

doi:10.15199/48.2024.11.23

Wykrywanie fazy gazowej w cieczach sygnałami ultradźwiękowymi sterowanymi mikrokontrolerem

Streszczenie. Fale ultradźwiękowe wykazują efektywną propagację w ośrodkach jednorodnych, takich jak ciecze, lecz ich zdolność do przenikania jest znacząco ograniczona w przypadku niejednorodności ośrodka. Fakt ten umożliwia na detekcję obecności fazy gazowej w różnych cieczach. W niektórych procesach technologicznych, pojawienie się fazy gazowej może być zjawiskiem niepożądanym i wymagającym szybkiego wykrycia. Niniejszy artykuł przedstawia koncepcję rozwiązania tego problemu, która jest zarówno ekonomiczna, jak i prosta w implementacji.

Abstract. Ultrasonic waves exhibit effective propagation in homogeneous media such as liquids; however, their penetration ability is significantly limited by the heterogeneity of the medium. This phenomenon enables the detection of the presence of a gaseous phase in various liquids. In certain technological processes, the emergence of a gaseous phase may be an undesirable occurrence, necessitating prompt detection. This paper presents a concept for addressing this issue, which is both cost-effective and straightforward in implementation. **Detection of Gas Phase in Liquids by Microcontroller-Controlled Ultrasonic Signals.**

Słowa kluczowe: ultradźwięki, pęcherzyki gazu, penetracja ultradźwiękowa, monitorowanie procesów, techniki detekcji.

Keywords: ultrasonics, gas bubbles, ultrasonic penetration, process monitoring, detection techniques.

Wstęp

Metody ultradźwiękowe są stosowane do analizy właściwości fizycznych gazów i cieczy, uwzględniając ich różne parametry akustyczne, takie jak impedancja i współczynnik absorpcji. Gazy charakteryzują się znacznie mniejszą impedancją akustyczną w porównaniu do cieczy; na przykład, impedancja akustyczna powietrza jest około 3400 razy mniejsza niż dla wody. Jednocześnie współczynnik absorpcji ultradźwięków w gazach, takich jak powietrze, jest około 1600 razy większy niż w wodzie. Te różnice mają istotne znaczenie przy projektowaniu systemów ultradźwiękowych do monitorowania i analizy procesów przemysłowych. [1,5.]

W roztworach i mieszaninach prędkość rozchodzenia się fal ultradźwiękowych oraz ich tłumienie zależy od stężenia składników oraz ich rozmiarów. W warunkach stałej temperatury i ciśnienia, przy niskim stężeniu składników, zależność prędkości fal od stężenia można opisać za pomocą wyrażenia liniowego. Przykładowo, zmiana prędkości fal ultradźwiękowych jest proporcjonalna do stężenia składników w roztworze [1,2,12], co można wyrazić jako

$$(1) \quad c(q) \approx c_0 + a_k q \left[\frac{m}{s} \right]$$

gdzie: c_0 - prędkość w temperaturze początkowej, a_k - bezwzględny współczynnik stężenia, q - stężenie %

Teoretyczne podstawy i empiryczne modele opisujące rozchodzenie się ultradźwięków w różnych ośrodkach są kluczowe do zrozumienia i optymalizacji technik detekcyjnych, które są wykorzystywane w różnorodnych procesach przemysłowych, w tym w kontroli jakości i monitorowaniu procesów. Sposób, w jaki ultradźwięki są tłumione i rozpraszane w roztworach i mieszaninach, pozwala na precyzyjne dostosowanie systemów ultradźwiękowych do specyficznych zastosowań, takich jak wykrywanie zanieczyszczeń czy monitorowanie składu chemicznego.

