Laboratorium

Techniki ultradźwiękowej w diagnostyce medycznej

Ćwiczenie 4

„Badanie właściwości przetworników ultradźwiękowych”

Opracowali:

- prof. nzw. dr hab. inż. Krzysztof Kałużyński
- dr inż. Jakub Żmigrodzki

Zakład Inżynierii Biomedycznej,
Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej,
Wydział Mechatroniki Politechniki Warszawskiej.

Warszawa, 2015

1. Cel ćwiczenia.

W ramach ćwiczenia studenci zapoznają się z podstawowymi właściwościami elektrycznymi piezoelektrycznych przetworników elektroakustycznych oraz praktycznymi sposobami ich pomiaru.

2. Wymagane wiadomości.

1. Znajomość następujących pojęć (oraz zależności pomiędzy nimi) z dziedziny elektrotechniki:
   a) impedancja,
   b) admitancja,
   c) rezystancja,
   d) konduktancja,
   e) reaktancja,
   f) susceptancja.
2. Właściwości szeregowego i równoległego obwodu rezonansowego RLC.

3. Literatura.

- A. Arnau, „Piezoelectric Transducers and Application”, Springer, 2004, Berlin;
- Grażyna Łypacewicz, „Piezoelektryczne układy nadawczo-odbiorcze dla celów ultrasonografii”, Instytut Podstawowych Problemów Technicznych PAN, 1995, Warszawa;
- M. Prokic, „Piezoelectric Transducers Modeling and Characterization”, MPI, 2004;
- Z. Jagodziński, „Przetworniki Ultradźwiękowe”, WKŁ, 1997;
- E. Kuntsal, „Accuracy issues on the calculation of efficiency for piezoelectric underwater transducers”, OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition, Vol. 2, 11-14 sept. 2000, pp.:1293-1297;
- www.ferroperm-piezo.com;

4. Wstęp

Przetwornikami elektroakustycznymi nazywamy elementy przetwarzające energię elektryczną w energię mechaniczną fali akustycznej lub na odwrót. Ze względu na wykorzystywane zjawisko fizyczne można wyróżnić wiele typów przetworników elektroakustycznych np.:

- elektromagnetyczne,
- magnetoelektryczne,
- magnetostrykcyjne,
- pojemnościowe,
- elektrostatyczne,
- piezoelektryczne,

Niniejsze ćwiczenie jest poświęcone właściwościom elektrycznym przetworników piezoelektrycznych. Cechą charakterystyczną takich przetworników jest zdolność do wytwarzania pola elektrycznego na skutek odkształcania elementu. Ze względu na fakt, iż zjawisko to jest odwracalne, przetworniki piezoelektryczne mogą być stosowane zarówno jako nadajniki jak i odbiorniki fali mechanicznej. Właściwości piezoelektryczne wykazują niektóre materiały ceramiczne, kryształy oraz polimery.

W technice ultradźwiękowej najczęściej stosowane są różne odmiany materiału PZT ($PbTiO_3$). Jest to materiał ceramiczny wynaleziony w Japonii około 1952 roku. Materiał ten oprócz właściwości piezoelektrycznych wykazuje również cechy piroelektryczne i ferroelektryczne. W tab.1 przedstawiono parametry fizyczne i stałe materiałowe przykładowego materiału z rodziny PZT.

Tabela 1: Wybrane parametry materiału Pz27 (PZT-5A) firmy Ferroperm piezoceramics. Indeks t oznacza stałą dla wyznaczoną dla drgań grubościowych.

