

---

**XXIII Seminarium  
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW  
Zakopane, 15-17 marca 2017**

---

## POMIARY POLA AKUSTYCZNEGO

Wojciech SECOMSKI

IPPT PAN, Warszawa  
[Wojciech.Secomski@ippt.pan.pl](mailto:Wojciech.Secomski@ippt.pan.pl)

### 1. POLE AKUSTYCZNE

Pole akustyczne to przestrzenny rozkład ciśnienia akustycznego lub natężenia fali ultradźwiękowej generowanego przez przetwornik ultradźwiękowy. Zależność pomiędzy ciśnieniem a natężeniem jest określona wzorem [1,2]:

$$I(t) = \frac{p^2(t)}{Z_0} \quad (1)$$

gdzie  $p(t)$  to chwilowa wartość ciśnienia akustycznego, mierzona w paskalach (Pa),  $I(t)$  to chwilowa wartość natężenia akustycznego, mierzona w watach na metr kwadratowy ( $W/m^2$ ), a  $Z_0$  to impedancja akustyczna ośrodka, mierzona w railach (Rayl). Impedancja akustyczna jest iloczynem gęstości  $\rho$  ( $kg/m^3$ ) i prędkości fali akustycznej  $c$  (m/s):

$$Z_0 = \rho \cdot c \quad (2)$$

Przykładowo, woda destylowana ma impedancję akustyczną  $Z_0 = 1.5$  MRayl. Typowe wartości ciśnienia generowane przez przetworniki używane w badaniach nieniszczących mieszczą się w zakresie setek kPa do pojedynczych MPa, a typowe natężenia mają wartość kilku do kilkuset  $mW/cm^2$ .

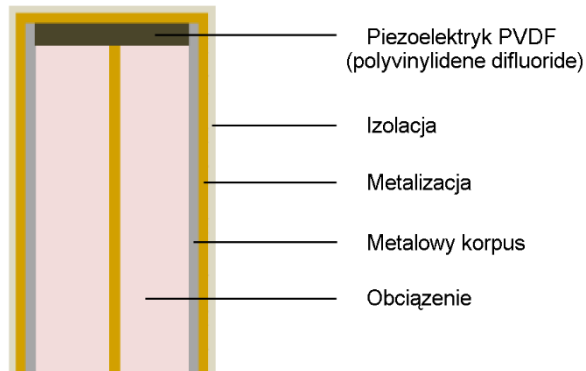
Badając pole akustyczne przetwornika można wyznaczyć:

- szerokość wiązki akustycznej, a tym samym oszacować rozdzielczość poprzeczną,
- długość (czas trwania) impulsu akustycznego i oszacować rozdzielczość podłużną,
- położenie ogniska,
- można wykryć obecność, położenie oraz względne amplitudy listków bocznych mogących zakłócać pomiary lub generować fałszywe obrazy,
- nierównomierność pola akustycznego w niewielkiej odległości od powierzchni przetwornika, co pozwala wykryć wady przetwornika lub uszkodzenia pojedynczych elementów głowicy wieloelementowej.

Wyznaczenie pola akustycznego wymaga przestrzennego skanowania wartości ciśnienia lub natężenia generowanego przez przetwornik. Pomiary wykonujemy w cieczy, najczęściej w wodzie, gdzie detektor ciśnienia – hydrofon może być przesuwany względem przetwornika nadawczego.

