

D2. WYZNACZANIE WZGLĘDNYCH PRZENIKALNOŚCI ELEKTRYCZNYCH I STRAT

Jadwiga Szydłowska i Marek Pekała

Dielektrykami nazywa się substancje, w których elektrony są zlokalizowane na cząsteczkach. W idealnych dielektrykach nie występują elektrony swobodne, które w metalach odpowiadają za przewodnictwo elektryczne. W dielektrykach umieszczonych w polu elektrycznym powstaje się niezerowy moment dipolowy, który na ogół jest równoległy do linii sił zewnętrznego pola i opisuje się go przez wektor polaryzacji \vec{P} lub wektor indukcji elektrycznej \vec{D} . Polaryzacja tworzy się poprzez porządkowanie dipoli cząsteczek lub przez indukowanie w atomach lub cząsteczkach nowych dipoli elektrycznych dzięki zmianom w rozkładzie ładunków.

W ośrodkach jednorodnych (izotropowych) wektor \vec{D} jest równoległy do wektora \vec{E} . Indukcję elektryczną \vec{D} w dielektryku można rozdzielić na dwie składowe. Jedną składową jest indukcja elektryczna próżni $\epsilon_0 \vec{E}$, drugą składową jest polaryzacja dielektryka \vec{P} równa co do wartości gęstości powierzchniowej ładunku indukowanego w dielektryku (w prostopadłościenną kostkę), czyli

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}. \quad (1)$$

Wyróżniamy następujące rodzaje polaryzacji dielektryka: **elektronową**, **jonową** i **orientacyjną**. Skutkiem polaryzacji jest zmniejszenie się natężenia pola elektrycznego wewnątrz dielektryka. Makroskopowe własności dielektryków opisuje wielkość fizyczna nazywana przenikalnością elektryczną ϵ . Generalnie przenikalność elektryczna nie jest stałą, jej wartość zależy od temperatury, a w silnych polach elektrycznych może zależeć od natężenia pola elektrycznego (dielektryki nieliniowe).

W zmiennym polu elektrycznym przenikalność elektryczna zależy od częstotliwości zmian pola elektrycznego. W polu elektrostatycznym lub w polach wolnozmiennych przenikalność elektryczna jest wielkością **rzeczywistą**, natomiast w polach szybkozmiennych wygodnie jest posługiwać się pojęciem **zespolonej przenikalności elektrycznej** $\hat{\epsilon}$. Gdy kondensator wypełniony dielektrykiem podłączymy do źródła napięcia sinusoidalnie zmiennego w czasie, a więc przyłożymy do próbki zmienne pole elektryczne \vec{E} , to w próbce wytworzą się zmienne w czasie wektory polaryzacji dielektryka \vec{P} i indukcji elektrycznej \vec{D} . Jednakże, przebieg czasowy obu wektorów może być przesunięty w fazie w stosunku do przyłożonego pola elektrycznego E . Opis tego zjawiska jest ułatwiony dzięki wprowadzeniu zespolonej stałej dielektrycznej $\hat{\epsilon}$

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' - i\epsilon''$$

gdzie składowa rzeczywista przenikalności ϵ' jest **przenikalnością elektryczną ośrodka / materiału**, która opisuje, jak łatwo ośrodek polaryzuje się pod działaniem zewnętrznego pola elektrycznego E . **Urojona składowa przenikalności ϵ''** jest związana z procesami relaksacji momentów dipolowych i związanych ładunków elektrycznych, które powodują straty energii (dyssypację energii) w ośrodku. Z własności liczb zespolonych wiadomo, że

$\hat{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon'' = |\varepsilon|e^{-i\delta}$, gdzie $|\varepsilon| = \sqrt{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2}$, a $e^{-i\delta} = \cos\delta - i\sin\delta$. A więc $\varepsilon' = |\varepsilon|\cos\delta$, $\varepsilon'' = |\varepsilon|\sin\delta$, oraz

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'}. \quad (2)$$

Kąt δ jest miarą opóźnienia w czasie polaryzacji dielektryka w stosunku do zmian pola elektrycznego. Ponieważ opóźnienie to jest źródłem strat energii podczas przepływu prądu zmiennego przez dielektryk, $\operatorname{tg}\delta$ został nazwany **tangensem kąta strat** (współczynnikiem strat).