Rozpraszanie dźwięku jest zjawiskiem, które może zachodzić w następujących warunkach:

1. Gdy napotyka na przeszkody o rozmiarach zbliżonych do długości fali akustycznej lub mniejszych, takie jak regularnie

pofalowane powierzchnie lub periodycznie rozmieszczone przeszkody [3];

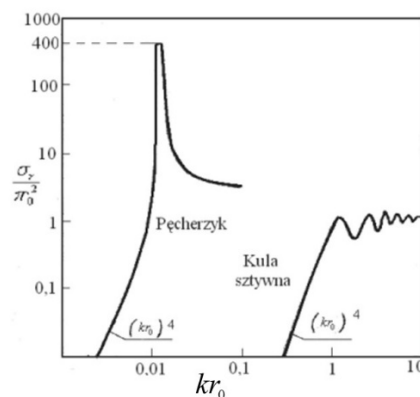
2. W przypadku chaotycznie rozmieszczonych w przestrzeni elementów rozpraszających, których właściwości akustyczne mogą ulegać zmianom w czasie.[5,14]

To zjawisko związane jest z interakcją fali dźwiękowej z materia, gdzie fala jest modyfikowana w wyniku zetknięcia z obiektami o różnorodnych właściwościach fizycznych i geometrycznych. Pęcherzyki gazowe różnią się znacznie własnościami akustycznymi od otaczającej je cieczy, dlatego też ich rezonans występuje, gdy ich wielkość (średnica) jest znacznie mniejsza od długości fali w wodzie. Przekrój czynny na rozpraszanie przez pęcherzyk gazu o promieniu r_0 w wodzie można wyrazić następującym wzorem [1,2,3]

$$(2) \quad \sigma_r = 4\pi \frac{p_r}{p_i} = \frac{4\pi r_0^2}{\left[\left(\frac{f_r}{f} \right)^2 - 1 \right]^2 + \delta}$$

gdzie: p_r i p_i - amplitudy ciśnienia akustycznego fali rozproszonej i fali padającej, f - częstotliwością fali, f_r - częstotliwością rezonansową pęcherzyka, δ - współczynnikiem tłumienia pęcherzyka w danym ośrodku.

Na wykresie poniżej jest wykreślony względny przekrój czynny w jednostkach $kr_0 = \frac{2\pi r_0}{\lambda}$



Rys.1. Rozpraszanie ultradźwięków na pęcherzyku gazowym [3]

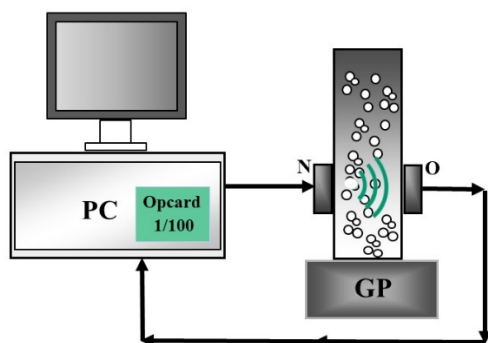
Efektywne wykrywanie emergentnych pęcherzyków gazowych metodą odbiciową, wymaga precyzyjnie dobranej częstotliwości ultradźwięków, tak aby długość fali rezonowała z wymiarami detektowanych mikropęcherzy. Szczególnie silne zjawisko rozproszenia zaobserwować można, gdy długość fali ultradźwiękowej jest zbliżona do średnicy pęcherzyków [2,8,10]. Przykładowo, dla fali o częstotliwości 4 MHz propagującej się w oleju, jej długość fali wynosić będzie około 0,37 mm. Zjawisko to jest manifestacją rezonansu akustycznego, zachodzącego wówczas, gdy długość fali ultradźwiękowej koreluje z rozmiarem obiektu rozpraszającego, wskutek czego energia fali zostaje amplifikowana przez oscylujący pęcherzyk, prowadząc do intensyfikacji procesu rozproszenia.[13,14]

W warunkach rezonansowych, rozproszenie jest maksymalizowane, a indukowane wibracje w pęcherzykach są z większą efektywnością rejestrowane przez systemy detekcyjne bazujące na ultradźwiękach. Wykorzystanie zjawiska rezonansu akustycznego ma również zasadnicze znaczenie w metodach transmisyjnych, umożliwiając wykrywanie oraz charakteryzację obszarów zawierających pęcherzyki gazowe w medium. Obszary te będą wyróżniać się zwiększonym tłumieniem ultradźwięków, co stanowi podstawę dla aplikacji takich jak kontrola jakości cieczy oraz analiza przepływów wielofazowych. W takich przypadkach kluczowe jest wykrycie oraz precyzyjne określenie obecności i dystrybucji fazy gazowej w cieczach.[9]

Diagnostyka z wykorzystaniem tej metody jest nieinwazyjną. Może być wykorzystana np. w kontroli stanu oleju w transformatorach energetycznych, gdzie pojawienie się pęcherzyków może oznaczać przeciążenie, wzrost temperatury lub degradację izolacji i szybka reakcja jest niezbędna.

