

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

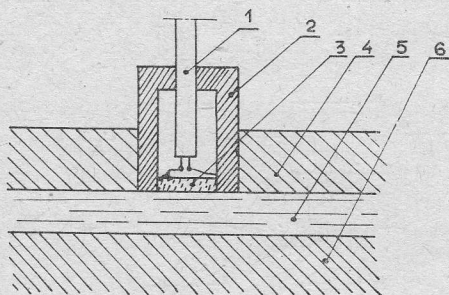
Gdańsk

Analiza pracy czujnika ultradźwiękowego do pomiaru małych przemieszczeń dynamicznych*

Przedmiotem opracowania są wyniki badań wpływu niektórych czynników zewnętrznych na pracę miniaturowego czujnika ultradźwiękowego. Czujnik o średnicy $\varnothing 8$ mm i długości 13 mm jest przeznaczony do pomiaru przemieszczeń czopów w łożyskach ślizgowych. Może być użyty do pomiaru przemieszczeń innych elementów metalowych i niemetalowych w ośrodkach ciekłych, takich np. jak olej lub woda, w zakresie temperatur od 20 do 80°C. Zakres mierzonych przemieszczeń wynosi od 5 do 180 μm . Pomiary obejmują również stałą składową przemieszczeń. Górna granica częstotliwości mierzonych drgań wynosi kilkanaście kHz.

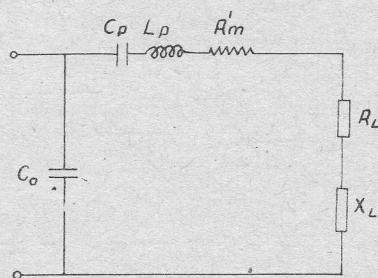
1. Wstęp

Rozpatruje się linię akustyczną złożoną z przetwornika, warstwy oleju i powierzchni odbijającej (reflektora). Zmiany obciążenia przetwornika w wyniku ruchu reflektora są



Rys. 1. Fragment układu pomiarowego

1 - kabel, 2 - oprawa, 3 - przetwornik, 4 - panewka,
5 - olej, 6 - czop



Rys. 2. Obwód zastępczy przetwornika

wykorzystane do pomiaru małych przemieszczeń dynamicznych czopów w łożyskach ślizgowych [1]. Koncepcję metody pomiarowej ilustruje rys. 1.

W wyniku ruchu reflektora (czopa) zmienia się impedancja akustyczna** i elektryczna

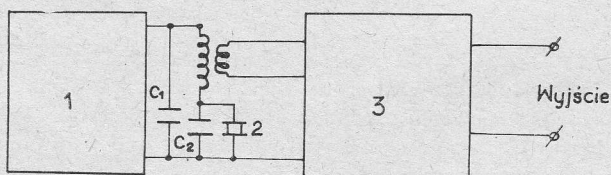
* Praca wykonana w ramach problemu resortowego PAN-19, grupa tematyczna 7.

** Jeżeli odległość między reflektorem a przetwornikiem ulega zmianie w ramach $1/4$ długości fali, wówczas wartość impedancji akustycznej osiąga ekstremum.

zastępczego obwodu przetwornika, którego schemat przedstawiono na rys. 2. Zmianie ulega indukcyjność L_p lub pojemność C_p , w zależności od obciążenia wywołanego przez impedancję ośrodka $R_L + jX_L$. Jeżeli z przetwornika pobierana jest energia, zmianie ulega oporność promieniowania $R'_m + R_L$.

2. Pomiar przemieszczeń czopów w łożyskach ślizgowych

Część elektryczną układu pomiarowego ilustruje rys. 3. Źródłem zmiennego obciążenia obwodu rezonansowego jest impedancja przetwornika. Obwód rezonansowy jest jednocześnie tłumiony i rozstrajany z częstotliwością przemieszczeń czopa. Napięcie dużej

