

Realizacja wzorca pierwotnego ciśnienia akustycznego w Głównym Urzędzie Miar

The realization of the primary standard for sound pressure at the Central Office of Measures

dr Danuta Dobrowolska (Zakład Promieniowania i Drgań GUM)

W artykule przedstawiono stanowisko pomiarowe w Głównym Urzędzie Miar stosowane do wzorcowania mikrofonów metodą wzajemności, które razem z zestawem laboratoryjnych mikrofonów wzorcowych tworzy wzorec pierwotny ciśnienia akustycznego. Stanowisko umożliwia wyznaczanie poziomu skuteczności ciśnieniowej mikrofonów klasy LS1, w zakresie częstotliwości od 2 Hz do 10 kHz i poziomu skuteczności ciśnieniowej mikrofonów klasy LS2, w zakresie częstotliwości od 20 Hz do 20 kHz, z najlepszą osiągalną niepewnością pomiarową: 0,03 dB. Stosowana metoda pomiarowa jest zgodna z wymaganiami normy IEC 61094-2:2009. W artykule zaprezentowano również przykłady wyników uzyskiwanych w latach 1999–2014, obrazujących stabilność mikrofonów wzorcowych. Równoważność wzorca pierwotnego utrzymywanego w GUM była wielokrotnie potwierdzana międzynarodowo poprzez uczestnictwo w porównaniach kluczowych organizowanych przez Międzynarodowy Komitet Miar (CIPM) i Regionalne Organizacje Metrologiczne: EURAMET, COOMET i AFRIMETS. Artykuł podaje przykłady wyników porównań odnoszące się do polskiego wzorca pierwotnego ciśnienia akustycznego.

In the paper the measurement setup used for this purpose at the Central Office of Measures, which together with the set of laboratory standard microphones composes the primary standard of sound pressure is described. It enables to determine the pressure sensitivity level of class LS1 microphones in the frequency range 2 Hz to 10 kHz and the pressure sensitivity level of LS2 microphones in the frequency range 20 Hz to 20 kHz with the best available measurement uncertainty of 0,03 dB. The measurement method used conforms to the requirements of IEC 61094-2:2009. The results obtained in the years 1999–2014, demonstrating the stability of standard microphones, are also presented. The equivalence of the primary standard used at the GUM was confirmed many times internationally through the participation in key comparisons organised by the International Committee for Weights and Measures (CIPM) and Regional Metrology Organizations: EURAMET, COOMET and AFRIMETS. The examples of the comparisons results referring to the Polish primary standard of sound pressure are given in the paper.

Wstęp

Ciśnienie akustyczne wyrażone w paskalach (Pa), jednostce Międzynarodowego Układu Jednostek Miar SI, jest wielkością fizyczną stosowaną najczęściej w pomiarach akustycznych, szczególnie pomiarach hałasu. Jednostka ta jest odtwarzana metodą pośrednią poprzez wzorcowanie mikrofonów pomiarowych o bardzo stabilnych parametrach metrologicznych. Jedną z najdokładniejszych metod wzorcowania mikrofonów pomiarowych jest metoda oparta na zasadzie wzajemności. Mikrofony wzorcowane tą metodą

powinny być przetwornikami odwracalnymi, tzn. takimi, które mogą działać zarówno jako źródła dźwięku, jak też jako odbiorniki. Mikrofony te muszą też być mikrofonami wzajemnościowymi, to znaczy impedancje przeniesienia – wtórna i pierwotna – tych mikrofonów, wyznaczone przy zaciskach otwartych, mają takie same moduły. Powyższe wymagania spełniają mikrofony pojemnościowe. W praktyce tylko mikrofony tego rodzaju są stosowane jako wzorcowe odbiorniki sygnałów dźwięku, ponieważ ich parametry metrologiczne są bardzo stabilne i odporne na wpływy zewnętrzne. Metoda wzajemności wymaga

użycia trzech mikrofonów (przynajmniej dwa z nich powinny być mikrofonami wzajemnościowymi), tworzących tzw. triadę i umożliwia wyznaczenie skuteczności mikrofonów bez potrzeby odniesienia do jakiegokolwiek wzorca akustycznego wyższego rzędu, a więc uznaje się, że jest to pierwotna metoda wzorcowania. Niemniej wyniki pomiaru są powiązane z wzorcami państwowymi innych wielkości, takich jak napięcie elektryczne, długość, masa, czas, temperatura, ciśnienie statyczne i wilgotność względna pod warunkiem, że przyrządy stosowane do ich pomiaru są regularnie wzorcowane.

Wyniki badań prowadzonych przez laboratoria akustyczne w wielu krajach wykazały, że metoda wzorcowania mikrofonów oparta na zasadzie wzajemności wydaje się być praktycznie jedyną metodą zdolną zagwarantować niepewność wzorcowania lepszą niż 0,1 dB w obrębie większości zakresu częstotliwości słyszalnych. Przez lata metoda ta była rozwijana i ulepszana [1], a zgodność wyników wzorcowania uzyskiwanych przez akustyczne laboratoria metrologiczne znacząco się poprawiała. Rozwój ten był podstawą do opracowania serii norm międzynarodowych IEC dotyczących mikrofonów pomiarowych, obejmujących normę odnoszącą się do wzorcowania mikrofonów metodą wzajemności w warunkach ciśnieniowych [2]. Obecnie metoda wzorcowania mikrofonów pomiarowych oparta na zasadzie wzajemności jest jedyną metodą stosowaną w Krajowych Instytucjach Metrologicznych (NMIs) przy realizacji wzorców pierwotnych ciśnienia akustycznego.

