

## Ćwiczenie 15

### Ultradźwięki

#### Cel ćwiczenia

Poznanie właściwości ultradźwięków i dokonanie pomiarów niektórych charakteryzujących je parametrów: prędkości rozchodzenia oraz współczynników tłumienia i odbicia w różnych materiałach.

#### Wprowadzenie

Źródłem ultradźwięków są generowane w ośrodkach materialnych drgania o częstotliwościach powyżej 20 kHz. Z punktu widzenia mechaniki klasycznej duża częstotliwość drgań oznacza dużą prędkość drgających cząstek, a co za tym idzie, ich dużą energię kinetyczną. I rzeczywiście, ultradźwięki są falami akustycznymi niosącymi stosunkowo największą energię.

Gęstość energii wyraża się wzorem  $w = 4 \pi^2 v^2 \rho A^2$ , gdzie  $v$  jest częstotliwością fali,  $\rho$  gęstością materiału, a  $A$  amplitudą drgań. Oprócz silnej zależności od częstotliwości ze wzoru tego widać również, że gęstość energii fal ultradźwiękowych w ciałach stałych będzie ponad tysiąc razy większa od gęstości energii w powietrzu - przy tej samej częstotliwości i amplitudzie.

**GENERACJA ULTRADŹWIEKÓW** - najczęściej przy wykorzystaniu zjawiska elektrostrykcji; w takt zmian napięcia elektrycznego zaczyna drgać płytka (z kwarcu, turmalinu, soli Seigneta itp.), która jest źródłem ultradźwięków.

**DETEKCJA ULTRADŹWIEKÓW** - odbywa się na zasadzie odwrócenia zjawiska generacji. Najczęściej będzie więc wykorzystywane zjawisko piezoelektryczne.

**PRĘDKOŚĆ ROZCHODZENIA SIĘ ULTRADŹWIEKÓW** - zależy do rodzaju materiału. Dla fali poprzecznej  $T$  i podłużnej  $L$  w nieograniczonym\* ośrodku izotropowym mamy następujące wzory:

$$v_L = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \quad (1a)$$

\* Czytelnik zapewne pamięta z podręczników wzór na prędkość dźwięku  $v = \sqrt{E/\rho}$ , obowiązuje on dla pręta cienkiego w porównaniu z długością fali. Dla ultradźwięków warunek nieograniczonego ośrodka (rozmiary ośrodka  $\gg$  długość fali) jest prawie zawsze spełniony.

$$v_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (1b)$$

gdzie: E - moduł Younga,  
 G - moduł sztywności,  
 ν - liczba Poissona,  $\nu = E/2G - 1$ .

Widać z tych wzorów, że im bardziej materiał jest "sprężysty", tym prędkość ultradźwięku jest większa.

**POCHŁANIANIE ULTRADŹWIĘKÓW** - zachodzi w materiałach według prawa wykładniczego:

$$A(x) = A(0) \exp(-\alpha x) \quad (2a)$$

lub

$$I(x) = I(0) \exp(-2 \alpha x) \quad (2b)$$

gdzie  $A(x)$  jest amplitudą w punkcie o współrzędnej  $x$ ,  $I(x)$  - natężeniem, a  $\alpha$  - współczynnikiem tłumienia.

**ULTRADŹWIĘKI NA GRANICY DWU RÓŻNYCH MATERIAŁÓW** - fala ultradźwięków dochodząc do powierzchni oddzielającej dwa materiały częściowo odbija się od niej, a częściowo przechodzi przez nią. Jeżeli prędkość fali w ośrodku o gęstości  $\zeta_1$  jest  $v_1$ , a w ośrodku o gęstości  $\zeta_2$  jest  $v_2$ , to amplituda fali poprzecznej zmienia się według wzoru

$$A_2^2 = \frac{4 \rho_1 v_1 \cos \alpha \rho_2 v_2 \cos \beta}{(\rho_1 v_1 \cos \beta + \rho_2 v_2 \cos \alpha)^2} A_1^2 \quad (3)$$