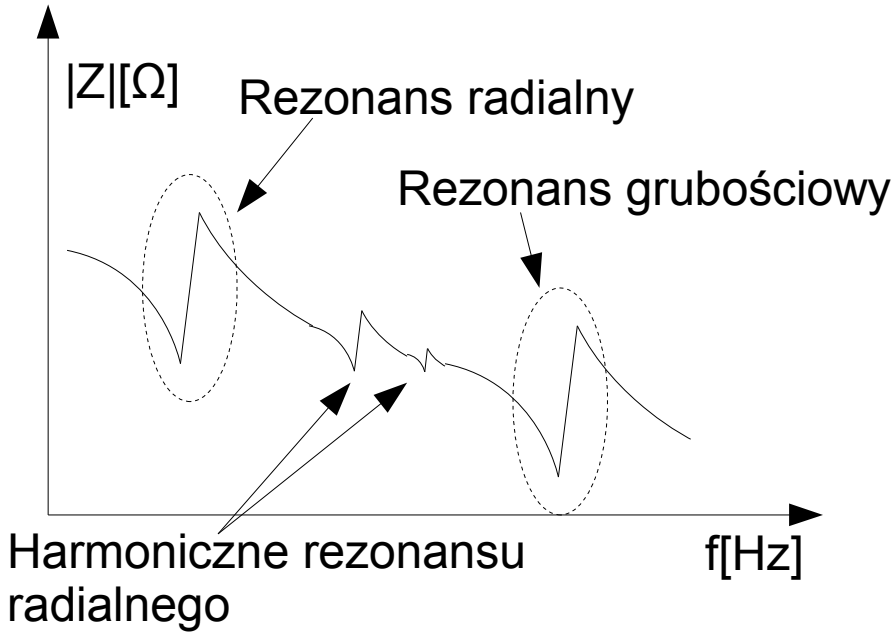
Symbol	Wartość	Komentarz
$\varepsilon_{r,t}$	1800	Względna przenikalność elektryczna.
tan δ	$17 \cdot 10^{-3}$	Tangens strat związany z przewodnością materiału (wyznaczony przy f=1kHz).
Tc [ºC]	350	Temperatura Curie.
k_t	0,47	Współczynnik sprzężenia elektromechanicznego (drgania grubościowe).
N_t **[Hz·m]**	1950	Stała rezonansowa (drgania grubościowe) $f_r=N_t/d$.
ρ [kg/m^3]	7700	Gęstość.
υ	0,39	Współczynnik Poissona.
$Q_{m,t}$	80	Mechaniczna dobroć przetwornika.
c [m/s]	3900	Prędkość propagacji fali mechanicznej (wartość wyliczona pośrednio – $c=2 \cdot N_t$).
Z[kg·m^{-2}·s^{-1}]	$30{,}06 \cdot 10^6$	Impedancja akustyczna (wartość wyliczona pośrednio – $Z=c \cdot q$).

5. Wąskopasmowy elektryczny model zastępczy.

Znajomość parametrów elektrycznych przetwornika piezoelektrycznego jest niezbędna do prawidłowego zaprojektowania układów elektronicznych współpracujących z przetwornikiem. Istotnymi parametrami są:

- wartości częstotliwości rezonansowych (mechanicznej i elektromechanicznej),
- pasma przenoszenia,
- sprawności,
- charakterystyka impedancji w funkcji częstotliwości.

Aby dobrze scharakteryzować przetwornik należy wykonać pomiary impedancji zarówno w szerokim jak i wąskim paśmie. Na podstawie pomiaru w szerokim paśmie można określić wartości charakterystycznych częstotliwości rezonansowych. Przetwornik posiada ich kilka i odpowiadają one drganiom różnego typu. Liczba rezonansów jest związana z kształtem przetwornika np.: dla przetwornika w kształcie dysku możemy wyróżnić drgania grubościowe i radialne.

