

# Aparatura i metody pomiaru hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy<sup>1,2</sup>

*mgr inż. JAN RADOSZ  
mgr inż. TOMASZ KRUKOWICZ  
Centralny Instytut Ochrony Pracy –  
Państwowy Instytut Badawczy  
00-701 Warszawa  
ul. Czerniakowska 16*

**Słowa kluczowe:** hałas, ultradźwięki, pomiary, stanowisko pracy.  
**Keywords:** noise, ultrasounds, measurements, workplace.

## Streszczenie

Hałas ultradźwiękowy znajduje się w wykazie szkodliwych czynników w środowisku pracy. Podstawą oceny ekspozycji na hałas ultradźwiękowy jest jego analiza widmowa w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych z przedziału  $10 \div 40$  kHz. W artykule omówiono metody pomiaru hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy, przeprowadzono analizę czynników wpływających na wyznaczone wartości poziomów ciśnienia akustycznego,

a także dokonano przeglądu aparatury przeznaczonej do pomiarów hałasu ultradźwiękowego i możliwości jej wzorcowania.

Celem artykułu jest próba ujednoczenia metod pomiaru i oceny hałasu ultradźwiękowego, co jest niezwykle istotne z uwagi na brak aktualnych norm dotyczących oceny zagrożenia tym czynnikiem fizycznym w środowisku pracy.

## Summary

Ultrasonic noise is a harmful factor in the work environment. The assessment of exposure to ultrasonic noise is based on the spectral analysis of one-third octave bands with center frequencies in the 10 - 40 kHz range. This paper presents a method of measuring the noise, an analysis of the factors affecting the determined sound pressure levels, a review

of the apparatus for measuring ultrasonic noise and the possibility of its calibration. This article attempts to standardize the methods of measuring and evaluating ultrasonic sound, which is extremely important due to the lack of current standards for risk assessment.

<sup>1</sup> Publikacja przygotowana na podstawie wyników uzyskanych w ramach II etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy” dofinansowywanego w latach 2011-2013 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej. Główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

<sup>2</sup> Zagadnienia hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy będą w 2013 r. przedmiotem prac zespołu Ekspertów ds. Czynników Fizycznych Międzyresortowej Komisji ds. NDS i NDN Czynniki Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy. Niniejszy artykuł stanowi głos w dyskusji dotyczącej aparatury i metod pomiaru hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy.

## WPROWADZENIE

Hałas ultradźwiękowy to hałas, w którego widmie występują składowe o wysokich częstotliwościach słyszalnych i niskich ultradźwiękowych (10 ÷ 40 kHz), (Smagowska, Mikulski 2008). Głównymi źródłami hałasu ultradźwiękowego w środowisku pracy są takie, tzw. technologiczne urządzenia ultradźwiękowe niskich częstotliwości, jak: myjki, zgrzewarki, drążarki, lutownice ręczne i wanny do cynowania detali (Mikulski, Smagowska 2007; Pawlaczyk-Luszczyńska i in. 2007a). Hałas ultradźwiękowy jest również emitowany przez: sprężarki wysokoobrotowe, palniki, zawory, narzędzia pneumatyczne oraz maszyny wysokoobrotowe, w tym: strugarki, frezarki, szlifierki, piły tarczowe i niektóre maszyny włókiennicze (Pawlaczyk-Luszczyńska i in. 2007a).

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych i środowiskowych wykazano, że wysokie poziomy ciśnienia akustycznego z zakresu 10 ÷ 40 kHz mogą powodować: uciążliwość, szумы uszne, bóle głowy, zmęczenie i nudności, a w niektórych przypadkach nawet uszkodzenie słuchu (Mikulski, Smagowska 2007; Pawlaczyk-Luszczyńska i in. 2007a).

Do przeprowadzania badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, w tym pomiarów hałasu ultradźwiękowego, są upoważnione akredytowane laboratoria badawcze, zgodnie z ustawą z dnia 30 sierpnia 2002 r. o systemie oceny zgodności, czyli laboratoria badawcze legitymujące się akredytacją Pol-

skiego Centrum Akredytacji (PCA). Oprócz laboratoriów prowadzonych przez jednostki organizacyjne lub osoby fizyczne, pomiary czynników szkodliwych mogą być wykonywane, m.in. także w: laboratoriach szkół wyższych i instytutów PAN, laboratoriach PIP i innych instytutów badawczych, pod warunkiem, że mają wdrożony system zapewnienia jakości (Rozporządzenie ministra zdrowia... 2011). Jednym z wymagań stawianych laboratoriom badawczym przez PCA jest stosowanie metody określania budżetu niepewności. Podstawą takich wymagań jest norma PN-EN ISO/IEC 17025. Obecne metody pomiarowe hałasu ultradźwiękowego, zarówno w Polsce jak i na świecie, nie zawierają informacji dotyczących dokładności pomiarów oraz szacowania budżetu niepewności. W zakresie częstotliwości hałasu ultradźwiękowego (w szczególności powyżej 20 kHz) nie ma również informacji w piśmiennictwie o czynnikach wpływających na wynik pomiaru poziomu ciśnienia akustycznego, a analiza tych czynników jest konieczna w celu zwiększenia dokładności i wiarygodności oceny ryzyka. Co więcej, w Polsce nie ma obecnie aktualnych norm dotyczących pomiaru hałasu ultradźwiękowego. Istnieje zatem pilna potrzeba ujednoczenia istniejących różnych metod pomiarowych opracowywanych na przestrzeni lat, z uwzględnieniem wymagań dotyczących określania budżetu niepewności pomiarów oraz obecnych możliwości aparatury pomiarowej i jej wzorcowania.

