

Sposób wyznaczania mocy akustycznej w reaktorach ultradźwiękowych

Przedmiotem wynalazku jest sposób wyznaczania mocy akustycznej w reaktorach ultradźwiękowych, mający zastosowanie w kontroli procesów sonochemicznych.

Sposoby wyznaczania mocy akustycznej w gazach takich jak powietrze opierają się na detekcji hałasu z wykorzystaniem mikrofonu. Badania te bazują na pomiarze poziomu mocy akustycznej (normy PN-EN ISO 3744, PN-EN ISO 3746), poziomu ciśnienia akustycznego emisji (normy PN EN 11201, PN EN ISO 11202) oraz poziomu ciśnienia akustycznego w polu dyfuzyjnym i w polu swobodnym nad powierzchnią odbijającą (PN-EN ISO 9295: 2015).

Badania wyznaczania mocy akustycznej wykonuje się również dla urządzeń generujących fale w środowisku ciekłym, np. w wodzie. Takimi urządzeniami są m.in. reaktory ultradźwiękowe. Jak do tej pory opracowanych zostało wiele metod wyznaczania mocy akustycznej w cieczach. Jedną z nich to metoda kalorymetryczna, która polega na pomiarze wzrostu temperatury cieczy poddanej działaniu sygnału akustycznego w czasie (R.F. Contaminem, *Ultrason. Sonochem.* 2 (1995) S43). Poza tym znane są metody wykorzystujące elementy magnetostrykcyjne, a także termoelektryczne, dla których stosuje się pomiar wzrostu temperatury elementu spowodowany pochłanianym sygnałem akustycznym (M. Romdhane et al., *Ultrasonics* 33 (1995) 139). Podobny sposób detekcji, związany ze zmianą temperatury cieczy i w konsekwencji zmiany temperatury zastosowanego czujnika, wykorzystywany jest w przypadku elementów piroelektrycznych (Z. Bajram, *United States Patent No. US 2005/0016282 A1*, 2005). Wyznaczenie mocy akustycznej w cieczy zrealizowane może również zostać za pomocą pomiarów optycznych, wśród których wyróżnia się metody interferencyjne i półcieniowe – oparte na pomiarze współczynnika załamania światła (M.A. Margulis and I.M. Margulis, *Ultrason. Sonochem.* 10 (2003) 343). Zupełnie inne podejście do omawianego zagadnienia stanowi technika polegająca na pomiarze charakterystyki impedancyjnej elementu generującego falę ultradźwiękową (A. Petosić et al., *Coll. Antropol.* 35 (2011) Suppl. 1: 107). Metoda ta pozwala na zbadanie zmiennoprądowych własności elektrycznych elementu generującego falę. W konsekwencji

sposób wyznaczenia mocy wygenerowanego sygnału akustycznego jest pośredni i ograniczony. Kolejną metodą określania mocy akustycznej jest zastosowanie hydrofonu, czyli mikrofonu służącego do odbierania dźwięków rozchodzących się w wodzie lub innych cieczach, stanowiącego podstawowy element konstrukcyjny sonarów pasywnych (I. Tzanakis et al., Sens. Actuator A Phys. 240 (2016) 57). W 1988 r. opracowana została konstrukcja przetwornika do wyznaczania mocy akustycznej zogniskowanego pola ultradźwiękowego (B. Granz et al., United States Patent No. 4764905, 1988). Zasadniczym elementem tego urządzenia była membrana wykonana z cienkiej warstwy materiału piezoelektrycznego – polifluorku winylidenu (PVDF). Membrana miała kształt sfery, której środek krzywizny musiał pokrywać się z punktem, w którym znajdowało źródło fali ultradźwiękowej. Wyznaczenie mocy akustycznej było możliwe dzięki pomiarowi ładunków elektrycznych wygenerowanych na powierzchniach materiału piezoelektrycznego pod wpływem drgań wzbudzonych falą ultradźwiękową. Zasadniczą wadą zaproponowanego urządzenia była konieczność zastosowania skomplikowanej i czasochłonnej procedury pozycjonowania urządzenia tak, aby środek krzywizny membrany pokrył się z punktem, w którym znajdowało źródło fali ultradźwiękowej. W 2020 r. zaproponowany został inny sposób pomiaru mocy akustycznej ultradźwięków w cieczy przy wykorzystaniu przetwornika piezoelektrycznego, przy czym sposób detekcji opierał się na pomiarze charakterystyk impedancji elektrycznej przetwornika (G. Csányi et al., Acoustics 2 (2020) 37). Zasadniczą wadą zaproponowanego rozwiązania była konieczność zastosowania innych certyfikowanych hydrofonów w celu przeprowadzenia procesu kalibracji opracowanego przetwornika.

