

## MATERIAŁY POMOCNICZE DO WYKŁADU Z PODSTAW ZASTOSOWAŃ ULTRADŹWIĘKÓW W MEDYCYNIE

(wyłącznie do celów dydaktycznych – zakaz rozpowszechniania)

### 6. Praca przetwornika w rezonansie, energia elektryczna i mechaniczna, promieniowanie energii przez przetwornik, sprawność przetwornika.

\*\*\*\*\*

#### S3. Schemat zastępczy przetwornika w rezonansie

(Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

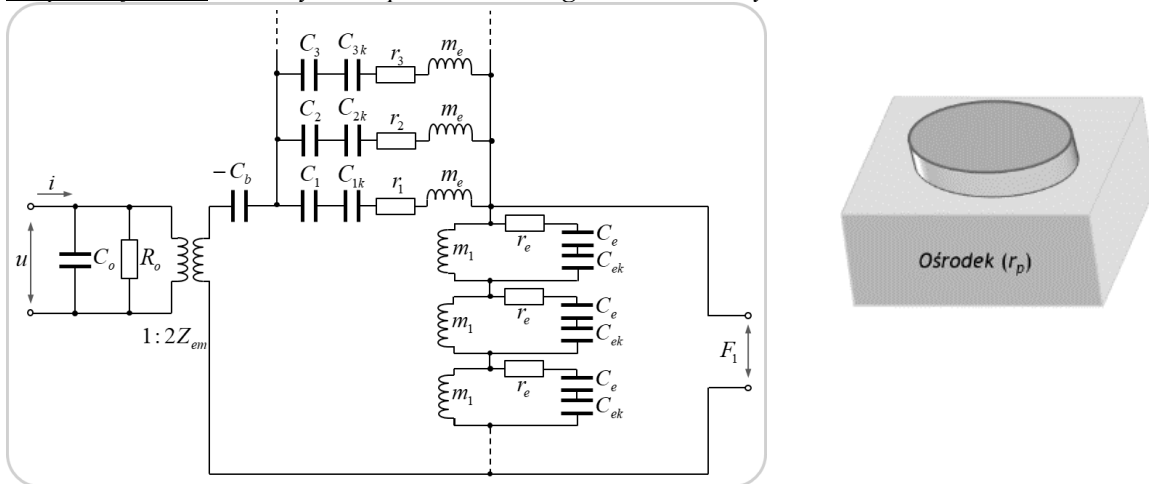
Założenie: przetwornik pracuje na jednej (podstawowej) częstotliwości rezonansowej → schemat zastępczy się upraszcza.

Strona mechaniczna: pozostaje tylko szeregowy obwód drgający:

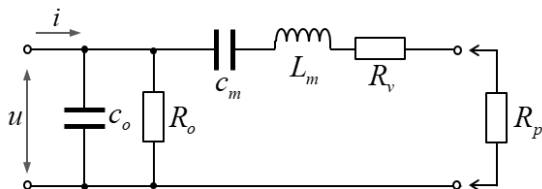
Masa czynna  $m_e$  jest połową rzeczywistej masy przetwornika.

Podatność  $C_w$  jest wypadkową podatności mechanicznych układu zastępczego.

Rezystancja strat  $r_1$  zależy od wsp. tłumienia drgań mechanicznych.



Elementy układu mechanicznego można przenieść na stronę elektryczną.



Rys.5.10 - skrypt Talarczyk

#### S4. Schemat zastępczy przetwornika w rezonansie

(Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

Podatność  $C_w$  staje się po stronie elektrycznej pojemnością  $C_m$

Masa czynna  $m_e$  staje się po stronie elektrycznej indukcyjnością  $L_m$

Rezystancja strat  $r_1$  staje się po stronie elektrycznej rezystancją  $R_v$

Rezystancja promieniowania  $r_p$  staje się po stronie elektrycznej rezystancją  $R_p$

Pojemność elektryczna przetwornika:

$$C_o = \frac{\epsilon_x A_m (1 - k^2)}{d}$$

### S5. Analiza drgań grubościowych przetwornika

(Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

#### Drgania grubościowe:

Przetwornik otoczony powietrzem (ośrodek podatny)

$Z_{pow} \ll Z_{przet} \rightarrow p = 0$  na brzegach (węzły ciśnienia)

$\xi$  maksymalne (strzałki przesunięcia)

$$d = (2n-1) \cdot \frac{\lambda}{2} \quad f = (2n-1) \cdot \frac{c'_o}{2d} \quad \text{najczęściej } n=1$$

Dla  $n$  parzyste  $\rightarrow$  przesunięcia powierzchni w tym samym kierunku bez zmiany grubości!

