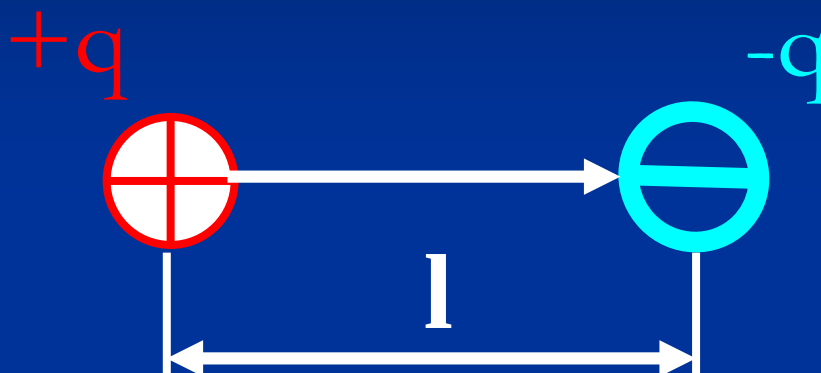


Materiały elektroizolacyjne lub dielektryki

Dipol elektryczny

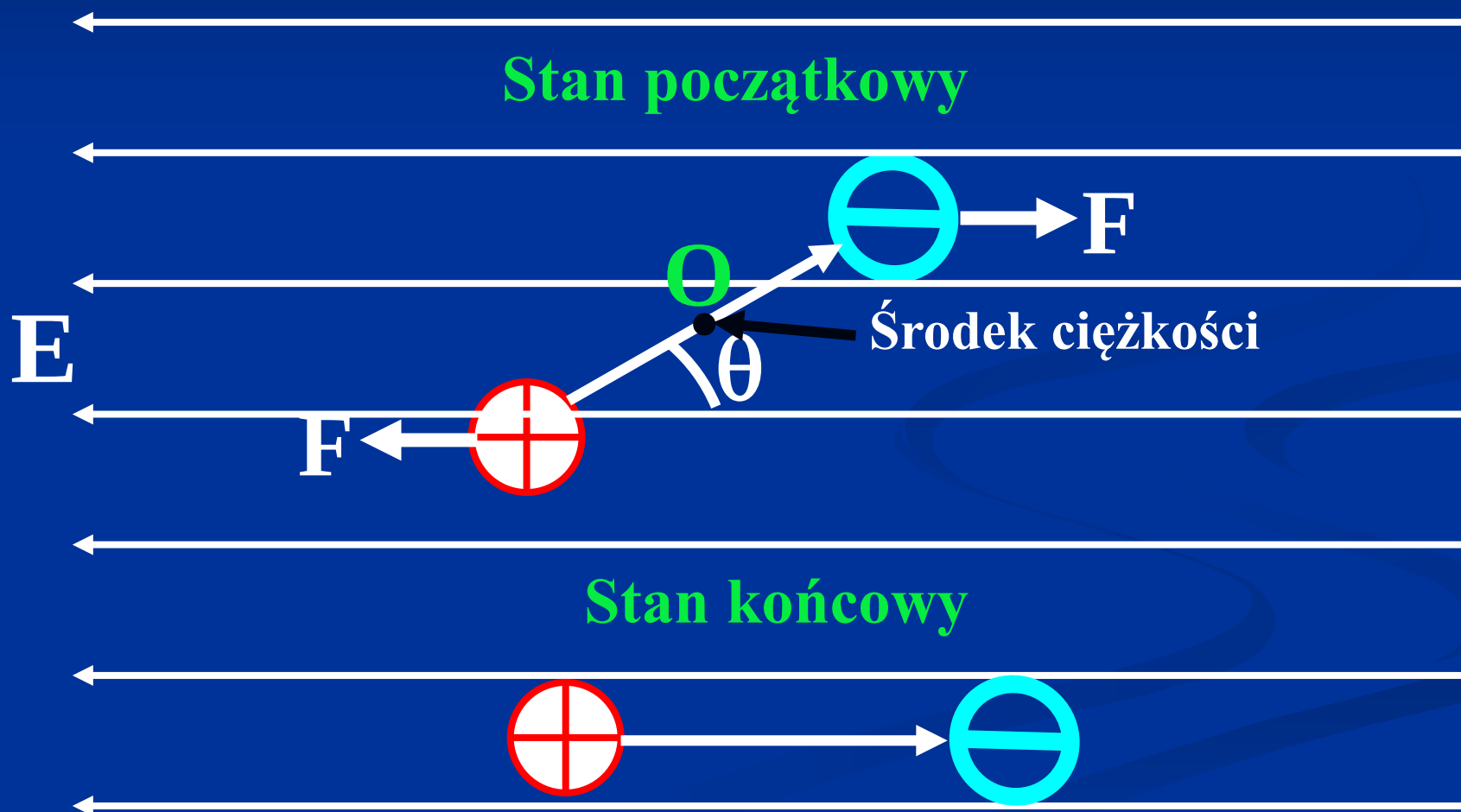


Dipolem elektrycznym nazywamy dwa związane ze sobą ładunki o jednakowej wartości i o przeciwnych znakach, umieszczone blisko siebie. Dipol posiada moment dipolowy:

$$\vec{p} = q \cdot \vec{l}$$

Dielektryki

W polu elektrycznym na dipol działa para sił, która ustawia jego wzdłuż linii sił pola elektrycznego:



Dielektryki

Dipol, znajdujący się w polu elektrycznym o natężeniu E posiada energię potencjalną:

$$U = -p \cdot E \cdot \cos \vartheta.$$

Energia potencjalna osiąga maksymalną wartość przy ustawieniu dipolu wzdłuż linii sił:

$$U_{max} = -p \cdot E.$$

Zerową – przy ustawieniu prostopadłym:

$$U_{min} = 0.$$

Dielektryki

Polaryzacja materiałów dielektrycznych

Wektor indukcji elektrycznej D jest funkcją:

- przenikalności dielektrycznej względnej dielektryka ε ;
- natężenia pola elektrycznego E ;
- przenikalności dielektrycznej próżni ε_0 :

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot \vec{E} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \vec{P} = \varepsilon_0 \cdot \vec{E} + \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot \vec{E},$$

$$\text{gdzie: } \chi = \varepsilon - 1, \quad \vec{P} = \varepsilon_0 \cdot \chi \cdot \vec{E}$$

P – wektor polaryzacji jednostki objętości dielektryka,
 χ – podatność dielektryczna.

Pojemność elektryczna

Kondensator – dwie okładziny z materiału przewodzącego, oddzielone od siebie materiałem izolacyjnym lub próżnią, naładowane ładunkami o jednakowej wartości q i o przeciwnych znakach ($+q$, $-q$) do różnicy potencjałów V .

Pojemność elektryczna charakteryzuje zdolność kondensatora do gromadzenia ładunków elektrycznych.

Kondensator płaski o polu powierzchni jednej okładziny S , odległości pomiędzy okładzinami (grubości dielektryka) d oraz o przenikalności względnej dielektryka ε posiada pojemność:

$$C = \frac{q}{V} = \frac{\varepsilon \cdot \varepsilon_0 \cdot S}{d}.$$

Dielektryki

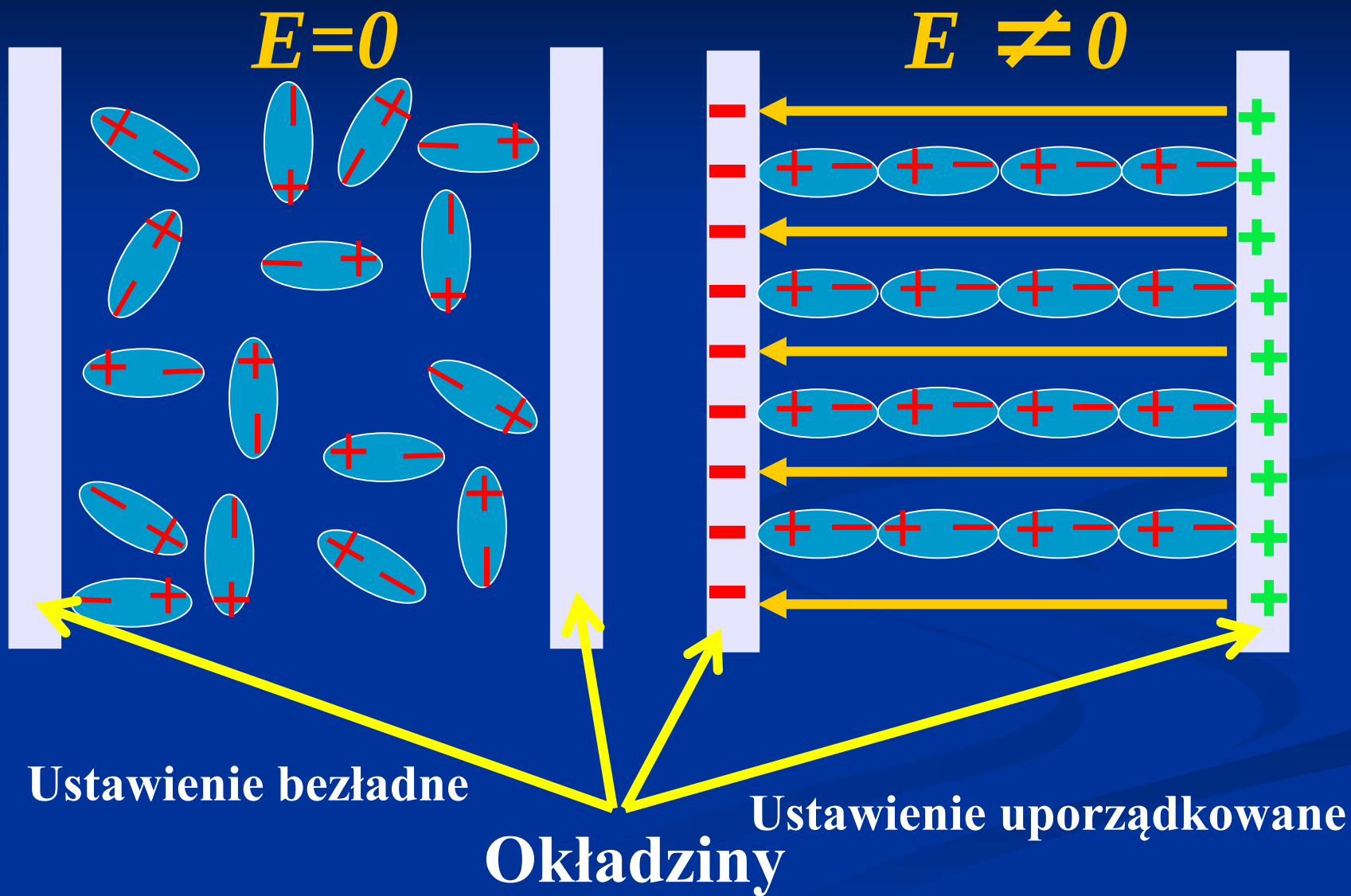
Jak widać z powyższego wzoru, pojemność zależy od wymiarów geometrycznych kondensatora (S oraz d) jak również od przenikalności względnej materiału izolacyjnego ϵ .

Na podstawie pomiarów wartości pojemności kondensatora C oraz jego wymiarów geometrycznych S i d możemy określić wartość przenikalności dielektrycznej materiału izolacyjnego:

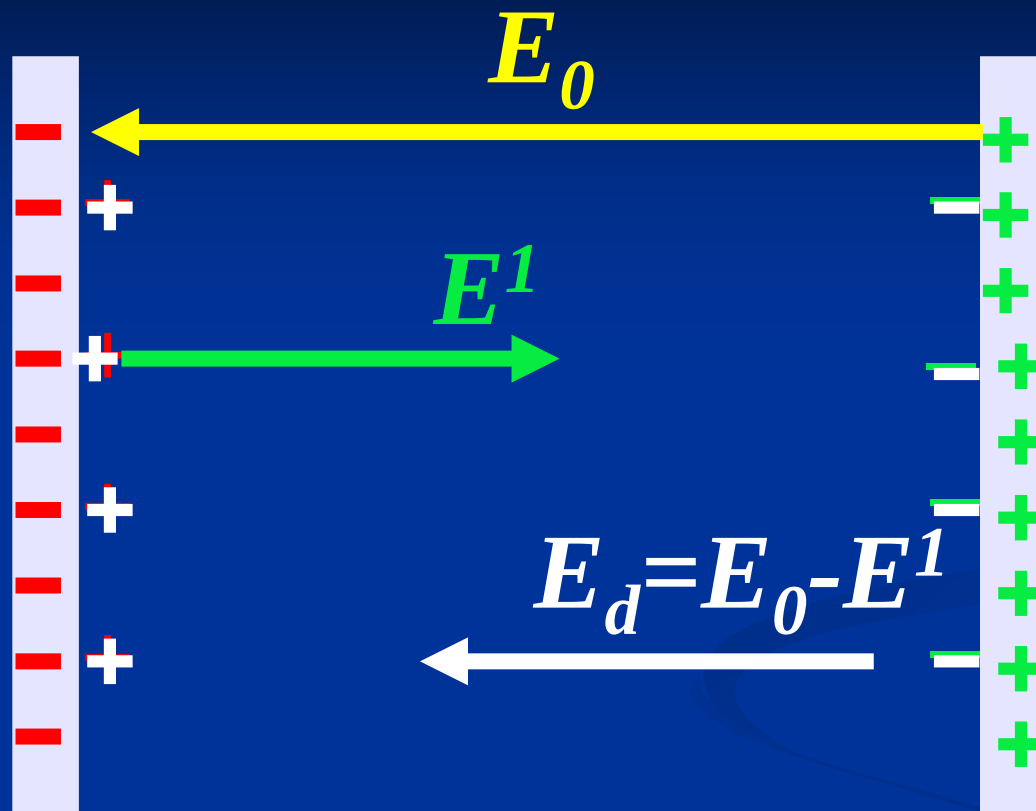
$$\epsilon = \frac{C \cdot d}{\epsilon_0 \cdot S}.$$

Co dzieje się z dipolami znajdującymi się w dielektryku umieszczonym w naładowanym kondensatorze?

Dielektryki



Dielektryki



Ustawienie uporządkowane

Dielektryki

Polaryzacja materiałów izolacyjnych polega na ustawieniu dipoli pod wpływem pola elektrycznego wzdłuż linii sił.

Miarą polaryzacji jest przenikalność dielektryczna względna która wskazuje, ile razy mniejsze jest natężenie pola elektrycznego wewnątrz materiału izolacyjnego niż w próżni:

$$\frac{E_0}{E_d} = \varepsilon \geq 1, \quad V_0 = E_0 \cdot d, \quad V_d = E_d \cdot d,$$

$$\frac{V_0}{V_d} = \frac{E_0}{E_d} = \varepsilon.$$

Mechanizmy polaryzacji

W materiałach izolacyjnych mogą występować osobno lub jednocześnie cztery rodzaje polaryzacji: elektronowa, jonowa, orientacji oraz makroskopowa.

