

POLITECHNIKA



BIAŁOSTOCKA

WYDZIAŁ



**INŻYNIERII
ZARZĄDZANIA**

KATEDRA ZARZĄDZANIA PRODUKCJĄ

Instrukcja do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu:

FIZYKA

Kod przedmiotu: **KS02137; KN02137; LS01137; LN01137**

Ćwiczenie nr 5

**POMIAR PRĘDKOŚCI PROPAGACJI
FALI ULTRADŹWIEKOWEJ**

Opracował:

dr inż. Arkadiusz Łukjaniuk

Białystok 2022

Wszystkie prawa zastrzeżone

Wszystkie nazwy handlowe i towarów występujące w niniejszej instrukcji są znakami towarowymi zastrzeżonymi lub nazwami zastrzeżonymi odpowiednich firm odnośnych właścicieli.

Laboratorium „Fizyki”

Ćw. Nr4 „Pomiar prędkości propagacji fali ultradźwiękowej”

CEL ĆWICZENIA: Zapoznanie studentów z metodami pomiaru prędkości propagacji fali ultradźwiękowej (podłużnej i poprzecznej) w ciałach stałych oraz wykorzystanie uzyskanych wyników pomiarów do wyznaczania modułu Younga i liczby Poissona.

1. PODSTAWY TEORETYCZNE

W ciałach stałych występują następujące rodzaje fal: poprzeczna, podłużna, powierzchniowa i dylatacyjna. Parametrem, który charakteryzuje materiał pod względem przewodnictwa akustycznego jest impedancja akustyczna $Z_a = \rho \cdot c$, gdzie: ρ jest gęstością materiału, a c – prędkością rozchodzenia się w nim dźwięku. Innym parametrem jest natężenie dźwięku J (z def. – moc przenoszona przez jednostkę powierzchni - W/m^2):

$$J = \frac{1}{2} Z_a c^2 .$$

Długość fali λ zależy od częstotliwości f i prędkości rozchodzenia się dźwięku:

$$\lambda = \frac{c}{f}.$$

Część fali ultradźwiękowej po dotarciu do granicy dwóch ośrodków odbija się od tej granicy, a część przenika dalej. Natężenie fali odbitej zależy od ilorazu impedancji akustycznych tych ośrodków:

$$R = \frac{J_{odb}}{J_{pad}} = \left(\frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2} \right)^2 ,$$

gdzie: R – współczynnik odbicia;

J_{odb} , J_{pad} – natężenie fali odbitej i padającej;

Z_1 , Z_2 – impedancje akustyczne ośrodków.

W tabeli 1 przedstawione są współczynniki odbicia i przenikania fali podłużnej padającej prostopadle do granicy ośrodków.

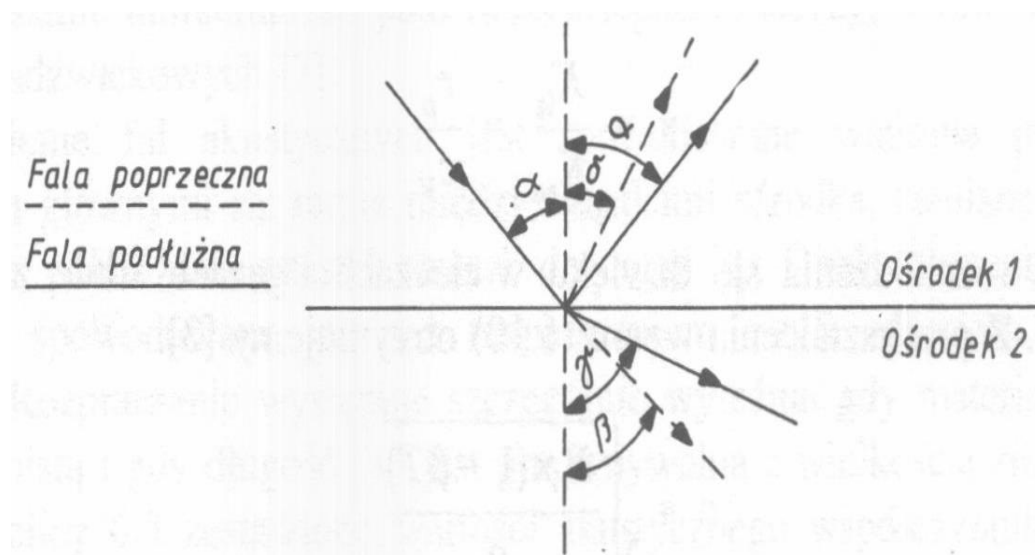
Analiza wartości współczynników odbicia pozwala wyciągnąć praktyczny wniosek: jeżeli na drodze fali ultradźwiękowej pojawi się szczelina powietrzna, to fala ulegnie odbiciu. Pozwala to na lokalizację defektów wewnątrz materiałowych. Jednocześnie trzeba pamiętać, aby umożliwić prawidłowe wnikanie fali ultradźwiękowej w głąb materiału należy zapewnić dokładne przyleganie głowicy do powierzchni badanej (w przeciwnym wypadku fala ultradźwiękowa odbije się od powierzchni badanego materiału).

Tabela 1. Współczynniki odbicia i przenikania fali podłużnej [2].

Ośrodek	Współczynnik odbicia									
	aluminium	stal	mosiądz	szkło	plexi	porcelana	guma	woda	olej	powietrze
aluminium	-	21	14	0,2	47	2	72	72	74	100
stal	79	-	1	25	76	31	88	88	89	100
mosiądz	86	99	-	16	70	22	86	86	87	100
szkło	98,2	75	84	-	43	1	69	69	71	100
plexi	43	24	30	57	-	37	15	15	18	100
porcelana	98	69	78	99	63	-	65	65	67	100
guma	28	12	14	31	85	35	-	0	0,1	100
woda	28	12	14	31	85	35	100	-	0,1	100
olej	26	11	13	29	82	33	99,9	99,9	-	100
powietrze	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-
Współczynnik przenikania										

Padająca pod kątem α do prostopadłej do powierzchni odbijającej zostanie odbita też pod tym samym kątem (rys.1), a fala przepuszczona zostanie załamana pod kątem γ . Zależności między wartościami tych kątów zależą od prędkości propagacji dźwięku w tych ośrodkach:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{c_1}{c_2}$$



Rys.1. Propagacja fali ultradźwiękowej na granicy dwóch różnych ośrodków [2].

Oprócz załamania w ciałach stałych fala ulega rozszczepieniu na podłużną i poprzeczną. Prędkości rozchodzenia się tych fal są różne, a więc i kąty załamania będą różne:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = \frac{c_{l1}}{c_{l2}}, \quad \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c_{l1}}{c_{t2}}, \quad \frac{\sin\alpha}{\sin\delta} = \frac{c_{l1}}{c_{t1}},$$

gdzie: c_{l1}, c_{l2} - prędkości propagacji fal podłużnych odpowiednio w ośrodku 1 i 2;

c_{t1}, c_{t2} - prędkości propagacji fal poprzecznych w ośrodku 1 i 2;

β - kąt załamania fali poprzecznej;

δ - kąt odbicia fali poprzecznej.