Pomiary i koncepcja rozwiązania

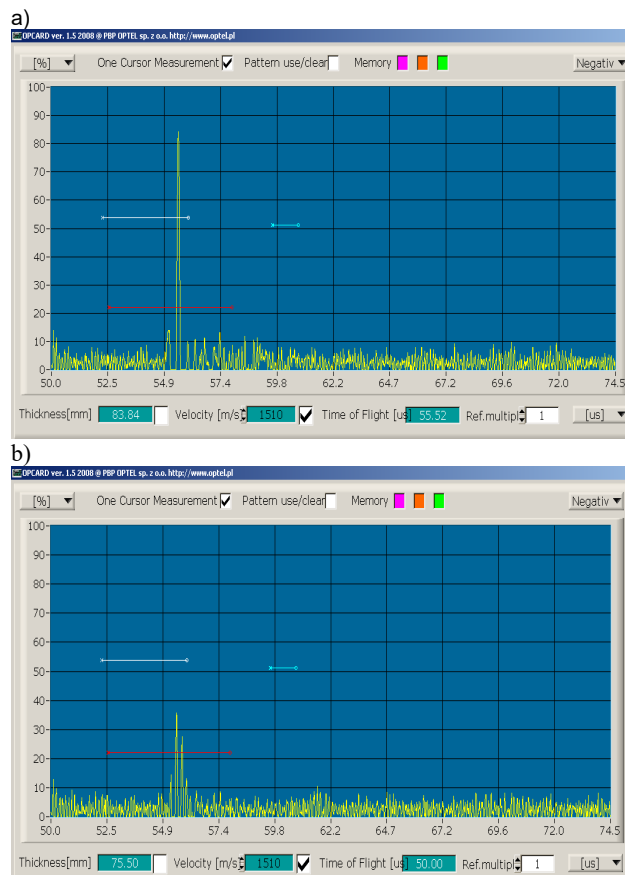
Dla sprawdzenia poprawności i efektywności wykrywania fazy gazowej w postaci pęcherzyków powietrza wstępne pomiary wykonano na stanowisku wyposażonym w komputerową kartę ultradźwiękową OPCARD-01/100 jak pokazano na rysunku 2. Na karcie zaimplementowany jest jednokanałowy układ nadawczo-odbiorczy z przełączanymi dwoma wejściami dzięki czemu karta może pracować zarówno z jedną głowicą ultradźwiękową w trybie nadawanie - odbiór, jak również z dwoma - jedna nadaje druga odbiera. To właśnie ten drugi wariant wybrano do pomiarów ponieważ nie jest tu konieczne doprowadzenie do rezonansu.[11,14]



Rys.2. Schemat stanowiska do badania poziomu ultradźwięków: PC-komputer, N nadajnik, O-odbiornik, GP- generator pęcherzyków powietrza

Efekty wywołane obecnością fazy gazowej są widoczne nawet przy jego braku. Sprawdzono w ten sposób możliwość wykrycia pęcherzyków gazowych. Ich pojawienie

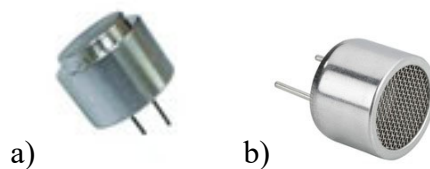
się, w tym przypadku w oleju, skutkowało znaczącym obniżeniem odbieranego sygnału co zobrazowane jest na rysunku 3. W miarę wzrostu koncentracji pęcherzyków powietrza następowały zmiany w detekcji sygnału.