Zachowania się wektorów \vec{E} , \vec{D} i \vec{P} można opisać przy pomocy liczb zespolonych. Przyłożone napięcie sinusoidalnie zmienne U jest częścią rzeczywistą pewnej liczby zespolonej $U = U_0 e^{i\omega t}$, a natężenie zmiennego pola elektrycznego E jest częścią rzeczywistą liczby zespolonej $\vec{E} = \vec{E}_0 e^{i\omega t}$, gdzie ω jest częstością tych zmian. Relacja między zespolonymi wektorami \vec{D} i \vec{E} jest postaci:

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \hat{\varepsilon} \vec{E}. \quad (3)$$

Co daje

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \hat{\varepsilon} \vec{E} = \varepsilon_0 |\varepsilon| \vec{E}_0 e^{i\omega t} e^{-i\delta} = \vec{D}_0 e^{i(\omega t - \delta)}, \quad (4)$$

gdzie $\vec{D}_0 = \varepsilon_0 |\varepsilon| \vec{E}_0$ jest amplitudą wektora indukcji elektrycznej i tak, jak wspomniano wyżej wektor indukcji jest przesunięty w fazie o δ względem natężenia pola elektrycznego. Składowa rzeczywista wektora \vec{D} wynosi:

$$\vec{D} = \vec{D}_0 \cos(\omega t - \delta) \quad (5)$$

Jeśli w jednostce objętości dielektryka znajduje się N elementarnych dipoli, każdy o momencie dipolowym \vec{p}_i , to wektor polaryzacji \vec{P} możemy przedstawić jako sumę wektorową tych momentów dipolowych. Gdy dielektryk jest izotropowy i gdy brak zewnętrznego pola elektrycznego, to polaryzacja jest równa zero, bo dipole są tak rozłożone, że żaden kierunek nie jest uprzywilejowany. Natomiast w zewnętrznym polu elektrycznym na każdy z dipoli działa moment siły, który dąży aby ustawić dipol zgodnie z kierunkiem pola. Jednocześnie pole elektryczne indukuje w cząsteczce dodatkowy moment dipolowy. Wektor polaryzacji definiujemy jako sumaryczny moment dipolowy jednostki objętości tej substancji, czyli

$$\vec{P} = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i. \quad (6)$$

W dielektryku, w którym nie ma swobodnych ładunków, zewnętrzne pole elektryczne powoduje przeorientowanie się dipoli trwałych oraz przesunięcie ładunków polaryzacyjnych. Nazywamy to prądem przesunięcia. Gęstość prądu przesunięcia \vec{j}_D (prąd na jednostkę powierzchni, I/S) jest równa prędkości zmian wektora indukcji elektrycznej \vec{D}

$$\vec{j}_D = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} (\hat{\epsilon} \epsilon_0 \vec{E}) = \frac{\partial}{\partial t} (\hat{\epsilon} \epsilon_0 \vec{E}_0 e^{i\omega t}) = i\omega \hat{\epsilon} \epsilon_0 \vec{E}_0 e^{i\omega t} = i\omega \epsilon' \epsilon_0 \vec{E}_0 e^{i\omega t} + \omega \epsilon'' \epsilon_0 \vec{E}_0 e^{i\omega t} = \epsilon' \epsilon_0 \vec{E}_0 e^{i(\omega t + \pi/2)} + \omega \epsilon'' \epsilon_0 \vec{E}_0 e^{i\omega t} \quad \text{bo } i = e^{i\pi/2} \quad (7)$$

Gęstość prądu przesunięcia zależy od częstości ω , i znika w polu elektrostatycznym. Z prawa Ohma wynika, że gęstość prądu \vec{j} jest równa

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}d}{RS} = \frac{\vec{E}}{\rho} = \sigma \vec{E}, \quad \text{gdzie } \rho = \frac{RS}{d} = \frac{1}{\sigma} \quad (8)$$

i gdzie R , d , S stanowią opór, grubość i pole powierzchni próbki oraz ρ i σ są oporem właściwym i przewodnictwem właściwym próbki. W związku z tym, z zależności (7), gęstość prądu przesunięcia \vec{j}_D można zapisać jako:

$$\vec{j}_D = \sigma_I \vec{E} + \sigma_R \vec{E} \quad \text{gdzie: } \sigma_I = i\omega \epsilon' \epsilon_0 \text{ oraz } \sigma_R = \omega \epsilon'' \epsilon_0 \quad (9)$$