## METODY POMIARU HAŁASU ULTRADŹWIĘKOWEGO

### Metoda pomiaru zgodna z normą PN-N-01321:1986

W normie PN-N-01321:1986 „Hałas ultradźwiękowy – Dopuszczalne wartości poziomu ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy i ogólne wymagania dotyczące wykonywania pomiarów” są zawarte ogólne wymagania dotyczące wykonywania pomiarów. Mimo że w 2011 r. norma ta została wycofana (bez zastąpienia jej inną normą), to zawiera ona informacje, które nie zostały zawarte w innych normach umożliwiających pomiar hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy, np. w normie PN-ISO 9612:2004.

Wymagania dotyczące aparatury pomiarowej zawarte w normie PN-N-01321:1986 dotyczą: mikrofonu pomiarowego, miernika poziomu ciśnienia akustycznego oraz filtrów tercjowych. Charakterystyka nierównomierności, w zakresie filtrów analizujących miernik z mikrofonem, nie powinna przekraczać ±2 dB, a filtry tercjowe powinny spełniać wymagania zawarte w normie PN-83/T-06461 (obecnie w normie PN-EN 61260).

Pomiary poziomu ciśnienia akustycznego przeprowadza się w pasmach tercjowych w zakresie częstotliwości hałasu ultradźwiękowego. Mikrofon powinno się umieszczać w miejscu głowy pracownika i kierować go w stronę źródła emisji hałasu. Osoba wykonująca pomiar i inne

osoby powinny znajdować się w odległości większej niż 50 cm od mikrofonu. Podczas pomiaru miernik poziomu ciśnienia akustycznego powinien mieć włączoną charakterystykę dynamiczną SLOW. Pomiar należy wykonać co najmniej trzykrotnie, a następnie obliczyć uśredniony równoważny poziom ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych.

### **Metoda pomiaru zgodna z procedurą opublikowaną w kwartalniku „Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy”**

W procedurze pomiarowej opublikowanej w 2001 r. w kwartalniku „Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy” (PiMOŚP) zamieszczono więcej szczegółowych informacji dotyczących sposobu wykonywania pomiarów oraz wymagań dotyczących aparatury pomiarowej niż w omówionej wcześniej normie PN-N-01321:1986.

Do pomiarów hałasu ultradźwiękowego powinny być stosowane całkowite mierniki poziomu dźwięku pierwszej klasy dokładności spełniające wymagania zawarte w normie IEC 804 (obecnie normie PN-EN 61672), z filtrami tercjowymi o częstotliwościach środkowych od 10 do 40 kHz spełniającymi wymagania zawarte w normie PN-83/T-06461 (obecnie normie PN-EN 61260) i o charakterystyce częstotliwościowej LIN w zakresie częstotliwości filtrów analizujących.

Mikrofon w czasie wykonywania pomiarów powinien być umieszczony w miejscu, w którym zwykle znajduje się lub może znajdować się głowa pracownika w przypadku jego nieobecności lub w odległości około 10 cm od jego ucha, jeżeli obecność pracownika w czasie pomiarów jest niezbędna. Mikrofon powinien być skierowany w stronę źródła emitującego hałas ultradźwiękowy. Osoba przeprowadzająca pomiary i osoby postronne powinny znajdować się w odległości co najmniej 0,5 m od mikrofonu.

Równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych ( $L_{fi,eq,Te}$ ) mierzy się z zastosowaniem całkowitego miernika poziomu dźwięku spełniającego wymagania podane wcześniej. Pomiary maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych ( $L_{fi,max}$ ) przeprowadza się przy włączonej charakterystyce dynamicznej SLOW miernika poziomu dźwięku. Jeśli miernik umożliwia tylko pomiar równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego (uśrednia-

nie liniowe), to wyznacza się maksymalne wartości z zarejestrowanych przebiegów czasowych z częstotliwością próbkowania 1 s (dopuszcza się również częstotliwość próbkowania 0,25 s).

Czas pomiaru powinien być tak dobrany, aby można było uwzględnić pełen zakres zmienności poziomu ciśnienia akustycznego. Dla każdego, wyraźnie rozróżnialnego przedziału czasu pod względem warunków narażenia na hałas ultradźwiękowy, wymienione wcześniej wielkości należy mierzyć oddzielnie. W każdym wyróżnionym przedziale narażenia czas pomiaru powinien być tak dobrany, aby zostały uwzględnione czasowe zmiany poziomu ciśnienia akustycznego i aby była zapewniona stabilizacja wskazań równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego w poszczególnych pasmach tercjowych w zakresie  $\pm 0,5$  dB. Pomiar może obejmować pełny zakres wykonywanych czynności danego typu, ich pojedynczy fragment lub kilka powtórzeń tych samych czynności. Jeżeli hałas ma wyraźny charakter okresowy, to czas trwania pomiaru powinien obejmować co najmniej jeden cykl zmienności. Minimalny czas trwania pomiaru powinien wynosić co najmniej 15 s.

Przyjmuje się, że równoważny poziom ciśnienia akustycznego w czasie pomiaru jest równy równoważnemu poziomowi ciśnienia akustycznego podczas ekspozycji.

### **Metoda pomiaru zgodna z normą PN-ISO 9612:2004**

Norma PN-ISO 9612:2004 „Akustyka. Wytyczne do pomiarów i oceny ekspozycji na hałas w środowisku pracy” została zastąpiona przez aktualną jej edycję normę PN-EN ISO 9612:2011 „Akustyka – Wyznaczanie zawodowej ekspozycji na hałas – Metoda techniczna”. W zakresie tej normy nie zostały zamieszczone informacje dotyczące pomiarów hałasu ultradźwiękowego, chociaż w edycji z 2004 r. znajdują się informacje dotyczące oceny ekspozycji w tym zakresie częstotliwości.

W świetle normy PN-ISO 9612:2004 pomiary hałasu ultradźwiękowego należy wykonać z zastosowaniem filtrów 1/3-oktawowych lub filtrów wąskopasmowych o częstotliwościach środkowych zapewniających właściwy zakres częstotliwości badanego hałasu. Do pomiarów należy stosować miernik poziomu dźwięku lub całkowity miernik poziomu dźwięku klasy dokładności 1., zgodnie z wymaganiami zawartymi w normie IEC

651 (obecnie normie PN-EN 61672) o znanej charakterystyce częstotliwościowej powyżej 12 kHz. Przedziały czasowe pomiaru powinny być tak dobrane, aby zapewniały wyniki reprezentatywne dla długiego czasu uśredniania. Powinna być także podana co najmniej informacja o przybliżonych poziomach w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych.

