

Laboratorium Półprzewodniki, Dielektryki i Magnetyki

Ćwiczenie 7

Badanie materiałów metodą spektroskopii impedancyjnej

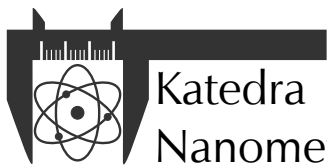
dr hab. inż. Tomasz Piasecki, prof. uczelni (tomasz.piasecki@pwr.edu.pl)

Zagadnienia do przygotowania

1. Algebra liczb zespolonych
2. Definicje, składowe i jednostki: impedancji, admitancji, równoważnej pojemności szeregowej i równoległej, równoważnej indukcyjności szeregowej i równoległej, współczynnika strat i dobroci
3. Metody pomiaru impedancji: metoda techniczna, mostek automatyczny, mostek samorównoważący się. Podaj ogólne zasady działania, schemat blokowy, sposób wyznaczenia impedancji z wyników pomiarów w tych metodach

Spis treści

1 Wstęp	1
1.1 Impedancja i admitancja	1
1.2 Wartości równoważne (ekwiwalentne) impedancji i admitancji dwójników	2
1.3 Współczynnik strat i dobroć	4
1.4 Metody pomiaru impedancji	4
2 Przebieg ćwiczenia	8
2.1 Przygotowanie stanowiska pomiarowego	8
2.2 Wyznaczenie impedancji przy jednej częstotliwości	10
2.3 Wyznaczenie widma impedancji - pomiar zautomatyzowany	11
2.4 Pomiar analizatorem impedancji	12



Katedra
Nanometrologii

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów
Politechnika Wrocławska

1 Wstęp

1.1 Impedancja i admitancja

Jeżeli do liniowego dwójnika przyłożone zostanie napięcie zmienne sinusoidalnie w czasie o stałej częstotliwości kołowej ω , o amplitudzie A_U i przesunięciu fazowym φ_U , to przez dwójnik ten popłynie prąd o tej samej częstotliwości, jaką ma napięcie, ale o amplitudach A_I i przesunięciu fazowym φ_I (rysunek 1).

Używając zespolonej notacji symbolicznej takie napięcia i prądy można zapisać jako:

$$U = A_U \cdot e^{j\varphi_U} \quad (1)$$

$$I = A_I \cdot e^{j\varphi_I} \quad (2)$$

gdzie U i I to, odpowiednio, zespolone napięcie i prąd. Moduł tych wartości zespolonych odpowiada amplitudzie a argument przesunięciu fazowemu napięcia lub prądu.

Impedancję elektryczną Z definiuje się jako iloraz tych dwóch wielkości zespolonych.

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{A_U}{A_I} e^{j(\varphi_U - \varphi_I)} = |Z| e^{j\varphi_Z} \quad (3)$$

Zwróć uwagę, że impedancja też jest liczbą zespoloną. Moduł impedancji $|Z|$ odpowiada wartości ilorazu amplitud napięcia i prądu, a argument φ_Z odpowiada różnicy przesunięć fazowych napięcia i prądu.

Jednostką impedancji jest Ω .

Impedancję, jak każdą liczbę zespoloną, można wyrazić też w formie algebraicznej podając jej część rzeczywistą i urojoną:

$$Z = R + jX \quad (4)$$

gdzie R to rezystancja a X to reaktancja. Ich jednostkami też jest Ω .

Jeśli szeregowo połączone jest kilka dwójników to wypadkowa impedancja takiego połączenia jest sumą impedancji łączonych dwójników, obliczaną zgodnie z zasadami algebry liczb zespolonych. Wynika z tego, że użycie impedancji jest wygodne, gdy rozpatruje się szeregowe połączenie elementów.

Admitancja Y jest odwrotnością impedancji.

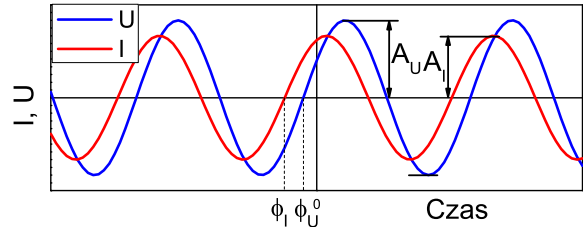
$$Y = \frac{1}{Z} = G + jB \quad (5)$$

Jej jednostką jest S (siemens). Wielkość tę można przedstawić w formie algebraicznej, w której część rzeczywista admitancji G to konduktancja, część urojona B to susceptancja. Ich jednostkami też, oczywiście, jest S.

Jeśli równolegle połączone jest kilka dwójników to wypadkowa admitancja takiego połączenia jest sumą admitancji łączonych dwójników, obliczaną zgodnie z zasadami algebry liczb zespolonych. Wynika z tego, że użycie admitancji jest wygodne, gdy rozpatruje się równoległe połączenie elementów.

Z definicji admitancji wynika, że:

$$Y = \frac{I}{U} = \frac{A_I}{A_U} e^{j(\varphi_I - \varphi_U)} = |Y| e^{j\varphi_Y} \quad (6)$$



Rysunek 1: Przebiegi napięcia i prądu w dwójniku, przez który płynie prąd przemienny

czyli, że moduł admitancji $|Y|$ jest równy jest stosunkowi amplitud prądu i napięcia płynącego przez dwójnik, a argument admitancji φ_Y równy jest różnicy przesunięć fazowych prądu i napięcia.

Z zależności tej też wynika, że przeliczanie impedancji na admitancję jest najprostsze, gdy znane są ich moduły i argumenty – wtedy bowiem najprościej jest obliczyć odwrotność liczby zespolonej:

$$|Y| = \frac{1}{|Z|}, \varphi_Y = -\varphi_Z \quad (7)$$

Jeśli znamy tylko części rzeczywiste i urojone tych wielkości elektrycznych to przeliczenie jednej w drugą można wykonać w następujący sposób:

$$Y = \frac{1}{R + jX} = \frac{R}{R^2 + X^2} - j \frac{X}{R^2 + X^2} \Rightarrow G = \frac{R}{|Z|^2}, B = -\frac{X}{|Z|^2} \quad (8)$$

$$Z = \frac{1}{G + jB} = \frac{G}{G^2 + B^2} - j \frac{B}{G^2 + B^2} \Rightarrow R = \frac{G}{|Y|^2}, X = -\frac{B}{|Y|^2} \quad (9)$$

gdzie $|Z|^2 = R^2 + X^2$ i $|Y|^2 = G^2 + B^2$.

