

P O L S K A A K A D E M I A N A U K
INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

PRACE
INSTYTUTU MASZYN
PRZEPLYWOWYCH

TRANSACTIONS
OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

73

WARSZAWA—POZNAN 1976

P A Ń S T W O W E W Y D A W N I C T W O N A U K O W E

PRACE INSTYTUTU MASZYN PRZEPŁYWOWYCH

poświęcone są publikacjom naukowym z zakresu teorii i badań doświadczalnych w dziedzinie mechaniki i termodynamiki przepływów, ze szczególnym uwzględnieniem problematyki maszyn przepływowych

*

THE TRANSACTIONS OF THE INSTITUTE OF FLUID-FLOW MACHINERY

exist for the publication of theoretical and experimental investigations of all aspects of the mechanics and thermodynamics of fluid-flow with special reference to fluid-flow machinery

KOMITET REDAKCYJNY - EXECUTIVE EDITORS
KAZIMIERZ STELLER - REDAKTOR - EDITOR
JERZY KOŁODKO · JÓZEF ŚMIGIELSKI
ANDRZEJ ŻABICKI

REDAKCJA - EDITORIAL OFFICE
Instytut Maszyn Przepływowych PAN,
80-952 Gdańsk, skr. pocztowa 621, ul. Gen. Józefa Fiszer 14, tel. 41-12-71

Copyright
by Państwowe Wydawnictwo Naukowe
Warszawa 1976
Printed in Poland

PAŃSTWOWE WYDAWNICTWO NAUKOWE - ODDZIAŁ W POZNANIU

Nakład: 350+90 egz. Ark. wyd. 13. Ark. druk. 10. Papier druk. sat. kl. V, 70g, 70×100.
Oddano do składania 9 I 1976. Podpisano do druku 12 XI 1976. Druk ukończono w listopadzie 1976 r. Zam. nr 114/159. H-5/709. Cena zł 40,-

DRUKARNIA UNIWERSYTETU IM. A. MICKIEWICZA W POZNANIU

WITOLD DRABOWICZ

Gdańsk

Analiza pracy ultradźwiękowego przetwornika w warunkach zmiennego obciążenia akustycznego*

Przedmiotem opracowania jest wyznaczenie funkcji opisującej przebieg napięcia na obwodzie rezonansowym, współpracującym z przetwornikiem, w zależności od grubości warstwy wypełnionej ośrodkiem między przetwornikiem a reflektorem.

W zależności tej uwzględniono szereg parametrów, takich jak: piezoelektryczne, sprężyste i dielektryczne własności ceramiki, akustyczne własności ośrodka, materiału reflektora oraz niektóre parametry układu zasilającego przetwornik.

Wyznaczono również współczynnik zniekształceń nieliniowych dla zadanego punktu pracy i amplitudy przemieszczeń dynamicznych.

1. Wstęp

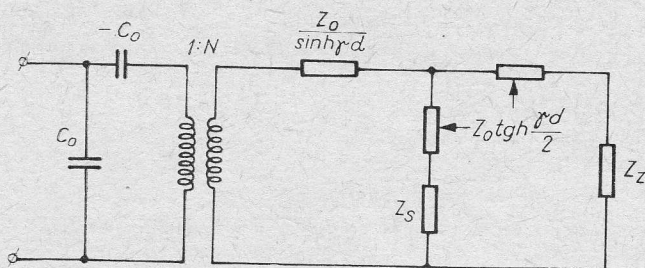
Miniaturowy przetwornik ultradźwiękowy umieszczony w odległości 0,2 - 0,3 mm od reflektora i pracujący na fali o długości 1,2 mm w ośrodku ciekłym tworzy akustyczną linię podobną do linii elektrycznej. Przy odpowiedniej częstotliwości pracy i określonych własnościach ośrodka, linia akustyczna może mieć pomijalnie małe straty, co pozwala traktować ją jako linię bez strat energii. Bardzo duża impedancja akustyczna metalowego reflektora, w porównaniu z impedancją ośrodka, daje linię którą można traktować jako bezstratną i rozwartą.

Wypromieniowana energia oscyluje między przetwornikiem a reflektorem. Jeśli reflektor wykonuje drgania, wówczas zmianie ulega reaktancja szeregowego obwodu rezonansowego przetwornika. W wyniku tych zmian zachodzi modulacja amplitudy napięcia na zaciskach przetwornika w rytm przemieszczeń reflektora. Analizę układu rozpoczęto od odpowiedniego obwodu zastępczego przetwornika.