Pierwszy składnik powyższego wzoru zawiera urojone przewodnictwo właściwe, σ_I które odnosi się do oporu urojonego, drugi składnik – przewodnictwo rzeczywiste σ_R odnoszące się do oporu rzeczywistego. Na oporze urojonym podczas przepływu prądu nie wydzielą się ciepło. Natomiast opór rzeczywisty jest źródłem ciepła, a więc źródłem strat energii. Jak widać urojona wartość stałej przenikalności dielektrycznej ϵ'' opisuje straty energii związane z procesami relaksacji momentów dipolowych i związanych ładunków elektrycznych w zmiennym polu elektrycznym.

Pomiar przenikalności elektrycznej

Z powodów technicznych częstość generatora jest w naszym ćwiczeniu stała. Do niej musi być dopasowana **częstość własna obwodu rezonansowego ω_{REZ}** . Więc dla ustalonej geometrii układu częstość rezonansowa obwodu pomiarowego jest również wielkością stałą. Częstość ta zależy od indukcyjności L i całkowitej pojemności C obwodu. Słabo tłumiony obwód RLC jest w rezonansie, gdy częstość drgań własnych jest równa

$$\omega_{REZ} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (10)$$

Wtedy na indukcyjności L pojawia się maksymalna siła elektromotoryczna U_{MAX} , co można stwierdzić obserwując wskazania woltomierza V (Rys. 3). W skład pojemności całkowitej obwodu wchodzi: pojemność kondensatora pomiarowego C_P , pojemność kondensatora zmiennego C_Z i pojemność rozproszona obwodu C_R . Kondensatory są połączone ze sobą równolegle, czyli

$$C = C_P + C_Z + C_R \quad (11)$$

W warunkach rezonansu w obwodzie pomiarowym $C = C_{REZ} = 1/\omega^2 L = 195$ pF (Wartość ta wynika z zastosowanego zestawu RLC).

Jako kondensator zmienny C_Z zastosowano układ dwóch współosiowych cylindrów o różnej średnicy, przesuwanymi wzajemnie przy pomocy śruby mikrometrycznej. Pojemność

elektryczna cylindrycznego kondensatora zmiennego $C_Z(l)$ zmienia się proporcjonalnie do położenia śruby l tak, że:

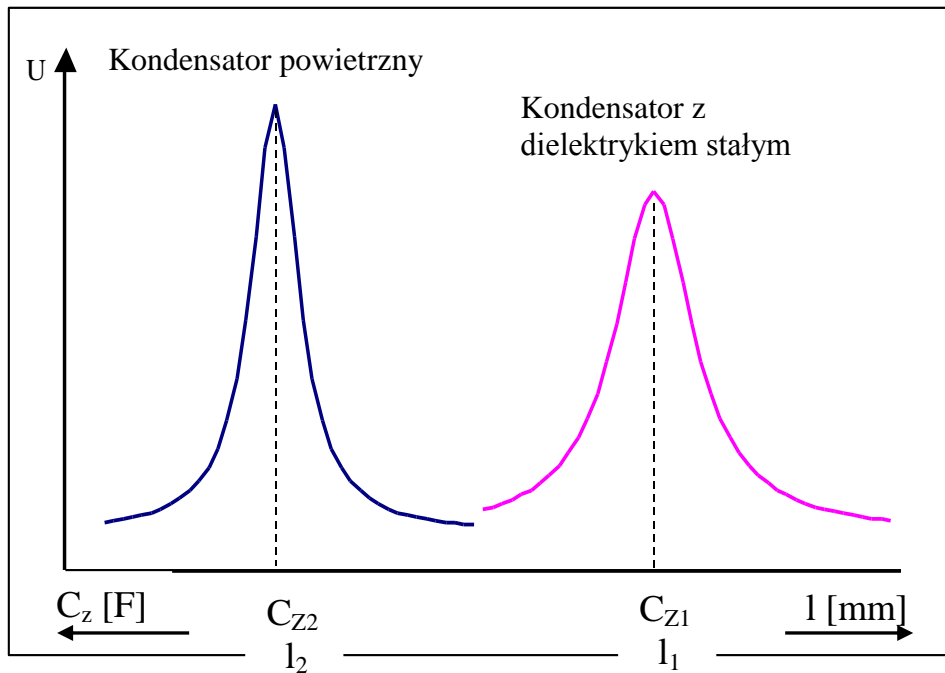
$$C_Z = \text{const} - A \cdot l \quad (12)$$