Rys.3. Poziom odebranego impulsu ultradźwiękowego przechodzącego przez olej: a) bez fazy gazowej; b) z zawartością pęcherzyków gazy różnej wielkości

Na rysunku 3.a. widać wyraźną silną „szpilkę” – sygnał bez przeszkód dotarł do odbiornika, natomiast rysunek 3.b. przedstawia sygnał silnie słumiony i zniekształcony poprzez odbicia i rozproszenie na pęcherzykach gazu. Przy większym ich zagęszczeniu w oleju sygnał odbierany zupełnie zanikał [16].

Tak wyraźny efekt skłania do wykorzystania ultradźwięków w szybkim wykrywaniu fazy gazowej, przy czym z równym powodzeniem może być wykorzystana fala ciągła zamiast impulsów. Spadek odbieranego sygnału poniżej założonego poziomu bezpieczeństwa oznaczać będzie wystąpienie w medium fazy gazowej.

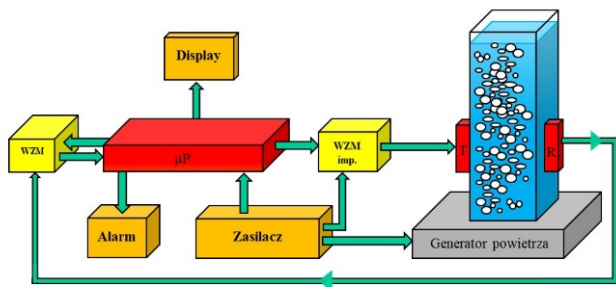


Rys.4. Przykładowe przetworniki ultradźwiękowe 40 kHz. a) do pracy w środowisku ciekłym. b) do pracy w powietrzu

przez medium. [5,6,7] Ponieważ powyższe rozwiązanie nie jest tanie ani wygodne w praktyce oraz chcąc uniezależnić się od komputera i karty defektoskopowej, można z powodzeniem zbudować układ autonomiczny w

oparciu o mikrokontrolery powszechnie dostępne np. w aplikacjach Arduino lub podobnych co znacząco obniża koszty. Koncepcja urządzenia opiera się w tym wypadku na ciągłej lub okresowej (kwestia programu) emisji sygnału ultradźwiękowego o stałej amplitudzie i częstotliwości np. 40kHz w kierunku odbiornika w taki sposób aby przenikał

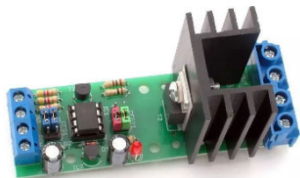
Amplituda napięcia na wyjściu odbiornika ultradźwiękowego zależy od ilości pęcherzyków gazu lub zanieczyszczeń w medium, które osłabiają docierającą do niego falę ultradźwiękową [15]. Poziom odbieranego sygnału można dostosować do potrzeb dzięki regulowanemu wzmacniaczowi impulsów. Całością sterować może mikrokontroler np. ATmega328P, Tensilica Xtensa LX106 32-bit lub podobne z uwagi na popularność i niską cenę. Mikrokontroler z odpowiednim programem jest odpowiedzialny zarówno za sterowanie modułem nadawczym jak i odbiorczym oraz układem decyzyjno-wykonawczym. Aby użyć przetworników np. z Arduino, należy odpowiednio zaprojektować obwód elektroniczny, który może bezpiecznie wzbudzać przetwornik z wykorzystaniem napięcia zgodnego ze specyfikacją i odczytywać sygnał analogowy generowany przez przetwornik. W związku z tym, konieczne jest zaprojektowanie własnego układu, który może wyglądać jak na rysunku 5 poniżej.



