MATERIAŁY ELEKTROIZOLACYJNE

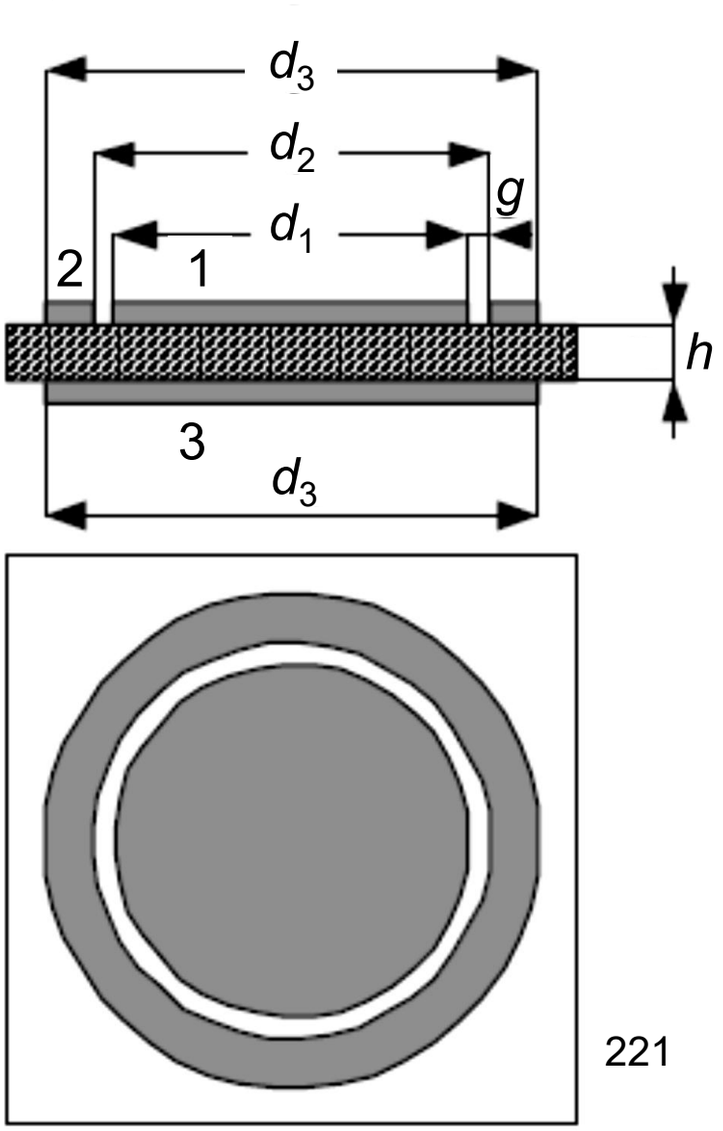
Rezystywność dielektryków

- „dielektryk” - „materiał izolacyjny”,
- rezystywność większa od 10^8 Ωm,
- szerokość pasma zabronionego większa od 5 eV,
- rezystywność określa się przy napięciu stałym,
- po przyłożeniu napięcia prąd po nagłym wzroście powoli maleje,
- zbliża się bardzo wolno do wartości ustalonej,
- prąd przewodzenia tworzą cząstki swobodne obdarzone ładunkiem.

Rezystywność skrośna dielektryków stałych

- wyznaczona z wartość napięcia i prądu przepływającego wewnątrz dielektryka znajdującego się między elektrodami,
- prąd tworzą przede wszystkim jony (**przewodnictwo jonowe**).
- źródła energii potrzebnej do uwolnienia jonów:
  - duża wartość natężenia pola elektrycznego,
  - promieniowanie zewnętrzne o odpowiednio dużej energii,
  - wysoka temperatura dielektryka.

- źródła swobodnych jonów w dielektrykach:
  - domieszki (zanieczyszczenia),
  - domieszki dysocjujące (w dielektrykach organicznych),
- ze wzrostem temperatury rezystywność dielektryków maleje (*TWR* **ujemny** – odwrotnie niż w przypadku przewodników),
- wyższa temperatura sprzyja oswobadzaniu jonów,
- przykładowe wartości rezystywności skrośnej:
  - polietylen – rzędu 10^{16} Ωm,
  - bakelit – rzędu 10^{12} Ωm.

