

Procedura pomiaru hałasu ultradźwiękowego¹

Procedure for measuring ultrasonic noise

mgr inż. JAN RADOSZ
e-mail: jarad@ciop.pl
Centralny Instytut Ochrony Pracy –
Państwowy Instytut Badawczy
00-701 Warszawa
ul. Czerniakowska 16

Słowa kluczowe: hałas, ultradźwięki, hałas ultradźwiękowy – źródła technologiczne i nietechnologiczne, pomiary, stanowisko pracy.

Keywords: noise, ultrasounds, ultrasonic noise – technological and non-technological sources, measurements, work station.

Streszczenie

Konieczność opracowania nowej procedury pomiaru hałasu ultradźwiękowego wykazała analiza: obowiązujących przepisów w zakresie hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy, metod pomiaru hałasu, wymagań metrologicznych dotyczących aparatury pomiarowej, a także szczegółowa identyfikacja czynników wpływających na wynik pomiaru. Na podstawie wyników badań prowadzonych w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym opracowano nową procedurę pomiarową hałasu ultradźwiękowego, zawierającą m.in.:

wymagania dotyczące aparatury pomiarowej, okresowej kontroli metrologicznej oraz dotyczące środowiska pomiarowego (temperatury, wilgotności, ciśnienia statycznego), a także opis postępowania podczas przeprowadzania pomiarów (zał. 1.).

W procedurze uwzględniono również stosowanie korekcji wyników pomiarów oraz metodę wyznaczania niepewności, przy zachowaniu spójności z normami obowiązującymi w zakresie częstotliwości słyszalnych oraz infradźwiękowych.

¹ Publikacja opracowana na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2011-2013 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Summary

The need to develop a new procedure for measuring ultrasonic noise was taken from the analysis results of current legislations to ultrasonic noise in a working environment, methods of measuring noise, metrological requirements for measuring equipment, and identification of factors affecting the measurement result.

A new ultrasonic noise measurement procedure was developed on the basis of the results of research conducted in the Central Institute for

Labour Protection-National Research Institute. The procedure includes requirements for measuring equipment, periodic metrological control, test environment (temperature, humidity, static pressure) and a description of proceeding during measurements.

The procedure also includes the use of correction for measuring results and the method of determination of measurement uncertainty in accordance with other acoustic ISO standards.

WPROWADZENIE

Hałas ultradźwiękowy definiuje się jako hałas, w którego widmie występują składowe o wysokich częstotliwościach słyszalnych i niskich ultradźwiękowych (Pawlaczyk-Łuszczynska i in. 2007). Znajduje się on w wykazie szkodliwych czynników w środowisku pracy, a podstawą oceny ekspozycji na ten rodzaj hałasu jest analiza widmowa w pasmach terejowych o częstotliwościach środkowych z przedziału $10 \div 40$ kHz.

Głównymi źródłami hałasu ultradźwiękowego w środowisku pracy są tzw. technologiczne urządzenia ultradźwiękowe niskich częstotliwości ultradźwiękowych, jak np.: myjki, zgrzewarki czy drążarki (Mikulski, Smagowska 2007), a także niektóre maszyny oraz inne urządzenia (tzw. nietechnologiczne źródła hałasu ultradźwiękowego) wytwarzające hałas, którego widmo, oprócz składowych słyszalnych, obejmuje także składowe ultradźwiękowe.

Hałas ultradźwiękowy jest jednym z czynników szkodliwych w środowisku pracy, a wymagania dotyczące przeprowadzania jego badań zostały określone w odpowiednich rozporządzeniach (rozporządzenie ministra zdrowia... 2011; rozporządzenie ministra pracy i polityki społecznej... 2014). Przepisy te obligują laboratoria badawcze wykonujące pomiary do określania budżetu niepewności wyników pomiarów. W zakresie hałasu ultradźwiękowego nie istnieją wytyczne, w jaki

sposób określać niepewność pomiarów oraz w jaki sposób uwzględniać czynniki, które mają na nią wpływ. Co więcej, brak jest aktualnych norm czy procedur dotyczących badania hałasu ultradźwiękowego. Z uwagi na wycofanie normy PN-N-01321:1986 (bez jej zastąpienia), a także wprowadzenie zmian w zakresie normy ISO 9612, wykonując pomiary hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy można było dotychczas powołać się jedynie na procedurę pomiarową opublikowaną w kwartalniku Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy (Pawlaczyk-Łuszczynska i in. 2001), która jednak nie zawierała wytycznych do określania niepewności pomiarów.

W artykule, dotyczącym metod pomiaru hałasu ultradźwiękowego stosowanych na stanowiskach pracy (Radosz, Krukowicz 2012), przedstawiono obszernie zagadnienie dostępnej w Polsce aparatury pomiarowej. Wskazano na brak jednoznacznie zdefiniowanych przyrządów przeznaczonych do pomiaru w tym zakresie, a także brak ustalonych wymagań dla takich przyrządów oraz metod ich wzorcowania. W odniesieniu do metody pomiaru wykazano brak szczegółowych wymagań w zakresie: liczby próbek i rozrzutu ich wartości, czasu trwania pomiarów, rodzaju emitowanego hałasu oraz położenia mikrofonu podczas trwania pomiaru.

Celem niniejszej procedury pomiarowej jest

ustalenie sposobu i trybu postępowania przy wyznaczeniu poziomów ciśnienia akustycznego hałasu ultradźwiękowego do potrzeb oceny narażenia na ten czynnik, tj. porównania wy-

ników z dopuszczalnymi wartościami najwyższych dopuszczalnych natężeń (NDN) hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy.

PROCEDURA POMIAROWA

Opracowaną procedurę pomiarową można zastosować do wszystkich rodzajów hałasu ultradźwiękowego, bez względu na charakter jego zmienności w czasie.

W niniejszej procedurze określono metodę pomiaru wielkości charakteryzujących hałas ultradźwiękowy w środowisku pracy. Procedura dotyczy wyznaczania równoważnych poziomów ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych w zakresie $10 \div 40$ kHz odniesionych do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy oraz maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych $10 \div 40$ kHz. Określono metodę uwzględniania poprawek związanych z wpływem charakterystyk metrologicznych aparatury oraz wpływem siatki ochronnej mikrofonu na wynik pomiaru.

Procedura umożliwi również określanie metody szacowania niepewności pomiarów w celu określenia jakości pomiarów.

Nowa procedura pomiarowa obejmuje:

- wymagania dotyczące aparatury pomiarowej oraz okresowej kontroli metrologicznej
- wymagania dotyczące środowiska pomiarowego
- opis postępowania w czasie przeprowadzania pomiarów
- zagadnienie korekcji wyniku pomiaru
- metodę wyznaczania niepewności pomiarów
- wytyczne sporządzenia raportu z pomiarów.

Na podstawie analizy piśmiennictwa oraz wyników przeprowadzonych badań przyjęto,

że na niepewność związaną z metodą pomiaru (próbkowaniem) będą miały wpływ dwie wartości – odchylenie standardowe oraz liczba próbek. Takie podejście, z wystarczającą dla praktyki dokładnością, określa niepewność związaną z określaniem estymaty równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego dla danej czynności z kilku pomiarów elementarnych oraz nie wymaga skomplikowanych obliczeń matematycznych. Przy tym założeniu przyjęto, że potrzeba co najmniej trzech pomiarów elementarnych do określenia uśrednionej wartości równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego, a największy rozrzut między wartościami próbek nie powinien przekraczać 3 dB (*Thiery, Ognedal* 2008). W takim przypadku, odchylenie standardowe wartości próbek wynosi maksymalnie około 1,5 dB, a różnice między wyznaczanymi estymatami można uznać za akceptowalne.

Na podstawie wyników badań omówionych w artykule *Radosz i Krukowicz* wykazano również, że pomiary hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy zgrzewarek ultradźwiękowych wymagają szczególnej uwagi (*Radosz, Krukowicz* 2012). Duże rozrzuty wartości poziomów ciśnienia w czasie trwania impulsów wpływają nie tylko na dużą niepewność wyznaczania wartości równoważnych, lecz przede wszystkim na niepewność wyznaczania wartości poziomów maksymalnych.

Na podstawie wyników badań obejmujących m.in.: identyfikację czynników wpływających na niepewność pomiaru hałasu ultradźwiękowego związanych z aparaturą pomiarową, określenie możliwości kontroli metrologicznej aparatury stosowanej do pomiaru poziomu ciśnienia akustycznego w zakresie

częstotliwości $10 \div 40$ kHz oraz badanie czynników wpływających na niepewność pomiarów wynikających z metody pomiarowej, położenia mikrofonu podczas pomiaru oraz stosowania dodatkowych akcesoriów aparatury pomiarowej, pozwoliły na opracowanie nowej procedury pomiarowej przedstawionej w tym artykule.

Ze względu na konieczność całościowego ujęcia wszystkich elementów opracowanej

procedury, ważnych w celu zapewnienia jej operatywności w praktycznym jej stosowaniu, w artykule znalazły się także znane sformułowania i definicje przeniesione z norm, między innymi dotyczących pomiarów hałasu w zakresie słyszalnym odpowiednio zaadaptowane do zakresu częstotliwości reprezentujących hałas ultradźwiękowy.