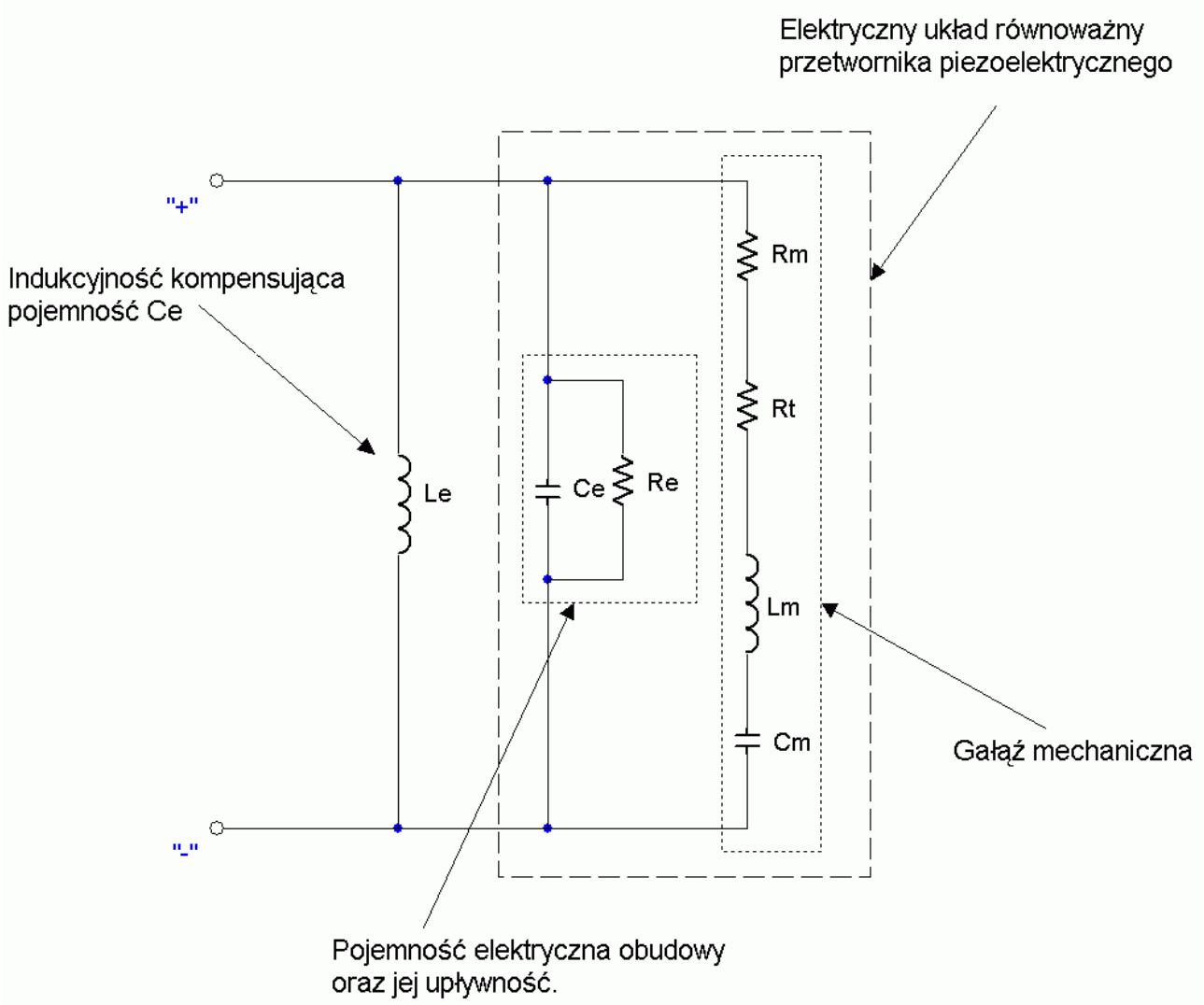


Rysunek 1: Przykładowy przebieg widma modułu impedancji dla przetwornika piezoelektrycznego w kształcie dysku.

Po określeniu, na podstawie charakterystyki szerokopasmowej, położenia interesującego typu rezonansu dokonuje się pomiaru impedancji w wąskim paśmie wokół wybranej częstotliwości rezonansowej.