Zasady wzorcowania ciśnieniowego metodą wzajemności

Zasady ciśnieniowego wzorcowania mikrofonów metodą wzajemności [2] dotyczą mikrofonów wzorcowych klasy LS1 i klasy LS2, spełniających wymagania określone w [3] lub innych typów mikrofonów pojemnościowych o takich samych wymiarach mechanicznych. W czasie wzorcowania trzy mikrofony odwracalnie są kolejno łączone parami w taki sposób, że podczas pełnego cyklu pomiarowego każdy z tych mikrofonów pracuje zarówno jako źródło, jak też jako odbiornik dźwięku. Obiektem pomiarowym jest system elektroakustyczny, składający się z dwóch mikrofonów połączonych akustycznie za pomocą sprzęgacza o dokładnie znanych wymiarach, wypełnionego zwykle powietrzem atmosferycznym. Zaciskami

wejściowymi tego systemu są elektryczne zaciski mikrofonu nadawczego, a zaciskami wyjściowymi elektryczne zaciski mikrofonu odbiorczego. System ten można scharakteryzować za pomocą elektrycznej impedancji przeniesienia, definiowanej jako iloraz napięcia na nieobciążonych zaciskach wyjściowych i prądu płynącego przez zaciski wejściowe. „Wnętrze” tego układu elektro-akustycznego można scharakteryzować za pomocą akustycznej impedancji przeniesienia, zdefiniowanej jako iloraz ciśnienia akustycznego działającego na membranę mikrofonu odbiorczego i prędkości objętościowej membrany mikrofonu nadawczego. Jej wartość zależy głównie od następujących czynników: wymiarów geometrycznych sprzęgacza, impedancji akustycznej każdego z mikrofonów, częstotliwości sygnału akustycznego, ciśnienia statycznego i temperatury gazu w sprzęgaczu, stosunku ciepła właściwych gazu wypełniającego sprzęgacz, przewodzenia ciepła przez ściany sprzęgacza, rozkładu pola akustycznego w sprzęgaczu. Układ elektro-akustyczny można opisać za pomocą równań czwórnikowych (1) [2]. Łącząc parami trzy mikrofony oznaczone numerami 1, 2 i 3 otrzymujemy trzy niezależne iloczyny (2) [2], na podstawie których można uzyskać wyrażenie określające skuteczność ciśnieniową każdego z trzech mikrofonów.

$$\underline{Z}_e \underline{i} + \underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{q} = \underline{U} \quad (1)$$

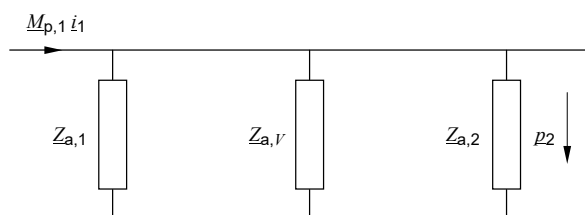
$$\underline{M}_p \underline{Z}_a \underline{i} + \underline{Z}_a \underline{q} = \underline{p}$$

$$\underline{M}_{p,1} \underline{M}_{p,2} = \frac{1}{\underline{Z}_{a,12}} \frac{\underline{U}_2}{\underline{i}_1} \quad (2)$$

gdzie: \underline{p} jest ciśnieniem akustycznym doprowadzonym do wejścia akustycznego (membrany) mikrofonu, rozłożonym równomiernie na jej powierzchni (wyrażonym w Pa), \underline{U} jest napięciem sygnału na zaciskach elektrycznych mikrofonu (wyrażonym w V), \underline{q} jest prędkością objętościową na wejściu akustycznym (membranie) mikrofonu (wyrażonym w m^3/s), \underline{i} jest natężeniem prądu przepływającego przez zaciski elektryczne mikrofonu (wyrażonym w A), \underline{Z}_e jest impedancją elektryczną mikrofonu w warunkach unieruchomienia membrany (wyrażoną w Ω), \underline{Z}_a jest impedancją akustyczną mikrofonu przy nieobciążonych zaciskach elektrycznych (wyrażoną w $\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$), $\underline{M}_p \cdot \underline{Z}_a$ jest wtórną i pierwotną impedancją przeniesienia (wyrażoną w $\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$), przy czym \underline{M}_p jest skutecznością ciśnieniową mikrofonu (wyrażoną w $\text{V} \cdot \text{Pa}^{-1}$), $\underline{M}_{p,1}$ i $\underline{M}_{p,2}$ są skutecznościami ciśnieniowymi mikrofonów

oznaczonych jako 1 i 2 (symbole podkreślone reprezentują wielkości zespolone).

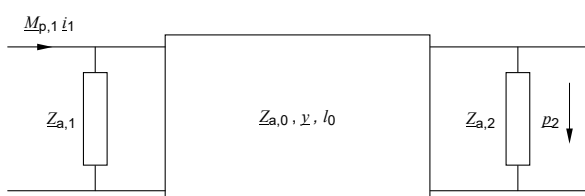
Elektryczną impedancję przeniesienia mierzy się przez porównanie z rezystancją lub pojemnością wzorcową połączoną szeregowo z mikrofonem nadawczym. Akustyczną impedancję przeniesienia dla danej pary sprzężonych mikrofonów można obliczyć na podstawie układu zastępczego przedstawionego na rys. 1, zgodnie z (3) [2] i na podstawie układu przedstawionego na rys. 2, zgodnie z (4) [2].