## 2. HYDROFONY

Hydrofon, z greckiego hydro (woda) + phone (dźwięk), jest przetwornikiem służącym do rejestracji ciśnienia akustycznego w wodzie lub w innych cieczach. Hydrofon do pomiaru pola akustycznego powinien mieć niewielkie wymiary, najlepiej średnicę mniejszą od  $\frac{1}{4}$  długości mierzonej fali oraz płaską charakterystykę częstotliwościową. Najczęściej stosowanym materiałem piezoelektrycznym w hydrofonach jest folia z polifluorku winylidenu, PVDF (polyvinylidene difluoride). Hydrofony pomiarowe mają aktywną średnicę  $40\ \mu\text{m}$  –  $1\ \text{mm}$  i grubość od kilku do kilkunastu  $\mu\text{m}$ , co odpowiada częstotliwości rezonansowej  $100$  –  $40\ \text{MHz}$ . Folia PVDF ma impedancję akustyczną zbliżoną do wody, a praca poza rezonansem umożliwia uzyskanie płaskiej charakterystyki częstotliwościowej, nie gorszej niż  $\pm 2\ \text{dB}$  w zakresie częstotliwości  $2$  –  $20\ \text{MHz}$ . Konstrukcja hydrofonu nie powinna zakłócać rozkładu pola akustycznego. Dlatego hydrofony są produkowane albo w kształcie igły o średnicy  $0.1$  –  $1\ \text{mm}$  i długości  $40\ \text{mm}$  (rys.1, rys.2) lub przezroczystej dla ultradźwięków membrany PVDF o średnicy  $60\ \text{mm}$ , w obudowie o średnicy  $110\ \text{mm}$  (rys.3). Do hydrofonu jest dołączany wodoszczelny przedwzmacniacz w postaci metalowego walca o średnicy  $8$  –  $10\ \text{mm}$ , łączony bezpośrednio z hydrofonem igłowym, lub umieszczony wewnątrz obudowy hydrofonu membranowego.



Rys.1. Przekrój hydrofonu igłowego z folii PVDF.



Rys.2. Zestaw czterech hydrofonów igłowych firmy Precision Acoustics, UK [4]. Średnica elementów aktywnych (folia PVDF) wynosi (od lewej)  $40\ \mu\text{m}$ ,  $75\ \mu\text{m}$ ,  $0.2\ \text{mm}$  oraz  $0.5\ \text{mm}$ .

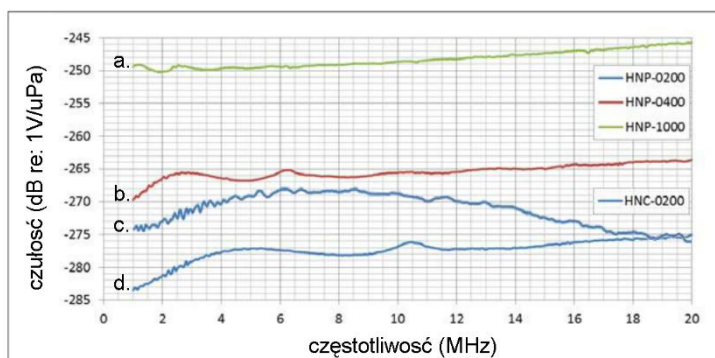
W tylnej części hydrofonów znajdują się złącza koncentryczne, podłączane do przedwzmacniacza.



Rys.3. Hydrofon membranowy firmy Sonora, USA (obecnie Acertara Acoustic Labs, USA) [5]. W prawym górnym rogu pokazano powiększenie elementu aktywnego o średnicy 0.5 mm.

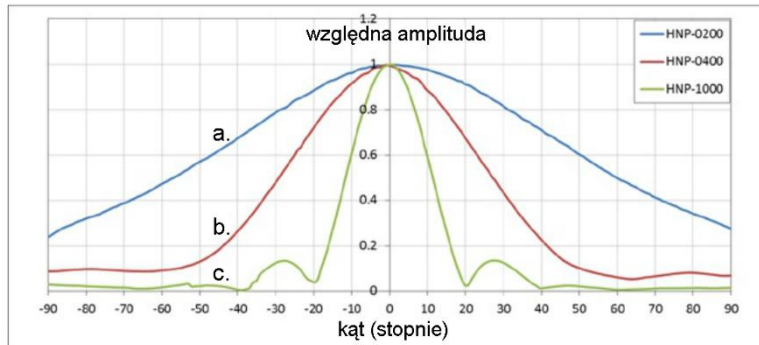
Czułość hydrofonu zależy od jego powierzchni i wynosi od kilku do kilkuset mV/MPa. Producenci często podają czułość hydrofonu w skali logarytmicznej w dB w stosunku do 1V/ $\mu$ Pa. Niekiedy, zamiast folii PVDF stosuje się piezoceramikę, co zwiększa czułość hydrofonu o około 10 dB kosztem mniej równomiernej charakterystyki częstotliwościowej. Przykładowe charakterystyki hydrofonów o różnej powierzchni i wykonane z różnych materiałów przedstawiono na rys.4, a ich charakterystyki kierunkowe na rys.5.