W ciałach stałych prędkości propagacji fal zależą od właściwości sprężystych: modułu Younga E i liczby Poissona ν :

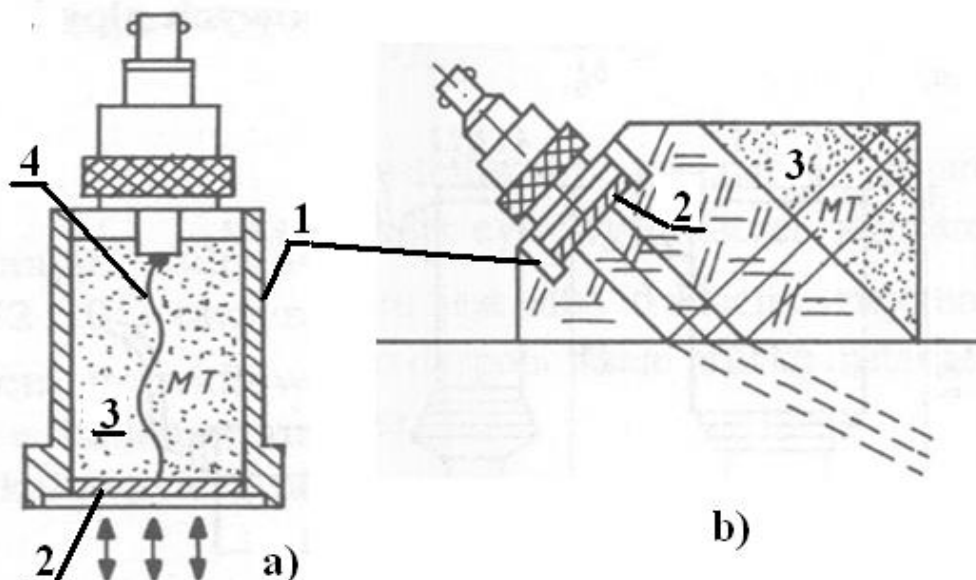
$$c_l = \sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}, \quad c_t = \sqrt{\frac{E}{2\rho(1+\nu)}}. \quad (1)$$

Ze wzoru (1) wynika, że znając gęstość materiału i mierząc prędkości fal podłużnych i poprzecznych możemy wyznaczyć wartości modułu Younga i liczby Poissona. Ta właściwość leży u podstaw elastometrii ultradźwiękowej:

$$E = \rho c_t^2 \frac{3c_l^2 - 4c_t^2}{c_l^2 - c_t^2}, \quad \nu = \frac{c_l^2 - 2c_t^2}{2(c_l^2 - c_t^2)}. \quad (2)$$

Prędkość propagacji fali ultradźwiękowej zależy też od takich parametrów materiałów jak: porowatość, twardość.

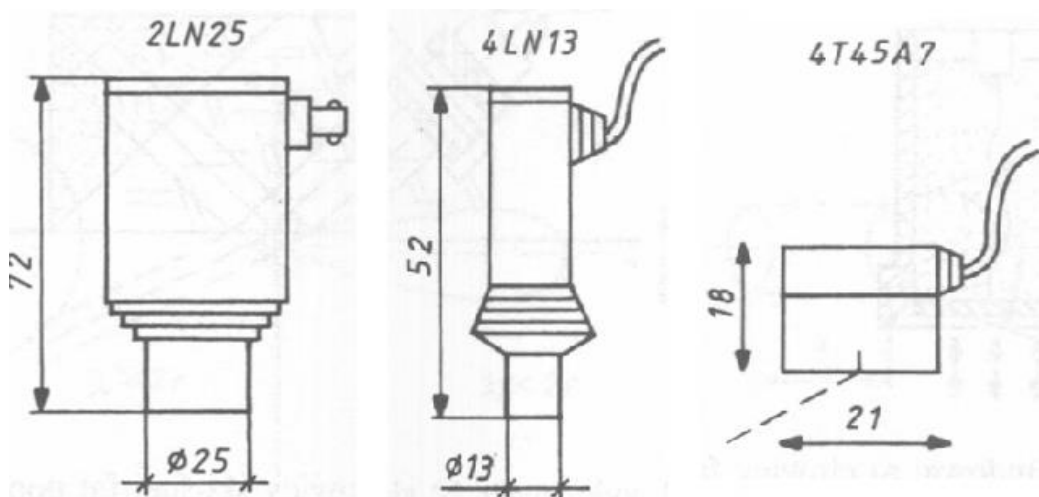
Fale ultradźwiękowe generowane są za pomocą głowic tak skonstruowanych, że wytwarzają tylko jeden rodzaj fali (w zależności od proporcji między średnicą przetwornika a długością promieniowanej fali powstaje fala podłużna, poprzeczna, powierzchniowa lub dylatacyjna). Na rys. 2a przedstawiona jest budowa głowicy fal podłużnych, a 2b – poprzecznych.



Rys.2. Budowa głowicy: a) fal podłużnych; b) skośnej fal poprzecznych: 1 - obudowa, 2 - płytkę piezoelektryka (generatora drgań), 3 - materiał tłumiący fale odbite wewnątrz głowicy, 4 – elektroda doprowadzająca wysokoczęstotliwościowe napięcie zasilające.

Materiały używane do budowy przetworników piezoelektrycznych to: kwarc, piezomagnetyki, materiały ceramiczne (np. tytanian baru). Moce źródeł ultradźwięków mogą być: małe – do 1 W/cm²; średnie – od 1-10 W/cm² i duże – od 10-100 W/cm². Płytkę generatora fal wycina się w ten sposób, aby jej grubość a spełniała zależność (3), a więc była wielokrotnością jej częstotliwości rezonansowej f_r :

$$a = \frac{\lambda}{2} n = n \frac{c}{2f_r}. \quad (3)$$



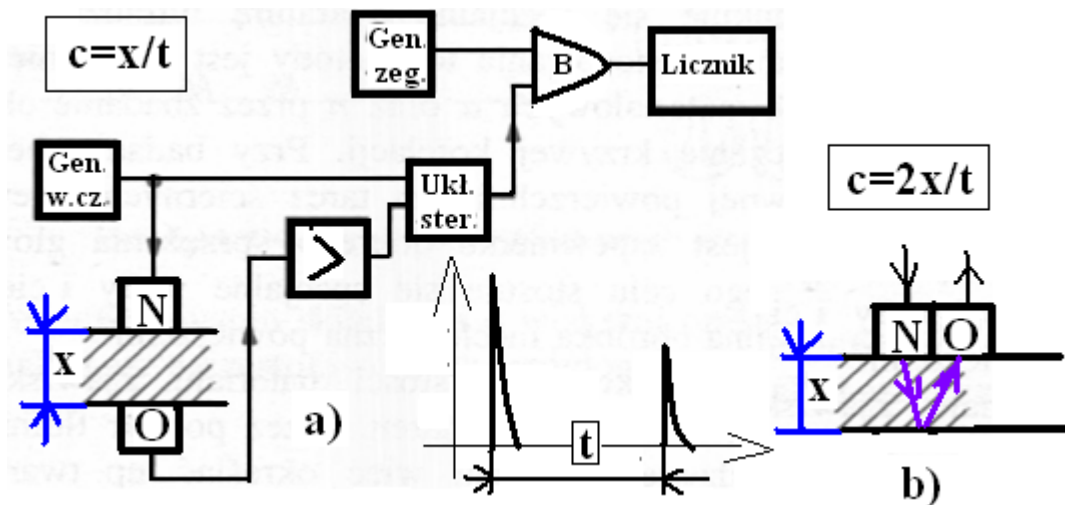
Rys.3. Przykłady konstrukcji głowic ultradźwiękowych [2].