$N = f \cdot d$  stała częstotliwościowa przetwornika

### S7. Energia elektryczna i mechaniczna w przetworniku

(Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

*Energia mechaniczna drgań wytworzona dzięki właściwościom piezoelektrycznym w jednostce*

*objętości przetwornika:*  $W_{mech} = \frac{1}{2} c_{11} \cdot S_1^2$ , gdzie  $S_1 = d_{11} \cdot E$

$d_{11} = -\frac{e_{x1}}{c_{11}}$  **moduł piezoelektryczny**, drugi obok stałej  $e$  ważny parametr  $\rightarrow$  określa związek między składową pola  $E$  a stałą mechaniczną: odkształceniem  $S$

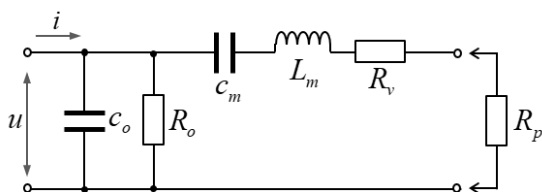
$$W_{mech} = \frac{1}{2} \frac{e_{x1}^2 \cdot E^2}{c_{11}} \quad W_{el} = \frac{1}{2} \varepsilon_x E^2 \quad \rightarrow \quad \frac{W_{mech}}{W_{el}} = \frac{e_{x1}^2}{\varepsilon_x c_{11}} = k^2$$

$k = \sqrt{\frac{W_{mech}}{W_{el}}} = \frac{e_{x1}}{\sqrt{\varepsilon_x c_{11}}}$  *Współczynnik sprzężenia elektromechanicznego  $k$  wiąże stałą dielektryczną z modułem sprężystości.*

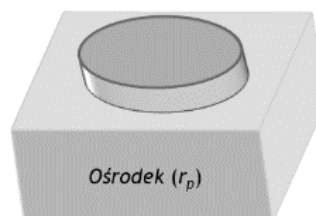
*Sens fizyczny: miara przekształcenia energii elektrycznej nagromadzonej w przetworniku na energię drgań mechanicznych.*

### S9-10. Promieniowanie, moc i natężenie

(Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)



Rys.5.10 - skrypt Talarczyk



$$P = \frac{U'^2}{R_p} = U^2 \frac{R_p}{(R_v + R_p)^2} \quad R_p = \frac{r_p}{4Z_{em}^2} = \frac{\rho_o c_o A_p}{4Z_{em}^2} \quad R_v = \frac{r_v}{4Z_{em}^2} \quad Z_{em} = e \frac{A}{d}$$

$$P = \frac{4e^2 A^2 U^2}{\rho_o c_o d^2 A_p} \left( \frac{r_p}{r_v + r_p} \right)^2 = \frac{4e^2 A^2 E^2}{\rho_o c_o A_p} \left( \frac{r_p}{r_v + r_p} \right)^2 \quad A_p = i \cdot A$$

$$I = \frac{P}{A_p} = \frac{4e^2 E^2}{i^2 \rho_o c_o} \left( \frac{r_p}{r_v + r_p} \right)^2 \quad \longrightarrow \quad I = \frac{4e^2 E^2}{i^2 \rho_o c_o} \eta_{ma}^2$$

### S11. Amplituda drgań przetwornika

(Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

Przetwornik w postaci płytki drgającej grubościowo:

$$\xrightarrow{\quad} \xi_s = \frac{e \hat{E} \cdot d}{2c_{ik}}$$

dla  $f \ll f_{rez}$

w rezonansie, dla  $n = 1$   $\xrightarrow{\quad}$  połowa długości fali w przetworniku

