

mgr inż. PAWEŁ GÓRSKI
Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

Możliwość lokalizacji źródeł dźwięku przez osoby z dysfunkcją słuchu

Możliwość lokalizacji przestrzennej źródeł dźwięku jest ważnym elementem bezpieczeństwa człowieka w środowisku pracy pozwalającą na określenie odległości od miejsc oraz kierunku, z którego dochodzi dźwięk. W przypadku osób niedosłyszących możliwość właściwej lokalizacji źródeł dźwięku jest w poważnym stopniu zredukowana. Jedną z metod poprawy lokalizacji źródeł dźwięku jest odpowiednia modyfikacja parametrów akustycznych pomieszczenia pracy. W artykule opisano metodę badawczą, stanowisko laboratoryjne i wstępne badania weryfikacyjne umożliwiające ilościową ocenę lokalizacji źródeł dźwięku przez osoby niedosłyszące.

Ability to localize sound sources by people with a hearing dysfunction

The ability to spatially localize sound sources is an important element of human safety in the occupational environment; it makes people able to determine the distance between places and the direction of sound. Such ability is vastly reduced for people with a hearing dysfunction. One method for improving this, is to modify the acoustic parameters of workplaces. This article describes research methodology, a test stand and preliminary research results providing means for a quantitative evaluation of the ability to localize sound sources by people with a hearing dysfunction.



Wprowadzenie

Człowiek w środowisku pracy znajduje się stale pod wpływem różnorodnych sygnałów dźwiękowych. Niektóre z nich to sygnały dźwiękowe bezpieczeństwa (w tym komunikaty słowne), a inne to hałasy pochodzące od maszyn i urządzeń, tzw. hałas tła. Zagadnienia akustyczne w procesie projektowania pomieszczeń pracy analizowane są najczęściej pod względem ograniczania zagrożenia hałasem. Takie podejście jest jednak niewystarczające w przypadku pracowników niedosłyszących, dla których warunki akustyczne panujące w pomieszczeniach pracy są znacznie ważniejsze niż dla osób bez dysfunkcji słuchu. Zapewnienie osobom niedosłyszącym odpowiedniej percepcji sygnałów dźwiękowych wymaga dobrych warunków akustycznych. Jej ograniczenie w skrajnych przypadkach uniemożliwia wykonywanie powierzonych zadań lub prowadzi do powstawania sytuacji niebezpiecznych, zagrażających zdrowiu i życiu pracownika – co może skutkować wycofywaniem się osób niedosłyszących z działalności zawodowej. Analiza literatury wskazuje, że stosunkowo niewiele badań nad lokalizacją przestrzenną źródeł dźwięku oraz wpływem właściwości akustycznych pomieszczeń pracy na odbiór sygnałów dźwiękowych, łączy te zagadnienia z dysfunkcją słuchu.

