

3.10.4. — fale dźwiękowe w cieczech
3.10.15 — techniki pomiarowe

A. Balcerzak, R. Płowiec

CHARAKTERYSTYKA I KONSTRUKCJA
ZBUDOWANEGO W IPPT STANOWISKA
DO ULTRADŹWIĘKOWEGO BADANIA ZJAWISK
RELAKSACYJNYCH W CIECZACH
W ZAKRESIE CZĘSTOTLIWOŚCI 10–150 MHz

21/1994

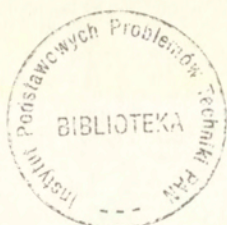
P. 269



W A R S Z A W A 1 9 9 4

<http://rcin.org.pl>

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 8 czerwca 1994 r.



56628



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
Nakład 100 egz. Ark. wyd. 0,75 Ark. druk. 1,0
Oddano do drukarni w lipcu 1994 r.

Wydawnictwo Spółdzielcze sp. z o.o.
Warszawa, ul. Jasna 1

Andrzej Balcerzak
Ryszard Płowiec
Zakład Akustyki
Fizycznej
IPPT PAN

CHARAKTERYSTYKA I KONSTRUKCJA ZBUDOWANEGO W IPPT STANOWISKA
DO ULTRADŹWIĘKOWEGO BADANIA ZJAWISK RELAKSACYJNYCH W CIECZACH
W ZAKRESIE CZĘSTOTLIWOŚCI 10-150 MHz

STRESZCZENIE

W niniejsze pracy opisano zasadę działania oraz konstrukcję stanowiska do pomiarów prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych w cieczach. Pomiaru takie są niezbędne do badania zjawisk relaksacyjnych zachodzących w ośrodkach ciekłych.

Opisywane stanowisko służy do pomiaru prędkości fazowej, prędkości grupowej oraz współczynnika tłumienia fal ultradźwiękowych w cieczach w zakresie częstotliwości 10-150 MHz. Podstawy teoretyczne tych pomiarów omówione są w [1-3].

1. WSTĘP

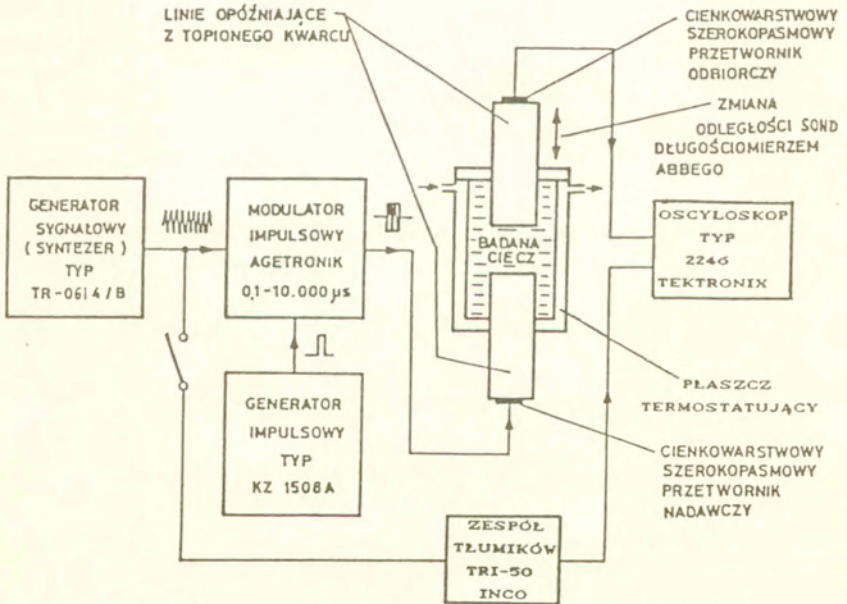
Dla pełnych badań ośrodków ciekłych metodami spektroskopii ultradźwiękowej niezbędne jest wykonywanie pomiarów prędkości i tłumienia propagujących się w nich fal ultradźwiękowych w możliwie szerokim zakresie częstotliwości [4]. Do takich badań w zakresie 0.5-10 MHz skonstruowano zautomatyzowany układ wykorzystujący metodę rezonancyjną (Eggersa) [5]. Opisane poniżej stanowisko, działające w oparciu o zupełnie inną metodę, rozszerza zakres pomiarów na częstotliwości 10-150 MHz, co umożliwi skompletowanie pełniejszych danych o prędkości i tłumieniu ultradźwięków w badanym ośrodku ciekłym oraz określenie parametrów

relaksacyjnych tych ośrodków.