gdzie $A = 1,4 \frac{\text{pF}}{\text{mm}}$, a l – położenie śruby mikrometrycznej. Zmieniając pojemność $C_Z(l)$ przez obrót śruby i notując wskazania woltomierza U mierzy się krzywą rezonansową układu $U(C_Z)$ lub $U(l)$. (Rys. 1)

Pusty kondensator pomiarowy C_{PI} jest płaskim kondensatorem próżniowym o pojemności C_0

$$C_{PI} = C_0 = \frac{\epsilon_0 S}{d} \quad (13)$$

gdzie S jest powierzchnią okładek, zaś d jest odległością między okładkami.



Rysunek 1.

Po wypełnieniu kondensatora pomiarowego dielektrykiem o przenikalności elektrycznej $\epsilon' > 1$ jego pojemność rośnie ϵ' razy, i przyrost pojemności jest równy $\Delta C_p = (\epsilon' - 1)C_0$. Np. przenikalność elektryczna powietrza w temperaturze pokojowej jest równa $\epsilon' = 1,005$ i tylko 0,05% różni się od przenikalności elektrycznej próżni. Przenikalność stałych dielektryków jest kilkakrotnie większa od przenikalności próżni.

Jeśli układ z zawierający kondensatora pomiarowy C_{P2} wypełniony stałym dielektrykiem chcemy dostroić do rezonansu musimy pojemność kondensatora zmiennego, zmniejszyć do pojemności C_{Z1} , w porównaniu z pojemnością C_{Z2} tego kondensatora dla układu bez dielektryka. Zmiana ta kompensuje wzrost pojemności ΔC_p

$$C_{Z1} - C_{Z2} = -\Delta C_P = -(\varepsilon' - 1)C_0 \quad (14)$$

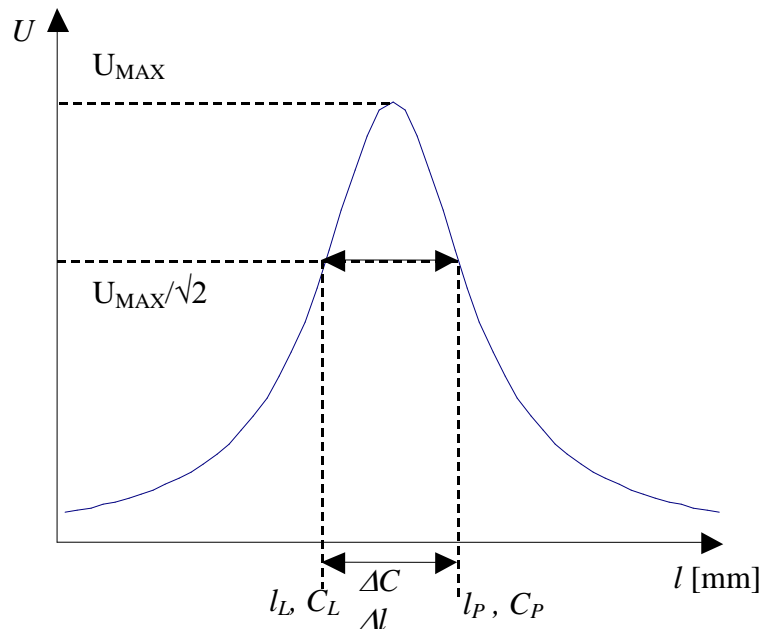
Aby zmniejszyć pojemność kondensatora pomiarowego (C_Z) należy wyciągnąć jeden cylinder z drugiego, a więc wykręcić śrubę mikrometryczną. Jeśli rezonans dla kondensatora pustego występuje w położeniu l_2 , a dla kondensatora wypełnionego dielektrykiem w położeniu l_1 , to (12)

$$C_{Z1} - C_{Z2} = -A \cdot (l_1 - l_2) \quad (\text{gdzie } A = 1,4 \frac{\text{pF}}{\text{mm}}) \quad (15)$$