Ważna jest również informacja o wzorcowaniu aparatury pomiarowej, które powinno się przeprowadzać w regularnych, nieprzekraczających trzech lat, odstępach czasowych.

Pozostałe wymagania dotyczące wykonywania pomiarów hałasu ultradźwiękowego są takie same jak w procedurze opublikowanej w kwartalniku „Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy” (Pawlaczyk-Łuszczynska i in. 2001).

W normie PN-ISO 9612:2004 pojawia się również metoda wyznaczania niepewności pomiarowej, jednak ma ona charakter tylko informacyjny, ponieważ nie jest ona całkowicie zgodna z wyma-

ganiami zawartymi w przewodniku ISO/IEC oraz nie uwzględniono w niej specyfiki zakresu częstotliwości hałasu ultradźwiękowego.

### Stan obecny

Z uwagi na wycofanie normy PN-N-01321:1986 „Hałas ultradźwiękowy – dopuszczalne wartości poziomu ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy i ogólne wymagania dotyczące wykonywania pomiarów” bez zastąpienia jej inną normą, a także wprowadzenie zmian w zakresie normy PN-ISO 9612:2011, wykonując pomiary hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy należy powołać się jedynie na procedurę pomiarową opublikowaną w kwartalniku „Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy” (Pawlaczyk-Łuszczynska i in. 2001). Procedura ta wymaga jednak aktualizacji i uzupełnienia o zagadnienia omówione w dalszej części artykułu.

## APARATURA POMIAROWA

W odróżnieniu od pomiarów poziomu dźwięku w zakresie częstotliwości słyszalnych wykonywanych miernikiem poziomu dźwięku, dla którego są określone wymagania zawarte w normach (PN-EN 60651(U); PN-EN 60804(U); PN-EN 61672-1:2005), nie ma jednoznacznie zdefiniowanej aparatury przeznaczonej do pomiaru poziomu ciśnienia akustycznego w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych ani ustalonych wymagań dla takiej aparatury, ani metod jej wzorcowania w ramach okresowej kontroli metrologicznej.

Zgodnie z wymaganiami określonymi w metodach pomiarowych (Pawlaczyk-Łuszczynska i in. 2001; PN-ISO 9612:2004; PN-N-0132:1986) aparatura przeznaczona do pomiarów w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych powinna umożliwiać pomiar równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach 1/3-oktawowych oraz maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach 1/3- -oktawowych rejestrowanego ze stałą czasową SLOW (S). Biorąc to pod uwagę, należy stwierdzić, że obecnie jedynym możliwym rozwiązaniem jest stosowanie do pomiarów aparatury w postaci miernika/analizatora dźwięku wyposażonego w mikrofon właściwy dla zakresu częstotliwości 10 ÷ 40 kHz i filtry pasmowe 1/3-oktawowe pod warunkiem, że:

- płaska charakterystyka częstotliwościowa miernika/analizatora obejmuje częstotliwości z zakresu 8 ÷ 50 kHz (aby uwzględnić liniowość w zakresie 10 ÷ 40 kHz)
- zakres częstotliwości środkowych filtrów pasmowych miernika/analizatora obejmuje częstotliwości z zakresu 10 ÷ 40 kHz
- zakres pomiarowy ciśnienia akustycznego i zakres liniowości miernika/analizatora jest dostosowany do czułości mikrofonu, a także jest wystarczający do pomiaru poziomu ciśnienia akustycznego w zakresie, w jakim występuje on w warunkach rzeczywistych.

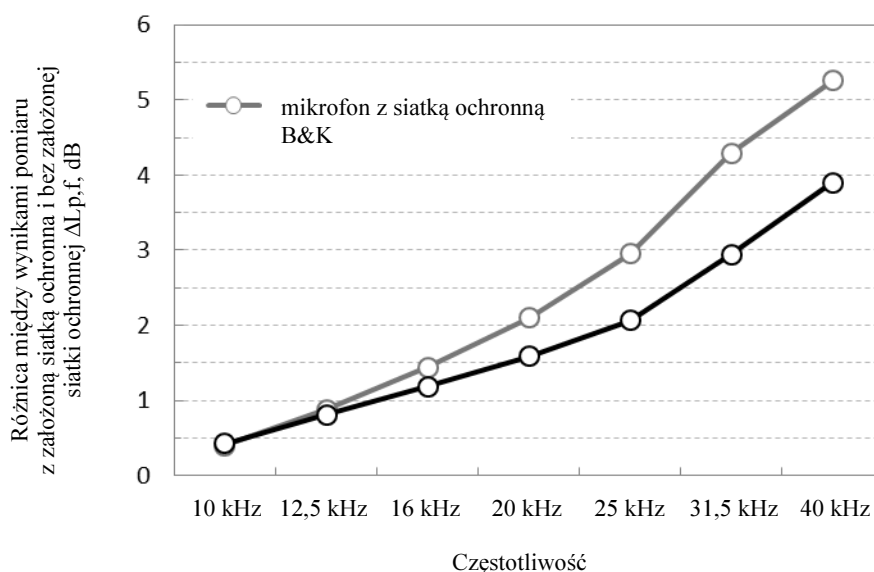
Przeprowadzenie wiarygodnych pomiarów i oszacowanie ich niepewności wymaga wiedzy na temat aktualnego stanu aparatury pomiarowej. Z tego względu okresowa kontrola metrologiczna miernika/analizatora, przeprowadzana nie rzadziej niż co 2 lata, powinna obejmować, co najmniej, wyznaczenie:

- płaskiej charakterystyki częstotliwościowej w polu swobodnym w zakresie częstotliwości co najmniej od 250 Hz lub 1 ÷ 50 kHz
- tłumienia względnego filtrów 1/3-oktawowych.

