

Wzorcowanie akustycznej aparatury pomiarowej w zakresie częstotliwości infradźwiękowych

Danuta Dobrowolska, Tadeusz Wąsala, Tomasz Zmierczak

Główny Urząd Miar – Zakład Mechaniki i Akustyki

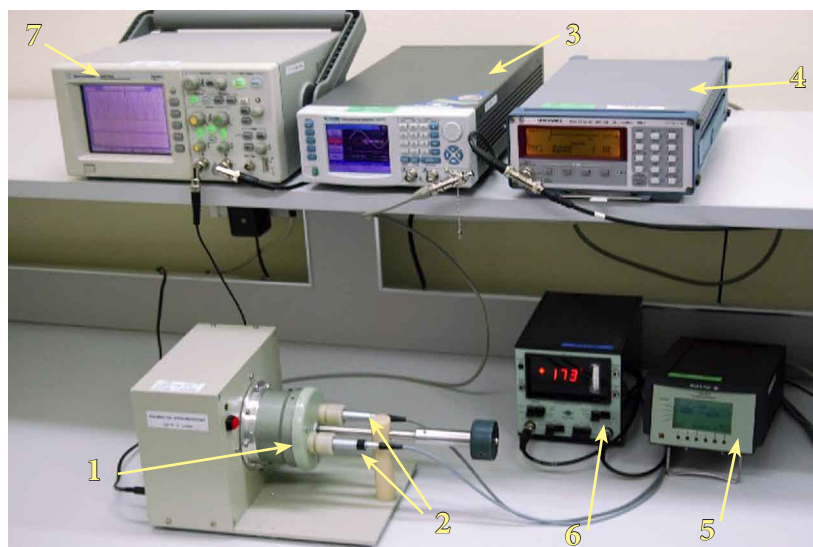
W pracy przedstawiono metodę wzorcowania akustycznej aparatury pomiarowej w zakresie częstotliwości infradźwiękowych z wykorzystaniem stanowiska pomiarowego z niskoczęstotliwościową komorą ciśnieniową. Stanowisko opracowano w Głównym Urzędzie Miar w 2006 r. w odpowiedzi na rosnące zapotrzebowanie na badanie i ocenę mierników poziomu dźwięku wyposażonych w korekcyjną charakterystykę G. Opisano sposób wyznaczania odpowiedzi częstotliwościowej miernika poziomu dźwięku ustawionego do pomiaru poziomu ciśnienia akustycznego skorygowanego według charakterystyki częstotliwościowej G oraz metodę wzorcowania zestawów mikrofonowych (zespołów składających się z mikrofonu pomiarowego i przedwzmacniacza mikrofonowego) metodą porównania jednoczesnego w zakresie małych częstotliwości. Zamieszczono również informacje na temat walidacji metod oraz rozszerzonej niepewności pomiaru.

Low-frequency pressure chamber system for determination of low-frequency response of acoustic measuring equipment

The method of the calibration of acoustic measuring equipment in the infrasound frequency range using measurement setup with low-frequency pressure chamber is presented. The setup has been developed in Central Office of Measures in 2006 as the response to growing demand for testing and evaluation of sound level meters equipped with G frequency weighting. The method of determination of frequency response of sound level meter when set to measure G-weighted sound pressure level and the method of calibration of microphone-preamplifier units in low-frequency range by simultaneous comparison are described. The information on validation of the measurement methods and the estimated expanded uncertainty of measurements is also presented.