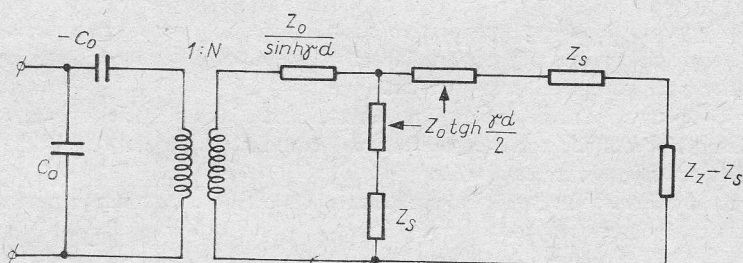
2. Obwód zastępczy przetwornika

Analizę pracy przetwornika ultradźwiękowego przeprowadzono za pomocą obwodu zastępczego, reprezentującego elektryczne i mechaniczne własności elementu piezoelektrycznego, jak również ośrodka w którym przetwornik pracuje. Posłużono się obwodem prze-

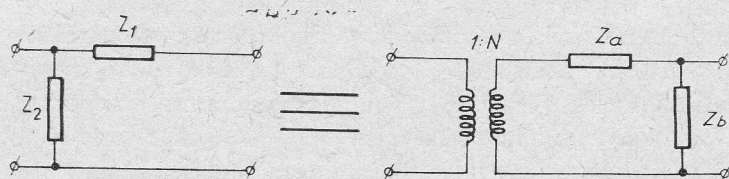
* Praca wykonana w ramach problemu resortowego PAN-19, grupa tematyczna 7.



Rys. 1. Obwód zastępczy przetwornika obciążonego dwustronnie; Z_0 – akustyczna oporność właściwa ceramiki, N – przekładnia idealnego elektromechanicznego transformatora, γ – stała propagacji ceramiki, d – grubość przetwornika



Rys. 2. Przekształcony obwód zamknięty



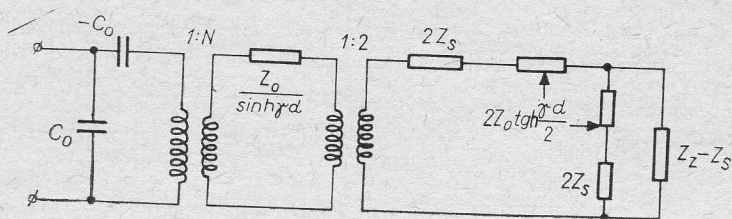
Rys. 3. Równoważne obwody Nortona

twornika (rys. 1), pozwalającym na badanie go przy obciążeniu jednostronnym i dwustronnym [1, 2]. Obciążeniem jest z jednej strony zmienna impedancja akustyczna Z_Z , zaś z drugiej, impedancja Z_S ośrodka obciążającego tylną ściankę przetwornika. Dodając i odejmując impedancję Z_S w gałęzi równoległej impedancji Z_Z otrzymamy układ przedstawiony na rys. 2.

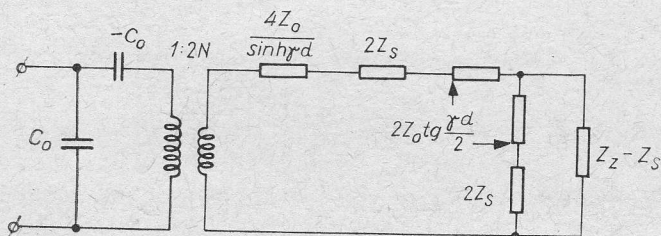
Korzystając z twierdzenia Nortona o równoważności czwórników przedstawionych na rys. 3 [2]:

$$Z_a = \frac{Z_1(Z_1 + Z_2)}{Z_2}, \quad Z_b = Z_1 + Z_2, \quad (1)$$

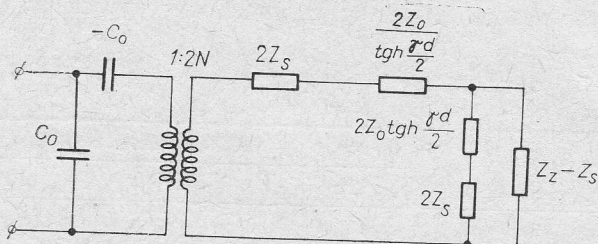
$$N = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2},$$



Rys. 4. Obwód zastępczy z dwoma transformatorami



Rys. 5. Przekształcony obwód po redukcji jednego transformatora



Rys. 6. Obwód zastępczy z uwzględnieniem przekształceń Nortona i tożsamości (2)

i tożsamości

$$\frac{2}{\sinh \gamma d} + \operatorname{tg} \frac{\gamma d}{2} = \frac{1}{\operatorname{tgh} \frac{\gamma d}{2}}, \quad (2)$$

układ (rys. 2) przekształca się do postaci przedstawionej na rys. 4.

Po usunięciu jednego transformatora i przesunięciu transformacji $Z/\sinh \gamma d$ na prawą stronę, obwód zastępczy przyjmuje postać przedstawioną na rys. 5 lub 6. Dalsze przekształcenie, względnie uproszczenie, zależy od rzędu wielkości impedancji wchodzących w skład obwodu. W tym celu należy rozpatrzyć gałąź szeregową i równoległą z rys. 6, które są opisane następującymi równaniami:

$$Z_m = R_m + j\omega L_m + \frac{1}{j\omega C_m}, \quad (3)$$

$$Y_m = G_m + j\omega C_m + \frac{1}{j\omega L_m}, \quad (4)$$

gdzie Z_m – impedancja obwodu szeregowego, Y_m – admitancja obwodu równoległego, R_m, G_m – rezystancja i konduktancja mechaniczna, L_m – masa, C_m – podatność.