2. OPIS STANOWISKA POMIAROWEGO

Stanowisko umożliwia dokonywanie pomiarów prędkości i tłumienia ultradźwięków w cieczach o temperaturach od -30°C do $+120^{\circ}\text{C}$. Pomiary można przeprowadzać w ośrodkach aktywnych chemicznie. Błąd pomiaru prędkości nie przekracza 0.05%, a błąd pomiaru tłumienia 1%. Maksymalna wartość tłumienia możliwa do zmierzenia jest równa 3 Np, natomiast współczynnika tłumienia - $5 \cdot 10^4$ Np/m, dzięki możliwości pomiaru odległości z dużą dokładnością ($1 \mu\text{m}$).

Zasadę działania układu ilustruje rys.1.



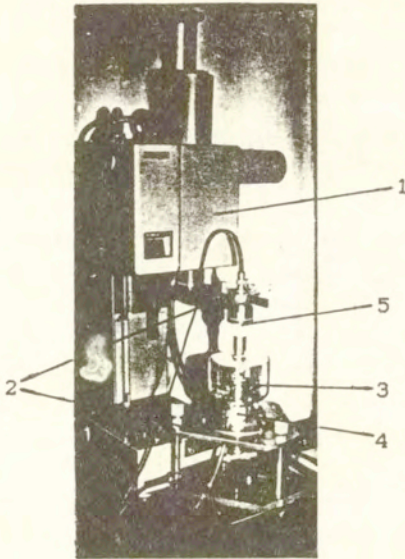
Rys.1. Schemat blokowy układu do pomiarów prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych w cieczach w zakresie częstotliwości 10-150 MHz.

Sygnal wielkiej częstotliwości z generatora typu TR-0614/B produkcji węgierskiej podawany jest na wejście

modulatora impulsowego f-my Agetronik z Warszawy. Sygnał modulujący pobierany jest z generatora impulsowego typu KZ 1508A f-my KABID-ZOPAN. Na wyjściu modulatora otrzymuje się sygnał o przebiegu prostokątnym wypełnionym w.cz., który zasila ultradźwiękowy przetwornik nadawczy. Przetwornik ten przetwarza drgania elektryczne w drgania mechaniczne o tej samej częstotliwości, emitowane następnie poprzez linię opóźniającą pod postacią fali ultradźwiękowej do badanego ośrodka ciekłego znajdującego się w naczyniu pomiarowym. Przetwornik, linia opóźniająca i obudowa wraz z połączeniami elektrycznymi składają się na sondę ultradźwiękową. Po dotarciu fali ultradźwiękowej, poprzez ciecz oraz drugą akustyczną linię opóźniającą, do umieszczonego w sondzie odbiorczej (górnej) przetwornika odbiorczego, jest ona z powrotem przetwarzana w sygnał elektryczny. Sygnał ten jest wzmacniany i uwidoczniany za pomocą oscyloskopu typu 2246 f-my Tektronix. Sygnał odniesienia, konieczny przy pomiarach prędkości metodą impulsowo-fazową, podawany jest poprzez zespół tłumików typu TRI-50 f-my INCO.

Jednym z podstawowych warunków osiągnięcia dużej dokładności pomiarów jest określanie zmiany odległości sond w trakcie pomiaru prędkości lub tłumienia. Δl oraz $l_2 - l_1$, z możliwie małym błędem. Stąd konstrukcję mechanizmu przesuwu sondy odbiorczej, gdyż w naszym stanowisku zmiana odległości sond następuje poprzez przesunięcie tej sondy, oparto o długościomierz pionowy Abbego produkcji niemieckiej. Umożliwia to wykorzystanie jego precyzyjnych mechanizmów przesuwu pionowego oraz daje możliwość dokładnego pomiaru odległości (do $1 \mu\text{m}$) - rys.2.