Innym rozwiązaniem są hydrofony światłowodowe, wykorzystujące interferometr laserowy do pomiaru zmian współczynnika załamania światła na końcu światłowodu, proporcjonalnych do ciśnienia akustycznego. Produkowane są także hydrofony o dużej powierzchni i proporcjonalnie większej czułości służące między innymi do detekcji kawitacji.



Rys.4. Charakterystyki częstotliwościowe hydrofonów PVDF i piezoceramicznego firmy Onda, USA [3]. Hydrofony o większej powierzchni mają większą czułość.

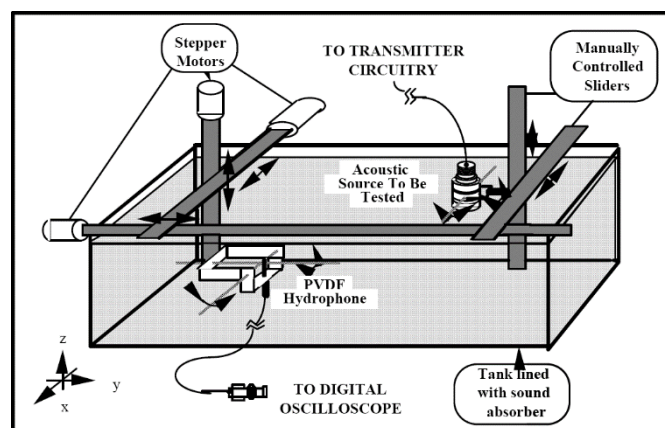
- a. hydrofon PVDF typu HNP-1000 o średnicy 1 mm, b. hydrofon PVDF typu HNP-0400 o średnicy 0.4 mm, c. hydrofon piezoceramiczny typu HNC-0200 o średnicy 0.2 mm, d. hydrofon PVDF typu HNP-0200 o średnicy 0.2 mm.



Rys.5. Charakterystyki kierunkowe hydrofonów PVDF firmy Onda, USA [3] dla częstotliwości 5 MHz. Hydrofony o mniejszej średnicy mają szerszą charakterystykę kierunkową. a. hydrofon typu HNP-0200 o średnicy 0.2 mm, b. hydrofon typu HNP-0400 o średnicy 0.4 mm, hydrofon typu HNP-1000 o średnicy 1 mm.

### 3. WANNA DO POMIARÓW AKUSTYCZNYCH

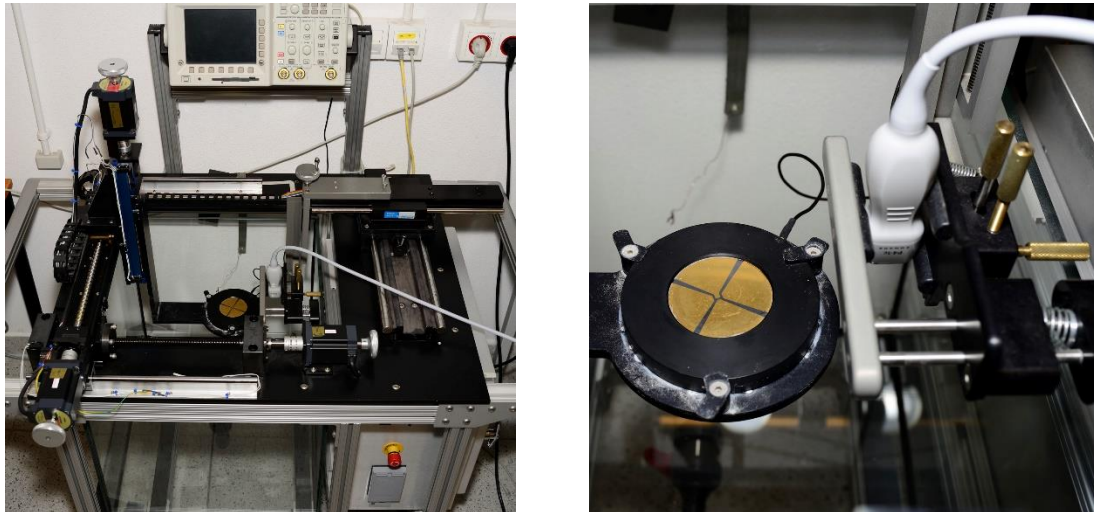
Pomiary pola akustycznego przeprowadza się w naczyniu (wannie), którego objętość zależy od wymiarów przetwornika ultradźwiękowego oraz wielkości (zakresu) trójwymiarowego pola akustycznego (XYZ), przewidywanego do rejestracji. Jeżeli przetwornik generuje krótkie impulsy o małej częstotliwości powtarzania to nie istnieje możliwość interferencji z wcześniejszymi impulsami, odbitymi od ścian naczynia i nie ma potrzeby wyłożenia tych ścian warstwą tłumiącą ultradźwięki. Rozkład ciśnienia lub natężenia w polu akustycznym można zarejestrować w układzie automatycznym Acoustic Measurement System (AMS) lub ręcznie, na przykład wykorzystując podstawę mikroskopu metalurgicznego, wyposażoną w precyzyjny dwuwymiarowy (XY) przesuw stolika za pomocą dwóch śrub mikrometrycznych. Dla przesuwu pionowego (Z), wzdłuż osi promieniowania przetwornika, dokładność 1 mm jest zwykle wystarczająca.



