

Badania wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne przyrządów pomiarowych

Tadeusz Wąsala

Główny Urząd Miar – Zakład Mechaniki i Akustyki

Przedstawiono badania wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne przyrządów pomiarowych wyposażonych w przetworniki nieelektrycznych wielkości wejściowych, ze szczególnym uwzględnieniem akustycznych przyrządów pomiarowych, kalibratorów, wzorców akustycznych i złożonych układów pomiarowych stosowanych w metrologii wielkości akustycznych. Omówiono zrealizowane w Głównym Urzędzie Miar stanowisko badawcze oraz metody wyznaczania współczynników ciśnieniowych wzorców akustycznych w szerokim zakresie częstotliwości. Przedyskutowano metody stosowane w Laboratorium Akustyki i Drgań do badania charakterystyk metrologicznych przyrządów pomiarowych zgłaszanych do zatwierdzenia typu. Wyniki badań własnych porównano z danymi deklarowanymi przez producentów przyrządów pomiarowych i wzorców akustycznych.

Słowa kluczowe: Pomiary akustyczne; wzorce akustyczne; kalibratory; ciśnienie statyczne; współczynniki ciśnieniowe; charakterystyki metrologiczne.

Investigation of the influence of static pressure on metrological characteristics of measuring instruments

This paper presents investigation of how the static pressure affects metrological characteristics of those measuring instruments, which comprise transducers of non-electric input quantities, in particular acoustic instruments, calibrators, acoustic standards and complex measuring systems employed in metrology of acoustic quantities. The testing system, designed and constructed at the Central Office of Measures (GUM) and methods for measuring pressure coefficients of acoustic standards in a broad range of acoustic frequencies are described. Investigations of metrological characteristics of measuring instruments submitted for type approval are discussed. Results of investigations performed at the Sound and Vibration Laboratory are compared with data declared by manufacturers of measuring instruments and acoustic standards.

Key words: Acoustic measurements; acoustic standards; calibrators; static pressure; pressure coefficients; metrological characteristics.

1. Wstęp

Zmiany parametrów środowiskowych, głównie ciśnienia atmosferycznego, wpływają na właściwości metrologiczne przyrządów pomiarowych. Współczesne przyrządy pomiarowe, a zwłaszcza przyrządy przeznaczone do pomiarów wielkości nieelektrycznych, wyposaża się w przetworniki przetwarzające daną wielkość fizyczną na sygnał elektryczny, co umożliwia dalsze przetwarzanie sygnału pomiarowego metodami elektrycznymi. Po przetworzeniu sygnału wejściowego na sygnał elektryczny następuje przetwarzanie informacji, na co nie mają już wpływu parametry środowiskowe. Z tego względu, elementem najbardziej podatnym na oddziaływanie otoczenia jest przetwornik pomiarowy.

Można rozróżnić dwa rodzaje oddziaływań: takie, które oddziałują na wejście toru pomiarowego i są addytywne w stosunku do sygnału wielkości mierzonej, oraz takie, któ-

re zmieniają geometrię lub właściwości materiałowe elementów przetwornika, powodując efekty multiplikatywne. Oprócz przyrządów pomiarowych wyposażonych w odbiorcze przetworniki pomiarowe, w metrologii wykorzystuje się również kalibratory przeznaczone do odtwarzania znanej wartości danej wielkości fizycznej, które również są podatne na oddziaływanie otoczenia.

Wpływ zmian temperatury i wilgotności powietrza na pomiary akustyczne jest znacznie mniejszy od efektów wynikających ze zmian ciśnienia statycznego. Ponadto, w warunkach laboratoryjnych można je zminimalizować poprzez stosowanie termostatów lub klimatyzację pomieszczeń pomiarowych. Zmiany ciśnienia statycznego, a w szczególności wahania ciśnienia atmosferycznego wywierają znacznie bardziej istotny wpływ na pomiary w akustyce i można je wyeliminować jedynie poprzez zastosowanie specjalnych komór pomiarowych wyposażonych w układy regulacji i stabilizacji ciśnienia powietrza.