Ze względu na występującą często asymetrię akustycznych osi przetworników piezoelektrycznych w stosunku do osi akustycznych linii opóźniających oraz nierównoległość względem siebie płaszczyzn czołowych tychże linii czy innych niedokładności wykonania np. osadzenia linii wraz z przetwornikiem w obudowie sondy ultradźwiękowej, konieczne jest zastosowanie mechanicznych układów regulacyjnych celem



Rys.2. Widok: 1-adaptowanego długościomierza Abbego, 2-mechanicznych układów regulacyjnych, 3-naczynia oraz 4-sondy nadawczej i 5-sondy odbiorczej.

uzyskania osiowości i równoległości sond pomiarowych. Dlatego też sonda dolna zamocowana jest w uchwycie, który pozwala na jej przesuw w płaszczyźnie poziomej oraz zmianę kąta ustawienia. Ta ostatnia możliwość dotyczy także sondy górnej.

Część ultradźwiękowa stanowiska pomiarowego składa się z dwu par szerokopasmowych sond ultradźwiękowych obejmujących pasmo 10-150 MHz, wykonanych przez Instytut Fizyki Technicznej WAT.

Jak wspomniano wyżej, sondy pomiarowe wyposażone są w linie opóźniające wykonane z mało tłumiącego falę topionego kwarcu. Przetworniki ultradźwiękowe wykonane z niobianu litu (LiNbO_3) połączono z kwarcowymi liniami opóźniającymi technologią próżniowej kompresji indu. Uprzednio jednak, wg wymagań technologii łączenia, konieczna jest metalizacja powierzchni warstwami Au i Cr. Po połączeniu przetworników z

liniami opóźniającymi szlifowano je do założonych grubości. Przy zastosowaniu opisanej wyżej technologii łączenia uzyskuje się bardzo dobre dopasowanie przetwornika do linii.

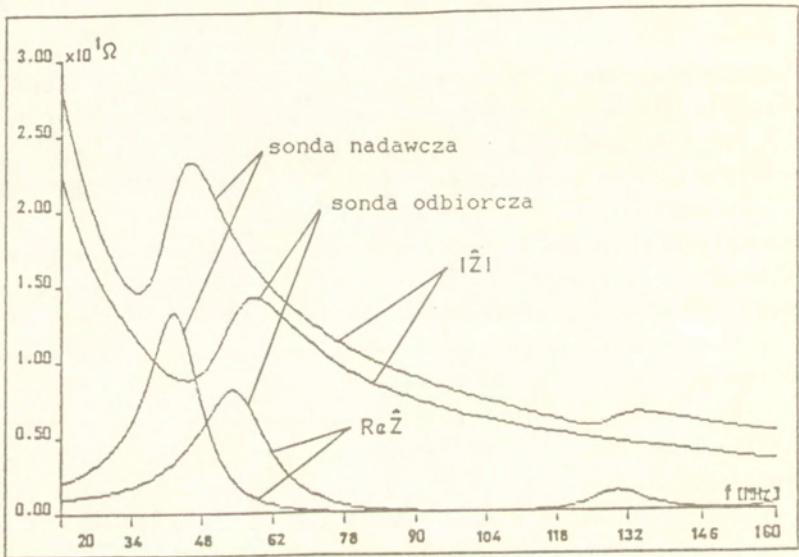
Para sond na częstotliwości wyższe, do 150 MHz, ma przetworniki na częstotliwość pracy 100 i 120 MHz (grubość przetworników 35 i 28 μm), natomiast druga para na częstotliwości niższe, do 60 MHz, ma przetworniki 40 i 50 MHz (grubość przetworników 82 i 64 μm). Charakterystyki teoretyczne sond przedstawiono na rys.3 i 4.

Wykonane sondy wraz z naczyniem pomiarowym przedstawiono na rys.5.