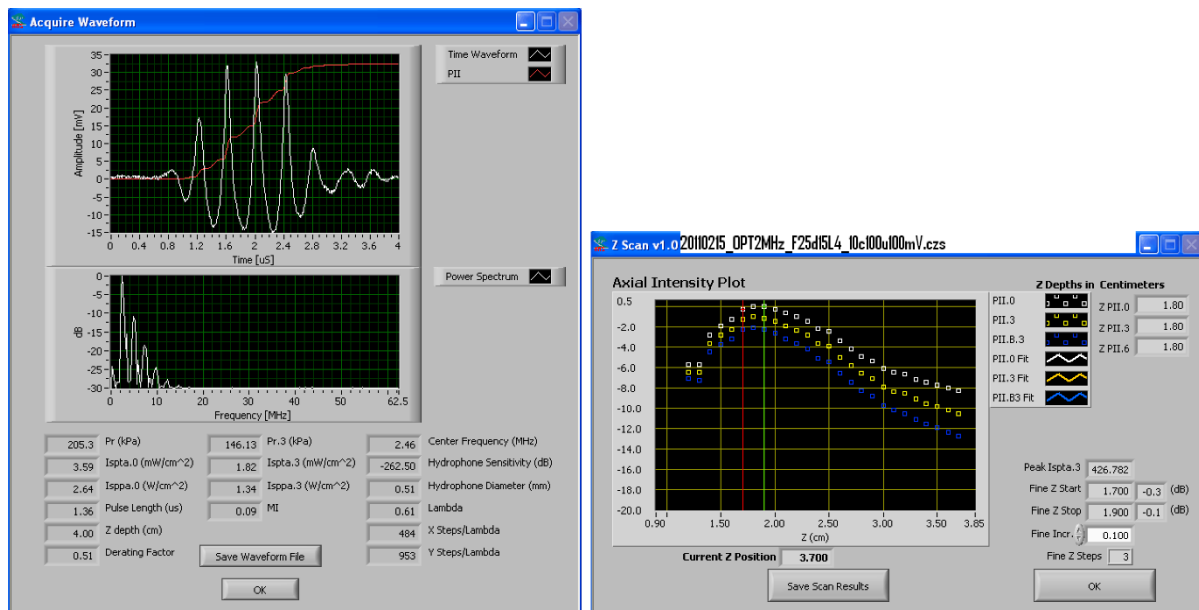
Rys.6. Schematyczny rysunek automatycznego skanera pola akustycznego AMS. Przesuw hydrofonu jest sterowany przez trzy silniki krokowe, przesuw przetwornika generującego falę akustyczną – ręcznie.