Sposób wyznaczania mocy akustycznej w reaktorach ultradźwiękowych polega na tym, że rejestruje się charakterystykę napięcia generowanego przez warstwę materiału piezoelektrycznego od czasu, za pomocą wzbudzenia falą ultradźwiękową emitowaną przez reaktor, reguluje się moc akustyczną (P_a) w zakresie od 150 W do 750 W, przy czym nominalna częstotliwość pracy reaktora wynosi od 19,5 kHz do 100 MHz, korzystnie 40 kHz, rozchodzącą się w cieczy, korzystnie w wodzie, o temperaturze od 278 K do 363 K, korzystnie 323 K, uzyskane w ten sposób wyniki aproksymuje się zależnością teoretyczną będącą sumą przebiegów sinusoidalnych, korzystnie dwóch ($n=2$):

$$U(t) = \sum_{i=1}^n U_i \sin[2\pi f_i(t - t_{0i})]$$

po czym dla kombinacji wartości współczynników aproksymującej zależności określa

się moc akustyczną w reaktorze ultradźwiękowym na podstawie interpolacji liniowej zależności kalibracyjnej,

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} U_i^2 = A \cdot P_a$$

którą wyznacza się dla danej warstwy piezoelektrycznej poprzez rejestrację dla różnych mocy akustycznych w cieczy.

Zaletą rozwiązania według wynalazku jest dowolność w ustawieniu elementu piezoelektrycznego w reaktorze ultradźwiękowym. Eliminuje to konieczność stosowania trudnej i czasochłonnej procedury pozycjonowania elementu piezoelektrycznego, jak to ma miejsce w przypadku hydrofonów używanych do wyznaczania mocy akustycznej zogniskowanego pola ultradźwiękowego (B. Granz et al., United States Patent No. 4764905, 1988). Ponadto dzięki rozwiązaniu według wynalazku możliwe jest zastosowanie tylko jednego przetwornika zamiast dwóch (G. Csányi et al., Acoustics 2 (2020) 37), co czyni zaproponowaną metodę prostszą i bardziej wydajną ekonomicznie.

Przedmiot wynalazku jest bliżej objaśniony w poniższym przykładzie.

Jako element piezoelektryczny wykorzystano próbkę jodoselenku antymonu (SbSeI). Próbkę tą wytworzono poprzez sprasowanie kserożeluzu nanodrutów SbSeI o masie 1,925 g pod ciśnieniem 160 MPa. Do tego celu wykorzystano maszynę Instron model 4469 oraz metalową formę o kształcie cylindra o średnicy 20 mm. Na przeciwległe ściany próbki o największej powierzchni, tj. 3,14 cm², naniesiono elektrody złote metodą rozpylania jonowego za pomocą napyłarki Q150R ES (Quorum Technologies Ltd.). Elektrody te połączone z przewodami elektrycznymi, stosując pastę srebrną (SPI Supplies). Następnie tak przygotowaną próbkę zatopiono w gumie silikonowej Elastosil N10 (Wacker Chemie AG) w celu zabezpieczenia jej przed wpływem cieczy znajdującej się w reaktorze ultradźwiękowym. Przez kolejne 48 godzin trwał proces wulkanizacji gumy silikonowej, a po jego zakończeniu otrzymano element piezoelektryczny gotowy do przeprowadzenia właściwych pomiarów.

W pierwszym etapie przeprowadzono procedurę kalibracji. Element piezoelektryczny umieszczono w naczyniu zawierającym wodę dejonizowaną o stałej temperaturze 323 K, połączonym obiegiem wodnym z termostatem HAAKE DC30 (Thermo Scientific). Temperatura wody dejonizowanej została dobrana tak, że jej wartość odpowiadała standardowej temperaturze stosowanej w procesach sonochemicznego wytwarzania nanomateriałów chłorkohalogenkowych. Naczynie umieszczono w reaktorze