Lokalizacja dźwięku

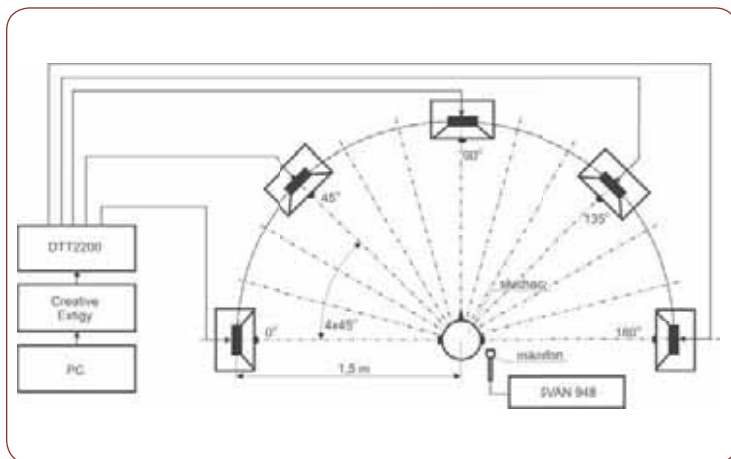
Lokalizacja przestrzenna źródła dźwięku związana jest z tzw. zjawiskiem psychologicznym zwanym percepcją kierunkową, wynikającym ze słyszenia dwuusznego. W pomieszczeniu zależy ona od jego właściwości akustycznych i sygnału dźwiękowego emitowanego przez źródło [1]. Trudności pojawiają się, gdy zarówno człowiek, jak i źródło dźwięku znajdują się wewnątrz pomieszczenia, a w szczególności wówczas, kiedy chłonność akustyczna pomieszczenia jest mała (czas pogłosu jest duży). W tego typu pomieszczeniach fala akustyczna odbija się od powierzchni i w efekcie do ucha słuchacza docierają, poza falą bezpośrednią, również fale odbite. Wraz ze wzrostem odległości od źródła dźwięku stosunek energii fali bezpośredniej do energii fal odbitych maleje i zmniejsza się tym samym możliwość poprawnej lokalizacji źródła dźwięku. Należy dodać, że dzięki odbieraniu fal odbitych człowiek jest w stanie lokalizować położenie ścian i innych przedmiotów znajdujących się w pomieszczeniu [2].

Oprócz lokalizacji kierunku, z którego dochodzi dźwięk, istotna jest także możliwość dokonania przez człowieka oceny odległości, w jakiej znajduje się źródło dźwięku. Istotnymi czynnikami

mającymi wpływ na poprawność tej oceny są: poziom ciśnienia akustycznego źródła dźwięku docierającego do człowieka oraz zjawisko znacznego tłumienia wysokoczęstotliwościowych składowych dźwięku w powietrzu [3].

Oprócz sygnałów dźwiękowych docierających do uszu, znaczący wpływ na lokalizację źródła dźwięku mają także informacje wzrokowe. Na podstawie przeprowadzonych badań [4] stwierdzono, że mózg dąży do tego, aby wewnętrzny obraz rzeczywistości składający się z obrazów i dźwięków był spójny, zgodny ze wszystkimi odebranymi bodźcami. Potwierdzeniem tego może być doświadczenie, podczas którego słuchaczy umieszczono przed cylindrycznym ekranem, na którym prezentowano przesuwające się pionowe paski. Po pewnym czasie słuchacze mieli wrażenie, że obraz pozostaje w miejscu, natomiast oni się przesuwają. Następnie włączono stacjonarne źródło dźwięku. Większość słuchaczy określiła źródło jako ruchome.

Dla osób niedosłyszących opisane mechanizmy są w znacznym stopniu zniekształcone. Różnica między odbieranymi bodźcami wzrokowymi i słuchowymi rośnie wprost proporcjonalnie do poziomu uszkodzenia narządu słuchu. Jednym ze sposobów poprawy możliwości lokalizacji źródeł dźwięku przez osoby z dysfunkcją słuchu



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego do badania lokalizacji źródeł dźwięku
Fig. 1. Diagram of a test stand for measuring the localization of sound sources

jest kształtowanie właściwości akustycznych pomieszczeń poprzez zastosowanie odpowiednich adaptacji akustycznych [5, 6, 7].

Opis stanowiska laboratoryjnego i przyjęta metoda badań

Schemat opracowanego w CIOP-PIB stanowiska laboratoryjnego do badań lokalizacji źródeł dźwięku przez osoby niedosłyszące przedstawiono na rys. 1., a widok tego stanowiska, umieszczonego w pomieszczeniu laboratoryjnym z adaptacją akustyczną przedstawiono na fotografii. Stanowisko to obejmuje komputer PC wraz z wielokanałową kartą dźwiękową *Creative Extigy*, wielokanałowy aktywny zestaw głośnikowy *Creative DTT 2200*, miernik poziomu dźwięku *SVAN 948*. Komputer PC służy jako generator sygnałów testowych emitowanych przez zestaw