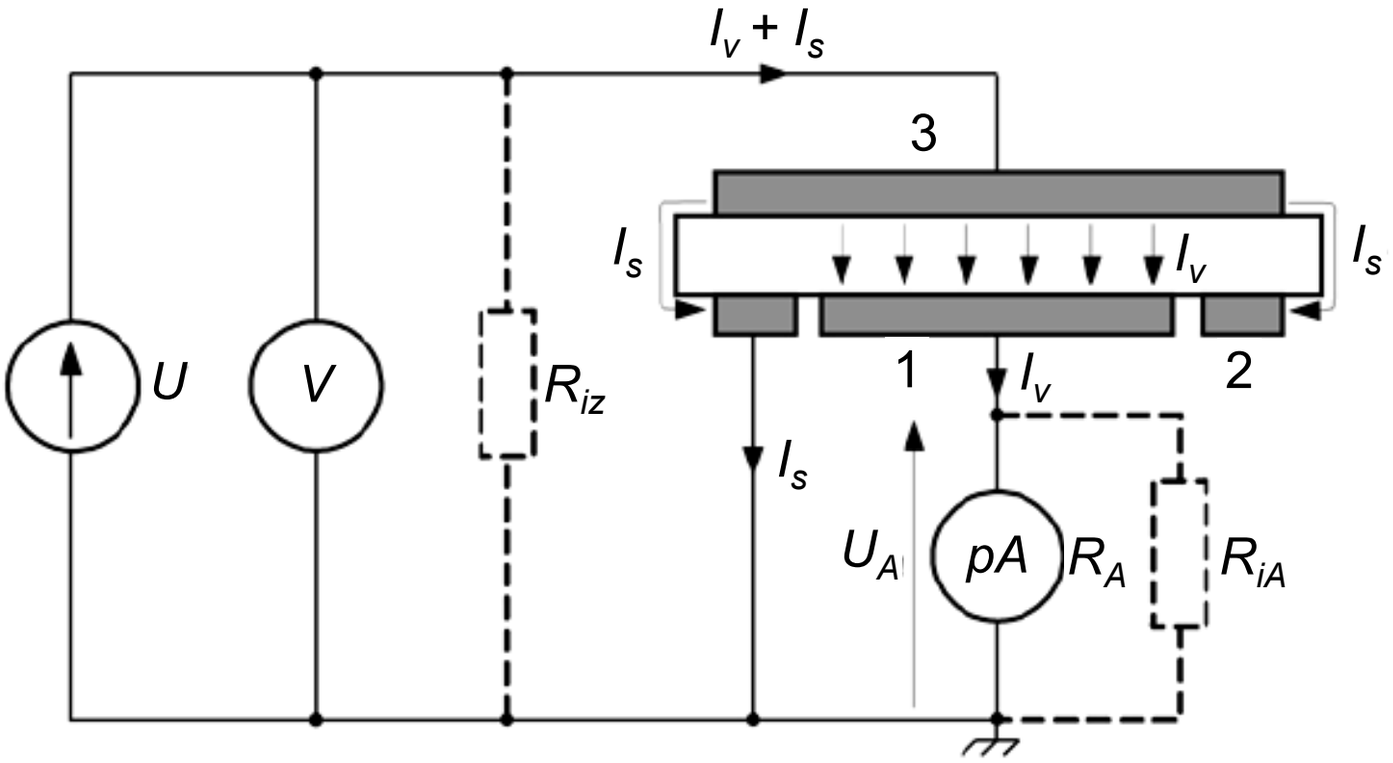


Układ trójelektrodowy do badania rezystywności dielektryków:

1 - elektroda pomiarowa,

2 - elektroda ochronna w pomiarach rezystywności skrośnej, elektroda napięciowa w pomiarach rezystywności powierzchniowej,

3 - elektroda napięciowa w pomiarach rezystywności skrośnej, elektroda ochronna w pomiarach rezystywności powierzchniowej.



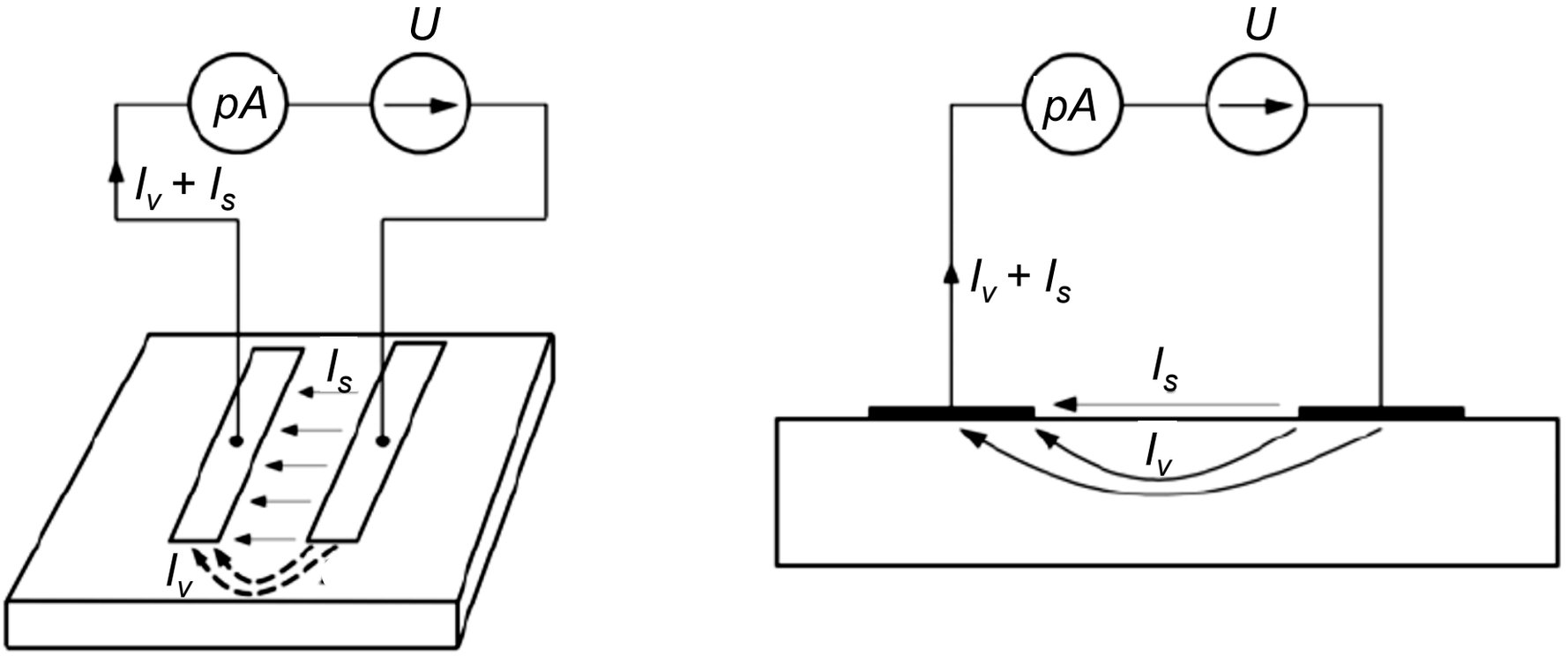
Schemat układu do pomiaru rezystywności skrośnej w układzie trójelektrodowym; elektrody:
1 - pomiarowa, 2 - ochronna, 3 - napięciowa.