1. Polaryzacja elektronowa

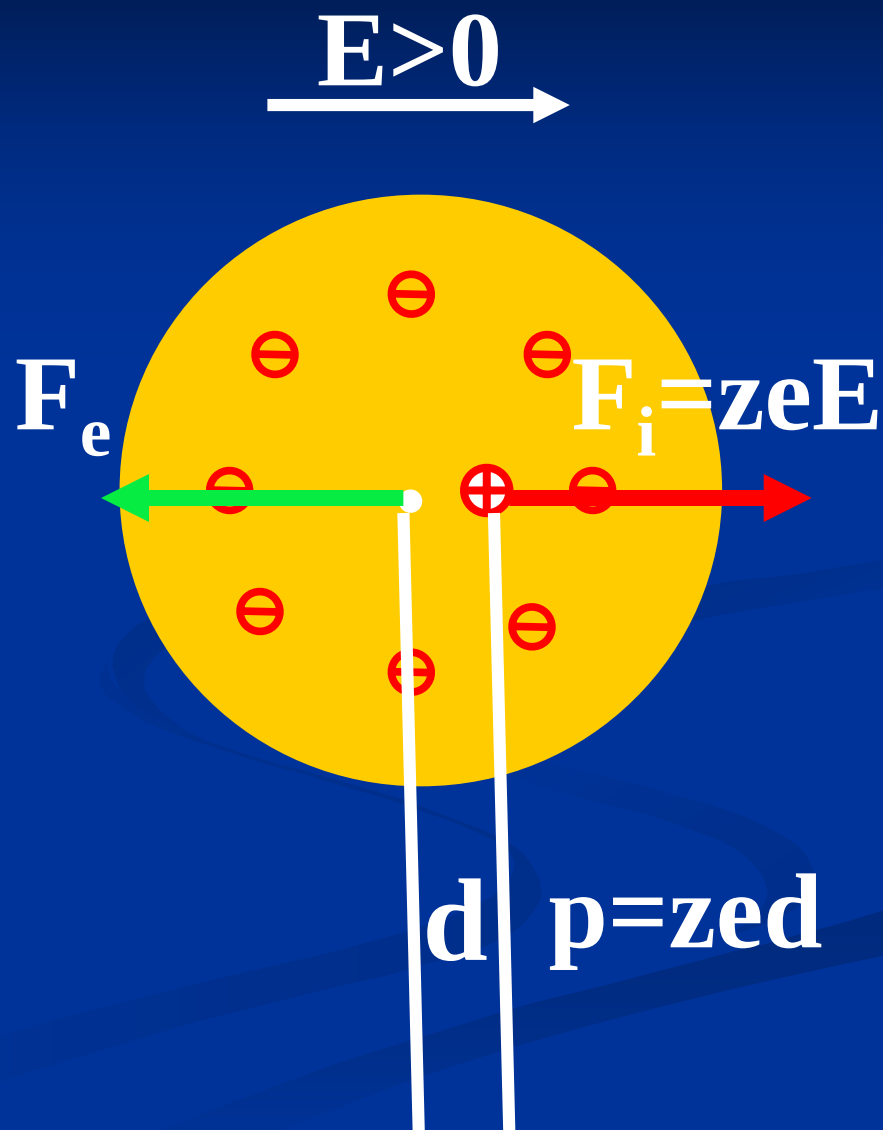
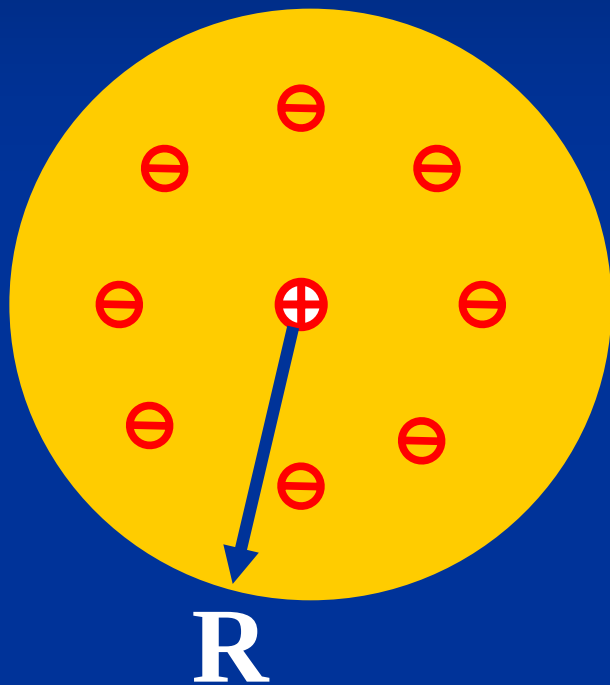
W materiałach o wiązaniach kowalencyjnych atomy są neutralne a środek ciężkości chmury elektronów pokrywa się ze środkiem ciężkości jądra. Moment dipolowy takich atomów przy braku pola elektrycznego jest zerowy.

Przy włączeniu pola elektrycznego powstaje polaryzacja elektronowa, która polega na przesunięciu się pod wpływem pola elektrycznego chmury elektronowej względem dodatniego jądra.

Dielektryki

Gęstość ładunku $\rho = \text{const}$

$$E=0, p=0$$



Dielektryki

Pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego środki ciężkości ładunków ujemnych i dodatnich rozchodzą się. Powstaje przy tym, zgodnie z prawem Coulomba, siła przyciągająca, tym większa, im większa jest odległość pomiędzy środkami ciężkości ładunków ujemnych i dodatnich. Ładunki przestaną rozsuwać się gdy siły te zrównoważą się, to znaczy, gdy natężenie pola zewnętrznego E zrówna się z natężeniem pola E_e , wytwarzanego przez ładunek ujemny w miejscu, gdzie znajdzie się ładunek dodatni.

Do obliczeń wartości natężenia tego pola zastosujemy prawo Gaussa:

$$\vec{E}_e = \vec{E}; \quad \varepsilon_0 \oint_S E \cdot ds = q.$$

Gdzie q – ładunek wewnątrz powierzchni całkowania

Dielektryki

Wartość ładunku q obliczymy z objętości atomu V oraz jego części o promieniu d , tzn. wewnątrz powierzchni całkowania:

$$q = \rho \cdot v = \rho \frac{4\pi d^3}{3}, \quad ze = \rho V = \rho \frac{4\pi R^3}{3}.$$

Stąd:

$$q = ze \frac{d^3}{R^3}$$

Dielektryki

Podstawiając q oraz E_e do prawa Gaussa uzyskamy:

$$\varepsilon_0 E_e \int_S ds = \varepsilon_0 E_e 4\pi d^2 = q = ze \frac{d^3}{R^3}.$$

Stąd:

$$E_e = \frac{zed}{4\pi\varepsilon_0 R^3} = E.$$

W liczniku tego wzoru znajduje się moment dipolowy atomu, powstały pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego o natężeniu E . Przekształcając uzyskujemy:

Dielektryki

$$p_e = zed = 4\pi\epsilon_0 R^3 E$$

Jak widać z tego wzoru, moment dipolowy p , a znaczy i polaryzacja, pojawia się po włączeniu zewnętrznego pola elektrycznego E i liniowo wzrasta wraz ze wzrostem natężenia tego pola.

Polaryzację spowodowaną przesunięciem chmury elektronów pod wpływem pola elektrycznego nazywamy polaryzacją elektronową.

Polaryzacja elektronowa jest polaryzacją indukowaną, ponieważ powstaje (indukuje się) pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego.

Dielektryki

Moment dipolowy jednostki objętości dielektryka, zawierającego N atomów w przypadku polaryzacji elektronowej wynosi :

$$P_e = N \cdot p_e$$

$$P_e = zedN = 4\pi\epsilon_0 R^3 NE$$

Często dla porównania zdolności do polaryzacji atomów różnych pierwiastków używają polaryzowalność elektronową:

$$\alpha_e = \frac{p_e}{E} = 4\pi\epsilon_0 R^3$$

W tym przypadku moment dipolowy jednostki objętości dielektryka, zawierającego N atomów :

$$P_e = N \cdot \alpha_e \cdot E$$

Dielektryki

Moment dipolowy jednostki objętości dielektryka:

$$P_e = \varepsilon_0 \cdot \chi_e \cdot E.$$

Porównując ten wzór z poprzednim uzyskamy:

$$\chi_e = \frac{\alpha_e \cdot N}{\varepsilon_0}$$

Stąd:

$$\varepsilon_e = 1 + \chi_e = 1 + \frac{\alpha_e \cdot N}{\varepsilon_0}$$

2. Polaryzacja jonowa

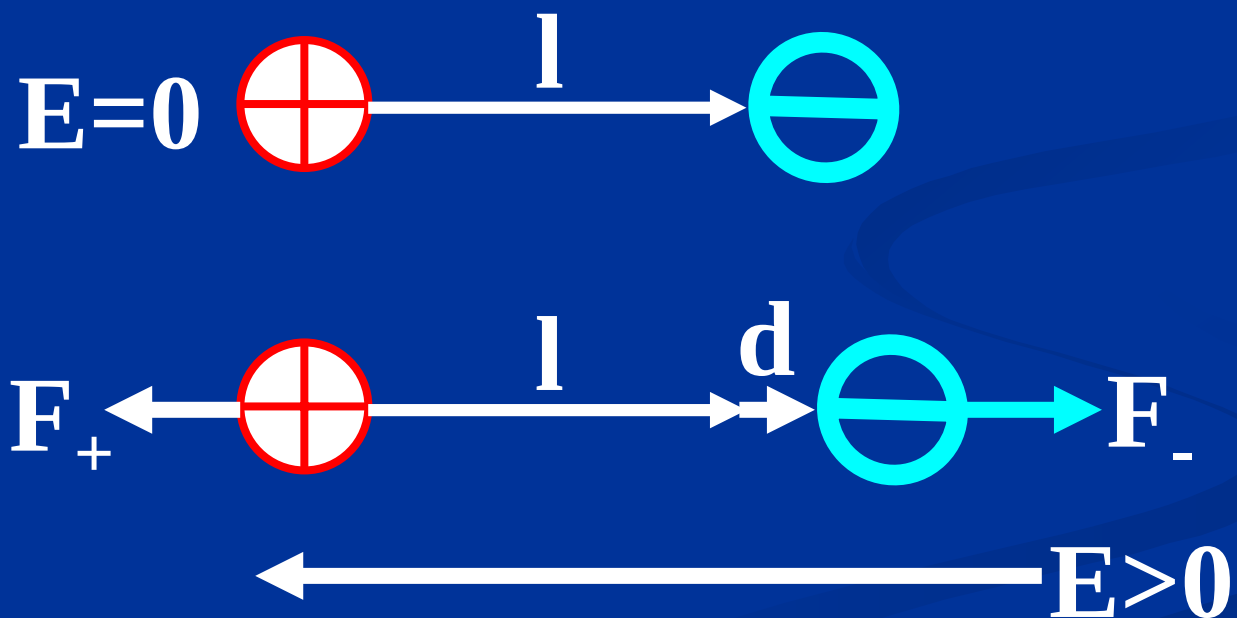
Polaryzacja jonowa występuje w materiałach izolacyjnych o wiązaniach jonowych i zachodzi, tak samo jak i polaryzacja elektronowa, jedynie przy włączeniu zewnętrznego pola elektrycznego. Stąd również i polaryzacja jonowa należy do polaryzacji indukowanej.

Przy braku pola elektrycznego w kryształach o wiązaniach jonowych w siatce krystalicznej na przemian umieszczone są w równych odległościach jony ujemne i dodatnie (na przykład: sól i chlor):



Dielektryki

Po włączeniu pola elektrycznego, podobnie jak i dla polaryzacji elektronowej ładunki dodatnie i ujemne przesuwają się w kierunkach przeciwnych, a odległość pomiędzy nimi zwiększa się o wartość d .



Dielektryki

Ponieważ przesunięcia te są bardzo małe, do ich obliczeń można zastosować znane z mechaniki prawo Hooke'a – siła rozciągająca (ściskająca) proporcjonalna do wydłużenia:

$$F = eE = f_1 \cdot d; \quad p_i = e \cdot d = \frac{e^2}{f_1} E.$$

Polaryzowalność jonowa:

$$\alpha_i = \frac{e^2}{f_1}, \quad P_i = p_i \cdot N = N \cdot \alpha_i \cdot E.$$

Dielektryki

Ponieważ każdy jon, za wyjątkiem jonów wodoru, posiada chmurę elektronów, w niej również będzie zachodziła polaryzacja elektronowa. Wypadkowy moment dipolowy jednostki objętości materiału o wiązaniach jonowych składa się z wektora polaryzacji elektronowej i wektora polaryzacji jonowej:

$$P = P_e + P_i = N \cdot (\alpha_e + \alpha_i) \cdot E.$$

Stąd przy jednoczesnym występowaniu polaryzacji jonowej i elektronowej :

$$\chi_{j+e} = \frac{N \cdot (\alpha_e + \alpha_i)}{\epsilon_0}, \quad \epsilon_{j+e} = 1 + \frac{N \cdot (\alpha_e + \alpha_i)}{\epsilon_0}.$$

Dielektryki

Jak widać z powyższych wzorów polaryzacja jonowa jest również polaryzacją indukowaną, ponieważ moment dipolowy powstaje po włączeniu zewnętrznego pola elektrycznego i zanika po jego wyłączeniu.

Z powyższego wzoru również widać, że przenikalność dielektryczna względna materiału izolacyjnego, w którym występują zarówno polaryzacja elektronowa jak i polaryzacja jonowa jest większa od przenikalności dielektrycznej materiału, w którym występuje jedynie polaryzacja elektronowa.

Przenikalność dielektryczna materiałów o polaryzacji wyłącznie elektronowej mieści się w granicach:

$$2 < \epsilon_e < 3$$

Dielektryki

W przypadku polaryzacji jonowej przenikalność dielektryczna względna, z reguły, nie przekracza wartości 10.

Przenikalność dielektryczna materiałów o polaryzacji wyłącznie elektronowej nie zależy od częstotliwości pola elektrycznego aż do zakresu nadfioletu.

Przenikalność dielektryczna materiałów o polaryzacji jonowej nie zależy od częstotliwości pola elektrycznego do zakresu podczerwieni.

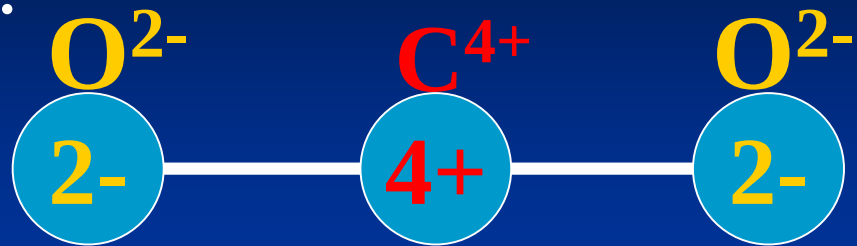
Przy dalszym wzroście częstotliwości jony przestają nadążać za zmianami pola elektrycznego i przenikalność dielektryczna względna maleje do wartości, charakterystycznej dla polaryzacji elektronowej.

3. Polaryzacja orientacji

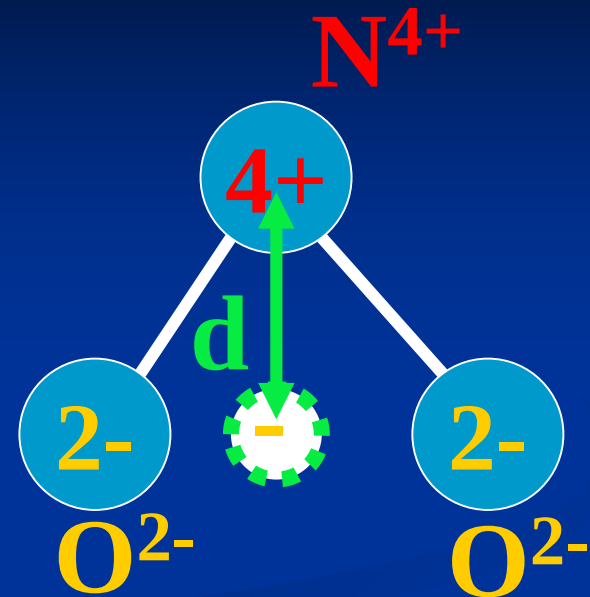
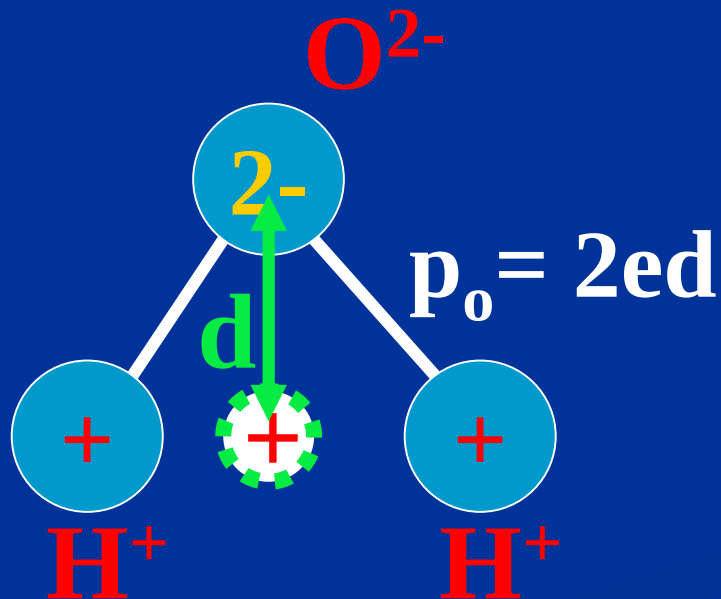
Są niektóre cząsteczki (molekuły) o wiązaniach jonowych, które posiadają stały moment dipolowy, wartość którego nie zależy od natężenia zewnętrznego pola elektrycznego. Wśród takich cząsteczek należy w pierwszej kolejności wymienić cząsteczki wody, ze względu na jej wszechobecność i skłonność do przenikania do materiałów izolacyjnych. O posiadaniu przez cząsteczkę stałego momentu dipolowego decydują zarówno skład chemiczny cząsteczki jak i układ jonów w niej.

Na przykład, cząsteczka NO_2 posiada stały moment dipolowy, a cząsteczka CO_2 – nie.