Oznaczenia głowic (rys.3):

- ✓ **1 cyfra** – częstotliwość głowicy w MHz;
- ✓ **2 litera** – rodzaj fali (L- podłużna, T- poprzeczna, S-powierzchniowa);
- ✓ **3 symbol** – rodzaj głowicy (N- fal podłużnych, 45A -kątowna - kąt 45deg, D - podwójna, LT- głowica fal podłużnych nadawcza, LR - głowica fal podłużnych odbiorcza);
- ✓ **5 cyfra** – wymiar powierzchni promieniującej w mm;
- ✓ **6 symbol** – przeznaczenie głowicy (G –do grubościomierza, B – do betonoskopu, R80 – o powierzchni wklęsłej do badania rur średnica 80mm).

Ultradźwięki znajdują zastosowanie przy pomiarze: grubości, modułu Younga i stałej Poissona, jakości betonu, prędkości dźwięku, współczynnika tłumienia, zapylenia, lepkości cieczy, jako echosondy oraz w defektoskopii ultradźwiękowej.

Do pomiaru prędkości dźwięku w ciałach stałych stosuje się najczęściej metodę pomiaru odstępu czasu między impulsem nadanym a odebrany po odbiciu się od dna próbki o znanej grubości (rys.4).



Rys.4. Schemat blokowy ultradźwiękowego miernika prędkości dźwięku: a) głowica nadawcza i odbiorcza znajdują się po przeciwległych stronach badanej próbki; b) głowica nadawcza i odbiorcza znajdują się w tym samym miejscu; **Gen. w. cz.** – generator wysokiej częstotliwości pobudzający do drgań piezoelektryk w głowicy nadawczej **N**; **O** – głowica odbiorcza; **Gen. zeg.**- precyzyjny generator impulsów zegarowych, wypełniających odcinek czasu przejścia fali ultradźwiękowej przez materiał i zliczanych przez licznik; **B** – bramka iloczynowa; **Ukl. ster.** – układ sterowania; **x** – grubość próbki; **t** – czas przebycia fali ultradźwiękowej z głowicy nadawczej do głowicy odbiorczej.

Prędkość propagacji podłużnej fali ultradźwiękowej c_l (tak jak kąt padania wiązki fal ultradźwiękowych jest równy 90°) wyznacza się ze wzoru:

$$c_l = \frac{x}{t}, \quad (4)$$

jeżeli głowice umieszczone są jak na rys. 3a i ze wzoru:

$$c_l = \frac{2x}{t}, \quad (5)$$

gdy usytuowanie głowic odpowiada rysunkowi 3b.

Najdokładniejszą metodą pomiaru prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej w ciałach stałych jest metoda interferencyjna. Proponuję samodzielne zapoznanie się studentów z tą metodą.

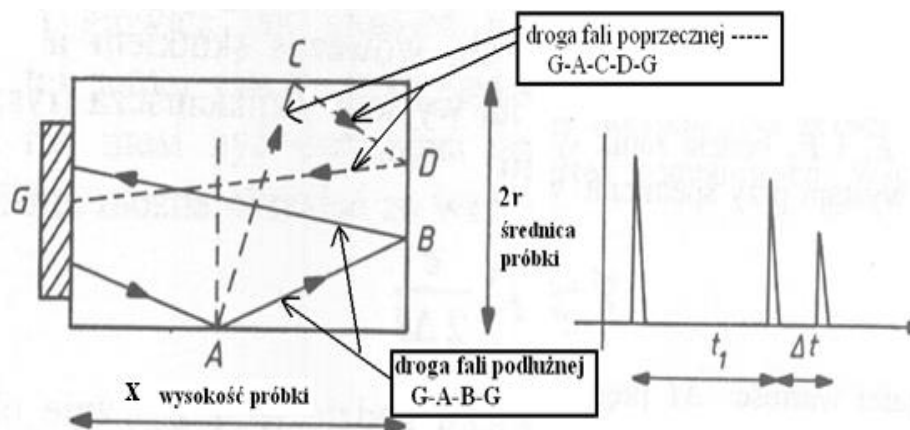
Inną metodą pomiaru prędkości fali podłużnej i poprzecznej może być użycie próbki o średnicy porównywalnej ze średnicą głowicy, wtedy wysłana fala podłużna (rys. 5) rozszepi się na ściankach bocznych. Fala podłużna dotrze do głowicy odbiorczej po czasie t_1 , a fala poprzeczna (ponieważ przebywa drogę dłuższą) przybędzie po czasie $t_1 + \Delta t$.

Prędkość fali podłużnej wyznaczana jest ze wzoru (5), tak jak $\beta \approx 90^\circ$.

Prędkość fali poprzecznej obliczana jest z zależności [5]:

$$c_t = \frac{c_l}{\sqrt{1 + \frac{\Delta t^2 c_l^2}{4r^2}}}, \quad (6)$$

gdzie: r – promień próbki; x – wysokość próbki.



Rys.5. Idea pomiaru prędkości fali podłużnej i poprzecznej.

Fala dźwiękowa przechodząc przez ośrodek jest osłabiana (tłumiona). Natężenie dźwięku J w odległości x od źródła dźwięku jest równe:

$$J = J_0 e^{-2\alpha x}, \quad (7)$$

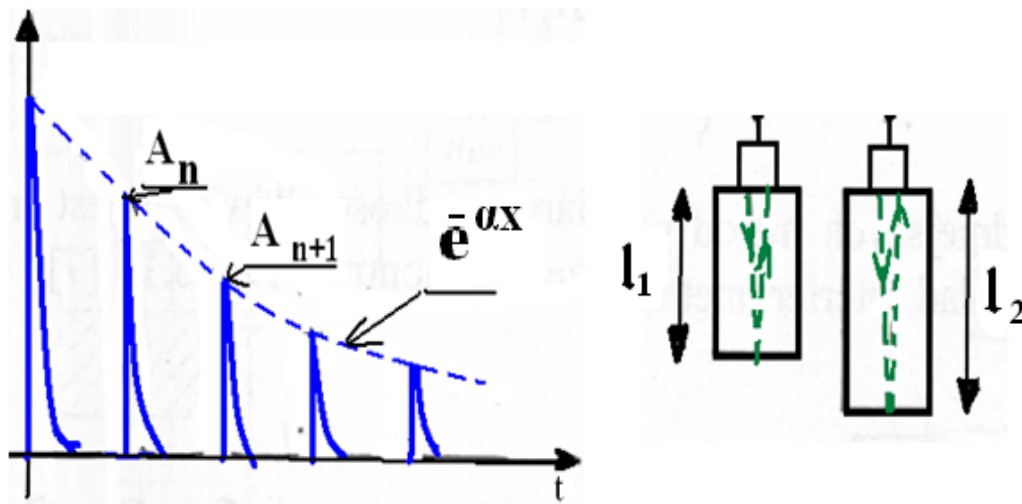
gdzie: J_0 – natężenie źródła dźwięku; α – akustyczny współczynnik tłumienia zależny od częstotliwości fali, ziarnistości materiału, składu chemicznego, itp..