Rezystywność powierzchniowa dielektryków stałych

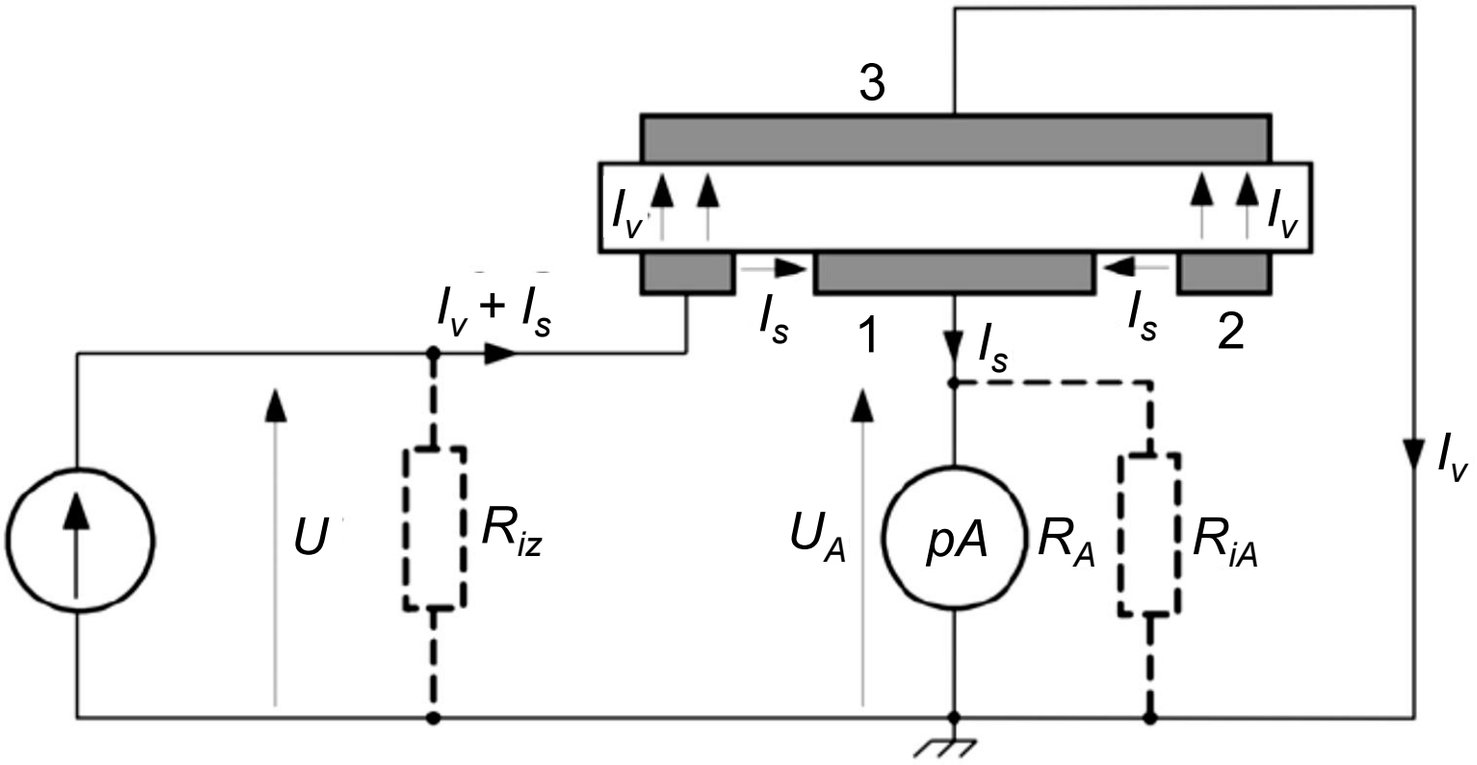
- wyznaczona z wartość napięcia i prądu przepływającego między elektrodami po powierzchni dielektryka,
- jednostką rezystywności powierzchniowej jest 1 Ω,
- prąd przewodzenia tworzą głównie jony:
  - woda na powierzchni dielektryka,
  - dysocjacja związków chemicznych (zanieczyszczeń).

Rezystywność powierzchniowa zależy od własności dielektryka:

- dielektryki hydrofilowe rozpuszczalne w wodzie:
  - szkło sodowe - ρ_s około 10^8 Ω,
- dielektryki hydrofobowe:
  - polietylen, parafina - ρ_s około 10^{16} Ω.



Rozpływ prądów podczas pomiaru rezystancji powierzchniowej w układzie dwuelektrodowym



Schemat układu do pomiaru rezystancji powierzchniowej w układzie trójelektrodowym; elektrody:
1 - pomiarowa, 2 - napięciowa, 3 - ochronna

Rezystywność dielektryków ciekłych i gazowych

Dielektryki ciekłe

- przewodnictwo jonowe elektrolityczne,
- dysocjacja zanieczyszczeń w śladowych ilościach rozpuszczalników,
- rezystywność zależy od stopnia czystości dielektryków,
- *TWR* **ujemny** - wzrost temperatury ułatwia ruch jonów w cieczy,
- rezystywność oleju izolacyjnego mineralnego technicznie czystego jest rzędu 10^{12} Ωm.

Dielektryki gazowe

- przewodnictwo jonowe i elektronowe,
- powietrze atmosferyczne:
  - w 1 cm^3 - $2{,}77 \cdot 10^{19}$ cząstek (1013 hPa, 293 K),
  - około 1000 elektronów i jonów,
  - w ciągu sekundy w 1 cm^3 powietrza powstaje i zanika średnio około 10 jonów i elektronów,
  - jonizacja powietrza - ciała promieniotwórcze w ziemi,
  - rezystywność powietrza - około 10^{17} Ωm,
  - rezystywność technicznie osiągalnej próżni - rzędu 10^{20} Ωm (około 10^9 cząstek w 1 cm^3).

Przenikalność elektryczna dielektryków

Polaryzacja elektryczna

Cząstki tworzące strukturę dielektryka:

- elektrycznie obojętne,
- trwałe dipole elektryczne,

W polu elektrycznym cząstki elektrycznie obojętne stają się dipolami indukowanymi.

Ładunki swobodne:

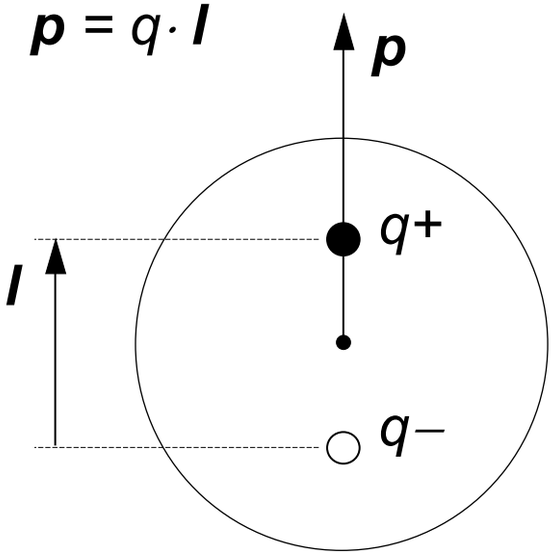
- jony i elektrony mogące poruszać w całej przestrzeni dielektryka (tworzą prąd przewodzenia).