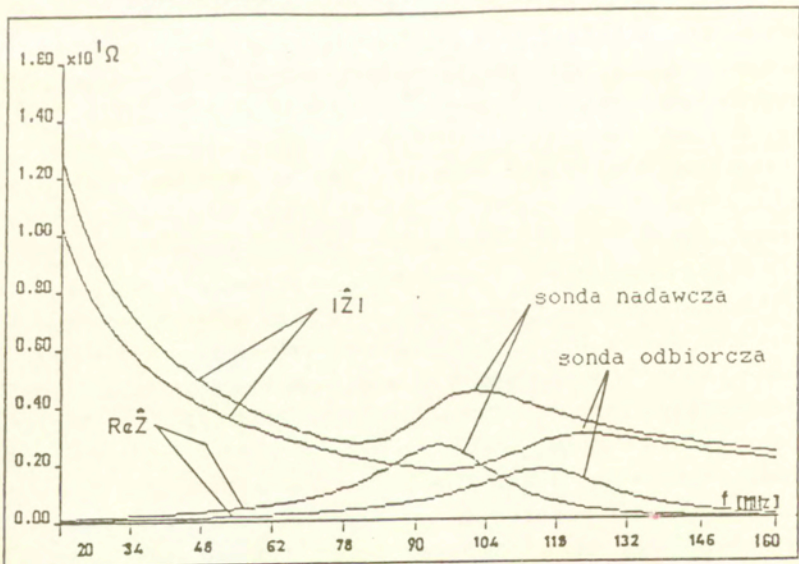
Sprawność przetwarzania wykonanych sond określono mierząc amplitudy sygnałów pierwszego echa ultradźwiękowego w linii opóźniającej. W pomiarach tych sondy zasilano napięciem z wyjścia modulatora o amplitudzie $1.5 V_{PP}$ na oporności 50 Ω . Wyniki tych badań przedstawiono na rys.6 i 7 dla pary sond na zakres 10-60 MHz oraz na rys. 8 i 9 dla pary sond 60-150 MHz. Jak widać dla pary sond na niższe częstotliwości maksima sprawności przetwarzania występują przy częstotliwościach bardzo zbliżonych do częstotliwości odpowiadających maksymalnym wartościom oporności promieniowania ($\text{Re}\hat{Z}$). Dla pary wysokoczęstotliwościowej zmierzone maksima sprawności są w stosunku do krzywych teoretycznych dość znacznie przesunięte w kierunku wyższych częstotliwości, co jest prawdopodobnie spowodowane niedopasowaniem oporności wyjściowej modulatora do oporności wejściowych sond.

Dolna sonda jest połączona szczelnym szlifem ze szklanym naczyniem pomiarowym zaopatrzonym w płaszcz termostatujuący. W czasie pomiarów przez płaszcz przepływa ciecz termostatujuąca z termostatu. Cieczą termostatujuącą, w zależności od zakresu temperatury w jakim dokonuje się pomiarów prędkości lub tłumienia, jest woda destylowana, glikol etylenowy lub etanol oraz ewentualnie mieszaniny tych cieczy. Od góry naczynie pomiarowe jest szczelnie zamknięte korkiem teflonowym, w którym są otwory na górną sondę i czujnik temperatury.

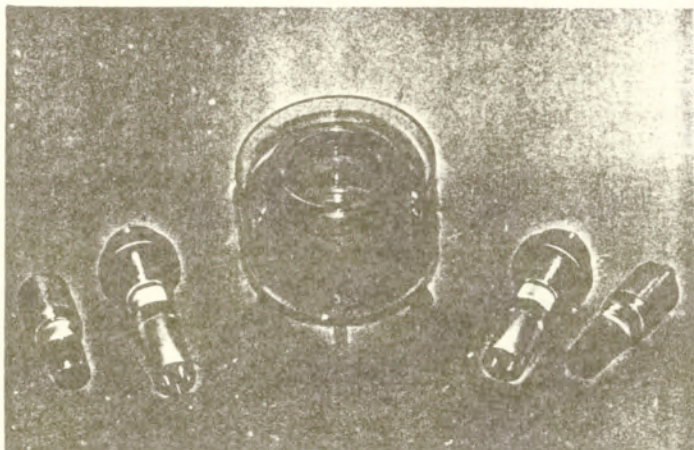
Po zmontowaniu i uruchomieniu stanowiska przeprowadzone



Rys.3. Zależność teoretyczna oporności dla pary sond 10-60 MHz.



Rys.4. Zależność teoretyczna oporności dla pary sond 60-150 MHz.