Tłumienie fal akustycznych spowodowane jest między innymi zamianą energii fali na ciepło, tarciami między cząsteczkami ośrodka, pobudzaniem cząstek do drgań, rozpraszaniem fali itp. i zależy też od częstotliwości fali. Wartość współczynnika tłumienia α podawana jest w dB/m lub dB/cm, gdzie: $1\text{dB}=10 \lg J/J_0$.

Najprostszą metodą pomiaru współczynnika tłumienia α jest pomiar kolejnych amplitud ech fali ultradźwiękowej odbitych od dna próbki (rys. 6). Do pomiarów można wykorzystać jedną próbkę, ale wtedy pomiar współczynnika α będzie obciążony błędem spowodowanym wpływem współczynnika odbicia między materiałem próbki i głowicą, a także wpływem tłumienia warstwy sprzęgającej głowicę z materiałem. Zastosowanie dwóch próbek o różnej długości zapobiega powstawaniu tych błędów (rys. 6). Współczynnik tłumienia w tym przypadku oblicza się ze wzoru [6]:

$$\alpha = \frac{1}{2(l_2 - l_1)} \ln \frac{q_{n2}}{q_{n1}}, \quad (8)$$

gdzie: $q_n = \frac{A_{n+1}}{A_n}$; l_1, l_2 – odpowiednio wysokość próbki pierwszej i drugiej; A_n, A_{n+1} – kolejne amplitudy ech fali ultradźwiękowej.



Rys.6. Metodyka pomiaru współczynnika tłumienia za pomocą dwóch próbek.

2. OPIS DEFEKTOSKOPU DI 60

Defektoskop DI 60 to uniwersalny przyrząd pomiarowy wykorzystujący technikę pomiarową opartą na ultradźwiękach.

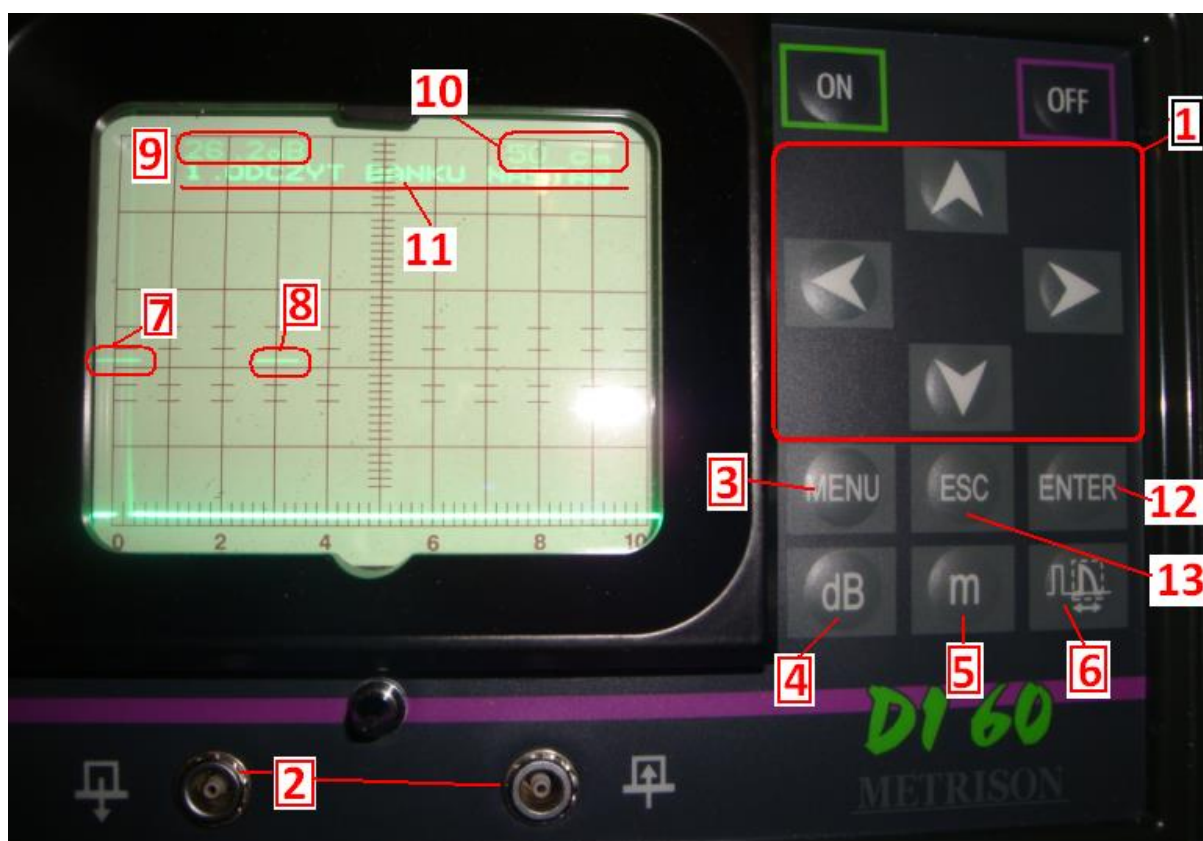
Defektoskop DI 60 przeznaczony jest do szybkich i nieniszczących badań defektoskopowych pozwalających na wykrycie wad:

- konstrukcji stalowych;
- połączeń spawanych;
- odkuwek i odlewów;
- wyrobów walcowanych, np. szyn kolejowych, profili budowlanych i konstrukcyjnych;
- wszelkich wad materiałów, przez które przechodzi fala ultradźwiękowa.

Defektoskop DI 60 mierzy grubość ścian konstrukcji jednostronnie dostępnych takich jak: zbiorniki i cysterny, rurociągi, kotły, kadłuby statków itp.