## Mikrofon pomiarowy

W zakresie częstotliwości hałasu ultradźwiękowego szczególnego znaczenia nabiera mikrofon pomiarowy. Biorąc pod uwagę zakres częstotliwości hałasu ultradźwiękowego oraz minimalne i maksymalne wartości poziomu ciśnienia akustycznego spotykane na stanowiskach pracy (Mikulski, Smagowska 2004; 2007; Młyński i in. 2012; Smagowska, Mikulski 2008), a także właściwości elektroakustyczne mikrofonów dostępnych na rynku, należy stwierdzić, że do pomiarów w tym środowisku optymalnym wyborem są mikrofony o średnicy nominalnej 6,35 mm (1/4 cala).

Mikrofon pomiarowy w połączeniu z miernikiem/analizatorem powinien zapewniać płaską charakterystykę częstotliwościową obejmującą częstotliwości z zakresu  $8 \div 50$  kHz ( $\pm 0,5$  dB). Powinien on być stosowany przede wszystkim w konfiguracji bez siatki ochronnej. Stosowanie mikrofonu w konfiguracji z siatką jest możliwe, pod warunkiem, że znany jest jej wpływ na charakterystykę częstotliwościową mikrofonu (rys. 1). Należy jednak mieć świadomość, że pomiary takie będą obarczone większą niepewnością, często trudną do oszacowania (Radosz 2012).



**Rys. 1.** Wpływ stosowania siatek ochronnych na ten sam mikrofon pomiarowy w czasie pomiarów na wybranym stanowisku pracy (Radosz 2012)

Niektóre mikrofony o średnicy 12,70 mm (1/2-calowe) przeznaczone do pomiarów w polu swobodnym mają charakterystykę częstotliwościową płaską w zakresie do częstotliwości 40 kHz. Ich stosowanie do pomiarów nie jest jednak zalecane, ze względu na porównywalne z długością fal wymiary, zakłócające istotnie pole akustyczne w tym zakresie częstotliwości i wpływające na wynik pomiaru. Pole akustyczne występujące na stanowiskach pracy, na których występuje hałas ultradźwiękowy, można uznać za pole swobodne, ze względu na długości fal w tym zakresie częstotliwości.

Do pomiarów powinny więc być stosowane przede wszystkim mikrofony pola swobodnego, skierowane w kierunku źródła dźwięku. Możliwe jest także stosowanie mikrofonu przeznaczonego

do pomiarów w warunkach ciśnieniowych pod warunkiem, że znane są poprawki dla pola swobodnego dla kierunku padania fali akustycznej zgodnego z osią główną mikrofonu (kąt padania  $0^\circ$ ). Należy jednak pamiętać, że charakterystyka częstotliwościowa takiego mikrofonu w polu swobodnym może nie spełniać ustalonych wymagań w całym zakresie częstotliwości. Innym rozwiązaniem jest umieszczenie tego mikrofonu w polu akustycznym w taki sposób, aby jego membrana była położona równolegle do kierunku rozchodzenia się fal (kąt padania  $90^\circ$ ).

Aby pomiary można było uznać za wiarygodne, powtarzalne i odtwarzalne, a także można było oszacować ich niepewność, powinny być znane, tzn. zbadane i zadeklarowane przez producenta, właściwości elektroakustyczne mikrofonów. Naj-

lepsza sytuacja występuje wówczas, gdy mikrofony stosowane do pomiarów hałasu ultradźwiękowego spełniają wymagania określone dla roboczych mikrofonów klasy WS3 (*working standard 3* – mikrofony robocze o średnicy 1/4") w normie PN-EN 61094-4:2000.

### **Możliwości wzorcowania mikrofonów stosowanych do pomiaru hałasu ultradźwiękowego**

Wiele nierozwiązanych jeszcze problemów metrologicznych powoduje utrudnienia podczas wzorcowania mikrofonów w zakresie częstotliwości powyżej 20 kHz. Do najważniejszych z nich należy brak:

- laboratoryjnych mikrofonów wzorcowych klasy LS (*laboratory standard*) przeznaczonych do odtwarzania jednostki ciśnienia akustycznego oraz wymagań dla tych mikrofonów
- metody wyznaczania skuteczności mikrofonów roboczych klasy WS3
- porównań międzylaboratoryjnych w zakresie wzorcowania mikrofonów roboczych WS3 w tym zakresie częstotliwości

Wobec wymienionych trudności obecne możliwości wzorcowania mikrofonów roboczych klasy WS3 w zakresie częstotliwości hałasu ultradźwiękowego ograniczają się do wyznaczenia:

- skuteczności mikrofonu na jego otwartych zaciskach albo skuteczności zestawu mikrofon-przedwzmacniacz za pomocą kalibratora akustycznego wytwarzającego sygnał akustyczny o wartości poziomu ciśnienia akustycznego 94 lub 114 dB, co z uwagi na małą skuteczność mikrofonów jest istotne w celu zachowania wystarczającego odstępu sygnału od zakłóceń
- wyznaczenia charakterystyki częstotliwościowej mikrofonu lub charakterystyki częstotliwościowej zestawu mikrofon-przedwzmacniacz metodą pobudnika elektrostatycznego i skorygowania wartości charakterystyki za pomocą poprawek wyznaczonych przez producenta dla danego typu mikrofonu i dla określonego rodzaju pola akustycznego – swobodnego lub rozproszonego.