Do analizy właściwości przetwornika w wąskim paśmie wykorzystuje się model elektryczny, którego schemat pokazany jest na rys. 2. Elektryczny model zastępczy dla przetwornika piezoelektrycznego składa się z dwóch gałęzi: elektrycznej i mechanicznej. Gałąź elektryczną (statyczną) stanowi pojemność $\mathbf{C_e}$ (którą stanowią elektrody rozdzielone materiałem przetwornika) oraz upływność $\mathbf{R_e}$ materiału przetwornika. Gałąź mechaniczną (ruchową) stanowią elektryczne odpowiedniki cech mechanicznych materiału przetwornika. Oporność $\mathbf{R_m}$ odpowiada stratom energii

spowodowanym wewnętrznym tarciem wynikającym z lepkości materiału. Oporność $\mathbf{R_t}$ odzwierciedla ilość energii wypromieniowanej poza przetwornik w postaci fali akustycznej. W przypadku umieszczenia przetwornika w próżni wartość oporności $\mathbf{R_t}$ wynosi 0 ponieważ wypromieniowanie energii w formie fali mechanicznej nie jest w takiej sytuacji możliwe. W praktyce umieszczenie przetwornika w medium o znacznie różniącej się od przetwornika impedancji akustycznej (np.: w powietrzu) pozwala również zaniedbać wpływ oporności $\mathbf{R_t}$. Indukcyjność $\mathbf{L_m}$ modeluje efekty inercyjne związane z przyspieszaniem masy przetwornika. Pojemność $\mathbf{C_m}$ jest odpowiednikiem podatności materiału na odkształcenia. W celu uzyskania czysto rezystancyjnego charakteru przetwornika dla pobudzenia częstotliwością rezonansową stosuje się równolegle dołączoną indukcyjność $\mathbf{L_e}$, której celem jest kompensacja pojemności $\mathbf{C_e}$.



Rysunek 2: Model elektryczny skompensowanego przetwornika piezoelektrycznego.

Z analizy powyższego modelu wynika istnienie dwóch częstotliwości rezonansowych:

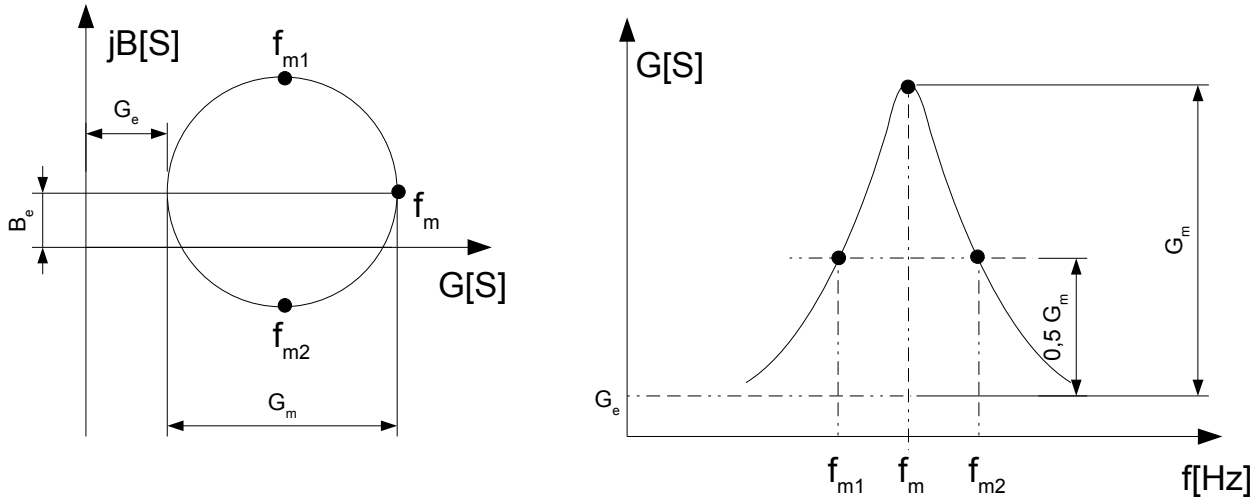
- $\mathbf{f_m}$ mechanicznej (rezonansowa),
- $\mathbf{f_{em}}$ elektromechaniczna (antyrezonasowa).