ANALIZA WYNIKÓW SZACOWANIA NIEPEWNOŚCI POMIARÓW

W celu weryfikacji nowej procedury pomiarowej w zakresie szacowania niepewności pomiarów przeprowadzono badania na trzydziestu trzech stanowiskach pracy, na których występował hałas ultradźwiękowy. Do badań wybrano stanowiska pracy zgrzewarek ultradźwiękowych, biorąc pod uwagę:

- procedury pomiarowej hałasu o charakterze impulsowym w zakresie $10 \div 40$ kHz
- brak powtarzalności impulsów zgrzewania, co przekłada się na większe niepewności pomiarów niż w przypadku innych źródeł hałasu ultradźwiękowego
- rodzaj oraz powszechność występowania na stanowiskach pracy źródeł hałasu ultradźwiękowego.

Pomiary przeprowadzono zgodnie z wymaganiami opracowanej procedury pomiarowej. Dzień pracy na badanych stanowiskach został podzielony na czynności rozróżnialne pod względem hałasu ultradźwiękowego, a łączny czas ich trwania

obejmował pełną zmianę roboczą. Czas trwania poszczególnych czynności (czas narażenia) ustalano, wykorzystując harmonogramy produkcji oraz rejestrowany czas wykonywania poszczególnych operacji. Wykonywano co najmniej trzy pomiary każdej wyróżnionej czynności. W przypadku czynności cyklicznych (czynność zgrzewania), czas trwania każdego pomiaru obejmował pięć pełnych cykli wykonywanej czynności na każdy pomiar. Jeżeli wyniki trzech pomiarów równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego w dominującym paśmie częstotliwości różniły się między sobą o 3 dB lub więcej, to przeprowadzono dodatkowe trzy pomiary danej czynności. Pomiary były wykonywane podczas pracy pracownika na stanowisku.

Do pomiarów wykorzystano miernik/analizator dźwięku SVAN 912AE. Pomiary wykonano z zastosowaniem siatki ochronnej mikrofonu (G.R.A.S.S.). Wyniki skorygowano o poprawki przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1.

Korekcja wyniku pomiaru zastosowana w badaniach weryfikacyjnych

Poprawki / Częstotliwość środkowa pasma tercjowego	10 kHz	12,5 kHz	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
$K_{ap,fi}$ (świadczenie wzorcowania), dB	1,02	1,11	0,80	0,50	0,24	0,22	1,44
$K_{g,fi}$ (siatka ochronna G.R.A.S.), dB	0,4	0,8	1,2	1,6	2,3	3,0	3,7

Objaśnienia:

$K_{ap,fi}$ – poprawka uwzględniająca łączny wpływ charakterystyk metrologicznych aparatury na wynik pomiaru, w dB; poprawka wyznaczana podczas kontroli metrologicznej dla każdego pasma tercjowego jako suma wartości charaktery-

styki częstotliwościowej mikrofonu (ze znakiem przeciwnym) i tłumienia względnego filtru,
 $K_{g,fi}$ – poprawka uwzględniająca wpływ na wynik pomiaru stosowania siatki ochronnej mikrofonu, w dB.
 Korekcję wyników pomiarów wyznaczono na podstawie wzoru:

$$L_{fi} = L_{fi}' + K_{ap,fi} - K_{g,fi}$$

gdzie:

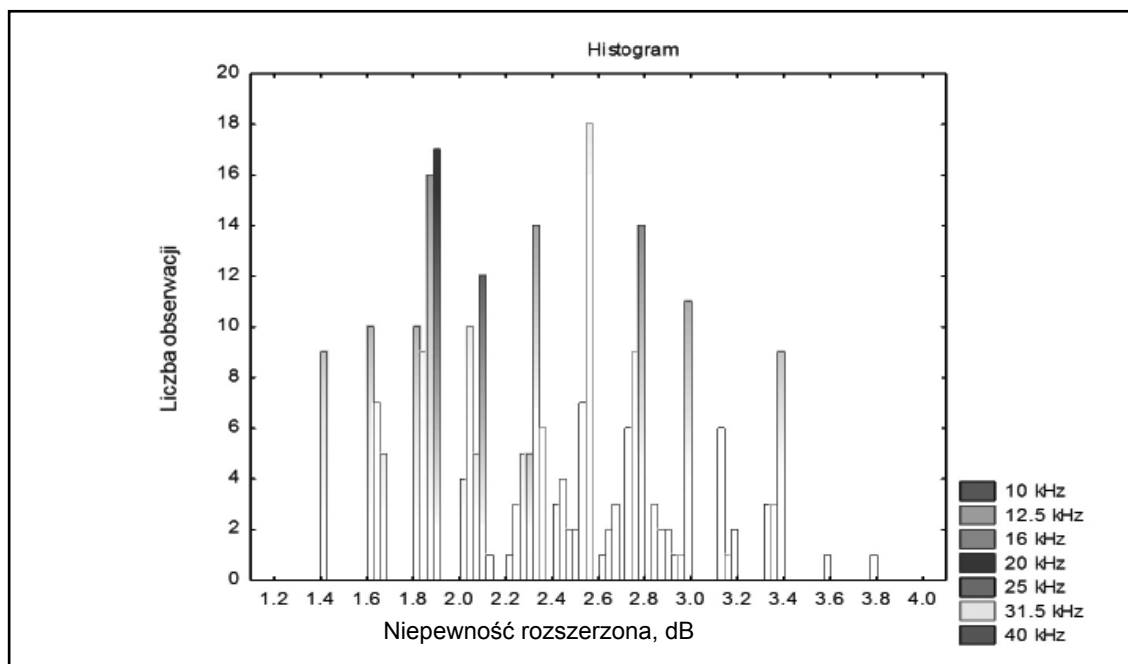
L_{fi}' – wskazanie miernika/analizatora w i -tym pasmie tercjowym, w dB.

Mikrofon w czasie wykonywania pomiarów był umieszczany w odległości około 10 cm od wejścia do kanału ucha zewnętrznego, po stronie ucha narażonego na wyższe wartości poziomu ciśnienia akustycznego oraz skierowany w stronę źródła emitującego hałas ultradźwiękowy.

Warunki środowiskowe na wszystkich stanowiskach pracy spełniały wymagania określone w procedurze pomiarowej.

Na podstawie wyników badań weryfikacyjnych wykazano, że mniejsze wartości niepewności pomiarów uzyskuje się w dominujących pasmach tercjowych widma. W przypadku pasma o częstotliwości środkowej 20 kHz (częstotliwość pracy sonotrody

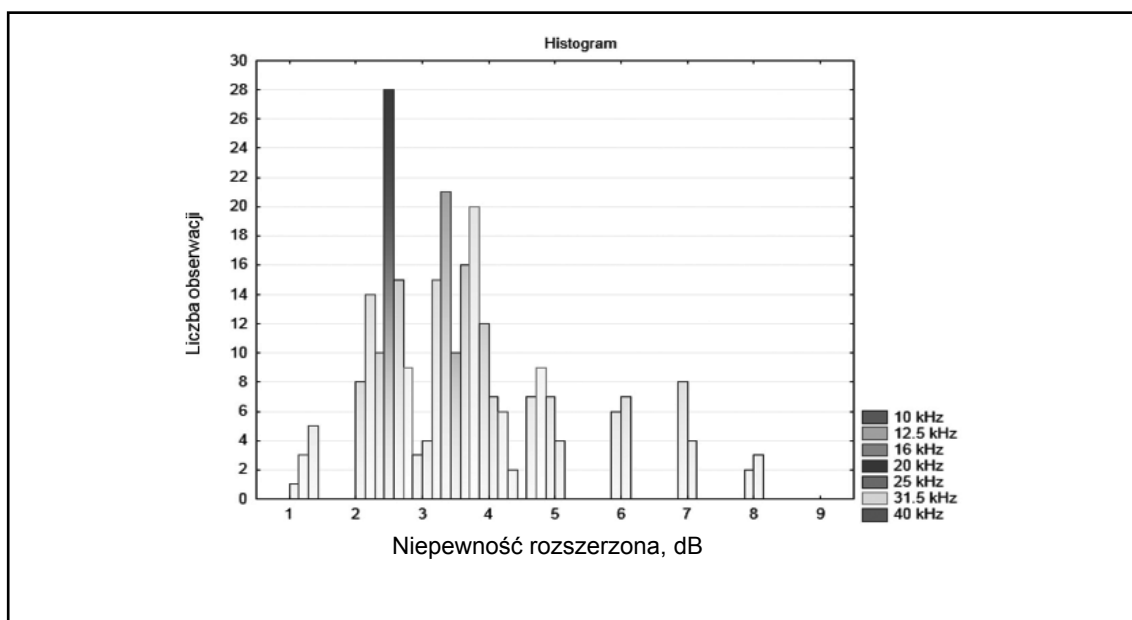
zgrzewarek) niepewność rozszerzona w większości przypadków nie przekraczała 2 dB dla poziomów równoważnych (rys. 1.) i 2,5 dB dla poziomów maksymalnych (rys. 2.). Znacznie większe wartości niepewności (sięgające 4 dB dla poziomów równoważnych i 8 dB dla poziomów maksymalnych) odnotowano dla częstotliwości 12,5 kHz. Ma to znaczenie przy porównywaniu wyników pomiarów z wartościami dopuszczalnymi. W pasmach, które nie są dominujące, poziomy ciśnienia akustycznego z reguły są znacznie poniżej wartości dopuszczalnych, dlatego duże wartości niepewności mają tam mniejsze znaczenie przy interpretacji wyników.