Dane techniczne [3]	
Konstrukcja	przystosowana do pracy w terenie
Znamionowe warunki pracy <ul style="list-style-type: none">✓ zakres obserwacji ustawiony fabrycznie✓ zakres obserwacji ustawiany płynnie przez użytkownika✓ zakres prędkości fal✓ zakres opóźnienia✓ częstotliwość powtarzania✓ zakres regulacji wzmocnienia✓ podcięcie✓ dynamika zobrazowania	2-5-10-20-25-50-100-200-500 cm od 2 do 500 cm od 1 000 do 20 000 m/s od 0 do 50 cm w stali od 0,1 do 3 kHz od 0 do 100 dB, skokowo co 0,1 dB regulowane płynnie 26 dB
Banki kalibracyjne	10 banków
Współpraca z urządzeniami zewnętrznymi	współpraca z komputerem i drukarką przez interfejs szeregowy RS232C
Zasilanie	za pośrednictwem zasilacza - ładowarki z sieci prądu przemiennego od 100V do 240V, w terenie z akumulatora 6V
Zakres temperatur pracy	od - 20 ° C do 50 ° C
Czas pracy ciągłej (zasilanie z akumulatora)	ok. 8 h
Wymiary zewnętrzne	135 x 260 x 185 mm
Masa	4 kg

Rysunek 6 przedstawia płytę czołową defektoskopu DI 60.



Rys. 6. Płyta czołowa defektoskopu DI 60: **1** – pole przycisków sterowania nastawami przyrządu; **2**-gniazda przyłączania głowic ultradźwiękowych; **3** – (**MENU**) przycisk włączania listy opcji; **4** – (**dB**) sterowanie wzmacnieniem, wyłączenie automatyki; **5** – (**m**) sterowanie zasięgiem (podstawa czasu); **6** – sterowanie opóźnieniem; **7** – marker monitora pierwszego; **8** – marker monitora drugiego; **9** – pole wyświetlania wartości wzmacnienia; **10** - pole wyświetlania wartości zakresu pomiarowego; **11** - pole wyświetlania listy opcji; **12** – (**ENTER**) przycisk potwierdzenia wyboru opcji lub zakończenia wprowadzania danej; **13** - (**ESC**) przycisk przejścia do menu nadrzędnego lub rezygnacja z wyboru opcji; **ON** – włączenie przyrządu; **OFF** - wyłączenie przyrządu.

Sterowanie podstawą czasu (**m**) odbywa się za pomocą przycisków poprzez naciskanie przycisków kierunkowych $\leftarrow\rightarrow$.

Możliwe opcje sterowania:

- ❖ **M** – skokowa - jest dostępna, gdy po kolejnym wciskaniu przycisku **m** (rys.6) pojawi się w górnym prawym rogu ekranu (pod wartością zakresu pomiarowego 10 – rys.6) napis $\leftarrow\rightarrow$ **M**. Skokowa regulacja jest możliwa w zakresie od 2-500 cm;
- ❖ **MZ** – płynna regulacja możliwa jest w zakresie od 2-500 cm (opcja aktywna, gdy po kolejnym wciskaniu przycisku **m** pojawi się w górnym prawym rogu ekranu napis $\leftarrow\rightarrow$ **MZ**);

- ❖ **LUP** – zmiana wielkości opóźnienia (jest dostępna, gdy pojawi się w górnym prawym rogu ekranu napis ←→ **LUP**);
- ❖ **M1** – regulacja położenia na ekranie monitora 1 (aktywna, gdy jest napis górnym prawym rogu ekranu ←→ **M1**);
- ❖ **M1R** – regulacja położenia prawego końca linii monitora 1 (jego szerokości). Dostępna, gdy pojawi się napis górnym prawym rogu ekranu ←→ **M1R**;
- ❖ **M2** – regulacja położenia na ekranie monitora 2 (aktywna, gdy jest napis górnym prawym rogu ekranu ←→ **M2**);
- ❖ **M2R** – regulacja położenia prawego końca linii monitora 2 (jego szerokości). Dostępna, gdy pojawi się napis górnym prawym rogu ekranu ←→ **M2R**.

Defektoskop DI 60 charakteryzuje się:

- ✓ zaprogramowanymi fabrycznie skalami OWR pozwalającymi na dokładne określenie wielkości i położenia wady;
- ✓ pamięcią 300 wyników pomiarów wraz z nastawami, datą oraz dokładnym czasem pomiaru;
- ✓ pomiarem tłumienia, prędkości i odległości;
- ✓ dwoma niezależnymi monitorami w kanale;
- ✓ zakresami obserwacji nastawianymi płynnie od 2 do 500 cm, lub skokowo w zakresie: 2-5-10-20-50-100-200-500 cm;
- ✓ możliwością współpracy z komputerem;
- ✓ możliwością umieszczania pomiarów w bankach danych;
- ✓ możliwością współpracy z różnymi typami głowic produkcji METRISON oraz 10 głowicami innych dowolnych producentów;
- ✓ możliwością pracy w terenie;
- ✓ małymi gabarytami i masą;
- ✓ długim czasem pracy na zasilaniu bateryjnym (ok. 8 h);
- ✓ szczelną obudową IP-65 czyniącą go odpornym na zewnętrzne warunki atmosferyczne.

Sterowanie defektoskopem polega na wyborze opcji z rozwijanego menu.

Wybór opcji dokonuje się w sposób następujący:

- wcisnąć klawisz **MENU** i w polu wyświetlania listy opcji (**11** na rys.6) pojawi się tekst opcji pierwszej: **ODCZYT BANKU NASTAW**; korzystając z klawiszy kierunkowych (**1** na rys.6) wybrać właściwą opcję i zatwierdzić klawiszem **ENTER**;
- po zatwierdzeniu opcji defektoskop wyświetla operatorowi określone polecenia, które należy wykonać zgodnie z ukazującymi się komunikatami;

- przechodzenie do menu nadrzędnego, rezygnacja z wyboru opcji lub wykonania polecenia odbywa się poprzez naciśnięcia klawisza **ESC**.

Lista opcji w menu defektoskopu DI 60:

1. **ODCZYT BANKU NASTAW** – odczyt nastaw defektoskopu (mogą to być nastawy zapisane przez użytkownika w celu usprawnienia pracy w poszczególnych trybach pomiarów).
2. **ZAPIS BANKU NASTAW** – zapis nastaw defektoskopu.
3. **PRĘDKOŚĆ** – wybór prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej lub opcja pomiaru prędkości fali w badanym materiale:

Rodzaj materiału	Prędkość fali m/s
polietylen	2 000
polistyren	2 510
szkło organiczne	2 750
cyna	3 320
srebro	3 600
cynk	4 170
mosiądz	4 450
miedź	4 700
nikiel	5 630
stal	5 900
tytan	6 000
chrom	6 200
aluminium	6 260

4. **TYP GŁOWICY** – wybór typu głowicy lub pomiar opóźnienia dobiegu.
5. **MONITOR 1** – sterowanie monitorem 1:
 - **regulacja monitorów** – sterowanie przyciskami ←→ położeniem monitora na ekranie.
 - **rodzaj alarmu:**