Przeliczenia uproszczone w postaci $R = \frac{1}{G}$ czy $X = -\frac{1}{B}$ są możliwe **wyłącznie** dla dwójników o charakterze czysto rezystancyjnym bądź czysto reaktancyjnym, czyli wtedy, gdy druga składowa zespolonej wielkości elektrycznej opisującej dwójnik jest równa 0.

1.2 Wartości równoważne (ekwiwalentne) impedancji i admitancji dwójników

Innym ze sposobów na przedstawienie zmiennoprądowych właściwości elektrycznych dwójników jest podanie ich wartości równoważnych.

Jeśli mamy do czynienia z dwójnikiem o impedancji Z , zmierzonej przy częstotliwości kołowej ω , to zamiast podawać wartość impedancji można podać rezystancję rezystora R_s i pojemność kondensatora C_s , których hipotetyczne szeregowe połączenie będzie miało impedancję Z (rysunek 2a). Wartości te nazywamy wartościami równoważnymi: równoważną rezystancją szeregową i równoważną pojemnością szeregową.

Przyrównując zatem wartość impedancji Z ze wzorem na impedancję szeregowego połączenia R_s i C_s , czyli:

$$Z = R + jX = R_s - j \frac{1}{\omega C_s} \quad (10)$$

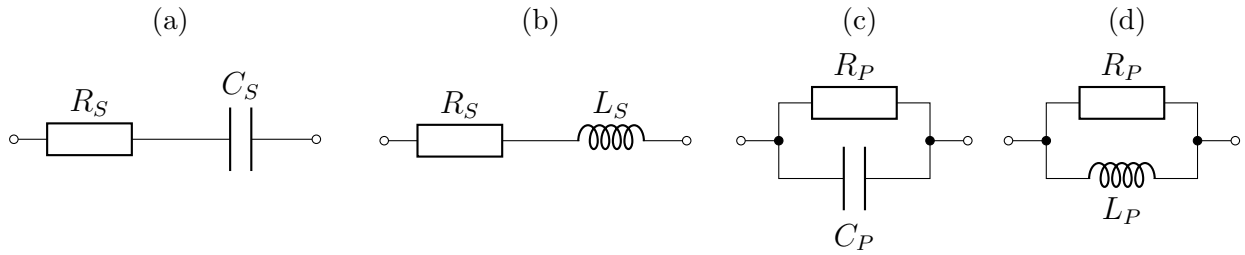
można obliczyć wartości równoważne:

$$R_s = R \quad (11) \quad C_s = -\frac{1}{\omega X} \quad (12)$$

Przedstawianie wyników pomiarów właściwości zmiennoprądowych w ten właśnie sposób, zamiast po prostu wartości impedancji, jest celowe w wielu wypadkach, szczególnie gdy dwójnikiem tym jest kondensator rzeczywisty. Na przykład, równoważna rezystancja szeregową (ESR - equivalent serial resistance) mierzona przy częstotliwości 1 MHz jest typowym parametrem podawanym przez producentów kondensatorów przeznaczonych jako magazyny ładunku w zasilaczach impulsowych.

Podobnie, wartość impedancji Z zmierzona przy częstotliwości kołowej ω można porównać z hipotetycznym szeregowym połączeniem rezystora o rezystancji R_s i induktora o indukcyjności L_s (rysunek 2b), nazywanych równoważną rezystancją szeregową i równoważną indukcyjnością szeregową:

$$Z = R + jX = R_s + j\omega L_s \quad (13)$$



Rysunek 2: Obwody ilustrujące wartości ekwiwalentne: a) rezystancję i pojemność szeregową, b) rezystancję i indukcyjność szeregową, c) rezystancję i pojemność równoległą, d) rezystancję i indukcyjność równoległą.

z czego wynika, że

$$R_s = R \quad (14) \quad L_s = \frac{X}{\omega} \quad (15)$$

Takie przedstawienie właściwości elektrycznych dwójników jest z kolei przydatne przy induktorach rzeczywistych. Na przykład równoważna indukcyjność szeregowa induktora rzeczywistego jest podstawą do obliczenia wartości przenikalności magnetycznej materiału rdzenia, na którym go nawinięto.

Szeregowe wielkości równoważne łatwo oblicza się na podstawie składowych impedancji, chodzi wszak o szeregowe połączenia, w których użycie impedancji skutkuje prostymi rachunkami. Jeśli trzeba je wyznaczyć na podstawie znanej wartości admitancji najprościej jest najpierw przeliczyć ją na impedancję.

Można się zatem też domyśleć, że admitancja z kolei będzie łatwo przeliczalna na wielkości równoważne ale równoległe.

Wartość admitancji Y dwójnika, zmierzoną przy częstotliwości kołowej ω , można przeliczyć na równoważną rezystancję równoległą R_p i równoważną pojemność równoległą C_p przyrównując wartość admitancji z admitancją hipotetycznego równoległego tym razem połączenia R_p i C_p (rysunek 2c):

$$Y = G + jB = \frac{1}{R_p} + j\omega C_p \quad (16)$$

z czego wynika, że:

$$R_p = \frac{1}{G} \quad (17) \quad C_p = \frac{B}{\omega} \quad (18)$$

Równoległa pojemność równoważna C_p kondensatora rzeczywistego jest wartością na podstawie której obliczyć można przenikalność elektryczną dielektryka znajdującego się pomiędzy okładkami kondensatora.