Rys. 1. Histogram niepewności rozszerzonej równoważnych poziomów ciśnienia akustycznego w pasmach częstotliwości na badanych stanowiskach pracy zgrzewarek

Wykazano również, że na większości stanowisk pracy związanych z obsługą zgrzewarek ultradźwiękowych konieczne jest przeprowadzenie sześciu pomiarów dla czynności związanych z pracą urządzenia. Porównano wyniki

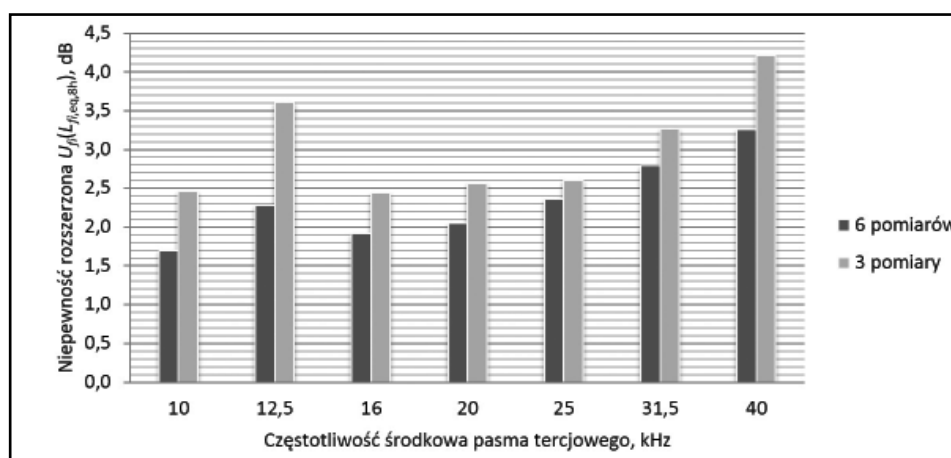
wyznaczonych niepewności na stanowisku pracy zgrzewarki ultradźwiękowej, przeprowadzając trzy pomiary, a następnie sześć pomiarów w czasie czynności zgrzewania (rys. 3. i rys. 4.).



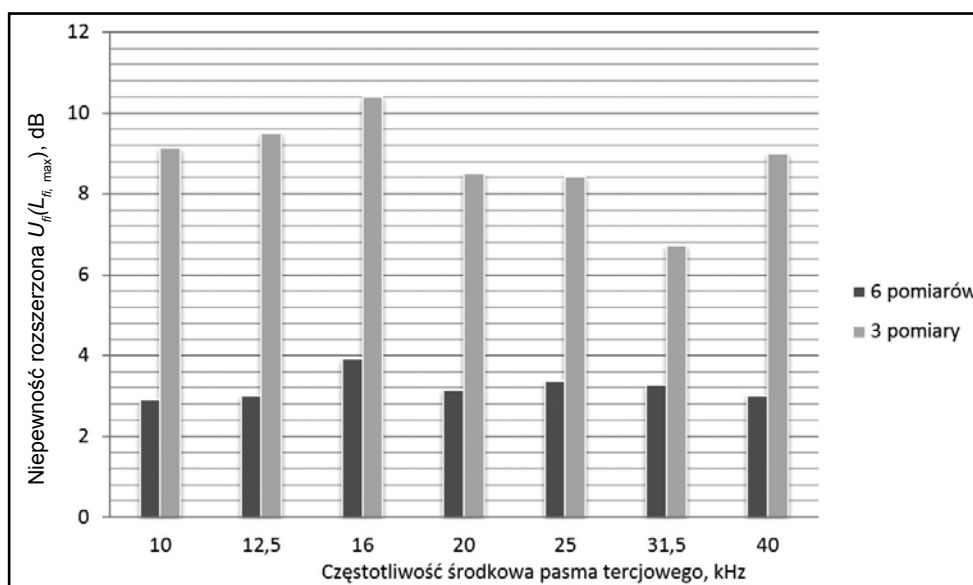
Rys. 2. Histogram niepewności rozszerzonej maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego w pasmach częstotliwości na badanych stanowiskach pracy zgrzewarek

Duże rozrzuty niepewności rozszerzonej maksymalnego poziomu ciśnienia (sięgające w niektórych przypadkach nawet 8 dB, w pasmach, które nie są dominujące) oraz mała liczba próbek wpływają na duże wartości niepewności rozszerzonej, dlatego w przypadku źródeł hałasu

ultradźwiękowego o charakterze impulsowym, w większości przypadków konieczne jest przeprowadzenie trzech dodatkowych pomiarów, co pozwala na dokładniejsze wyznaczanie wartości maksymalnej oraz obniżenie wartości niepewności rozszerzonej nawet o 6 dB.



Rys. 3. Porównanie wartości niepewności rozszerzonej dla różnej liczby pomiarów równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego na wybranym stanowisku pracy zgrzewania ultradźwiękowego



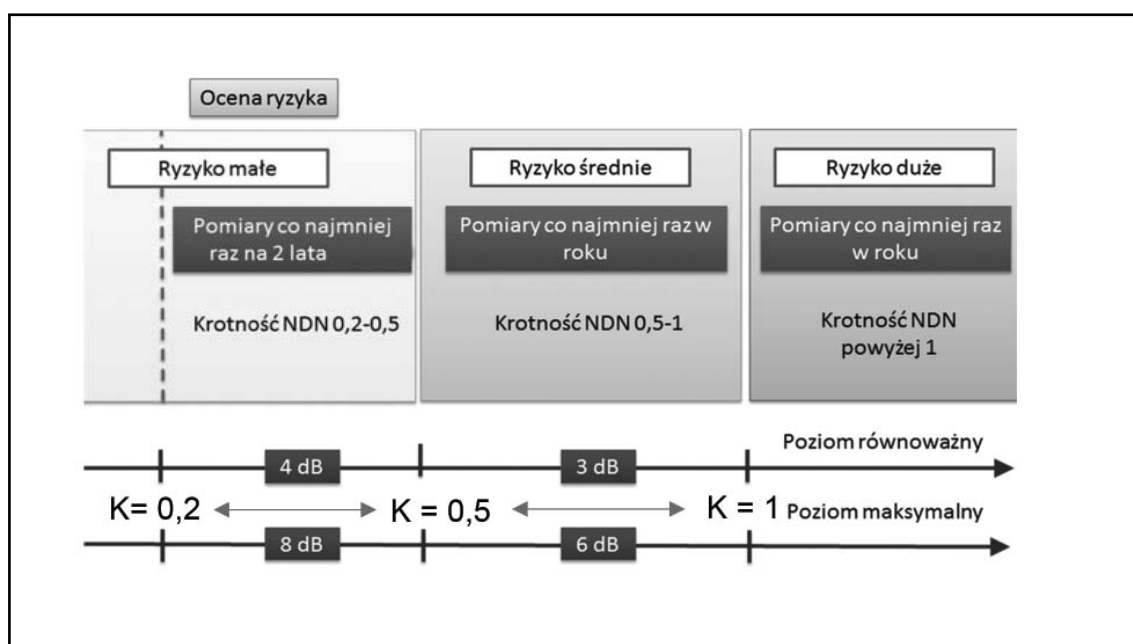
Rys. 4. Porównanie wartości niepewności rozszerzonej dla różnej liczby pomiarów maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego na wybranym stanowisku pracy zgrzewania ultradźwiękowego

Zgodnie z rozporządzeniem ministra zdrowia z dnia 2.02.2011 r. w sprawie badań oraz pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy, pomiary hałasu ultradźwiękowego w środowisku pracy przeprowadza się:

- co najmniej raz na dwa lata, jeżeli podczas ostatniego badania i pomiaru

stwierdzono natężenie czynnika powyżej 0,2 do 0,5 wartości najwyższego dopuszczalnego natężenia (NDN)

- co najmniej raz w roku, jeżeli podczas ostatniego badania i pomiaru stwierdzono natężenie czynnika powyżej 0,5 wartości NDN.



Rys. 5. Częstotliwość przeprowadzania pomiarów w zależności od wyznaczonej krotności wartości NDN

Analizując ocenę ryzyka zawodowego powstania negatywnych skutków działania hałasu ultradźwiękowego na podstawie krotności wartości NDN oraz wyniki badań weryfikacyjnych, stwierdzono, że uwzględnienie niepewności (górną granicą przy 95-procentowym poziomie ufności), w przypadkach wyników pomiarów na granicy wartości NDN, nie jest znaczące dla ewentualnej zmiany ustaleń dotyczących częstotliwości przeprowadzania pomiarów (rys. 5.). Rozszerzone niepewności pomiarów w dominujących pasmach tercjowych widma (w których może wystąpić przekroczenie wartości NDN) mają wartość poniżej 3 dB dla równoważnych poziomów ciśnienia akustycznego oraz poniżej 6 dB dla maksymalnych pozio-

mów ciśnienia akustycznego.

Biorąc pod uwagę ustalenia zawarte w normie PN-EN ISO 9612, według których wynik pomiaru należy podawać jako dwie odrębne wartości (wartość zmierzona oraz wartość niepewności pomiaru), a także fakt, że wartości niepewności pomiarów mogą zmieniać się w zależności od wielu czynników, przyjmuje się wartości zmierzone do porównania wyników pomiarów z wartościami NDN. Wartości niepewności służą jedynie określeniu jakości pomiarów, co zostało ustalone na 67. posiedzeniu Międzyresortowej Komisji ds. Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy w dniu 28.10.2011 r.

PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy: obowiązujących przepisów w zakresie hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy, metod pomiaru, wymagań metrologicznych aparatury pomiarowej oraz wyników badań prowadzonych w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym w tym zakresie, opracowano nową procedurę pomiarową hałasu ultradźwiękowego zawierającą m.in.: wymagania dotyczące aparatury pomiarowej i okresowej kontroli metrologicznej, a także środowiska pomiarowego (temperatury, wilgotności, ciśnienia statycznego), opis postępowania w czasie przeprowadzania pomiarów, zagadnienie korekcyjności wyniku pomiaru (siatka ochronna, charakterystyka częstotliwościowa mikrofonu) oraz metodę wyznaczania niepewności pomiarów (typu A i typu B przy 95-procentowym poziomie ufności).

Na podstawie wyników badań weryfikacyjnych przeprowadzonych na trzydziestu trzech

stanowiskach pracy wykazano, że najmniejsze niepewności pomiarów uzyskuje się w dominujących pasmach tercjowych (w przypadku zgrzewarek to częstotliwość pracy sonotrody). Wykazano również, że na większości stanowisk pracy związanych z obsługą zgrzewarek ultradźwiękowych, konieczne jest przeprowadzenie większej liczby pomiarów dla czynności związanych z pracą urządzenia, co pozwala na dokładniejsze wyznaczenie wartości maksymalnej oraz obniżenie wartości niepewności rozszerzonej.

Nowa procedura pomiarowa została przedstawiona Zespołowi Ekspertów ds. Czynników Fizycznych (Grupa ds. Hałasu) oraz Międzyresortowej Komisji do spraw Najwyższych Dopuszczalnych Stężeń i Natężeń Czynników Szkodliwych dla Zdrowia w Środowisku Pracy. Komisja przyjęła przedstawioną procedurę pomiarową na 76. posiedzeniu w dniu 22.10.2014 r.

PIŚMIENNICTWO

- Dobrowolska D., Radosz J.* (2013) The influence of apparatus parameters on the uncertainty of ultrasonic noise measurement. Materiały konferencyjne Noise Control 2013, Ryn, 26-29.05.2013.
- Gedliczka A.* (2001) Atlas miar człowieka. Warszawa, CIOP-PIB.
- Kirpluk M.* (2010) Niepewność w pomiarach poziomu dźwięku. Materiały XXXVIII Zimowej Szkoły Zwalczenia Zagrożeń Wibroakustycznych, Szczyrk.
- Pawlaczyk-Łuszczynska M., Koton J., Śliwińska-Kowalska M., Augustyńska D., Kamedula M.* (2001) Hałas ultradźwiękowy – dokumentacja proponowanych wartości dopuszczalnych poziomów narażenia zawodowego. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2(28), 55–88.
- Pawlaczyk-Łuszczynska M., Koton J., Augustyńska D.* (2001) Hałas ultradźwiękowy – procedura pomiarowa. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 2(28), 89–95.
- Radosz J.* (2012) Methodology issues of ultrasonic noise exposure assessment. Noise Control Engineering Journal 60, 6, 645–654.
- Radosz J.* (2014) Ultrasonic noise exposure assessment – uncertainty due to instrumentation. Noise Control Engr. J. 62 (4), 168–195.
- Radosz J., Krukowicz T.* (2012) Aparatura i metody pomiaru hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy. Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy 4(74), 5–15.
- Radosz J.* (2012) Wpływ metody pomiaru na wyznaczane wartości poziomu ciśnienia akustycznego na stanowiskach pracy w zakresie 10 ÷ 40 kHz. Szczyrk, XL Zimowa Szkoła Zwalczenia Zagrożeń Wibroakustycznych.
- Radosz J.* (2012) Hałas ultradźwiękowy – wyznaczanie poziomu ekspozycji na stanowiskach pracy obsługi zgrzewarek ultradźwiękowych. Boszkowo, 59. Otwarte Seminarium z Akustyki.
- Rudno-Rudziński K.* (2007a) Ocena niepewności pomiaru poziomów maksymalnych hałasu w środowisku pracy. Gliwice-Ustroń, Materiały XXXV Zimowej Szkoły Zwalczenia Zagrożeń Wibroakustycznych.
- Rudno-Rudziński K.* (2007b) Why and how to determine peak workplace noise pressure measurement uncertainty. Revista de Acustica vol. 38, spec. iss. 3/4.
- Smagowska B.* (2011) Hałas ultradźwiękowy na stanowiskach maszyn i urządzeń ze sprężonym powietrzem. Bezpieczeństwo Pracy 7-8, 38–41.
- Smagowska B.* (2012) Hałas ultradźwiękowy na wybranych stanowiskach pracy maszyn włókienniczych – ocena ryzyka zawodowego. Przegląd Włókienniczy – Włókno, Odzież i Skóra 2, 42–46.
- Smagowska B., Mikulski W.* (2012) Badania laboratoryjne wpływu hałasu ultradźwiękowego na funkcje poznawcze i sprawność psychomotoryczną człowieka. Bezpieczeństwo Pracy 5, 24–26.
- Smagowska B.* (2013) Ultrasonic noise sources in the work environment. Archives of Acoustics, vol. 38, 2, 169–176.
- Smagowska B., Pawlaczyk-Łuszczynska M.* (2013) Effects of action of ultrasonic noise on the human body – a bibliographic review. International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE), vol. 19, 2, 195–202.
- Smagowska B.* (2013) Objective and subjective study of noise exposure in the frequency range from 10 kHz to 40 kHz. Archives of Acoustics, vol. 38, 4, 559–563.
- Smagowska B.* (2014) Hałas ultradźwiękowy na wybranych stanowiskach pracy w hucie stali. Hutnik. Wiadomości hutnicze 6, 397–401.
- 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 Acustica 94, 331–334.
- Rozporządzenie ministra pracy i polityki społecznej z dnia 6.06.2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU 2014, poz. 817.
- Rozporządzenie ministra zdrowia z dnia 2.02.2011 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. DzU 2011, nr 33, poz. 166.
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10.09.1996 r. w sprawie wykazu prac wzbronionych kobietom. DzU 1996, nr 114, poz. 545; zm. DzU 2002, nr 127, poz. 1092.
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 24.08.2004 r. w sprawie wykazu prac wzbronionych młodocianym i warunków ich zatrudniania przy niektórych z tych prac. DzU nr 200, poz. 2047; zm.: DzU 2005, nr 136, poz. 1145.

- PN-EN ISO/IEC 17025:2005. Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących.
- PN-N-01307. Hałas. Dopuszczalne wartości hałasu w środowisku pracy. Wymagania dotyczące przeprowadzania pomiarów.
- 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 61672-2:2005. Elektroakustyka – Mierniki poziomu dźwięku – Część 2: Badania typu.
- PN-EN 61672-3:2007. Elektroakustyka – Mierniki poziomu dźwięku – Część 3: Badania okresowe.
- PN-EN ISO 9612:2011. Akustyka – Wyznaczanie zawodowej ekspozycji na hałas - Metoda techniczna.
- PN-EN 60942:2005. Elektroakustyka – Kalibratory akustyczne.
- PN-EN 61094-4:2000. Mikrofony pomiarowe – Część 4: Wymagania dla roboczych mikrofonów wzorcowych.
- PN-EN 61260:2000. Filtry pasmowe o szerokości oktawy i części oktawy.
- ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995).
- Technical Documentation, Microphone Handbook, Volume 1: Theory, Brüel&Kjær, July 1996, BE 1447–11.
- EA-04/16 Wytyczne EA dotyczące wyrażania niepewności w badaniach ilościowych. PCA, 2004.

PROCEDURA POMIAROWA HAŁASU ULTRADŹWIĘKOWEGO

Powołania normatywne

Do stosowania opracowanej procedury są niezbędne wymienione dokumenty powołane:

- PN-EN ISO 9612:2011. Akustyka – Wyznaczanie zawodowej ekspozycji na hałas – Metoda techniczna
- ISO/IEC Guide 98-3:2008. Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM: 1995)
- PN-EN 60942:2005. Elektroakustyka – Kalibratory akustyczne
- PN-EN 61672-1:2005. Elektroakustyka – Mierniki poziomu dźwięku – Część 1.: Wymagania
- PN-EN 61260:2000. Elektroakustyka – Filtry pasmowe o szerokości oktawy i części oktawy
- PN-EN 61094-4:2000. Mikrofony pomiarowe – Część 4.: Wymagania dla roboczych mikrofonów wzorcowych.

Definicje

W niniejszym artykule przyjęto następujące definicje:

- hałas ultradźwiękowy – hałas, w którego widmie występują składowe o wysokich częstotliwościach słyszalnych i niskich ultradźwiękowych (10 ÷ 40 kHz)
- poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym L_{fi} w dB – poziom ciśnienia akustycznego mierzony z zastosowaniem filtru tercjowego o częstotliwości środkowej f_i
- równoważny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym $L_{fi,eq,T}$ w dB
- dziesięć logarytmów dziesiętnych z ilorazu uśrednionego w czasie kwadratu ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie

tercjowym, p_{fi} , w określonym przedziale czasowym T (rozpoczynającym się w chwili t_1 i kończącym się w chwili t_2) i kwadratu wartości ciśnienia odniesienia, p_0 .