Stąd przenikalność ε' jest równa:

$$\varepsilon' = 1 + \frac{(l_1 - l_2) \cdot \left(1,4 \frac{\text{pF}}{\text{mm}}\right)}{C_0}. \quad (16)$$

Pomiar strat dielektrycznych



Rysunek 2

Z kształtu krzywej rezonansowej można wyznaczyć **tangens kąta strat dielektrycznych**, $\text{tg} \delta$ obliczając

$$\text{tg} \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{1}{Q} = \frac{\Delta \omega}{\omega_{\text{REZ}}} \quad (17)$$

gdzie Q jest współczynnikiem dobroci obwodu rezonansowego a $\Delta \omega = \omega_p - \omega_L$ tzw. szerokością połówkową na poziomie $U = \frac{U_{\text{max}}}{\sqrt{2}}$ (warunek połowy mocy traconej podczas rezonansu, a moc $\sim U^2$).

Odstrojenie układu od warunku rezonansu $\omega_{REZ} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ obniża mierzone napięcie U .

Układ odstrajamy zmieniając pojemności kondensatora C_Z . Korzystając z tego, że krzywa rezonansowa jest symetryczna, możemy pośrednio z pomiarów l_P i l_L wyznaczyć różnicę pojemności ΔC dla dwóch punktów na zboczach krzywej rezonansowej, leżących symetrycznie po obu stronach maksimum, w położeniach, dla których mierzone napięcie będzie równe, $U = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}}$. Wtedy:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \delta &= \frac{\omega_P - \omega_L}{\omega_{REZ}} = \frac{1}{\omega_{REZ}} \left(\frac{1}{\sqrt{LC_P}} - \frac{1}{\sqrt{LC_L}} \right) = \frac{1}{\omega_{REZ}} \left(\frac{1}{\sqrt{L \left(C_{REZ} - \frac{\Delta C}{2} \right)}} - \frac{1}{\sqrt{L \left(C_{REZ} + \frac{\Delta C}{2} \right)}} \right) = \\ &= \frac{1}{\omega_{REZ}} \left(\frac{1}{\sqrt{LC_{REZ} \left(1 - \frac{\Delta C}{2C_{REZ}} \right)}} - \frac{1}{\sqrt{LC_{REZ} \left(1 + \frac{\Delta C}{2C_{REZ}} \right)}} \right) \end{aligned}$$

Gdzie C_P , C_L , C_{REZ} są pojemnościami całego układu tzn. sumą pojemności kondensatora pomiarowego C_P i kondensatora zmiennego C_Z oraz pojemności rozproszonej obwodu C_R . Zmiana pojemności ΔC odnosi się do zmiany pojemności całego układu i jest równa zmianie tylko kondensatora pomiarowego, tzn. $\Delta C = \Delta C_Z = A(l_P - l_L)$, (analogicznie do wzoru (15))

Gdy $\Delta C \ll C_{REZ}$, to z rozwinięcia w szereg Taylora wynika, że:

$$\frac{1}{\sqrt{1 \mp \frac{\Delta C}{2C_{REZ}}}} \cong 1 \pm \frac{1}{4} \frac{\Delta C}{C_{REZ}},$$

a wtedy **tangens kąta strat**

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{\Delta C}{2C_{REZ}} \quad (C_{REZ} = 195 \text{ pF}) \quad (18)$$

Straty energii w pomiarowym obwodzie rezonansowym nie pochodzą tylko od dielektryka wypełniającego kondensator pomiarowy, ale od całego układu i należy to uwzględnić. W związku z tym urojoną stałą dielektryczną ε'' dielektryka stałego wypełniającego kondensator wyznaczamy z różnicy między stałą dielektryczną ε_1'' obwodu z kondensatorem zawierającym dielektryk stały $\varepsilon_1'' = \varepsilon_1' \operatorname{tg} \delta_1$ i z dielektrykiem powietrznym $\varepsilon_2'' = \operatorname{tg} \delta_2$, czyli:

$$\varepsilon'' = \varepsilon_1' \operatorname{tg} \delta_1 - \operatorname{tg} \delta_2, \quad (19)$$

a dzięki zależności (9) dochodzimy do wzoru na przewodnictwo dielektryka

$$\sigma = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'' . \quad (20)$$

Cel

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie zespolonej przenikalności elektrycznej ε' , współczynnika strat dielektrycznych $\operatorname{tg} \delta$ oraz przewodnictwa właściwego σ_R dla wybranych ciał stałych.