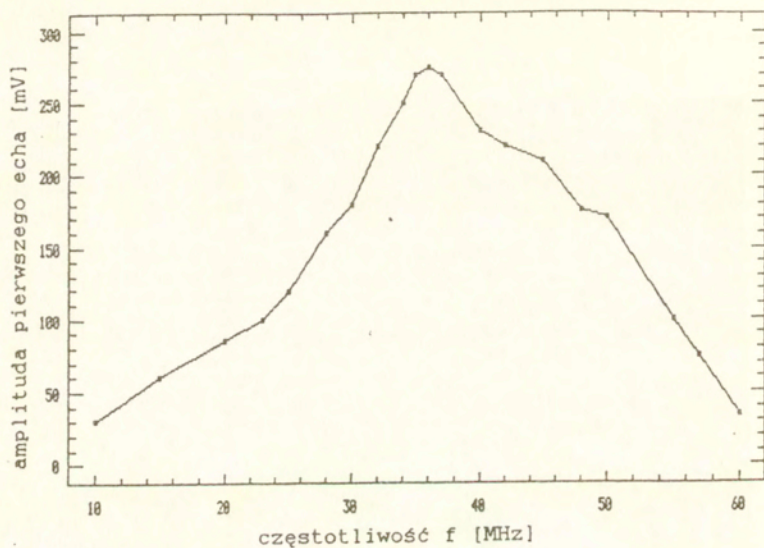
Rys.5. Sondy i naczynie pomiarowe.

zostały pomiary kontrolne przy użyciu wody destylowanej jako cieczy wzorcowej. Pomiary wykazały prawidłowe działanie stanowiska; prędkość zmierzono z błędem nie większym niż 0.05%, a tłumienie - 1%. Stwierdzono jednak, w zakresie obejmującym częstotliwości pracy sond, znaczne różnice czułości tych sond w zależności od częstotliwości. Wynika to również z charakterystyk przedstawionych na rys. 3, 4 oraz 6-9. Wydaje się, że w zakresach odpowiadających niższej czułości sond (tj. 50-80 MHz i 140-150 MHz) pomiary w cieczach silniej tłumiących będą wymagały zastosowania dodatkowych wzmacniaczy sygnału elektrycznego otrzymywanego z sondy odbiorczej.