Dielektryki



$$p_o = 0$$

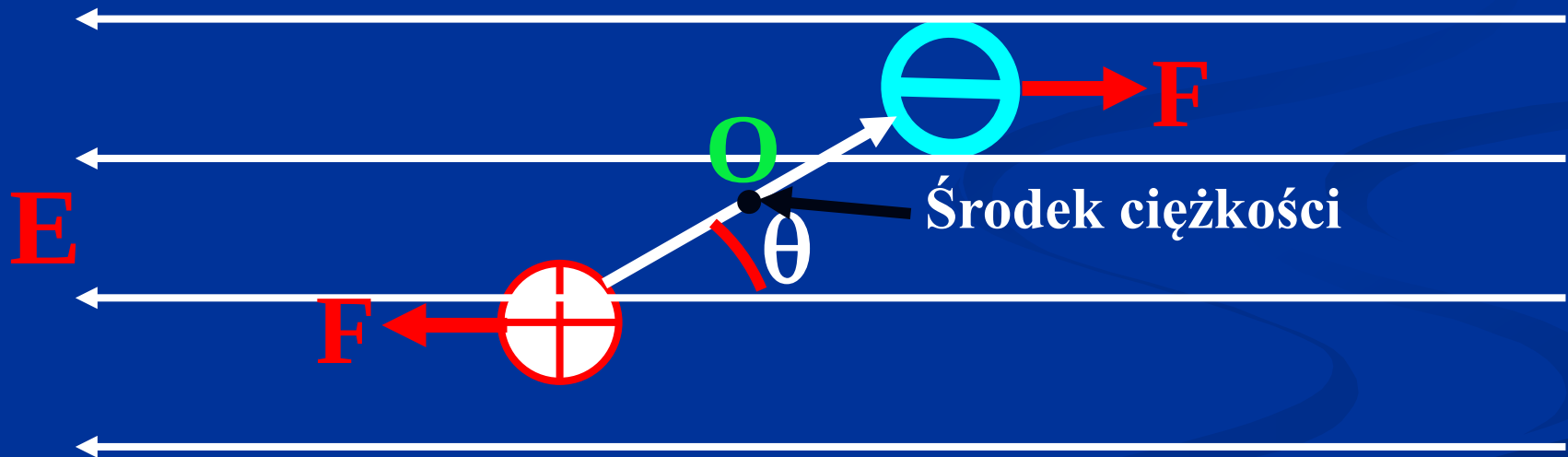


$$p_o = 4ed$$

Dielektryki

Dipol, znajdujący się w polu elektrycznym o natężeniu E posiada energię potencjalną:

$$U = -p_0 \cdot E \cdot \cos \vartheta.$$



Dielektryki

$$N(\vartheta)d\vartheta = C \sin \vartheta \exp\left(-\frac{p_0 \cdot E \cdot \cos \vartheta}{kT}\right)d\vartheta.$$

$$P_0 = \int_0^{\pi} CN(\vartheta)p_0 d\vartheta.$$

$$P_0 = Np_0\left(\operatorname{ctgh}\alpha - \frac{1}{\alpha}\right);$$

$$\alpha = p_0 E / kT;$$

Dielektryki

W przypadku słabych pól

$$p_0 E \ll kT, \quad \operatorname{ctgh} \alpha - \frac{1}{\alpha} \cong \frac{\alpha}{3} = \frac{p_0 E}{3kT}.$$

$$P_0 = \frac{N p_0^2 E}{3kT};$$

$$\alpha_0 = \frac{p_0^2}{3kT}.$$

Dielektryki

Ponieważ w materiałach izolacyjnych składających się z drobin, posiadających stałe momenty dipolowe, część jonów (za wyjątkiem atomów wodoru) posiada elektrony, w takich materiałach mogą jednocześnie występować polaryzacja orientacji, polaryzacja jonowa oraz polaryzacja elektronowa.

Moment dipolowy jednostki objętości:

$$P = P_e + P_i + P_0 = N \left(\alpha_e + \alpha_i + \frac{p_0^2}{3kT} \right).$$

Przenikalność dielektryczna względna:

$$\epsilon = 1 + N \left(\frac{\alpha_e}{\epsilon_0} + \frac{\alpha_i}{\epsilon_0} + \frac{p_0^2}{3\epsilon_0 kT} \right).$$

Dielektryki

Przy jednoczesnym występowaniu polaryzacji orientacji, elektronowej i jonowej często mówią o polaryzacji mieszanej.

Polaryzację orientacji charakteryzują duże wartości przenikalności dielektrycznej – powyżej 10 oraz jej zależność od temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury wartość przenikalności dielektrycznej polaryzacji orientacji obniża się.

Obszar częstotliwości w którym występuje polaryzacja orientacji zależy od temperatury i nie przekracza, z reguły 100kHz.

Dielektryki

Wyrównując ostatni wzór:

$$\varepsilon = 1 + N \left(\frac{\alpha_e}{\varepsilon_0} + \frac{\alpha_i}{\varepsilon_0} + \frac{p_0^2}{3\varepsilon_0 kT} \right).$$

za pomocą przekształcenia:

$$X = \left(\frac{1000}{T} \right).$$

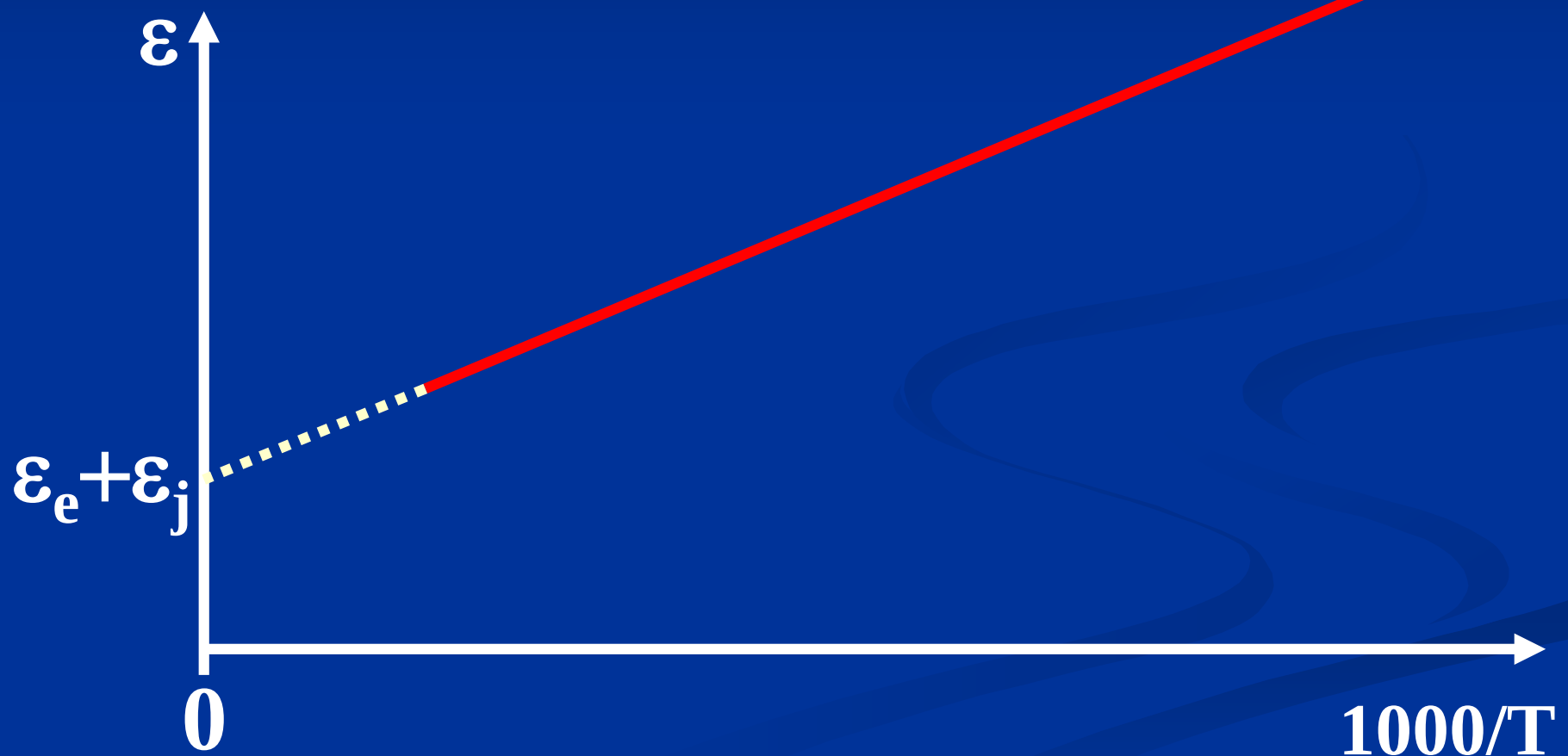
uzyskamy:

$$\varepsilon = 1 + \chi_e + \chi_j + \frac{Np_0^2}{3000\varepsilon_0 k} \left(\frac{1000}{T} \right) = 1 + \chi_e + \chi_j + \frac{Np_0^2}{3000\varepsilon_0 k} X.$$

Wykres we współrzędnych $1/T$ nazywają wykresem Arrheniusa

Dielektryki

Wykres Arrheniusa dla zależności przenikalności dielektrycznej od temperatury odwrotnej $1000/T$ w przypadku polaryzacji orientacji:



Dielektryki

Do wytwarzania układów izolacyjnych często stosowane są tzw. materiały kompozytowe, wytwarzane jako mieszanina kilku różnorodnych materiałów, na przykład – mika i szkło; żywica epoksydowa, włókno szklane oraz piasek kwarcowy.

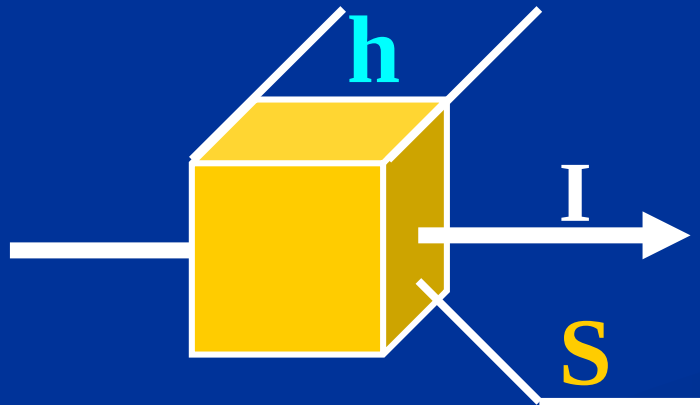
Każdy ze składników materiału kompozytowego posiada charakterystyczną dla siebie wartość względnej przenikalności dielektrycznej. Gdy zawartość objętościowa składowej wynosi Θ_i a jej względna przenikalność dielektryczna wynosi ε_i to wypadkową przenikalność można obliczyć ze wzoru:

$$\varepsilon = \sum_i \Theta_i \cdot \varepsilon_i, \quad \sum_i \Theta_i = 1.$$

Przewodzenie dielektryków

W odróżnieniu od metali w dielektrykach prąd przepływa zarówno w objętości materiału – prąd objętościowy, jak i po jego powierzchni – prąd powierzchniowy. Zgodnie z tym wyróżniamy dwa rodzaje rezystancji oraz rezystywności - skrośną i powierzchniową.

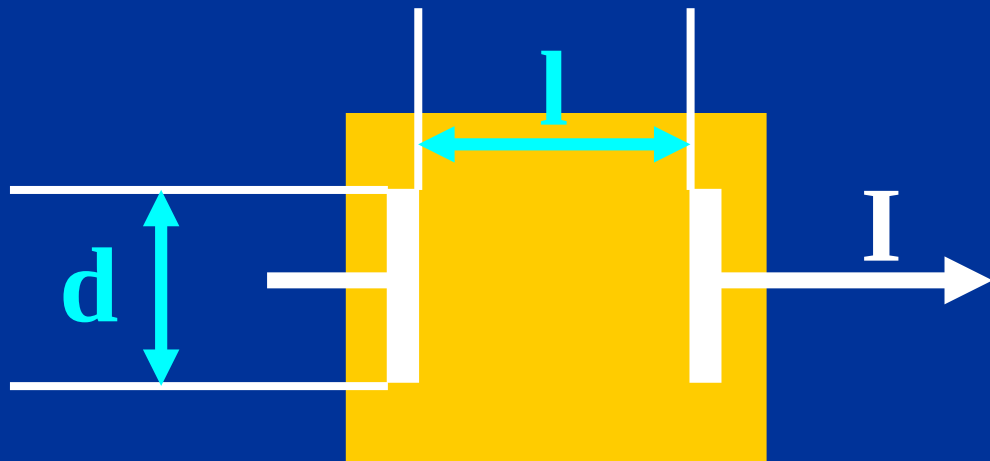
Rezystywność skrośna związana jest z właściwościami objętościowymi danego materiału i zależy od jego rodzaju, stopnia czystości (zanieczyszczeń) oraz od temperatury.



$$\rho = R \frac{S}{h}.$$

Dielektryki

Rezystywność powierzchniowa związana jest z właściwościami danego materiału oraz w dużej mierze ze stanem jego powierzchni – chropowatością, hydrofobowością (zdolnością do wchłaniania wilgoci) oraz ze stanem zabrudzenia powierzchni, zwłaszcza obecnością na niej rozpuszczalnych w wodzie związków chemicznych (sole, nawozy chemiczne i inne) oraz zabrudzeń przewodzących prąd – sadza i inne.



$$\rho_s = R_s \frac{d}{l}.$$

Dielektryki

Pomiary rezystywności skrośnej i powierzchniowej



Przy podłączeniu do punktu B miernika rezystancji a do punktu A uziemienia – pomiar rezystancji skrośnej.

Przy podłączeniu do punktu A miernika rezystancji a do punktu B uziemienia – pomiar rezystancji powierzchniowej.

Dielektryki

Rzeczywisty materiał izolacyjny posiada jednocześnie zdolność do polaryzacji określaną wartością przenikalności dielektrycznej względnej ϵ oraz zdolność (co prawda, słabą) do przewodzenia prądu elektrycznego określaną wartościami rezystywności skrośnej ρ i powierzchniowej ρ_s .

Kondensator płaski, który posiada pojemność:

$$C = \epsilon \epsilon_0 S / d$$

w związku z tym posiada jednocześnie i rezystancję:

$$R = \rho d / S$$

Zarówno polaryzacja jak i przewodzenie prądu odbywają się w materiale izolacyjnym pod wpływem różnicy potencjałów V przyłożonej do okładek.

Dielektryki

Znana jest stała czasowa obwodu RC:

$$\tau = RC = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S}{d} \times \rho \frac{d}{S} = \varepsilon_0 \varepsilon \rho.$$

Ponieważ kondensator jednocześnie posiada pojemność C i rezystancję R, to po jego naładowaniu i odłączeniu od źródła zasilania o napięciu V_Z dopiero po czasie τ napięcie na okładzinach obniży się do poziomu ok. $0,37V_Z$. Należy o tym pamiętać zwłaszcza w urządzeniach wysokonapięciowych, takich jak kable, które posiadają dużą pojemność i doskonałą izolację. Powoduje to, że w kablu przez dłuższy czas może pozostawać duże napięcie. Żeby zapobiec porażeniu prądem kabel po odłączeniu od zasilania należy rozładować poprzez uziemienie jego żył.

Przewodzenie ciał stałych

Konduktywność każdego materiału możemy opisać wzorem:

$$\sigma = qn(T)\mu(T)$$

Dla małych natężeń pola elektrycznego E (tzw. słabych pól):

$$n(E) = \text{const}, \quad \mu(E) = \text{const}$$

a gęstość prądu wynosi:

$$j = \sigma E.$$

Dielektryki

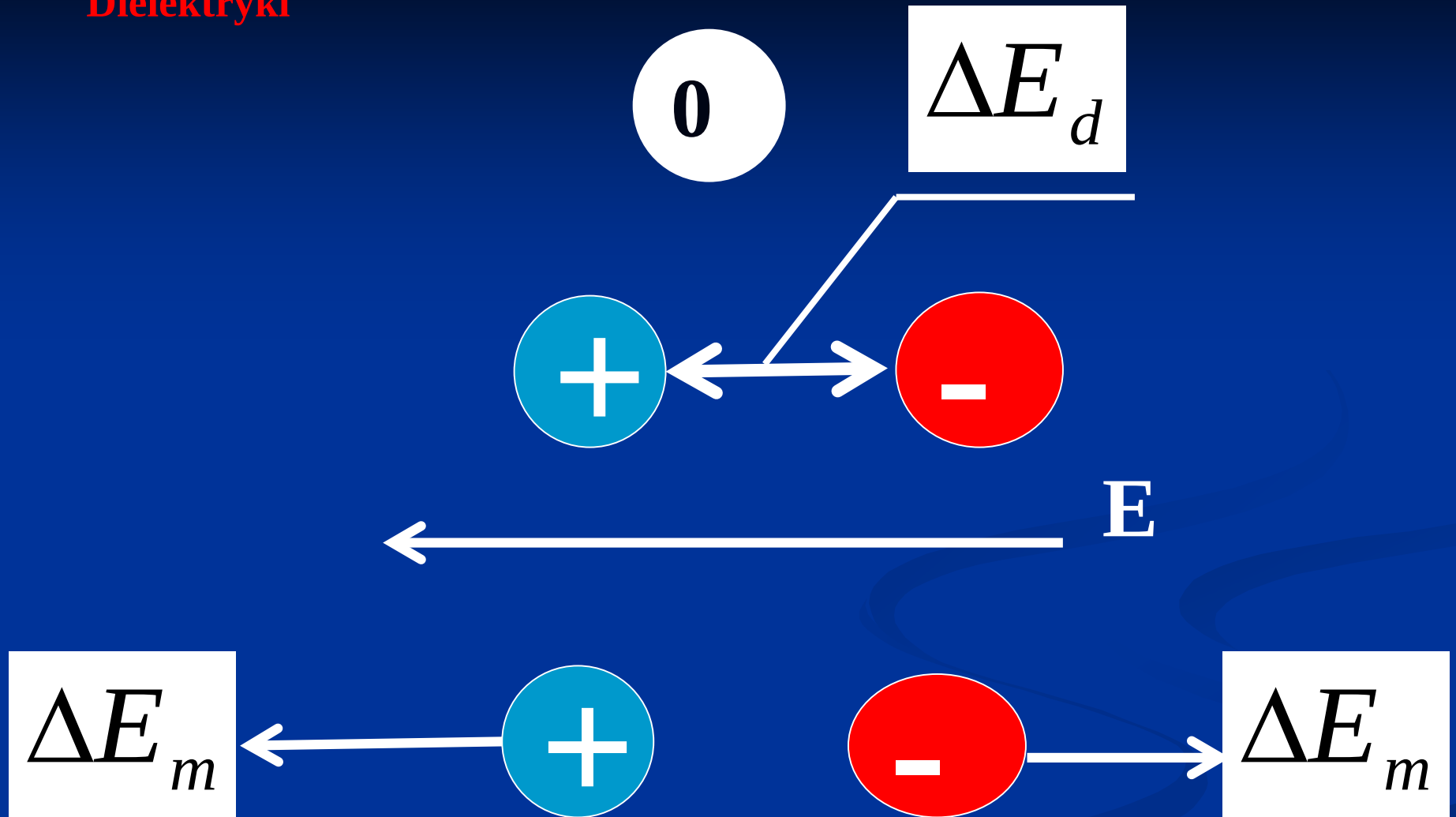
Nośniki prądu w dielektrykach, materiałach, które teoretycznie nie powinny przewodzić prądu, pojawiają się wskutek termicznej jonizacji zanieczyszczeń (powstawania pary jonów – dodatniego i ujemnego) Dla jonizacji potrzebna jest energia termiczna ΔE_d nazywana energią jonizacji:

$$n(T) = n_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_d}{kT}\right)$$

Żeby jony zaczęły poruszać się pod wpływem pola elektrycznego, niezbędna jest dodatkowa energia termiczna ΔE_m nazywana energią migracji:

$$\mu(T) = \mu_0 \exp\left(-\frac{\Delta E_m}{kT}\right)$$

Dielektryki



Dielektryki

W materiale izolacyjnym może jednocześnie znajdować się kilka rodzajów jonów, każdy z których będzie posiadał inną energię jonizacji ΔE_{di} . Należy zaznaczyć, że energia aktywacji migracji jest wiele mniejsza od energii jonizacji. Stąd:

$$\sigma_i = \sum_j q_j n_j \mu_j \exp\left(-\frac{\Delta E_j}{kT}\right).$$

W przewodzeniu biorą również udział elektrony, których, co prawda, jest o wiele mniej, niż jonów, lecz które posiadają, ze względu na małe wymiary i masę, ruchliwość znacznie większą, niż jony:

$$\sigma_e = q n_0^e \mu_0^e \exp\left(-\frac{\Delta E_g}{kT}\right).$$

Straty energii w dielektrykach

Rozważane wcześniej zagadnienia dotyczące polaryzacji i przewodzenia w materiałach izolacyjnych przeprowadziliśmy dla przypadku stałego pola elektrycznego lub prądu stałego.

Większość urządzeń, w których stosowane są materiały izolacyjne pracuje na prądzie zmiennym o tzw. pierwszej częstotliwości przemysłowej 50Hz. Zgodnie z III równaniem Maxwella (tzw. uogólnione prawo Ampera), w dielektryku, umieszczonym w zmiennym polu elektrycznym, oprócz zwykłego prądu przewodzenia pojawia się **prąd przesunięcia**, związany z polaryzacją dielektryka i ze zmianami orientacji dipoli przy zmianie biegunowości pola elektrycznego w każdym okresie.

Dielektryki

Prąd przesunięcia i_c , według Maxwella, możemy obliczyć ze wzoru:

$$i_c = \frac{d\Phi_E}{dt}.$$

Gdzie Φ_E - strumień pola elektrycznego przenikającego przez dielektryk, umieszczony pomiędzy okładzinami kondensatora. Zakładając, że pole elektryczne i natężenie prądu przewodzenia zmieniają się w czasie jako $\sin(\omega t)$, natężenie prądu przesunięcia jest opóźnione fazowo o -90° w stosunku do prądu przewodzenia.

Dielektryki

W elektrotechnice prąd przesunięcia często nazywają prądem pojemnościowym.

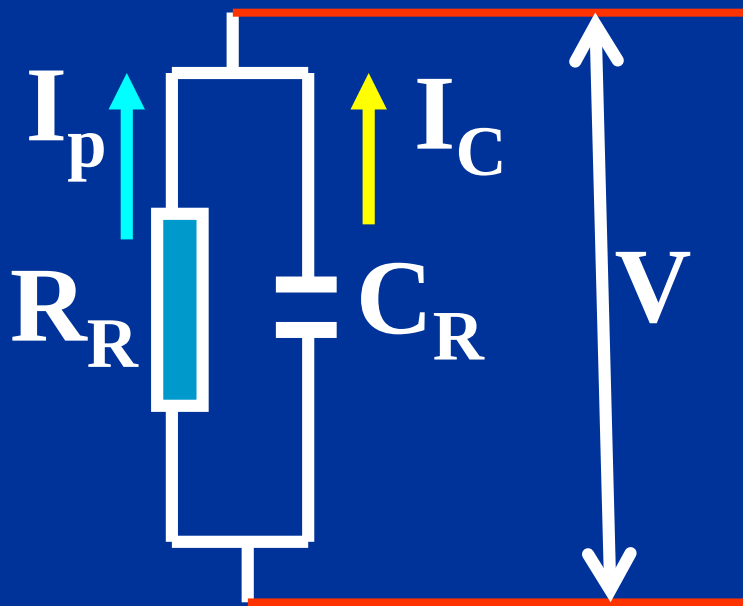
Jak wynika z powyższych rozważań, w dielektryku umieszczonym pomiędzy okładzinami kondensatora, zasilanego napięciem przemiennym sinusoidalnym, płynie zgodny fazowo z napięciem prąd przewodzenia oraz opóźniony fazowo o $(\phi = -90^\circ)$ prąd przesunięcia (pojemnościowy). Oznacza to że wypadkowy prąd płynący przez kondensator jest przesunięty fazowo w stosunku do napięcia o kąt:

$$0^\circ < \phi < -90^\circ.$$

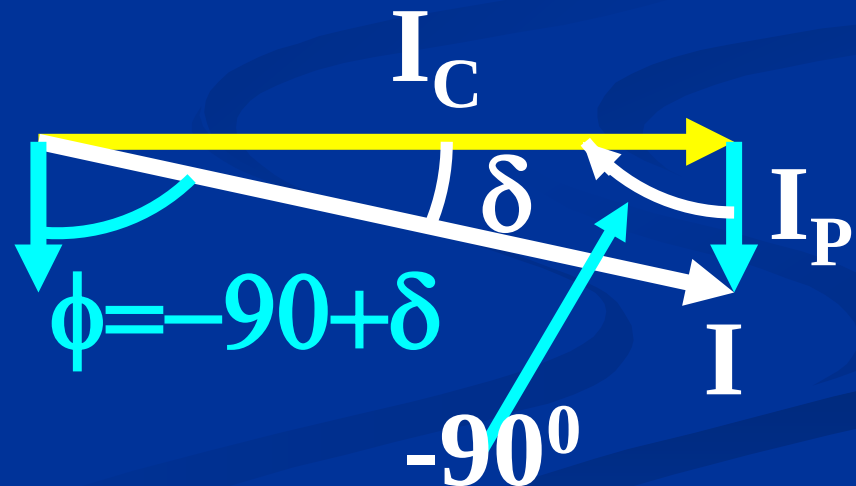
Ponieważ zarówno polaryzacja, z którą związany jest prąd przesunięcia (pojemnościowy) jak i prąd przewodzenia powstają pod wpływem napięcia przemiennego, przyłożonego do okładzin, w celu obliczenia wartości tych prądów stosują tzw. schemat zastępczy równoległy.

Dielektryki

W schemacie zastępczym równoległym kondensator z dielektrykiem rzeczywistym, zdolnym zarówno do polaryzacji jak i przewodzenia prądu, zastępują kondensatorem z dielektrykiem idealnym, zdolnym wyłącznie do polaryzacji oraz podłączonym równolegle do kondensatora rezystorem zdolnym jedynie do przewodzenia prądu. Wykres wskazowy dla danego



schematu umieszczono obok.



Dielektryki

Straty mocy w dielektryku określa tangens kąta strat δ :

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{i_p}{i_C} = \frac{V}{R_R} \bigg/ \frac{V}{1/\omega C_R} = \frac{1}{\omega C_R R_R}.$$

Całkowite straty mocy:

$$P_P = i_p V = V^2 \omega C_R \operatorname{tg} \delta.$$

Gdzie $\omega=2\pi f$ – częstotliwość kołowa lub pulsacja.

Mechanizmy strat w materiałach izolacyjnych

Dla materiałów o polaryzacji indukowanej występują straty wyłącznie rezystancyjne. W schemacie zastępczym równoległym:

$$P_P = \frac{V^2}{R_R};$$

Podstawiając do wzoru na $\text{tg}\delta$ wartość liczbowa ϵ_0 uzyskujemy:

$$\text{tg}\delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{\epsilon \rho f}.$$

Dielektryki

Dla materiałów o polaryzacji orientacji, kompozytów, zawierających składową o polaryzacji orientacji lub dla materiałów zawilgoconych pojawiają się dodatkowe straty, nazywane stratami na relaksację. Straty na relaksację związane są z tym, że w każdym okresie dipol stały zmienia swoją orientację o 180° wraz ze zmianą biegunowości przyłożonego napięcia. Ponieważ energia potencjalna dipolu, ustawionego prostopadle do pola jest równa zero, a ustawionego wzdłuż pola:

$$U = -p_0 \cdot E.$$

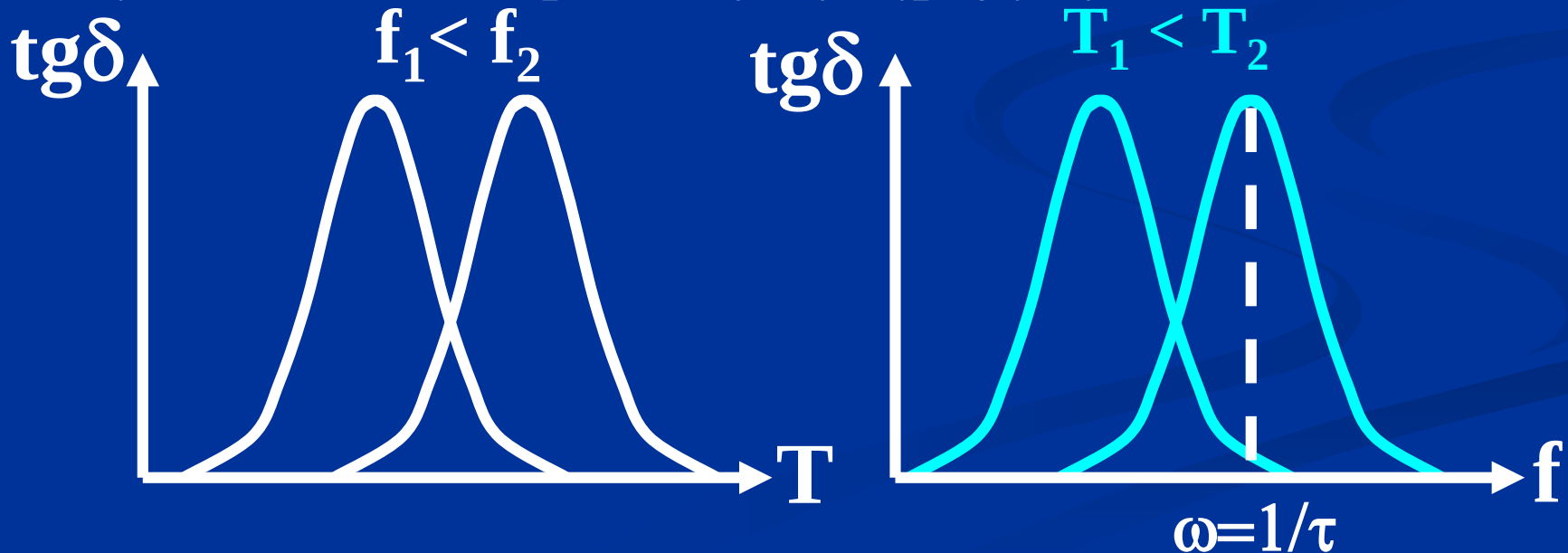
to w każdym okresie prądu zmiennego dipol pobiera od pola porcję energii, określoną powyższym wzorem.

Dielektryki

W ciągu jednej sekundy w jednostce objętości materiału izolacyjnego, zawierającej N dipoli pochłania się energia:

$$U_1 = N \cdot f \cdot p_0 \cdot E.$$

W materiałach o polaryzacji orientacji na zależnościach $\text{tg}\delta$ od częstotliwości i temperatury występują wyraźne maksima:



Dielektryki

Maksyma są związane z tym że drobina posiada określony moment bezwładności, a co za tym idzie, określoną częstotliwość rezonansową, w pobliżu której straty są maksymalne. Przy częstotliwościach wyższych drobina nie zdąża w ciągu półokresu ustawić się wzdłuż linii sił, $\theta < 90^\circ$ i pobierana przez nią energia jest mniejsza od energii potencjalnej dipolu i dalej zmniejsza się wraz ze wzrostem częstotliwości.

$$U_1 = \frac{\omega \cdot N \cdot p_0 \cdot \cos(\vartheta) \cdot E}{2 \cdot \pi}.$$

Dla częstotliwości mniejszych od $\omega = 1/\tau$ im niższa częstotliwość, tym mniej razy na sekundę zachodzi zmiana ustawienia dipoli, a tym samym zmniejsza się pobór energii od pola elektrycznego. Podobną sytuację obserwujemy i przy zmianach temperatury.

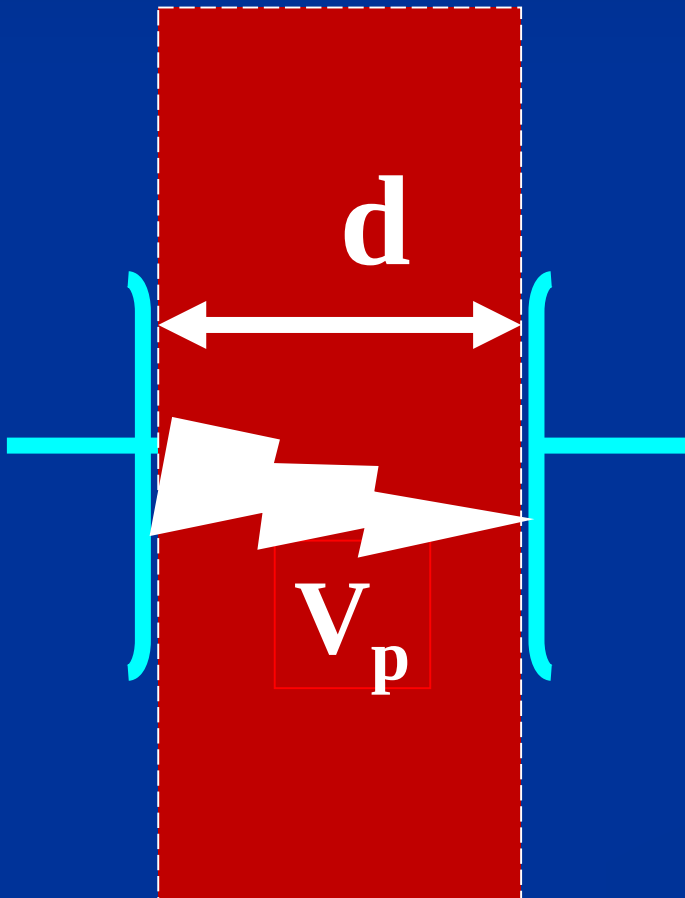
Dielektryki

Wytrzymałość dielektryczna materiałów izolacyjnych

Do badań wytrzymałości dielektrycznej stosują elektrody płaskie zaokrąglone na krawędziach. Stopniowo podnosząc napięcie (według Polskiej normy – nie szybciej niż 2kV/s) doprowadzamy do przebicia które zachodzi przy wartości napięcia V_p .

Za miarę wytrzymałości dielektrycznej materiału wybieramy natężenie pola elektrycznego przy którym dochodzi do przebicia:

$$E_{PRZ} = V_p / d$$



Dielektryki

Wykorzystanie wartości wytrzymałości dielektrycznej pozwala na porównanie odporności na przebicia materiałów o różnym składzie jak i o różnych grubościach.

Rodzaje przebić

Przebiecia elektryczne – przebicia, podczas których pod wpływem silnego pola elektrycznego gwałtownie wzrasta koncentracja nośników prądu, natężenie prądu oraz maleje rezystancja. Po obniżeniu natężenia pola elektrycznego koncentracja nośników i natężenie prądu obniżają się a rezystancja wzrasta do stanu przed przebicciem.

Przebiecie elektrochemiczne – podczas którego w materiale izolacyjnym pod wpływem przepływu prądu zachodzą nieodwracalne reakcje elektrochemiczne w wyniku których gwałtownie i na stałe obniża się rezystywność materiału.