Rys.5. Model układu ultradźwiękowego do generacji i detekcji pęcherzyków gazowych w cieczach metodą transmisji

Problemem jaki może się pojawić to odpowiedni poziom pobudzenia nadajnika ponieważ standardowy układ mikrokontrolera np. w Arduino samodzielnie nie jest w stanie zapewnić wyższego napięcia impulsów niż 5V [4], bez dodatkowych komponentów takich jak:

- o Wzmacniacz impulsów: dla generowania sygnału o odpowiedniej amplitudzie, zgodnie z wymaganiami przetwornika ultradźwiękowego lub generatora impulsów: Arduino mógłby sterować zewnętrznym generatorem do wytwarzania sygnałów o odpowiedniej częstotliwości, które następnie byłyby wzmacniane układem z rysunku 6.



Rys.6. Prosty wzmacniacz impulsów z tranzystorem MOSFET- maksymalna częstotliwość impulsów- 500kHz.

- o Układ ochronny: pomiędzy układ mikrokontrolera a wzmacniaczem napięcia może być konieczne zastosowanie układów ochronnych, aby zapewnić, że wyższe napięcie nie uszkodzi mikrokontrolera.

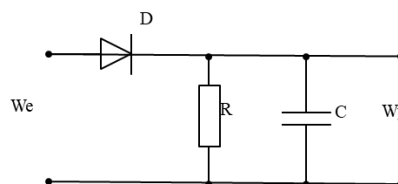
Ponadto, odczyt sygnału analogowego odbieranego przez przetwornik również wymaga uwagi:

- o Jeżeli sygnał analogowy jest na odpowiednim poziomie napięcia dla wejścia analogowego mikrokontrolera (0-5V), można go bezpośrednio odczytać za pomocą jednego z wejść analogowych.
- o Jeżeli sygnał przekracza te wartości, potrzeba układu dopasowującego poziom napięcia. aby uniknąć uszkodzenia mikrokontrolera.
- o Jeżeli sygnał odbierany jest zbyt słaby należy użyć przedwzmacniacza z regulowanym wzmocnieniem np. gotowy moduł MAX4466 który bez problemu pracuje w zakresie ultradźwiękowym.



Rys.7. Moduł MAX4466 z regulacją wzmocnienia [5]

Układ przedstawiony na rysunku 8, jest klasycznym przykładem detektora obwiedniowego, który jest używany do wyodrębniania informacji modulującej z sygnału AM. Jest to najprostszy i jeden z najstarszych metod demodulacji sygnału AM a w naszym przypadku pomoże wygładzić sygnał odbiornika



Rys.8. Detektor obwiedni sygnału odbiornika

Diody w tym układzie służy jako detektor, czyli demodulator. Ma za zadanie przepuszczać tylko jedną połowę sygnału, w rezultacie czego z sygnału zmiennego otrzymujemy sygnał, który ma już tylko dodatnie wartości napięcia. Rezystor w połączeniu z kondensatorem tworzy układ RC, który filtruje sygnał, usuwając z niego wysoką częstotliwość, pozostawiając sygnał wolnozmienny. Kondensator pracuje jako filtr dolnoprzepustowy w układzie z rezystorem. Jego zadaniem jest gromadzenie ładunku podczas przepływu prądu i jego oddawanie, co wygładza sygnał i pomaga go ustabilizować. Z wyjścia tego układu, otrzymujemy sygnał napięciowy wolno zmieniający się w czasie w zależności od poziomu odbieranych ultradźwięków, który można przekazać na wejście analogowe mikroprocesora.

WNIOSKI

Tam gdzie niemożliwe jest wykonanie pomiarów czy obserwacji bez zakłócenia procesu fizycznego czy chemicznego lub zniszczenia struktury materiału, często ultradźwięki okazują się jedynym możliwym lub najprostszym narzędziem pomiarowym w danych warunkach.

Niewątpliwą zaletą przedstawionego rozwiązania jest jego modułowość i skalowalność. Dość prosta budowa i autonomiczność a zarazem możliwość dokładania kolejnych modułów funkcjonalnych, np. komunikacyjnych po niewielkich zmianach w programie wydają się jego najmocniejszymi atutami.

Zaletą są również niskie koszty realizacji a dzięki możliwościom programowym jak i regulacji wzmocnienia impulsów istnieje możliwość indywidualnego

wykalibrowania układu dla różnych obiektów gdzie kontrola poziomu fazy gazowej jest pożądana.