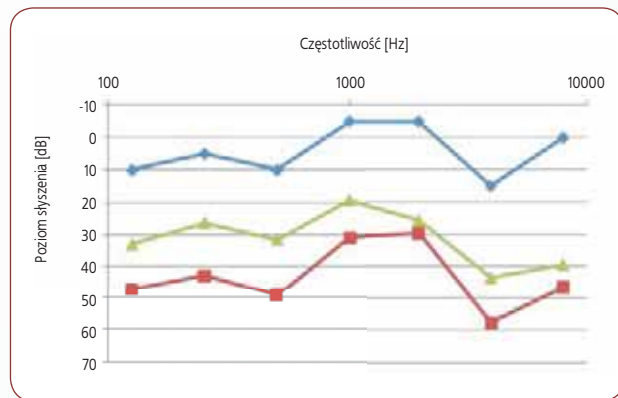
Fot. Stanowisko do badania lokalizacji źródeł dźwięku
Photo. Test stand for measuring the localization of sound sources

głośnikowy. Kolumny głośnikowe umieszczone są wokół słuchacza co 45° w odległości 1,5 m. Poziom dźwięku A w pobliżu głowy słuchacza jest kontrolowany miernikiem dźwięku.

Sygnały testowe emitowano kolejno przez poszczególne kolumny głośnikowe, a zadaniem słuchacza było wskazanie kierunku, z którego – jego zdaniem – emitowany był dźwięk.

W badaniach stosowano 17 różnych sygnałów akustycznych (tzw. sygnałów cząstkowych) nadawanych kolejno z 5 różnych kierunków, których czas emisji wynosił 5 sekund. Taki zestaw sygnałów nazwany jest sygnałem testowym, który generowany jest pięciokrotnie – bez maskowania oraz z maskowaniem szumem o 4 różnych poziomach.

Sygnały cząstkowe, czyli tonalne sygnały dźwiękowe stosowane jako sygnały ostrzegawcze oraz szum maskujący generowane były przy wykorzystaniu programów *Matlab* i *Samplitude 7.0 Professional*. Ze względu na wymagania PN-EN ISO 7731:2009 [8] określające zakres częstotliwości dźwięków stosowanych w sygnale ostrzegawczym, częstotliwości emitowanych sygnałów zawierały się w zakresie 500-2500 Hz. Sygnały cząstkowe, w liczbie 16, podzielono na 3 grupy. Pierwsza grupa to sygnały ciągłe, druga to sygnały przerywane, a trzecia to sygnały modulowane o płynnie zmieniającej się w czasie częstotliwości (od podstawowej do jej dwukrotnej wartości).



Rys. 2. Przykładowy wynik badań audiometrycznych słuchaczy bez wkładek przeciwhałasowych (kolor niebieski) oraz z wkładkami (kolor zielony – SNR = 22 dB, czerwony – SNR = 33 dB)

Fig. 2. Sample result of audiometric test conducted on listeners not using earplugs (blue) and using earplugs (green – SNR = 22 dB, red – SNR = 33 dB)

Dodatkowo, jako 17. generowany był sygnał maskujący w postaci szumu pseudolosowego.

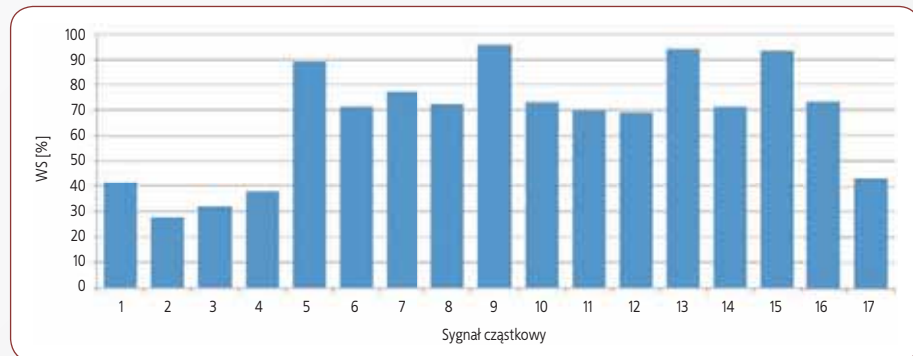
Odpowiedzi słuchacza dotyczące lokalizacji źródła dźwięku zostały porównane z kartą odpowiedzi prawidłowych i na tej podstawie wyznaczono wskaźnik lokalizacji źródła dźwięku (WS), określający procent prawidłowo zlokalizowanych położeń źródła dźwięku opisany wzorem:

$$WS = \frac{P}{Q} * 100\%$$

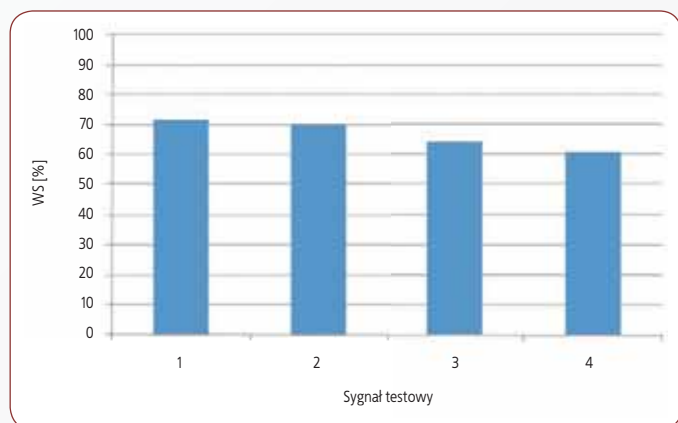
P – liczba prawidłowo zlokalizowanych dźwięków
Q – liczba wszystkich dźwięków.

W badaniu stopień niedosłyszenia słuchaczy (ubytek słuchu) symulowany był przez zastosowanie wkładek przeciwhałasowych. Podejście takie przyjęto na podstawie badań, z których wynika, że pracownik niedosłyszący może być w pewnym sensie porównany do pracownika ze słuchem normalnym, noszącego stale ochronniki słuchu [9, 10].

Przed przystąpieniem do właściwych badań słuchaczom wykonano – zgodnie z wymaganiami PN-EN 26189:2000 [11] – badania audiometryczne (rys. 2). Każdy z nich odbył pełną serię pomiarową bez wkładek przeciwhałasowych oraz z dwoma rodzajami wkładek, charakteryzujących się różnym poziomem tłumienia.

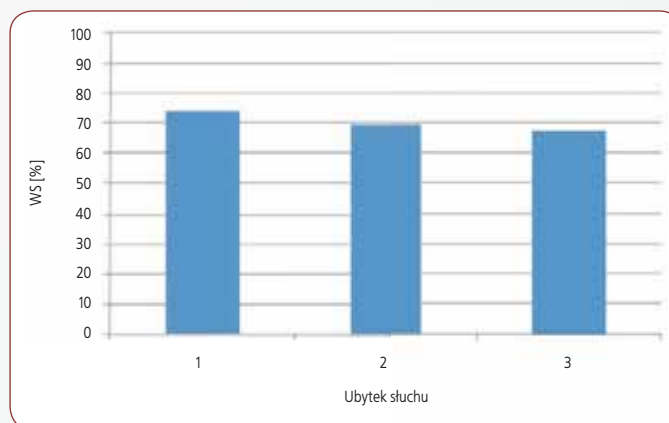


Rys. 3. Średni wskaźnik lokalizacji źródeł dźwięku (WS) w zależności od rodzaju sygnału cząstkowego
Fig. 3. Mean index of localization of sound sources (WS) in reference to partial signal type



Rys. 4. Średni wskaźnik WS w zależności od rodzaju sygnału testowego (4 sygnały testowe złożone z sygnałów cząstkowych S o stałym poziomie, różniące się poziomem szumu maskującego N: 1 – $S/N = 12$ dB, 2 – $S/N = 6$ dB, 3 – $S/N = 2,5$ dB, 4 – $S/N = 0$ dB)