Ładunki związane:

- bieguny dipoli trwałych i indukowanych,
- jony i elektrony mogące poruszać się tylko w części przestrzeni dielektryka nie docierając do elektrod.

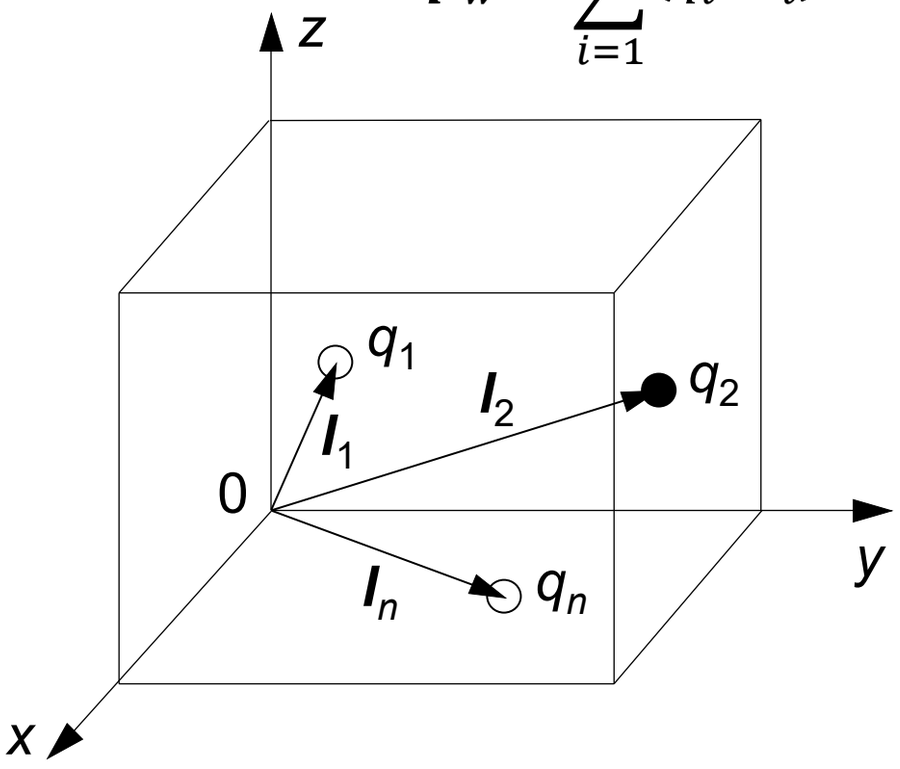
Pole elektryczne zewnętrzne działa na ładunki związane. Zjawisko to nazywa się polaryzacją elektryczną dielektryka.

Moment dipolowy (wielkość charakteryzująca dipol elektryczny)



Sposób wyznaczania momentu dipolowego cząstki materialnej;
$\boldsymbol{p}$ - moment dipolowy, $\boldsymbol{l}$ - wektor odstępu między ładunkami;
$q+$, $q-$ - wartości ładunków związanych dodatniego i ujemnego

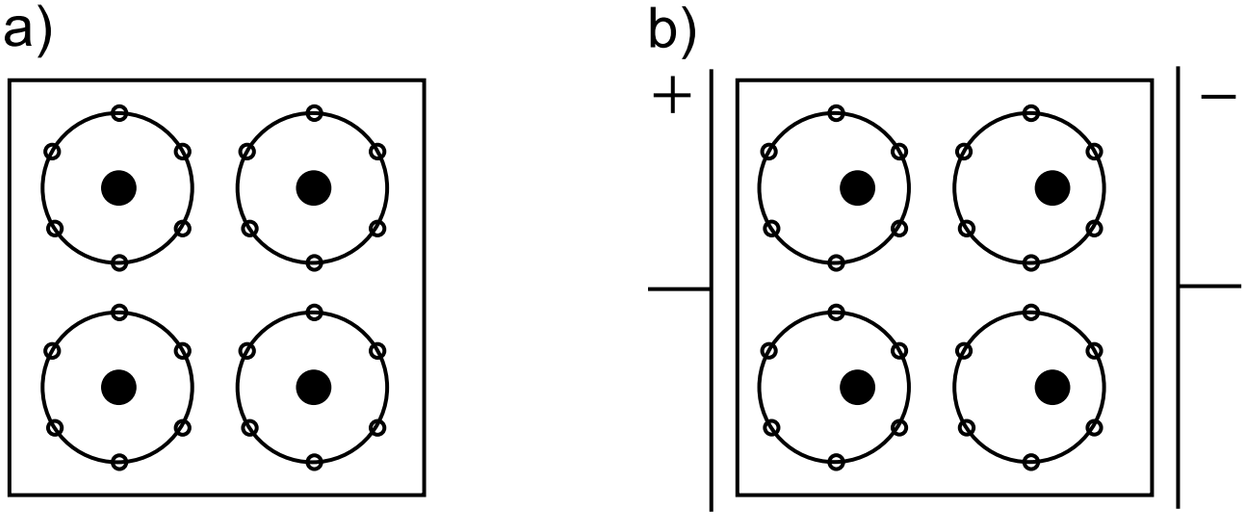
$$\boldsymbol{p}_w = \sum_{i=1}^{n} (q_i \cdot \boldsymbol{l}_i)$$



Sposób wyznaczania wypadkowego momentu dipolowego próbki dielektryka:
q_1, q_2, q_n - wartości ładunków związanych dodatnich ● i ujemnych ○,
$\boldsymbol{l}_1$, $\boldsymbol{l}_2$, $\boldsymbol{l}_n$ - wektory położenia ładunków w układzie xyz.