Rys. 1. Układ zastępczy stosowany do wyznaczania akustycznej impedancji przeniesienia $Z'_{a,12}$, gdy wymiary sprzęgacza są małe w porównaniu z długością fali [2]

Fig. 1. Equivalent circuit for evaluating $Z'_{a,12}$ when coupler dimensions are small compared with wavelength [2]

$$\frac{1}{Z'_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,V}} + \frac{1}{Z_{a,1}} + \frac{1}{Z_{a,2}} = j\omega \left(\frac{V}{\kappa p_s} + \frac{V_{e,1}}{\kappa_r p_{s,r}} + \frac{V_{e,2}}{\kappa_r p_{s,r}} \right) \quad (3)$$



Rys. 2. Układ zastępczy stosowany do wyznaczania akustycznej impedancji przeniesienia $Z'_{a,12}$, kiedy zakłada się, że w sprzęgaczu rozchodzi się fala płaska [2]

Fig. 2. Equivalent circuit for evaluating $Z'_{a,12}$ when plane wave transmission in the coupler can be assumed [2]

$$\frac{1}{Z'_{a,12}} = \frac{1}{Z_{a,0}} \left[\left(\frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \cosh \gamma l_0 + \left(1 + \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,1}} \frac{Z_{a,0}}{Z_{a,2}} \right) \sinh \gamma l_0 \right] \quad (4)$$

gdzie: V jest całkowitą objętością geometryczną sprzęgacza (wyrażoną w m^3), $V_{e,1}$ jest objętością równoważną mikrofonu, oznaczonego 1, (wyrażoną w m^3), $V_{e,2}$ jest objętością równoważną mikrofonu, oznaczonego 2, (wyrażoną w m^3), $Z_{a,V}$ jest impedancją akustyczną gazu zawartego w sprzęgaczu (wyrażoną w $Pa \cdot s/m^3$), ω jest pulsacją (wyrażoną w rad/s), p_s jest ciśnieniem statycznym (wyrażonym w Pa), $p_{s,r}$ jest

ciśnieniem statycznym w warunkach odniesienia (wyrażonym w Pa), κ jest stosunkiem ciepł właściwych w warunkach pomiaru, a κ_r jest wartością współczynnika κ w warunkach odniesienia.

Wzorzec pierwotny ciśnienia akustycznego utrzymywany w Głównym Urzędzie Miar (GUM)

Rys historyczny

Najwcześniejsze doświadczenia GUM dotyczące wzorcowania mikrofonów wzorcowych metodą wzajemności były związane z ręcznie obsługiwaną aparaturą Bruel&Kjaer typ 4143. W 1998 r. GUM zakupił sterowany komputerowo system pomiarowy do wzorcowania mikrofonów klasy LS2 metodą niepewności, opracowany w National Physical Laboratory (NPL). Jego możliwości zostały w 2000 r. rozszerzone siłami własnymi (przez pracowników GUM przy wsparciu specjalistów z NPL) o wzorcowanie mikrofonów klasy LS1. Możliwości GUM w zakresie wzorcowania mikrofonów metodą wzajemności były następnie potwierdzone w porównaniach kluczowych [4, 5], co było podstawą do zatwierdzenia najlepszych możliwości pomiarowych CMC [8], opublikowanych w bazie porównań kluczowych KCDB prowadzonej przez BIPM (Międzynarodowe Biuro Miar) [9]. System umożliwiał wzorcowanie mikrofonów metodą wzajemności (ograniczające się do wyznaczenia tylko modułu skuteczności) w zakresie częstotliwości od 31,5 Hz do 10 kHz (mikrofony LS1) i od 31,5 Hz do 20 kHz (mikrofony LS2), przy częstotliwościach zmienianych z krokiem 1/3-oktawowym. Po ponad dziesięciu latach używania zarówno sprzęt komputerowy i oprogramowanie działające w systemie MS DOS, jak też niektóre analogowe przyrządy pomiarowe stały się przestarzałe. Pomiary wykonywane za pomocą tego systemu były bardzo czasochłonne. Dodatkowo system nie spełniał wymagań drugiego wydania normy IEC 61094-2. W 2009 r. istniejący w GUM system pomiarowy został zmodernizowany w taki sposób, aby odpowiadał najnowszej wersji używanej w NPL. Zasadnicze elementy dotychczasowego systemu GUM (mikrofony wraz z ich danymi historycznymi, sprzęgacze oraz przyrządy zapewniające spójność pomiarową) pozostały niezmienione. To umożliwiło utrzymanie dotychczasowych CMC na niezmienionym poziomie. Modernizacja obejmowała wymianę starych analogowych woltomierzy na nowe selektywne

woltomierze DSP (Digital Signal Processing), wymianę oprogramowania na takie, które działa w środowisku MS Windows, a także znaczące rozszerzenie możliwości technicznych układu poprzez dodanie możliwości wyznaczania kąta fazowego, rozszerzenie dolnej granicy częstotliwości pracy do 2 Hz oraz wyznaczanie akustycznych parametrów mikrofonów za wykorzystaniem metody wielosprzęgaczowej.