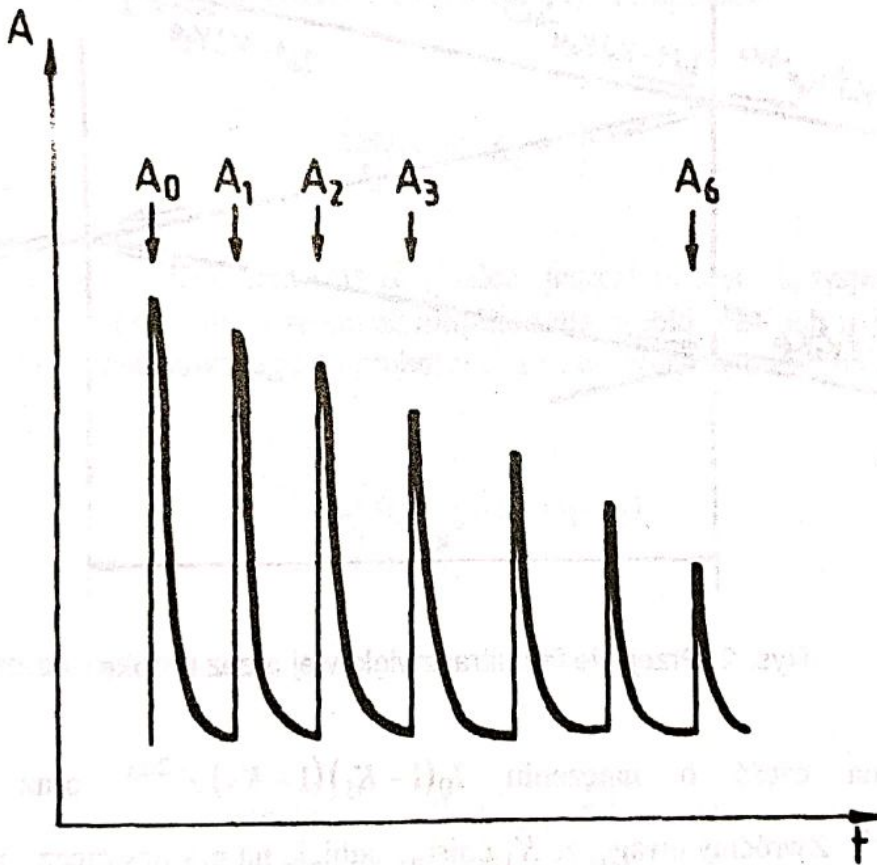
gdzie:  $\alpha$  - kąt padania,  $\beta$  - kąt załamania,  $A_1$  - amplituda w ośrodku 1,  $A_2$  - w ośrodku 2. Analizując powyższy wzór można łatwo zauważyć (wstawiając za  $\rho_1$  i  $\rho_2$  gęstości powietrza, wody i różnych materiałów), że przy przejściach ciało stałe - ciecz i odwrotnie, odbiciu ulega od kilku do kilkudziesięciu procent energii, a przy przejściach powietrze - ciało stałe lub ciecz, prawie cała energia.

Z tych własności fal ultradźwiękowych wypływają dwa ważne wnioski praktyczne:

- wiązka ultradźwięków przechodząc przez warstwę metalu ulega odbiciu lub załamaniu na wszelkiego rodzaju niejednorodnościach (pęcherzyki powietrza, pęknięcia obce wtręty). Efekt ten jest wykorzystywany w tzw. defektoskopii ultradźwiękowej,

- aby ultradźwięki mogły przechodzić z generatora fal ultradźwiękowych czyli z tzw. głowicy do ciała stałego, głowica ta musi być z nim sprzęgnięta za pomocą cienkiej warstwy cieczy, np. oliwy lub wody.