Rodzaje (mechanizmy) polaryzacji

Polaryzacja elektronowa**:** (rezonansowa, bezstratna, $f_{rez} \cong 10^{15}$ Hz)



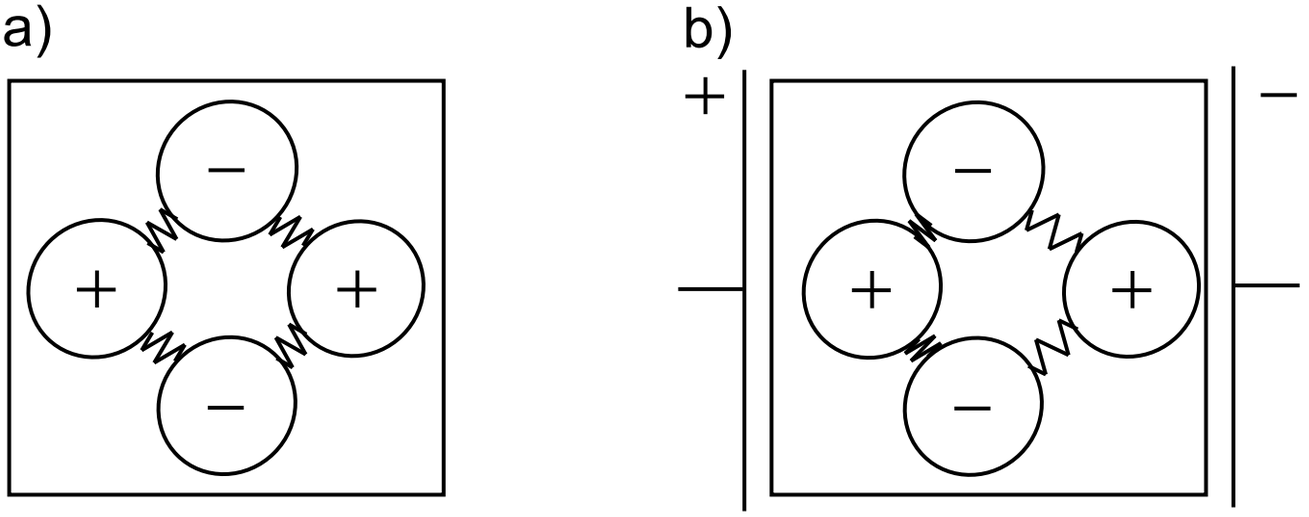
Mechanizm polaryzacji elektronowej: a) dielektryk z wybranymi reprezentatywnymi atomami, b) dielektryk w polu elektrycznym między elektrodami; ● - jądro atomu, ∘ - elektron

Bez zewnętrznego pola elektrycznego: środki ciężkości ładunków dodatnich i ujemnych w atomach pokrywają się - brak polaryzacji.

Dielektryk w polu elektrycznym: elastyczne przesunięcie ładunków dodatnich i ujemnych w atomach względem siebie - powstają dipole elektryczne.

Indukowanie dipoli jest w rezonansie ze zmianami pola elektrycznego do częstotliwości 10^{15} Hz.

Polaryzacja atomowa: (rezonansowa, bezstratna, $f_{rez} \cong 10^{13}$ Hz)



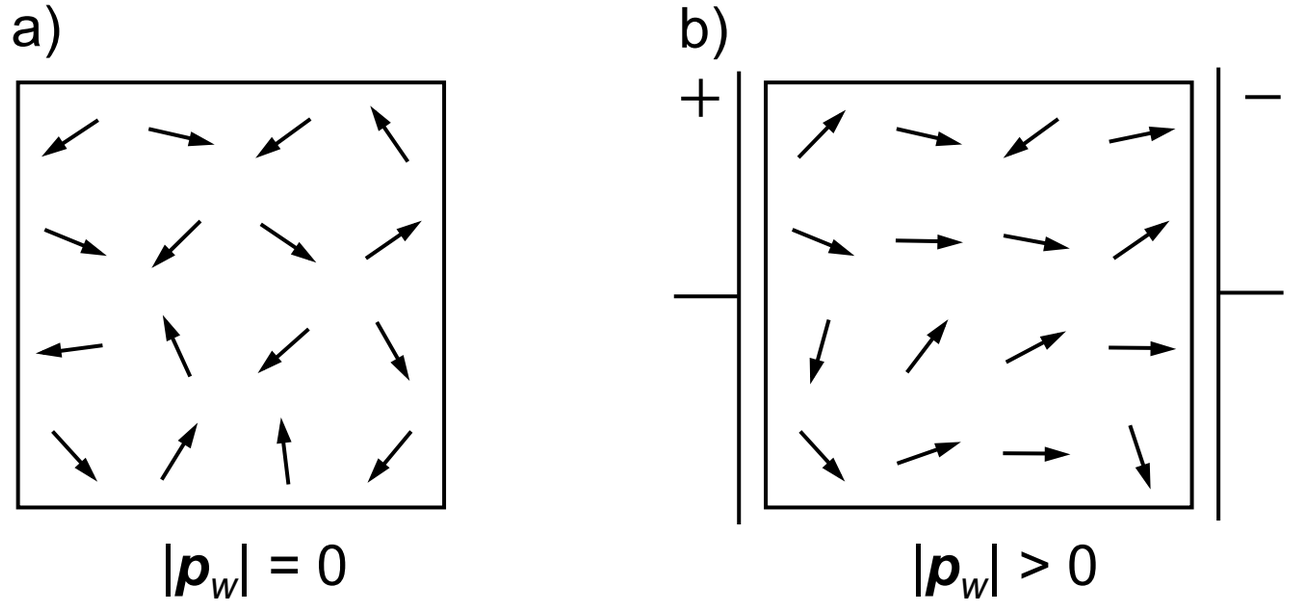
Mechanizm polaryzacji dipolowej: a) dielektryk reprezentowany przez jedną cząsteczkę, b) dielektryk w polu elektrycznym między elektrodami

Bez zewnętrznego pola elektrycznego: środki ciężkości ładunków dodatnich i ujemnych w cząsteczkach pokrywają się - brak polaryzacji.

Dielektryk w polu elektrycznym: elastyczne przesunięcie ładunków dodatnich i ujemnych w cząsteczkach względem siebie - powstają dipole elektryczne.

Indukowanie dipoli jest w rezonansie ze zmianami pola elektrycznego do częstotliwości 10^{13} Hz.