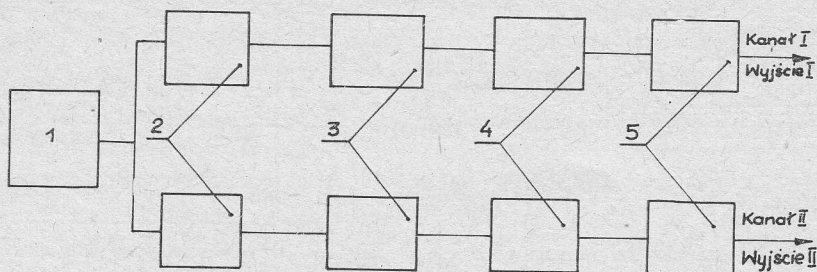


Rys. 3. Część elektryczna układu pomiarowego

1 – generator, 2 – przetwornik, 3 – blok z demodulatorem, filtrem dolnoprzepustowym i wzmacniaczem prądu stałego

częstotliwości, przyłożone do obwodu rezonansowego i zasilającego przetwornik, zostaje zmodulowane w amplitudzie. Przebieg ten jest demodulowany, filtrowany i wzmacniany do odpowiedniego poziomu.

Schemat blokowy dwukanałowego układu pomiarowego przedstawiono na rys. 4. Urządzenie to pozwala na wyznaczenie przemieszczeń czopa w dwóch kierunkach wzajemnie prostopadłych. Napięcie zasilające przetwornik jest generowane w oscylatorze



Rys. 4. Schemat blokowy urządzenia pomiarowego

1 – oscylator i separator, 2 – wzmacniacz rezonansowy, 3 – wzmacniacz mocy, 4 – kompensator i demodulator, 5 – wzmacniacz prądu stałego i filtr dolnoprzepustowy

typu Clappa. Między dwustopniowymi, selektywnymi wzmacniaczami a oscylatorem znajduje się separator. Czujnik ultradźwiękowy jest dołączony do wzmacniacza mocy poprzez obwód rezonansowy typu II, w którym impedancja przetwornika (zmieniająca się z przemieszczeniem czopa) moduluje napięcie wysokiej częstotliwości. Modulowane

napięcie steruje w każdym kanale stopień demodulatora pracującego w klasie C. W wyniku zmian poziomuysterowania zmienia się składowa stała prądu demodulatora. Zmiany te są małe i dlatego zastosowano prądowy układ kompensacyjny. Sygnał z wyjścia demodulatora jest w każdym kanale filtrowany i wzmacniany.

Do pomiaru przemieszczeń o amplitudach $70 \div 80 \mu\text{m}$ opracowano miniaturowy czujnik o średnicy 8 mm i długości 13 mm [2]. Przetwornik ma średnicę 4 mm, jest wykonany z tytano-cyrykonianu ołowiu i osadzony w cienkim pierścieniu metalowym w płaszczynie węglowej. Przetwornik promieniuje do ośrodka poprzez płytkę półfalową ze szkła organicznego. Jest on obciążony zmienną impedancją akustyczną oraz impedancją stałą, jaką tworzy warstwa oleju o grubości 2λ , granicząca z tworzywem uszczelniającym. Hermetyczna obudowa czujnika, składająca się z trzech części, zapewnia niezawodną pracę urządzenia w trudnych warunkach, w obecności wibracji i podwyższonych temperatur ośrodka.

3. Czynniki określające dokładność pomiarów

3.1. Wpływ temperatury i tłumienia oleju

Proces rozprzestrzeniania się podłużnej fali ciśnienia w oleju można uważać za proces adiabatyczny, dla którego prędkość fali ultradźwiękowej wynosi:

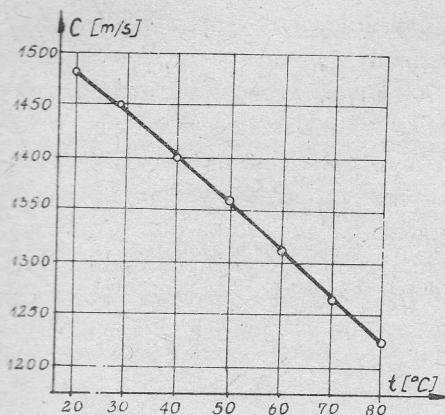
$$c = \sqrt{\frac{1}{\rho \beta_{\text{ad}}}}, \quad (1)$$