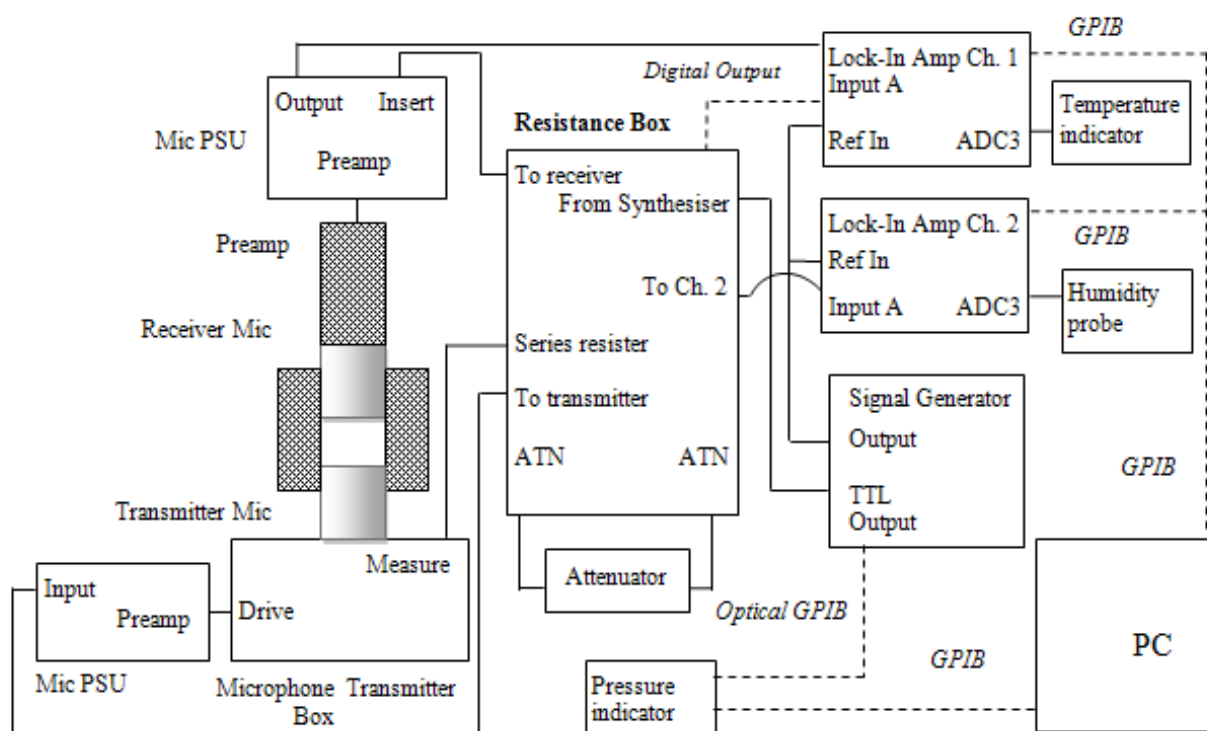
Stan obecny

Używany obecnie w GUM wzorzec pierwotny ciśnienia akustycznego [12] składa się z czterech układów pomiarowych przeznaczonych do pomiaru następujących parametrów wzorcowanych mikrofonów: rezystancji izolacji, elektrycznej impedancji przeniesienia sprzężonych ciśnieniowo par mikrofonów, całkowitej objętości efektywnej oraz głębokości wnęki czołowej. Ważną częścią wzorca pierwotnego są zestawy mikrofonów klasy LS1 i LS2 razem z danymi dotyczącymi ich historycznych wyników, przyrządy do monitorowania warunków środowiskowych (temperatury, ciśnienia statycznego i wilgotności względnej powietrza) oraz specjalistyczne oprogramowanie działające w systemie MS Windows. Pomiary mogą

być wykonywane tylko w następujących warunkach środowiskowych: ciśnienie statyczne od 99 kPa do 103,5 kPa; temperatura powietrza od 21,5 °C do 24,5 °C; wilgotność względna powietrza od 30 % do 65 %.

Układ do pomiaru elektrycznej impedancji przeniesienia U/i implementuje zmodyfikowaną wersję metody pomiarowej zaproponowanej przez Koidana [10], gdzie iloraz U/i jest porównywany z wzorcowaną rezystancją lub, przy częstotliwościach mniejszych od 20 Hz, z wzorcowaną pojemnością. Prąd elektryczny płynący przez mikrofon nadawczy jest wyznaczany pośrednio poprzez pomiar spadku napięcia na wzorcowanej impedancji (wybranej z zestawu impedancji w zależności od częstotliwości) połączonej szeregowo z elektrycznymi zaciskami mikrofonu nadawczego. Napięcie na zaciskach otwartych mikrofonu odbiorczego jest wyznaczane metodą napięcia podstawowego. W czasie pomiaru mikrofon nadawczy jest sprzężony z mikrofonem odbiorczym za pomocą jednego z czterech sprzęgaczy w kształcie walca, o właściwie dobranej średnicy, wykonanych z syntetycznego szafiru. Sprzęgacze nie posiadają kapilar.