Aby wyznaczyć współczynnik tłumienia, ultradźwięki z głowicy nadawczej generatora podajemy przez ciekłą warstwę oliwy do próbki. Fala ultradźwiękowa rozchodząc się ulega osłabieniu, odbija się od dna próbki i z powrotem wraca do głowicy. Na granicy głowica - próbka część energii fali znowu się odbija i wchodzi do materiału, a część poprzez głowicę jest przetwarzana na impuls elektryczny i podawana na ekran oscyloskopu. Dalej sytuacja powtarza się  $n$ -krotnie. Część energii fali po każdorazowym odbiciu powraca do sondy i jest odbierana przez przetwornik kwarcowy jako kolejne echo. Na ekranie oscyloskopu można zaobserwować zerowy impuls nadawczy  $A_0$  oraz kolejne impulsy  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  odbite od dna próbki jednokrotnie, dwukrotnie itd. (rys. 1)

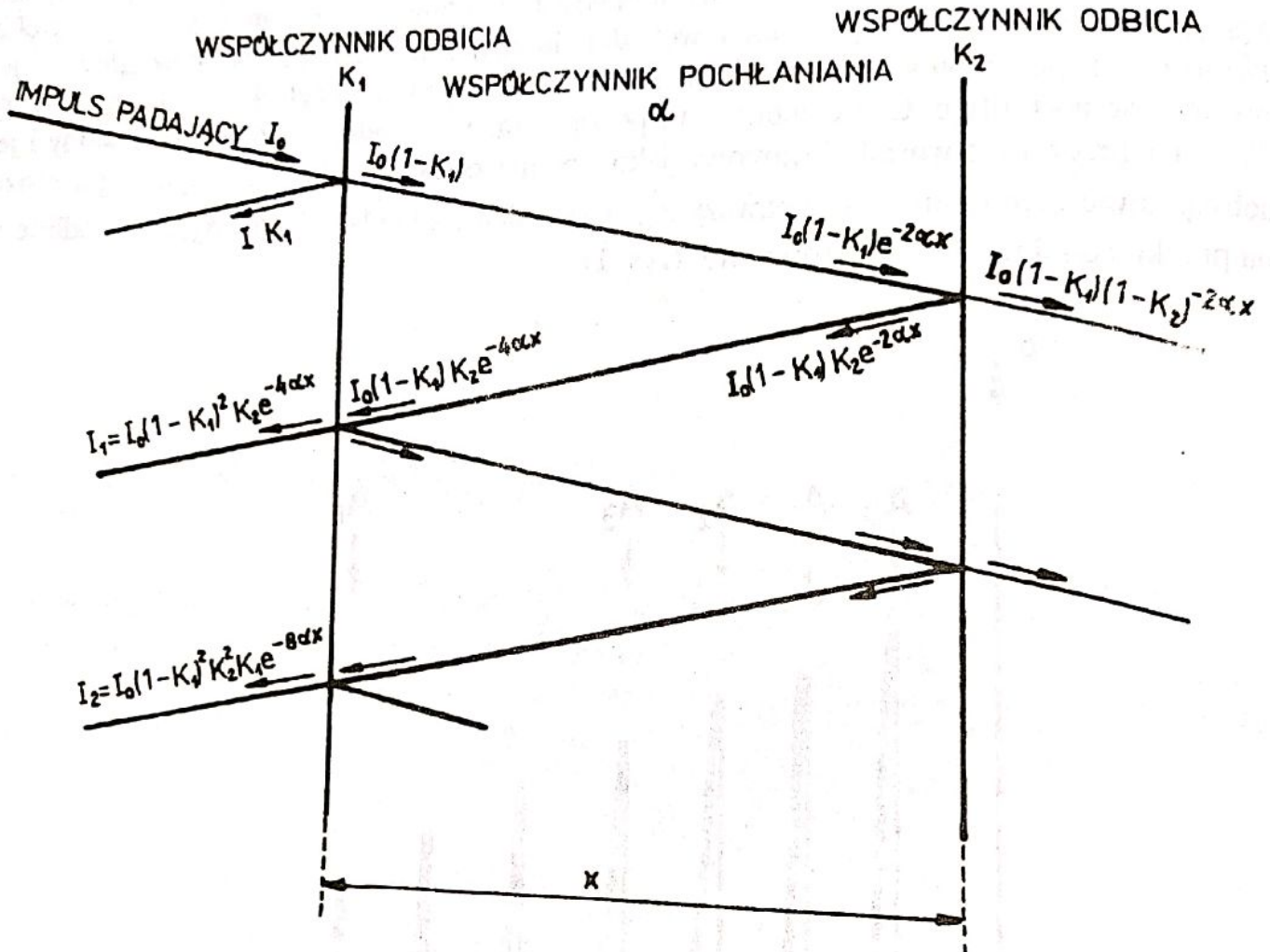


Rys. 1. Amplituda impulsu zerowego oraz kolejnych impulsów odbitych jednokrotnie, dwukrotnie, ... sześciokrotnie od dna próbki

Przypuśćmy, że na próbkę pada fala ultradźwiękowa o natężeniu  $I_0$  (rys. 2). Część jej ulega odbiciu, a część wchodzi do próbki. Współczynnik odbicia fali na granicy ciecz sprzęgająca - próbka definiujemy jako:

$$K_1 = \frac{\text{natężenie fali odbitej}}{\text{natężenie fali padającej}}$$

Wobec tego natężenie fali odbitej jest równe  $I_0 K_1$ , a natężenie fali wchodzącej do próbki równe  $I_0(1-K_1)$ . Fala przechodząc przez próbkę o grubości  $x$  ulega pochłanianiu zgodnie z wykładniczym prawem (2). Do dna próbki dochodzi więc tylko  $I_0(1-K_1)e^{-2\alpha x}$ . Ta fala znowu



Rys. 2. Przejście fali ultradźwiękowej przez próbkę