System Acoustic Measurement System (AMS) firmy Sonora, USA, (obecnie Acertara Acoustic Labs, USA) [5], jest automatycznym skanerem pola akustycznego, napędzany przez trzy silniki krokowe. Zainstalowane oprogramowanie rejestruje dane z oscyloskopu cyfrowego połączonego z hydrofonem. Oprogramowanie steruje silnikami krokowymi skanera,

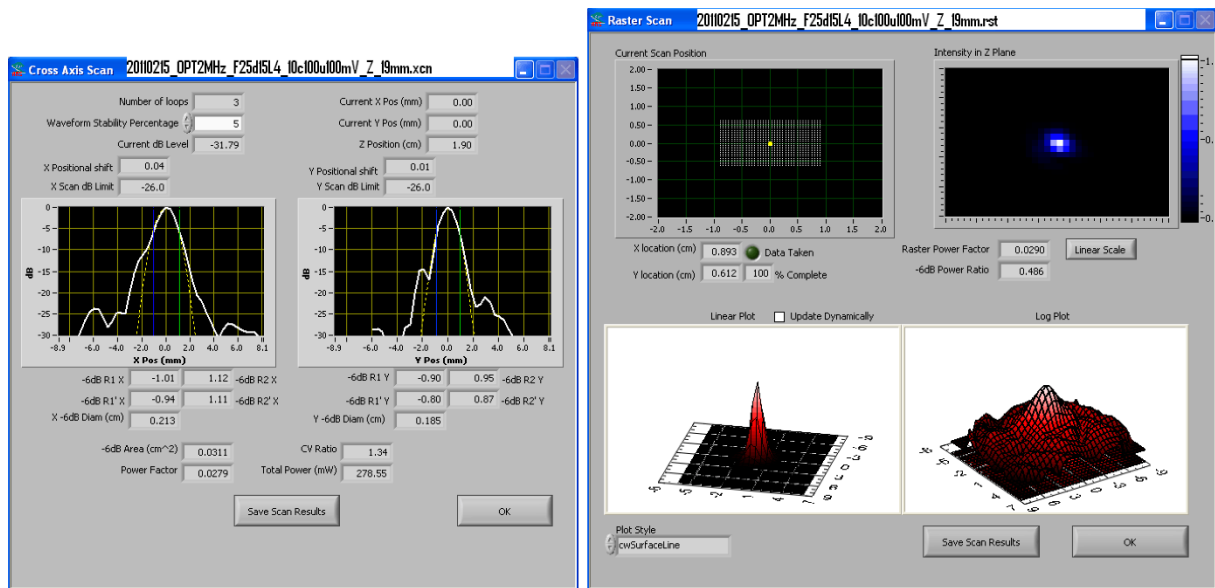
automatycznie wyszukuje położenie ogniska (maksymalnej amplitudy) oraz wyświetla i zapisuje gotowe wykresy pola akustycznego jedno- i dwuwymiarowego. Poza automatycznym przesuwem w trzech osiach, system posiada ręczną regulację pochylenia przetwornika nadawczego w dwóch osiach tak, aby wiązka akustyczna była równoległa do jednej z osi przesuwu (najczęściej pionowej, Z). Schematyczny rysunek skanera jest przedstawiony na rys.6., zdjęcie skanera na rys.7., a graficzne wyniki pomiarów na rys.8. i rys.9.



Rys.7. Fotografia skanera pola AMS (z lewej) oraz powiększenie przetworników nadawczego – głowicy ultrasonografu i hydrofonu membranowego (z prawej). Dla czytelności fotografii, z naczynia wypompowano wodę, a głowica i hydrofon są przesunięte względem siebie.



Rys.8. Graficzne wyniki pomiarów pola akustycznego zarejestrowane przez skaner AMS. Źródłem pola akustycznego była głowica jednoelementowa 2.5 MHz, o średnicy 15 mm i ogniskowej 25 mm. Rysunek z lewej przedstawia przebieg impulsu akustycznego w ognisku, zarejestrowany przez hydrofon, poniżej widmo tego impulsu. Prawy rysunek przedstawia natężenie fali akustycznej w osi Z, czyli w kierunku propagacji fali akustycznej. Widoczne są trzy krzywe: górna – zmierzona oraz dwie wyliczone, uwzględniające tłumienie ośrodka (tkanki ludzkiej) odpowiednio 0.3 dB/cm/MHz i 0.6 dB/cm/MHz.