Gałęzie te reprezentują szeregowy i równoległy obwód rezonansowy. Można je obliczyć z zależności następujących [2]:

$$\frac{2Z_0}{\operatorname{tgh} \frac{\gamma d}{2}} \cong \frac{Z_0 \pi}{2Q_m} \left[1 + 2jQ_m \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right) \right], \quad (5)$$

gdzie

$$R_m = Z_0 \pi / 2Q_m, \quad L = R_m Q_m / \omega_0, \quad C_m = 1 / \omega^2 L_m, \quad (6)$$

oraz

$$2Z_0 \operatorname{tgh} \frac{\gamma d}{2} \cong \frac{G_0 \pi}{2Q_m} \left[1 + j2Q_m \left(\frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} \right) \right], \quad (7)$$

przy czym

$$G_m = G_0 \pi / 2Q_m, \quad C_m = Q_m G_m / \omega_0, \quad L_m = 1 / \omega_0^2 C_m, \quad \omega_0 = 2\pi f_0, \quad (8)$$

gdzie f_0 – częstotliwość rezonansowa, Q_m – dobroć mechaniczna.

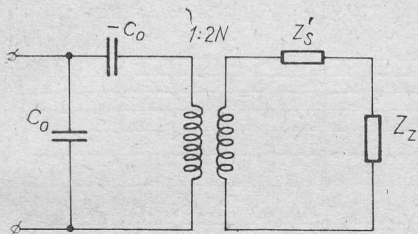
Na podstawie danych Zakładów Ceramiki Radiowej w Warszawie (tab. 1), wyznaczono dla częstotliwości rezonansowej rezystancję i konduktancję właściwą obwodów dla cera-

Tabela 1

Parametr	Materiał ceramiczny			Wymiar
	PP4	PP6	PP9	
Elektromechaniczny współczynnik sprzężenia k	45	64,4	60	%
Współczynnik sztywności G_{33}	$21 \cdot 10^{-3}$	$39 \cdot 10^{-3}$	$16 \cdot 10^{-3}$	Vm/N
Moduł C_{33}^E	$8,27 \cdot 10^{10}$	$4,87 \cdot 10^{10}$	$6,9 \cdot 10^{10}$	N/m ²
sztywności C_{33}^D	$10,32 \cdot 10^{10}$	$8,25 \cdot 10^{10}$	$10,8 \cdot 10^{10}$	
Stała częstotliwościowa k_d	1900	2350	1600	kHzmm
Gęstość ρ_0	$7,45 \cdot 10^3$	$7,51 \cdot 10^3$	$6,95 \cdot 10^3$	kg/m ³
Temperatura Curie	345	345	345	°C
Stała dielektryczna $\epsilon_0 \epsilon_{33}^T$	$66 \cdot 10^{-10}$	$92 \cdot 10^{-10}$	$44 \cdot 10^{-10}$	F/m
Prędkość dźwięku C	3700	4560	3360	m/s
Stała piezoelektryczna e_{33}	9,6	13,6	10,5	N/mV
Impedancja właściwa Z_0	$24 \cdot 10^6$	$34 \cdot 10^6$	$23,4 \cdot 10^6$	kg/m ² s
Dobroć mechaniczna Q_m	1000	400	250	—
Tangens kąta stratności $\operatorname{tg} \delta$	$54 \cdot 10^{-4}$	$60 \cdot 10^{-4}$	$200 \cdot 10^{-4}$	—

miki PP4 i PP9. Rezystancje te wynoszą odpowiednio $3,76 \cdot 10^4$ i $14,7 \cdot 10^4$ kg/m²s, zaś konduktancje $0,65 \cdot 10^{-10}$ i $2,6 \cdot 10^{-10}$ m²s/kg. Dla tak małych wartości konduktancji wpływ bocznikujący gałęzi równoległej na pracę przetwornika w ośrodku ciekłym (olej, woda) można pominąć. Obwód zastępczy uprości się wówczas do postaci przedstawionej na rys. 7.

Szeregowo z impedancjami $Z'_s + Z_z$ występuje również szeregowy obwód rezonansowy. Na rys. 7 obwód ten pominięto lecz uwzględniono przy dalszej analizie.



Rys. 7. Obwód zastępczy przetwornika bez uwzględnienia gałęzi równoległej; $Z_s' = Z_c + R_c$, Z_c – impedancja obciążająca tylną ściankę przetwornika, R_c – rezystancja uwzględniająca straty w materiale piezoelektrycznym i wpływ tłumienia oprawy przetwornika

Zmienną impedancję, obciążającą przetwornik pracujący w ośrodku ze stratami, można opisać zależnością [3]:

$$Z_z = Z_k \left[\frac{\Delta + \coth \Gamma l}{1 + \coth \Gamma l} \right], \quad (9)$$

gdzie Z_k – akustyczna impedancja promieniowania, $\Delta = Z_0'/Z_R$, Z_0' – akustyczna oporność właściwa ośrodka (oleju), Z_R – akustyczna oporność właściwa reflektora ze stali, $\Gamma = \alpha + j\beta$ – stała propagacji oleju, l – odległość między przetwornikiem a reflektorem.