gdzie ρ — gęstość oleju, a

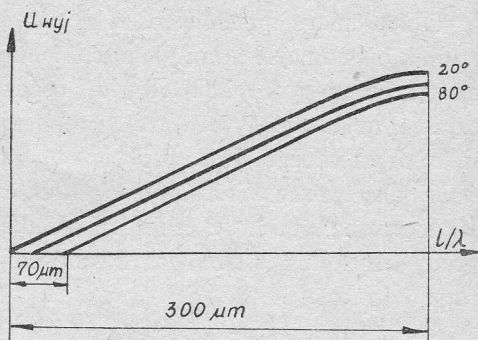
$$\beta_{\text{ad}} = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp} \quad (2)$$

jest adiabatycznym współczynnikiem ściśliwości. Ściśliwość oleju zależy od temperatury; ze wzrostem temperatury zwiększa się i powoduje zmniejszenie prędkości fali ultradźwiękowej.

Do pomiaru prędkości fali ultradźwiękowej stosowane są metody interferometryczne, impulsowe i optyczne [3]. W badaniach własnych posłużono się metodą interferometryczną. Pomiar przeprowadzono w oleju dla temperatur od 20 do 80°C . Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 5. W wyniku wzrostu temperatury od 20 do 80°C prędkość, a przez to i długość fali, zmniejszyły się o 17,2%. Zmiany te powodują przesunięcie charakterystyk pomiarowych przemieszczeń czopa. Świadczą o tym wyniki pomiarów czujnikiem ultradźwiękowym, którego przetwornik (o stosunku średnicy do grubości płytki $D/d = 2,58$) zainstalowano w odległości $100 \div 150 \mu\text{m}$ od reflektora. Stwierdzono, że w wyniku zmiany temperatury od 20 do 80°C , następuje przesunięcie charakterystyk o wartość około $70 \mu\text{m}$ (rys. 6). Ten fakt, wpływający na błąd pomiaru, określa potrzebę utrzymywania małych zmian temperatury oleju podczas badań przemieszczeń czopa w łożysku. Na ogół w czasie tych badań temperatura oleju zmienia się tylko o kilka stopni C. W tych warunkach błąd pomiaru szacuje się na około 3,5%.



Rys. 5. Zmiany prędkości ultradźwięku w zależności od temperatury



Rys. 6. Przeszczanie się charakterystyk pomiarowych w zależności od temperatury

Na podstawie obliczeń i pomiarów stwierdzono, że wpływ tłumienia oleju na impedancję akustyczną, obciążającą przetwornik, jest mały i można go pominąć [5]. Wykazano [4], na podstawie pomiaru tłumienia fali ultradźwiękowej o częstotliwości 1,23 MHz, która rozchodziła się w oleju o temperaturze 20°C, że współczynnik tłumienia wynosi $\alpha = 0,17$ dB/mm.

3.2. Wpływ materiału i gładkości powierzchni czopa

Zmienna impedancja akustyczna, jaką obciążony jest przetwornik pracujący w ośrodku stratnym o skończonych wymiarach i zakończonym impedancją Z_R , wynosi [6]:

$$Z_Z = Z_K \left[\frac{\Delta + \operatorname{ctgh} \theta l}{1 + \Delta \operatorname{ctgh} \theta l} \right], \quad (3)$$

gdzie

$$Z_K = \frac{A \rho \omega \beta}{\alpha^2 + \beta^2} + j \frac{A \rho \omega \alpha}{\alpha^2 + \beta^2}, \quad (4)$$

zaś A — promieniująca powierzchnia przetwornika, ρ — gęstość ośrodka (oleju), ω — częstotliwość pracy, l — odległość między czopem a przetwornikiem, $\beta = 2\pi/\lambda$, $\theta = \alpha + j\beta$ — stała propagacji oleju, $\Delta = Z'_0/Z_R$, Z'_0 i Z_R — akustyczna oporność właściwa oleju i materiału, z którego wykonano czop.