Jeśli przetwornik jest otoczony ośrodkiem podatnym  $\rightarrow$  fala stojąca w przetworniku i amplituda drgań wielokrotnie się zwiększy i  $\xi_{rez} = Q \cdot \xi_s$

$$Q = \frac{\omega_r \cdot L_m}{R_m} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot c' \cdot A}{2r_m} = \frac{\pi \cdot \rho \cdot c'}{2i \cdot \rho_o \cdot c_o} \cdot \eta_{ma}$$

Dobroć dla kwarcu promieniującego jednostronnie do wody = 16

Dobroć dla piezoceramiki promieniującej jednostronnie do wody = 30

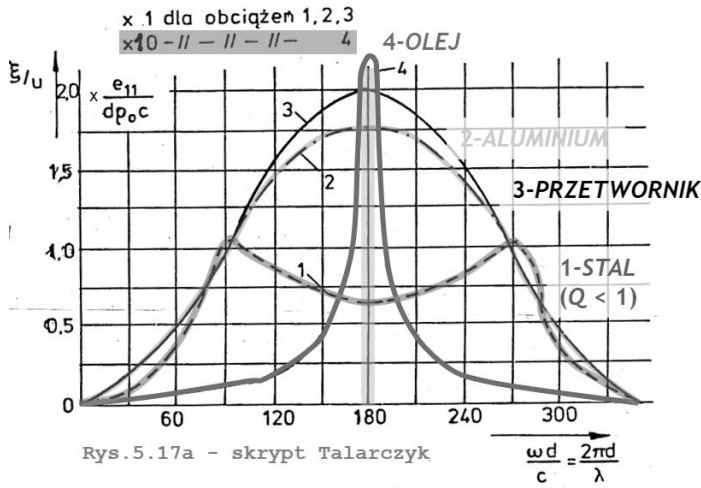
Podczas promieniowania do powietrza istotne są straty mechaniczne:  $(r_v)_{kwarc} \ll (r_v)_{ceramika}$ ,  
 $(Q, \eta_{ma})_{kwarc} \gg (Q, \eta_{ma})_{ceramika}$

### S12-13. Amplituda drgań przetwornika (bez warstwy sprzęgającej)

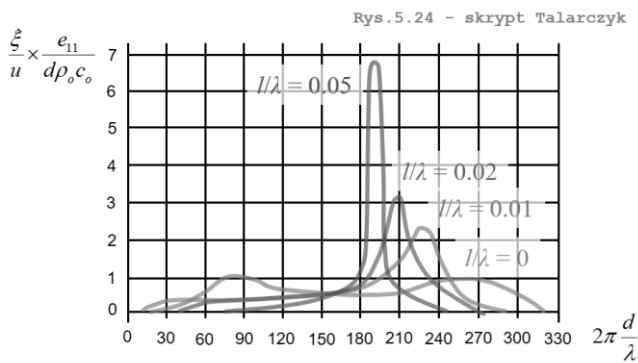
(Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

Dobroć mechaniczna zależy mocno od impedancji akustycznej ośrodka:

$$\xi_{rez} = Q \cdot \xi_s = Q = \frac{\pi \cdot \rho \cdot c'}{2 \cdot \rho_o \cdot c_o} \cdot \eta_{ma}$$