rozdziela się na część o natężeniu  $I_0(1-K_1)(1-K_2)e^{-2\alpha x}$  oraz część odbitą  $I_0(1-K_1)K_2e^{-2\alpha x}$ . Zwróćmy uwagę, że  $K_1$  opisuje odbicie na granicy ciecz - próbka, a  $K_2$  na granicy powietrze - próbka. Fala odbita od dna próbki rozchodzi się w kierunku sondy, ulegając oczywiście osłabieniu wskutek pochłaniania. Na granicy próbka - ciecz sytuacja się powtarza: część fali odbija się do próbki, część wychodzi na zewnątrz do sondy, tworząc w niej pierwsze echo  $I_1$  o natężeniu

$$I_1 = I_0(1-K_1)^2 K_2 e^{-4\alpha x}$$

Dla impulsu odbijającego się dwukrotnie od dna próbki

$$I_1 = I_0 K_2^2 K_1 (1 - K_1)^2 e^{-4 \cdot 2 \alpha x} \quad (5)$$

Ostatecznie n-ty impuls, powstały przy wielokrotnym odbiciu w materiale, wyraża się wzorem

$$I_n = I_0 (1 - K_1)^2 K_2^n K_1^{n-1} e^{-4n\alpha x} \quad (6)$$

gdzie  $\alpha$  jest współczynnikiem tłumienia, który właśnie chcemy wyznaczyć.

$$I_{n+1} = I_0 (1 - K_1)^2 K_2^{n+1} K_1^n e^{-4(n+1)\alpha x} \quad (7)$$

Możemy teraz utworzyć stosunek natężeń dwóch kolejnych impulsów

$$\frac{I_{n+1}}{I_n} = K_2 K_1 e^{-4\alpha x} \quad (8)$$

Aby obliczyć współczynnik tłumienia  $\alpha$ , należy jeszcze pozbyć się współczynników odbicia  $K_1, K_2$ . W tym celu określimy stosunek amplitud dla próbki o dwóch różnych grubościach  $x_1$  i  $x_2$ . Ze wzoru (6) zastosowanego do grubości  $x_1$  i  $x_2$  otrzymamy mianowicie

$$\frac{I_n(x_1)}{I_n(x_2)} = e^{-4n\alpha(x_1 - x_2)} \quad (9)$$

Podobnie ze wzoru (8)

$$\frac{I_{n+1}(x_1)}{I_n(x_1)} \cdot \frac{I_{n+1}(x_2)}{I_n(x_2)} = e^{-4\alpha(x_1 - x_2)} \quad (10)$$

Mierząc stosunki kolejnych amplitud oraz grubość próbek, ze wzorów (9) lub (10) można wyznaczyć współczynnik tłumienia  $\alpha$ . Znając  $\alpha$  można na podstawie formuł (6) i (8) oszacować straty przy odbiciu od powierzchni próbki.