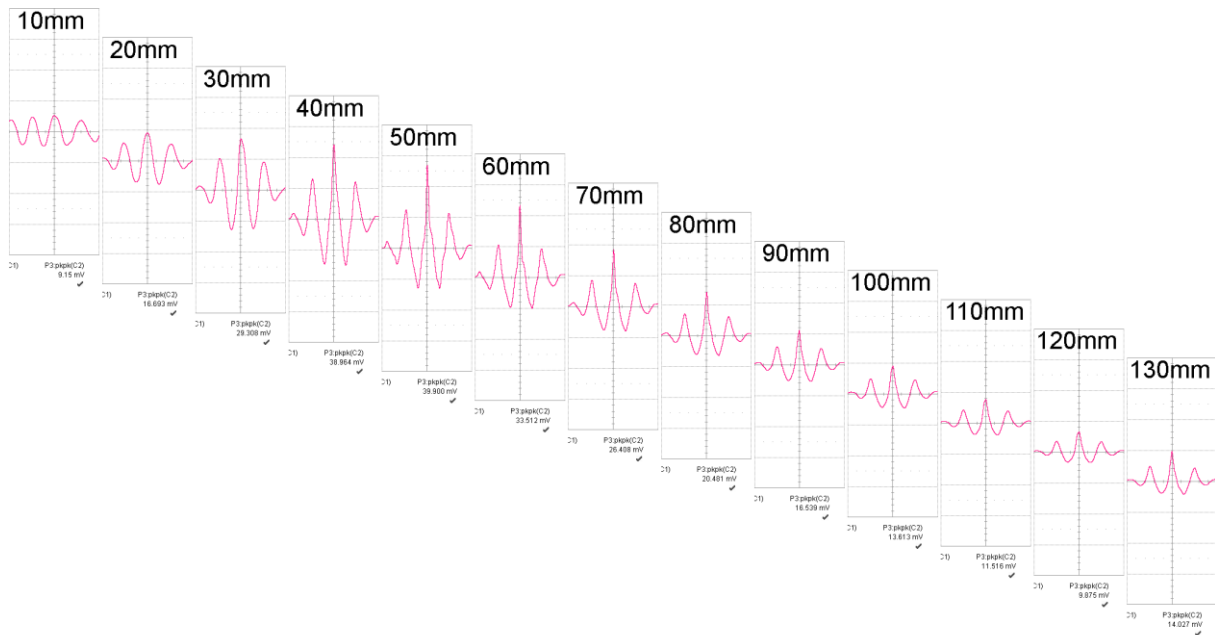
Rys.9. Graficzne wyniki pomiarów pola akustycznego zarejestrowane przez skaner AMS. Źródłem pola akustycznego była głowica jednoelementowa 2.5 MHz, o średnicy 15 mm i ogniskowej 25 mm. Rysunek z lewej przedstawia dwa rozkłady poprzeczne wiązki ultradźwiękowej zmierzone w ognisku, w osiach X i Y, prostopadłych do kierunku propagacji fali. Prawe dolne rysunki przedstawiają porzeczną rozkład ciśnienia akustycznego w skali liniowej oraz logarytmicznej.