Wymagania

Momenty dipolowe molekuł, dipol w polu elektrycznym. Dielektryki polarne i niepolarne, dielektryk w polu elektrycznym. Rodzaje polaryzacji dielektryków. Wektor natężenia pola elektrycznego, wektor indukcji elektrycznej, wektor polaryzacji, przenikalność dielektryczna, pojemność elektryczna kondensatorów. Kondensator w obwodzie prądu przemiennego. Prawo indukcji Faradaya, SEM indukcji. Obwód RLC, rezonans, kształt krzywej rezonansowej a straty w obwodzie. Pochłanianie energii w dielektryku. Prawa Ohma i Kirchhoffa.

Literatura

A. Chełkowski, Fizyka dielektryków, PWN

T. Krajewski, Zagadnienia fizyki dielektryków, WKŁ.

K. Zboński, Laboratorium z fizyki, Liber

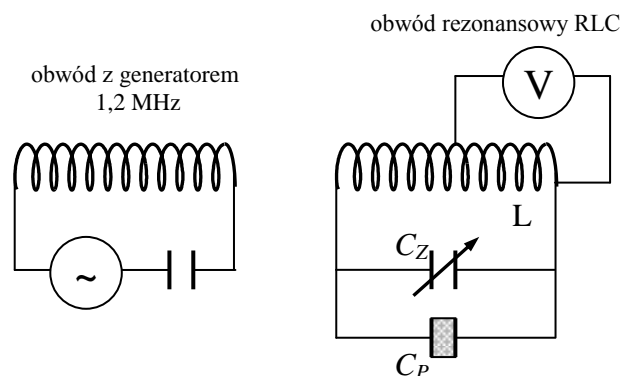
Sz. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, cz.III, Elektryczność i magnetyzm, PWN.

H. Szydłowski, Pracownia fizyczna, PWN.

Opis układu

Metody pomiaru podstawowych parametrów dielektryków, czyli ε i $\operatorname{tg} \delta$, są różne dla różnych zakresów częstotliwości pola elektrycznego. W obszarze częstotliwości radiowych, $10^4 \div 10^8$ Hz, stosuje się metody rezonansowe.

Obwód rezonansowy składa się z cewki indukcyjnej L i połączonych ze sobą równolegle dwóch kondensatorów. Jednym z nich jest kondensator pomiarowy, którego pojemność elektryczna C_P zależy od badanego dielektryka. Drugim jest cylindryczny kondensator o regulowanej pojemności C_Z z precyzyjnym odczytem zmiany pojemności. Do części uzwojenia cewki tego obwodu jest włączony woltmierz służący jako wskaźnik dostrojenia.



Rys. 3

Drgania elektryczne lewego obwodu na Rys. 3 są pobudzane przez generator napięcia przemiennego o częstotliwości 1,2 MHz. Prąd przemienny płynący w obwodzie generatora wytwarza w cewce zmienny w czasie strumień indukcji magnetycznej. Część tego strumienia wnika do cewki obwodu rezonatora indukując w niej siłę elektromotoryczną indukcji (SEM). Wartość siły elektromotorycznej indukowanej w obwodzie rezonansowym zależy od zgodności częstości drgań własnych obwodu z częstością pracy generatora. Optymalne

dostrojenie do rezonansu jest sygnalizowane przez maksimum napięcia U_{MAX} na woltomierzu V w obwodzie pomiarowym, gdy częstotliwość własna obwodu rezonansowego

$$\omega_{REZ} = \frac{1}{\sqrt{L(C_P + C_Z + C_R)}} \quad (21)$$

staje się równa częstotliwości generatora.