Impedancję Z_k opisuje równanie [4]:

$$Z_k = \frac{A\rho\omega\beta}{\alpha^2 + \beta^2} + j \frac{A\rho\omega\alpha}{\alpha^2 + \beta^2} = \frac{A\rho\omega}{\alpha^2 + \beta^2} (\beta + j\alpha), \quad (10)$$

gdzie: $\omega = 2\pi f$, f – częstotliwość pracy, A – powierzchnia przetwornika, ρ – gęstość ośrodka.

Równanie (9) można przekształcić do postaci następującej:

$$Z_z = Z_k \left[\frac{\Delta (\cosh 2\alpha l - \cos 2\beta l) + \sinh 2\alpha l - j \sin 2\beta l}{\Delta \sinh 2\alpha l + \cosh 2\alpha l - \cos 2\beta l - j \Delta \sin 2\beta l} \right]. \quad (11)$$

Możliwość uproszczenia tego równania zależy od wartości parametru α charakteryzującego tłumienie ośrodka, odległości l między przetwornikiem i reflektorem oraz parametru Δ . W pracy [5] stwierdzono, że dla częstotliwości powyżej 1 MHz (dokładnie 1,23 MHz) i ośrodka olejowego współczynnik tłumienia jest mały oraz $\alpha = 0,17$ dB/mm. Zakładając w pierwszym przybliżeniu, że $\alpha = 0$, zgodnie z (10) otrzymamy

$$Z_k = A\rho c', \quad (12)$$

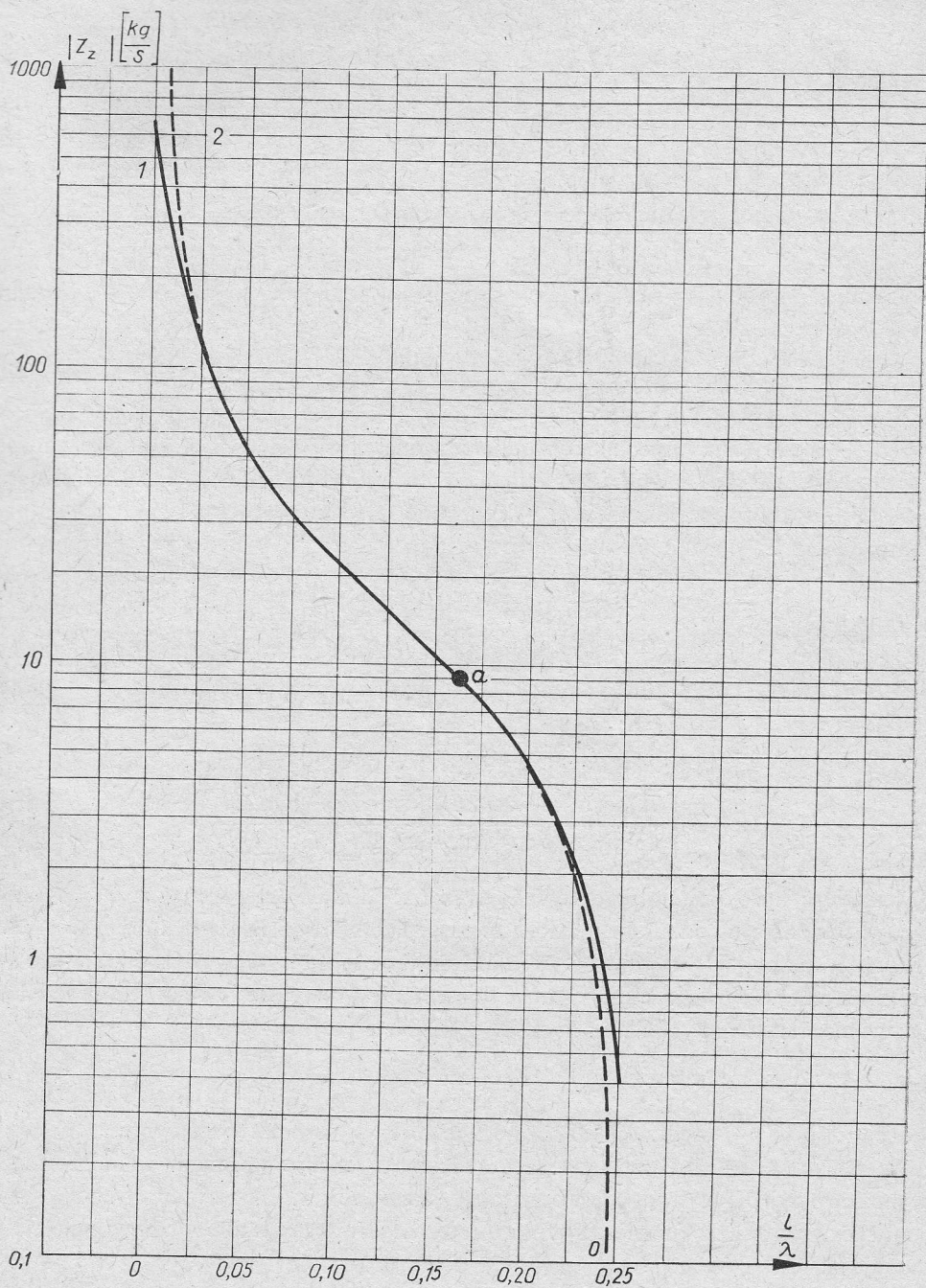
gdzie $c' = \omega/\beta$ (c' – prędkość fali ultradźwiękowej w ośrodku olejowym).