#### 4. PRZYKŁADOWE WYNIKI POMIARÓW

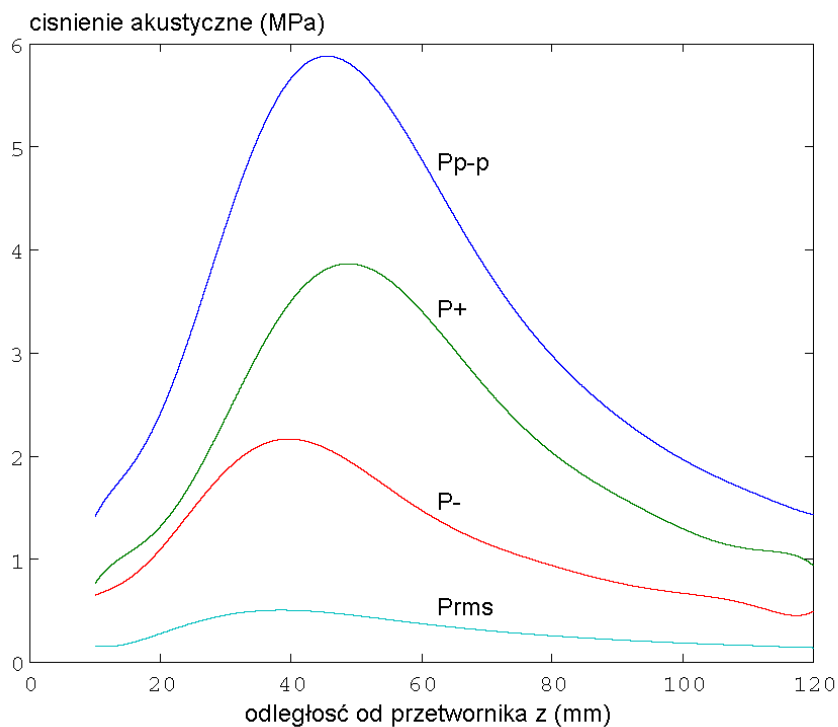
Woda jest ośrodkiem nieliniowym i fala akustyczna propagująca się w wodzie zostaje zniekształcona. Zniekształcenia są widoczne jako zwiększenie dodatniego ciśnienia oraz zmniejszenie (spłaszczenie) ciśnienia ujemnego. Wielkość zniekształceń zależy od maksymalnej amplitudy ciśnienia akustycznego oraz od odległości od przetwornika. Zjawisko to można zminimalizować zmniejszając amplitudę generowanego impulsu akustycznego, ale nie zawsze jest to możliwe, na przykład testowane urządzenie nie ma regulacji amplitudy lub stosunek sygnału do szumu jest niski. Przykładowe przebiegi ciśnienia akustycznego przedstawiono na rys.10. W zarejestrowanym przebiegu możemy wyznaczyć wartość skuteczną (RMS), amplitudę międzyszczytową (peak-to-peak), maksymalną amplitudę ujemną i maksymalną amplitudę dodatnią. Odpowiednio, najmniejszym błędem spowodowanym nieliniowością jest obarczona wartość skuteczna, największym maksymalna amplituda dodatnia. Należy dodać, że wartość natężenia akustycznego jest z reguły wyznaczana z wartości skutecznej ciśnienia. Obliczone wartości skuteczna i szczytowe mogą przyjmować maksimum w innych odległościach od przetwornika czyli wyznaczać inne położenie ogniska. Przykładowe wyniki pomiaru tych czterech wartości dla przetwornika ogniskującego przedstawiono na rys.11.

Wyniki pomiaru rozkładu poprzecznego pola akustycznego dla dwóch przetworników 25 MHz i 2 MHz przedstawiono na rys.12. Do pomiaru wykorzystano podstawę mikroskopu warsztatowego, a hydrofon przesuwano ręcznie za pomocą śruby mikrometrycznej.

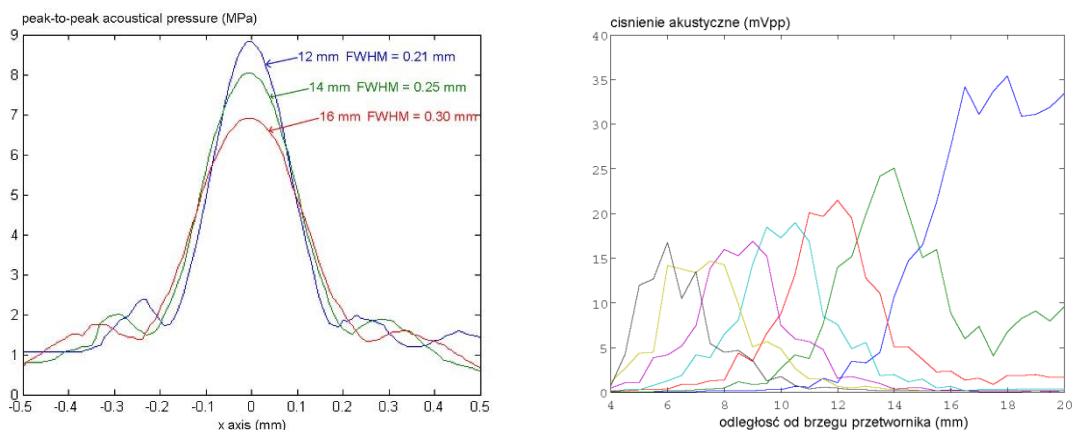
Układ Acoustic Measurement System (AMS) wykorzystano do automatycznego skanowania głowicy terapeutycznej pracującej na pierwszej i trzeciej harmonicznej. Dane z AMS skopiowano do programu Matlab. Wyniki pomiarów w postaci wykresów 3D przedstawiono na rys.13.