[1]

$$L_{fi,eq,T} = 10 \lg \left[\frac{\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} p_{fi}^2(t) dt}{p_0^2} \right],$$

gdzie:

wartość ciśnienia odniesienia, p_0 , wynosi 20 μ Pa.

U w a g a

Pomiar równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych przeprowadza się za pomocą analizatora częstotliwości przy włączonej opcji uśredniania linowego (np. Averaging: LIN) w czasie T , bez stosowania korygowania charakterystykami częstotliwościowymi (np. A lub C).

- równoważny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym odniesiony do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy, $L_{fi,eq,8h}$, w dB, określony na podstawie wzoru:

[2]

$$L_{fi,eq,8h} = L_{fi,eq,T_e} + 10 \log \left[\frac{T_e}{T_0} \right],$$

gdzie:

L_{fi,eq,T_e} – równoważny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym w przedziale czasowym T_e ,

T_e – czas narażenia w czasie dnia pracy, w godzinach,

T_0 – czas odniesienia, $T_0 = 8$ h.

- równoważny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym pasmie tercjowym odniesiony do przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy, $L_{fi,eq,w}$ w dB, określony jest na podstawie wzoru:

$$L_{fi,eq,w} = 10 \log \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N 10^{0,1L_{fi,eq,8h,n}} \right], \quad [3]$$

gdzie:

- n – kolejny dzień roboczy w rozważanym tygodniu,
- N – liczba dni roboczych w rozważanym tygodniu.
- maksymalny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym pasmie tercjowym, $L_{fi,max}$ w dB
- maksymalna wartość skuteczna poziomu ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym występująca w czasie obserwacji.

U w a g a

1. Pomiar maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych przeprowadza się za pomocą analizatora częstotliwości przy włączonej opcji uśredniania wykładniczego (Averaging: EXP) z czasem uśredniania równym 0,125 s (odpowiadającym stałej czasowej FAST), bez stosowania filtrów (Filter: LIN) oraz z liniową detekcją sygnału (RMS Det.: LIN). W celu ułatwienia odczytu wartości maksymalnej można użyć (o ile jest dostępna) funkcji analizatora zatrzymującej odczyt na maksymalnej wartości poziomu ciśnienia akustycznego w czasie danego pomiaru (Averaging: HLD MAX).

2. Alternatywnym sposobem wyznaczania wartości maksymalnej jest odczyt zapisanych do pamięci miernika przebiegów czasowych poziomu ciśnienia akustycznego z krokiem próbkowania równym 0,125 s (odpowiadającym stałej czasowej FAST).

Aparatura pomiarowa

Miernik/analizator poziomu dźwięku

Pomiary hałasu ultradźwiękowego należy przeprowadzać za pomocą miernika/analizatora, który:

- spełnia wymagania zawarte w normie PN-EN-61672-1:2005 oraz w normie PN-EN 61260:2000 w zakresie częstotliwości do 20 kHz dla przyrządów pomiarowych klasy 1.
- jest wyposażony w filtry pasmowe 1/3-oktawowe o częstotliwościach środkowych z zakresu co najmniej 10 ÷ 40 kHz, spełniające wymagania zawarte w normie PN-EN 61260:2000
- jest wyposażony w mikrofon pola swobodnego spełniający wymagania zawarte w normie PN-EN 61094-4:2000.

Do pomiarów powinno się stosować mikrofon bez siatki ochronnej. W przypadku stosowania mikrofonu z siatką ochronną, należy wprowadzić odpowiednią korekcję wyniku pomiaru (rozdział: „Korekcja wyniku pomiaru”).

U w a g a

Pomiary hałasu ultradźwiękowego na stanowiskach pracy nie wymagają na ogół stosowania osłon przeciwwietrznych, czy też korygujących osłon stożkowych (*nosecone*). Jeżeli jednak zasłaby taka potrzeba, powinna być znana charakterystyka częstotliwościowa mikrofonu w rozpatrywanym zakresie częstotliwości w konfiguracji z taką osłoną, z uwagi na jej duży wpływ na wynik pomiaru. W takim przypadku należy zastosować odpowiednią korekcję wyniku pomiaru.

Kalibrator akustyczny

Kalibrator powinien spełniać wymagania zawarte w normie PN-EN 60942:2005 dla przyrządów klasy 1. Kalibrator powinien być również wyposażony w adapter dostosowujący średnicę jego komory sprzęgającej do wymiarów mikrofonu o średnicy 1/4" cala.

Okresowa kontrola metrologiczna

Kontrola metrologiczna, obejmująca sprawdzanie zgodności aparatury pomiarowej (miernika/analizatora poziomu dźwięku i kalibratora akustycznego) m.in. z wymaganiami zawartymi w normach: PN-EN 61672-1:2005, PN-EN 61260:2000 oraz PN-EN 60942:2005, powinna być okresowo przeprowadzana w akredytowanych laboratoriach wzorcujących.

Okresowa kontrola metrologiczna miernika/analizatora poziomu dźwięku w rozpatrywanym zakresie częstotliwości powinna obejmować co najmniej:

- wzorcowanie mikrofonu, obejmujące wyznaczenie jego charakterystyki częstotliwościowej w polu swobodnym
- wzorcowanie tercjowych filtrów pasmowych (charakterystyki tłumienia, błędy oraz zakres liniowości)
- pomiar szumów własnych
- wyznaczenie błędów związanych z uśrednianiem liniowym i uśrednianiem wykładniczym.

Okresową kontrolę metrologiczną aparatury pomiarowej należy przeprowadzać w odstępach czasu nie przekraczających 2 lat.

Pomiary

Postanowienia ogólne

Pomiary hałasu ultradźwiękowego są przeprowadzane w miejscu przebywania pracownika, definiując wykonywane przez niego czynności oraz zapewniając reprezentatywne warunki: eksploatacji urządzeń, maszyn czy innych narzędzi, będących źródłem tego hałasu. Jeśli warunki eksploatacji lub warunki pracy odbiegają od normalnej sytuacji, to powinno być to zarejestrowane i umieszczone w sprawozdaniu.

Stanowiska pracy związane z hałasem ultradźwiękowym, zwłaszcza technologicznych urządzeń ultradźwiękowych, z reguły są stacjonarnymi stanowiskami pracy, a wykonywane na nich czynności mogą być podzielone na

wyraźne przedziały czasowe zależne od pracy tych urządzeń. 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 się przeprowadza oddzielne pomiary.

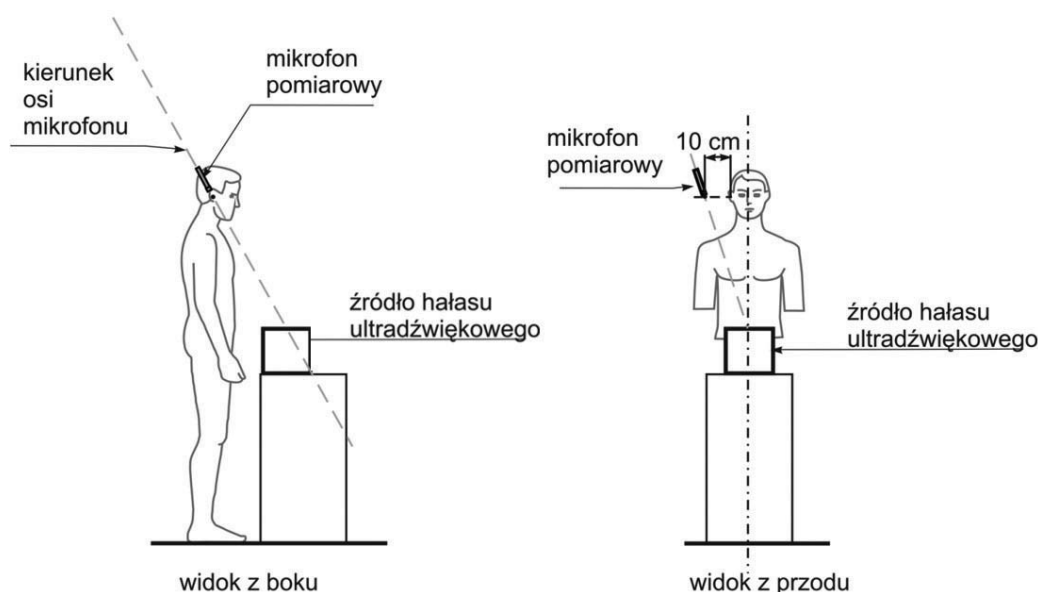
Przed pomiarami należy przeprowadzić w miejscu pomiaru kalibrację. Po przeprowadzeniu pomiarów należy sprawdzić tor pomiarowy. Jeżeli odczyt dla częstotliwości testowej kalibratora po przeprowadzeniu pomiarów różni się od odczytu dla tej częstotliwości przed pomiarami więcej niż o 0,5 dB, to wyniki tych pomiarów powinny zostać odrzucone.

Pomiary powinny być wykonywane w obecności pracownika na stanowisku pracy. Mikrofon w czasie wykonywania pomiarów powinien być umieszczony w odległości około 10 cm od wejścia do kanału ucha zewnętrznego, po stronie ucha narażonego na wyższe wartości poziomu ciśnienia akustycznego. Zaleca się wyznaczenie charakterystyki kierunkowości źródła hałasu ultradźwiękowego lub co najmniej zbadanie pola akustycznego wokół źródła w takim stopniu, aby skierować mikrofon w stronę największej wartości emitowanego hałasu przez źródło (rys. 1.).