Zgodnie z powyższym modelem częstotliwości rezonansowe wynoszą:

$$f_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_m \cdot C_m}} \quad \textbf{(1)}$$

$$f_{em} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{C_m + C_e}{L_m \cdot C_e \cdot C_m}} \quad \textbf{(2)}$$

Na podstawie zmierzonych wykresów pętli admitancji lub jej części rzeczywistej można określić wartość częstotliwości rezonansowej oraz szerokość pasma dla rezonansu mechanicznego (rys.3). Analogicznie z wykresu pętli impedancji lub jej części rzeczywistej można określić wartość częstotliwości i szerokość pasma dla rezonansu elektromechanicznego.



Rysunek 3: Sposób określania wartości częstotliwości rezonansu mechanicznego, pasma przenoszenia oraz wartość elementów elektrycznych modelu elektrycznego.

Wartości elementów gałęzi elektrycznej oraz członu rezystancyjnego gałęzi mechanicznej można oszacować bezpośrednio z wykresu pętli admitancji:

$$R_e = \frac{1}{G_e} \quad \textbf{(3)}$$

$$C_e = \frac{B_e}{2 \cdot \pi \cdot f_m} \quad \textbf{(4)}$$

$$R_m + R_t = \frac{1}{G_m} \quad \textbf{(5)}$$

Szerokość pasma przenoszenia **Δf** i dobroć $\mathbf{Q_m}$ dla częstotliwości rezonansowej $\mathbf{f_m}$ wynoszą:

$$\Delta f_m = f_{m2} - f_{m1} \quad \textbf{(6)}$$

$$Q_m = \frac{f_m}{\Delta f_m} \quad \textbf{(7)}$$

Wartość elementów gałęzi mechanicznej można wyznaczyć z następujących wzorów:

$$C_m = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_m \cdot Q_m \cdot (R_m + R_t)} \quad \textbf{(8)}$$

$$L_m = Q_m^2 \cdot (R_m + R_t)^2 \cdot C_m \quad \textbf{(9)}$$

W literaturze można spotkać również drugi (równoważny) model elektryczny przetwornika piezoelektrycznego w którym elementy gałęzi mechanicznej tworzą równoległy obwód RLC do które są dołączone szeregowo elementy gałęzi elektrycznej. Narysuj schemat elektryczny tego modelu.

6. Sprawność przetwornika elektroakustycznego.

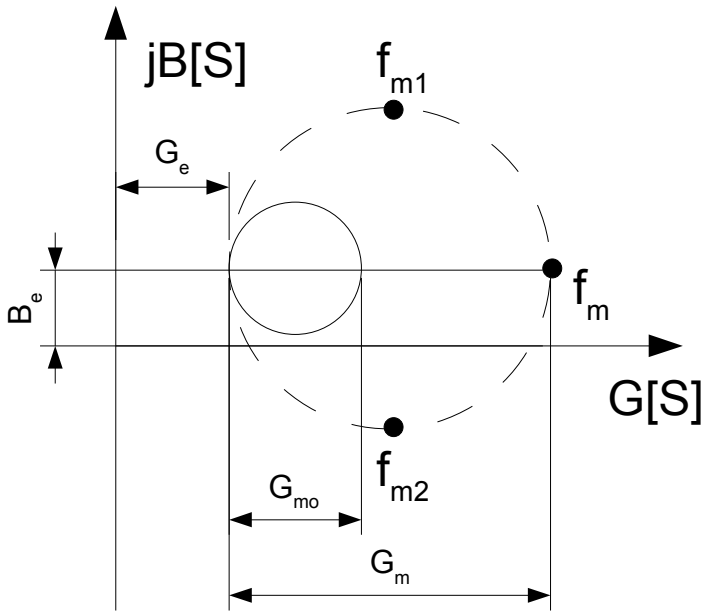
Sprawność elektroakustyczna przetwornika η_{ea} można opisać wzorem:

$$\eta_{ea} = \frac{P_{wy\ akustyczna}}{P_{we\ elektryczna}} = \eta_{ma} \cdot \eta_{em} \qquad (10)$$

gdzie:

- η_{ma} – sprawność mechanoakustyczna – określa sprawność przemiany drgań bryły w energię fali mechanicznej – wartość jej jest zależna od rodzaju medium obciążającego przetwornik,
- η_{em} – sprawność elektromechaniczna – określa sprawność przemiany dostarczonej energii elektrycznej na energię mechaniczną (drgań bryły).