Polaryzacja dipolowa: relaksacyjna, stratna, $t_{rel} = 10^{-10}...10^{-6}$ s



Mechanizm polaryzacji dipolowej: a) dielektryk z reprezentatywnymi dipolami elektrycznymi, b) dielektryk w polu elektrycznym między elektrodami

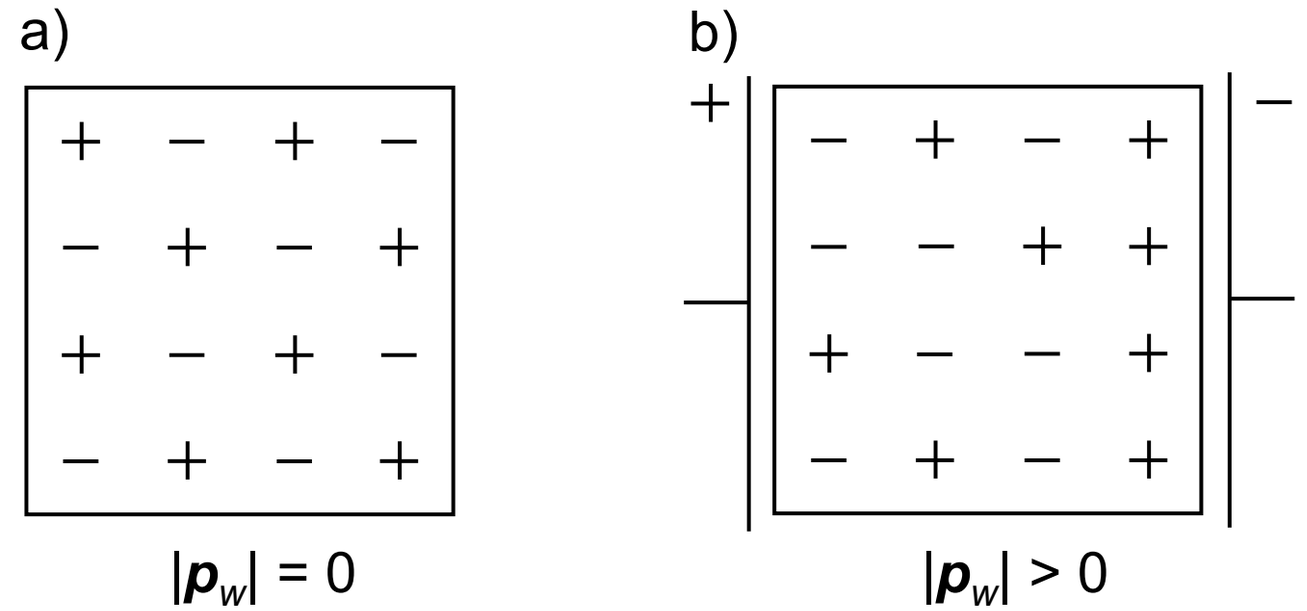
Bez zewnętrznego pola elektrycznego: naturalne dipole elektryczne zorientowane przypadkowo.

Dielektryk w polu elektrycznym: koordynacja orientacji dipoli elektrycznych zgodnie z zewnętrznym polem elektrycznym.

Zmiana orientacji dipoli za zmianami pola elektrycznego jest opóźniona od 10^{-10} s do 10^{-6} s zależnie od rodzaju dielektryka.

Polaryzacja makroskopowa: relaksacyjna, stratna,

$t_{rel} = 10^{-2}$ s … godziny



Mechanizm polaryzacji makroskopowej: a) dielektryk z reprezentatywnymi jonami związanymi **+** i **–** , b) dielektryk w polu elektrycznym między elektrodami

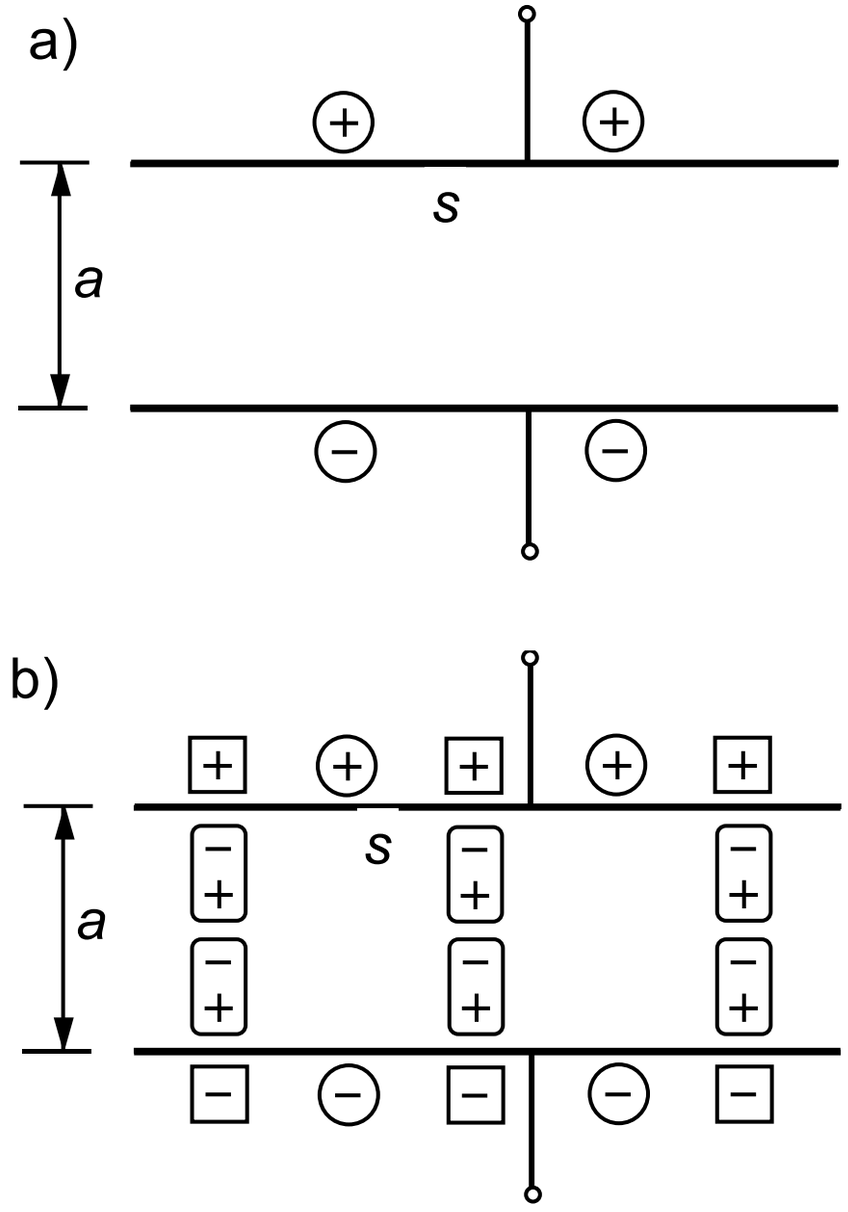
Bez zewnętrznego pola elektrycznego: związane ze strukturą jony są rozmieszczone przypadkowo.