Całkowita objętość efektywna mikrofonu składa się z dwóch składników: wymiarów fizycznych wnęki



Rys. 3. Układ do pomiaru elektrycznej impedancji przeniesienia U/i [12]
 Fig. 3. The setup for electrical transfer impedance (U/i) measurement [12]

Tab. 1. Niepewności rozszerzone wyznaczania poziomu i kąta fazowego skuteczności mikrofonu

Table 1. Expanded uncertainties of microphone sensitivity level and phase angle determination

Częstotliwość Frequency (Hz)	Niepewność rozszerzona Expanded uncertainty			
	Poziom skuteczności Sensitivity level (dB)		Kąt fazowy skuteczności Sensitivity phase angle (°)	
	LS1	LS2	LS1	LS2
2	0,27	–	2,8	–
4	0,13	–	2,2	–
8	0,12	–	1,9	–
16	0,12	–	1,7	–
20	0,12	–	1,5	–
25	0,12	0,07	1,5	1,2
31,5	0,03	0,06	1,5	1,1
63	0,03	0,05	1,1	0,7
125	0,03	0,04	0,9	0,7
250	0,03	0,04	0,9	0,6
500	0,03	0,03	0,7	0,6
1 000	0,03	0,03	0,7	0,6
2 000	0,03	0,03	1,1	0,6
2 500	0,03	0,03	0,9	0,6
3 150	0,04	0,03	1,0	0,6
4 000	0,05	0,03	1,2	0,6
5 000	0,06	0,03	1,0	0,6
6 300	0,06	0,04	1,0	0,7
8 000	0,06	0,05	1,2	0,7
10 000	0,11	0,06	1,4	0,8
12 500	–	0,08	–	0,8
16 000	–	0,08	–	1,0
20 000	–	0,12	–	1,4

czołowej i objętości równoważnej wynikającej z akustycznej impedancji membrany mikrofonu. Do obliczenia skuteczności mikrofonu używa się wielkości nazywanej objętością czołową mikrofonu, zdefiniowanej jako różnica między całkowitą objętością efektywną i równoważną objętością membrany. Całkowitą efektywną objętość mikrofonu wyznacza się metodą akustyczną. Ciśnienie akustyczne jest wytwarzane w specjalnej komorze pomiarowej zamkniętej z jednej strony wnęką czołową mikrofonu badanego. Ciśnienie to jest mierzone za pomocą systemu monitorującego, składającego się z mikrofonu pomiarowego,

przedwzmacniacza mikrofonowego i wzmacniacza fazoczułego. W kolejnym kroku, przy niezmiennych warunkach pobudzenia akustycznego, pomiar ten jest powtarzany w warunkach, gdy wnęka czołowa mikrofonu badanego jest zastąpiona kolejno przez dwie wnęki o dokładnie znanych objętościach, z których jedna ma mniejszą, a druga większą objętość niż wnęka mikrofonu. Zmierzone ciśnienie akustyczne jest odwrotnie proporcjonalne do objętości wnęki zamykającej komorę. Całkowitą efektywną objętość mikrofonu wyznacza się na podstawie wyników pomiarów ciśnienia akustycznego, stosując interpolację liniową. Integralną częścią pomiaru objętości czołowej mikrofonu jest pomiar głębokości wnęki. Wykonuje się go za pomocą specjalnego mikroskopu pomiarowego wyposażonego w czujnik zegarowy monitorujący przemieszczenie pionowe układu optycznego.

Akustyczne parametry mikrofonu, tj. jego impedancji akustycznej: akustyczną masę, podatność i rezystancję wyznacza się metodą wielosprzęgaczową. Odbywa się to w dwóch etapach: w pierwszym moduł i kąt fazowy odpowiedzi mikrofonów wyznacza się stosując układ do pomiaru elektrycznej impedancji przeniesienia i cztery sprzęgacze o różnych objętościach, w drugim składowe impedancji akustycznej mikrofonów są wyznaczone metodą optymalizacji, z wykorzystaniem programu narzędziowego opracowanego w NPL.

Poziom i kąt fazowy skuteczności wzorcowanego mikrofonu są obliczane na podstawie wyników pomiaru elektrycznej impedancji przeniesienia (przynajmniej trzy powtórzenia eksperymentu), wyników pomiaru objętości czołowej i głębokości wnęki czołowej oraz wyników wyznaczenia impedancji akustycznej mikrofonu, wyrażonej jako wartości składowych modelu mikrofonu o parametrach skupionych: masa akustyczna, podatność akustyczna i rezystancja akustyczna. Chociaż mogą być też wykorzystane wartości nominalne tych parametrów. Dla mikrofonów B&K typ 4160, 4144 i 4180 możliwa jest korekcja obliczonych wyników do warunków środowiskowych odniesienia.

Przedstawiony powyżej wzorzec pierwotny umożliwi wyznaczenie mikrofonów wzorcowych klasy LS1 w zakresie częstotliwości od 2 Hz do 10 kHz i klasy LS2 w zakresie od 20 Hz do 20 kHz, przy częstotliwościach o wartościach dokładnych [11], zmienianych z krokiem $1/n$ oktawy. Niepewność

wzorcowania, oszacowana zgodnie z [12, 13] i wyrażona jako niepewność rozszerzona przy poziomie ufności około 95 %, zależy od częstotliwości sygnału pomiarowego i klasy mikrofonu. Wartości niepewności rozszerzonej wzorcowania mikrofonów na stanowisku wzorca pierwotnego ciśnienia akustycznego, utrzymywanego obecnie w GUM, są przedstawione w tab. 1.