## **WPLYW METODY POMIAROWEJ NA WYZNACZANE WARTOŚCI HAŁASU ULTRADŹWIĘKOWEGO**

Metoda pomiaru wiąże się z modelem badanego zjawiska. W przypadku zjawiska narażenia na hałas ultradźwiękowy model składa się z informacji uzyskanych za pomocą wywiadu i dotyczących badanego stanowiska pracy, jak również wstępnych informacji zebranych podczas trwania typowych operacji technologicznych. Następnie określa się sytuacje pozwalające na scharakteryzowanie narażenia pracownika na hałas w ciągu zmiany roboczej lub innego czasu odniesienia. Każda z przedstawionych sytuacji w czasie jej występowania jest ściśle związana z: miejscem pobytu pracownika, stanem źródeł hałasu mających istotny wpływ na mierzone wartości, czasem trwania sytuacji oraz poziomem ciśnienia akustycznego w danej sytuacji. Zbiór wszystkich istotnych sytuacji stanowi model zjawiska narażenia (*Kirpluk 2010*).

Stanowiska pracy związane z hałasem ultradźwiękowym są najczęściej stacjonarnymi stanowiskami pracy, a wykonywane na nich czynności mogą być podzielone na wyraźne przedziały czasowe. W takim przypadku najbardziej efektywną metodą pomiarową jest metoda z podziałem na czynności zawarta w normie PN-EN ISO 9612:2011. Polega ona na analizie pracy i podziale jej na pewną liczbę reprezentatywnych czynności, dla których są przeprowadzane osobne pomiary.

W przypadku gdy poziom ciśnienia akustycznego uśredniony dla danej sytuacji (czynności) jest określany na podstawie kilku pomiarów elementarnych (próbek), prawdziwa wartość nie jest znana, a jej estymatę określa się w decybelach, na podstawie wzoru:

$$L_{p,eq,T,m} = 10 \log_{10} \left( \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I 10^{0,1 \cdot L_{p,eq,T,m,i}} \right),$$

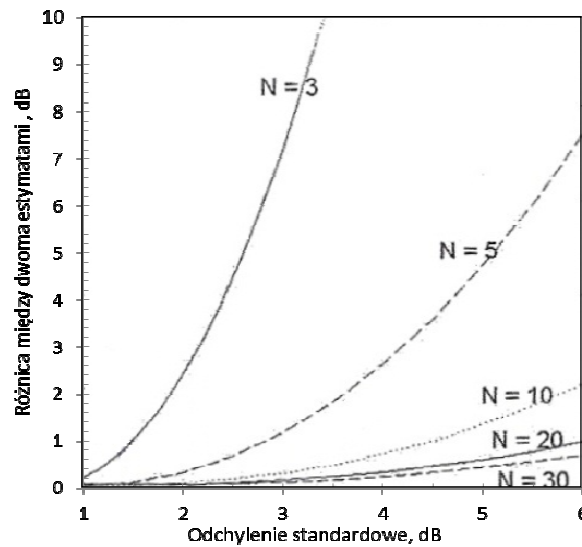
w którym:

- $L_{p,eq,T,m}$  – równoważny poziom ciśnienia akustycznego podczas czynności  $m$  o czasie trwania  $T$ , w dB,
- $m$  –  $m$ -ta czynność wykonywana na stanowisku pracy,
- $i$  – numer próbki dla czynności  $m$ ,
- $I$  – ogólna liczba próbek dla czynności  $m$ .

Przedstawione równanie jest równaniem nieliniowym. W takim przypadku w przewodniku ISO/IEC zaleca się, aby w przypadku określania niepewności za pomocą aproksymacji przez szeregi Taylora uwzględnić wyrazy wyższego rzędu. Wyznaczanie wyrazów wyższych rzędów jest trudne zarówno pod względem obliczeniowym, jak i pod względem zastosowania w szacowaniu budżetu niepewności (0 2008). Z tego powodu, aby ułatwić szacowanie niepewności przyjęto w praktyce, że na niepewność próbkowania będą

miały wpływ dwie wartości – odchylenie standardowe oraz liczba próbek (odpowiednik wyrazu pierwszego rzędu szeregu Taylora). Na podstawie wyników badań przeprowadzonych w zakresie częstotliwości słyszalnych (Gedliczka 2008) można przyjąć, że takie podejście, z wystarczającą dokładnością określa w praktyce niepewność związaną z wyznaczaniem estymaty równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego dla danej czynności z kilku pomiarów elementarnych (pomiarów wykonywanych podczas określonej czynności, na których podstawie wyznacza się poziom uśredniony).

Istotną kwestią z punktu widzenia niepewności pomiarowej jest określenie minimalnej liczby próbek potrzebnej do określenia równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego dla danej czynności wykonywanej na stanowisku pracy. Szacowanie estymaty równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego jest zależne od liczby próbek i odchylenia standardowego ich wartości (rys. 2).



**Rys. 2.** Wpływ ilości próbek  $N$  i odchylenia standardowego na szacowanie estymaty równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego (Śliwiński 2001)

Można zatem przypuszczać, że nie ma istotnych różnic między dwoma estymatami wyznaczonymi z dużej liczby próbek i małej wartości odchylenia standardowego. Pojawia się natomiast pytanie, jaką minimalną liczbę próbek należy przyjąć w metodzie pomiarowej, pozwalającą na wyznaczenie równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego dla danej czynności z wystarczającą dokładnością. Istotne ze względów praktycznych jest również określenie, jaki powinien być maksymalny