W wypadku induktorów rzeczywistych można również wartość admitancji Y , zmierzoną przy częstotliwości kołowej ω , przeliczyć na równoważną rezystancję równoległą R_p i równoważną indukcyjność równoległą L_p przyrównując ich hipotetyczne równoległe połączenie (rysunek 2d) ze zmierzoną admitancją:

$$Y = G + jB = \frac{1}{R_p} - j\frac{1}{\omega L_p} \quad (19)$$

skąd:

$$R_p = \frac{1}{G} \quad (20) \quad L_p = -\frac{1}{\omega B} \quad (21)$$

Matematycznie spójnym może być również przedstawianie właściwości elektrycznych elementów pojemnościowych za pomocą ekwiwalentnych indukcyjności i *vice versa*. Uzyska się

wówczas jednak ujemne wartości ekwiwalentne. W praktyce oznacza to zastosowanie niewłaściwych wartości ekwiwalentnych, na przykład użycie ekwiwalentnej pojemności szeregowej do przedstawienia właściwości induktora.

1.3 Współczynnik strat i dobroć

Współczynnik strat $\operatorname{tg} \delta$ zazwyczaj podawany jest w kontekście elementów o charakterze pojemnościowym czy samych dielektryków. Wyraża on stosunek energii pola elektrycznego, która została rozproszona i utracona w trakcie jego ładowania, do energii zmagazynowanej w tym kondensatorze w wyniku jego ładowania.

Współczynnik strat można obliczyć na podstawie właściwości elektrycznych dwójnika, jakim jest kondensator rzeczywisty na wiele sposobów:

$$\operatorname{tg} \delta = -\frac{R}{X} = \frac{G}{B} = \omega R_s C_s = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (22)$$

W wypadku elementów indukcyjnych zazwyczaj operuje się odwrotnością współczynnika strat, czyli dobrocią $Q = \frac{1}{\operatorname{tg} \delta}$. Tę również można dla elementu o charakterze indukcyjnym obliczyć na szereg sposobów:

$$Q = \frac{X}{R} = -\frac{B}{G} = \frac{\omega L_s}{R_s} = \frac{R_p}{\omega L_p} \quad (23)$$

Współczynnik strat $\operatorname{tg} \delta$ można również obliczyć na podstawie kąta strat δ . Kąt strat określa się z kolei na podstawie argumentu impedancji lub admitancji. Jeśli ten argument φ jest dodatni, to $\delta = 90 - \varphi$, czyli kąt strat jest dopełnieniem do 90° . Gdy argument ten jest ujemny to kąt strat określa się jako dopełnienie do -90° .

Współczynnika strat jest wielkością bezwymiarową i nieujemną.

1.4 Metody pomiaru impedancji

Impedancję dwójnika można mierzyć na wiele sposobów. W początkach elektroniki używano do tego czteroramiennych mostków zmiennoprądowych (np. mostka Wiena, Sheringa, Maxwella i inne). Metody te trudno jest zautomatyzować bądź dostosować do pomiarów impedancji w szerokim zakresie częstotliwości, niezbędnym w spektroskopii impedancyjnej.

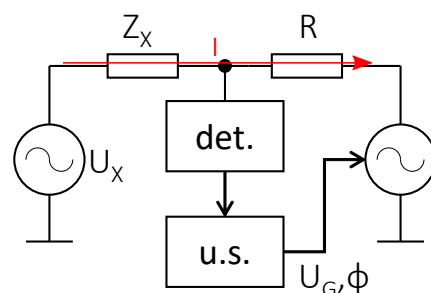
Poniżej przedstawiono kilka metod pomiaru impedancji, jakie można stosować współcześnie.

Mostek automatyczny

Mostek automatyczny de facto nie jest mostkiem a kompensatorem. Nazwa ta jednak przyjęła się przez analogię do dawnym metod mostków czteroramiennych. Schemat układu mostka automatycznego przedstawiono na rysunku 3.

Układ ten wyposażony jest w dwa generatory napięcia sinusoidalnie przemiennego o jednakowej częstotliwości ale o regulowanych amplitudach U_Z i U_G oraz wzajemnym przesunięciu fazowym napięć φ . Jeden generator dołączony jest do dwójnika badanego o impedancji Z_X , drugi do dwójnika wzorcowego R (zazwyczaj jest to rezystor).

Punkt środkowy mostka (kompensatora) dołączony jest do detektora zrównoważenia.



Rysunek 3: Schemat ideowy układu mostka automatycznego: det. - detektor zrównoważenia, u.s. - układ sterujący.

Zrównoważaniem nazywamy sytuację, w której napięcie w punkcie środkowym mostka wynosi 0. Równoważnie najłatwiej sobie wyobrazić w sytuacji, gdy Z_X byłoby dokładnie równe R . Oczywiście jest wtedy, że jeśli $U_G=U_Z$ a $\varphi = 180^\circ$ (czyli generator U_G generuje napięcie, którego chwilowe wartości są przeciwne do chwilowych wartości napięcia generatora U_X), to mostek będzie zrównoważony. Dla innych wartości Z_X zrównoważenie uzyska się przy innych parametrach generatora U_G .

Brak zrównoważenia sygnalizowany jest układowi sterującemu, który tak będzie regulował napięciem U_G i przesunięciem fazowym φ aby to zrównoważenie osiągnąć.

Detektor ten wykrywa zrównoważenie w sposób bezprądowy. Jeśli zatem mostek jest zrównoważony, to prąd przemienny o takiej samej wartości I popłynie zarówno przez impedancję nieznaną Z_X i wzorcową R . Jednocześnie, ponieważ napięcie w punkcie środkowym mostka równe jest 0, to napięcia na Z_X i R są znane i równe napięciom, odpowiednio, U_X i U_G . Przyjmując, że przesunięcie fazowe napięcia z generatora U_X wynosi 0 można napisać, że:

$$I = \frac{U_X}{Z_X} = -\frac{U_G \cdot e^{j\varphi}}{R} \quad (24)$$

a skoro $-1 = e^{-j\pi}$ to

$$Z_X = \frac{U_G}{U_X} e^{j(\pi-\varphi)} \quad (25)$$

Wartość nieznanej impedancji Z_X określa się zatem pośrednio, przez znajomość wartości napięć z generatorów i wzorca R .