Ze względu na dużą różnorodność stosowanych w praktyce przyrządów pomiarowych, rozważania w tej pracy koncentrują się na wpływie zmian ciśnienia statycznego na przyrządy stosowane w miernictwie wielkości akustycznych. Specyfika zjawisk fizycznych o charakterze falowym powoduje, że zmiany ciśnienia statycznego mają szczególnie duży wpływ na dokładność pomiarów w dziedzinie metrologii akustycznej, wykonywanych za pomocą mierników poziomu dźwięku i innych układów pomiarowych wyposażonych w mikrofony pomiarowe [1]. Wpływa to również na dokładność wzorcowania mierników poziomu dźwięku, co jest realizowane za pomocą kalibratorów akustycznych. Szereg norm i dokumentów metrologicznych określa szczegółowo wymagania metrologiczne dotyczące wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki mierników poziomu dźwięku, mikrofonów pomiarowych i kalibratorów akustycznych [2, 3]. Również przepisy wykonawcze, odnoszące się do pomiarów użytkowych w dziedzinie akustyki, wymagają kontroli warunków środowiskowych i uwzględniania poprawek wynikających z różnicy między aktualnymi wartościami parametrów środowiska, a parametrami warunków odniesienia.

Jednym z najistotniejszych parametrów środowiskowych jest ciśnienie atmosferyczne. Dlatego konieczne jest badanie i określenie współczynników liczbowych charakteryzujących zależny od częstotliwości stopień wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki

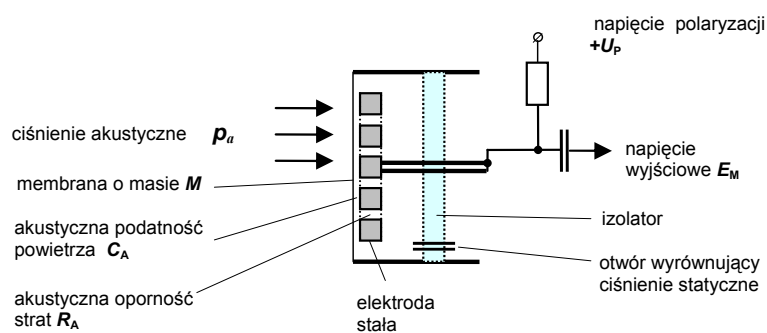


Rys. 1. Zestaw przetworników ciśnienia akustycznego (elektrostatyczne mikrofony pomiarowe) i wzorcowych źródeł ciśnienia akustycznego (kalibratory akustyczne).

metrologiczne akustycznych przyrządów pomiarowych. Współczynniki te wykorzystuje się następnie do korekcji wyników pomiarów podczas wzorcowania przyrządów, a także w pracach przy tworzeniu budżetu i szacowaniu niepewności wyników pomiarów.

2. Wpływ ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne mikrofonów pomiarowych

Do przetwarzania ciśnienia akustycznego na napięcie elektryczne stosuje się pomiarowe mikrofony elektrostatyczne, pokazane na rys. 1. Schemat budowy i zasadę działania takiego urządzenia ilustruje rys. 2. Metalowa membrana oraz sztywna, płaska elektroda mikrofonu tworzą kondensator elektryczny polaryzowany ze źródła napięcia stałego $+U_p$. Podatność akustyczna C_A warstwy powietrza między elektrodami oraz akustyczna oporność strat R_A w otworach elektrody stałej są wielkościami zależnymi od ciśnienia statycznego, temperatury, wilgotności powietrza i częstotliwości.



Rys. 2. Schemat budowy i zasada działania mikrofonu elektrostatycznego.