1. Wstęp

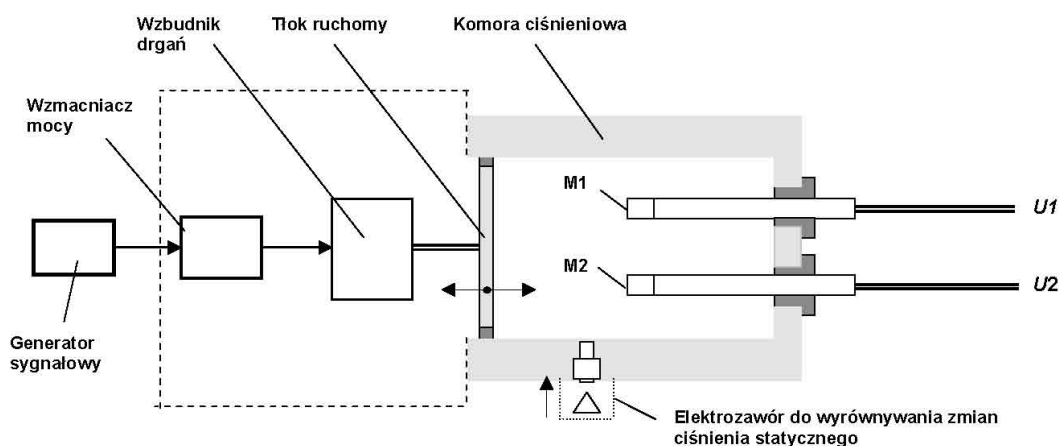
Rosnące zapotrzebowanie na badanie i ocenę mierników poziomu dźwięku wyposażonych w częstotliwościową charakterystykę korekcyjną G zgodną z wymaganiami normy PN-ISO 7196:2002 *Akustyka – Charakterystyka częstotliwościowa filtru do pomiarów infradźwięków*, zgłaszane przez użytkowników tych mierników, spowodowało w GUM podjęcie prac związanych z problematyką wzorcowania akustycznych przyrządów pomiarowych w zakresie częstotliwości infradźwiękowych. W Polsce instytucje zajmujące się ochroną środowiska naturalnego i środowiska pracy są zobowiązane do pomiaru i oceny hałasu infradźwiękowego, a zakłady naukowo-badawcze i laboratoria badań środowiskowych podejmują prace dotyczące hałasu niskoczęstotliwościowego. Jest to przyczyną obserwowanego w ostatnich latach wzrostu zainteresowania wzorcowaniem aparatury pomiarowej w tym zakresie częstotliwości. W 2006 r. opracowano w GUM metodę i zbudowano stanowisko do wzorcowania mierników poziomu dźwięku w zakresie częstotliwości poniżej 20 Hz (rys. 1). Stanowisko jest również wykorzystywane do wzorcowania zestawów mikrofonowych (zespołów składających się z mikrofonu pomiarowego i przedwzmacniacza mikrofonowego) metodą porównania jednoczesnego.



Rys. 1. Stanowisko pomiarowe do wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych zestawów mikrofonowych i mierników poziomu dźwięku w zakresie częstotliwości poniżej 20 Hz:
 1 – niskoczęstotliwościowa akustyczna komora ciśnieniowa, 2 – zestawy mikrofonowe: zestaw odniesienia i zestaw wzorcowany, 3 – generator sygnałowy, 4 – woltmierz niskoczęstotliwościowy, 5 – zasilacz mikrofonowy, 6 – miernik fazy, 7 – analizator widma.

2. Opis stanowiska pomiarowego

Głównym elementem stanowiska pomiarowego jest niskoczęstotliwościowa komora ciśnieniowa, w której sygnał ciśnienia akustycznego jest wytwarzany przez tłok pobudzany do drgań za pomocą wzbudnika elektrodynamicznego (rys. 2). Pole akustyczne wewnątrz komory działa z jednakową amplitudą na umieszczone w niej mikrofony zestawu wzorcowanego i zestawu odniesienia. Jednorodność pola akustycznego w komorze w zakresie małych częstotliwości jest bardzo dobra, co potwierdziły pomiary przesunięcia fazy pomiędzy sygnałami wyjściowymi U_1 i U_2 zestawów mikrofonowych (rys. 2).



Rys. 2. Główne elementy układu niskoczęstotliwościowej komory ciśnieniowej.

Podczas wzorcowania jako przyrząd odniesienia stosowany jest zestaw mikrofonowy Brüel & Kjær typ 4193-L-004. Jego charakterystyka częstotliwościowa jest wyznaczana w Danish Primary Laboratory of Acoustics (DPLA) w zakresie częstotliwości od 0,5 Hz do 250 Hz, zgodnie z metodą opisaną w [2]. Stanowisko pomiarowe jest wyposażone w dwa takie zestawy.