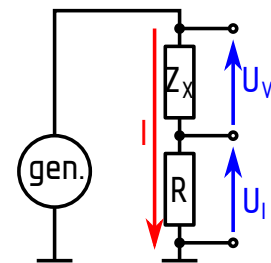
Mimo pozornej prostoty układu mostka automatycznego jego praktyczna realizacja pozwalająca na pomiar impedancji w szerokim zakresie częstotliwości jest złożona. Wymagane jest użycie precyzyjnych, szerokopasmowych generatorów, precyzyjnego i również szerokopasmowego detektora zera, oraz implementacja odpowiednich algorytmów w układzie sterującym pozwalających na szybkie i skuteczne równoważenie mostka. Trudności te pozwala rozwiązać współczesna elektronika, przez np. stosowanie generatorów z bezpośrednią cyfrową syntezą (DDS) bądź opartych na sterowanej cyfrowo pętli sprzężenia fazowego (PLL) czy stosowanie mikroprocesorowych układów sterujących.

Metoda techniczna pomiaru impedancji

Metoda techniczna pomiaru impedancji przypomina tę, którą znasz z pomiarów rezystancji. Różnica leży w sposobach zasilania układu pomiarowego i odczytu wartości elektrycznych.

W metodzie technicznej pomiaru impedancji stosuje się szeregowe połączenie nieznanej impedancji Z_X z rezystorem o znanej rezystancji R . Połączenie to zasilane jest z generatora napięcia przemiennego, który wymusza przepływ prądu przemiennego o natężeniu I , jednakowego w obu połączonych elementach.

Mierząc napięcia na obu połączonych elementach można określić wielkości służące do wyznaczenia impedancji Z_X . Napięcie U_V odpowiada bezpośrednio napięciu na badanym dwójniku, natomiast napięcie U_I jest napięciem, jakie powoduje przepływ prądu I przez rezystor R .



Rysunek 4: Schemat ideowy metody technicznej pomiaru impedancji

$$U_I = R \cdot I \quad (26)$$

co pozwala na określenie wartości natężenia prądu I . Wartość impedancji można zatem uzyskać obliczając:

$$Z_X = \frac{U_V}{I} = \frac{U_V}{U_I} R \quad (27)$$

Mierząc jedynie amplitudy napięć U_V i U_I (na przykład za pomocą multimetrów) można określić jedynie moduł impedancji $|Z_X|$ (patrz równanie (3)). Pełnię informacji o mierzonej impedancji można uzyskać mierząc te napięcia w sposób tzw. wektorowy, czyli poznając i amplitudę i przesunięcia fazowe tych napięć, co pozwala na przedstawienie ich w postaci wartości zespolonych w metodzie symbolicznej. Przedstawione zostaną dwie metody na uzyskanie takiej informacji: analiza odpowiedzi częstotliwościowej oraz metoda dopasowania funkcji.

Analiza odpowiedzi częstotliwościowej Jedną z metod pozwalających na uzyskanie informacji wektorowej o napięciu sinusoidalnie zmiennym jest metoda analizy odpowiedzi częstotliwościowej (FRA - frequency response analysis).

W metodzie tej sygnał analizowany najpierw mnożony jest przez napięcia pochodzące z tego samego generatora, który służył do generowania napięcia zasilającego układ pomiarowy w metodzie technicznej, oraz przez napięcie przesunięte dokładnie o 90° w fazie w stosunku do niego. Takie dwa sygnały są następnie poddawane całkowaniu. Mnożenie i całkowanie może być realizowane układowo w układach mnożących i całkujących bądź cyfrowo w cyfrowym układzie do przetwarzania sygnałów.

Wartości iloczynów takich sygnałów można obliczyć korzystając ze znanych tożsamości trygonometrycznych:

$$A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot A_G \cdot \sin(\omega t) = \frac{A \cdot A_G}{2} [\cos(\varphi) - \cos(2\omega t + \varphi)] \quad (28)$$

$$A \cdot \sin(\omega t + \varphi) \cdot A_G \cdot \cos(\omega t) = \frac{A \cdot A_G}{2} [\sin(\varphi) + \sin(2\omega t + \varphi)] \quad (29)$$

Oba tak uzyskane sygnały są sumą wartości stałej, zależnej wyłącznie od amplitud oraz przesunięcia fazowego φ oraz składowej pulsującej z częstotliwością 2ω .

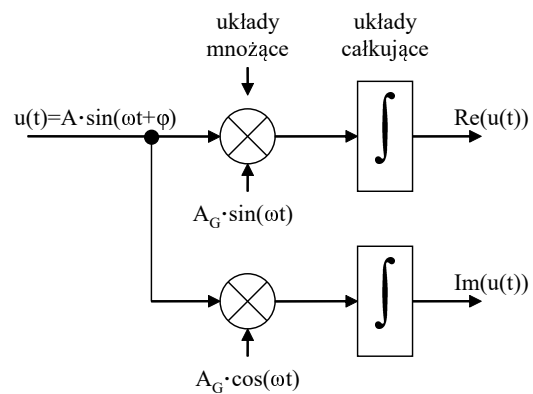
Układ całkujący następnie uśredni te sygnały sprowadzając je do ich wartości średnich. Odpowiednio będą to:

$$\frac{A_G}{2} A \cos(\varphi) \propto \text{Re}(U) \quad (30)$$

$$\frac{A_G}{2} A \sin(\varphi) \propto \text{Im}(U) \quad (31)$$

które proporcjonalne są do części rzeczywistej i urojonej zespolonego napięcia U .

Metoda dopasowania funkcji Metoda dopasowania funkcji realizowana jest już wyłącznie w układach cyfrowych. Aby ją użyć należy spróbkować chwilowych wartości analizowanego napięcia na przykład za pomocą oscyloskopu cyfrowego bądź modułu przetworników analogowo-cyfrowych współpracujących z komputerem osobistym.



Rysunek 5: Przetwarzanie sygnału w metodzie analizy odpowiedzi częstotliwościowej.