Przykładowo, zależność podatności akustycznej C_A od parametrów ośrodka przedstawia wzór

$$C_A = \frac{V_p}{p_0 \kappa} = \frac{V_p}{c^2 \rho_0}, \quad (1)$$

gdzie V_p – objętość przestrzeni powietrznej, p_0 – ciśnienie statyczne, κ – wykładnik adiabaty, c – prędkość dźwięku, ρ_0 – gęstość ośrodka. Również akustyczna oporność strat układu akustycznego, R_A , związana z układem równoległych kanałów (tj. otworów w elektrodzie stałej o łącznym polu przekroju poprzecznego S), wiąże prędkość objętościową V_0 z różnicą ciśnień po obu stronach kanałów i zależy liniowo od ciśnienia statycznego.

Wyznaczanie charakterystyk elementów składowych mikrofonu pomiarowego ma duże znaczenie zarówno przy tworzeniu schematów zastępczych rzeczywistych przetworników pomiarowych, jak i przy weryfikacji założonego modelu. Niezastąpionym narzędziem w tych pracach jest teoria analogii elektromechanicznych, umożliwiającą tworzenie schematów zastępczych i pozwalającą na modelowanie struktury oraz badanie własności dynamicznych układów akustycznych (w tym także mikrofonów pomiarowych i kalibratorów akustycznych) na podstawie znanych własności elementów składowych, w szerokim zakresie częstotliwości.

W praktyce, w mikrofonach elektrostatycznych, przy zmniejszaniu ciśnienia statycznego następuje wzrost akustycznej podatności powietrza między elektrodami, C_A , natomiast

akustyczna oporność strat, R_A , dla wyższych częstotliwości (zbliżonych do częstotliwości rezonansowej mikrofonu) zmniejsza się. W następstwie zmniejszania ciśnienia statycznego zwiększa się dobroć układu rezonansowego i zmniejsza częstotliwość rezonansowa mikrofonu.

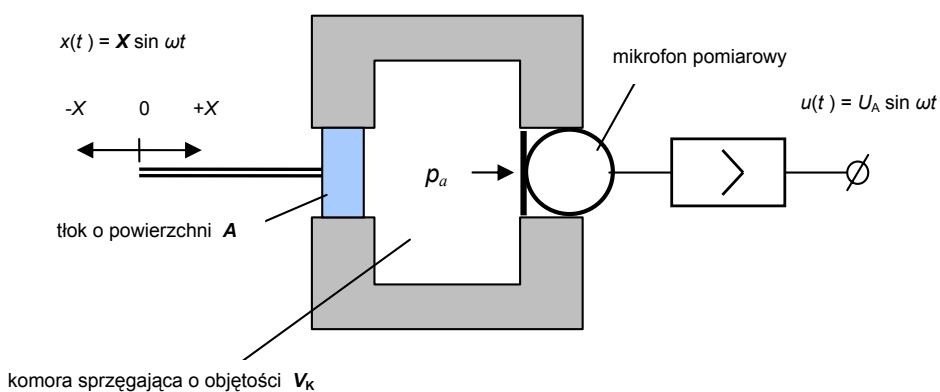
W zakresie średnich częstotliwości, obejmujących częstotliwości odniesienia 250 Hz i 1000 Hz, typowa wartość współczynnika ciśnieniowego wynosi $-0,0001$ dB/kPa. W pozostałych zakresach częstotliwości, zjawiska fizyczne i struktura modelu mikrofonu są znacznie bardziej złożone. W zakresie niskich częstotliwości, gdy przemiany zachodzące w gazie są wolnozmiennie, następuje wymiana energii (ciepła) z otoczeniem (tzn. odstępstwo od adiabatyczności przemian), zwiększają się straty energii akustycznej i zwiększa się równoważna podatność powietrza C_A ; efekt ten zachodzi także wskutek zmniejszania akustycznej oporności przepływowej w otworze wyrównującym ciśnienie. W zakresie wyższych częstotliwości, przy zmianach ciśnienia statycznego istotne staje się tłumienie drgań membrany i efekty falowe, zarówno na powierzchni membrany jak i wewnątrz mikrofonu.

