектриков, частота релаксации $f_p < 1$ Гц и **миграционные потери** малы даже на промышленной частоте (50 Гц).

Если в диэлектрике есть проводящие включения, то f_p оказывается в области рабочих частот и **миграционные потери** необходимо учитывать.

Так, при увлажнении $\text{tg}\delta$ диэлектрика **возрастает**, так как **проводимость** воды велика.

Время релаксации – промежуток времени, в течение которого поляризованность диэл-ка после снятия поля уменьшается вследствие теплового движения молекул в ϵ раз от первоначального значения.

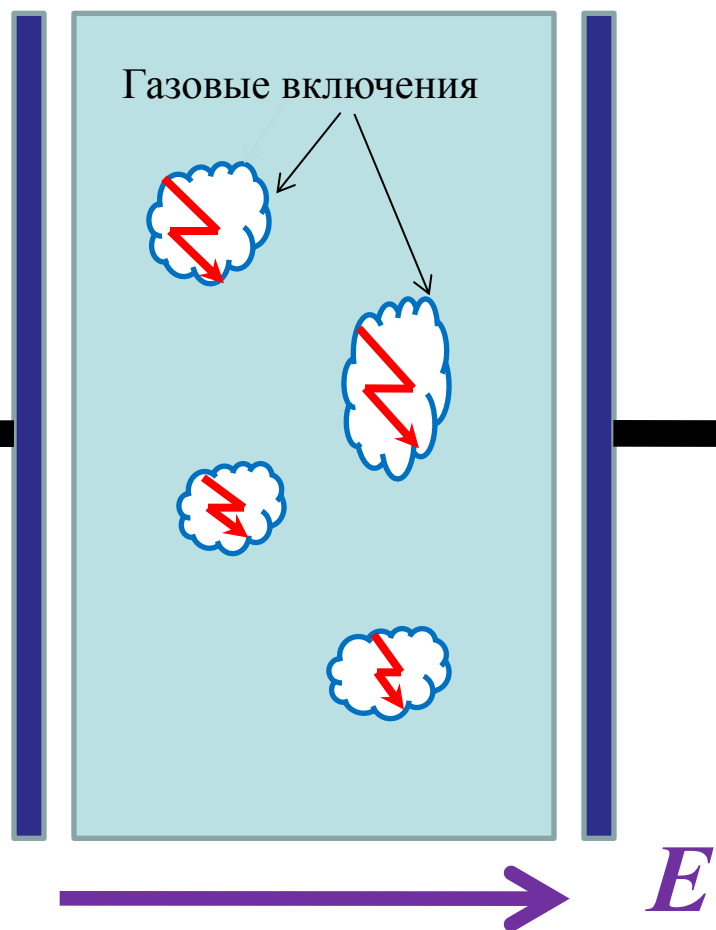
В случае *миграционной поляризации*, как и дипольной, возникает интервал времен τ релаксации, что приводит к *увеличению* частотного интервала миграционных потерь.

Причина: *неодинаковые свойства* основной среды и проводящих включений диэлектрика, *неодинаковая форма и ориентация включений*.

С ростом T удельная проводимость γ **растет** экспоненциально, поэтому частота релаксации и максимума *миграционных потерь* **повышается с** ростом температуры.

Ионизационные диэлектрические потери

в пористых диэлектриках при повышении напряжения сверх порога ионизации $U_{\text{ион}}$



Ионизационные потери:

$$P_{\text{ион}} = Af(U - U_{\text{ион}})^3,$$

A – постоянная зависящая от свойств газа в порах;