Tak uzyskaną cyfrową informację o przebiegu sygnału poddaje się następnie analizie przez dopasowanie do niej metodą najmniejszych kwadratów odpowiednich funkcji, na przykład funkcji sinusoidalnej:

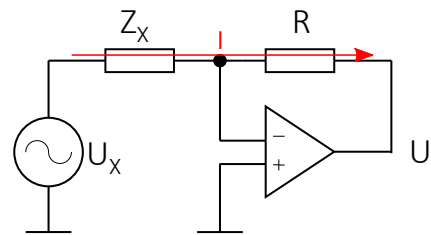
$$y(t) = y_0 + A \sin(\omega t + \varphi) \quad (32)$$

W ten sposób cyfrowo można uzyskać informacje o amplitudzie i przesunięciu fazowym przebiegu sinusoidalnego.

Mostek samorównoważący się

Wracając do metod pomiaru impedancji. Szczególnym rodzajem metody technicznej, czyli polegającej na osobnych pomiarach napięcia i prądu płynącego przez badany dwójnik, jest tak zwany mostek samorównoważący się. Schemat ideowy układu mostka samorównoważącego się przedstawiono na rysunku 6.

Mostek samorównoważący się składa się z generatora napięcia sinusoidalnego o kontrolowanej amplitudzie U_X oraz przetwornika prąd-napięcie zbudowanego przy użyciu wzmacniacza operacyjnego, którego przełożenie ustalone jest za pomocą rezystora R o znanej wartości. Pomiedzy te elementy dołącza się badany dwójnik o nieznannej impedancji Z_X .



Rysunek 6: Schemat ideowy układu mostka samorównoważącego się

Mostek samorównoważący się składa się z generatora napięcia sinusoidalnego o kontrolowanej amplitudzie U_X oraz przetwornika prąd-napięcie zbudowanego przy użyciu wzmacniacza operacyjnego, którego przełożenie ustalone jest za pomocą rezystora R o znanej wartości. Pomiedzy te elementy dołącza się badany dwójnik o nieznannej impedancji Z_X . Wzmacniacz operacyjny w układzie z ujemnym sprzężeniem zwrotnym, pod warunkiem pracy w reżimie liniowym, dzięki istnieniu sprzężenia zwrotnego poprzez zmiany swojego napięcia wyjściowego wymusza utrzymanie zerowej różnicy potencjałów pomiędzy swoimi wejściami.

Ponieważ wejście nieodwracające jest dołączone do masy układu, na wejściu odwracającym będzie utrzymywany potencjał masy. Jest to tak zwana masa pozorną. Utrzymywanie potencjału masy w tym węzle układu przypomina sytuację zrównoważenia w mostku automatycznym, z tym, że w wypadku mostka samorównoważącego się jest osiągnięta nie przez aktywne sterowanie generatorami a dzięki właściwościom wzmacniacza operacyjnego.

Jednocześnie przyjmuje się, że impedancja wejściowa wzmacniacza jest tak duża, że prądy wejściowe wzmacniacza można zaniedbać. Zatem całość prądu I , płynącego przez badany dwójnik Z_X przepływa również przez rezystor o znanej wartości R , wywołując na nim spadek napięcia proporcjonalny do I .

Ponieważ jeden koniec rezystora R jest na potencjale masy (pozorna masa!) to na wyjściu U_I będzie utrzymywane napięcie równe $-R \cdot I$. Pomiar tego napięcia pozwala zatem pośrednio określić wartość chwilową prądu płynącego przez badany dwójnik.

Z kolei wartość chwilową napięcia na dwójniku Z_X dokładnie odpowiada napięciu generatora U_X , znów z powodu istnienia pozornej masy w układzie.

Układ taki jest prostszy w konstrukcji od mostka automatycznego. W porównaniu do metody technicznej zaletą jest pełna kontrola nad napięciem, jakim polaryzuje się badany dwójnik Z_X .

Wady wynikają wyłącznie z ograniczeń częstotliwościowych wzmacniaczy operacyjnych. Typową granicą stosowalności mostka samorównoważącego w tej postaci jest częstotliwość około 100 kHz - 1 MHz, zależnie od rozwiązania układowego. Powyżej tej częstotliwości konieczne staje się kompensowanie pasożytniczych efektów wynikających z ograniczeń częstotliwościowych wzmacniaczy operacyjnych.

Oczywiście, uzyskane w ten sposób napięcia muszą być odpowiednio zmierzone tak, aby uzyskać informacje o ich amplitudach i fazach. Robić to można podobnie, jak w wypadku metody technicznej.

2 Przebieg ćwiczenia

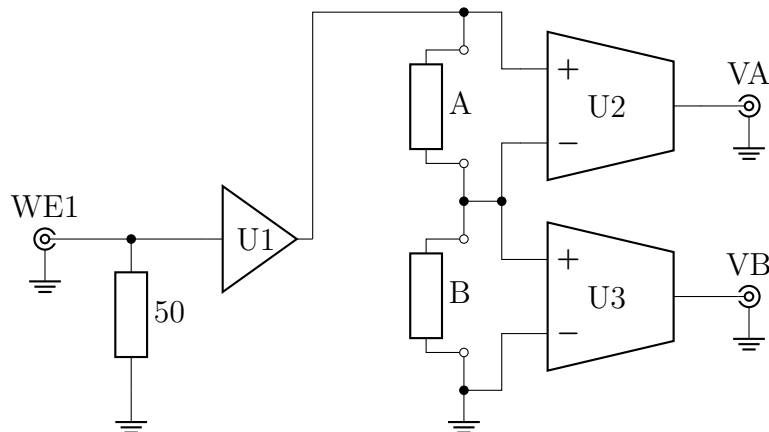
W trakcie ćwiczenia dokonywany jest pomiar widm częstotliwościowych obiektów wskazanych przez prowadzącego w podanych zakresach częstotliwości i odpowiedniej amplitudzie. Pomiarów można dokonywać przy użyciu analizatora impedancji bądź układem zestawionym z generatora funkcyjnego, makiety z elementami pozwalającymi mierzyć impedancję metodą techniczną bądź mostka samorównoważającego się oraz oscyloskopu.

2.1 Przygotowanie stanowiska pomiarowego

Stanowisko pomiarowe składa się z zasilacza, generatora funkcyjnego, oscyloskopu i makiety dydaktycznej umożliwiającej pomiar impedancji klasyczną metodą techniczną oraz metodą mostka samorównoważającego się. Użyj metody wskazanej przez prowadzącego.