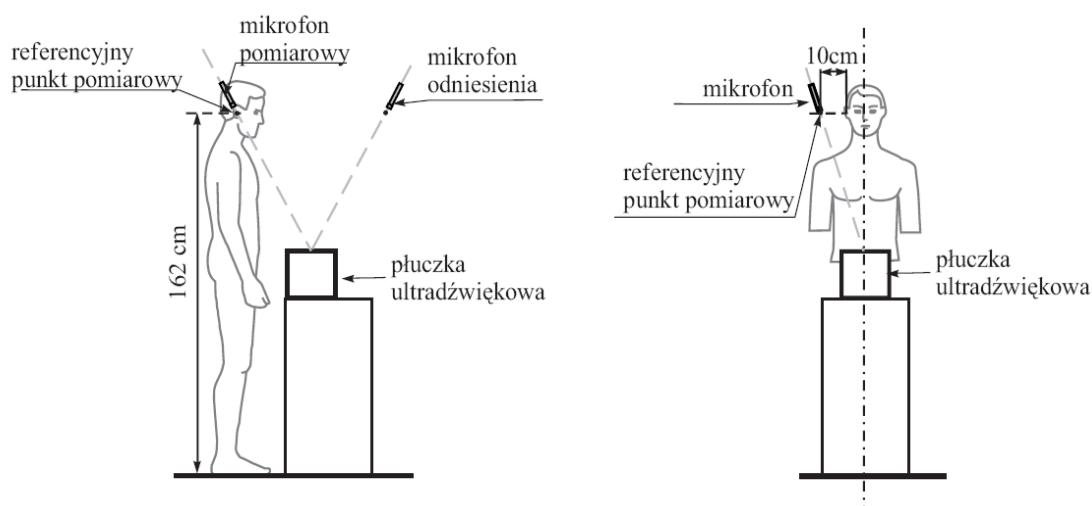
dopuszczalny rozrzut wartości zmierzonych próbek. W przypadku wyznaczania równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego z trzech próbek, różnice między dwoma estymatami można uznać za akceptowalne, kiedy odchylenie standardowe wartości próbek wynosi maksymalnie około 1,5 dB (rys. 2). Dlatego przyjęto, że minimalną liczbą próbek niezbędną do wyznaczenia wartości uśrednionej jest cyfra 3, a największy rozrzut między wartościami próbek nie powinien przekraczać 3 dB

(wartość odchylenia standardowego w takim przypadku wynosi około 1,5 dB). Wymienione wcześniej wymagania są zgodne z wymaganiami metod pomiarowych hałasu określonych w normie PN-ISO 9612:2011.

### Położenie mikrofonu pomiarowego w czasie wykonywania pomiarów

Niezmiernie istotne w czasie wykonywania pomiarów w zakresie częstotliwości hałasu ultradźwię-

kowego jest położenie mikrofonu. Nawet przy zachowaniu 10-centymetrowego odstępów od ucha pracownika lub wykonywaniu pomiaru w miejscu, gdzie zwykle znajduje się głowa pracownika (Pawlaczyk-Łuszczyńska i in. 2001), punkt pomiarowy może znaleźć się w bardzo wielu przypadkowych miejscach. Może to wynikać m.in.: ze wzrostu pracownika, który był obecny w czasie wykonywania pomiarów, poruszania się pracownika w obrębie stanowiska pracy czy niedokładnego umiejscowienia punktu pomiarowego.



Rys. 3. Schemat stanowiska pracy operatora płuczki ultradźwiękowej

Na podstawie wyników badań przeprowadzonych na przykładowym stanowisku pracy (rys. 3.) wykazano istotny wpływ położenia mikrofonu na mierzone wartości poziomu ciśnienia akustycznego (Radosz 2011). Przedmiotem badań był określenie wpływu:

- kierunku położenia mikrofonu w referencyjnym punkcie pomiarowym na mierzony poziom ciśnienia akustycznego – za maksymalne odchylenie przyjęto odchylenie mikrofonu o  $\pm 20^\circ$  względem kierunku referencyjnego w dwóch prostopadłych do siebie płaszczyznach
- położenia mikrofonu w sąsiedztwie wejścia do kanału ucha zewnętrznego na mierzony poziom ciśnienia akustycznego – za maksymalne przesunięcie położenia mikrofonu przyjęto przesunięcie o  $\pm 5$  cm względem referencyjnego punktu pomiarowego w dwóch prostopadłych do siebie płaszczyznach

- położenia mikrofonu w obszarze przestrzeni pracy określonym w „Atlasie miar człowieka” (Gedliczka 2008)
- położenia mikrofonu w miejscu, gdzie zwykle znajduje się głowa pracownika (środek głowy) względem referencyjnego punktu pomiarowego.

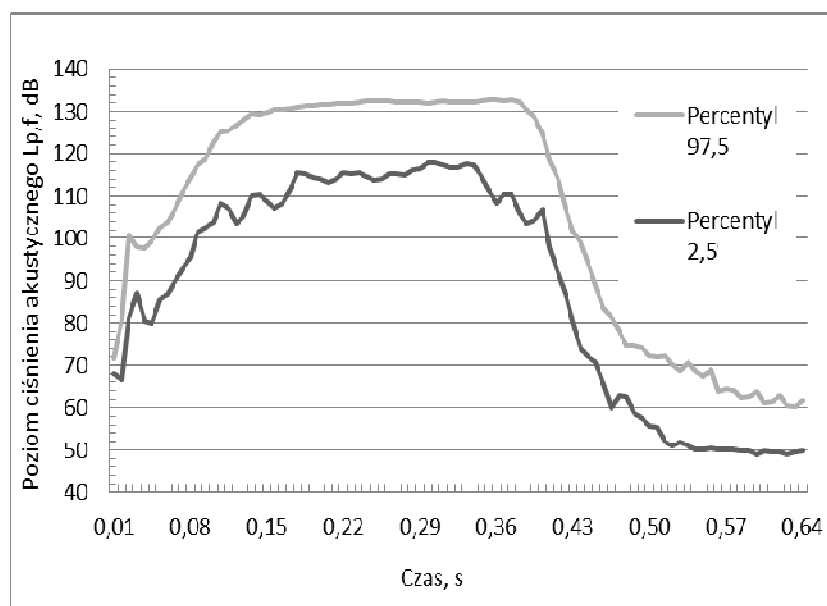
Maksymalna różnica zmierzonych wartości, w różnych punktach stanowiska pracy, względem referencyjnego punktu pomiarowego może przekraczać 6 dB. Położenie mikrofonu w sąsiedztwie wejścia do kanału ucha zewnętrznego ma również znaczny wpływ na mierzone wartości – w przypadku przesunięcia  $\pm 5$  cm w dowolnym kierunku maksymalna różnica mierzonych wartości względem punktu referencyjnego może wynosić do około 3 dB. Na podstawie wyników badań wykazano, że najmniejszy wpływ na mierzony poziom ciśnienia akustycznego ma kierunek położenia mikrofonu, przy założeniu maksymalnej zmiany kierunku położenia  $\pm 20^\circ$ .