Dzięki zastosowaniu mikroprocesora z platformy np. Arduino i opcjom jakie to stwarza jest możliwa zdalna współpraca układu poprzez różne interfejsy takie jak Ethernet, GSM, Wi-fi i inne. Również mnogość dostępnych magistrali komunikacyjnych SPI (Serial Peripheral Interface, I2C (Inter-Integrated Circuit), UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) czy USB (Universal Serial Bus).

Dzięki temu realizacja monitoringu on-line nie stanowi dużego problemu. Zaproponowany układ, tak jak wspomniano mógłby zostać użyty np. dla kontroli wystąpienia pęcherzyków gazowych w transformatorach olejowych gdzie zjawisko to jest bardzo groźne.

Autor: dr Piotr Rakus, Politechnika Częstochowska, Katedra Automatyki, Elektrotechniki i Optoelektroniki, Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: piotr.rakus@pcz.pl ;

LITERATURA

- [1] Śliwiński A.: Ultradźwięki i ich zastosowania. WNT. Warszawa 2001r.
- [2] Rojek M.: Metodologia badań diagnostycznych warstwowych materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej. Open Aces Library vol. 2/2011
- [3] Borowik L., Rakus P.: „Problemy generacji, transmisji i odbioru fal ultradźwiękowych w ośrodkach gazowych.” Prace Komisji Naukowych PAN Oddz. w Katowicach. z.nr 34-35. 2011r.
- [4] Janu P., Śramek R. Intelligent distance measuring module using ultrasonic piezoelectric ceramic transducers. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 96 NR 11/2020
- [5] Synowiec P., Andruszkiewicz A., Wędrychowicz W., Regucki P. Badania możliwości pomiaru strumienia objętości czynnika dwufazowego przepływomierzem ultradźwiękowym. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 91 NR 10/2015
- [6] <https://www.sparkfun.com/categories/23>
- [7] <https://www.arduino.cc/reference/en/libraries>.
- [8] Ultrasound, 2020, available from: <https://courses.washington.edu/bioen508/Lecture6-US.pdf>
- [9] Coutinho FR., Ofuchi CY., Ramos de Arruda, Lucia V, Neves.F , Morales REM.: A New Method for Ultrasound Detection of Interfacial Position in Gas-Liquid Two-Phase Flow. SENSORS. Volume14, Issue5, Page9093-9116 May 2014.
- [10] Murai Y., Tasaka Y., Nambu Y., Takeda Y., Gonzalez R. : Ultrasonic detection of moving interfaces in gas-liquid two-phase flow. Flow Measurement and Instrumentation. Volume 21, Issue 3, September 2010, Pages 356-366.
- [11] Dong F., Cai X., Murai Y., Tan C.: Time-resolved flowmetering of gas-liquid two-phase pipe flow by ultrasound pulse Doppler method. 7th International Symposium On Measurement Techniques For Multiphase Flows. Volume1428. 2012 r. DOI10.1063/1.3694720.
- [12] Dong, XX., Tan C., Yuan Y.; Dong F.: Oil-water two-phase flow velocity measurement with continuous wave ultrasound Doppler. Chemical Engineering Science. Volume 135, 2 October 2015, Pages 155-165.
- [13] Feng D., Huan G., Weiling L., Chao T.: Horizontal oil-water two-phase dispersed flow velocity profile study by ultrasonic doppler method. Experimental Thermal and Fluid Science. Volume 102, April 2019, Pages 357-367
- [14] Xu C., Tan C., Dong, F.: Transmission-Mode Ultrasonic Measurement for Gas Bubble Detection. 2014 INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHATRONICS AND CONTROL (ICMC).Page1379-1382.
- [15] Wen Wen*, Guang Hua Zong, Yang Yu, Liang Sun: The influence of bubbles on the performance of ultrasonic flow meter. Applied Mechanics and Materials 2014 (Volume 678). Pages: 285-289.
- [16] Sommerlatt HD., Kaiser E.: An ultrasonic test set-up for measuring fluid-flows with bubbles or particles. Technisches Messen. Volume71. Issue12. 2014. Page651-659.