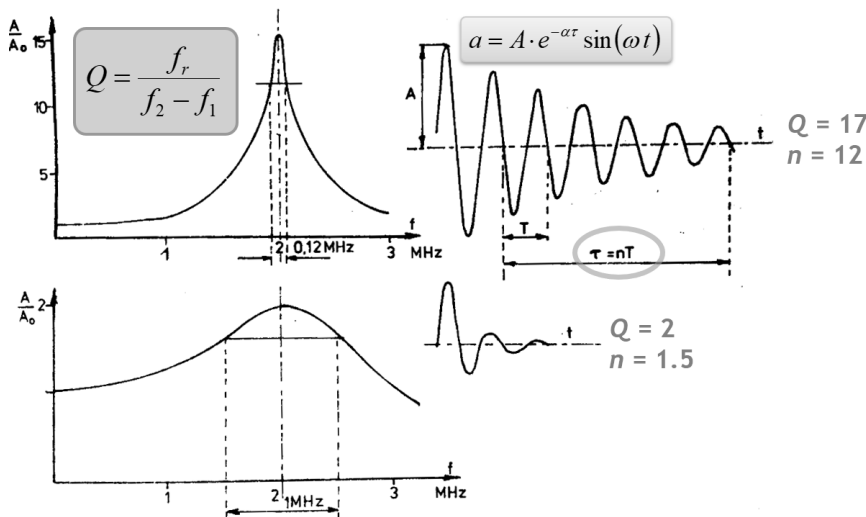
Częstotliwościowe charakterystyki względnej cząstkowej prędkości fali ultradźwiękowej wypromieniowanej do niektórych środowisk przez przetwornik kwarcowy dla obciążenia jednostronnego



Częstotliwościowe charakterystyki względnej cząstkowej prędkości fali ultradźwiękowej wypromieniowanej przez przetwornik kwarcowy do ciała stałego poprzez warstwę oleju o różnej grubości

### S14. Dobroć przetwornika

(Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)



$$\alpha = \frac{\omega}{2Q}$$

$$e^{-\alpha\tau} = e^{-\frac{\pi \cdot n}{Q}}$$

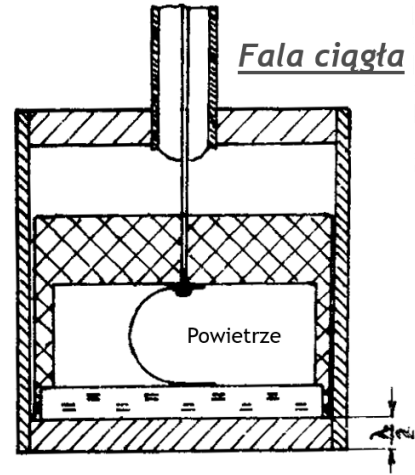
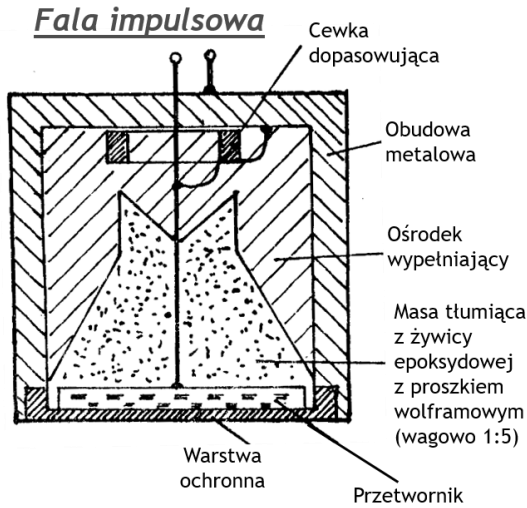
$$n = 0.73 \cdot Q$$

Rys. 5.23. Przebieg krzywych rezonansowych przetworników o różnych dobrociach

### S15. Konstrukcje głowic o małej i dużej dobroci

(Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

$$Q = \frac{\pi \cdot \rho \cdot c'}{2 \cdot \rho_o \cdot c_o} \cdot \eta_{ma}$$

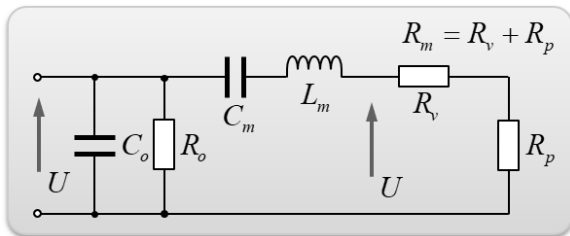


	<i>Tkanka</i>		
<i>PZT5</i>	<i>mięśniowa</i>	<i>Obciążenie</i>	
$\rho c = 27.4 \cdot 10^6$	$\rho_2 c_2 = 1.7 \cdot 10^6$	$Q = 5.5$	$\rho_1 c_1 = 6.1 \cdot 10^6$

$$Q_L = \frac{\pi}{2} \frac{\rho c}{k_1 \rho_1 c_1 + k_2 \rho_2 c_2} \cdot \eta_{ma} \quad 0 < k < 1$$