Wykonanie ćwiczenia

Pomiar polega na dostrojeniu pojemności obwodu rezonansowego do rezonansu ($U = U_{MAX}$) przez dopasowanie pojemności $C_Z(l)$. Dla kondensatora wypełnionego dielektrykiem stałym rezonans obserwuje się dla $C_{Z1} = C_{Z1}(U_{MAX}) = C_Z(l_1)$. Dla kondensatora powietrznego o tej samej odległości okładek d rezonans pojawia się dla $C_{Z2} = C_{Z2}(U_{MAX}) = C_Z(l_2)$. Korzystając ze wzoru (16) oblicza się część rzeczywistą przenikalności elektrycznej ε' .

W obu przypadkach rejestruje się lewą i prawą połowę krzywej rezonansowej odstrajając układ przy pomocy pojemności $C_Z(l)$ odpowiednio mniejszych i większych od pojemności rezonansowej $C_Z(U_{MAX})$. Wykręca się lub wkreca śrubę mikrometryczną kondensatora C_Z i zapisuje się wartość napięcia U w zależności od położenia śruby mikrometrycznej l . Kształt krzywej rezonansowej pozwala wyznaczyć tangens kąta strat dielektrycznych $\text{tg}\delta$ (wzór (18)) i część urojoną przenikalności elektrycznej ε'' badanego dielektryka stałego (wzór (19)).

Wyniki wszystkich pomiarów muszą być zapisane w sprawozdaniu, opatrzone odpowiednimi jednostkami i podpisane przez asystenta.

Uwaga 1: włączenia napięcia zasilania i dobór parametrów układu zapewniających właściwe sprzężenie obwodów dokonuje asystent (odległość między cewkami powinna być większa niż 14 cm).

Uwaga 2: układy generatora, zasilacza oraz woltomierz są układami lampowymi i wymagają kilku minut nagrzewania dla ustalenia parametrów.

Pomiary

- Wkręcamy śrubę regulującą odległość między okładkami kondensatora płaskiego i doprowadzamy do zetknięcia metalowych okładek kondensatora. W tym położeniu czujnik mikrometryczny powinien wskazywać zero. Korektę zerowania czujnika można wykonać obracając śrubkę umieszczoną na szczycie czujnika.
- Między okładkami kondensatora umieszczamy płytkę dielektryka. Odległość między okładkami d równą grubości dielektryka odczytujemy na czujniku mikrometrycznym.
- Zapisujemy grubość i nazwę próbki.
- Sprawdzamy, czy przełącznik zakresów woltomierza lampowego jest ustawiony na zakresie 300 mV.

Uwaga! W pomiarach krzywej rezonansowej wystarcza rejestracja **względnych** wartości napięcia. Żeby podnieść dokładność **odczytu** wskazania przyrządu można odczytywać z górnej skali woltomierza o zakresie 0 – 1000.

- Obracając śrubą mikrometryczną kondensatora zmiennego znajdujemy na woltomierzu maksimum napięcia rezonansowego $U_{MAX} = U_{REZ}$.
- Prawym niebieskim pokrętkiem zasilacza dobieramy taki prąd anodowy zasilacza, aby przy napięciu rezonansowym $U_{MAX} = U_{REZ}$, wskazówka woltomierza znalazła się w zakresie 920-980 **działek** na najwyższej skali. Zapisujemy napięcie U_{MAX} i położenie

położenia śruby kondensatora pomiarowego l_{MAX} odpowiadające maksimum krzywej rezonansowej.

- g) **Wkręcamy** śrubę mikrometryczną zmniejszając napięcie do 900 działek, a następnie co 50 działek aż do 250 działek notujemy wskazania woltomierza U i położenia śruby kondensatora pomiarowego l – dla pojemności mniejszych od rezonansowej C_{REZ} .
- h) Powracamy do położenia rezonansu, a następnie **wykręcając** śrubę mikrometryczną zmniejszamy napięcie do 900 działek, a następnie co 50 aż do 250 działek i notujemy wskazania woltomierza U i położenia śruby kondensatora l – dla pojemności większych od rezonansowej C_{REZ} .