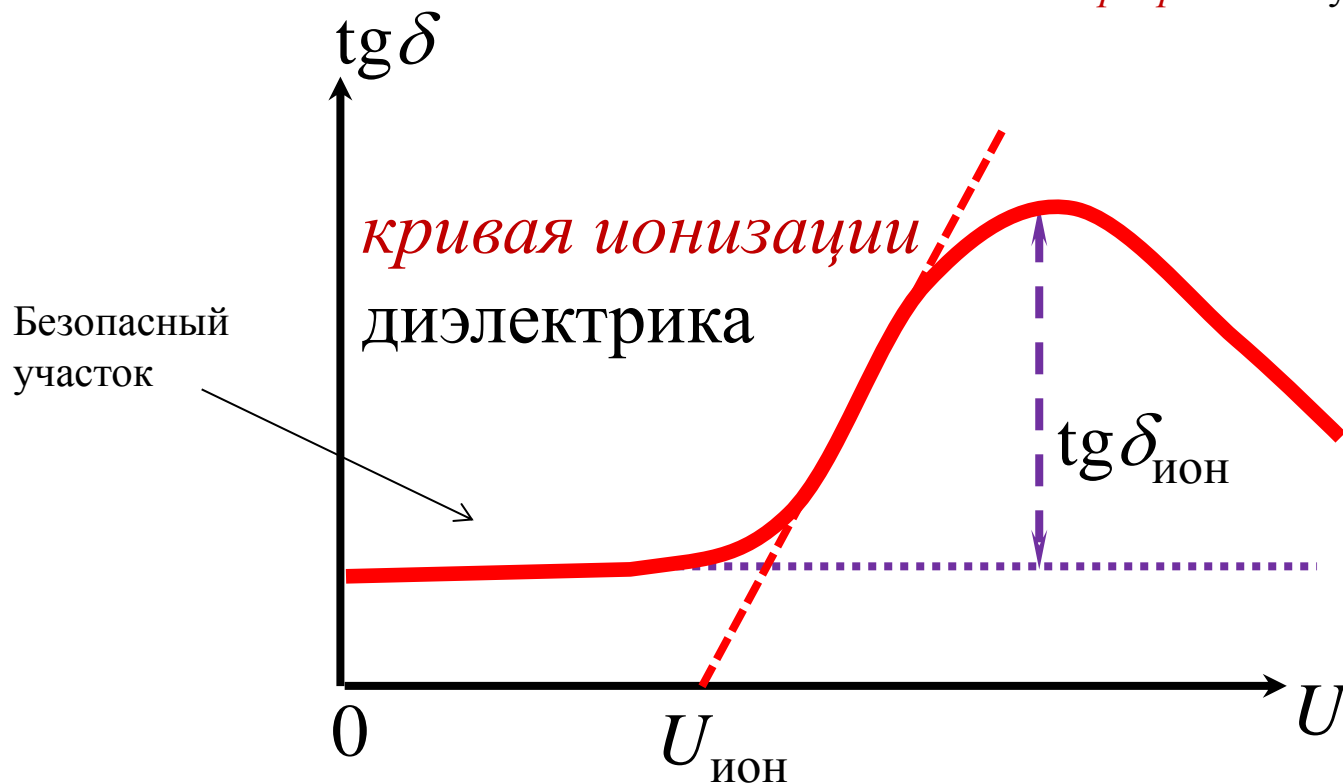
f – частота приложенного электрического поля;

U – приложенное напряжение.

Диэл. прочность газа на много меньше, чем диэл-ка. В газ. промежутках происходят частичные разряды, пробой.

Чем *меньше* приращение $\text{tg} \delta$ из-за ионизационных потерь ($\text{tg} \delta_{\text{ион}}$) и чем при *более высоких напряжениях* $U_{\text{ион}}$ начинается рост $\text{tg} \delta$, тем **выше качество изоляции** высокого напряжения.

Частичные разряды могут разрушить диэл-к.



Если *напр-е начала ионизации* $U_{\text{ион}}$ приблизит. $= U_{\text{раб}}$, изоляция состарилась, нужен осмотр, ремонт.

В *кабельных ЛЭП* проводят испытание систем для анализа $U_{\text{ион}}$.

Для повышения качества электрической изоляции высокого напряжения (ВН) ее пропитывают, заполняя поры маслами, лаками, компаундами, газами под высоким давлением.