Pomijając wpływ tłumienia oleju, czyli przyjmując $\alpha = 0$, równanie (3) redukuje się do równań (5) i (6). Zamiast funkcji hiperbolicznych otrzymujemy funkcje trygonometryczne, to jest

$$Z_Z = Z_K \frac{\cos \beta l + j \Delta \sin \beta l}{\Delta \cos \beta l + j \sin \beta l}, \quad (5)$$

gdzie

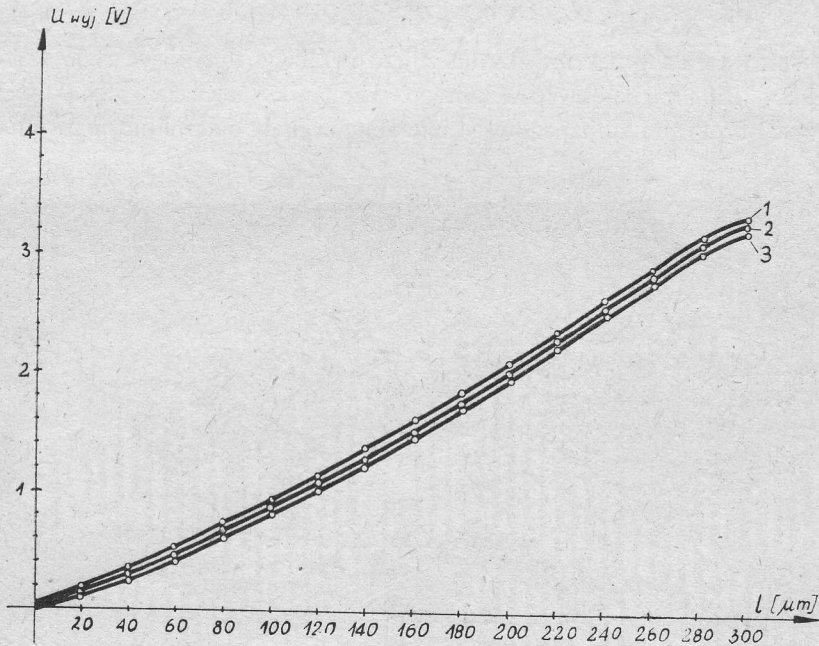
$$Z_K = A \rho c. \quad (6)$$

Równanie (5) można przekształcić do postaci następującej

$$Z_z = \frac{Z_K \Delta}{\Delta^2 \cos^2 \beta l + \sin^2 \beta l} - j \frac{Z_K \sin \beta l \cos \beta l}{\Delta^2 \cos^2 \beta l + \sin^2 \beta l} \quad (7)$$

Część całkowitej energii wypromieniowanej z przetwornika odbija się od czopa i powraca do przetwornika, zaś pozostała część wchłaniana jest przez czop. Pewna część energii przenikającej do czopa jest rozproszona na przeciwległej zakrzywionej ścianie czopa. Impedancja akustyczna reflektora stalowego jest bardzo zbliżona do akustycznej oporności właściwej stali.

Stosunek energii odbitej do energii wchłanianej przez czop zależy od parametru Δ . Gdyby $\Delta=0$, to czop jest idealnie sztywny i wypromieniowana energia jest w całości odbita. Powstaje wówczas fala stojąca, zaś energia oscyluje między przetwornikiem a reflektorem. W zależności od obciążenia przetwornika zmienia się wartość i znak części urojonej impedancji.



Rys. 7. Charakterystyki pomiarowe ilustrujące wpływ gładkości powierzchni czopa

1 – maksymalna wysokość chropowatości 3 - 3,5 μm , 2 – 14,5 - 16,5 μm , 3 – 26 - 28 μm

Dla czopa stalowego zmiany oporności promieniowania w zależności od jego przemieszczenia wynoszą kilka procent i mogą być pominięte. Nie wpływają one praktycznie na czułość urządzenia i nie zmieniają przebiegu funkcji Z_z w zależności od l/λ [5].

Przy tych założeniach równanie (5) przyjmuje dla $\Delta=0$ postać następującą:

$$Z_z = -jZ_K \operatorname{ctg} \beta l. \quad (8)$$

Równanie to wykorzystano w pracy [5] do wyprowadzenia zależności opisującej przebieg napięcia na obwodzie rezonansowym, zasilającym przetwornik, od przemieszczeń reflektora.