### S16. Sprawność przetworników piezoelektrycznych

(Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)



Rys.5.10 - skrypt Talarczyk

Energia el. → Energia mech. → Energia akust.

$$\eta_{ea} = \eta_{em} \cdot \eta_{ma}$$

$$\eta_{em} = \frac{P_m}{P_m + P_o} \quad P_m = \frac{U^2}{R_m} \quad P_o = \frac{U^2}{R_o} \quad \eta_{em} = \frac{R_o}{R_o + R_v + R_p}$$

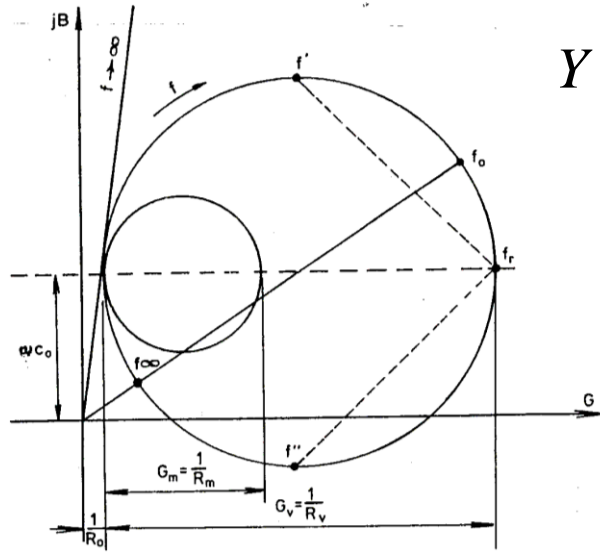
$$\eta_{ea} = \eta_{em} \cdot \eta_{ma} = \frac{R_o}{R_o + R_v + R_p} \cdot \frac{R_p}{R_v + R_p}$$

### S17. Charakterystyka amplitudowo-fazowa admitancji przetwornika

(Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

Pomiar modułu impedancji  $|Z|$  oraz fazy  $\varphi_Z$  w funkcji  $f$

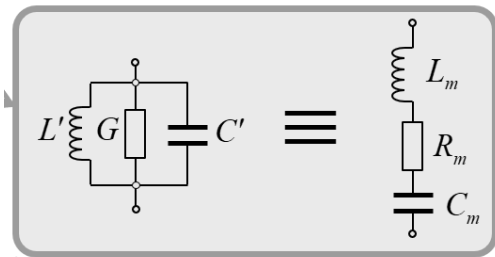
$$Z = R + jX$$



$$Y = G + jB = \frac{1}{Z}$$

$$G = \frac{1}{|Z|} \cdot \cos(\varphi_Z)$$

$$B = -\frac{1}{|Z|} \cdot \sin(\varphi_Z)$$



Rys. 5.18. Charakterystyka amplitudowo-fazowa admitancji przetwornika piezoelektrycznego

$$R_m = R_v + R_p = \frac{1}{G_m}$$

$$Y_o = G_o + jB_o \quad G_o = \frac{1}{R_o} \quad B_o = \frac{1}{X_o} = \omega C_o$$

### S18-19. Charakterystyka amplitudowo-fazowa admitancji przetwornika

(Talarczyk E. Podstawy techniki ultradźwięków, Wrocław, 1990)

Parametry

$$Q = \frac{f_r}{f_2 - f_1} \quad Q = \frac{G_v}{\omega_r C_m} \quad C_m = \frac{G_v}{2\pi f_r Q} \quad L_m = \frac{1}{4\pi^2 f_r^2 C_m}$$

$$k \approx \sqrt{\frac{\pi^2 C_m}{8 C_o}} \approx \sqrt{\frac{C_m}{C_o}} \quad C_o \gg C_m \quad k \approx \sqrt{1 - \frac{f_r^2}{f_a^2}}$$