Poniżej przedstawiono podstawowe dane techniczne układu niskoczęstotliwościowej komory ciśnieniowej:

- ◆ Poziom ciśnienia akustycznego przy częstotliwości 10 Hz: do 120 dB
- ◆ Zniekształcenia nieliniowe: < 2 %
- ◆ Zakres częstotliwości: od 0,2 Hz do 250 Hz
- ◆ Czas trwania stanu nieustalonego po zamknięciu komory: 20 s
- ◆ Objętość komory ciśnieniowej: 460 cm³
- ◆ Wbudowany elektrozawór do wyrównywania ciśnienia statycznego wewnątrz komory z ciśnieniem statycznym w otoczeniu
- ◆ Wbudowany wzmacniacz sygnałowy mocy do zasilania wzbudnika elektrodynamicznego.

3. Wyznaczanie charakterystyk częstotliwościowych zestawów mikrofonowych

Charakterystykę częstotliwościową zestawu mikrofonowego, znormalizowaną względem wartości przy częstotliwości 250 Hz, wyznacza się metodą porównania jednoczesnego [4] na podstawie wyników pomiaru napięć wyjściowych zestawu wzorcowanego i zestawu odniesienia oraz wyników wzorcowania zestawu odniesienia, zgodnie ze wzorem (1)

$$L_{M2,rel}(f) = L_{M1,rel}(f) + 20 \log \frac{U_{M2}(f)}{U_{M1}(f)} - 20 \log \frac{U_{M2}(f_{ref})}{U_{M1}(f_{ref})}, \quad (1)$$

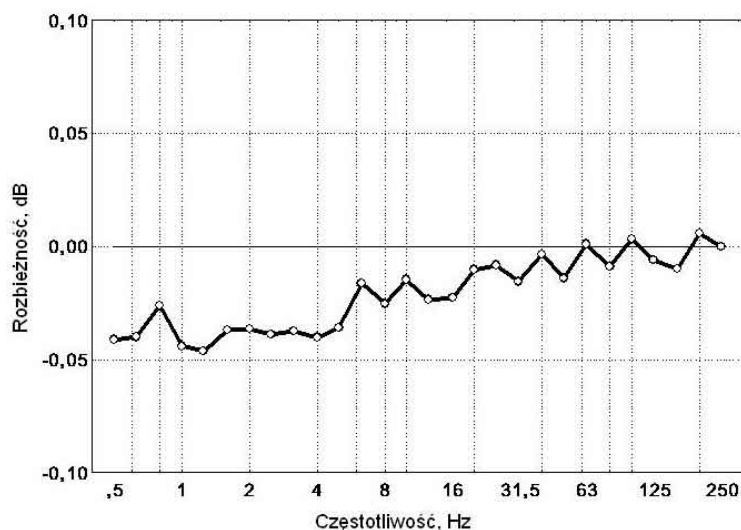
gdzie:

- $L_{M2,rel}(f)$ – charakterystyka częstotliwościowa zestawu wzorcowanego, znormalizowana względem wartości przy 250 Hz;
- $L_{M1,rel}(f)$ – charakterystyka częstotliwościowa zestawu odniesienia, znormalizowana względem wartości przy 250 Hz;
- $U_{M1}(f), U_{M2}(f)$ – napięcia wyjściowe odpowiednio zestawu odniesienia i zestawu wzorcowanego;
- f_{ref} – częstotliwość odniesienia 250 Hz.

Skuteczność zestawu mikrofonowego jest wyznaczana przy częstotliwości odniesienia 250 Hz za pomocą wywzorcowanego kalibratora akustycznego.