- ✓ **pozytywny** – wywołanie alarmu, gdy amplituda echa jest wyższa od wartości progowej;
 - ✓ **negatywny** - wywołanie alarmu, gdy amplituda echa jest poniżej wartości progowej.
- **alarm akustyczny** – sygnalizowanie dźwiękiem:
 - ✓ **al. akustyczny wł.** – włączenie alarmu akustycznego;
 - ✓ **al. akustyczny wył.** – wyłączenie alarmu akustycznego.
 - **alarm optyczny** – sygnalizowanie alarmem optycznym:
 - ✓ **al. optyczny wł.** – włączenie alarmu optycznego;
 - ✓ **al. optyczny wył.** – wyłączenie alarmu optycznego.
 - **monitor 1 wł/wył.:**
 - ✓ **monitor 1 włączony** – włączenie monitora 1;
 - ✓ **monitor 1 wyłączony** – wyłączenie monitora 1.
6. **MONITOR 2** – sterowanie monitorem 2 – polecenia analogiczne jak w przypadku monitora 1.
 7. **POMIAR ODLEGŁOŚCI** – pomiar odległości ech między monitorami.
 8. **POMIAR TŁUMIENIA** – pomiar tłumienia fali ultradźwiękowej.
 9. **POMIAR PRĘDKOŚCI** – pomiar prędkości rozchodzenia się fali ultradźwiękowej.
 10. **POMIAR WIELKOŚCI WADY** – pomiar rozmiaru wady równoważnej.
 11. **AUTOMATYKA** – sterowanie automatyką wzmocnienia:
 - **automatyka mon – 1** – sterownie automatyką wzmocnienia w monitorze 1;
 - **automatyka mon – 2** – sterownie automatyką wzmocnienia w monitorze 2;
 - **automatyka wyłączona** – wyłączenie automatyki wzmocnienia.
 12. **PODCIĘCIE** – sterowanie podcięciem.
 13. **ENERGIA** – sterowanie energia fali ultradźwiękowej w głowicy:

➤ duża;

➤ mała.

14. **PRZENIKANIE** – wybór trybu pracy defektoskopu:

➤ jedna głowica;

➤ dwie głowice.

15. **CZĘSTOTLIWOŚĆ POWTARZANIA** – sterowanie częstotliwością powtarzania:

➤ duża;

➤ mała.

16. **KALIBRACJA ZASIĘGU** – płynne sterowanie zakresem obserwacji.

17. **DRUKOWANIE** – komunikacja z komputerem lub drukarką.

18. **JEDNOSTKI** – wybór jednostek, w których przedstawiane są nastawy i wyniki pomiarów:

➤ jednostki – μm ;

➤ jednostki – cm ;

➤ jednostki – cale .

19. **JĘZYK** – wybór języka w jakim wyświetlane będą komunikaty:

➤ język polski;

➤ język angielski.

20. **STAN BATERII** – stan naładowania baterii w %.

21. **DATA I CZAS** – data i czas wykonania pomiarów;

22. **PAMIĘĆ WYNIKÓW** – przechowywane są wcześniej zapisane wyniki pomiarów.


3. POMIAR PRĘDKOŚCI FALI ULTRADŹWIĘKOWEJ

3.1. Pomiar prędkości fali podłużnej

W celu pomiaru prędkości fali podłużnej defektoskopem DI 60 należy:

Laboratorium „Fizyki”

Ćw. Nr4 „Pomiar prędkości propagacji fali ultradźwiękowej”

- a) włączyć defektoskop przyciskiem **ON** i odczekać kilkanaście sekund, w czasie których przyrząd przeprowadzi autotest;
- b) do końca przewodu pomiarowego umieszczonego w gnieździe **2** (rys. 6) dołączyć głowicę ultradźwiękową dla fal podłużnych (o okrągłym przekroju);
- c) wcisnąć przycisk „**MENU**” i następnie za pomocą przycisków kierunkowych ↓ wybrać opcję „**4.TYP GŁOWICY**”, zatwierdzić przyciskiem **ENTER**;
- d) przyciskiem ↑↓ wybrać typ głowicy **4L.0.10C** i zatwierdzić przyciskiem **ENTER**;
- e) wcisnąć przycisk „**MENU**” i następnie za pomocą przycisków kierunkowych ↓ wybrać opcję „**3. PRĘDKOŚĆ**”, zatwierdzić przyciskiem **ENTER**, pojawi się napis „**PRĘDKOŚĆ NIETYPOWA**”;
- f) przyciskiem → wybrać „**PRĘDKOŚĆ MIERZONA**” - zatwierdzić przyciskiem **ENTER**;
- g) w odpowiedzi na pytanie „**UWZGLĘDNIAC ZERO GŁOWICY TAK?**” przyciskami ←→ wybrać „**NIE**” i zatwierdzić przyciskiem **ENTER**;
- h) Trzykrotnie zmierzyć suwmiarką grubość badanej próbki, obliczyć wartość średnią – wyniki zamieścić w tabeli 2;
- i) zwilżyć powierzchnię roboczą głowicy ultradźwiękowej olejem silikonowym (lub innym płynem) w celu zapewnienia jej dobrego kontaktu z powierzchnią próbki i ustawić ją centralnie na próbce;
- j) wciskając kilkakrotnie przycisk „**m**” wybrać opcję „**M2 ←→M**” i wciskać przycisk ← lub → tak, aby na ekranie widać było około 3-5 impulsów (gdy próbka nie zawiera wad, to odległość między kolejnymi impulsami jest równa jej grubości);
- k) wcisnąć przycisk „**m**” i gdy pojawi się opcja „**M2 ←→MZ**” wciskając i przytrzymując przycisk ← lub → uzyskać na ekranie dokładnie 5 impulsów;
- l) jeżeli pierwszy impuls jest zbyt oddalony od zera na osi czasu, to wcisnąć przycisk  i gdy pojawi się opcja „**M2←→LUP**” przytrzymując przycisk ← lub → przesunąć przebiegi do punktu „**0**”;
- m) wcisnąć 1 raz przycisk „**dB**” (wyłączenie automatycznej regulacji wzmocnienia) i przyciskami ↑↓ doprowadzić do tego, aby wszystkie widoczne impulsy przekraczały wysokością środkową linię ekranu (niektóre z impulsów mogą przy tym wychodzić poza ekran);
- n) wcisnąć przycisk „**m**” i gdy pojawi się opcja „**M2 ←→M1**” wciskając i przytrzymując przycisk ← lub → przesunąć kursor monitora **1**, tak aby jego początek lekko wystawał przed zbocze narastające drugiego impulsu (jeżeli kursor monitora 1 jest zbyt