Wartości poszczególnych sprawności można oszacować dokonując pomiaru pętli admitancji dla przetwornika nieobciążonego i obciążonego odpowiednim medium (rys.4). Jako przetwornik nieobciążony rozumie się przetwornik umieszczony w próżni (brak możliwość powstania fali mechanicznej w ośrodku), ale w praktycznych pomiarach umieszczenie przetwornika w powietrzu przyjmuje się za wystarczająco dobre przybliżenie (ze względu na bardzo dużą różnice impedancji akustycznej materiału przetwornika i powietrza). W zastosowaniach medycznych przetworniki są obciążone tkanką, której impedancja akustyczna jest zbliżona do wody (tab. 2), dlatego w niniejszym ćwiczeniu pomiar z obciążeniem będzie realizowany przez zanurzenie przetwornika w wodzie. W celu zobrazowania wpływu impedancji akustycznej medium otaczającego przetwornik na sprawność przemiany elektroakustycznej, dodatkowo zmierzono impedancję przetwornika obciążonego gliceryną.



Rysunek 4: Sposób pomiaru sprawności elektroakustycznej przetwornika. Linia przerywana – pomiar dla przetwornika nieobciążonego, linia ciągła – pomiar dla przetwornika obciążonego.

Tabela 2: Wartości parametrów akustycznych dla tkanek miękkich, wody i gliceryny. c - prędkość propagacji fali wzdłużnej, ρ - gęstość, Z - impedancja akustyczna.

	Tkanka miękka (wartość średnia)	**Woda**	**Gliceryna**
c [m/s]	1540	1500	1902
ρ [kg/m^3]	1,06	0,998	1,26
Z [kg/m^{2}s]	1,63	1,49	2,34

Wartość poszczególnych sprawności można wyznaczyć z następujących wzorów:

$$\eta_{em} = \frac{G_m}{G_m + G_e} \tag{11}$$

$$\eta_{ma} = \frac{(G_m - G_{mo})}{G_m} \tag{12}$$

Ostatecznie łącząc równania 10, 11 i 12 otrzymujemy:

$$\eta_{ea} = \frac{G_m - G_{mo}}{G_m + G_e} \tag{13}$$

Wartym zaznaczenia jest fakt iż obciążenie oprócz zmiany wartości członu rezystancyjnego gałęzi mechanicznej modelu elektrycznego przetwornika wpływa również na wartość pozostałych elementów gałęzi mechanicznej.

7. Kompensacja elektryczna przetwornika.

W celu uzyskania maksymalnej sprawności transmisji energii elektrycznej pomiędzy układem nadawczym a przetwornikiem należy skompensować część urojoną admitancji (impedancji) przetwornika dla danej częstotliwości pobudzenia oraz dopasować impedancję przetwornika do impedancji nadajniku i/lub kabla łączącego przetwornik i układ nadawczy. Najczęściej dokonuje się tego przez dołączenie do przetwornika cewki pełniącej również rolę autotransformatora. Wartość indukcyjność dobiera się tak aby skompensować wpływ pojemności $\mathbf{C_e}$. W przypadku kiedy indukcyjność $\mathbf{L_e}$ jest dołączona tak jak zostało to pokazane na rys. 2 mówimy o kompensacji równoległej, a wartość indukcyjność kompensującej $\mathbf{L_e}$ wynosi:

$$L_e = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f)^2 \cdot C_e} \tag{14}$$

Czy istnieje inny sposób dołączenia indukcyjności $\mathbf{L_e}$? Jeśli tak to jaka powinna być jej wartość?