3. Wpływ ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne kalibratorów akustycznych

W przypadku gazu idealnie sprężystego, w warunkach przemiany adiabatycznej, zależność między ciśnieniem akustycznym p_a a ciśnieniem statycznym p_0 jest liniowa i zależy od wykładnika adiabaty κ oraz od chwilowej, względnej zmiany gęstości ośrodka ($d\rho/\rho_0$),

$$p_a = p_0 \kappa \frac{d\rho}{\rho_0} . \quad (2)$$

Zależność ta jest wykorzystywana w kalibratorze akustycznym z pobudnikiem tłokowym [4], którego zasadę działania przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat budowy i zasada działania kalibratora akustycznego z pobudnikiem tłokowym.

Wartość skuteczną ciśnienia akustycznego wytwarzanego w komorze o objętości V_K , przy sinusoidalnym ruchu płaskiego tłoka o powierzchni A i amplitudzie wychylenia X , opisuje zależność

$$p_a = \frac{p_0 \kappa A X}{\sqrt{2V_K}} , \quad (3)$$

natomiast wartość poprawki ciśnienia akustycznego ΔL_p , wyrażoną w dB, przy odchyleniu ciśnienia atmosferycznego p_0 (mierzonych w hPa) od wartości odniesienia 1013,25 hPa, określa wzór

$$\Delta L_p = 20 \log \frac{P_0}{1013,25} . \quad (4)$$

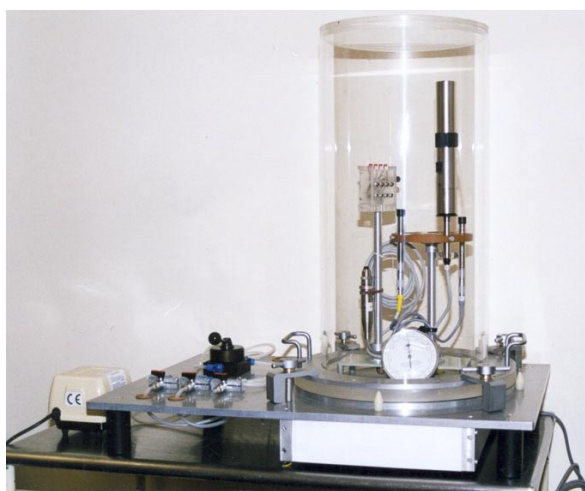
Kalibrator akustyczny z pobudnikiem tłokowym jest wzorcem obliczeniowym. W praktyce pomiarowej rozpowszechniły się kalibratory membranowe, przeważnie z pobudnikiem piezoceramicznym, zasilanym z wewnętrznego generatora napięcia sinusoidalnego. Kalibratory najnowszej generacji wyposażone są w układy stabilizacji poziomu ciśnienia akustycznego z wewnętrznymi przetwornikami ciśnienia, kompensującymi wpływ zmian ciśnienia atmosferycznego.

4. Stanowisko badawcze

Głównym elementem stanowiska pomiarowego w Laboratorium Akustyki i Drgan GUM, pokazanego na rys. 4, jest komora ciśnieniowa w postaci cylindra odłączanego od podstawy stanowiska pomiarowego, wyposażonego w pompę powietrza i zewnętrzny cyfrowy miernik ciśnienia statycznego [5]. Pompa umożliwia uzyskanie ciśnienia powietrza w komorze w zakresie od 52 kPa do 130 kPa. Podczas napełniania i opróżniania komory, kaskadowo połączone zawory pozwalają na płynną regulację szybkości zmian ciśnienia powietrza w komorze w zakresie od 0,1 hPa/s do 3 hPa/s. Konstrukcja komory zapewnia bardzo dobrą szczelność, której miarą jest zmiana ciśnienia wewnętrznego w czasie. Przykładowo, przy ciśnieniu powietrza w komorze 120 kPa, jego zmiana po 100 godzinach nie przekroczyła 0,06 kPa. Można zatem twierdzić, że badania w komorze ciśnieniowej, trwające przeciętnie ok. pół godziny, odbywają się przy stałej, zadanej wartości ciśnienia statycznego.