Uwaga: należy pamiętać, że na ekranie oscyloskopu mierzymy amplitudę a nie natężenie! Wzór (9), napisany dla stosunku amplitud, będzie miał postać

$$\frac{A_n(x_1)}{A_n(x_2)} = e^{-2n\alpha(x_1-x_2)} \quad (11)$$

Oprócz wysokości pików na ekranie oscyloskopu możemy mierzyć ich odległości  $a_i$ . Pomiar taki możemy wykorzystać do obliczenia względnej prędkości fali ultradźwiękowej.

Oznaczamy przez  $t_1$  czas przejścia fali przez próbkę 1 o grubości  $x_1$  i przez  $t_2$  czas przejścia fali przez próbkę 2 o grubości  $x_2$ . Mamy

$$\begin{aligned} 2x_1 &= v_1 t_1 \\ 2x_2 &= v_2 t_2 \end{aligned} \quad (12)$$

Odległości między kolejnymi pikami są proporcjonalne do czasów  $t_1$  i  $t_2$

$$\begin{aligned} a_1 &= k t_1 \\ a_2 &= k t_2 \end{aligned} \quad (13)$$

gdzie  $k$  jest stałą zależną od ustawienia parametrów defektoskopu. Wyznaczone z (13) wartości  $t_1$ ,  $t_2$  wstawiamy do (12) i dzieląc stronami układ równań (12) otrzymamy

$$\frac{x_1}{x_2} = \frac{v_1 a_1}{v_2 a_2} \quad (14)$$

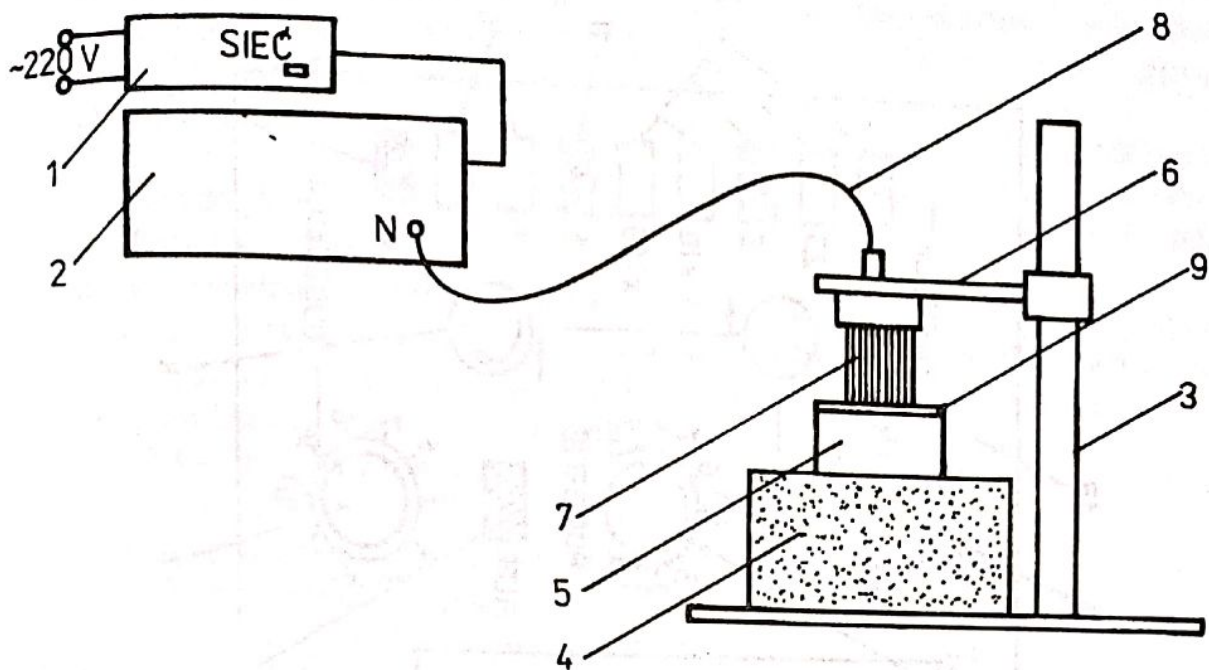
Z tego równania - jeżeli  $v_2$  jest znane - można wyznaczyć  $v_1$ .