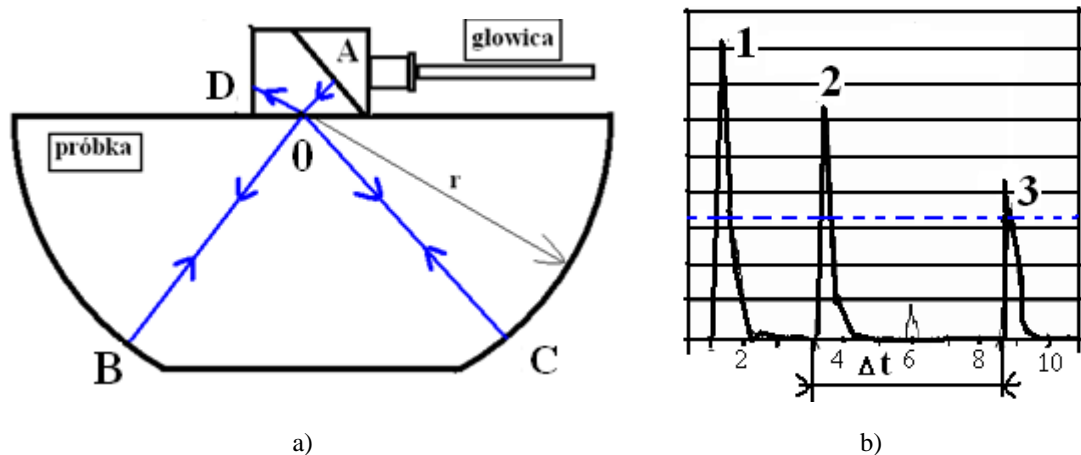
- szeroki, to wciskając przycisk „m” za pomocą opcji „M2 ←→M1R” i przycisków ← lub → skrócić jego szerokość, tak aby prawy koniec kursora M1 trochę wystawał za zbocze narastające drugiego impulsu;
- o) wcisnąć przycisk „m” i gdy pojawi się opcja „M2 ←→M2” wciskając i przytrzymując przycisk ← lub → przesunąć kursor monitora 2, tak aby jego początek lekko wystawał przed zbocze narastające trzeciego impulsu (jeżeli kursor monitora 2 jest zbyt szeroki, to wciskając przycisk „m” za pomocą opcji „M2 ←→M2R” i przycisków ← lub → skrócić jego szerokość, tak aby prawy koniec kursora M2 trochę wystawał za zbocze narastające trzeciego impulsu;
- p) wcisnąć przycisk **ENTER** - pojawi się napis „RZECZ. ODLEGLOSC?” i „M1- 009.1-M2” (lub podobny). Przyciskami ←→ wprowadzić wartość grubości próbki zmierzoną w punkcie **3.1h** i wcisnąć **ENTER**;
- q) zapisać wartość prędkości, która pojawi się na ekranie, w tabeli 2 i wcisnąć **ENTER**. Na pytanie „ZAPAMIĘTAĆ POMIAR” przyciskiem → wybrać „NIE”, wcisnąć **ENTER**.
- r) na pytanie „POWTÓRZYĆ POMIAR?” odpowiedzieć „TAK” wciskając **ENTER**;
- s) powtórzyć pomiary dla pozostałych próbek wskazanych przez prowadzącego ćwiczenia wykonując polecenia zawarte w **p. 3.1h-r**;
- t) jeżeli zostały przebadane już wszystkie próbki - wówczas na pytanie „POWTÓRZYĆ POMIAR?” przyciskiem → wybrać „NIE”, zatwierdzić **ENTER**.

Tabela 2.

	Jedn.	Próbka stalowa			Próbka aluminiowa		
		1	2	3	1	2	3
Grubość	mm						
Wartość średnia	mm						
Prędkości fali podłużnej	m/s						
Wartość średnia	m/s						

3.2. Pomiar prędkości fali poprzecznej

Pomiar prędkości fali poprzecznych wykonuje się na próbce o specjalnie wybranym kształcie za pomocą głowicy kątowej (rys.7).



Rys.7. Pomiar prędkości fali poprzecznej: a) droga propagacji fali; b) zarejestrowane impulsy na ekranie defektoskopu

Sygnał ultradźwiękowy z głowicy (p.A) pada na powierzchnię próbki wyciętej z walca w punkcie 0 (jest to środek walca). Przy przejściu do ośrodka o większym współczynniku załamania fala ulega załamaniu i biegnie w kierunku punktu B. Kąt padania fali w p. B jest równy zero (tak jak 0-B jest promieniem) i po odbiciu wraca tą samą drogą do punktu 0. Tam fala częściowo załamuje się wracając do odbiornika głowicy, a częściowo odbija się przebywając drogę 0-C-0. Następnie w punkcie 0 znów częściowo załamuje się, ale tym razem nie trafia do odbiornika głowicy, tylko do punktu D (trafia do odbiornika głowicy dopiero po przejściu przez impuls kolejnego dystansu 0-B-0). Na ekranie defektoskopu pojawi się obraz podobny do przedstawionego na rysunku 7b. Głowica odbierze impuls nadawczy 1, impuls 2, który przebył drogę 0-B-0 równą dwóm promieniom walca ($2r$) i impuls 3, który przebył drogę 0-C-0-B-0 (dłuższą o $4r$ niż droga impulsu 2). Odczytany z ekranu odcinek czasu Δt , (między impulsami 2 i 3 jest równoważny przebytej przez falę poprzeczną drodze $4r$). Znając promień walca i odczytując z ekranu czas obliczamy prędkość fali poprzecznej

$$c_t = \frac{4r}{\Delta t}. \quad (9)$$

Kolejność wykonywanych czynności:

- zmierzyć trzykrotnie średnicę badanej próbki, wyliczyć wartość średnią i zapisać w tabeli 3;
- wcisnąć „MENU”, przyciskami $\uparrow\downarrow$ wybrać „18 JEDNOSTKI”, zatwierdzić ENTER;
- przyciskiem \uparrow wybrać „ μs ” i ENTER;
- znowu wcisnąć „MENU” i przyciskami $\uparrow\downarrow$ wybrać opcję „4.TYP