Stanowisko pomiarowe z komorą ciśnieniową dostosowane jest do równoczesnych badań w czterech kanałach pomiarowych, z zastosowaniem czterech kalibratorów akustycznych lub czterech pobudników elektrostatycznych i czterech torów mikrofonowych.

Stanowisko pomiarowe wyposażono również w drugi, znacznie większy cylinder o objętości 93 dm³, pokazany na rys. 5. Stało się to niezbędne ze względu na duże rozmiary aku-



Rys. 4. Stanowisko pomiarowe z komorą ciśnieniową o objętości 30 dm³.



Rys. 5. Stanowisko pomiarowe z komorą ciśnieniową o objętości 93 dm³ oraz akustyczna sonda pomiarowa stosowana w systemach monitoringu hałasów lotniczych.

stycznych sond pomiarowych stosowanych w systemach monitoringu hałasu w środowisku, a zwłaszcza hałasów lotniczych.

5. Metody badania wpływu ciśnienia statycznego

Wielkością charakteryzującą stopień wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne kalibratorów akustycznych jest współczynnik ciśnieniowy k_p , odzwierciedlający relację między zmianą poziomu ciśnienia akustycznego ΔL_a wytwarzanego za pomocą kalibratora, a wywołującą ją zmianą ciśnienia statycznego Δp_0

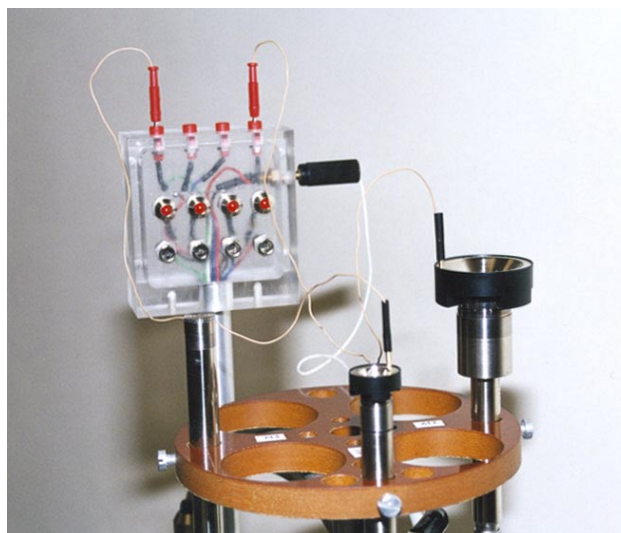
$$k_p = \frac{\Delta L_a}{\Delta p_0} \quad (5)$$

Po połączeniu kalibratora z mikrofonem wzorcowym o współczynniku ciśnieniowym wyznaczonym przy częstotliwości takiej samej, jak częstotliwość badanego kalibratora, wykonywane są pomiary w zakresie ciśnienia powietrza w komorze od 65 kPa do 108 kPa [2, 3].