Metoda techniczna

Schemat ideowy makiety dydaktycznej do pomiaru impedancji metodą techniczną przedstawiono na rysunku 7.



Rysunek 7: Schemat ideowy makiety dydaktycznej do pomiaru impedancji metodą techniczną.

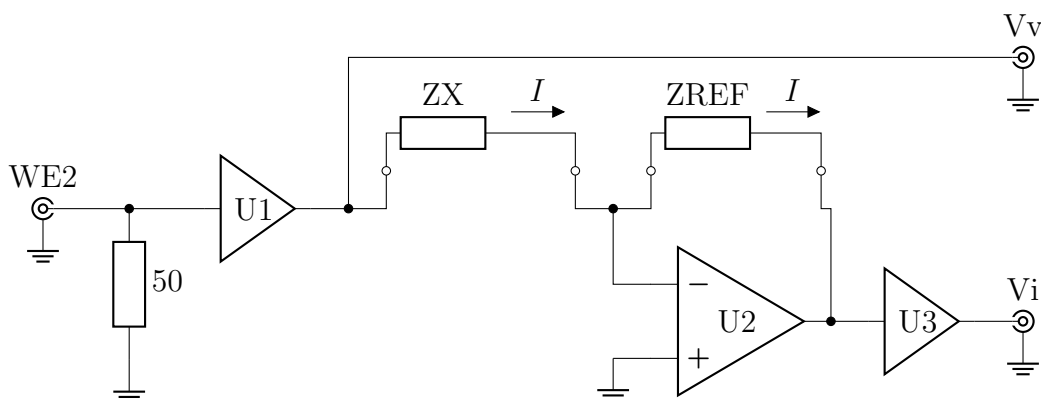
Napięcie z wejścia *WE1* buforowane jest wzmacniaczem *U1*. Podane jest ono na szeregowo połączone elementy *A* i *B*. Jednym z nich jest dwójnik, którego impedancję badamy, drugim rezystor. Elementy te umieszcza się w gniazdach w mackiecie. Napięcia na tych elementach mierzone są wzmacniaczami różnicowymi *U2* i *U3* i podawane na wyjścia *VA* i *VB*.

Przygotowanie makiety do pracy:

1. Podłącz do gniazd *A* i *B* wskazane przez prowadzącego: badany element i rezystor. Zanotuj wartość rezystancji tego rezystora.
2. Zasil makiety symetrycznym napięciem $\pm 15V$ z ograniczeniem prądowym 100 mA. Właściwe zasilanie makiety sygnalizowane jest zaświeceniem się diod LED czerwonej i niebieskiej.
3. Wyjście sygnałowe generatora funkcyjnego dołącz do wejścia *WE1*.
4. Wyjście synchronizacji generatora funkcyjnego dołącz do wejścia wyzwalania zewnętrznego *EXT* oscyloskopu.
5. Wyjścia *VA* i *VB* makiety dołącz do wejść sygnałowych oscyloskopu. Nie ma znaczenia kolejność elementów *A* i *B* czy przyporządkowanie kanałów sygnałowych oscyloskopu. Sam o niej zadecyduj.
6. Prześledź drogę sygnałów elektrycznych i zanotuj, na którym kanale oscyloskopu rejestrowane jest napięcie na badanym elemencie a na którym napięcie na rezystorze.
7. Przejdź do sekcji „Przygotowanie oscyloskopu do pomiaru”.

Mostek samorównoważący się

Schemat ideowy makiety dydaktycznej do pomiaru impedancji metodą mostka samorównoważającego się przedstawiono na rysunku 8.



Rysunek 8: Schemat ideowy makiety do pomiaru impedancji metodą mostka samorównoważającego się.

Napięcie z wejścia $WE2$ buforowane jest wzmacniaczem $U1$. Polaryzuje ono jedno wyprowadzenie badanego elementu ZX i jest dostępne do pomiaru na wyjściu Vv . Drugie wyprowadzenie badanego elementu znajduje się na potencjale masy, dzięki wirtualnej masie zapewnianej przez wzmacniacz $U2$. W obwodzie sprzężenia zwrotnego wzmacniacza $U2$ znajduje się element $ZREF$ będący rezystorem wzorcowym. Wyjście wzmacniacza $U2$, dodatkowo wzmocnione $\times 1$, $\times 10$ lub $\times 100$ wzmacniaczem $U3$ jest podane na wyjście Vi . Wyboru wzmocnienia dokonuje się przez przestawienie zworki.

Pamiętaj, że napięcie na wyjściu $U2$ a co za tym idzie na złączu Vi jest równe $-I \cdot ZREF$. Mierzac to napięcie oscyloskopem warto jest skorzystać z możliwości odwrócenia polaryzacji przebiegu, jaką daje opcja *Invert* w oscyloskopie (o tym poniżej, w sekcji dotyczącej przygotowania oscyloskopu).

Przygotowanie makiety do pracy:

1. Podłącz do gniazda ZX badany element a do gniazda $ZREF$ rezystor, wskazane przez prowadzącego. Zanotuj wartość rezystancji tego rezystora.
2. Wstępnie ustal wzmocnienie wzmacniacza $U3$ zwróć na wartość $1\times$.
3. Zasil makiety symetrycznym napięciem $\pm 15V$ z ograniczeniem prądowym 100 mA. Właściwe zasilanie makiety sygnalizowane jest zaświeceniem się diod LED czerwonej i niebieskiej.
4. Wyjście sygnałowe generatora funkcyjnego dołącz do wejścia $WE2$.
5. Wyjście synchronizacji generatora funkcyjnego dołącz do wejścia wyzwalania zewnętrznego EXT oscyloskopu.
6. Wyjścia Vv i Vi makiety dołącz do wejść sygnałowych oscyloskopu. Zanotuj, na którym kanale oscyloskopu rejestrowane jest napięcie na badanym elemencie a na którym wyjście mostka samorównoważającego się.