В группу **кабелей ВН** включены кабели, предназначенные для работы в сетях переменного напряжения 110, 220, 330, 380, 500, 750 кВ и выше, а также кабели постоянного напряжения от +100 до +400 кВ и выше. Основная масса кабелей ВН в настоящее время изготавливается с **пропитанной маслом бумажной изоляцией**, также распространены **газонаполненные** кабели. В данных кабелях **масло и газ** используются **для создания избыточного давления в изоляции**.

Зависимость $\operatorname{tg}\delta$ от U

- важна для эл/техников, энергетиков:

- для изготовления эл/техн. устройств – ЭМ, трансформаторы, дроссели и т.д.;
- для оценки их работоспособности (выделяются газовые продукты в объеме диэл-ка).

В ТПУ НИИ высоких напряжений – изготавливают **изоляторы** (изоляция из ПЭ), которые должны выдерживать напряжение >500 кВ (1 млн. В):

- если $U_{\text{ион}} > 1$ млн. В – хорошо;
- если $U_{\text{ион}} < 1$ млн. В – плохо, пригодно для более низкого $U_{\text{раб}}$.

Резонансные диэлектрические потери

Наблюдаются *во всех* диэлектриках.

Происходят при *дисперсии* резонансного характера, когда *частота электрического поля* приближается к *частотам собственных колебаний* электронов или ионов.

Резонансные потери **электронной** поляризации имеют максимумы в ***оптическом диапазоне***: инфракрасной, видимой и ультрафиолетовой областях спектра (**на частотах 10^{14} – 10^{17} Гц**).

С ними связано поглощение света веществом.

Потери сопровождаются частотной зависимостью показателя преломления и максимальны в области т.н. «аномальной» ***дисперсии***, где ε снижается с ростом ω .

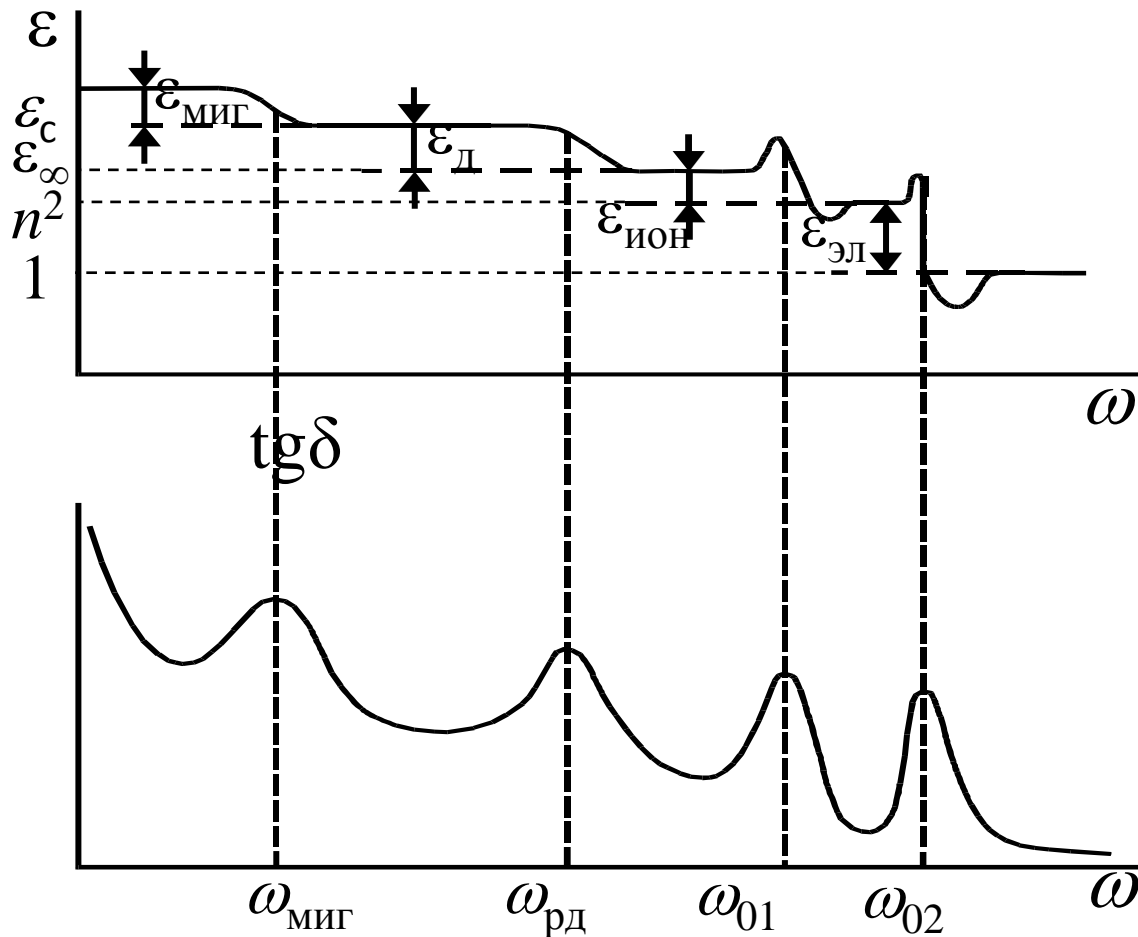
Максимумы ***резонансных потерь*** **ионной** поляризации наблюдаются в ***инфракрасном диапазоне*** на частотах 10^{13} – 10^{14} Гц.