### Pomiar hałasu impulsowego w zakresie częstotliwości 10 ÷ 40 kHz

Ze względu na rodzaj emitowanego hałasu ultradźwiękowego, specyficznym rodzajem urządzeń są zgrzewarki ultradźwiękowe (Śliwiński 2001). Emitują one hałas impulsowy<sup>3</sup> bardzo często o wysokich poziomach, przekraczających dopuszczalne wartości (Mikulski, Smagowska 2004; 2007; Młyński i in. 2012; Pawlaczyk-Łuszczynska i in. 2001).

Na podstawie wyników badań przeprowadzonych w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym wykazano, że pomiary hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy zgrzewarek ultradźwiękowych wymagają szczególnej uwagi (Radosz 2012). Brak powtarzalności impulsów zgrzewania wpływa znacznie na określane wartości poziomów równoważnych oraz wartości maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego. Różnice między impulsami zgrzewania w zależności od czasu pomiaru w ciągu zmiany roboczej mogą sięgać nawet 20 dB (rys. 4).



Rys. 4. Przebiegi czasowe percentyli 2,5 i 97,5 poziomu ciśnienia akustycznego w paśmie o częstotliwości środkowej 40 kHz w czasie impulsów zgrzewania w ciągu zmiany roboczej (Radosz 2012)

### WYZNACZANIE NIEPEWNOŚCI POMIARÓW

Podając wynik pomiaru wielkości fizycznej, jakim w przypadku hałasu ultradźwiękowego jest poziom ciśnienia akustycznego, konieczne jest podanie ilościowej informacji o jakości tego wyniku, aby korzystający z tego wyniku mógł oszacować jego wiarygodność. Podstawowymi koncepcjami wg przewodnika ISO/IEC Guide 98-3:2008 w wyznaczaniu niepewności są:

- wiedza o każdej wielkości, która wpływa na

wielkość mierzoną, z zasady nie jest pełna i może być wyrażona w postaci funkcji gęstości prawdopodobieństwa wartości dających się przypisać, na podstawie tej wiedzy, do danego parametru

- oczekiwana wartość funkcji gęstości prawdopodobieństwa jest przyjmowana jako najlepsze przybliżenie wartości danej wielkości

<sup>3</sup> Hałas impulsowy – hałas składający się z jednego lub wielu zdarzeń dźwiękowych o czasie trwania krótszym niż 1 s (Młyński i in. 2012).

- odchylenie standardowe funkcji gęstości prawdopodobieństwa jest przyjmowane jako niepewność standardowa związana z danym oszacowaniem
- funkcja gęstości prawdopodobieństwa jest oparta na wiedzy o wielkości mierzonej, o której można wnioskować na podstawie powtarzalnych pomiarów (niepewność typu A) i/lub naukowej ocenie opartej na wszystkich dostępnych informacjach o wszystkich możliwych wpływach na zmienność tej wielkości (niepewność typu B).

Przy szacowaniu niepewności, zgodnie z wy-

mienionymi założeniami, należy wziąć pod uwagę wszystkie składniki niepewności, które są istotne w danej sytuacji, z wykorzystaniem odpowiednich metod analizy. Według wytycznych PCA (EA-04/160) przy decydowaniu, czy składowa niepewności może być pominięta, należy uwzględnić: względne wielkości największej i najmniejszej składowej, wpływ poszczególnych składowych na podawaną niepewność oraz uzasadnienie stopnia dokładności dotyczącego wyznaczania niepewności, uwzględniającego wymagania: klienta, regulacji prawnych oraz innych wymagań zewnętrznych.

## PODSUMOWANIE

W zakresie aparatury pomiarowej analiza danych piśmiennictwa wykazała brak:

- jednoznacznie zdefiniowanych przyrządów przeznaczonych do pomiaru poziomu ciśnienia akustycznego w zakresie częstotliwości ultradźwiękowych
- ustalonych wymagań dla takich przyrządów oraz metod ich wzorcowania w ramach okresowej kontroli metrologicznej
- w pełni zapewnionej spójności pomiarowej w zakresie częstotliwości większych od 20 kHz.

Niemniej jednak można dokonać kontroli metrologicznej aparatury do pomiaru hałasu ultradźwiękowego na podstawie norm i przepisów adaptowanych z zakresu częstotliwości słyszalnych, określając:

- płaską charakterystykę częstotliwościową miernika/analizatora w polu swobodnym w zakresie częstotliwości co najmniej od 250 Hz lub 1 do 50 kHz
- tłumienie względne filtrów 1/3-oktawowych
- pomiar szumów własnych miernika/analizatora w pasmach 1/3-oktawowych o częstotliwościach środkowych z zakresu 10 ÷ 40 kHz
- błędy liniowości i zakres liniowości dla wybranych filtrów o skrajnych częstotliwościach środkowych, tj. 10 i 40 kHz
- błędy odpowiedzi miernika/analizatora na impulsy tonalne.

Na podstawie analizy aparatury pomiarowej w zakresie częstotliwości 10 ÷ 40 kHz wykazano, że w przypadku pomiarów hałasu ultradźwiękowego, należy wziąć pod uwagę:

- warunki środowiskowe
- akcesoria stanowiące wyposażenie mikrofonu, w szczególności siatki ochronne (zastosowanie siatki ochronnej może wpłynąć na wynik pomiaru nawet do 5 dB)
- regulację i wzorcowanie miernika/analizatora za pomocą kalibratora akustycznego
- przebieg charakterystyki częstotliwościowej miernika/analizatora w polu swobodnym
- charakterystykę kierunkowości mikrofonu
- wpływ szumów własnych na mierzone wartości poziomu ciśnienia akustycznego.