Dielektryki

Przebiecie cieplne zachodzi przy wzroście wartości ciepła wydzielanego w urządzeniu powyżej zdolności jego odprowadzenia do otoczenia. Występuje przy tym gwałtowny wzrost temperatury, który powoduje nieodwracalne obniżenie rezystywności materiałów izolacyjnych zachodzące podczas przekroczenia granicy maksymalnej krótkotrwałej temperatury dopuszczalnej dla danego materiału.



Przebiecie w gazach

Gazem najczęściej stosowanym jako materiał izolacyjny jest powietrze. Ze względu na skład chemiczny ($O_2 + N_2$) powietrze nie powinno zawierać jonów i elektronów, a znaczy nie powinno przewodzić prąd.

Jednak pod wpływem czynników zewnętrznych, takich jak promieniowanie kosmiczne, w powietrzu powstają w niewielkich ilościach jony i elektrony. Zachodzi to na drodze jonizacji. Żeby elektron został oderwany od neutralnego atomu powinien on uzyskać energię przekraczającą energię jonizacji danej cząsteczki W_j . Dla większości gazów energia jonizacji wynosi ok. 15eV. Promieniowanie kosmiczne wytwarza w 1cm^3 od 6 do 8 par jon dodatni – elektron na sekundę.

Dielektryki

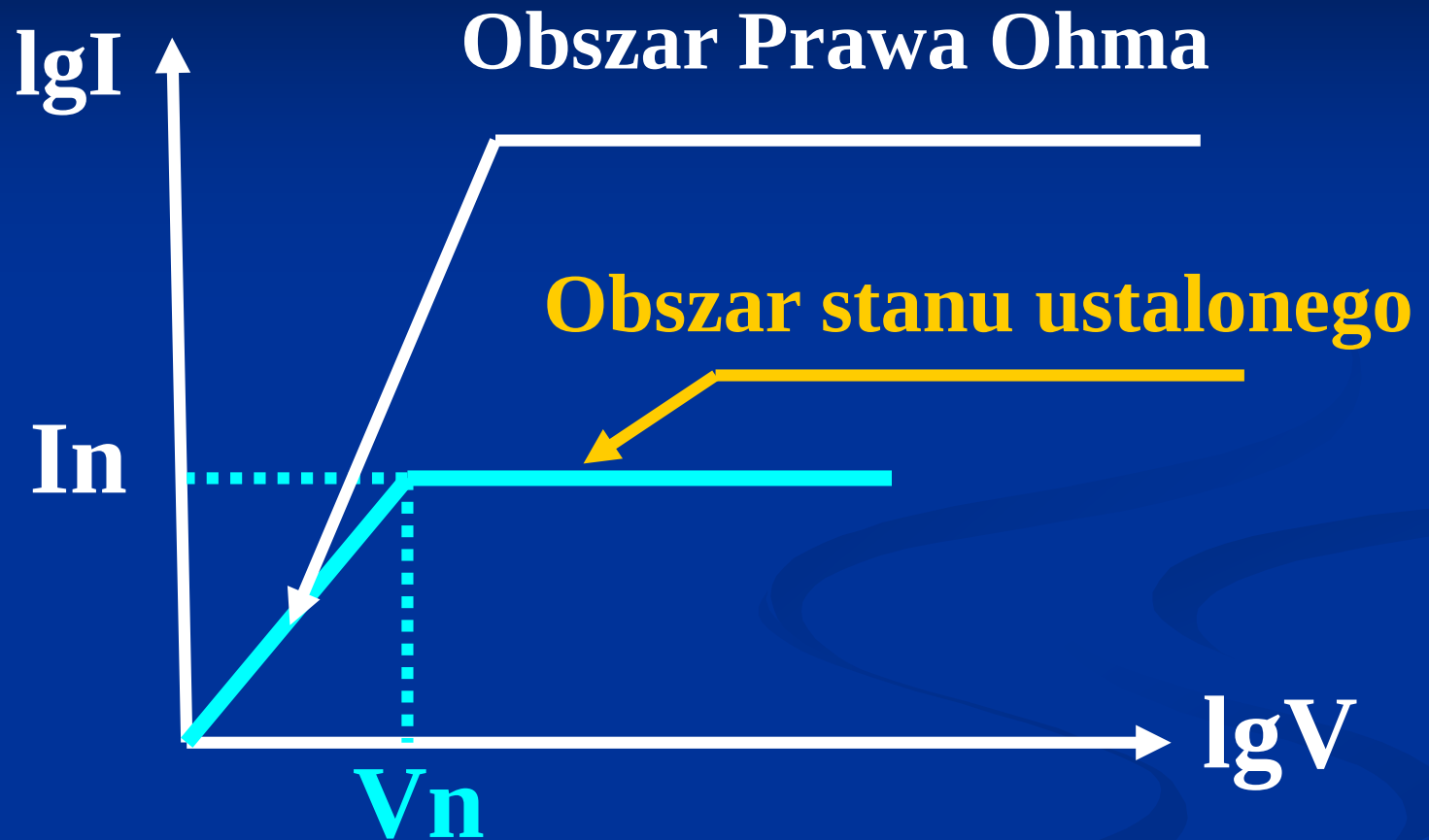
Dla elektrod płaskich o średnicy 40 cm umieszczonych na odległości 5 cm w przestrzeni między nimi powstanie ok. 45000 par jon – elektron, co odpowiada ładunkowi $Q=1,4 \cdot 10^{-14} \text{ C}$ /s.

Przy małych napięciach jedynie część z tych ładunków będzie dochodziła do elektrod, a reszta ulegnie rekombinacji. Wraz ze wzrostem napięcia co raz więcej ładunku dochodzi do elektrod i natężenie prądu wzrasta. Odcinek ten nazywamy obszarem prawa Ohma.

Przy osiągnięciu pewnej wartości napięcia wszystkie ładunki będą dochodziły do elektrod a natężenie prądu przestanie wzrastać i osiągnie stan ustalony. Dla naszego przykładu wartość natężenia prądu wynosi:

$$I_n = Q/t = 1,4 \cdot 10^{-14} \text{ A} = 1,4 \cdot 10^{-2} \text{ pA}.$$

Dielektryki



Dielektryki

Przy dalszym zwiększeniu napięcia w pewnym momencie natężenie prądu zaczyna gwałtownie wzrastać, co oznacza, że w gazie gwałtownie wzrasta koncentracja nośników prądu.

Wzrost koncentracji nośników odbywa się wskutek tzw. jonizacji zderzeniowej, która odbywa się w sposób następujący. Elektron wybity przez promieniowanie kosmiczne z cząsteczki obojętnej jest przyśpieszany w polu elektrycznym. Po przebyciu drogi swobodnej λ uzyskuje on od pola elektrycznego energię:

$$W = F * \lambda = e * E * \lambda$$

Po przebyciu drogi swobodnej λ dochodzi do zderzenia elektronu z cząsteczką obojętną. Gdy energia elektronu wynosi

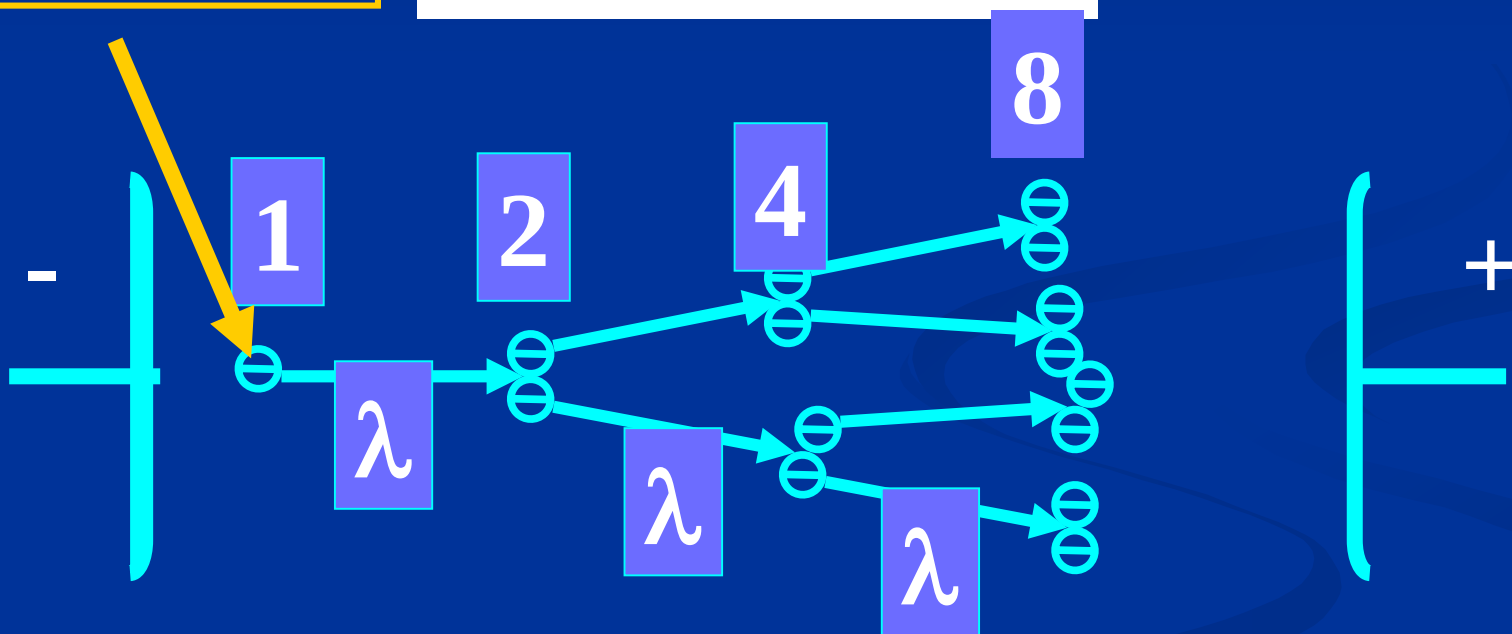
$$W < W_j$$

dochodzi jedynie do wzbudzenia cząsteczki. Gdy występuje sytuacja odwrotna, dochodzi do jonizacji cząsteczki a w gazie zamiast jednego pojawiają się dwa elektrony swobodne.

Lawina elektronowa

Promieniowanie
kosmiczne

$$W = eE\lambda \rangle W_j$$



Dielektryki

Granice natężeń pola elektrycznego, która odpowiada przejściu do jonizacji zderzeniowej, a znaczy i do przebicia, możemy obliczyć z warunku $W = W_j$:

$$E_{prz} = \frac{W_j}{e\lambda}.$$

Z kinetycznej teorii gazów wiadomo, że dla cząsteczek o polu przekroju każdej równym S , oraz ich zawartości w jednostce objętości N średnia droga swobodna:

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}SN}.$$

Podstawimy tą wartość do wzoru na natężenie pola przebicia:

$$E_{prz} = \frac{W_j \sqrt{2}SN}{e}.$$

Dielektryki

W powyższym wzorze wszystkie parametry, za wyjątkiem N są wartościami stałymi. Wartość N uzyskamy z równania stanu jednego mola gazu doskonałego:

$$\{pV = RT\} \times \frac{1}{N_0}; \quad p \frac{V}{N_0} = \frac{RT}{N_0}; \quad \frac{R}{N_0} = k; \quad \frac{N_0}{V} = N = \frac{p}{kT}.$$

Podstawiając ten wynik do wzoru na natężenie pola przebicia uzyskamy:

$$E_{prz} = \frac{W_j \sqrt{2Sp}}{ekT}.$$

Dielektryki

W technice stosujemy do pomiarów wytrzymałości powietrza i innych gazów elektrody kuliste, które dla stosunku odległości pomiędzy kulami a do średnicy kul d :

$$a/d < 0,5$$

zapewniają, podobnie jak i elektrody płaskie, jednorodne pole elektryczne o natężeniu $E=V/a$. Mierzimy napięcie przebicia V_p

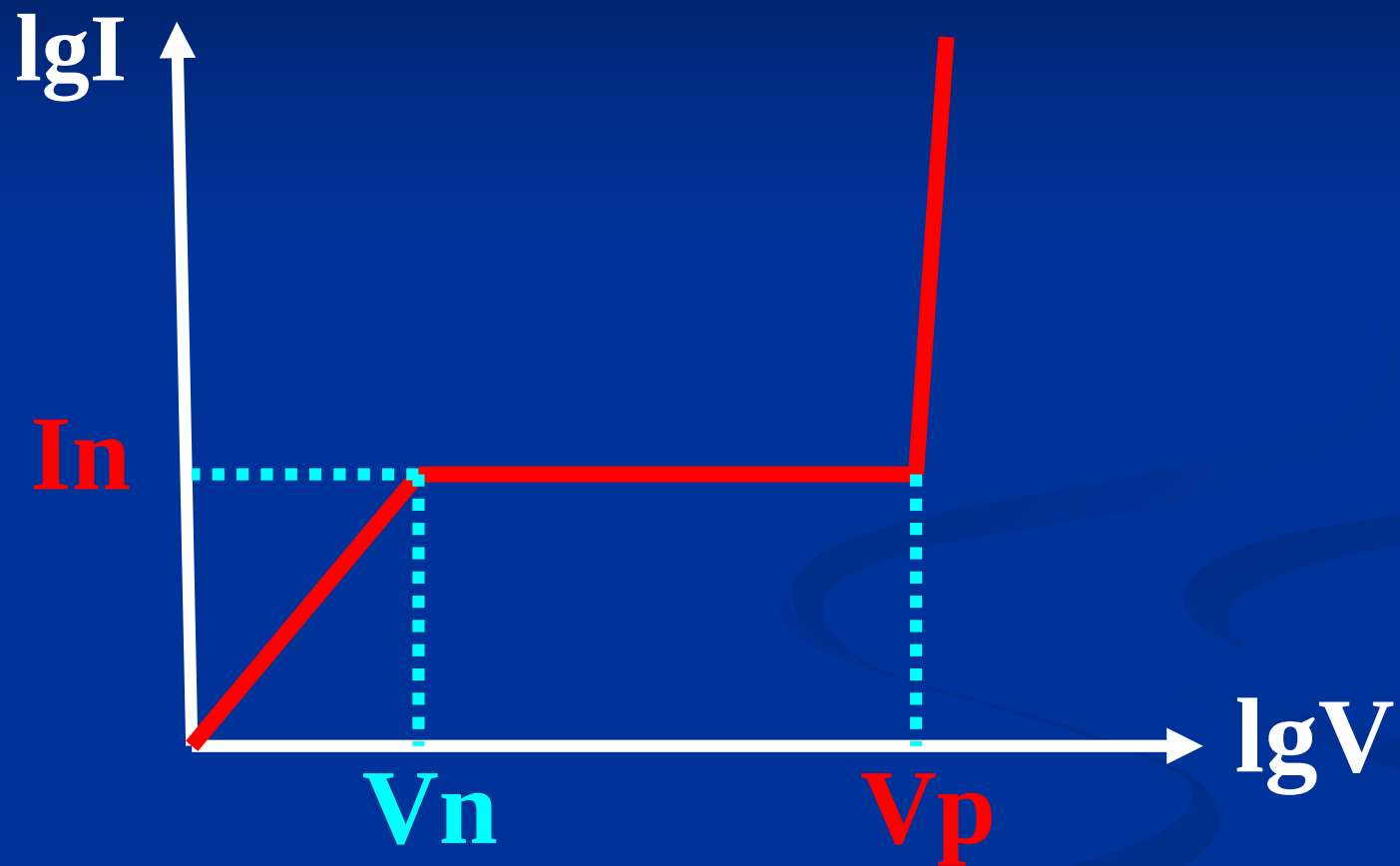
$$V_P = E_{prz} \cdot a$$

Dielektryki

W taki sposób określając napięcie przebicia V_p dla elektrod kulistych określamy wytrzymałość dielektryczną gazu:

$$E_{prz} = \frac{V_P}{a} = \frac{W_j \sqrt{2Sp}}{ekT}.$$

Dielektryki



Dielektryki

Według Polskiej Normy wszystkie uzyskane wyniki dotyczące pomiarów przebiecia w powietrzu należy przeliczyć na warunki normalne, tzn. ciśnienie 1013hPa oraz temperaturę 20°C. W tym celu z powyższego wzoru można łatwo uzyskać współczynnik δ potrzebny do przeliczeń:

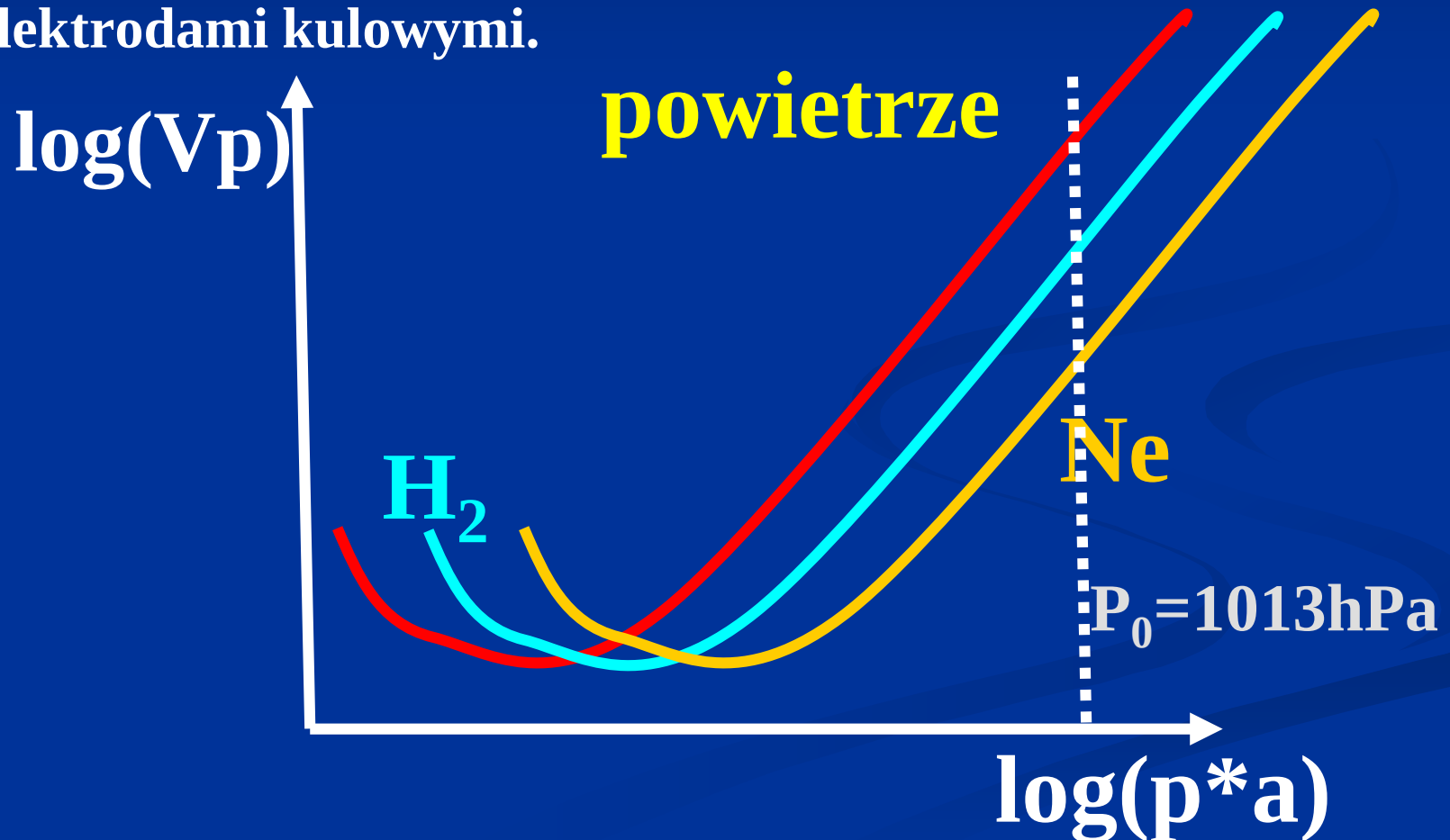
$$\delta = \frac{V_p}{V_{p0}} = 0,386 \frac{p}{t + 273}.$$

Gdzie p – ciśnienie w hPa, t – temperatura w °C. Stosując współczynnik δ możemy każdy wynik pomiarów przeliczyć na warunki normalne i odwrotnie:

$$V_{p0} = \frac{V_p}{\delta}, \text{ lub } V_p = V_{p0} \cdot \delta.$$

Krzywe Paschena

Są to uniwersalne krzywe które podają zależności napięcia przebicia od iloczynu ciśnienia i odległości pomiędzy elektrodami kulowymi.



Przebiecie w cieczach

Materiałami izolacyjnymi ciekłymi są oleje izolacyjne ropopochodne.

W bardzo czystych olejach przebiecie zachodzi w sposób podobny do przebiecia w gazach. Pod wpływem dużego natężenia pola powstaje lawina elektronów.

Ponieważ gęstość oleju jest o wiele większa od gęstości gazu, droga swobodna elektronów w oleju jest znacznie mniejsza.

Oznacza to, że wytrzymałość dielektryczna oleju jest znacznie wyższa, niż wytrzymałość dielektryczna gazów.

Dielektryki

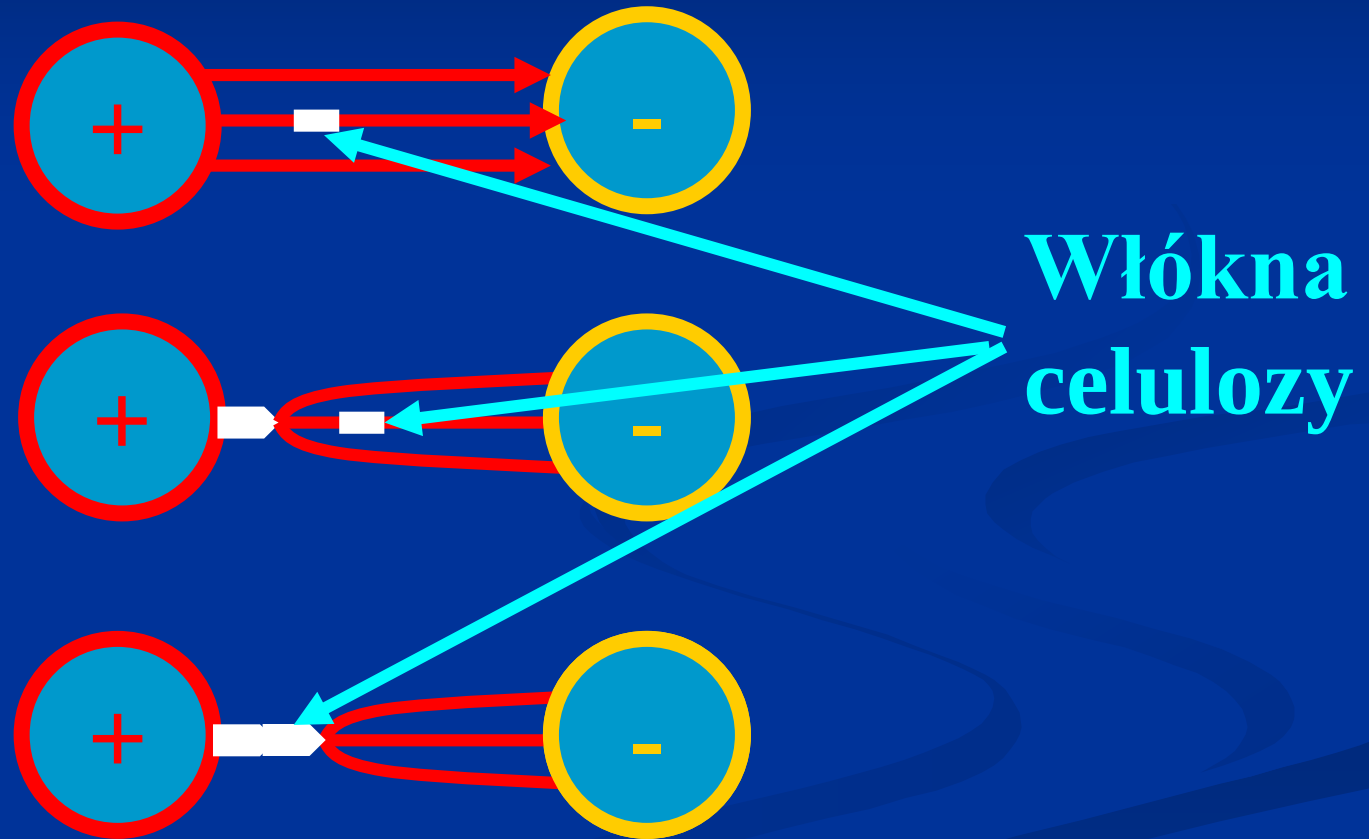
W realnych olejach występują dodatkowo inne mechanizmy przebicia, co obniża ich wytrzymałość dielektryczną.

1. Mostki przewodzące

W transformatorach energetycznych izolacja wykonywana z papieru izolacyjnego i oleju izolacyjnego.

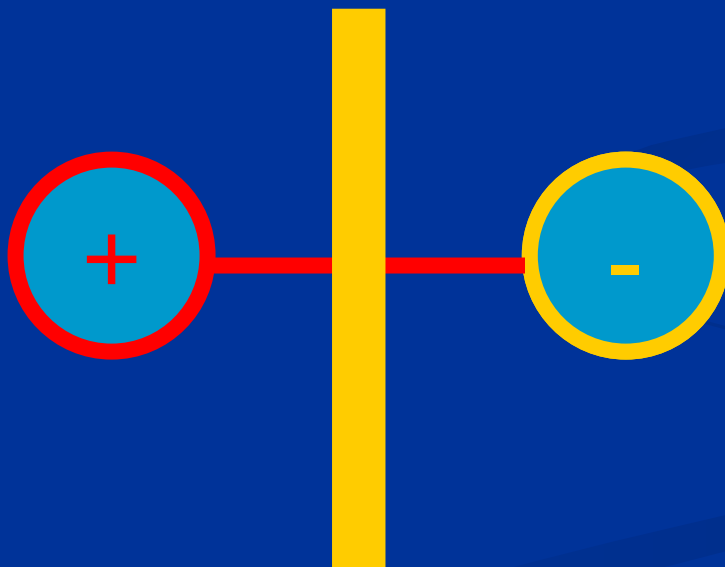
W trakcie eksploatacji część włókien celulozy, z której wykonany jest papier, przechodzi do oleju. W jednostajnym polu elektrycznym zachodzi elektryzacja włókien celulozy. Gdy pierwsze włókno dochodzi do elektrody i przykleja się do niej, pole elektryczne zostaje zakłócone powstaniem ostrza, na którym koncentruje się pole elektryczne.

Mostki przewodzące



Dielektryki

W celu wyeliminowania możliwości powstawania mostków przewodzących stosowane są przegrody izolacyjne z preszpanu (prasowanej celulozy). Postawienie takiej przegrody nie pozwala połączyć się elektrycznie mostkom i zapobiega powstawaniu przebicia przez nie.



Pęcherzyki gazowe

W oleju izolacyjnym z różnych powodów mogą powstać wtrącenia gazowe. Pojawienie się wtrąceń gazowych może być spowodowane gwałtowną zmianą temperatury i wytrąceniem się gazów rozpuszczonych w oleju. Może to być również pęcherzyk gazu pomiędzy warstwami izolacji papierowej, pozostały podczas jej nawijania.

Takie wtrącenie gazowe może spowodować lokalne przebicie w postaci wyładowania niezupełnego, ponieważ:

- a) wytrzymałość dielektryczna gazu jest o wiele mniejsza, niż oleju (ok. 5 – 10 razy);
- b) natężenie pola elektrycznego w gazie jest ϵ razy większe, niż w oleju.

Dielektryki

Wskutek wyładowań niezupełnych w pobliżu pęcherzyka zachodzą straty energii elektrycznej oraz lokalnie wzrasta temperatura co może doprowadzić do pogorszenia właściwości oleju.

Przebiecie w ciałach stałych

Podstawowym mechanizmem przebicia w dielektrykach organicznych jest przebiecie cieplne.

Starzenie się materiałów izolacyjnych

Starzeniem się materiałów izolacyjnych nazywamy pogorszenie parametrów elektrycznych i mechanicznych wraz ze wzrostem czasu ich eksploatacji.

Procesy starzeniowe zachodzą nawet wtedy gdy materiał leży w magazynie lub w biurku.

Czynnikami przyśpieszającymi procesy starzeniowe są:

- a) podwyższona w trakcie eksploatacji temperatura;**
- b) wyładowania niezupełne;**
- c) zawilgocenie materiału;**
- d) zawartość zanieczyszczeń w atmosferze.**

Dielektryki

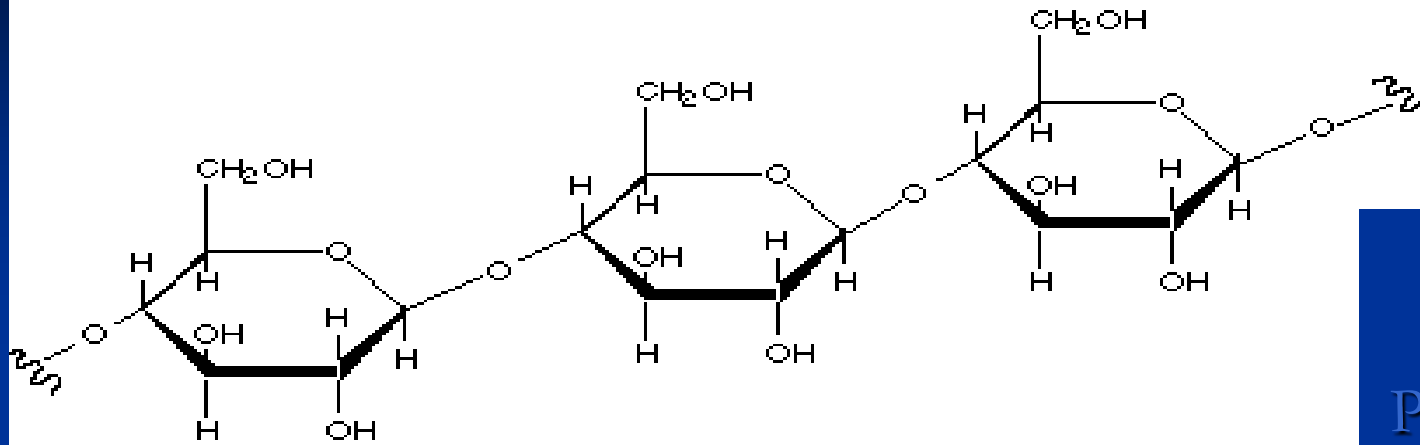
Czynniki te powodują, że wraz ze wzrostem czasu eksploatacji pogarszają się podstawowe parametry materiału, takie jak:

- tangens kąta strat;
- rezystywność;
- wytrzymałość dielektryczna;
- właściwości mechaniczne.

Jest to związane ze zmianami składu chemicznego i struktury materiałów pod wpływem czynników eksploatacyjnych.

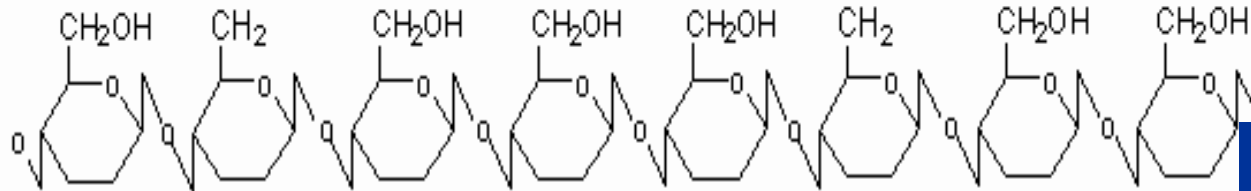
Na przykład w układach izolacyjnych olej – papier (kable, transformatory, kondensatory) pod wpływem eksploatacji wzrasta, wskutek reakcji chemicznych w celulozie, zawilgocenie, co powoduje obniżenie wytrzymałości dielektrycznej oleju oraz całego układu.