Dla małych odległości między przetwornikiem a reflektorem, rzędu ułamka długości fali, można przyjąć, że ośrodek jest bezstratny i zamiast funkcji hiperbolicznych we wzorze (9) można wprowadzić funkcje trygonometryczne. Wówczas wzór ten przyjmuje postać następującą:

$$Z_z = Z_k \frac{\cos \beta l + j \Delta \sin \beta l}{\Delta \cos \beta l + j \sin \beta l}, \quad (13)$$

czyli

$$Z_z = \frac{Z_k \Delta}{\Delta^2 \cos^2 \beta l + \sin^2 \beta l} - j \frac{Z_k \sin \beta l \cos \beta l (1 - \Delta^2)}{\Delta^2 \cos^2 \beta l + \sin^2 \beta l}. \quad (14)$$



Rys. 8. Przebieg modułu impedancji Z_z w zależności od przemieszczeń i parametru α

Pomijając Δ^2 jako wartość małą drugiego rzędu (dla reflektora ze stali $\Delta=0,028$), otrzymamy

$$Z_z = \frac{Z_k \Delta}{\Delta^2 \cos^2 \beta l + \sin^2 \beta l} - j \frac{Z_k \sin \beta l \cos \beta l}{\Delta^2 \cos^2 \beta l + \sin^2 \beta l}. \quad (14a)$$

Część rzeczywista związana jest z energią, która wypromieniowuje i nie powraca do przetwornika. Część urojona określa tę część energii, która oscyluje między przetwornikiem a reflektorem. Przy założeniu, że właściwa oporność akustyczna stali dąży do nieskończoności ($\Delta=0$) oraz że ośrodek jest bezstratny ($\alpha=0$), linię akustyczną utworzoną przez warstwę oleju między przetwornikiem a reflektorem można rozpatrywać jako bezstratną i rozwartą.

Na rys. 8 przedstawiono przebieg modułu impedancji Z_z w zależności od przemieszczeń reflektora względem przetwornika. Krzywą 1 wykreślono dla przetwornika o średnicy 4 mm umieszczonego w bezpośredniej odległości od reflektora, tj. dla zakresu przemieszczeń $l/\lambda (0 \div 0,25)$. Uwzględniono przy tym wartość parametru $\Delta=0,028$. Krzywą 2 wykreślono dla przypadku gdy reflektor jest idealnie sztywny, tj. gdy jego akustyczna oporność właściwa jest nieskończenie duża, tzn. gdy $\Delta=0$.

Dla rozpatrywanego zakresu przemieszczeń obciążenie przetwornika ma charakter pojemnościowy. W linii bezstratnej i rozwartej nie zachodzi pochłanianie energii lecz odbicia jej między reflektorem a przetwornikiem, przy jednoczesnych zmianach zależnych od charakteru obciążenia, pojemności lub indukcyjności dynamicznej szeregowego obwodu rezonansowego. Zmienną reaktancję wykorzystano do pomiaru przemieszczeń czopów w łożyskach ślizgowych.

Znając zakres mierzonych przemieszczeń oraz prędkość fali ultradźwiękowej w ośrodku, można łatwo wyznaczyć częstotliwość pracy układu pomiarowego. Dla przemieszczeń rzędu 150 μm (podwójna amplituda), przy wykorzystaniu 12,5% zakresu długości fali w ośrodku olejowym, otrzymano częstotliwość pracy 1,23 MHz.

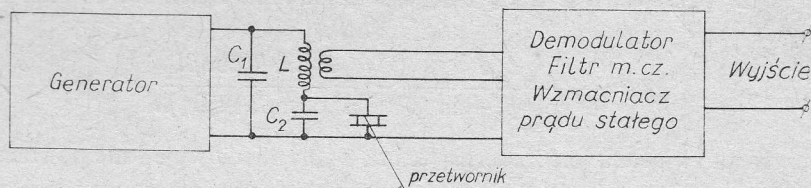
3. Analiza układu pomiarowego

Zmienna impedancja przetwornika tłumi i rozstraja obwód rezonansowy, do którego dołączony jest przetwornik. Część układu pomiarowego po stronie elektrycznej ilustruje rys. 9.

Za pomocą pojemności C_2 można zmieniać oddziaływanie przetwornika na obwód rezonansowy. W wyniku zmian impedancji przetwornika z częstotliwością mierzonego sygnału, tj. przemieszczeń reflektora (czopa), otrzymuje się na obwodzie rezonansowym przebieg z modulacją amplitudy. Przebieg ten jest następnie demodulowany, filtrowany i wzmacniany do odpowiedniego poziomu.