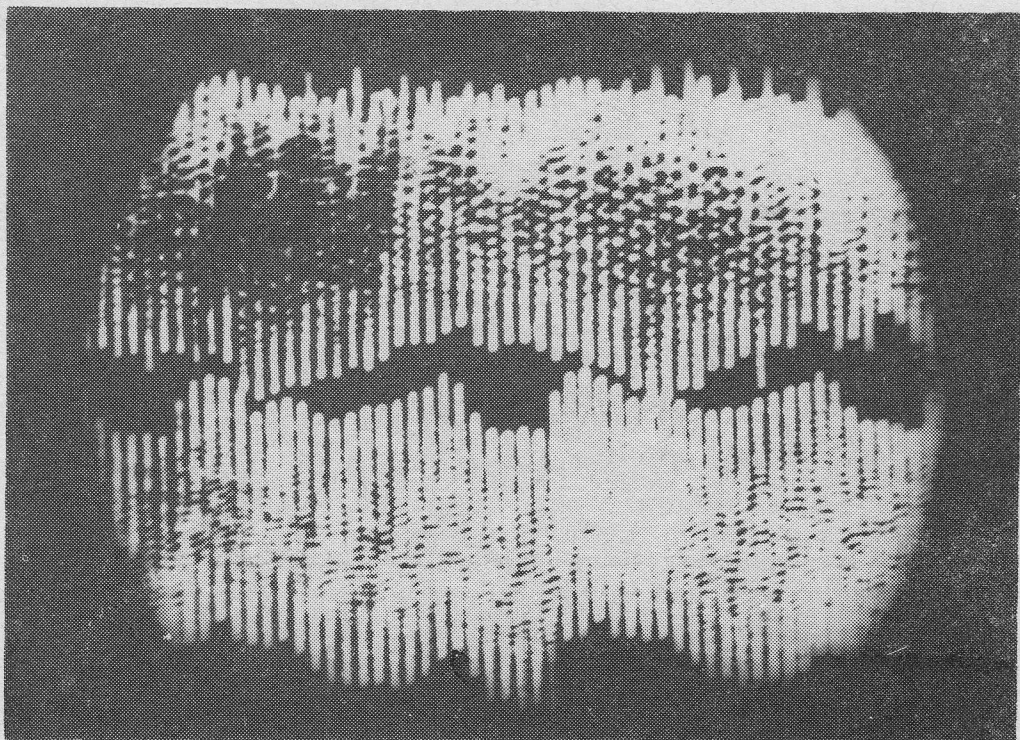
Dla reflektorów z aluminium lub szkła parametr Δ jest większy niż dla stali i powinien być uwzględniony.

Wpływ gładkości powierzchni czopa na zmianę napięcia ilustruje rys. 7. Charakterystyka 1 odpowiada polerowanej powierzchni czopa o maksymalnej wysokości chropowatości $3 - 3,5 \mu\text{m}$, zaś 2 i 3 odpowiadają powierzchni czopa toczonej dokładnie i zgrubnie. Maksymalne wysokości chropowatości wynosiły odpowiednio $14,5 \div 16,5$ i $26 \div 28 \mu\text{m}$. Charakterystyki wskazują na przesunięcie się skutecznej powierzchni odbicia w stosunku do powierzchni, od której mierzone były przesunięcia (to jest dla wierzchołków nierówności).

Czułość urządzenia dla trzech badanych powierzchni nie zmniejszyła się, gdyż zjawisko dyfrakcji nie odgrywało większej roli (stosunek długości fali do maksymalnej różnicy wysokości chropowatości był duży).

4. Pomiary przemieszczeń czopa

W celu sprawdzenia pracy urządzenia zdjęto przebiegi ilustrujące ruch walca stałego o średnicy $\varnothing 50 \text{ mm}$, na obwodzie którego wykonano 24 nacięcia o głębokości $0,1 \text{ mm}$. Zmieniając obroty silnika napędowego mierzono sygnały o amplitudzie $50 \mu\text{m}$ i często-



Rys. 8. Dwa przebiegi sygnałów o częstotliwości 30 tysięcy na minutę. Górny przebieg zdjęto dla czujnika indukcyjnego, dolny dla ultradźwiękowego

tliwości od kilkuset do 50 tysięcy przebiegów na minutę. Na rysunku 8 przedstawiono przykładowo oscylogram ilustrujący dwa przebiegi o częstotliwości 30 tysięcy sygnałów na minutę. Przebieg górny zdjęto z wyjścia z mostka tensometrycznego MT-50, pracującego z czujnikiem indukcyjnym, zaś dolny z wyjścia układu ultradźwiękowego. Oba czujniki umieszczone były obok siebie, przy czym czujnik indukcyjny pracował w układzie różnicowym. Obwiednie przebiegów są wynikiem ruchu walca w granicach luzu łożyska. Dla czujników indukcyjnych obwiednia ta jest zniekształcona na skutek niejednorodnej przenikalności magnetycznej materiału walca. W miarę wzrostu prędkości obrotowej głębokość wnikania strumienia magnetycznego zmniejsza się i powstają większe zniekształcenia przebiegu. Czujnik ultradźwiękowy nie reaguje na tego rodzaju zakłócenia.