Struktura celulozy



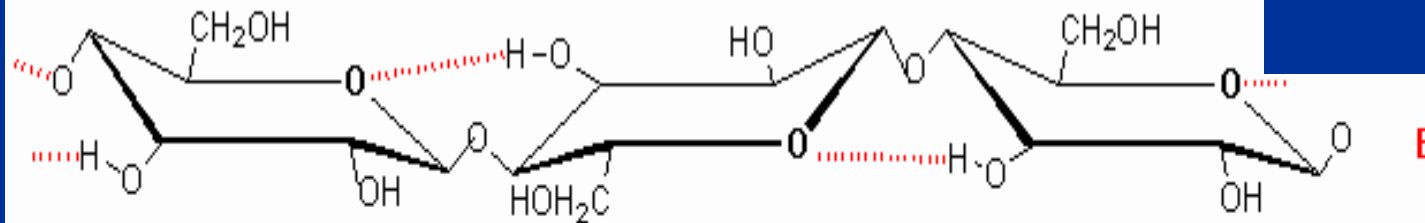
Papier nowy
DP = 1100

Papier zestarzony
DP = 250 - 350



A

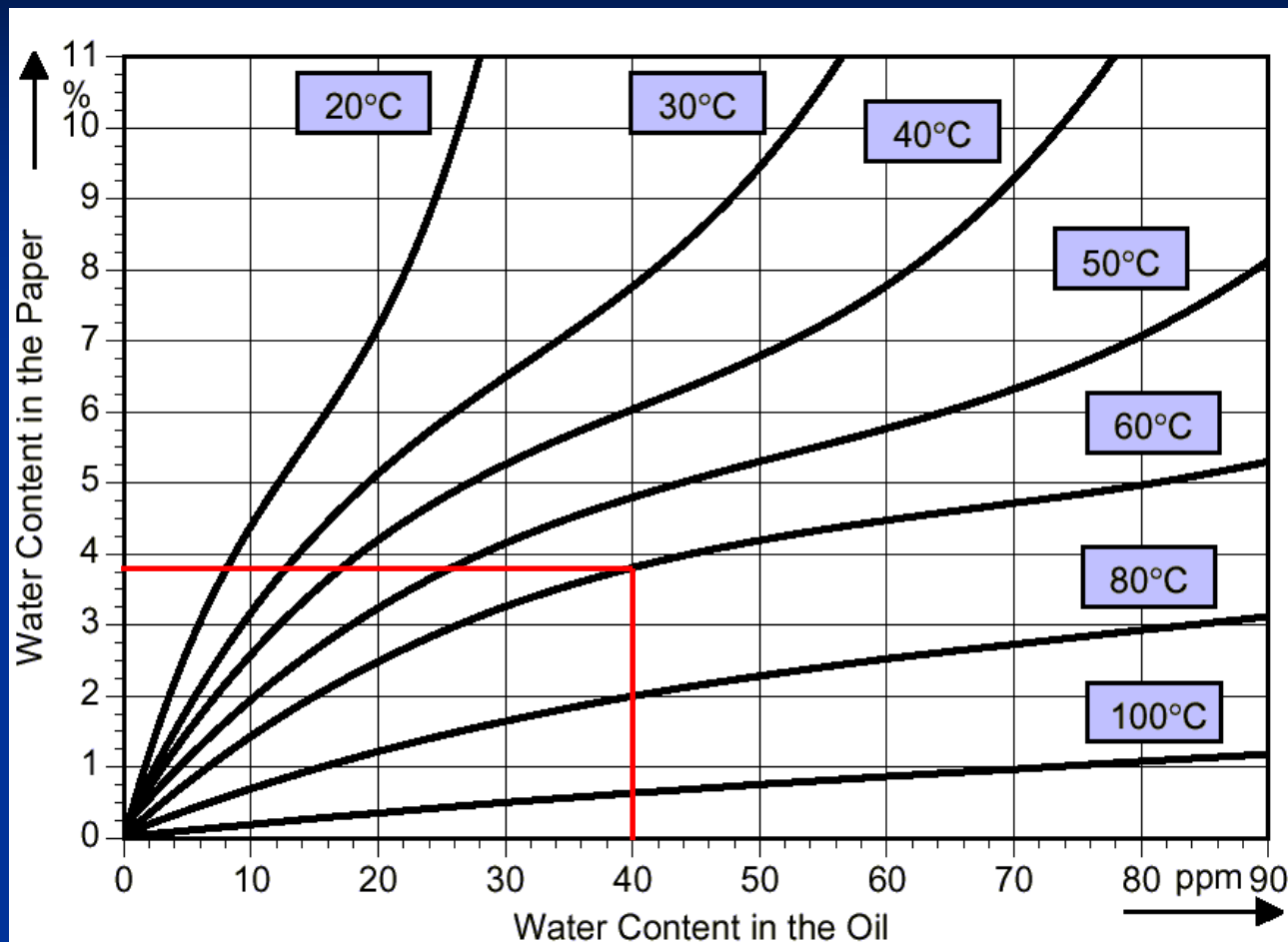
Produkt starzenia:
 H_2O



B

Izolacja papierowo - olejowa

Zawartość wody w papierze i oleju w stanie równowagi termodynamicznej



$T = 60^{\circ}\text{C}$

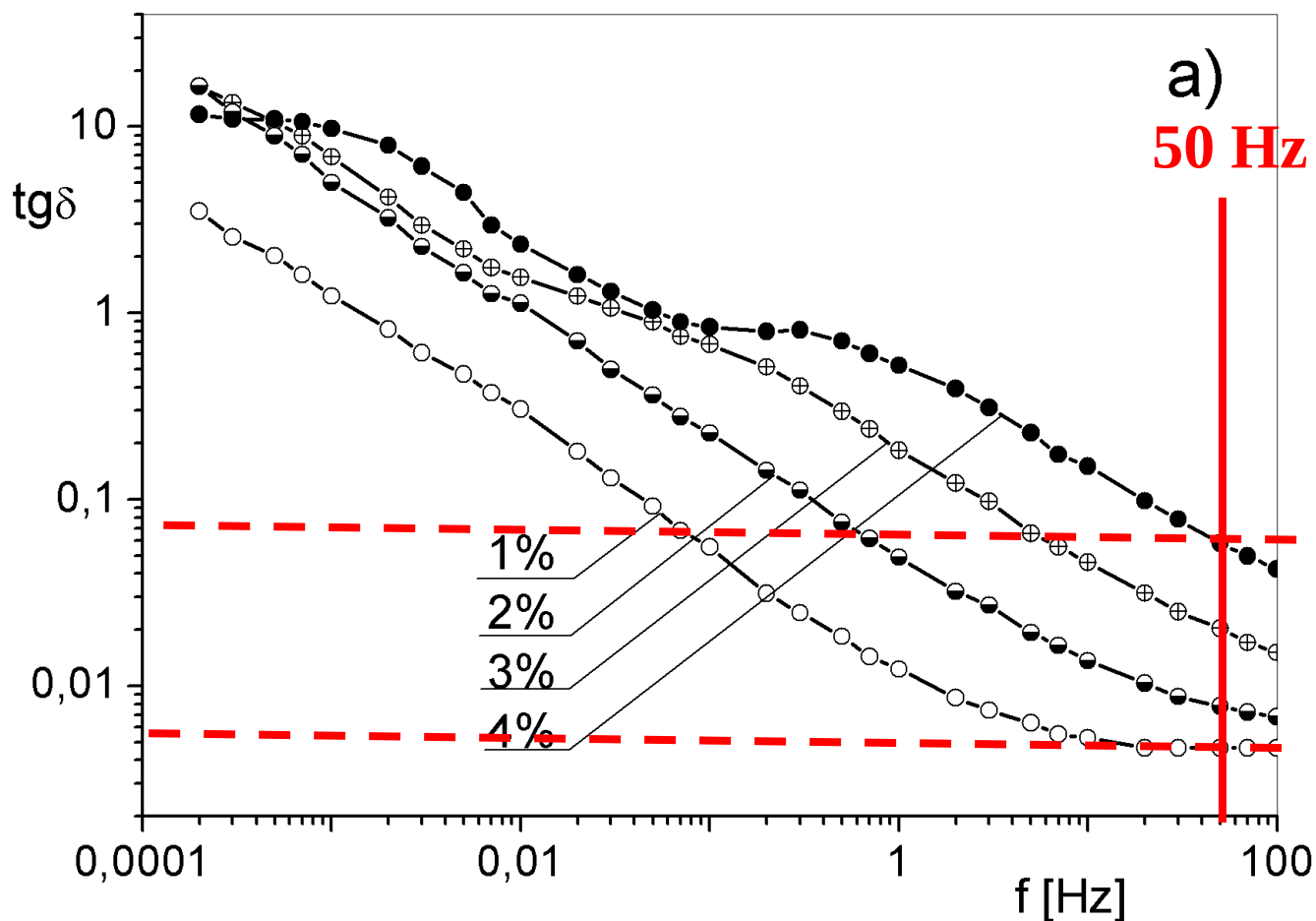
Gdy stopień zawilgocenia oleju wynosi 40 ppm, to w papierze znajduje się ok. 3,8% wody

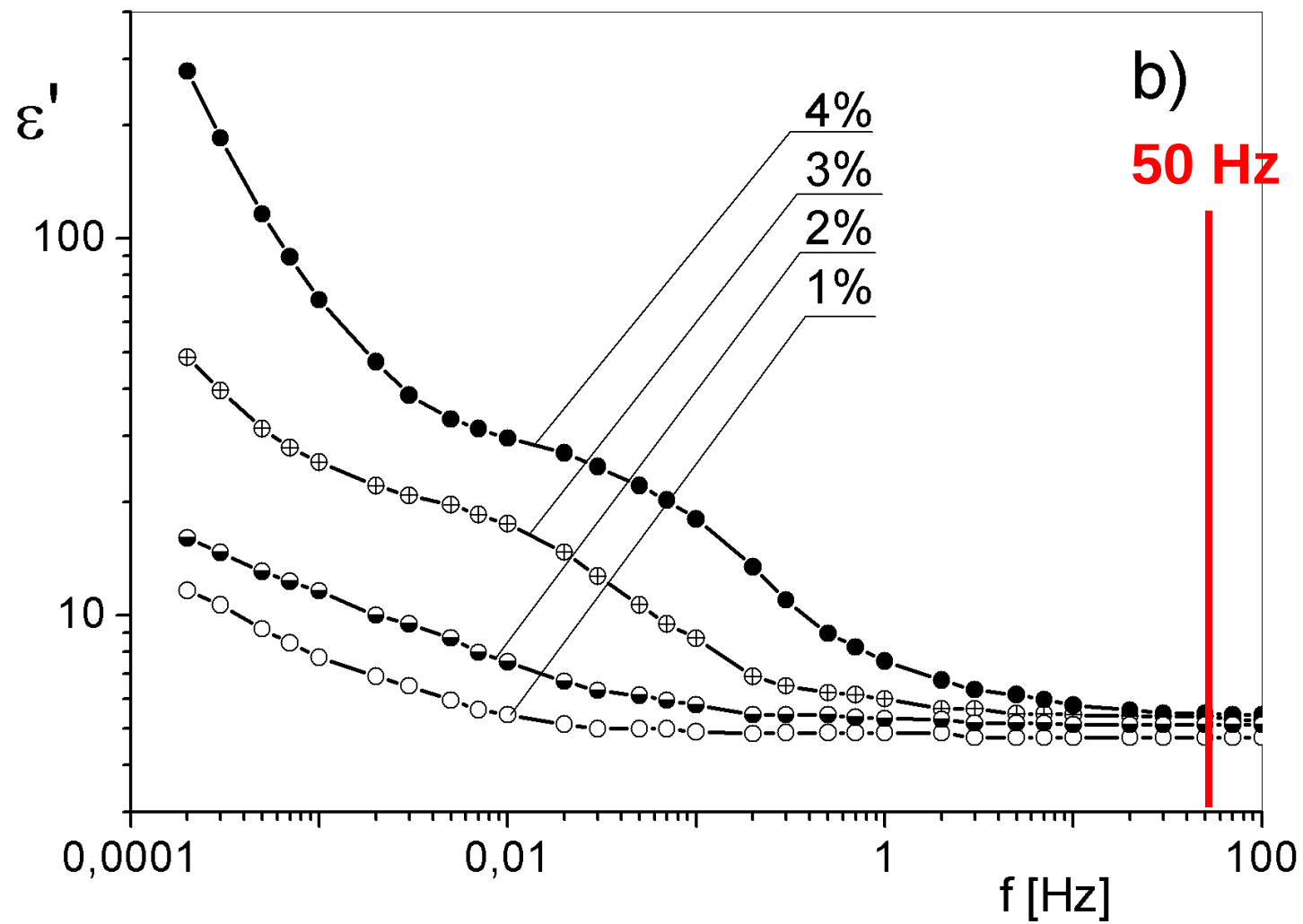
10 ton zawilgoconego oleju w ilości 40 ppm zawiera **400 g** wody.

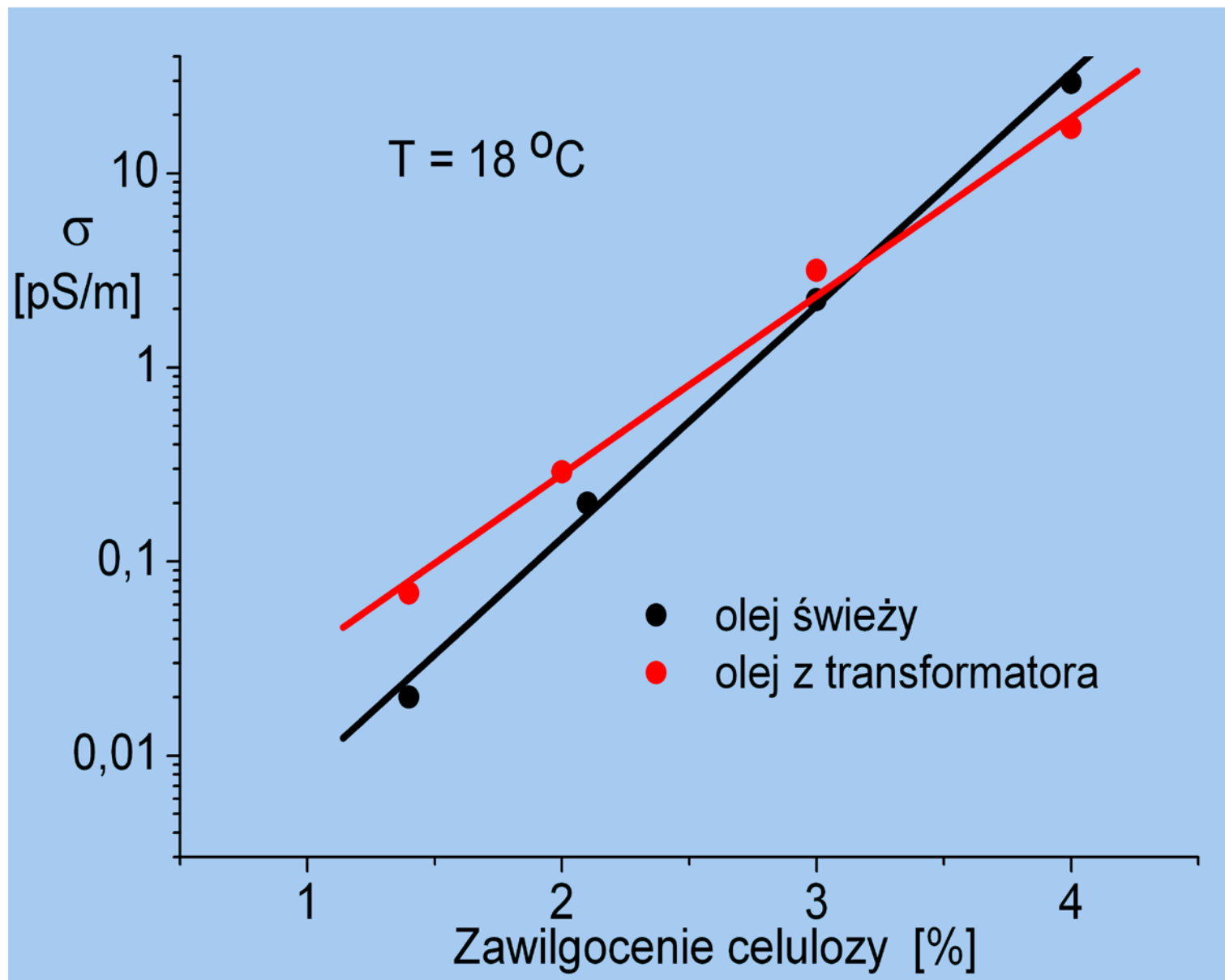
10 ton zawilgoconego papieru w ilości 3,8% zawiera **380 l** wody

**40 ppm = 40molekuł
wody na 1 000 000
molekuł oleju
lub 0,004 %**

Wzorcowe charakterystyki $\operatorname{tg} \delta = f(f)$ oraz $\varepsilon = f(f)$
przeszpanu o różnym stopniu zawilgocenia

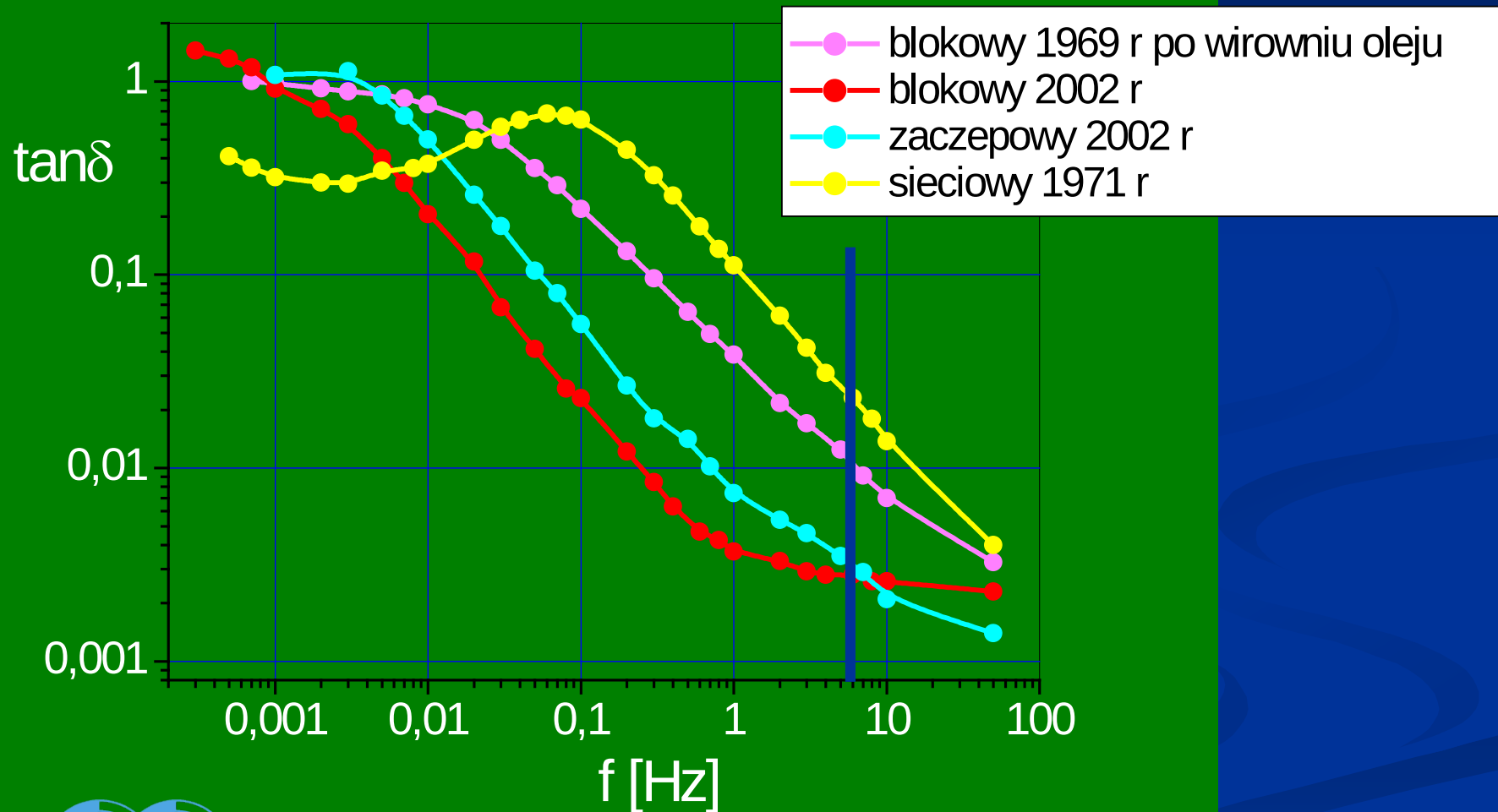






Charakterystyki $\tan\delta = f(f)$

transformatorów o różnym stopniu zesterzenia izolacji



Teoria procesów starzeniowych

Procesy starzeniowe w materiałach izolacyjnych powodują powstawanie lub zwiększenie wskutek reakcji chemicznych zawartości substancji niekorzystnie wpływających na parametry materiałów. W przypadku izolacji papierowo - olejowej jest to wytrącanie się wody z celulozy. Może to również być powstawanie pęcherzyków gazowych oraz ciał stałych (sadza, włókna celulozy) podczas wyładowania niezupełnego. Istotne jest to, że z czasem wzrasta zawartość niekorzystnych dla materiału izolacyjnego substancji, przekroczenie określonej granicznej zawartości których może doprowadzić do awarii.