Przygotowanie oscyloskopu do pomiaru

Następnie, niezależnie od wybranej metody pomiaru, należy ustawić właściwie przygotować oscyloskop do pomiaru:

1. Włącz oba wejścia oscyloskopu i wybierz na nich sprzężenie zmiennoprądowe, mnożnik $1\times$ (przycisk z numerem kanału, *Coupling=AC*, *Probe=1X*).
2. Tam, gdzie to potrzebne włącz opcję *Invert*, która powoduje odwrócenie polaryzacji przebiegu.

3. Ustal wyzwalanie normalne, na podstawie zbocza narastającego na sygnale na wejściu synchronizacji (przycisk *Trigger Mode—Coupling, Mode=Edge, Source=EXT, Slope=narost, Sweep=Normal*).
4. ustalić poziom wyzwalania na około 1 V (pokrętko Level) Uwaga! **Naciśnięcie przycisku AUTOSCALE powoduje zmiany parametrów wyzwalania oscyloskopu!!!** Zaleca się nie korzystać z tej funkcji, bo jego użycie będzie wymagało ponownego ręcznego ustawienia wielu opcji. Jeśli go użyjesz to sprawdź poprawność wszystkich ustawień wymienionych w powyższej liście.

2.2 Wyznaczenie impedancji przy jednej częstotliwości

Pomiar polega na wyznaczeniu wartości impedancji przy podanej przez prowadzącego częstotliwości na podstawie kształtu przebiegów obserwowanych na oscyloskopie. Używa się metody dopasowania funkcji sinus do zarejestrowanych oscylogramów.

Aby wykonać ten pomiar należy:

1. Ustawić na generatorze funkcyjnym parametry zgodnie z informacjami podanymi przez prowadzącego i włączyć wyjście generatora.
2. Ustalić podstawę czasu tak, aby jeden okres sygnału przypadła na około 2-3 podziałki na ekranie oscyloskopu.
3. Ustalić wzmocnienia na kanałach oscyloskopu na największe przy których przebiegi mieszczą się jeszcze na ekranie.
4. Odczytać oscylogramy programem DSO3000, zaimportować i wykreślić dane w programie Origin, używając **osobnych wykresów** dla napięć U_V i U_I . Wykres należy przedstawić w postaci scatter, przy czym aby punkty nie nakładały się na siebie należy skorzystać z opcji Skip Points w zakładce Drop Lines w oknie właściwości linii wykresu Plot Details.
5. Dopasować funkcje za pomocą programu Origin (Analysis-Fitting-Nonlinear Curve Fit) wybierając funkcję Sine do przebiegów chwilowych wartości obu napięć. Wykresy powinny wyglądać w sposób zbliżony do przedstawionego na rysunku 9.
6. Odczytać parametry dopasowanych funkcji i obliczyć wartości impedancji, adekwatnie do metody stosowanej w pomiarze

Podana funkcja dopasowująca w programie Origin różni się nieco zapisem, w stosunku do (32) i jest dana zależnością:

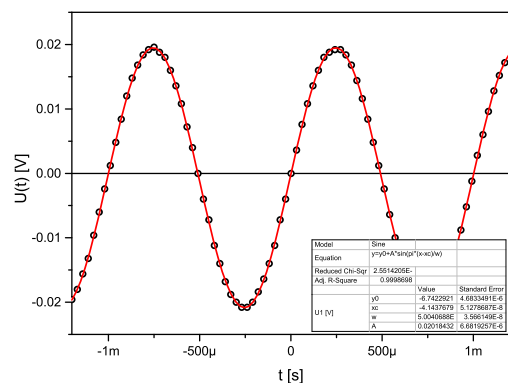
$$y = y_0 + A \sin\left(\pi \frac{x - x_c}{w}\right) \quad (33)$$

O ile składową stałą y_0 i amplitudę A można odczytać bezpośrednio o tyle przesunięcie fazowe wymaga pewnych przekształceń. Zmienną niezależną wykresów (x), do których wykonano dopasowanie jest czas t . Podstawiając zatem t zamiast x i przekształcając (33) można uzyskać

$$y = y_0 + A \sin\left(2\pi \frac{1}{2w}t - \pi \frac{x_c}{w}\right) \quad (34)$$

i na jej podstawie wyznaczyć przesunięcie fazowe porównując ze sobą (32) i (34) stwierdzając, że

$$\varphi = -\pi \frac{x_c}{w} \quad (35)$$



Rysunek 9: Przykładowy przebieg zmienności wartości chwilowej napięcia z dopasowaną do niego funkcją sinus.

Oblicz amplitudę prądu na podstawie parametrów napięcia U_I i znając wartość rezystora do pomiaru prądu w metodzie technicznej lub rezystora w sprzężeniu zwrotnym w mostku samorównoważącym się. Weź pod uwagę to, na którym kanale oscyloskopu mierzysz który przebieg oraz to, czy stosowane było dodatkowe wzmocnienia (przy pomiarze metodą mostka samorównoważającego się) oraz czy używano odwrócenia polaryzacji sygnału w oscyloskopie.

Na podstawie amplitud i przesunięć fazowych przebiegów napięcia i prądu należy określić wartość impedancji, korzystając z (3).

W sprawozdaniu należy umieścić wykresy zarejestrowanych przebiegów z dopasowanymi funkcjami sinus, odczytane wartości oraz obliczenia impedancji.

2.3 Wyznaczenie widma impedancji - pomiar zautomatyzowany

Pomiaru zautomatyzowanego dokonuje się wykorzystując program „ImpedanceMeter DSO”. Przed rozpoczęciem pomiaru należy podać wartość rezystora służącego do pomiaru prądu oraz przedział częstotliwości, w którym pomiar będzie wykonany. Program ten po uruchomieniu pomiaru automatycznie steruje generatorem funkcyjnym i oscyloskopem wykonując dla każdego punktu częstotliwości następujące czynności:

1. ustalenie częstotliwości pobudzenia w generatorze i podstawy czasu oscyloskopu adekwatną do tej częstotliwości,
2. regulację wzmocnienie kanałów oscyloskopu,
3. odczyt zarejestrowanych przebiegów napięć na kanałach A i B oscyloskopu,
4. dopasowanie funkcji sinusoidalnych zgodnych z zapisem podanym w (33).