W celu wyznaczenia przebiegu napięcia na obwodzie rezonansowym, do którego dołączono przetwornik, w funkcji przemieszczeń reflektora, analizowano układ elektryczny widoczny na rys. 10.

Oporność oznaczona symbolem r jest opornością cewki. Jest ona wynikiem strat własnych, jak również strat powstałych od obciążenia obwodu rezonansowego opornością układu zasilającego.

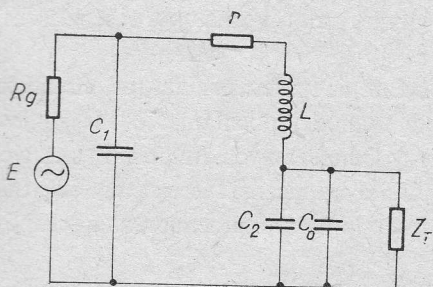


Rys. 9. Schemat blokowy układu pomiarowego

Przetransformowana na stronę elektryczną impedancja wynosi

$$Z_T = \frac{Z'_s + Z_z}{4N^2}, \quad (15)$$

gdzie $N = Ae_{33}/d$, przy czym e_{33} – stała piezoelektryczna.



Rys. 10. Układ pomiarowy przetransformowany na stronę elektryczną

Przy uwzględnieniu elementów szeregowego obwodu rezonansowego, impedancja Z_T wyniesie:

$$Z_T = \frac{\left[Z'_s + Z_k \left(\frac{\Delta + \coth \Gamma l}{1 + \Delta \coth \Gamma l} \right) \right] d^2}{4A^2 e_{33}^2} + j \left(\omega L_p - \frac{1}{\omega C_p} \right). \quad (16)$$

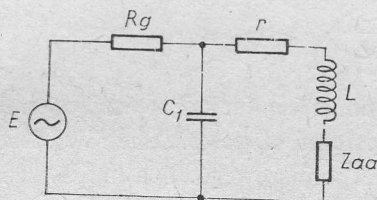
Wartość elementów L_p i C_p po stronie elektrycznej szeregowego rezonansowego obwodu przetwornika według [6] wynosi:

$$L_p = \rho_0 d^3 / 8Ae_{33}^2, \quad (17)$$

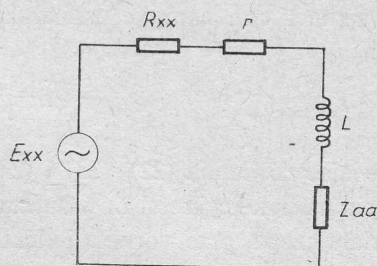
$$C_p = \frac{8(1-k^2)e_{33}^2 A}{\pi^2(1-0,8k^2)C_{33}^E d}, \quad (18)$$

gdzie ρ_0 – gęstość materiału przetwornika, k – elektromechaniczny współczynnik sprzężenia, C_{33}^E – moduł sztywności. Pomijając wpływ tłumienia oleju, impedancja przyjmie postać:

$$Z_T = \frac{\left(Z'_s + \frac{Z_k \Delta}{\Delta^2 \cos^2 \beta l + \sin^2 \beta l} - j \frac{Z_k \sin \beta l \cos \beta l}{\Delta^2 \cos^2 \beta l + \sin^2 \beta l} \right) d^2}{4A^2 e_{33}^2} + j \left(\omega L_p - \frac{1}{\omega C_p} \right). \quad (19)$$



Rys. 11. Dwuobwodowy schemat zastępczy układu pomiarowego



Rys. 12. Jednoobwodowy schemat zastępczy układu pomiarowego

W wyniku przekształcenia schematu przedstawionego na rys. 10 otrzymano dwuobwodowy układ widoczny na rys. 11. Układ ten przekształcono za pomocą twierdzenia Thévenina w jednoobwodowy (rys. 12). Ponieważ:

$$C'_2 = C_2 + C_0, \quad (20)$$

$$Z_{aa} = \frac{Z_T}{1 + j\omega C'_2 Z_T}, \quad (21)$$

stąd, wstawiając równanie (19) do równania (21) otrzymujemy

$$Z_{aa} = \frac{\mathcal{L}_1}{\mathcal{M}_1}, \quad (22)$$

gdzie

$$\mathcal{L}_1 = \frac{Z'_s d^2}{4A^2 e_{33}^2} + \frac{Z_k \Delta d^2}{4A^2 e_{33}^2 (\Delta^2 \cos^2 \beta l + \sin^2 \beta l)} - j \frac{Z_k d^2 \sin \beta l \cos \beta l}{4A^2 e_{33}^2 (\Delta^2 \cos^2 \beta l + \sin^2 \beta l)} + j \left(\omega L_p - \frac{1}{\omega C_p} \right),$$

$$\mathcal{M}_1 = 1 + j\omega C'_2 \left[\frac{Z'_s d^2}{4A^2 e_{33}^2} + \frac{Z_k \Delta d^2}{4A^2 e_{33}^2 (\Delta^2 \cos^2 \beta l + \sin^2 \beta l)} - j \frac{Z_k d^2 \sin \beta l \cos \beta l}{4A^2 e_{33}^2 (\Delta^2 \cos^2 \beta l + \sin^2 \beta l)} + j \left(\omega L_p - \frac{1}{\omega C_p} \right) \right].$$