Dielektryk w polu elektrycznym: zmiana rozmieszczenia jonów wymuszona zewnętrznym polem elektrycznym.

Zmiana położeń jonów za zmianami pola elektrycznego jest opóźniona od 10^{-2} s do wielu godzin, zależnie od rodzaju dielektryka.

Związek polaryzacji z przenikalnością elektryczną

Układ izolacyjny bez dielektryka i z dielektrykiem



Takie same wartości ładunku oznaczonego symbolami:

⊕ ⊖ ładunki na elektrodach bez dielektryka

⊞ ⊟ ładunki związane z polaryzacją dielektryka

⌐− −+⌋ ładunki dipoli elektrycznych w dielektryku

Ładunek „przesunięty” ze źródła napięcia na elektrody układu izolacyjnego: a) próżniowego, b) z dielektrykiem stałym; *a* - odstęp elektrod, *s* - powierzchnia elektrody

Układ izolacyjny bez dielektryka:

$$C = C_0 = \varepsilon_0 \frac{s}{a} = \frac{Q_0}{U_0}$$

ε_0 = 8,854·10^{-12} F·m^{-1} [(1/36π)·10^{-9}]
przenikalność elektryczna próżni

Układ izolacyjny z dielektrykiem:

$$C = \varepsilon \frac{s}{a} = \frac{Q_0 + Q_a}{U_0} = \frac{Q_0 + 1{,}5\ Q_0}{U_0} = \frac{2{,}5\ Q_0}{U_0} = 2{,}5\ \varepsilon_0 \frac{s}{a} = 2{,}5\ C_0$$

ε - przenikalność elektryczna dielektryka,

Q_a - ładunek przesunięty (zaadsorbowany) ze źródła dla zrównoważenia ładunku dipoli w dielektryku.

Przenikalność elektryczna dielektryków

Przenikalność względna dielektryka: $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$

Dla przykładu przedstawionego na rysunku:

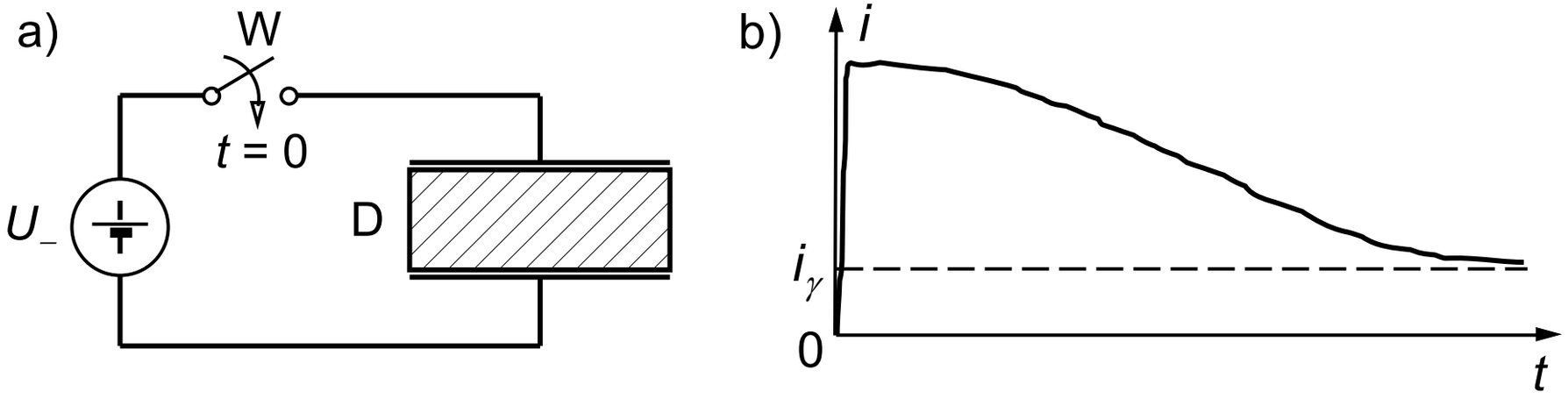
$Q_a = 1{,}5\,Q_0, \quad C = 2{,}5\,C_0$

stąd: $\varepsilon = 2{,}5\,\varepsilon_0$, czyli: $\varepsilon_r = 2{,}5$

Najczęściej stosowane dielektryki ciekłe i stałe: $\varepsilon_r = 2 \ldots 8$.

Dielektryki gazowe: $\varepsilon_r \cong 1$.

Załączenie układu izolacyjnego pod napięcie stałe



Załączenie układu izolacyjnego pod napięcie stałe: a) schemat obwodu, b) przebieg prądu w obwodzie; $U_{_}$ - źródło napięcia stałego, W - wyłącznik, D - dielektryk, i_{γ} - prąd przewodzenia dielektryka

Prądy płynące w obwodzie:

- ustalony prąd przewodzenia i_{γ},
- pojemnościowy prąd ładowania układu elektrod (bez dielektryka),
- pojemnościowy prąd absorpcji związany z polaryzacją dielektryka,
- czynny prąd absorpcji związany ze stratami polaryzacyjnymi w dielektryku.

Trzy ostatnie, to prądy dodatkowe tworzące tzw. prąd przesunięcia (elektrony przemieszczają się ze źródła napięcia do elektrod i z powrotem).

Przy napięciu stałym prąd przesunięcia zanika po upływie czasu relaksacji polaryzacji stratnych właściwych dla danego dielektryka.

Przy napięciu przemiennym:

- prąd przesunięcia ma charakter ciągły,
- składowa czynna prądu absorpcji jest w fazie z napięciem,
- pozostałe składowe prądu przesunięcia wyprzedzają napięcie o 90°.