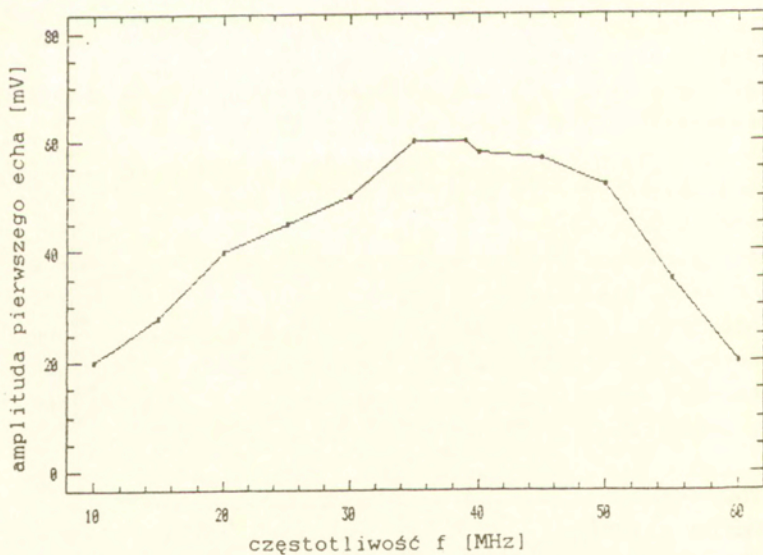
3. METODY POMIARU

3.1. Pomiar prędkości

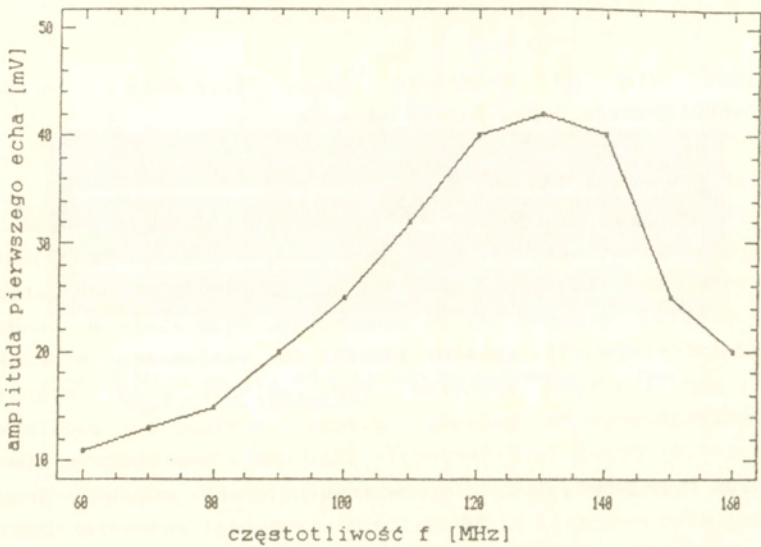
Pomiar prędkości fazowej jest dokonywany metodą impulsowo-fazową tzn. w oparciu o porównanie faz dwóch koherentnych sygnałów impulsowych, natomiast prędkość grupową



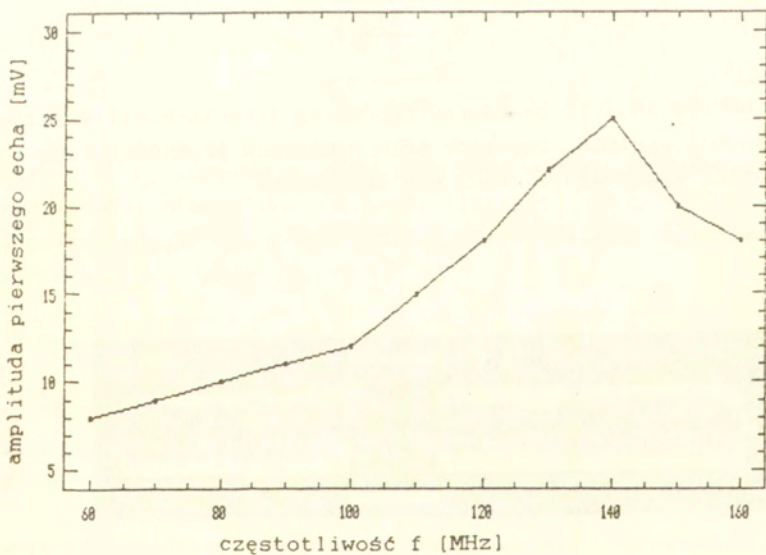
Rys.6. Zależność amplitudy pierwszego echa od częstotliwości - sonda nadawcza 10-60 MHz.



Rys.7. Zależność amplitudy pierwszego echa od częstotliwości - sonda odbiorcza 10-60 MHz.



Rys.8. Zależność amplitudy pierwszego echa od częstotliwości - sonda nadawcza 60-150 MHz.



Rys.9. Zależność amplitudy pierwszego echa od częstotliwości - sonda odbiorcza 60-150 MHz.

oblicza się na podstawie czasu przejścia impulsu ultradźwiękowego przez badany ośrodek.

Pomiar prędkości fazowej.

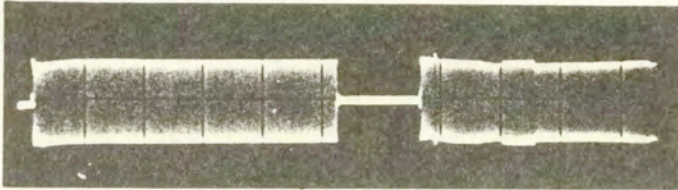
W tym celu na wejście oscyloskopu, oprócz odbieranego z toru ultradźwiękowego sygnału impulsowego, doprowadzany jest, odpowiednio stłumiony, koherentny z nim sygnał z generatora fali ciągłej. Sygnały te, po zsumowaniu, dają stały w czasie obraz interferencji, zależny jedynie od wzajemnego stosunku faz i amplitud tych sygnałów. Przy zmianie drogi sygnału ultradźwiękowego w badanej cieczy następuje dodatkowe opóźnienie. Obraz interferencji (np. maksimum lub minimum sygnału wypadkowego) będzie powtarzał się po zmianie drogi równej długości fali λ lub jej wielokrotności - $\Delta l = n\lambda$, gdzie n jest liczbą naturalną. Stąd mierząc zmianę odległości Δl odpowiadającą kolejnym minimum albo maksimum amplitudy sygnału wypadkowego możemy obliczyć szukaną prędkość fazową:

$$c_f = \frac{\Delta l}{n} f \quad (1)$$

Na rys.10 i 11 przedstawiono obraz interferencji w fazie maksimum i minimum, uzyskany przy pomiarach prędkości fazowej za pomocą zbudowanego przez nas stanowiska.