#### Literatura

1. Obraz J.: *Ultradźwięki w technice pomiarowej*. WNT. Warszawa 1983.
2. Szczeniowski S.: *Fizyka doświadczalna*. T.I. PWN. Warszawa 1982.

#### Aparatura

W skład zestawu aparatury (rys. 3) wchodzi: defektoskop ultradźwiękowy DI-4T z zasilaczem sieciowym, głowica z przetwornikiem piezoelektrycznym typu 3LO°20 K oraz statyw z uchwytem sondy.



Rys. 3. Układ pomiarowy: 1 - zasilacz sieciowy, 2 - defektoskop ultradźwiękowy, 3 - statyw, 4 - gąbka, 5 - element badany, 6 - uchwyt głowicy, 7 - głowica, 8 - kabel koncentryczny, 9 - cienka warstwa oliwy

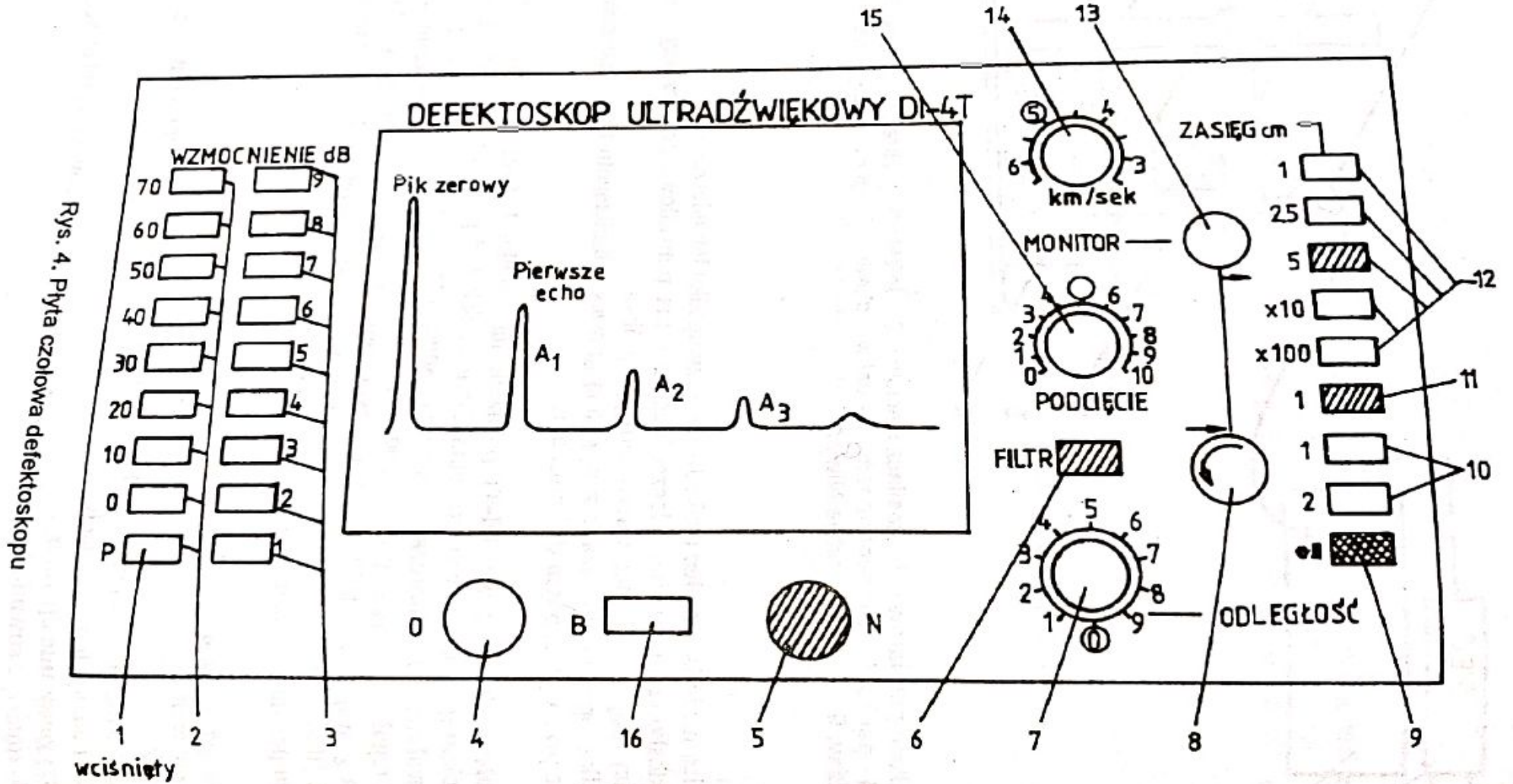
#### Uwaga:

1. Głowica może łatwo ulec uszkodzeniu przy upadku lub uderzeniu.
2. Defektoskopu nie wolno włączać, jeśli nie ma prawidłowo podłączonej i sprzężonej głowicy (poprzez cienką warstwę oliwy) z próbką.
3. Wszelkie operacje związane z wymianą głowicy lub elementu badanego należy wykonywać przy wyłączonym defektoskopie.

Płytę czołową defektoskopu DI-4T pokazano na rysunku 4. Dwa rzędy przycisków 2 i 3 służą do skokowej regulacji wzmocnienia. Do gniazdek 4, 5 podłącza się sondę. Litery *N* i *O* oznaczają: nadawcza i odbiorcza, rodzaj pracy sondy wybieramy przyciskiem *P*. Potencjometr 7 służy do regulacji podstawy czasu, potencjometr 8 - do przesuwania poziomego obrazu. Przyciskiem *g* włączamy defektoskop (po włączeniu do sieci generatorem przyciskiem *sieć*). Przełącznik 10 służy do zmiany szerokości impulsów, a potencjometry: 14 - do regulacji szybkości pisania podstawy czasu, 15 - do regulacji dyskryminacji.

#### Wykonanie ćwiczenia

- A. Wyznaczanie względnych prędkości fali ultradźwiękowej w aluminium, miedzi lub innych podanych materiałach.
  1. Przygotowanie aparatury:
    - a) zmierzyć suwmiarką grubości stalowych próbek wzorcowych i próbek badanych,



Rys. 4. Płyta czołowa defektoskopu



- b) sprawdzić, czy wszystkie klawisze i potencjometry defektoskopu są w prawidłowej pozycji zgodnej z rysunkiem płyty czołowej, oraz czy klawisz "SIEĆ" zasilacza defektoskopu i klawisz 9 są wyciśnięte,
  - c) krążek z aluminium o grubości 40 mm pokryć z jednej strony cienką warstwę oliwy i umieścić go na podstawie statywu tak, by naoliwiona strona była lekko dociśnięta do głowicy umocowanej w uchwycie i podłączonej do gniazdka 5 N defektoskopu (rys. 3 i 4)
  - d) wcisnąć klawisz "SIEĆ" zasilacza, a następnie klawisz 9 na płycie czołowej defektoskopu. W ten sposób układ został włączony i po kilkunastu sekundach na ekranie powinien pojawić się obraz podobny do narysowanego na rysunku 1,
  - e) sprawdzić działanie tylko następujących klawiszy i potencjometrów:
    - 2,3 - regulacja wzmocnienia,
    - 7 - regulacja odległości, przesuwanie podstawy czasu,
    - 10 - przełącznik szerokości impulsów,
    - 12 - przełącznik zasięgu,
    - 14 - regulacja szybkości podstawy czasu.
2. Pomiar względnych prędkości fali ultradźwiękowej:
- a) wymienić próbkę aluminiową na najgrubszą stalową,
  - b) dobrać wzmocnienie (klawisze 1, 2, 10) oraz zasięg (klawisze 12 potencjometr 14) tak, aby otrzymać kilka dobrze widocznych pików,
  - c) ustawić pik zerowy na początek skali (potencjometr 7) a regulacją szybkości pisania podstawy czasu (potencjometr 14) n-te echo przy końcu skali;