Przed rozpoczęciem pomiaru należy ustalić w programie parametry pomiaru. O ile prowadzący nie wskaże inaczej:

- amplitudę napięcia pobudzającego wpisz taką, jaka była przy pomiarze ręcznym,
- zakres częstotliwości pomiaru od 10 Hz do 100 kHz,
- liczba punktów na dekadę od 5 do 10,
- wpisz wartość rezystancji rezystora służącego do pomiaru prądu,
- dla zmniejszenia poziomu zakłóceń w oscyloskopie może być użyta funkcja uśredniania, ustawienie $4\times$ zazwyczaj jest optymalne.

Po ustaleniu parametrów należy przełączyć się do karty *Pomiar* i go rozpocząć. Obserwuj wskazania oscyloskopu i przebiegi rejestrowane przez program. Punktami na wykresach zaznaczone są punkty danych z oscyloskopu, a liniami na wykresach dopasowane funkcje sinusoidalne.

W tabeli zapisywane będą parametry, takie jak częstotliwość, wartość rezystora do pomiaru prądu, oraz parametry funkcji sinus w , A , x_c oraz y_0 , jak w równaniu (33), które używane były przy pomiarze ręcznym, rejestrowane dla kanału A i B oscyloskopu. Wartość w jest taka sama dla obu kanałów.

O ile masz teraz wystarczająco dużo czasu do końca zajęć (co najmniej pół godziny), to przed rozpoczęciem analizowania uzyskanych wyników rozpocznij zadanie 2 z punktu 2.4. Jego realizacja wymaga sporadycznego poświęcenia uwagi, przeprowadzaj go w „międzyczasie”. Jeżeli czasu jest mało, wykonaj jedynie zadanie 1 z punktu 2.4.

Wracając do bieżącego zadania. Wyniki pomiaru można skopiować do schowka (do wklejenia do arkusza kalkulacyjnego lub Origin) bądź zapisać w postaci pliku .txt, który można zaimportować. Po umieszczeniu ich w programie Origin trzeba wykonać następujące czynności:

1. Oceń prawidłowość pomiaru. Największą trudnością jest to, że moduł impedancji badanego obiektu zmienia się wraz z częstotliwością, przez co amplitudy napięć A_A i A_B też się zmieniają. Sprawdź, czy w żadnym z punktów pomiaru nie są one mniejsze od 2 mV lub większe od 8 V. Jeśli tak, spróbuj innych parametrów pomiaru aby wyniki spełniały te kryteria. Zmienić można:

- amplitudę napięcia z generatora, która proporcjonalnie zmieni wszystkie wartości amplitud napięć na oscyloskopie,
- rezystor na taki o innej rezystancji, co spowoduje zmianę stosunku napięcia na rezystorze do napięcia na badanej próbce,
- dodatkowe wzmocnienie przy pomiarze metodą mostka samorównoważającego się.

Jeśli masz wątpliwości co zrobić, skonsultuj się z prowadzącym.

2. Oblicz za pomocą programu Origin, wedle zależności identycznych, jak w pomiarze ręcznym, wartości modułu impedancji i argumentu impedancji dla wszystkich częstotliwości.
3. Wykreśl wykres Bodego impedancji. Wykres Bodego składa się z dwóch wykresów: $|Z| = f(f)$ z obiema osiami logarytmicznymi, oraz $arg(Z) = f(f)$ z logarytmiczną osią częstotliwości.
4. Oblicz również dwie wskazane przez prowadzącego wartości i też wykreśl ich zależność od częstotliwości z logarytmiczną skalą. Do wyboru są: $|Y|$, $arg(Y)$, R , X , G , B , R_S , C_S , L_S , R_P , C_P , L_P , $tg(\delta)$, C' , C'' lub inne.

W sprawozdaniu należy umieścić wskazane widma impedancji czy innych wielkości pochodnych od impedancji. Wykresy te można porównać z tymi, które da się wyrysować w programie ZView.

2.4 Pomiar analizatorem impedancji

Pomiar wykonywany za pomocą analizatora impedancji jest zautomatyzowany. Do jego przeprowadzania służy program *Impedancer*. Rolę analizatora impedancji pełni mostek RLC GW Instek LCR-8101.

Stanowisko przygotowane jest do pomiaru tej samej próbki, którą bada się w poprzednich punktach z użyciem makiety dydaktycznej, w temperaturze pokojowej bądź zadanej przez umieszczenie próbki na stoliku termoelektrycznym.

Pomiar widma impedancji

Mierzoną próbkę połączyć należy z przewodami z zaciskami krokodylkowymi z analizatorem impedancji. Po uruchomieniu programu *Impedancer* z menu *File* należy wybrać opcję *Open measurement* i otworzyć przygotowany scenariusz pomiaru impedancji tym urządzeniem, umieszczony w folderze Dokumenty lub na Pulpicie. Uruchomienie pomiaru następuje po wydaniu polecenia *Run* z menu *Run*. Podać należy nazwę pliku, w którym zapisane będzie zmierzone widmo impedancji. W razie potrzeby ponownego pomiaru ponownie wywołuje się polecenie *Run*.

Zadania do wykonania

Jeśli prowadzący ćwiczenia nie poleci inaczej, to przeprowadź następujące pomiary:

1. Zmierz widmo impedancji próbki w temperaturze pokojowej. Zapisany plik z wynikiem pomiaru (rozszerzenie nazwy pliku .z) można otworzyć w programie ZView przez podwójne kliknięcie na pliku. Porównaj wykres Bodego impedancji w ZView z wynikami, jakie osiągnięte były za pomocą makiety. Nieco szczegółów dotyczących obsługi ZView jest w instrukcji do ćwiczenia „Analiza właściwości zmiennoprądowych materiałów i elementów elektronicznych”.
2. Umieść próbkę na stoliku termoelektrycznym, przykryj gąbką i obciążnikiem. Wykonaj szereg pomiarów widm impedancji dla 5 - 10 temperatur z przedziału od 10 °C do 70 °C. Wyniki zachowuj w pliku, którego nazwa zawiera informację o temperaturze, w której znajdowała się próbka. Rozpoczynaj pomiar widma impedancji po ustabilizowaniu się wybranej temperatury.