Rys.10. Maksimum sygnału zinterferowanego; z lewej - sygnał odniesienia.



Rys.11. Minimum sygnału zinterferowanego; z lewej - sygnał odniesienia.

Pomiar prędkości grupowej

Pomiar ten polega na wyznaczeniu czasu przejścia impulsu ultradźwiękowego przez badany ośrodek. Odbywa się on bezpośrednio poprzez wykorzystanie możliwości mierzenia odstępów czasowych za pomocą zastosowanego oscyloskopu. Prędkość tę wyznacza się ze wzoru:

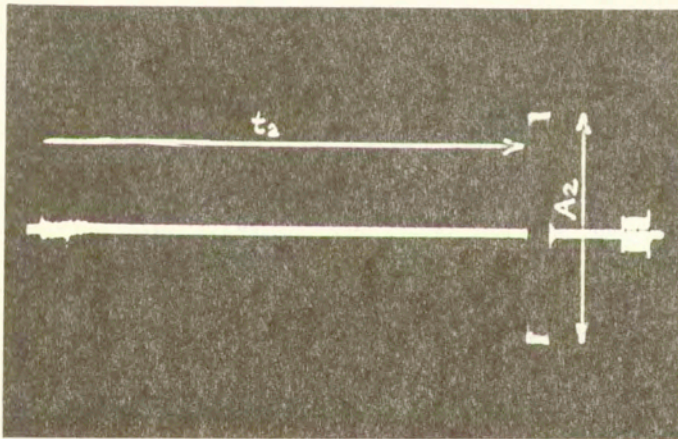
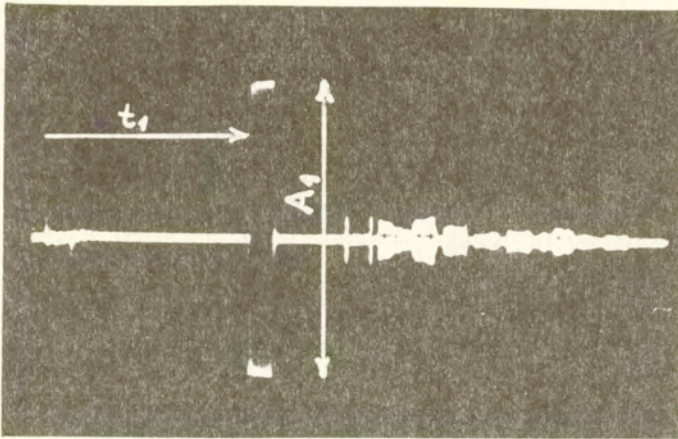
$$c_g = \frac{l_2 - l_1}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

gdzie l_1 i l_2 oznaczają dwa położenia sond (w przypadku opisywanego stanowiska - sondy górnej), a t_1 i t_2 odpowiadające im czasy przejścia impulsu. Sposób wyznaczania czasów t_1 i t_2 ilustruje rys.12.

3.2. Pomiar tłumienia

Współczynnik tłumienia jest wyznaczany poprzez pomiar amplitudy pierwszego impulsu przechodzącego przez ciecz metodą przepuszczania. Możliwy jest także pomiar tłumienia metodą odbiciową.

W metodzie odbiciowej stosuje się jeden przetwornik nadawczo-odbiorczy. Impuls ultradźwiękowy, generowany z przetwornika ultradźwiękowego, przechodzi przez ciecz badaną, odbija się od reflektora, po czym powraca znowu do



Rys.12. Określenie czasów przejścia t_1 i t_2 oraz wartości amplitud A_1 i A_2 przy dwu różnych położeniach sondy górnej, l_1 i l_2 .

przetwornika, który w tym przypadku pełni rolę przetwornika odbiorczego.