Pomiary hałasu ultradźwiękowego powinny być wykonywane w następujących warunkach środowiskowych:

- temperatura 13 ÷ 33 °C
- ciśnienie statyczne 970 ÷ 1050 hPa
- zakres wilgotności względnej 25 ÷ 90%.

W przypadku warunków środowiskowych, które nie odpowiadają przyjętym wymaganiom, należy informację o takich warunkach zamieścić w sprawozdaniu z badań.



Rys. 1. Położenie mikrofonu w czasie pomiaru

Pomiary z podziałem na czynności

Czas pracy na badanym stanowisku powinien być podzielony na czas trwania poszczególnych czynności rozróżnialnych ze względu na hałas ultradźwiękowy. Wszystkie istotne udziały hałasu ultradźwiękowego powinny być uwzględnione, a łączny czas trwania poszczególnych czynności powinien obejmować pełną zmianę roboczą.

Czas trwania poszczególnych czynności, T_m , powinien być wyznaczony na podstawie:

- wywiadów z pracownikami i osobami nadzorującymi stanowiska pracy
- obserwacji i pomiarów czasu trwania czynności podczas pomiarów
- danych dotyczących działania typowych źródeł hałasu (np. procesów produkcyjnych, urządzeń, czynności wykonywanych na stanowisku pracy i w jego otoczeniu).

U w a g a

Czas narażenia często bywa powiązany z liczbą cykli wykonywanej pracy. Przykładem są stanowiska pracy obsługi zgrzewarek ultradźwiękowych, gdzie narażenie na hałas ultradźwiękowy jest ściśle powiązane z liczbą zgrzewanych elementów w czasie pracy pracownika na stanowisku oraz poziomami ciśnienia akustycznego podczas zgrzewania.

więkowy jest ściśle powiązane z liczbą zgrzewanych elementów w czasie pracy pracownika na stanowisku oraz poziomami ciśnienia akustycznego podczas zgrzewania.

W takich przypadkach najdokładniejszym sposobem oszacowania czasu trwania danego przedziału narażenia (czynności) jest wykorzystanie harmonogramów produkcji. Przy takim podejściu należy wykonać kilka elementarnych pomiarów obserwacji, przy założeniu, że rejestrowana jest określona liczba cykli zgrzewania. Na podstawie czasu trwania określonej liczby cykli, wyznacza się średnią wartość czasu trwania jednego cyklu zgrzewania. Następnie wyznacza się łączny czas trwania cykli zgrzewania w czasie zmiany roboczej na podstawie liczby cykli określonych w harmonogramie produkcji. Dzięki temu możemy określić czas trwania czynności:

[4]

$$T_m = n \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J \frac{T_{m,j}}{n_j},$$

gdzie:

T_m – czas trwania m -tej czynności, w: h, min lub s,

$T_{m,j}$ – czas trwania j -tej obserwacji (próbki) dla m -tej-czynności czasu, w: h, min lub s,

n_j – liczba cykli zgrzewania w czasie j -ty pomiaru czasu,

J – ogólna liczba pomiarów dla m -tej czynności,

n – całkowita liczba wykonanych elementów dla m -tej czynności odczytana z harmonogramu produkcji.

Dla każdej czynności należy wykonać co najmniej trzy pomiary. Zaleca się wykonywanie pomiarów w różnych odcinkach czasu trwania danej czynności, aby uwzględnić ewentualną zmienność warunków akustycznych.

W każdym wyróżnionym przedziale narażenia należy tak dobrać czas pomiaru, aby zostały uwzględnione czasowe zmiany poziomu ciśnienia akustycznego.

W przypadku czynności cyklicznych, np. zgrzewania przewodów, czas trwania każdego pomiaru powinien obejmować co najmniej pięć pełnych cykli wykonywanej czynności. Kiedy hałas ultradźwiękowy ma charakter nieustalony, zaleca się, aby czas trwania poszczególnych pomiarów wynosił co najmniej 5 min.

Jeżeli wyniki trzech pomiarów równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego w dominującym paśmie częstotliwości (np. częstotliwość pracy sonotrody zgrzewarki ultradźwiękowej) dla danej czynności będą się różniły między sobą o 3 dB lub więcej, należy:

- przeprowadzić dodatkowe trzy pomiary danej czynności
- powtórzyć pomiary z dłuższym czasem trwania każdego pomiaru.

U w a g a

W przypadku dużych rozrzutów wartości maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych (powyżej 3 dB), zaleca się przeprowadzenie dodatkowych trzech

pomiarów lub przeanalizowanie zapisanych w pamięci miernika/analizatora przebiegów czasowych. Pozwoli to na znaczne obniżenie wyznaczania wartości niepewności.

Wartości równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego dla m -czynności wyznacza się na podstawie wzoru:

$$L_{fi,eq,Tm} = 10 \log \left(\frac{1}{J} \sum_{j=1}^J 10^{0,1 \cdot L_{fi,eq,Tm,j}} \right), \quad [5]$$

gdzie:

$L_{fi,eq,Tm}$ – równoważny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości, dla m -tej czynności, w dB

$L_{fi,eq,Tm,j}$ – równoważny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości, dla j -tego pomiaru dla m -tej czynności, w dB,

J – liczba pomiarów dla m -tej czynności.

Poziom maksymalny w danym przedziale narażenia (m -tej czynności) $L_{fi,max,Tm}$ jest to wartość największa z uzyskanych wartości maksymalnych z zarejestrowanych pomiarów $L_{fi,max,Tm,j}$.

Korekcja wyniku pomiaru

Wynik pomiaru poziomu ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości (równoważny oraz maksymalny) należy skorygować zgodnie z równaniem:

$$L_{fi} = L_{fi}^{\prime} + K_{ap,fi} - K_{g,fi}, \quad [6]$$

gdzie:

L_{fi}^{\prime} – wskazanie miernika/analizatora w i -tym pasmie tercjowym, w dB,

$K_{ap,fi}$ – poprawka uwzględniająca łączny wpływ charakterystyk metrologicznych aparatury na wynik pomiaru, w dB; poprawka wyznaczana podczas kontroli metrolo-

gicznej dla każdego pasma tercjowego jako suma wartości charakterystyki częstotliwościowej mikrofonu (ze znakiem przeciwnym) i tłumienia względnego filtru – dane ze świadectwa wzorcowania,

$K_{g,fi}$ – poprawka uwzględniająca wpływ na wynik pomiaru stosowania siatki ochronnej mikrofonu, w dB.

Jeśli nie jest możliwe stosowanie mikrofonu bez siatki ochronnej, należy zastosować korekcję podaną przez producenta mikrofonu. Jeśli dane dotyczące siatki ochronnej nie są podane przez producenta, można przyjąć przykładowe wartości wyznaczone empirycznie (tab. 1.).

Tabela 1.

Przykładowe wartości poprawki uwzględniającej wpływ na wynik pomiaru stosowania siatki ochronnej mikrofonu, $K_{g,fi}$ (Radosz 2012)

Wartości poprawki uwzględniającej wpływ na wynik pomiaru siatki ochronnej mikrofonu $K_{g,fi}$, w dB	10 kHz	12,5 kHz	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
Siatka ochronna Brüel&Kjær	0,5	0,9	1,5	2,2	3,2	4,6	5,1
Siatka ochronna G.R.A.S.	0,4	0,8	1,2	1,6	2,3	3,0	3,7

Wyznaczanie równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego odniesionego do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu

Na podstawie równania [7] możliwe jest obliczenie równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym odniesionego do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy:

$$L_{fi,eq,8h} = 10 \log \left[\sum_{m=1}^M \frac{T_m}{T_0} 10^{0,1 \cdot L_{fi,eq,Tm}} \right], \quad [7]$$

gdzie:

$L_{fi,eq,Tm}$ – równoważny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości, dla m -tej czynności, w dB,

T_m – czas trwania m -tej czynności,

T_0 – przedział czasowy odniesienia, $T_0 = 8$ h,

m – numer czynności,

M – ogólna liczba czynności mających udział w ekspozycji na hałas ultradźwiękowy.

Szacowanie niepewności pomiarów

Postanowienia ogólne

Zgodnie z przewodnikiem ISO/IEC Guide 98-3,

przy szacowaniu niepewności należy wziąć pod uwagę wszystkie składniki niepewności, które są istotne w danej sytuacji, z wykorzystaniem odpowiednich metod analizy.

Przy podejmowaniu decyzji, czy składowa niepewności może być pominięta, należy – według wytycznych Polskiego Centrum Akredytacji EA-04/16 – wziąć pod uwagę: względną wielkość 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.

Można również stosować inne podejście do obliczania niepewności, np. wyznaczanie niepewności na podstawie wartości względnego ciśnienia akustycznego (Kirpluk 2010). Jeżeli są stosowane tego typu metody, to powinny być one zgodne z wymaganiami zawartymi w normie ISO/IEC Guide 98-3. Powinno być również wykazane, że stosowanie tych metod nie prowadzi do niedoszacowania niepewności. Stosowana metoda powinna być wskazana w sprawozdaniu z pomiarów.

Laboratoria badawcze są zobligowane do określania budżetu niepewności metod pomiarowych. Podstawę takich wymagań zawarto w normie PN-EN ISO/IEC 17025.