W wyniku przekształceń oraz uwzględnienia układu przedstawionego na rys. 12 otrzymujemy:

$$E_{xx} = \frac{E}{1 + j\omega C_1 R_g}, \quad (23)$$

$$R_{xx} = \frac{R_g}{1 + j\omega C_1 R_g}. \quad (24)$$

W związku z tym napięcie na indukcyjności L wynosi:

$$U_L = \frac{E_{xx}(r + j\omega L)}{r + R_{xx} + Z_{aa} + j\omega L} \quad (25)$$

Wstawiając równania (22), (23) i (24) do (25) otrzymuje się funkcję opisującą zmiany napięcia na indukcyjności L , w zależności od przemieszczeń czopa, parametrów ośrodka, materiału czopa, przetwornika i elektrycznego układu pomiarowego. Dla linii rozwartej, tj. gdy parametr $\Delta = 0$, mamy:

$$U_L = \frac{E(r + j\omega L)}{r + Rg \left(1 - \frac{C_1 + C_2}{C_2} \right) + \frac{\mathcal{L}_2}{\mathcal{M}_2} (1 + \omega C_1 Rg) + j\omega (L + r C_1 Rg)} \quad (26)$$

gdzie

$$\mathcal{L}_2 = \frac{(Z'_s - jZ_k \operatorname{ctg} \beta l) d^2}{4A^2 e_{33}} - j \frac{\pi^2 (1 - 0,8k^2) C_{33}^E d}{8\omega (1 - k^2) e_{33}^2 A} - j\omega \frac{\rho d^2}{8A e_{33}^2},$$

$$\mathcal{M}_2 = (1 + j\omega C_2) \left[\frac{(Z'_s - jZ_k \operatorname{ctg} \beta l) d^2}{4A^2 e_{33}^2} - j \frac{\pi^2 (1 - 0,8k^2) C_{33}^E d}{8\omega (1 - k^2) e_{33}^2 A} + j\omega \frac{\rho d^2}{8A e_{33}^2} \right].$$

Równanie to opisuje przebieg napięcia na obwodzie rezonansowym w zależności od przemieszczeń reflektora dla stałej temperatury ośrodka.

4. Zniekształcenia nieliniowe przebiegu

Przyjęcie parametru $\Delta = 0$ jest uzasadnione przebiegiem krzywych 1 i 2 przedstawionych na rys. 8. Różnice występują tylko dla skrajnych wartości charakterystyk przy minimalnej i maksymalnej wartości obciążenia. Ze względu na dużą nieliniowość charakterystyk, do pomiaru przemieszczeń jest wykorzystywany tylko pewien ich zakres.

Przebieg impedancji akustycznej $f_a(\Omega t)$ w funkcji czasu dla drgań harmonicznym reflektora o amplitudzie $75 \mu\text{m}$ ilustruje rys. 13. Punkt pracy na charakterystyce oznaczono literą a . Zawartość harmonicznym, będących wynikiem nieliniowej charakterystyki impedancji akustycznej, wyznaczono rozkładając funkcję $f_a(\Omega t)$ w szereg Fouriera na drodze graficznego całkowania. Funkcję $f_a(\Omega t)$ opisano następującym szeregiem:

$$f_a(\Omega) = 64,1 + j6,7 \cos \Omega t - j0,8 \cos 2\Omega t + j0,16 \cos 3\Omega t - \dots \quad (27)$$

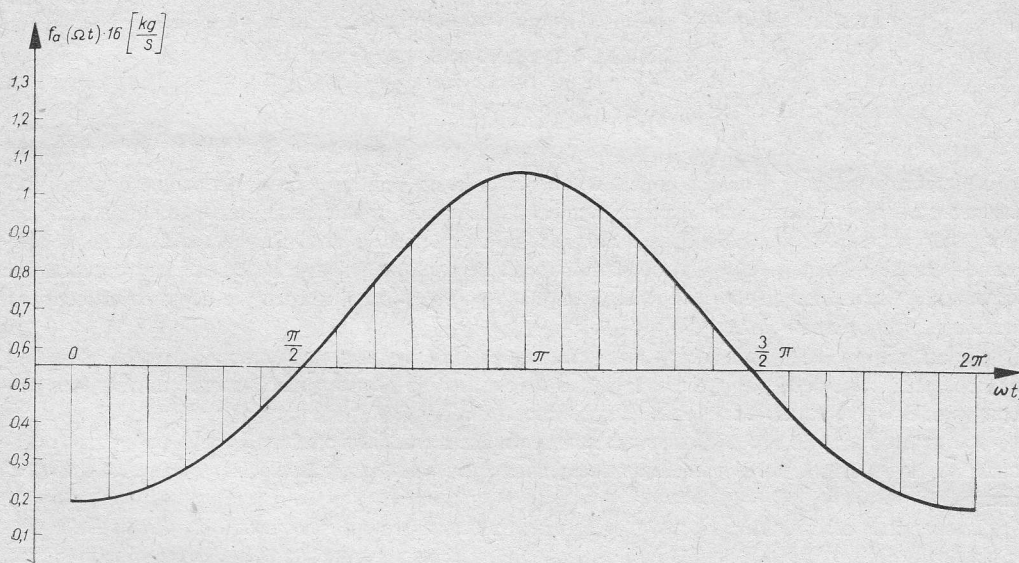
Znając amplitudy poszczególnych harmonicznym, wyznaczono współczynnik zniekształceń zdefiniowany w następujący sposób:

$$h = \sqrt{h_2^2 + h_3^2 + h_4^2 + \dots}, \quad (28)$$

gdzie

$$h_2 = A_2/A_1 \cdot 100\%, \quad h_3 = A_3/A_1 \cdot 100\%, \quad h_4 = A_4/A_1 \cdot 100\%, \dots, \quad (29)$$

zaś $A_1, A_2, A_3, \dots$ są amplitudami 1, 2, 3, ... harmonicznym.



Rys. 13. Przebieg czasowy impedancji akustycznej dla punktu a

Na podstawie tych zależności ustalono, że $h = 12\%$. Zniekształcenia można zmniejszyć pracując na niższej częstotliwości (czyli na dłuższej fali) lub mierząc drgania o mniejszej amplitudzie.

5. Zakończenie

W artykule wyprowadzono zależność napięcia na obwodzie rezonansowym, do którego dołączony jest przetwornik, od przemieszczeń reflektora. Zmiany napięcia w zależności od przemieszczeń wykorzystano do pomiaru drgań czopów w łożyskach ślizgowych. Na tej zasadzie można mierzyć drgania elementów metalowych lub niemetalowych w ośrodkach o własnościach akustycznych zbliżonych do własności akustycznych wody lub oleju.

Praca wpłynęła do Redakcji w grudniu 1973 r.

Literatura

- [1] W. P. Mason, *Piezoelectric crystals and their application to ultrasonics*. D. Van Nostrand Company, Inc. 1950.
- [2] H. W. Katz, *Solid state magnetic and dielectric devices*. John Wiley a. Sons, Inc. 1959.
- [3] W. P. Mason, *Physical acoustics and the properties of solids*. D. Van Nostrand Company, Inc. 1958.
- [4] W. P. Mason, *Physical acoustics*. Vol. I — Part A. Academic Press, 1964.
- [5] W. Drabowicz, *Ultradźwiękowa metoda pomiaru małych przemieszczeń dynamicznych*. Praca doktorska, 1972. Biblioteka IPPT-PAN, Warszawa.
- [6] J. Matauszek, *Technika ultradźwięków*. Warszawa 1961.

Анализ работы ультразвукового преобразователя в условиях переменной акустической нагрузки

Резюме

Предметом работы является определение зависимости описывающей ход напряжения в резонансном контуре, взаимодействующем с преобразователем, в зависимости от толщины слоя заполненного средой между преобразователем и рефлектором. В этой зависимости взяли во внимание влияние ряда параметров, таких как: пьезоэлектрические, упругие и диэлектрические свойства керамики, акустические свойства среды, материала рефлектора, и некоторые параметры системы, питающей преобразователь.

На основании расчётов и измерений установлено, что акустическую линию, которую образует слой среды между преобразователем и рефлектором, можно рассматривать как беспотерную и развернутую. Это значительно облегчает анализ системы.

В статье определён и коэффициент нелинейных искажений для заданной точки работы на основании характеристики, поясняющей ход модуля акустической импеданции, нагружающей преобразователь.

Также установлено, что существует возможность использования изменений напряжения в контуре в зависимости от перемещений рефлектора для измерения колебаний цапфы в подшипниках скольжения. Доказано, что по этому принципу можно производить измерения колебаний металлических и неметаллических элементов в жидких средах, со свойствами близкими акустическим свойствам воды или масла.

An Analysis of the Ultrasonic Transducer Operation at Variable Acoustic Loads

Summary

The paper is concerned with the determination of the relation between the voltage in a resonant circuit coupled to a transducer and the thickness of a layer of medium between the transducer and a reflector. Account is taken in the relation of the influence of numerous parameters, namely: piezoelectric, elastic and dielectric properties of ceramics, acoustic properties of the medium, material of the reflector and some parameters of the circuit supplying the transducer.

Calculations and measurements have proved that an acoustic line formed by the layer of medium contained between the transducer and the reflector can be regarded as a lossless and open line. This has considerably simplified the analysis of the system. Also a non-linear distortion coefficient for an operating point, set on a characteristic showing the change in the acoustic impedance forming the load, has been determined.

It has also been shown that changes in the circuit voltage caused by the reflector displacements can be used for measuring the journal vibrations in slide bearings. It has been proved that the measurements of vibrations of metallic and non-metallic elements in liquid media having properties similar to the acoustic ones of water or oil can be based on that principle.