Z uwagi na brak aktualnych norm, wykonując pomiary hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy, należy powołać się na procedurę pomiarową opublikowaną w kwartalniku „Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy” (Pawłaczyk-Łuszczynska i in. 2001). Wymaga ona jednak aktualizacji nie tylko w zakresie wymienionych wcześniej wymagań dotyczących aparatury pomiarowej, lecz także metody pomiaru. Przede wszystkim należy w niej uwzględnić:

- liczbę próbek (pomiarów elementarnych) potrzebną do wyznaczenia uśrednionego równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego

- rozrzut wartości próbek
- czas trwania próbek
- rodzaj emitowanego hałasu (ustalony, impulsowy)
- położenie mikrofonu w czasie trwania pomiaru
- określenie niepewności pomiarów.

## PIŚMIENNICTWO

- Bezpieczeństwo i higiena pracy (2008) [Red. nauk.] D. Koradecka. Warszawa, CIOP-PIB.
- Dobrowolska D.* (2011) Analiza niepewności wzorcowania i pomiarów mierników poziomu dźwięku stosowanych do pomiarów akustycznych środowiska pracy. Praca doktorska. Warszawa, CIOP-PIB.
- Gedliczka A.* (2001) Atlas miar człowieka – dane do projektowania i oceny ergonomicznej. Warszawa, CIOP.
- Grzebyk M., Thiery L.* (2003) Confidence intervals for the mean of sound exposure levels. *Am. Indust. Hyg. Assoc. J.* 64, 640–645.
- Kirpluk M.* (2010) Niepewność w pomiarach poziomu dźwięku. Materiały XXXVIII Zimowej Szkoły Zwalczenia Zagrożeń Wibroakustycznych. Szczyrk.
- Mikulski W., Smagowska W.* (2004) Ocena ryzyka zawodowego związanego z narażeniem na hałas na stanowiskach pracy w odlewniach żeliwa. *Bezpieczeństwo Pracy* nr 5, 33–36.
- Mikulski W., Smagowska B.* (2007) Metoda oceny ryzyka zawodowego związanego z hałasem ultradźwiękowym. *Bezpieczeństwo Pracy* nr 3, 13–17.
- Młyński R., Żera J., Kozłowski E.* (2012) Zagrożenie hałasem impulsowym wytwarzanym w przemyśle oraz podczas strzałów i eksplozji. *Bezpieczeństwo Pracy* nr 3, 22–25.
- Pawlaczyk-Luszczyńska M., Koton J., Augustyńska D.* (2001) Hałas ultradźwiękowy – procedura pomiarowa. *Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy* nr 2(28), 89–95.
- Pawlaczyk-Luszczyńska M., Dudarewicz A., Śliwińska-Kowalska M.* (2007a) Źródła ekspozycji zawodowej na hałas ultradźwiękowy – ocena wybranych urządzeń. *Medycyna Pracy* 58(2), 105–116.
- Pawlaczyk-Luszczyńska M., Dudarewicz A., Śliwińska-Kowalska M.* (2007b) Theoretical predictions and actual hearing threshold levels in workers exposed to ultrasonic noise of impulsive character – a pilot study. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* vol. 13, nr 4, 409–418.
- Radosz J.* (2011) Hałas ultradźwiękowy na wybranym stanowisku pracy – wpływ położenia mikrofonu na mierzone wartości poziomu ciśnienia akustycznego. Materiały konferencyjne XXXIX Szkoły Zimowej Zwalczenia Zagrożeń Wibroakustycznych. Szczyrk.
- Radosz J.* (2012) Wpływ metody pomiaru na wyznaczone wartości poziomu ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy w zakresie 10 – 40 kHz. Materiały konferencyjne XL Szkoły Zimowej Zwalczenia Zagrożeń Wibroakustycznych. Szczyrk.
- Rozporządzenie ministra zdrowia z dnia 2 lutego 2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. *DzU* 1998 r., nr 21, poz. 94, z późn. zm.
- Smagowska B., Mikulski W.* (2008) Hałas ultradźwiękowy na stanowiskach pracy drążarek ultradźwiękowych – ocena ryzyka zawodowego. *Bezpieczeństwo Pracy* nr 10, 18–22.
- Śliwiński A.* (2001) Ultradźwięki i ich zastosowania. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne.
- Thiery L., Ognedal T.* (2008) Note about the statistical background of the methods used in ISO/DIS 9612 to estimate the uncertainty of occupational noise exposure measurements. *Acta Acust.* 94, 331–334.
- Normy serii PN-EN ISO 11200:2010 umożliwiające wyznaczenie poziomu ciśnienia akustycznego emisji na stanowiskach pracy i innych określonych miejscach.
- ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement.
- EA-04/16 Wytyczne EA dotyczące wyrażania niepewności w badaniach ilościowych. PCA 2004.
- PN-EN ISO/IEC 17025:2005 Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
- PN-ISO 9612:2004 Akustyka. Wytyczne do pomiarów i oceny ekspozycji na hałas w środowisku pracy.
- PN-EN 60651(U) Mierniki poziomu dźwięku.
- PN-EN 60804(U) Całkująco uśredniające mierniki poziomu dźwięku.
- PN-EN 61094-4:2000 Mikrofony pomiarowe – Część 4: Wymagania dla roboczych mikrofonów wzorcowych.
- PN-EN 61260:2000 Elektroakustyka – Filtry pasmowe o szerokości oktawy i części oktawy.
- PN-EN-61672-1:2005 Elektroakustyka -Mierniki poziomu dźwięku – Część 1: Wymagania
- PN-EN ISO 9612:2011 Akustyka – Wyznaczanie zawodowej ekspozycji na hałas – Metoda techniczna.
- PN-N-01321:1986 Hałas ultradźwiękowy – Dopuszczalne wartości poziomu ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy i ogólne wymagania dotyczące wykonywania pomiarów.