Propozycja zapisu wyników:

Położenie $l_{MAX} = \dots\dots\dots U_{MAX} = \dots\dots\dots$

Nazwa próbki i odległość między okładkami d [jednostka]	Położenie śruby mikrometrycznej l poniżej rezonansu [mm]	Napięcie U [działki]	Położenie śruby mikrometrycznej l powyżej rezonansu [mm]	Szerokość krzywej rezonansowej $\Delta l = l_P - l_L$

- i) Wyznaczamy wartości położenia śruby mikrometrycznej, gdy odczytane napięcie wynosi $U = U_{MAX} / \sqrt{2}$, dla prawej l_P i lewej l_L części krzywej rezonansowej i obliczamy ich różnicę Δl . Jest to szerokość połowkowa krzywej rezonansowej wyznaczona dla położenia śruby mikrometrycznej.
- j) Dla każdej próbki zapisujemy błędy systematyczne Δd , Δl , ΔU wynikające z dokładności przyrządów.
- k) Wyjmujemy dielektryk. i przed rozpoczęciem pomiarów dla każdej próbki sprawdzamy czy czujnik mikrometryczny wskazuje zero przy zetknięciu okładek kondensatora.
- l) Ustawiamy okładki kondensatora powietrznego w odległości d równej grubości poprzednio badanego dielektryka.
- m) Powtarzamy pomiary tak, jak w punktach c) ÷ j).
- n) Pomiary dla kolejnych płytek dielektryków o różnych grubościach i odpowiadających kondensatorów powietrznych wykonujemy zgodnie z punktami a) ÷ m).

Opracowanie wyników

- a) Na jednym papierze milimetrowym lub wydruku komputerowym sporządzamy wykresy krzywych rezonansowych $U(l)$ dla układu kondensatora powietrznego i kondensatora z dielektrykiem w funkcji położenia śruby mikrometrycznej l kondensatora zmiennego (C_Z). W kilku punktach na wykresie zaznaczamy niepewności pomiarowe.
- b) Obliczamy powierzchnię okładek płaskiego kondensatora pomiarowego wiedząc, że średnica okładki jest równa 95 mm i dla każdej próbki obliczamy pojemność powietrznego kondensatora $C_0 \pm \Delta C_0$, (wzór (13))
- c) Z wykresów odczytujemy położenia l_1 i l_2 (Rys. 1) śruby mikrometrycznej, dla których krzywe rezonansowe osiągają maksimum. Wyznaczamy różnicę $(l_1 - l_2)$ i obliczamy **przenikalność elektryczną** $\varepsilon' \pm \Delta\varepsilon'$ badanych dielektryków (równanie (16)) Niepewność pomiarową wyznaczamy metodą propagacji niepewności pomiarowych.

- d) Z wyznaczonej szerokości krzywej rezonansowej Δl obliczamy połówkową szerokość krzywej rezonansowej wyrażoną w zmianie pojemności układu ΔC ze wzoru analogicznego do wzoru (15), $\Delta C = A \cdot \Delta l = A(l_P - l_L)$.
- e) Obliczamy **tangens kąta strat dielektrycznych** $tg\delta \pm \Delta tg\delta$ badanych płytek dielektryka stałego (równanie (18)) oraz **urojoną składową przenikalności elektrycznej** $\epsilon'' \pm \Delta\epsilon''$ (19).
- f) Wiedząc, że częstotliwość generatora wynosi 1,2 MHz obliczamy przewodnictwo elektryczne σ (równanie (20)). Niepewności pomiarowe wyznaczamy metodą propagacji niepewności pomiarowych.
- g) Wartości, $\epsilon' \pm \Delta\epsilon'$, $\epsilon'' \pm \Delta\epsilon''$ i σ badanych dielektryków zbieramy **w tabeli** i porównujemy z wartościami literaturowymi.

Wnioski:

- O czym świadczy różnica szerokości krzywych rezonansowych dla powietrza i dla dielektryka stałego oraz co wynika z porównania kształtów krzywych rezonansowych badanych substancji ?
- Czy wyznaczone wartości przenikalności elektrycznych i przewodnictwa są w granicach niepewności pomiarowych zgodne z wartościami tablicowymi ?
- Ile razy przewodnictwo badanych dielektryków jest mniejsze od przewodnictwa np. miedzi ?
- Który z badanych dielektryków ma najmniejsze przewodnictwo i o czym to świadczy ?
- Jaki mechanizm powoduje straty dielektryczne ?