W metodzie przepuszczania impuls ultradźwiękowy

przechodzi od przetwornika nadawczego do przetwornika odbiorczego poprzez ciecz badaną, w której ulega tłumieniu. W jednej i drugiej metodzie pomiar współczynnika tłumienia polega na pomiarze zmian amplitudy impulsu po przejściu przez warstwę ośrodka badanego. Metoda odbiciowa jest mniej dogodna od metody przepuszczania, bowiem konieczne jest w niej uwzględnienie strat w materiale piezoelektrycznym i strat przy odbiciu od reflektora oraz spełnienie bardzo ostrych wymagań odnośnie równoległości przetworników, gdyż w przeciwnym przypadku w pomiarach wystąpią znaczne błędy. Drugą istotną wadą metody odbiciowej jest ograniczenie możliwości pomiarowych, gdyż w cieczach silnie tłumiących można nie uzyskać impulsów odbitych.

Metoda przepuszczania eliminuje opisane wyżej wady, ale nie zezwala na prowadzenie pomiarów przy małej odległości przetworników, przy której czas przejścia impulsu między przetwornikami jest mniejszy od czasu trwania impulsu. W praktyce bowiem impuls elektryczny przedostający się bezpośrednio z nadajnika do odbiornika interferuje z pierwszym ultradźwiękowym impulsem akustycznym po jego zamianie na sygnał elektryczny, co uniemożliwia dokładny pomiar tłumienia. W celu wyeliminowania tego ograniczenia sondy pomiarowe wyposaża się w linie opóźniające, które to rozwiązanie zastosowano przy budowie sond pomiarowych użytych w opisywanym stanowisku.

W przypadku cieczy bardzo silnie tłumiących, zastosowanie linii opóźniających umożliwia pomiar w bardzo cienkich warstwach cieczy, rzędu setnych części milimetra.

Na podstawie wartości amplitudy dwu impulsów, A_1 i A_2 (por. rys.12), przy dwu różnych położeniach sondy górnej, l_1 i l_2 , można wyznaczyć tłumienie ośrodka ciekłego ze wzoru:

$$\alpha = \frac{1}{l_1 - l_2} \ln \frac{A_2}{A_1} \quad (3)$$

gdzie: α -współczynnik tłumienia w Np/m.

ZAKOŃCZENIE

Zbudowane stanowisko umożliwia wykonywanie pomiarów prędkości i tłumienia w ośrodkach ciekłych z zakresie częstotliwości 10-150 MHz z błędem pomiaru prędkości nie przekraczającym 0.05%, a pomiaru tłumienia 1%. Maksymalna wartość możliwa do zmierzenia wynosi dla tłumienia 3 Np, natomiast dla współczynnika tłumienia jest równa $5 \cdot 10^4$ Np/m.

Dużą zaletą ww stanowiska jest korzystanie w możliwie dużym zakresie z gotowych (fabrycznych) przyrządów. Koncepcję takiej konstrukcji stanowiska przyjęto już w fazie jego projektowania. Jedynie takie elementy stanowiska pomiarowego jak modulator, sondy ultradźwiękowe, mechaniczne układy regulacyjne oraz adaptacja pionowego długościomierza Abbego wykonane zostały we własnym zakresie.

LITERATURA

1. Herzfeld K.F., Litovitz T.A., Absorption and dispersion of ultrasonic waves, Academic Press, New York 1959.
2. Wehr J., Pomiary prędkości i tłumienia fal ultradźwiękowych, PWN, Warszawa 1972.
3. Kozłowski Z., Metoda impulsowo-fazowa w interferometrii ultradźwiękowej, Praca doktorska, IPPT PAN, Warszawa 1973.
4. Juskiewicz A., Antosiewicz J., Spektroskopia ultradźwiękowa w biofizyce molekularnej, Biospektroskopia (pod red. J.Twardowskiego), t.5, PWN, Warszawa 1990.
5. Balcerzak A., Bazior Z., Kozłowski Z., Zautomatyzowany układ do pomiarów ultradźwiękowych w cieczach metodą rezonancyjną (Eggersa), Prace IPPT, 17 (1992).