Stopień wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne mikrofonów pomiarowych (lub przyrządów wyposażonych w mikrofony pomiarowe) określa zależny od częstotliwości współczynnik ciśnieniowy k_p , który opisuje relację między zmianą skuteczności mikrofonu ΔS (lub zmianą wskazania mierzonego poziomu ciśnienia akustycznego ΔL_a), a wywołującą ją zmianą ciśnienia statycznego Δp_0

$$k_p = \frac{\Delta S}{\Delta p_0} \quad \text{lub} \quad k_p = \frac{\Delta L_a}{\Delta p_0} \quad (6)$$

W badaniach mikrofonów pomiarowych, źródłem sygnałów akustycznych są kalibratory tłokowe pracujące przy częstotliwości 250 Hz lub kalibratory membranowe typu 4231 o częstotliwości 1000 Hz i współczynnikiem ciśnieniowym $+8 \cdot 10^{-6}$ dB/kPa [6]. Do wyznaczenia współczynników ciśnieniowych w zakresie od 20 Hz do 100 kHz stosuje się pobudniki elektrostatyczne, które symulują działanie płaskiej fali akustycznej o amplitudzie ciśnienia akustycznego niezależnej od częstotliwości w szerokim zakresie drgań. Drgania mechaniczne membrany mikrofonu wymuszane są za pomocą zewnętrznego, stałego, jednorodnego pola elektrycznego, modulowanego sinusoidalnym sygnałem pomiarowym o regulowanej częstotliwości. Rysunek 6 przedstawia pobudniki elektrostatyczne stosowane w Laboratorium Akustyki i Drgań Głównego Urzędu Miar.



Rys. 6. Pobudniki elektrostatyczne do badań w szerokim zakresie częstotliwości.

6. Wyniki badań wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki częstotliwościowe skuteczności mikrofonów

Pomiary wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki częstotliwościowe skuteczności mikrofonów wzorcowych klasy WS1P typu 4144, klasy WS1F typu 4145, klasy WS2P typu 4134, 4166 i 4180 oraz klasy WS2F typu 4133, wykazały następującą prawidłowość:

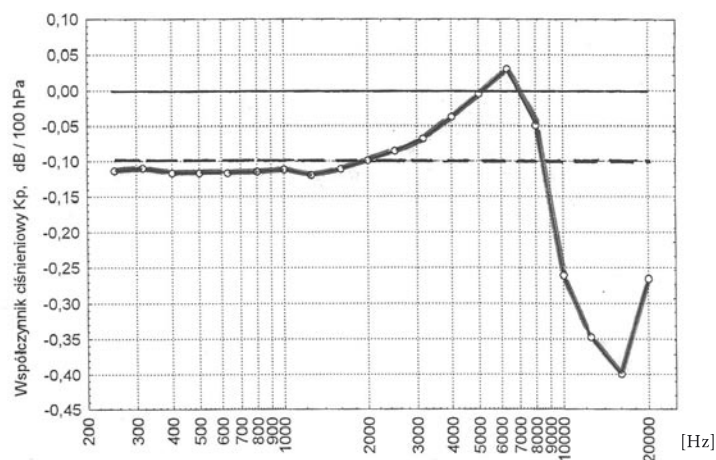
- W zakresie niższych częstotliwości, obejmującym stosowane przy wzorcowaniu częstotliwości odniesienia 250 Hz i 1000 Hz, wartości współczynników ciśnieniowych k_p są stałe i zbliżone do wartości deklarowanych przez producenta dla tych typów mikrofonów.
- W obszarze rezonansu mikrofonu oraz przy wyższych częstotliwościach, ujawnia się duża zmienność współczynnika ciśnieniowego k_p w funkcji częstotliwości, który może wówczas osiągać wartości wielokrotnie większe od wartości deklarowanych dla zakresu niższych częstotliwości.

W tabeli 1 podano przykładowe wartości współczynnika ciśnieniowego dla częstotliwości 1000 Hz, zmierzone w Laboratorium Akustyki i Drgań GUM dla mikrofonów wybranych klas i typów.

Tab. 1. Zestawienie zmierzonych wartości współczynnika ciśnieniowego k_p skuteczności mikrofonów klasy WS2P i WS2F przy częstotliwości 1000 Hz.