ultradźwiękowym VCX-750 (Sonics & Materials, Inc.). Sonotroda tego reaktora została zanurzona w wodzie znajdującej się w naczyniu. Koniec sonotrody ustawiono w odległości 1 cm od elementu piezoelektrycznego. Element ten podłączono do oscyloskopu DSOX3104T (Keysight) w celu pomiaru napięcia wygenerowanego na jego elektrodach. Wodę znajdującą się w naczyniu poddano działaniu ultradźwięków emitowanych przez sonotrodę reaktora VCX-750, regulując moc akustyczną (P_a) w zakresie od 150 W do 750 W i jednocześnie rejestrując odpowiedź elektryczną elementu piezoelektrycznego. Uzyskane w ten sposób charakterystyki czasowe napięcia $U(t)$ aproksymowano zależnością teoretyczną będącą sumą dwóch przebiegów sinusoidalnych, którą opisuje poniższe równanie

$$U(t) = U_1 \sin[2\pi f_1(t - t_{01})] + U_2 \sin[2\pi f_2(t - t_{02})], \quad (1)$$

gdzie U_1 , U_2 oznaczają wartości amplitud napięć, f_1 , f_2 są częstotliwościami przebiegów sinusoidalnych, t oznacza zmienną niezależną (czas), t_{01} , t_{02} to stałe czasowe determinujące przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałami. Częstotliwości dopasowanych przebiegów sinusoidalnych wyniosły $f_1=19.87(31)$ kHz i $f_2=59.6(14)$ kHz. Pierwsza z wymienionych wartości była równa częstotliwości pracy reaktora VCX-750 zadeklarowanej przez producenta sprzętu – firmę Sonics & Materials, Inc. Z kolei druga częstotliwość (f_2) stanowiła trzykrotność pierwszej (f_1), co potwierdziło, że odpowiada ona tzw. trzeciej harmonicznej. Następnie kombinację współczynników aproksymującej zależności czasowej opisano zależnością liniową w skali zadanych mocy akustycznych, uzyskując ostatecznie krzywą kalibracyjną opisaną równaniem

$$\frac{1}{2}(U_1^2 + U_2^2) = A \cdot P_a, \quad (2)$$

gdzie wyrażenie $(U_1^2+U_2^2)/2$ stanowi kombinację współczynników aproksymującej zależności czasowej, A jest współczynnikiem kalibracyjnym opisujący jednocześnie czułość przedstawionej metody, P_a oznacza moc akustyczną.

W drugim etapie eksperymentu wyznaczono nieznaną moc akustyczną fali ultradźwiękowej w reaktorze Sonic-6 (Polsonic). Reaktor ten wypełniono wodą dejonizowaną o temperaturze takiej samej wartości jak podczas procedury kalibracji, tj. 323 K. W reaktorze umieszczono element piezoelektryczny i podłączono go do oscyloskopu DSOX3104T (Keysight). Następnie uruchomiono reaktor Sonic-6 i zarejestrowano czasową charakterystykę napięcia $U(t)$ generowanego przez element piezoelektryczny pod wpływem wzbudzenia falą ultradźwiękową. Otrzymane w ten sposób wyniki aproksymowano zależnością teoretyczną będącą sumą dwóch przebiegów sinusoidalnych, opisaną za pomocą

podanego powyżej równania (1). Częstotliwości dopasowanych przebiegów sinusoidalnych wyniosły $f_1=40.848(3)$ kHz i $f_2=122.25(5)$ kHz. Pierwsza z wymienionych wartości była równa częstotliwości pracy reaktora Sonic-6 zadeklarowanej przez producenta sprzętu, tj. firmę Polsonic. Z kolei druga częstotliwość (f_2) stanowiła trzykrotność pierwszej (f_1), co stanowiło dowód, że stanowi on tzw. trzecią harmoniczną. Obliczono wartość kombinacji parametrów dopasowania, która wyniosła $(U_1^2+U_2^2)/2 = 4,06 \cdot 10^{-4}$ V². Dokonano interpolacji liniowej zależności kalibracyjnej, opisanej podanym powyżej równaniem (2), wyznaczając nieznaną moc akustyczną fal ultradźwiękowych w reaktorze Sonic-6. Otrzymano wartość $P_a=255(8)$ W. Wyznaczono również efektywność konwersji energii elektrycznej w akustyczną dla badanego reaktora, biorąc pod uwagę wartość pobieranej przez niego mocy elektrycznej (480 W). Efektywność konwersji energii wyniosła 53(2) %.

Krzysztof J. Szwed
mgr inż. Krzysztof Szwed