Fig. 4. Mean WS index in reference to test signal type (4 test signals composed from S partial signals of consistent level, varying in camouflage static N: 1 – $S/N = 12$ dB, 2 – $S/N = 6$ dB, 3 – $S/N = 2.5$ dB, 4 – $S/N = 0$ dB)



Rys. 5. Średni wskaźnik WS w zależności od ubytków słuchu symulowanych zastosowaniem wkładek przeciwhałasowych (1 – pomiar bez wkładek, 2 – pomiar z wkładkami o wartości SNR = 22 dB, 3 – pomiar z wkładkami o wartości SNR = 33 dB)

Fig. 5. Mean WS index in reference to hearing loss simulated while using earplugs (1 – measurement with no earplugs, 2 – measurement with earplugs where SNR = 22 dB, 3 – measurement with earplugs where SNR = 33 dB)

Wyniki badań

Wyznaczony wskaźnik lokalizacji źródła dźwięku (WS) w zależności od rodzaju generowanego sygnału cząstkowego przedstawiono na rys. 3. Numerami 1-4 oznaczono sygnały ciągłe, 5-12 sygnały przerywane, 13-16 modulowane, a numerem 17 oznaczono sygnał pseudolosowy. Analiza wyników wykazała, że sygnały tonalne były stosunkowo trudne do lokalizacji, a wskaźnik WS nie przekraczał 42% wobec sygnałów o częstotliwościach 500, 1000, 1500 i 2000 Hz (sygnały nr 1, 2, 3, 4). Wynik ten jest porównywalny z sygnałem pseudolosowym (nr 17), którego WS wyniósł ok. 43%.

Zdecydowanie wyższe wartości WS otrzymano dla sygnałów zmiennych w czasie, przerywanych i modulowanych (sygnały nr 5-16). Nie zaobserwowano znaczących różnic w wartościach WS w zależności od zmian rodzaju sygnału cząstkowego i szybkości zmian częstotliwości podstawowej. Różnice WS oscylowały w okolicach 10%. Dla sygnałów przerywanych (sygnały nr 5-12) wartości WS dochodziły do 96%, a dla sygnałów modulowanych częstotliwościowo (sygnały nr 13-16) – do 95%. Badania wykazały również we wszystkich grupach sygnałów cząstkowych najlepszą lokalizację dźwięków o częstotliwości 500 Hz (sygnały nr 5, 9, 13, 15). Wartość WS była wtedy nawet o 20% wyższa niż dla badanych dźwięków o innych częstotliwościach.

W dalszej kolejności zbadano zależność średniego wskaźnika lokalizacji źródła dźwięku od rodzaju sygnału testowego (rys. 4.). Jak wcześniej wspomniano, sygnały testowe różniły się między sobą poziomem sygnału maskującego, natomiast niezmienny był poziom sygnałów cząstkowych. Różnica poziomów pomiędzy tymi sygnałami to tzw. stosunek sygnał do szumu (S/N). Dla sygnału numer 1 S/N był równy 12 dB, dla sygnału nr 2 S/N wyniósł ok. 6 dB, dla sygnału nr 3 S/N wyniósł 2,5 dB, a w przypadku sygnału nr 4 $S/N = 0$ dB. Średni wskaźnik WS

wyznaczono dla wszystkich badanych sygnałów. Wyniki pokazały, że wraz ze wzrostem poziomu sygnału maskującego nieznacznie maleje możliwość lokalizacji źródeł dźwięku. Maksymalne wartości WS nie przekraczały 72%, a minimalne wynosiły ponad 60%.

Następnie przeprowadzono analizę wartości wskaźnika lokalizacji źródeł dźwięku w zależności od wielkości symulowanego ubytku słuchu (rys. 5.). Numerem 1 oznaczono wartości WS dla słuchaczy bez wkładek (bez ubytku słuchu), numerem 2 dla słuchaczy z ubytkiem słuchu symulowanym wkładką o wartości tłumienia równej 22 dB, a numerem 3 dla słuchaczy z ubytkiem słuchu symulowanym wkładką o wartości tłumienia równej 33 dB. Wartości WS oscylowały pomiędzy 68% a 73%. Główną cechą różnicującą wyniki pomiarów były osobnicze różnice możliwości lokalizacji źródeł dźwięku poszczególnych słuchaczy. Analiza wyników badań wykazała, że wraz ze wzrostem ubytku słuchu nieznacznie zmniejszała się możliwość lokalizacji źródeł dźwięku (o ok. 5%).

Podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że sygnały dźwiękowe tonalne ciągłe są dla osób z dysfunkcją słuchu relatywnie najtrudniejszymi do lokalizacji; wskaźnik lokalizacji źródła dźwięku (WS) wyniósł w ich przypadku tylko ok. 40%. Zdecydowanie wyższe wartości WS otrzymano za to dla sygnałów zmiennych w czasie (przerywanych i modulowanych), wobec których wartość WS wynosiła ok. 95%. Badania wykazały również, że spośród wszystkich badanych grup sygnałów dźwiękowych najlepiej lokalizowane były sygnały o częstotliwości 500 Hz oraz wskazały na fakt, że wraz ze wzrostem poziomu sygnału maskującego tylko nieznacznie malała możliwość lokalizacji źródeł dźwięku; maksymalne wartości wskaźnika WS nie przekraczały 72%, a minimalne wynosiły ponad 60%.

Badania lokalizacji źródeł przez słuchaczy z ubytkami słuchu symulowanymi zastosowaniem wkładek przeciwhałasowych wykazały, że ubytki słuchu tylko nieznacznie wpływały na możliwość lokalizacji źródeł dźwięku (różnica wskaźnika WS u osób z wkładkami i bez nich nie przekraczała 5%).

Opracowane w CIOP-PIB stanowisko laboratoryjne posłuży do przeprowadzenia dalszych badań dotyczących wpływu adaptacji akustycznej pomieszczenia na możliwość lokalizacji źródeł dźwięku przez osoby z ubytkami słuchu.

PIŚMIENICTWO

- [1] W. M. Hartmann *Localization of sound in rooms*. „J. Acoust. Soc. Am.”, 74(5)1380-1391, November 1983
- [2] Cz. Pużyna *Wpływ własności akustycznych środowiska na orientację przestrzenną*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1983
- [3] B. C. J. Moore *Wprowadzenie do psychologii słyszenia*. PWN Warszawa 1999
- [4] H. Wallach *The Role of Head Movements and Vestibular and Visual Cues in Sound Localization*. „J. Exp. Psychol.”, Vol. 27, 1940
- [5] M. Meissner *Influence of wall absorption on low-frequency dependence of reverberation time in room of irregular shape*. „Applied Acoustics”, 69(583-590)2008
- [6] E. E. Ryherd, L. M. Wang *Implications of human performance and perception under tonal noise conditions on indoor noise criteria*. „J. Acoust. Soc. Am.”, 124(1)218-226, July, 2008
- [7] S. Siltanen, T. Lokki, L. Savioja, C. L. Christensen *Geometry reduction in room acoustics modeling*, „Acta Acustica”, Vol. 94, 410-418, No 3, May/June, 2008
- [8] PN-EN ISO 7731:2009 *Ergonomia – Sygnały bezpieczeństwa dla obszarów publicznych i obszarów pracy – Dźwiękowe sygnały bezpieczeństwa (oryg.)*
- [9] S. M. Abel, P. W. Alberti, C. Haythornthwaite, K. Riko *Speech intelligibility in noise: effects of fluency and hearing protector type*. „J. Acoust. Soc. Am.”, 71(3)708-715, March 1982
- [10] K. D. Kryter *Effects of ear protective devices on the intelligibility of speech in noise*. „J. Acoust. Soc. Am.” 18(2)413-417, October 1946
- [11] PN-EN 26189:2000 *Akustyka – Pomiar prognozy słyszenia tonów w przewodnictwie powietrznym na potrzeby ochrony słuchu*