Stratność elektryczna dielektryków

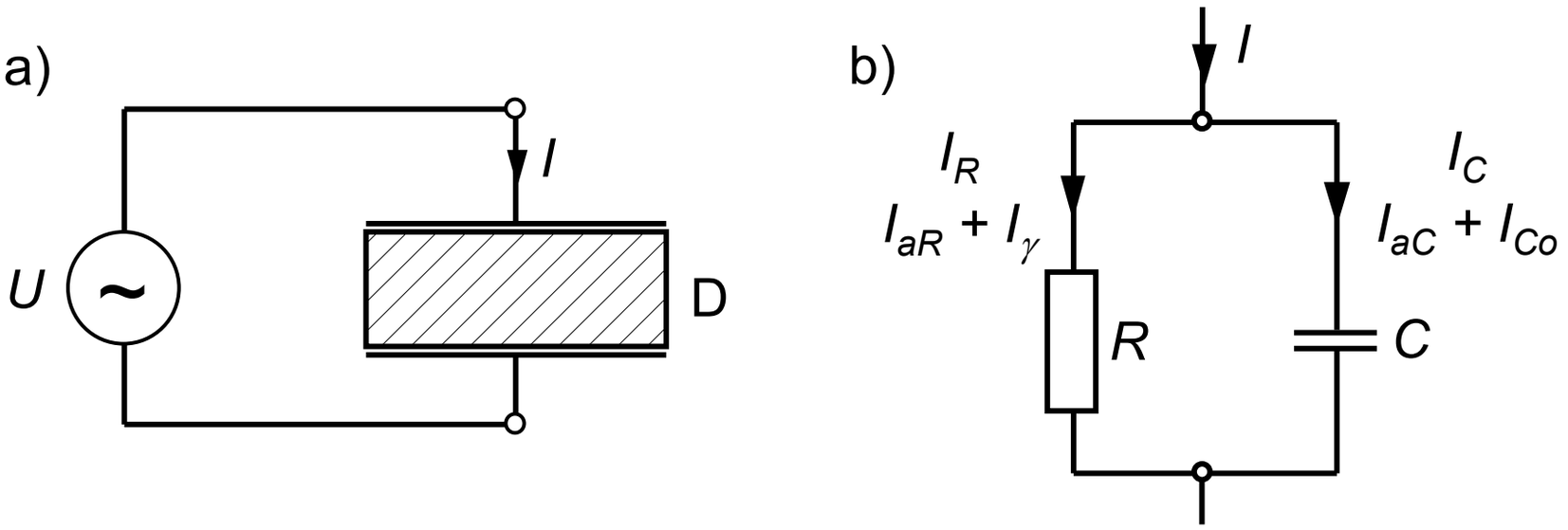
- własność materiałów izolacyjnych,
- zmiana energii pola elektrycznego na ciepło,
- wzrost temperatury dielektryka.

Mechanizmy strat elektrycznych w dielektrykach:

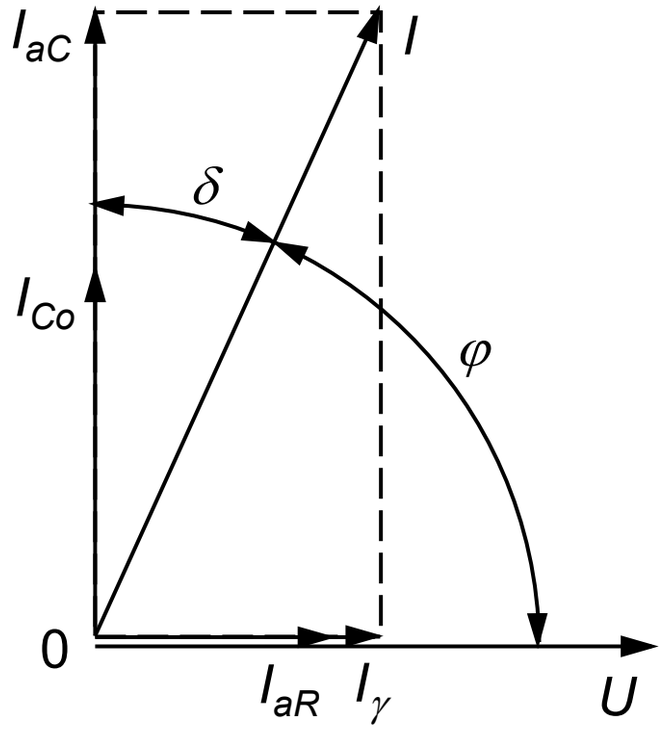
- straty polaryzacyjne - tylko przy napięciu zmiennym,
- straty przewodzenia - przy napięciu stałym i zmiennym.

Stratność elektryczna dielektryków:

- współczynnik $tg\delta$ (miara stratności elektrycznej),
- kąt δ - dopełnienie kąta fazowego φ do kąta prostego.



Dielektryk włączony pod napięcie przemienne: a) schemat obwodu elektrycznego, b) model obwodowy dielektryka; *U* - źródło napięcia, D - dielektryk, *R* - rezystancja uwzględniająca straty w dielektryku, *C* - pojemność układu elektrod z dielektrykiem



I_γ - prąd przewodzenia dielektryka,

I_{aR} - prąd absorpcji związany ze stratami polaryzacyjnymi w dielektryku,

I_{Co} - prąd ładowania układu elektrod (bez dielektryka),

I_{aC} - prąd absorpcji związany z polaryzacją dielektryka.

Wykres wektorowy napięcia i prądów dla obwodowego modelu dielektryka

W oparciu o schemat zastępczy i wykres wektorowy można napisać:

$$tg\delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{I_{aR} + I_\gamma}{I_{aC} + I_{C_o}} \qquad tg\delta = \frac{I_R \cdot U}{I_C \cdot U} = \frac{P}{Q_C}$$

gdzie:

P - moc czynna (moc strat elektrycznych) w dielektryku,

Q_C - moc bierna pojemnościowa układu izolacyjnego.

Obwód prądu sinusoidalnego o częstotliwości *f* i pulsacji $\omega = 2\pi f$:

$$I_C = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = U \cdot \omega C$$

gdzie: $\frac{1}{\omega C}$ - reaktancja pojemnościowa układu izolacyjnego.

Po podstawieniu zależności na I_c do wzoru na $tg\delta$:

$$tg\delta = \frac{I_R \cdot U}{I_C \cdot U} = \frac{P}{U^2 \cdot \omega C} \qquad \text{stąd:} \quad P = tg\delta \cdot Q_C = tg\delta \cdot \omega C \cdot U^2$$

Q_C - moc charakterystyczna dla układów izolacyjnych,

P - moc tracona w układzie izolacyjnym,

$tg\delta$ - współczynnik strat elektrycznych materiału izolacyjnego.

Dielektryki ciekłe i stałe: $tg\delta = 10^{-5}...10^{-2}$.

Dielektryki gazowe: $tg\delta \cong 0$.