**Uwaga:** od tej chwili dla następnych pomiarów nie wolno ruszać ustawienia podstawy czasu;

- d) za pomocą przymiaru milimetrowego zmierzyć odległość od początku zerowego pików do początku n-tego echa –  $na_1$  ( $a_1$  odległość pomiędzy sąsiednimi pikami).

3. Badanie wad w materiałach metodą echa:

- a) na podstawie statywu umieszczać po kolei próbki wzorcowe i wykonać pomiary jak w punkcie 2 (ewentualnie zmniejszając wzmocnienie),
- b) na podstawie statywu umieszczać po kolei próbki z innych materiałów i tak dobrać wzmocnienie, by na ekranie była widoczna jak największa liczba pików  $k$ , zmierzyć odległość  $ka_2$  jak w punkcie 2d),
- c) na podstawie statywu umieścić element z wadą i wykonać pomiary w celu określenia położenia i wielkości wad, przesuwać element badany poziomo względem głowicy, którą przykładac do próbki po kolei ze wszystkich stron.

B. Pomiar współczynników tłumienia ultradźwięków metodą echa.

1. Przygotowanie pomiarów:

- a) wybrać po dwie próbki z tego samego materiału o różnych grubościach, zmierzyć te grubości,
- b) umieścić na statywie jedną z próbek pokrytą cienką warstwą oliwy (dla materiału silnie pochłaniającego zacząć od próbki cieńszej),

c) włączyć defektoskop, dyskryminację ustawić na zero i tak dobrać wzmocnienie, aby cały pik odpowiadający pierwszemu echu (tzn. drugi pik od lewej, bo pierwszy jest obrazem impulsu, który jeszcze nie wszedł do próbki) był widoczny na ekranie.

## 2. Pomiary:

- a) zmierzyć przymiarem milimetrym wysokości pików  $A_1, A_2, \dots$  z wyjątkiem pików zerowego, lub odrysować obraz na specjalnie włożonej folii,
- b) powtórzyć trzy razy pomiar 2a), przesuując poziomo materiał względem głowicy defektoskopu (bez wyłączania defektoskopu),
- c) wyłączyć defektoskop, założyć próbkę z tego samego materiału, ale o innej grubości niż poprzednio,
- d) dla próbki cieńszej: po włączeniu defektoskopu tak zmniejszyć wzmocnienie, aby cały pik odpowiadający pierwszemu echu był widoczny na ekranie oscyloskopu i wykonać pomiary jak w punktach 2a i 2b; dla próbki grubszej: po włączeniu defektoskopu wykonać pomiary jak w punktach 2a i 2b bez zmiany wzmocnienia i po zwiększeniu wzmocnienia, jeżeli są dobrze widoczne co najmniej dwa kolejne odbicia (echa),
- e) wykonać pomiary 2a - 2d dla następnej pary próbek.

## Obliczanie wyników

Obliczyć wartości prędkości ultradźwięku w różnych materiałach, traktując jako wartość zadaną prędkość ultradźwięku w aluminium.

Obliczyć współczynniki tłumienia dla różnych materiałów. Czy dla wszystkich próbek da się go wiarygodnie zmierzyć?