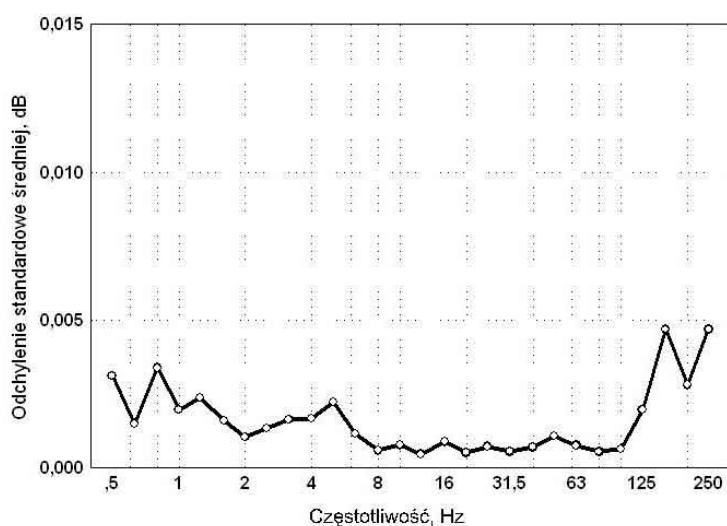
Walidację metody pomiarowej z jednoczesną weryfikacją stanowiska pomiarowego przeprowadzono, wyznaczając eksperymentalnie różnice między wartościami charakterystyk częstotliwościowych dwóch zestawów odniesienia wymienionych w rozdziale 2, a następnie porównując uzyskane rezultaty z odpowiednimi różnicami obliczonymi na podstawie wyników wzorcowania tych samych zestawów w DPLA, podanych w świadectwach wzorcowania (rys. 3). Wyniki pomiarów wykazały bardzo dobrą powtarzalność (odchylenie

standardowe średniej mniejsze niż 0,005 dB – rys. 4), a porównanie różnic wyznaczonych eksperymentalnie z różnicami obliczonymi na podstawie świadectw wzorcowania wykazało satysfakcjonującą zbieżność (wartości rozbieżności nie przekraczają 0,04 dB).



Rys. 3. Rozbieżność pomiędzy wyznaczonymi eksperymentalnie różnicami charakterystyk częstotliwościowych dwóch zestawów odniesienia i odpowiednimi różnicami obliczonymi na podstawie świadectw wzorcowania, przedstawiona jako funkcja częstotliwości.

Odchylenie standardowe średniej wyznaczonych eksperymentalnie różnic charakterystyk częstotliwościowych zestawów mikrofonowych odniesienia pokazano na rys. 4 jako funkcję częstotliwości



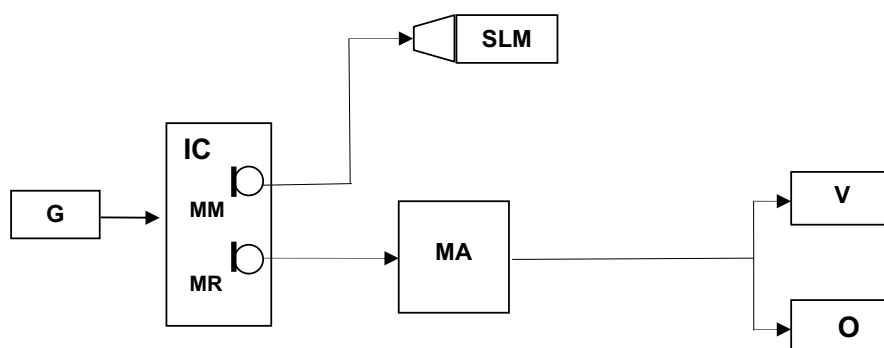
Rys. 4. Odchylenie standardowe średniej wyznaczonych eksperymentalnie różnic charakterystyk częstotliwościowych dwóch zestawów mikrofonowych odniesienia, przedstawione jako funkcja częstotliwości.

Wstępnie oszacowana niepewność rozszerzona wyznaczenia wartości charakterystyki częstotliwościowej zestawu mikrofonowego z wykorzystaniem opisanej powyżej niskoczęstotliwościowej komory ciśnieniowej oraz zestawu mikrofonowego odniesienia nie przekracza wartości określonych w tabeli:

Zakres częstotliwości	0,5 Hz do 1 Hz	1,25 Hz do 2 Hz	2,5 Hz do 4 Hz	5 Hz do 8 Hz	10 Hz do 160 Hz	200 Hz do 250 Hz
Niepewność rozszerzona	0,10 dB	0,09 dB	0,08 dB	0,07 dB	0,06 dB	0,07 dB