5. Wnioski końcowe

W wyniku badań stwierdzono przydatność urządzenia do pomiaru małych przemieszczeń dynamicznych czopów w łożyskach ślizgowych.

W odróżnieniu od czujników indukcyjnych, czujniki ultradźwiękowe nie wymagają układu różnicowego i nie są wrażliwe na wpływ pola elektromagnetycznego i niejednorodnej przenikalności magnetycznej materiału czopa.

Aparatura ultradźwiękowa pozwala mierzyć przemieszczenia elementów wykonanych ze szkła, porcelany, aluminium, miedzi, mosiądzu i innych materiałów w ośrodkach ciekłych (olej, woda) lub innych o podobnych własnościach akustycznych i temperaturze od 20 do 80°C. Technika pomiarowa wymaga by przestrzeń między czujnikiem a reflektorem była wypełniona olejem. Ogranicza to możliwość stosowania urządzenia do badania łożysk pracujących w pasmie kawitacji. Z drugiej jednak strony wydaje się być możliwe zastosowanie urządzenia do wyznaczenia momentu powstania i zanikania kawitacji w łożyskach, ponieważ powstają wówczas duże zmiany obciążenia przetwornika, które można łatwo rejestrować na ekranie oscyloskopu.

Praca wpłynęła do Redakcji w kwietniu 1974 r.

Literatura

- [1] W. Drabowicz, *Ultradźwiękowe urządzenie do pomiaru małych przemieszczeń dynamicznych. Pomiary, Automatyka, Kontrola*, 1973, nr 5.
- [2] W. Drabowicz, *Ultradźwiękowy czujnik do pomiaru małych przemieszczeń dynamicznych. Prace XIX otwartego seminarium z akustyki. Gdańsk-Sopot, wrzesień 1972.*
- [3] K. F. Herzfeld, T. A. Litovitz, *Absorption and Dispersion of Ultrasonic Waves*. Academic Press, New York a. London, 1959.
- [4] W. P. Mason, *Piezoelectric Crystals and Their Application to Ultrasonics*. Van Nostrand Company, Inc., 1950.
- [5] W. Drabowicz, *Ultradźwiękowa metoda pomiaru małych przemieszczeń dynamicznych. Praca doktorska. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa 1972.*
- [6] W. P. Mason, *Physical Acoustics* Vol. I — Part A, Academic Press, New York a. London 1964.

Анализ работы ультразвукового преобразователя служащего измерениям малых динамических перемещений

Резюме

Темой публикации являются результаты исследований влияния нескольких факторов на работу миниатюрного ультразвукового преобразователя. Этот преобразователь диаметром 8 мм и длиной 13 мм предназначен для измерений перемещений в подшипниках скольжения, но он может быть применен также в измерении перемещений и других металлических и неметаллических элементов в жидкостных средах, таких как масло, вода и других в интервале температур 20 - 80°C.

Интервал перемещений изменяется в пределах от 5 до 180 μm .

Измерения проводятся с учетом постоянной составляющей. Верхний предел частот измеряемых перемещений 20 кГц.

Operation of an Ultrasonic Transducer for Measurements of Small Dynamic Displacements

Summary

Results of investigations of the influence of several factors on the operation of a miniaturized ultrasonic transducer have been discussed. The transducer is of 8 mm diameter and 13 mm long. Mainly designed for measuring small displacements of shafts in journal bearings, it may also be used for measuring the displacements of metallic and non-metallic elements in liquid media such as oil, water and the like, within a temperature range of 20 to 80°C.

The measured displacements range from 5 to 180 μm . The measurements are taken as based on a constant component value. The upper frequency limit of the measured displacements equals to about 20,000 Hz.