Niepewność wyznaczania równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego odniesionego do 8-godzinne go dobowego wymiaru czasu pracy

Biorąc pod uwagę to, że wielkości wejściowe budżetu niepewności nie są skorelowane, złożoną niepewność standardową wyznaczania równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym u_{fi} ($L_{fi,eq,8h}$), zgodnie z ISO/IEC Guide 98-3, oblicza się na podstawie wartości liczbowych poszczególnych udziałów niepewności na podstawie wzoru:

[8]

$$u_{fi}(L_{fi,eq,8h}) = \sqrt{\sum_{m=1}^M c_{fi,m}^2 \cdot (u_{1,fi,m}^2 + u_{2,fi}^2 + u_{3,fi}^2)},$$

gdzie:

$c_{fi,m}$ – współczynnik wrażliwości w i -tym paśmie tercjowym, dla m -tej czynności,

$u_{1,fi,m}$ – niepewność standardowa związana z rozrzutem wartości próbek w i -tym paśmie tercjowym, dla m -tej czynności, w dB,

$u_{2,fi}$ – niepewność standardowa związana z aparaturą pomiarową w i -tym paśmie tercjowym (tab. 2.), w dB,

$u_{3,fi}$ – niepewność standardowa związana z położeniem mikrofonu w i -tym paśmie tercjowym (tab. 3.), w dB,

m – numer czynności,

M – ogólna liczba czynności.

Współczynniki wrażliwości określają, w jakim stopniu dany przedział narażenia wpływa na wyznaczaną wartość równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego odniesionego do 8-godzinne go lub do tygodniowego wymiaru czasu pracy. Współczynnik wrażliwości $c_{fi,m}$ oblicza się na podstawie wzoru:

[9]

$$c_{fi,m} = \frac{T_m}{T_0} 10^{0,1 \times (L_{fi,eq,Tm} - L_{fi,eq,8h})},$$

gdzie:

$L_{fi,eq,Tm}$ – równoważny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości, dla m -tej czynności, w dB,

$L_{fi,eq,8h}$ – równoważny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym odniesiony do 8-godzinne go dobowego wymiaru czasu pracy,

T_m – czas trwania czynności,

T_0 – czas odniesienia, $T_0 = 8$ h.

W tak przyjętej metodzie pomiarowej niepewność standardową związaną z rozrzutem wartości próbek $u_{fi^2,1,m}$ dla danego przedziału narażenia (czynności) wyznacza się na podstawie wzoru:

[10]

$$u_{1,fi,m} = \sqrt{\frac{1}{J(J-1)} \left[\sum_{j=1}^J (L_{fi,eq,Tm,j} - \overline{L_{fi,eq,Tm}})^2 \right]},$$

gdzie:

$L_{fi,eq,Tm,j}$ – równoważny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym, dla j -tego pomiaru (próbki) dla m -tej czynności, w dB,

J – liczba pomiarów dla m -tej czynności,

$\overline{L_{fi,eq,Tm}}$ – średnia arytmetyczna równoważnych poziomów ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości, m -tej dla czynności, w dB.

Niepewność standardową związaną z aparaturą pomiarową $u_{fi,2}$, którą wyznaczono empirycznie do omawianej procedury, przedstawiono w tabeli 2. (Radosz 2014).

Tabela 2.Niepewność standardowa związana z aparaturą pomiarową, $u_{2,fi}$ (Radosz 2012)

Niepewność standardowa	Częstotliwość środkowa pasma tercjowego, kHz						
	10	12,5	16	20	25	31,5	40
Niepewność standardowa złożona równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego $u_{2,fi}(L_{fi,eq,T})$, Db	0,45	0,46	0,46	0,47	0,47	0,49	0,50

U w a g a

Niepewność związana ze stosowanym wyposażeniem zależy od charakteru hałasu oraz warunków środowiskowych. Wartości niepewności standardowej związanej z wyposażeniem pomiarowym są reprezentatywne dla większości sytuacji.

Niepewność standardową związaną z położeniem mikrofonu $u_{3,fi}$, również wyznaczoną empirycznie, przedstawiono w tabeli 3. (Radosz 2012).

Tabela 3.Niepewność standardowa związana z położeniem mikrofonu, $u_{3,fi}$ (Radosz 2012)

Niepewność standardowa związana z położeniem mikrofonu	10 kHz	12,5 kHz	16 kHz	20 kHz	25 kHz	31,5 kHz	40 kHz
Niepewność standardowa złożona równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego $u_{3,fi}$ [dB]	0,7	0,9	0,9	1,0	1,2	1,3	1,5

U w a g a

W przypadku gdy mikrofon umieszczony jest blisko ciała pracownika, niepewność pomiaru ma związek z ekranowaniem i odbijaniem dźwięku. W przypadku pomiarów przeprowadzanych bez obecności pracownika na stanowisku pracy, niepewność jest związana z pozycją(-ami) mikrofonu, która(-e) nie w pełni odpowiada(-ją) rzeczywistemu położeniu (-om) głowy pracownika.

Ostatecznie niepewność rozszerzoną równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym $U_{fi}(L_{fi,eq,8h})$ oblicza się na podstawie wzoru:

[11]

$$U_{fi}(L_{fi,eq,8h}) = 1,65 \cdot u_{fi}(L_{fi,eq,8h}),$$

gdzie:

$u_{fi}(L_{fi,eq,8h})$ – złożona niepewność standardowa równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym, w dB.

U w a g a

Ponieważ wyznaczane wartości hałasu ultradźwiękowego służą do porównywania z wartościami dopuszczalnymi, w niniejszej procedurze przyjęto jednostronny 95-procentowy przedział ufności, co odpowiada współczynnikowi rozszerzenia $k = 1,65$. Oznacza to, że 95% wartości jest zawartych poniżej górnej granicy przedziału ufności [$L_{fi,eq,8h} + U_{fi}(L_{fi,eq,8h})$]. Niepewność rozszerzona jest podawana jako osobna wartość.

U w a g a

Jeśli jest to konieczne, budżet niepewności można rozszerzyć o niepewność standardową związaną z oszacowaniem czasu trwania danej czynności, $u_{fi,Tm}$. Wówczas równanie [8] należy rozwinąć do postaci (patrz PN-EN ISO 9612:2011):

$$u_{fi}(L_{fi,eq,8h}) = \sqrt{\sum_{m=1}^M c_{fi,m}^2 \cdot (u_{1,fi,m}^2 + u_{2,fi}^2 + u_{3,fi}^2) + (4,34 \frac{C_{fi,m}}{T_m} \cdot u_{fi,Tm})^2},$$

gdzie:

$$u_{fi,Tm} = \sqrt{\frac{1}{J(J-1)} \left[\sum_{j=1}^J (T_{m,j} - T_m)^2 \right]},$$

przy czym J jest ogólną liczbą obserwacji czasu trwania czynności.

Jeżeli zakres czasu wynika z analizy pracy, to oszacowaniem tej niepewności standardowej jest:

$$u_{fi,Tm} = 0,5 \times (T_{\max} - T_{\min}).$$

U w a g a

Równoważny poziom ciśnienia akustycznego odniesiony do tygodniowego dobowego wymiaru czasu pracy jest wyznaczany na podstawie wartości równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego odniesionego do 8-godzinnego dobowego wymiaru czasu pracy w poszczególnych dniach. W takim przypadku należy podać wyznaczone wartości niepewności dla poszczególnych dni.

Niepewność wyznaczania maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym

Do wyznaczenia niepewności maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym można posłużyć się metodą granic tolerancji (Rudno-Rudziński 2007a; 2007b). W metodzie tej wyznacza się górną granicę tolerancji dla $L_{fi,max}$ z określonym prawdopodobieństwem. Oznacza to, że z założonym prawdopodobieństwem określamy obszar (niepewność), w którym mogą się pojawić wartości większe niż wyznaczone $L_{fi,max}$. Podobnie jak w przypadku równoważnych poziomów ciśnienia akustycznego, przyjmuje się 95-procentowy poziom ufności. Górną granicę tolerancji $L_{fi,max}$ oblicza się na podstawie wzoru:

$$L_{fi,max(0,95)} = \overline{L_{fi,max}} + k_1 \cdot u_{fi}, \quad [12]$$

gdzie:

$\overline{L_{fi,max}}$ – średnia arytmetyczna maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości, w dB,
 $u_{fi,max}$ – niepewność standardowa związana z rozrzutem wartości próbek, w dB,
 k_1 – współczynnik rozszerzenia dla niecentralnego rozkładu t -Studenta.

U w a g a

1. Przy wyznaczaniu złożonej niepewności standardowej maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego $u_{fi}(L_{fi,max})$ w budżecie niepewności nie uwzględnia się współczynników wrażliwości, ponieważ poziom maksymalny określa się jako wartość największą z uzyskanych wartości maksymalnych z zarejestrowanych pomiarów elementarnych (próbek).
2. Niepewność poziomów maksymalnych wyznacza się dla czynności, w której wystąpiły największe z zarejestrowanych wartości maksymalnych w danym paśmie tercjowym.

Współczynnik k_1 można wyznaczyć za pomocą kalkulatorów statystycznych (np. NDC) lub metodą przybliżoną, omówioną w dalszej części artykułu. Pierwszym krokiem jest wyznaczenie niepewności $u_{fi,max}$ związanej z rozrzutem wartości próbek:

$$u_{fi,\max} = \sqrt{\frac{1}{J(J-1)} \left[\sum_{j=1}^J (L_{fi,\max,j} - \overline{L_{fi,\max}})^2 \right]} \quad [13]$$

gdzie:

$L_{fi,\max,j}$ – maksymalny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym, dla j -tego pomiaru (próbki), w dB,

J – liczba pomiarów,

$\overline{L_{fi,\max}}$ – średnia arytmetyczna maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości, w dB.