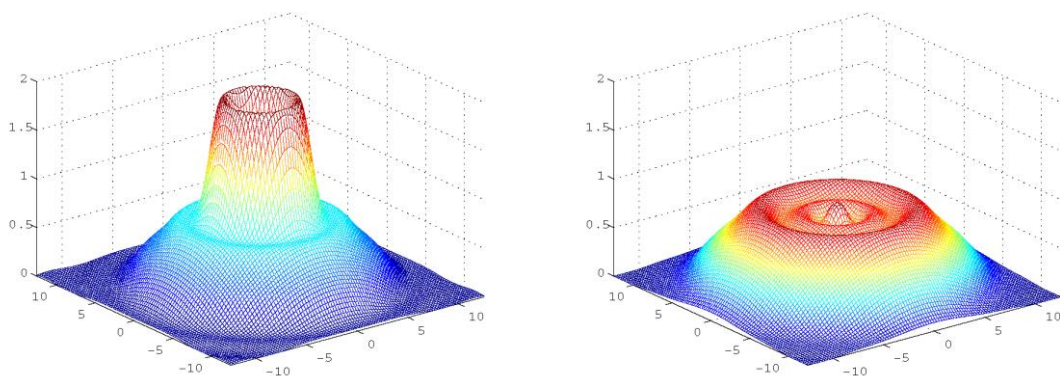
Rys.10. Przykładowe przebiegi ciśnienia akustycznego w różnych odległościach od przetwornika. Źródłem fali akustycznej był przetwornik ogniskujący 1 MHz o średnicy 20 mm i promieniu krzywizny 50 mm, generujący dwa okresy sinusoidy 1 MHz. Ciśnienia zarejestrowano hydrofonem Precision Acoustics 75  $\mu\text{m}$  z pomocą oscyloskopu LeCroy Waverunner 62xi.



Rys.11. Przykładowe wyniki pomiaru czterech wartości ciśnienia akustycznego dla przetwornika ogniskującego z rys.10. Obliczono wartości: międzyszczytową  $P_{p-p}$ , maksymalną dodatnią  $P_+$ , maksymalną ujemną  $P_-$  oraz skuteczną  $P_{RMS}$ . Wartość skuteczna została obliczona dla całego przebiegu 20  $\mu\text{s}$ . Wykorzystano funkcje pomiarowe oscyloskopu LeCroy Waverunner 62xi.



Rys.12. Wyniki pomiarów rozkładu poprzecznego wiązki ultradźwiękowej zmierzonych przy pomocy hydrofonu igłowego Precision Acoustics 40  $\mu\text{m}$  i ręcznego przesuwu z wykorzystaniem mikroskopu warsztatowego. Po lewej pomiar szerokości wiązki w ognisku siedmioelementowej głowicy pierścieniowej annular array, ogniskowanej dynamicznie na trzech głębokościach. Wykorzystano głowicę 25 MHz o średnicy 4 mm. Po prawej pomiar ciśnienia generowanego przez siedmioelementową głowicę pierścieniową 2 MHz w odległości 1 mm od powierzchni przetwornika. Każdy przebieg odpowiada innemu elementowi głowicy.



Rys.13. Rozkład natężenia akustycznego generowanego przez płaski przetwornik ultradźwiękowy o powierzchni 4  $\text{cm}^2$ . Przetwornik pracujący na częstotliwości podstawowej 1 MHz (z lewej) i na trzeciej harmonicznej 3.5 MHz (z prawej). Wykorzystano automatyczny układ pomiarowy AMS i program Matlab.

## 5. PIŚMIENNICTWO I ADRESY PRODUCENTÓW HYDROFONÓW

- [1] Ziskin MC, Lewin PA. Ultrasonic Exosimetry. Boca Raton: CRC Press, 1993.
- [2] Nowicki A. Ultrasonografia. Wydawnictwo Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa, 2016.
- [3] Onda Corporation, 1290 Hammerwood Avenue, Sunnyvale, CA 94089, USA, <http://www.ondacorp.com/>
- [4] Precision Acoustics Ltd, Hampton Farm Business Park, Higher Bockhampton, Dorchester, Dorset DT2 8QH, UK, <http://www.acoustics.co.uk/>
- [5] Sonora, Longmont, CO, USA, obecnie Acertara Acoustic Laboratories, 1900 South Sunset Street, Unit F Longmont, CO 80501, USA, <http://www.acertaralabs.com/>