8. Przebieg ćwiczenia.

1. Kolokwium wstępne;
2. Przypomnienie podstawowych informacji dotyczący przetworników piezoelektrycznych i ich zastosowania w diagnostyce i terapii medycznej;

3. Zapoznanie ze stanowiskiem pomiarowym i spektrometrem impedancyjnym firmy Solartron;
4. Przypomnienie podstaw pomiaru impedancji;
5. Pomiar impedancji przetwornika nieobciążonego w szerokim paśmie;
6. Analiza danych pomiarowych udostępnionych przez prowadzącego ćwiczenie:
   a) pomiar w szerokim paśmie – przetwornik nieobciążony:
      - określenie częstotliwości rezonansu radialnego,
      - określenie częstotliwości rezonansu grubościowego,
   b) pomiar w wąskim paśmie wokół częstotliwości rezonansu grubościowego – przetwornik nieobciążony i obciążony (wodą, gliceryną):
      - wyznaczenie wartości elementów zastępczego modelu elektrycznego przetwornika obciążonego wodą,
      - oszacowanie sprawności elektroakustycznej, elektromechanicznej i mechanoakustycznej dla przetwornika obciążonego wodą i gliceryną,
      - oszacowanie wartości stałej rezonansowej dla drgań grubościowych, prędkości propagacji fali mechanicznej w materiale przetwornika, kąta strat (dla częstotliwości 1kHz), względnej przenikalności elektrycznej,
   c) porównanie pętli admitancji uzyskanej dla opracowanego zastępczego modelu elektrycznego z danymi pomiarowymi,
   d) analiza (zastępczy model elektryczny) wpływu kompensacji elektrycznej przetwornika na przebieg jego impedancji,
   e) analiza zastępczego modelu elektrycznego z wykorzystaniem symulatora typ SPICE - wpływ obciążenia na pasmo przenoszenia przetwornika,

Jakie powinno być pasmo przenoszenia przetwornika elektroakustycznego dla potrzeb:

1. Obrazowania – USG,
2. pomiarów przepływu krwi – Doppler:
   a) z emisją ciągłą CW,
   b) z emisją impulsową PW.

9. Opracowanie wyników.

1. Dokonać analizy (analogicznie do punktu 6.b w sekcji „Przebieg ćwiczenia") dla danych pomiarowych w paśmie wokół częstotliwości rezonansu radialnego – przetwornik nieobciążony i obciążony;
2. W sprawozdaniu umieścić i omówić:
   a) wykresy:
      - modułu impedancji i fazy dla pomiaru w szerokim zakresie,
      - modułu impedancji i fazy, konduktancji i pętli admitancji dla pomiarów wokół rezonansów (grubościowego i radialnego),

   b) schematy elektryczne modeli zastępczych dla przetwornika obciążonego wodą – rezonans grubościowy i radialny,

   c) oszacowane wartości:
      - stałych rezonansowych dla drgań grubościowych i radialnych,
      - prędkości propagacji fali mechanicznej w materiale przetwornika,
      - kąta strat (dla częstotliwości 1kHz),
      - względnej przenikalności elektrycznej materiału przetwornika,

   d) wykresy dla danych pomiarowych i opracowanych modeli zastępczych:
      - pętli admitancji,
      - modułu impedancji,

   e) Wykresy pętli admitancji i modułu impedancji dla modelu przetwornika obciążonego skompensowanego i nieskompensowanego elektrycznie – tylko rezonans grubościowy,

   f) admitancji oraz jej modułu – pomiar w szerokim paśmie,

   g) impedancji i admitancji (pętle) – pomiar w wąskim paśmie,

   h) części rzeczywistych admitancji i impedancji – pomiar w wąskim paśmie;
3. Odpowiedzi na pytania zawarte w niniejszej instrukcji;
4. Wnioski i komentarze odnośnie otrzymanych wyników, ich zgodności z wiedzą teoretyczną, przebiegu ćwiczenia itp.;