Stabilność wzorca pierwotnego ciśnienia akustycznego utrzymywanego w GUM

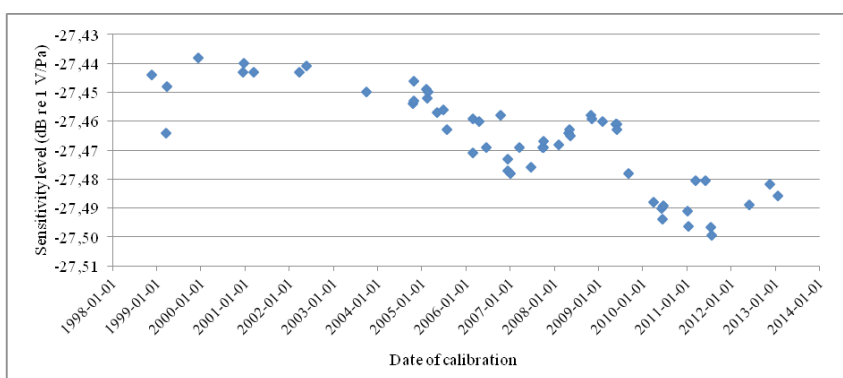
Wszystkie laboratoryjne mikrofony wzorcowe klasy LS1 i LS2, będące w posiadaniu GUM, są regularnie wzorcowane, monitorowana jest też ich stabilność. Dane dotyczące wyników wzorcowania najstarszych mikrofonów są dostępne od 1998 r. (dane dotyczące pomiaru kąta fazowego od 2010 r.). Okazuje się, że stabilność poziomu skuteczności mikrofonów

jest bardzo dobra. Maksymalna zmiana poziomu skuteczności przy częstotliwości 250 Hz pomiędzy kolejnymi, przeprowadzanymi raz w roku wzorcowaniami, nie przekracza na ogół 0,03 dB, zarówno dla mikrofonów klasy LS1, jak i LS2. Przykłady wyników monitoringu poziomu skuteczności najbardziej stabilnych mikrofonów przedstawiono graficznie na rys. 4 i 5.

Równoważność międzynarodowa wzorca ciśnienia akustycznego utrzymywanego w GUM

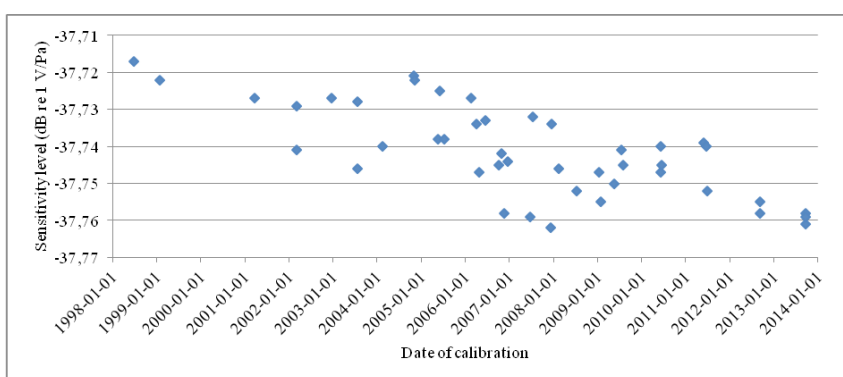
Główny Urząd Miar bierze udział w porównaniach kluczowych organizowanych przez Komitet Doradczy ds. Akustyki, Ultradźwięków i Drgan (CCAUV) Międzynarodowego Komitetu Miar (porównania CIPM) i Regionalne Organizacje Metrologiczne (porównania RMO), zgodnie z wymaganiami porozumienia CIPM MRA [9]. Porównania

kluczowe umożliwiają wzajemne uznawanie państwowych wzorców pomiarowych, będących w posiadaniu krajowych instytucji metrologicznych. Każde porównanie kluczowe CIPM kończy się raportem zawierającym: wyniki indywidualne każdego instytutu, łącznie z deklarowanymi niepewnościami; wartości odniesienia porównania kluczowego (KCRV), łącznie ze związanymi z nimi niepewnościami; dla każdego instytutu odchylenia uzyskanych wyników od wartości odniesienia (KCRV) i niepewności tych odchyżeń, tj. stopnie równoważności; dodatkowo stopnie równoważności wzorców między każdymi dwoma uczestniczącymi instytutami. Porównania kluczowe, organizowane przez RMO, muszą być powiązane (linkowane) z odpowiadającymi im porównaniami CIPM poprzez uczestników biorących udział w obu porównaniach. Wyniki porównań kluczowych CIPM i RMO są publikowane przez BIPM w bazie KCDB.