4. Wyznaczanie częstotliwościowej charakterystyki korekcyjnej G miernika poziomu dźwięku

Stanowisko pomiarowe z niskoczęstotliwościową komorą ciśnieniową zostało opracowane głównie ze względu na potrzebę wzorcowania mierników poziomu dźwięku wyposażonych w charakterystykę korekcyjną G. Układ pomiarowy do wyznaczenia odpowiedzi częstotliwościowej miernika poziomu dźwięku z włączoną charakterystyką korekcyjną G metodą porównania jednoczesnego przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Układ pomiarowy do wyznaczenia odpowiedzi częstotliwościowej miernika poziomu dźwięku z włączoną charakterystyką korekcyjną G metodą porównania jednoczesnego: G – generator, IC – komora ciśnieniowa, MM – zestaw mikrofonowy wzorcowanego miernika poziomu dźwięku, SLM – wzorcowany miernik poziomu dźwięku, MR – zestaw mikrofonowy odniesienia, MA – wzmacniacz mikrofonowy, V – woltomierz, O – oscyloskop.

Ze względu na duży zakres wartości charakterystyki korekcyjnej G (od $-76,0$ dB przy 250 Hz do $+9,0$ dB przy 20 Hz) charakterystykę miernika wyznacza się w trzech krokach:

- 1) wyznaczenie odpowiedzi częstotliwościowej $L_{\text{FLAT},\text{M}}$ wzorcowanego miernika z włączoną charakterystyką FLAT (znormalizowanej względem wartości przy 250 Hz) za pomocą sygnału akustycznego z wykorzystaniem niskoczęstotliwościowej komory ciśnieniowej metodą porównania z zestawem mikrofonowym odniesienia;
- 2) wyznaczenie odpowiedzi częstotliwościowych $L_{\text{FLAT},\text{el}}$ i $L_{\text{G},\text{el}}$ wzorcowanego miernika z włączonymi kolejno charakterystykami odpowiednio FLAT i G za pomocą sygnału elektrycznego. Sygnał ten jest doprowadzany do wejścia przedwzmacniacza mikrofonowego wzorcowanego miernika przez pojemność własną mikrofonu miernika

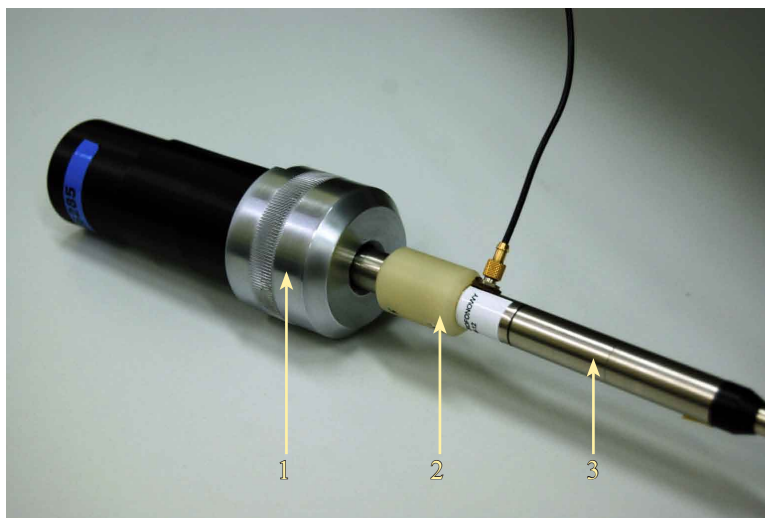
z wykorzystaniem specjalnego urządzenia dopasowującego (rys. 6) zainstalowanego między mikrofonem i przedwzmacniaczem. Podczas tych pomiarów mikrofon miernika jest odizolowany od zewnętrznych zakłóceń akustycznych za pomocą specjalnej głowicy dźwiękoizolacyjnej;

- 3) obliczenie wartości częstotliwościowej charakterystyki korekcyjnej G wzorcowanego miernika poziomu dźwięku jako superpozycji odpowiedzi miernika wyznaczonych w krokach 1 i 2, zgodnie ze wzorem (2)

$$L_{G,M}(f) = L_{G,el}(f) + L_{FLAT,M}(f) - L_{FLAT,el}(f), \quad (2)$$

gdzie:

- $L_{G,M}(f)$ – wartości częstotliwościowej charakterystyki korekcyjnej G wzorcowanego miernika poziomu dźwięku;
- $L_{G,el}(f)$ – odpowiedź częstotliwościowa wzorcowanego miernika z włączoną charakterystyką G wyznaczona za pomocą sygnału elektrycznego;
- $L_{FLAT,M}(f)$ – odpowiedź częstotliwościowa wzorcowanego miernika z włączoną charakterystyką FLAT, wyznaczona za pomocą sygnału akustycznego w niskoczęstotliwościowej komorze ciśnieniowej;
- $L_{FLAT,el}(f)$ – odpowiedź częstotliwościowa wzorcowanego miernika z włączoną charakterystyką FLAT, wyznaczona za pomocą sygnału elektrycznego.



Rys. 6. Układ do wyznaczania odpowiedzi częstotliwościowej miernika poziomu dźwięku za pomocą sygnału elektrycznego: 1 – głowica dźwiękoizolacyjna, 2 – specjalne urządzenie dopasowujące, 3 – przedwzmacniacz mikrofonowy wzorcowanego miernika poziomu dźwięku.

Niepewność rozszerzona wyznaczenia częstotliwościowej charakterystyki korekcyjnej G miernika poziomu dźwięku nie przekracza 0,3 dB w zakresie częstotliwości od 10 Hz do 250 Hz.

Duży wpływ na niepewność wyznaczenia charakterystyki częstotliwościowej wzorcowanego miernika poziomu dźwięku ma sposób doprowadzenia elektrycznego sygnału pomiarowego. Zwykle podczas takich badań sygnał ten jest doprowadzany do wejścia

przedwzmacniacza mikrofonowego miernika za pomocą adaptera zawierającego szeregową pojemność sprzęgającą o stałej wartości. Jednakże, ze względu na skończoną wartość impedancji wejściowej przedwzmacniacza mikrofonowego oraz rozrzut wartości pojemności własnej mikrofonów pomiarowych używanych w miernikach poziomego dźwięku, stosowanie takiego adaptera w zakresie częstotliwości pomiarowych mniejszych od 4 Hz może być źródłem znacznych błędów [4]. Specjalne urządzenie dopasowujące pokazane na rys. 6, które umożliwia wykorzystanie pojemności własnej mikrofonu miernika jako pojemności sprzęgającej, pozwala na wyeliminowanie tych błędów.

5. Podsumowanie

Opracowanie metody wzorcowania akustycznej aparatury pomiarowej w zakresie małych częstotliwości oraz budowa stanowiska pomiarowego z niskoczęstotliwościową komora ciśnieniową to pierwszy krok w kierunku zapewnienia w Polsce spójności pomiarowej w dziedzinie akustyki w zakresie małych częstotliwości. Kolejny krok został wykonany w grudniu 2009 r., kiedy to w ramach modernizacji stanowiska wzorca podstawowego jednostki miary ciśnienia akustycznego możliwości pomiarowe stanowiska zostały rozszerzone o wzorcowanie mikrofonów pomiarowych metodą bezwzględną w zakresie ograniczonym od dołu częstotliwością 2 Hz. Następnym krokiem będzie wykorzystanie mikrofonów wzorcowanych na stanowisku wzorca podstawowego jako wzorców odniesienia w zaprezentowanej w niniejszym artykule metodzie.

Literatura

- [1] PN-ISO 7196:2002 *Akustyka – Charakterystyka częstotliwościowa filtru do pomiarów infradźwięków*.
- [2] Frederiksen E.: *Infra Sound Calibration of Measurement Microphones*, 13th ICSV, Wien, 2006.
- [3] Wong G., Embleton T.: *AIP Handbook of Condenser Microphones. Theory, Calibration and Measurements*, American Institute of Physics, New York, 1984.
- [4] Wąsala T., Wiater M.: *Zastosowanie komparatora akustycznego do wzorcowania mikrofonów metodą porównania równoczesnego*, Materiały XXXIV Zimowej Szkoły Zwalczenia Zagrożeń Wibroakustycznych, Gliwice – Ustroń, 2006.
- [5] Dobrowolska D.: *Instrukcja wzorcowania. Wzorcowanie mierników poziomego ciśnienia akustycznego w zakresie częstotliwości infradźwiękowych*, wyd. 2, GUM, 2008.