Typ mikrofonu pomiarowego	4134	4166	4180	4133
Wartość współczynnika ciśnieniowego k_p skuteczności mikrofonu [dB/kPa]	$-4,5 \cdot 10^{-5}$	$-1,2 \cdot 10^{-4}$	$-5,2 \cdot 10^{-5}$	$-3,8 \cdot 10^{-5}$

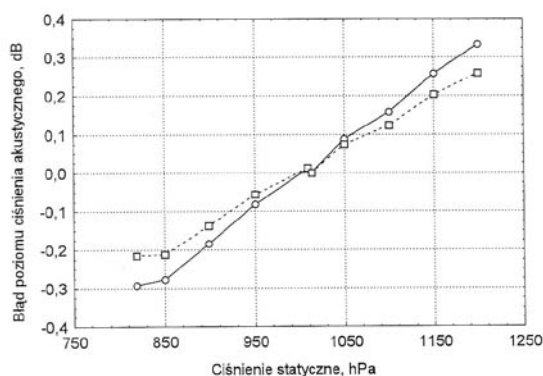
Rysunek 7 przedstawia przykładowy przebieg zmienności współczynnika ciśnieniowego skuteczności mikrofonu ciśnieniowego typu 4166 w rozszerzonym zakresie częstotliwości.



Rys. 7. Charakterystyka częstotliwościowa współczynnika ciśnieniowego mikrofonu typu 4166. Wartość współczynnika ciśnieniowego, zadeklarowana przez producenta, zaznaczona jest linią przerywaną.

7. Wyniki badań wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne kalibratorów akustycznych

Badania kalibratorów akustycznych, prowadzone w celu określenia wpływu ciśnienia statycznego na ich charakterystyki metrologiczne, wymagają zastosowania mikrofonów pomiarowych o jak najmniejszym współczynniku ciśnieniowym przy częstotliwości badanego



Rys. 8. Charakterystyka wpływu ciśnienia statycznego na poziom ciśnienia akustycznego wytwarzanego za pomocą badanego kalibratora. Linia ciągła przedstawia wartości bez uwzględnienia poprawek, zaś linia przerywana odpowiada wartościom skorygowanym ze względu na współczynnik ciśnieniowy.

kalibratora. Rysunek 8 przedstawia przykładową charakterystykę badanego kalibratora akustycznego o częstotliwości 1000 Hz. Widać wyraźnie, jak istotną rolę odgrywają poprawki ciśnieniowe, określone na podstawie indywidualnie wyznaczonych wartości współczynnika ciśnieniowego mikrofonu wzorcowego, szczególnie przy większych odstępstwach ciśnienia statycznego od wartości ciśnienia odniesienia 1013,25 hPa.

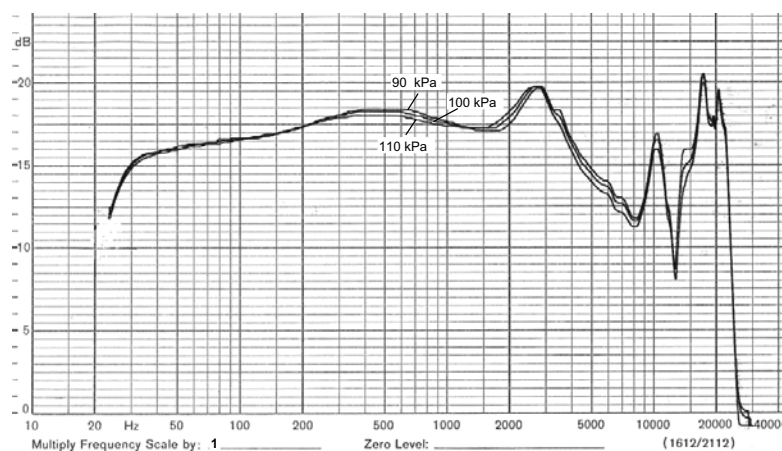
8. Wyniki badań wpływu ciśnienia statycznego na charakterystyki metrologiczne złożonych układów akustycznych

Przykład złożonego układu akustycznego pokazany jest na rys. 9. Jest on stosowany przy wzorcowaniu audiometrycznego sprzęgacza akustycznego typu 4153, zawierającego wewnętrzny mikrofon pomiarowy klasy WS2P. Wzorcowanie wykonywane jest przy pomocy słuchawki pomiarowej Bayer Dynamic typu DT48, pracującej jako szerokopasmowe źródło sygnału akustycznego.