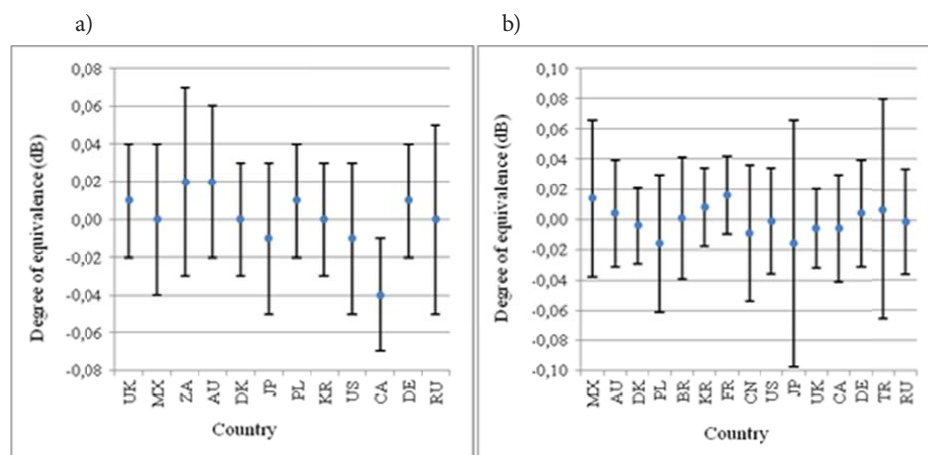
Rys. 4. Wyniki monitoringu stabilności poziomu skuteczności przy 250 Hz dla mikrofonu B&K typ 4160 nr 1453795

Fig. 4. Results of monitoring of sensitivity level stability at 250 Hz for the B&K microphone type 4160 No. 1453795



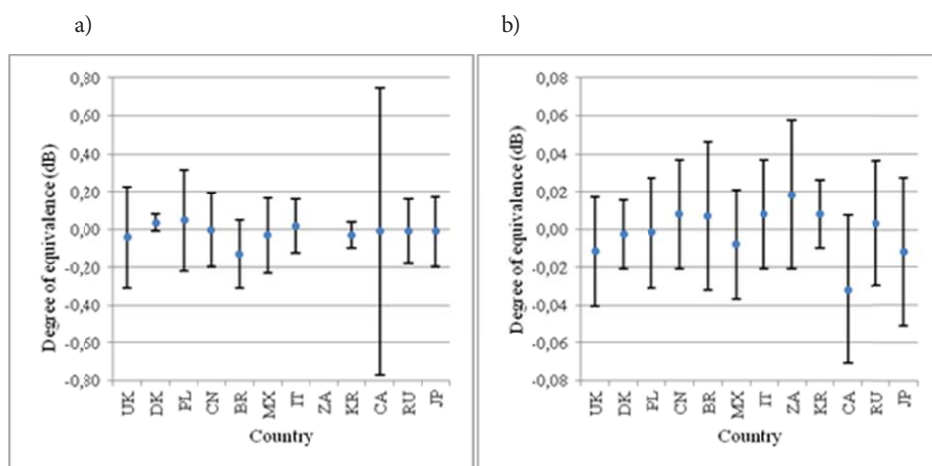
Rys. 5. Wyniki monitoringu stabilności poziomu skuteczności przy 250 Hz dla mikrofonu B&K typ 4180 nr 1886374

Fig. 5. Results of monitoring of sensitivity level stability at 250 Hz for the B&K microphone type 4180 No. 1886374



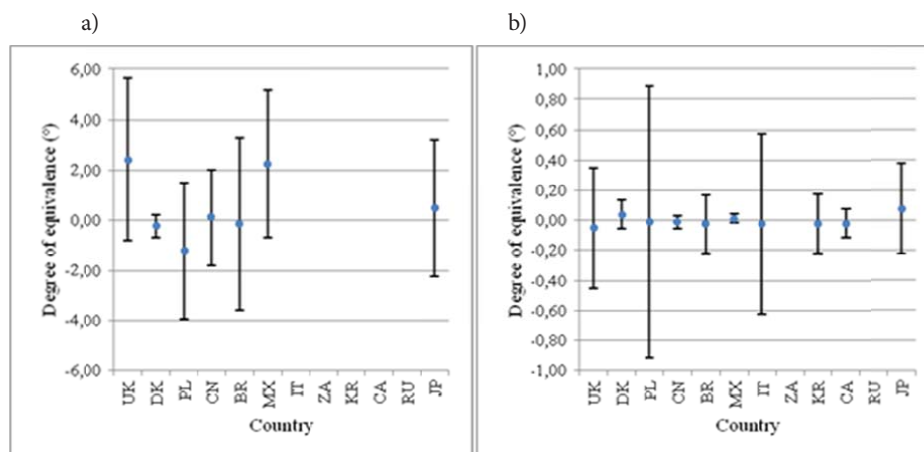
Rys. 6. Stopnie równoważności wzorców państwowych przy częstotliwości 250 Hz oraz związane z nimi niepewności rozszerzone, uzyskane dla poziomu skuteczności w porównaniu CCAUV.A-K1 (a) i CCAUV.A-K3 (b)

Fig. 6. Degrees of equivalence of national standards at 250 Hz and associated expanded uncertainties obtained in CCAUV.A-K1 (a) and CCAUV.A-K3 (b)



Rys. 7. Stopnie równoważności wzorców państwowych przy częstotliwości 2 Hz (a) i 250 Hz (b) oraz związane z nimi niepewności rozszerzone, uzyskane dla poziomu skuteczności w porównaniu CCAUV.A-K5

Fig. 7. Degrees of equivalence of national standards at 2 Hz (a) and 250 Hz (b) and associated expanded uncertainties obtained in CCAUV.A-K5 for sensitivity level



Rys. 8. Stopnie równoważności wzorców państwowych przy częstotliwości 2 Hz (a) i 250 Hz (b) oraz związane z nimi niepewności rozszerzone, uzyskane dla kąta fazowego skuteczności w porównaniu CCAUV.A-K5

Fig. 8. Degrees of equivalence of national standards at 2 Hz (a) and 250 Hz (b) and associated expanded uncertainties obtained in CCAUV.A-K5 for sensitivity phase angle

Raporty końcowe z porównań są także publikowane w dodatku technicznym międzynarodowego czasopisma „Metrologia” (Technical Supplement to Metrologia).