W związku z tym należy regularnie kontrolować zawartości tych substancji i po osiągnięciu zawartości granicznej przystąpić do działań zapobiegających awarii.

Dielektryki

Gdy koncentracja składowej ulegającej degradacji pod wpływem procesów starzeniowych w nowym materiale wynosiła C_0 a po czasie eksploatacji t – C , to równanie opisujące jej zmiany, nazywane jest formułą Bussinga, lub równaniem reakcji chemicznej pierwszego rzędu:

$$-\frac{dC}{dt} = KC,$$

Gdzie K – stała szybkości reakcji chemicznej. Rozwiązaniem powyższego równania jest:

$$C = C_0 \exp(-Kt).$$

Dielektryki

Nas interesuje nie to, jaka część materiału nie uległa degradacji po czasie t (jest to oczywiście C), a odwrotnie ile materiału zdegradowało (jest to wartość $C_0 - C$) :

$$\Delta C = C_0 - C = C_0 (1 - \exp(-Kt)).$$

Ponieważ uszkodzenie materiału następuje przy niewielkich zawartościach produktów reakcji (na przykład – wody w izolacji papierowo – olejowej), poprzednie równanie możemy rozłożyć w szereg:

$$\Delta C = C_0 - C = C_0 Kt.$$

Dielektryki

Szybkość reakcji chemicznej jest podawana wzorem:

$$K = a \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right).$$

Gdzie ΔE – energia aktywacji reakcji chemicznej doprowadzającej do destrukcji materiału, k – stała Boltzmana. Podstawiając do powyższego równania na ΔC wartość stałej szybkości reakcji chemicznej K uzyskujemy:

$$\Delta C = C_0 \cdot a \cdot t \cdot \exp\left(-\frac{\Delta E}{kT}\right).$$

Na podstawie powyższego wzoru można wprowadzić pojęcie trwałości materiałów izolacyjnych, oznaczanej jako t_t . Jest to czas, po upływie którego pod wpływem czynników eksploatacyjnych starzenie się materiału doprowadza go wzrostu koncentracji substancji niekorzystnych do poziomu krytycznego ΔC_{KR} , po którym może wystąpić awaria.

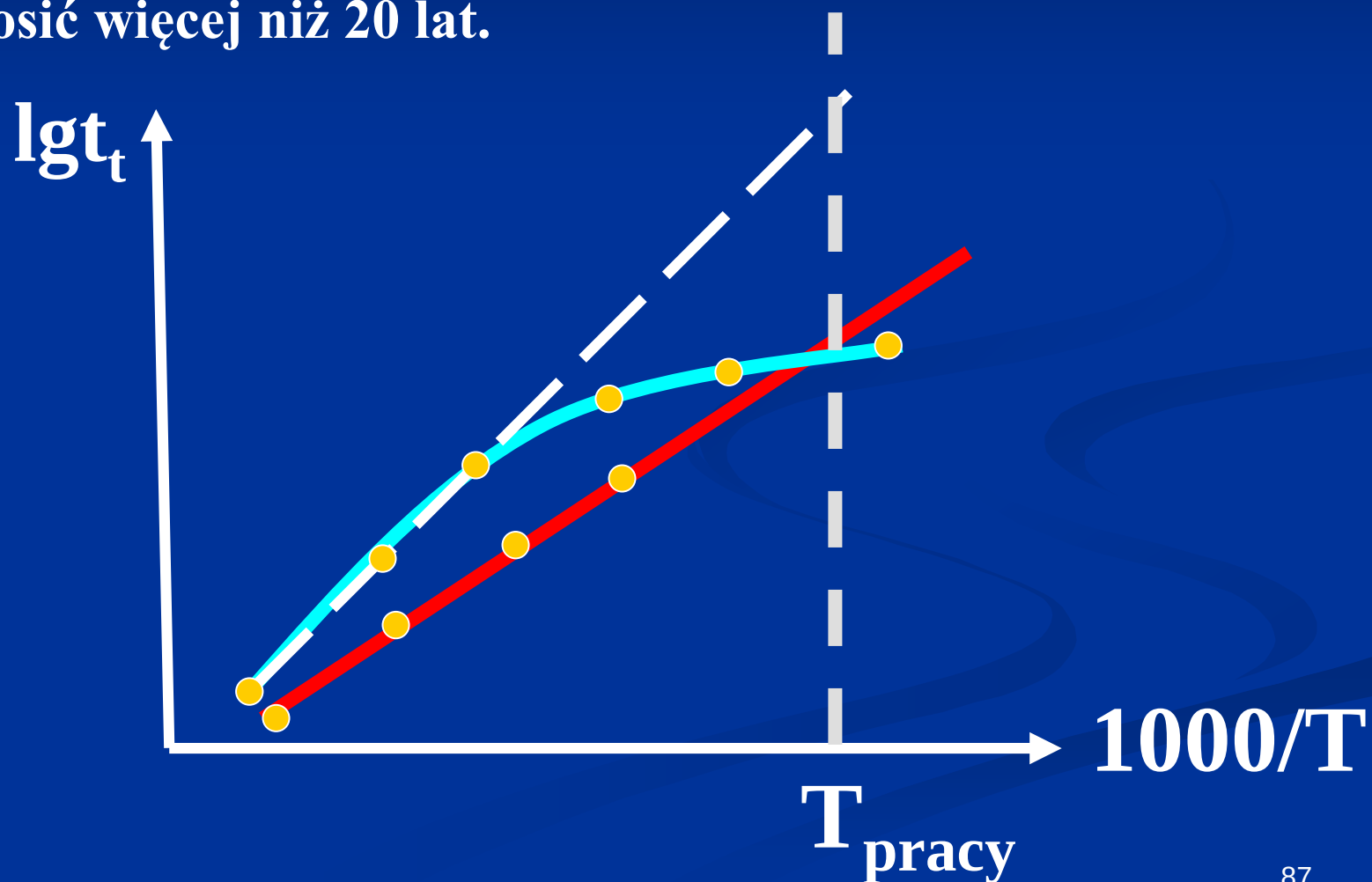
$$t_t = \frac{\Delta C_{KR}}{aC_0} \cdot \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right).$$

Wyrównania tego wzoru dokonamy wprowadzając nowe zmienne:

$$Y = \ln(t_t), \quad X = \frac{1000}{T}.$$

Dielektryki

Trwałość materiałów izolacyjnych przeznaczonych do pracy w urządzeniach elektroenergetycznych powinna wynosić więcej niż 20 lat.



Dielektryki

Materialy izolacyjne gazowe

Powietrze; N₂; SF₆; He; Ne; Ar; H₂

U _{gaz} /U _{pow}	1	1	2,5	<1	<1	<1	0,6
------------------------------------	---	---	-----	----	----	----	-----

$\rho=10^{18}$ Ohm*cm; $\text{tg}\delta < 10^{-8}$; $\epsilon=1$.

Dielektryki

Klasy odporności cieplnej i maksymalne dopuszczalne temperatury pracy ciągłej

Klasa	Y	A	E	B	F	H	200	220	250
t ⁰ C	90	105	120	130	155	180	200	220	250

Materiały izolacyjne ciekłe

Oleje izolacyjne są to oleje mineralne ropopochodne. W ich skład mogą wchodzić cząsteczki węglowodorów :

nasycone parafinowe C_nH_{2n-2}

nasycone naftenowe C_nH_{2n} ; C_nH_{2n-2}

nienasycone aromatyczne C_nH_n

Dielektryki

Jakość olejów

1. Liczba kwasowa
2. Zawartość osadów
3. Lepkość
4. Zawartość ciał obcych
5. Temperatura zapłonu
6. Zawartość wody
7. Temperatura krzepnięcia
8. Rozpuszczalność gazów
9. Wytrzymałość dielektryczna
10. $\text{tg}\delta$
11. ρ
12. ϵ
13. $T_{\text{dlugotrw}} = 95^{\circ}\text{C}$
14. $T_{\text{max}} > 110^{\circ}\text{C}$

Oleje: Transformatorowe

Kondensatorowe

Kablowe – zagęszczone kalafonią

Wyłącznikowe

Materialy izolacyjne stałe nieorganiczne

1. Szkła

Upr do 500 kV/cm

T_{dop} zależy od składu i określana jako temperatura, przy której rezystywność obniża się do wartości $\rho = 10^8 \text{ Ohm*cm}$:

Szkło przemysłowe – 80 – 90 °C

Szkło borowo – krzemowe – 200 – 250 °C

Szkło kwarcowe – 1000 °C.

ρ od 10^8 do 10^{20} Ohm*cm

ρ_{pow} od 10^{10} do 10^{15} Ohm

$\epsilon=3,9$ – szkło kwarcowe, 16 – o dużej zawartości Pb.

$\text{tg}\delta$ od 0,1 do 0,0001

Zastosowanie szkła w elektrotechnice:

Izolatory linii napowietrznych najwyższych napięć.

Bańki lamp oświetleniowych (żarówki, świetlówki, halogeny i inne).

Włókna i tkaniny szklane stosowane jako składowa kompozytowych materiałów izolacyjnych.

Materiały ceramiczne

Glinokrzemiany $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$

Krzemiany magnezu $\text{MgO} + \text{SiO}_2$

Glinokrzemiany baru $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2 + \text{BaO}$

Korundowo – mulitowa 70 – 90% Al_2O_3

Alundowa 90 – 98 % Al_2O_3

Korundowa >98 % Al_2O_3

Tlenek magnezu MgO

Tlenek cyrkonu ZrO_2

T_{dop}, w zależności od składu od 110 do 250 °C

Dielektryki

ρ od 10^{11} do 10^{16} Ohm*cm

ρ_{pow} od 10^{10} do 10^{12} Ohm

U_{pr} od 100 do 400 kV/cm

ϵ od 3 – 4 do >1000

$\text{tg}\delta$ od 0,01 do 0,001

Podstawową wadą ceramiki jest porowatość, zwłaszcza obecność otwartych porów, co powoduje nasiąkliwość wodą, łatwą przyczepność zabrudzeń, pogorszenie parametrów elektrycznych.

W celu zmniejszenia niekorzystnego wpływu porowatości powierzchnia izolatorów pokrywana jest specjalnym szkliwem.

Dielektryki

Mika

Minerały kopalniane:

Muskowit $T_{dop} < 540\text{ C}$

Flogopit $T_{dop} < 900\text{ C}$

ϵ od 6 do 7

$\text{tg}\delta$ od 0,01 do 0,0001

Papier mikowy.

Mikaleks – mika + szkło.

Materiały izolacyjne stałe naturalne organiczne

Materiały celulozowe

Celulozę otrzymują z drzewna liściastego (wióry) poprzez gotowanie w kwasie siarkowym H_2SO_4 lub zasadzie NaOH .

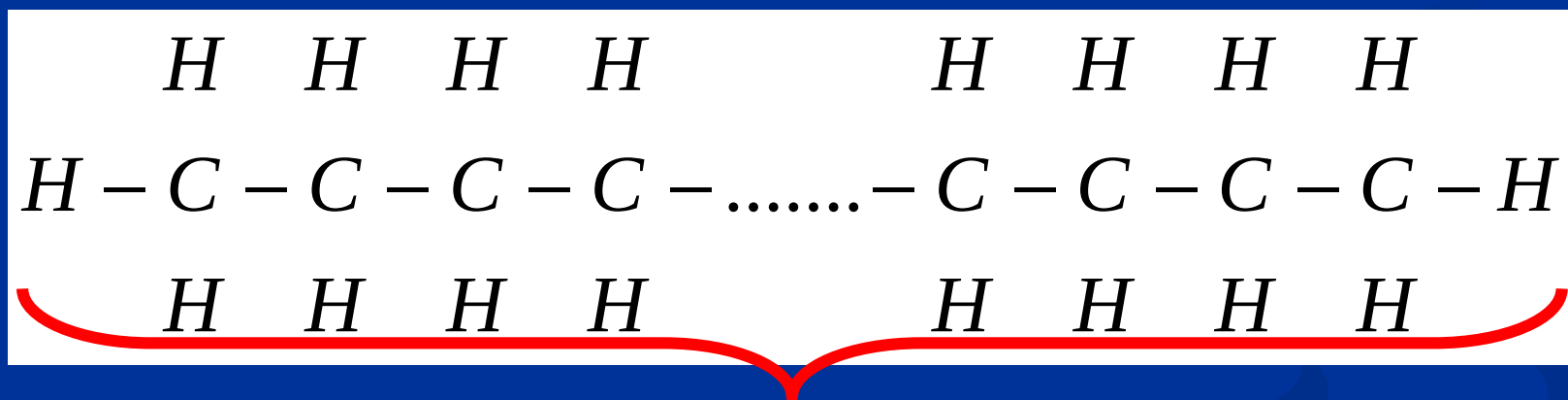
Wykorzystują w postaci papieru, kartonu, preszpanu – nasyconych olejem izolacyjnym.

Polimery, tworzywa sztuczne

Monomery > temperatura + ciśnienie > polimer

Gaz etylen C_2H_4 .

Przy podwyższonych temperaturze i ciśnieniu cząsteczki etylenu łączą się w łańcuch - polietylen:



n=1000 - 10000

Polimery

1. Termoplastyczne

2. Termoutwardzalne (duroplasty)

3. Kauczuki

Właściwości elektryczne

ρ , ρ_{pow} , $\text{tg}\delta$, U_{prz}

Właściwości cieplne

T_{dop} , α , $T_{\text{ugięcia}}$

Właściwości mechaniczne

R_r – wytrzymałość na rozciąganie

a – wydłużenie przy zerwaniu

R_g – wytrzymałość na zginanie

R_u – udarność

E – współczynnik sprężystości wzdłużnej

Polimery termoplastyczne mało polarne



Polichlorek winylu	50 C – 70 C
Polistyren	65 C – 80 C
Etyloceluloza	85 C – 120 C
Polietylen	85 C – 120 C
Polipropylen	100 C – 120 C
Teflon 3	190 C
Teflon 4	250 C

T_{dop}

Polimery termoutwardzalne

Związek wielocząsteczkowy + temperatura lub (i)
utwardzacz = utwardzanie nieodwracalne

Fenoplasty

Aminoplasty

Poliestry

Żywice epoksydowe

Żywice silikonowe

Żywice polimidowe

Elastomery

Kauczuk + napelniacz + siarka + temperatura =
Guma



Kauczuk naturalny	55 – 65 C
Kauczuk butadienowy	55 – 65 C
Kauczuk akrylonitrylowy	85 – 90 C
Kauczuk butylowy	80 – 85 C
Kauczuk silikonowy	180 – 220 C
Kauczuk fluorowy	180 – 205 C

T_{dop}

Metody formowania wyrobów

Odlewanie

Wtrysk

Prasowanie na gorąco pod ciśnieniem

Wytlaczanie

Kształtowanie na gorąco

Spawanie

Obróbka mechaniczna