В веществах с высокой ε , а также в стеклах и ситаллах, где есть слабо связанные ионы, частоты **ионного резонанса** могут быть ниже ($\sim 10^{12}$ Гц).

В этом случае начало **резонансного максимума** потерь захватывает диапазон СВЧ (10^9 – 10^{10} Гц).

Полный диэлектрический спектр

$$P = P_{\text{СКВ}} + P_{\text{Д}} + P_{\text{ИОН}} + P_{\text{РЕЗ}} + P_{\text{МИГ}}$$



$P_{\text{СКВ}}$ – мощность потерь на электропроводность;
 $P_{\text{Д}}$ – мощность дипольных релаксационных потерь;
 $P_{\text{ИОН}}$ – мощность ионизационных потерь;
 $P_{\text{РЕЗ}}$ – мощность резонансных потерь;
 $P_{\text{МИГ}}$ – мощность миграционных потерь.

Требуемое на практике *снижение диэлектрических потерь* достигается путем выбора *однородных неполярных диэлектриков с высоким удельным сопротивлением.*

В таких материалах (ПЭ, кварц, сера, парафин, трансформаторное масло и т.д.) $\text{tg}\delta$ *во всем диапазоне частот электро- и радиотехники* ($50\text{-}10^{11}$ Гц) лежит на уровне 10^{-4} .

В *полярных* диэлектриках (целлюлоза и т.д.) $\text{tg}\delta$ в области частот релаксации достигает значений $0,01 - 0,3$, что может привести *к недопустимому нагреву и выходу из строя эл. изоляции.*

Диэлектрические потери в газах

Источником диэлектрических потерь в основном является *сквозная электропроводность*.

При высоких напряженностях эл. поля, а также в неоднородных эл. полях, могут возникнуть *потери на ионизацию*.

Диэлектрические потери в жидких диэлектриках

В *неполярных* жидкостях диэлектрические потери обусловлены только *сквозной электропроводностью*.

В *полярных жидкостях* в зависимости от условий эксплуатации (повышения T , f и т.п.) могут дополнительно проявляться *потери, обусловленные дипольно-релаксационной поляризацией*.

Диэлектрические потери в твердых диэлектриках

В зависимости от структуры твердых диэлектриков в них возможно существование *всех видов диэлектрических потерь*.

В *неполярных* твердых диэлектриках, не имеющих примесей, диэлектрические потери определяются *сквозной электропроводностью*.

В *полярных однородных* твердых диэлектриках могут наблюдаться заметные *потери, связанные с медленными видами поляризации*; зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от T, f такие же, как и для полярных жидкостей.

В *неоднородных* твердых диэлектриках возможны дополнительно все остальные виды поляризации; зависимости $\operatorname{tg}\delta$ от T, f носят сложный характер.