W latach 1999–2007 GUM brał z sukcesem udział w następujących porównaniach kluczowych: EUROMET.AUV.A-K1, CCAUV.A-K1, CCAUV.A-K3, COOMET.AUV.A-K1 i COOMET.AUV.A-K3 (w dwóch ostatnich jako instytut linkujący) [4-7]. Przykłady stopni równoważności uzyskanych w porównaniach CCAUV.A-K1 i CCAUV.A-K3 są przedstawione graficznie na rys. 6. W latach 2010–2013, po modernizacji wzorca pierwotnego, GUM wziął udział w porównaniu CCAUV.A-K5 [14], dotyczącym wzorcowania mikrofonów klasy LS1 (z zakresem znacząco rozszerzonym w porównaniu z poprzednim porównaniem CCAUV.A-K1), a także w porównaniu uzupełniającym AFRIMETS.AUV.A-S1 [15], poprzedzającym przyszłe porównanie kluczowe CIPM w zakresie wzorcowania mikrofonów klasy LS2. Wyniki GUM w obu tych porównaniach okazały się satysfakcjonujące. Przykłady stopni równoważności uzyskanych w porównaniu CCAUV.A-K5 są przedstawione graficznie dla poziomu skuteczności i kąta fazowego skuteczności odpowiednio na rys. 7 i 8. Wyniki uzyskane przez GUM w porównaniach CCAUV.A-K5 i AFRIMETS.AUV.A-S1 pozwolą na znaczącą zmianę wartości CMC w dziedzinie akustyki.

Wnioski

Pomiary poziomu dźwięku można uznać za wiarygodne tylko wtedy, gdy są przeprowadzone z zachowaniem spójności pomiarowej z wzorcem pierwotnym. Wzorzec pierwotny ciśnienia akustycznego utrzymywany w GUM, zaprezentowany w niniejszym artykule, można uważać za bardzo dobre źródło spójności pomiarowej dla wszystkich pomiarów akustycznych wykonywanych zarówno w Polsce, jak i na całym świecie, ponieważ jest on, zgodnie z porozumieniem CIPM-MRA, uznany międzynarodowo.

Literatura

- [1] Jarvis D. R., *Realization of the standard of sound pressure through the calibration of half-inch laboratory standard condenser microphones*. Ph. D. Thesis, Kings College, London, 1989.
- [2] IEC 61094-2:2009 *Electroacoustics – Measurement microphones – Part 2: Primary method for pressure calibration of laboratory standard microphones by the reciprocity technique*.
- [3] IEC 61094-1:2000 *Electroacoustics – Measurement microphones – Part 1: Specifications for laboratory standard microphones*.
- [4] Barham R., *Report on key comparison CCAUV.A-K1*. Metrologia 40, Technical Supplement, 09002, 2003.
- [5] Cutanda Henríquez V., Rasmussen K., *Final report on the key comparison CCAUV.A-K3*, Metrologia 43, Technical Supplement, 09001, 2006.
- [6] Barrera-Figueroa S., Nielsen L., Rasmussen K., *Report on the Regional Comparison COOMET.AUV.A-K3*, Metrologia 44, Technical Supplement, 09002, 2007.
- [7] Fedtke T., *Final report on key comparison COOMET.AUV.A-K1*, Metrologia 46, Technical Supplement, 09004, 2009.
- [8] Calibration and Measurement Capabilities in the context of the CIPM MRA. http://www.bipm.org/utills/common/CIPM_MRA/CIPM_MRA-D-04.pdf, <http://kcdb.bipm.org/>
- [9] *Mutual recognition of national measurement standards and of calibration and measurement certificates issued by national metrology institutes*, Paris, 14 October 1999, http://www.bipm.org/utills/en/pdf/mra_2003.pdf.
- [10] Koidan W., *Method for measurement of E'/T in the reciprocity calibration of condenser microphones*, J. Acoust. Soc. Am. 32, p. 611, 1960.
- [11] ISO 266:1997, Acoustics – Preferred frequencies.
- [12] Barham R., Avison J. E. M., *Pressure Calibration of Laboratory Standard Microphones by the Reciprocity Method. Instruction Manual*, NPL, November 2009.
- [13] ISO/IEC Guide 98-3 *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*.
- [14] Avison J., Barham R., *Report on key comparison CCAUV.A-K5: Pressure calibration of laboratory standard microphones in the frequency range 2 Hz to 10 kHz*, NPL REPORT AC 11, 2014.
- [15] Nel R., Barrera-Figueroa S., Dobrowolska D., Defilippo Soares Z. M., Maina A. K., Hof C., *Final report of supplementary comparison AFRIMETS.AUV.A-S1: primary pressure calibration of LS2aP microphones according to IEC 61094-2, over the frequency range 1 Hz to 31.5 kHz*.