Następnie wyznacza się parametr niecentralności rozkładu, δ_{fi} :

$$\delta_{fi} = \sqrt{J} \cdot \frac{L_{fi,\max} - \overline{L_{fi,\max}}}{u_{fi,\max}} \quad [14]$$

gdzie:

J – liczba pomiarów,

$L_{fi,\max}$ – maksymalny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości, w dB,

$\overline{L_{fi,\max}}$ – średnia arytmetyczna maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości, w dB,

$u_{fi,\max}$ – niepewność standardowa związana z rozrzutem wartości próbek, w dB.

Wartość współczynnika rozszerzenia k_1 , w zależności od liczby pomiarów J , jest odczytywana z wykresu przedstawionego na rysunku 2.

Tabela 4.

Niepewność standardowa związana z aparaturą pomiarową $u_{2,fi}$ (Radosz 2012)

Niepewność standardowa	Częstotliwość środkowa pasma tercjowego, kHz						
	10	12,5	16	20	25	31,5	40
Niepewność standardowa złożona równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego $u_{2,fi}(L_{fi,\max})$, dB	0,44	0,45	0,45	0,45	0,46	0,48	0,49

Podstawiając k_1 i $u_{fi,\max}$ do wzoru [12], wyznacza się następnie niepewność rozszerzoną typu A maksymalnych wartości poziomów ciśnienia akustycznego $U_{A,fi}(L_{fi,\max})$ na podstawie wzoru:

$$U_{A,fi}(L_{fi,\max}) = L_{fi,\max(0,95)} - L_{fi,\max} \quad [15]$$

gdzie:

$L_{fi,\max(0,95)}$ – górna granica tolerancji dla $L_{fi,\max}$, w dB,

$L_{fi,\max}$ – maksymalny poziom ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie częstotliwości, w dB.

Niepewność rozszerzoną typu B maksymalnych wartości poziomów ciśnienia akustycznego $U_{B,fi}(L_{fi,\max})$ wyznacza się na podstawie wzoru:

$$U_{B,fi}(L_{fi,\max}) = 1,65 \cdot \sqrt{u_{2,fi}^2 + u_{3,fi}^2} \quad [16]$$

gdzie:

$u_{2,fi}$ – niepewność standardowa związana z aparaturą pomiarową w i -tym paśmie tercjowym (tab. 4.), w dB (Radosz 2014)

$u_{3,fi}$ – niepewność standardowa związana z położeniem mikrofonu w i -tym paśmie tercjowym (tab. 3.), w dB (Radosz 2012).

U w a g a

Niepewność związana ze stosowanym wyposażeniem zależy od charakteru hałasu oraz warunków środowiskowych. Niepewności standardowe $u_{2,fi}$ podane w tabeli 5. oparte są na danych empirycznych. Wartości niepewności standardowej związanej z wyposażeniem pomiarowym są reprezentatywne dla większości sytuacji.

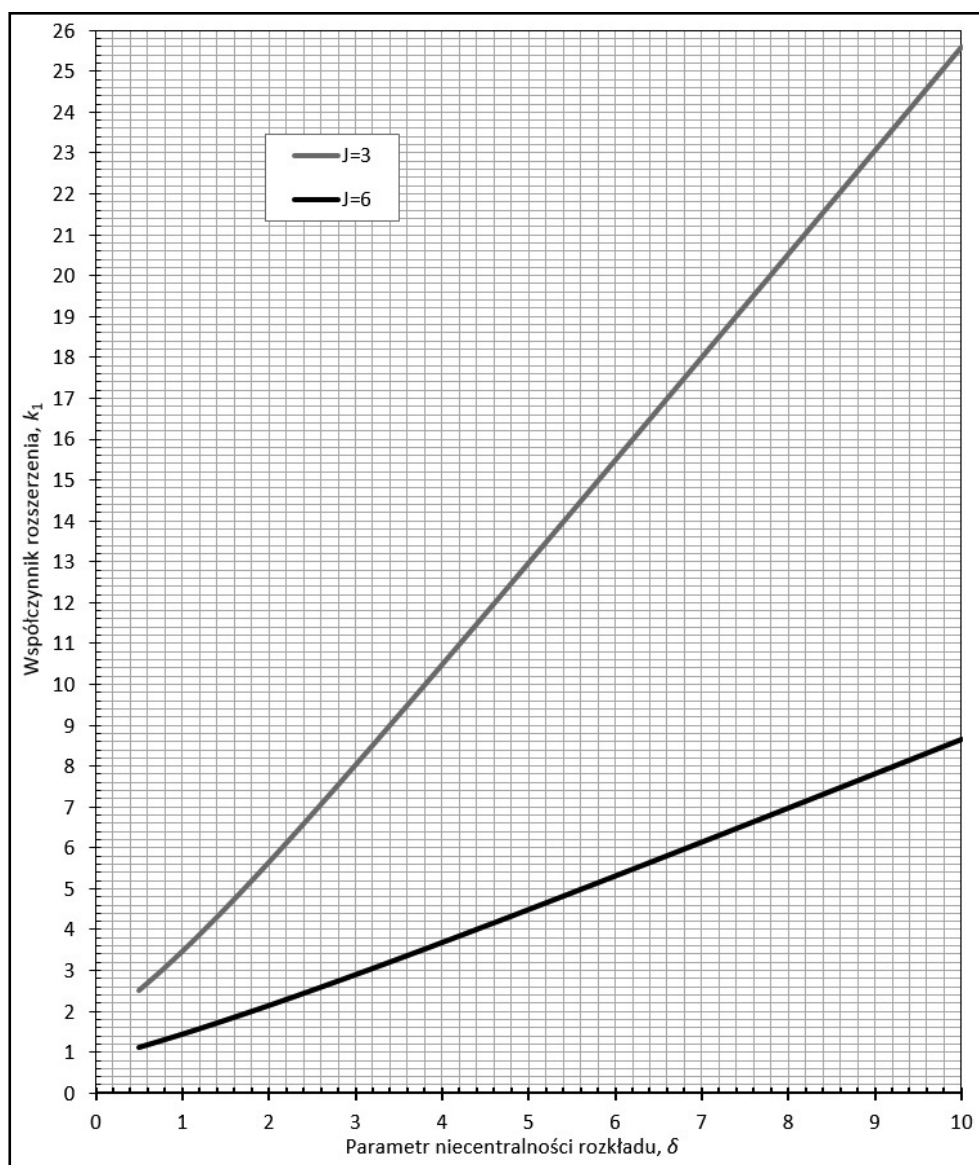
Ostatecznie niepewność rozszerzoną dla maksymalnych wartości poziomów ciśnienia akustycznego w i -tym paśmie tercjowym $U_{fi}(L_{fi,max})$ wyznacza się na podstawie wzoru:

$$U_{fi}(L_{fi,max}) = \sqrt{U_{A,fi}^2 + U_{B,fi}^2} \quad [17]$$

gdzie:

$U_{A,fi}$ – niepewność rozszerzona typu A (wyznaczana na podstawie analizy statystycznej) maksymalnych wartości poziomów ciśnienia akustycznego, w dB,

$U_{B,fi}$ – niepewność rozszerzona typu B (związana z błędami systematycznymi) maksymalnych wartości poziomów ciśnienia akustycznego, w dB.



Rys. 2. Współczynnik rozszerzenia k_1 w zależności od parametru δ oraz liczby pomiarów

Sprawozdanie z pomiarów hałasu ultradźwiękowego

Sprawozdanie z pomiarów hałasu ultradźwiękowego, wykonanych zgodnie z opracowaną procedurą, powinno zawierać następujące informacje:

- ogólne informacje: nazwę jednostki zlecającej pomiary, nazwę jednostki przeprowadzającej pomiary, identyfikację stanowisk pracy
- analizę warunków pracy: opis stanowisk pracy wraz z wykonywanymi na nich czynnościami, opis źródeł hałasu ultradźwiękowego, z uwzględnieniem wpływu hałasu pochodzącego z sąsiednich stanowisk pracy, opis zabezpieczeń przeciwhałasowych (o ile zastosowano)
- wykaz aparatury pomiarowej: konfiguracja układu pomiarowego (np. rodzaj i typ), dane o wzorcowaniu, wyniki kalibracji, zastosowane poprawki
- warunki pomiarowe: datę i godzinę wykonania pomiarów, czas pomiaru, liczbę próbek, czas wykonywanych przez pracownika czynności, wpływ warunków meteorologicznych (jeśli był znaczący dla pomiarów), wpływ zakłóceń, (jeśli wystąpiły, np. niepożądane sygnały)
- wyniki pomiarów i podsumowanie: skorygowane odpowiednimi poprawkami wyniki pomiarów $L_{fi,eq,Tm}$ i $L_{fi,max,Tm}$ dla każdej czynności/stanowiska, wyznaczone wartości $L_{fi,eq,8h}$ i $L_{fi,max}$, rozszerzoną niepewność pomiarową $U_{fi}(L_{fi,eq,8h})$ oraz $U_{fi}(L_{fi,max})$.