- GŁOWICY” i zatwierdzić ENTER-em;**
- e) zamienić głowicę na fale podłużne na głowicę prostokątną i przyciskiem \rightarrow wybrać typ głowicy **4T 45° 10C**, zatwierdzić przyciskiem **ENTER**;
 - f) przyciskami $\leftarrow\rightarrow$ wybrać taką skalę czasu, aby na ekranie widać było około 3-5 impulsów;
 - g) wcisnąć przycisk „**m**” i gdy pojawi się opcja „**M2 $\leftarrow\rightarrow$ MZ**” wciskając i przytrzymując przycisk \leftarrow lub \rightarrow uzyskać na ekranie dokładnie 3 impulsy;
 - h) przyciskami $\uparrow\downarrow$ ustawić takie wzmocnienie, aby wszystkie trzy impulsy przekroczyły linię poziomu decyzyjnego (rys.7b). W razie potrzeby wcisnąć przycisk „**dB**”;
 - i) wcisnąć przycisk „**MENU**” i następnie za pomocą przycisków kierunkowych \downarrow wybrać opcję „**7.POMIAR ODLEGŁOŚCI**”, zatwierdzić przyciskiem **ENTER**;
 - j) zatwierdzić „**1.ODLEGŁOŚĆ**” **ENTER-em**;
 - k) w odpowiedzi na pytanie „**UWZGLĘDNIAC ZERO GŁOWICY TAK?**” przyciskiem \downarrow wybrać „**NIE**” i **ENTER**;
 - l) wcisnąć przycisk „**m**” i gdy pojawi się opcja „**M2 $\leftarrow\rightarrow$ M1**” wciskając i przytrzymując przycisk \leftarrow lub \rightarrow przesunąć kursor monitora **1**, tak aby jego początek lekko wystawał przed zbocze narastające drugiego impulsu;
 - m) wcisnąć przycisk „**m**” i gdy pojawi się opcja „**M2 $\leftarrow\rightarrow$ M2**” wciskając i przytrzymując przycisk \leftarrow lub \rightarrow przesunąć kursor monitora **2**, tak aby jego początek lekko wystawał przed zbocze narastające trzeciego impulsu;
 - n) odczytać czas Δt z ekranu i zanotować w tabeli 3;
 - o) zmierzyć średnicę **d** walca-próbki (**d=2r**) i zanotować w tabeli 3;
 - p) obliczyć prędkość fali poprzecznej ze wzoru (9) i zapisać w tabeli 3;
 - q) powtórzyć czynności (punkty **e-o**) dla próbki aluminiowej;
 - r) wykorzystując wyniki pomiarów prędkości fali podłużnej i poprzecznej na podstawie wzorów (2) wyznaczyć i zamieścić w odpowiednich tabelach wartości modułu Younga i liczby Poissona oraz modułu Kirchhoffa: $G = c_t^2 \rho$, gdzie: ρ – gęstość materiału.

Tabela 3.

Wyznaczanie prędkości fali poprzecznej						
	Próbka stalowa			Próbka aluminiowa		
	d	Δt	c_t	d	Δt	c_t
Jednostki	mm	μs	m/s	mm	μs	m/s
Wartość						
Wartość średnia						
Błąd względny %				Błąd względny %		

Tabela 4.

Próbka stalowa		Moduł Kirchhoffa		Liczba Poissona		
		obliczony	dane literaturowe	obliczona	dane literaturowe	
	Jednostki	MPa		-		
	Wartość					
	Błąd względny					
	%					
Próbka aluminiowa		Moduł Kirchhoffa		Liczba Poissona		
		obliczony	dane literaturowe	obliczona	dane literaturowe	
	Jednostki	MPa		-		
	Wartość					
	Błąd względny					
	%					

3.3. Dodatkowe pomiary prędkości fali podłużnej

Tabela 5.

		Próbka.....			Próbka.....		
		1	2	3	1	2	3
Grubość	mm						
Wartość średnia	mm						
Prędkości fali podłużnej	m/s						
Wartość średnia	m/s						
Dane literaturowe	m/s						
Błąd względny	%						

Sprawozdanie powinno zawierać:

- wypełnione tabele pomiarowe podpisane przez prowadzącego;
- analizę uzyskanych wyników pomiarów i obliczeń;
- wnioski.

5. PYTANIA I ZADANIA KONTROLNE

1. Wyjaśnij zjawiska zachodzące w procesie propagacji fali ultradźwiękowej w ciałach stałych.
2. Wymień metody pomiaru prędkości fali podłużnej i opisz jedną z nich.
3. Wymień metody pomiaru prędkości fali poprzecznej i opisz jedną z nich.
4. Wyjaśnij metodykę wyznaczania właściwości sprężystych ciał stałych.
5. Wymień metody pomiaru prędkości propagacji fali ultradźwiękowej i opisz jedną z nich.
6. Narysuj oraz opisz budowę i zasadę działania głowicy ultradźwiękowej do generacji fali podłużnej.
7. Narysuj oraz opisz budowę i zasadę działania głowicy ultradźwiękowej do generacji fali poprzecznej.

LITERATURA

1. *Wyrażanie niepewności pomiaru. Przewodnik*. Główny Urząd Miar, 1999, ISBN 83-906546-1-x.
2. Michalski A., Tumański S., Żyła B.: *Laboratorium miernictwa wielkości niefektrycznych*, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1999.
3. *Instrukcja obsługi defektoskopu DI 60*. Metrison, Mościska 2011.
4. Miłek M.: *Metrologia elektryczna wielkości niefektrycznych*, WSP Zielona Góra 2006.
5. Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki. pod red. Ireny Lasockiej i Jana Zambrzyckiego. Wydaw. Politechniki Białostockiej. Białystok 2004.
6. Zbiór zadań z fizyki dla studentów uczelni technicznych. red. Wojciech Jarmoc. Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej Białystok 2011.
7. Stanisław Kulaszewicz, Irena Lasocka: *Fizyka dla studentów Wydziału Elektrycznego*, Wydaw. Politechniki Białostockiej, Białystok 1997.

WYMAGANIA BHP

Warunkiem przystąpienia do praktycznej realizacji ćwiczenia jest zapoznanie się z instrukcją BHP i instrukcją przeciwpożarową oraz przestrzeganie zasad w nich zawartych. Wybrane urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym mogą posiadać instrukcje stanowiskowe. Przed rozpoczęciem pracy należy zapoznać się z instrukcjami stanowiskowymi wskazanymi przez prowadzącego.

W trakcie zajęć laboratoryjnych należy przestrzegać następujących zasad.

- ♦ Sprawdzić, czy urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym są w stanie kompletnym, nie wskazującym na fizyczne uszkodzenie.
- ♦ Sprawdzić prawidłowość połączeń urządzeń.
- ♦ Załączenie napięcia do układu pomiarowego może się odbywać po wyrażeniu zgody przez prowadzącego.
- ♦ Przyrządy pomiarowe należy ustawić w sposób zapewniający stałą obserwację, bez konieczności nachylania się nad innymi elementami układu znajdującymi się pod napięciem.
- ♦ Zabronione jest dokonywanie jakichkolwiek przełączeń oraz wymiana elementów składowych stanowiska pod napięciem.
- ♦ Zmiana konfiguracji stanowiska i połączeń w badanym układzie może się odbywać wyłącznie w porozumieniu z prowadzącym zajęcia.
- ♦ W przypadku zaniku napięcia zasilającego należy niezwłocznie wyłączyć wszystkie urządzenia.
- ♦ Stwierdzone wszelkie braki w wyposażeniu stanowiska oraz nieprawidłowości w funkcjonowaniu sprzętu należy przekazywać prowadzącemu zajęcia.
- ♦ Zabrania się samodzielnego włączania, manipulowania i korzystania z urządzeń nie należących do danego ćwiczenia.
- ♦ W przypadku wystąpienia porażenia prądem elektrycznym należy niezwłocznie wyłączyć zasilanie stanowisk laboratoryjnych za pomocą wyłącznika bezpieczeństwa, dostępnego na każdej tablicy rozdzielczej w laboratorium. Przed odłączeniem napięcia nie dotykać porażonego.