Rys. 9. Przykład złożonego akustycznego układu pomiarowego: audiometryczny sprzęgacz akustyczny typu 4153, połączony ze słuchawką pomiarową DT48 stanowiącą źródło ciśnienia akustycznego.

Wpływ zmian ciśnienia statycznego na właściwości słuchawki pomiarowej i sprzęgacza akustycznego jest znacznie większy niż na zastosowany mikrofon pomiarowy. Na rys. 10 przedstawiono trzy charakterystyki częstotliwościowe funkcji przenoszenia



Rys. 10. Charakterystyka częstotliwościowa funkcji przenoszenia audiometrycznego sprzęgacza akustycznego typu 4153, połączony ze słuchawką pomiarową DT48 dla trzech wartości ciśnienia statycznego.

audiometrycznego sprzęgacza akustycznego typu 4153, wykonane przy trzech wartościach ciśnienia statycznego, różniących się o ± 10 kPa. Wykres umożliwia określenie tych zakresów częstotliwości, w których wpływ zmian ciśnienia statycznego jest nieznaczny oraz tych zakresów, w których jest on szczególnie duży. Przy częstotliwości 250 Hz, stosowanej jako częstotliwość odniesienia, wpływ zmian ciśnienia statycznego nie jest znaczący, natomiast przy częstotliwości 1000 Hz jest zauważalny.

9. Podsumowanie

Ciśnienie statyczne w złożony sposób wpływa na działanie mikrofonów pomiarowych i kalibratorów akustycznych, zwłaszcza przy pomiarach w rozszerzonym zakresie częstotliwości.

W badaniach układów akustycznych niezwykle pomocne jest tworzenie i analiza układów zastępczych, z wykorzystaniem teorii analogii elektromechanicznych. Niezbędnym elementem takich analiz jest uwzględnienie charakterystyk wielkości wpływających, a przede wszystkim dominującego wpływu ciśnienia statycznego.

W Laboratorium Akustyki i Drgań zbudowano stanowisko badawcze oraz opracowano metody pomiarowe do wyznaczania współczynników ciśnieniowych, które są niezbędne do korekcji charakterystyk metrologicznych kalibratorów akustycznych i mikrofonów pomiarowych w szerokim zakresie częstotliwości. Przedstawione w tej pracy wyniki badań wskazują na wysoką przydatność opracowanego stanowiska pomiarowego i zdolność Laboratorium do wykonywania specjalistycznych badań w dziedzinie metrologii wielkości akustycznych.

Literatura

- [1] Wong G., Embleton T.: *AIP Handbook of Condenser Microphones. Theory, Calibration, and Measurements*. American Institute of Physics, New York, 1984.
- [2] PN-EN 60942 *Elektroakustyka. Kalibratory akustyczne*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2005.
- [3] PN-EN 61672-2 *Elektroakustyka – Mierniki poziomu dźwięku. Część 2: Badania typu*. Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa, 2004.
- [4] *Pistonphone type 4228. Technical Documentation*. Brüel & Kjær, Nærum, 1991, Dania.
- [5] Wąsala T.: *Komora ciśnieniowa do badania wzorców akustycznych*. Materiały XXXI Zimowej Szkoły Zwalczenia Zagrożeń Wibroakustycznych, Polskie Towarzystwo Akustyczne, Ustroń, 2003.
- [6] *Sound Level Calibrator Type 4231. Technical Documentation*. Brüel & Kjær, Nærum, 1999, Dania.