

mgr inż. GRZEGORZ SZCZEPAŃSKI
 dr inż. LESZEK MORZYŃSKI
 dr hab. inż. DARIUSZ PLEBAN, prof. nadzw. CIOP-PIB
 dr inż. RAFAŁ MŁYŃSKI
 Centralny Instytut Ochrony Pracy
 – Państwowy Instytut Badawczy
 Kontakt: grszc@ciop.pl
 DOI: 10.5604/01.3001.0012.6477

Stanowisko badawcze CIOP-PIB do badań percepcji dźwięku przestrzennego z zastosowaniem techniki ambisonicznej

Fot. Trodler/Bigstockphoto

W warunkach środowiska pracy sygnały akustyczne mogą być źródłem informacji wpływającej na bezpieczeństwo pracowników. Możliwości percepcji dźwięków, słyszenia kierunkowego czy też orientacji przestrzennej osób w środowisku pracy zależą od szeregu czynników, takich jak np. właściwości akustyczne pomieszczeń pracy, hałas i jego parametry, ubytki słuchu, stosowanie ochron słuchu czy protez słuchu. Badanie wpływu tych czynników na wymienione możliwości (percepcja, słyszenie kierunkowe, orientacja) wymaga zastosowania dźwięku przestrzennego i ma istotne znaczenie dla tworzenia bezpiecznych warunków pracy.

W artykule przedstawiono podstawowe informacje na temat techniki ambisonicznej jako jednej z technik przetwarzania dźwięku przestrzennego. Scharakteryzowano wykonane w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym stanowisko laboratoryjne umożliwiające prowadzenie (z wykorzystaniem techniki ambisonicznej) badań percepcji dźwięków, słyszenia kierunkowego i orientacji przestrzennej osób.

Słowa kluczowe: technika ambisoniczna, dźwięk przestrzenny, akustyka środowiska pracy, percepcja dźwięku

CIOP-PIB test stand for studies on spatial sound perception using ambisonics

Acoustic signals can be a source of information affecting workers' safety in the working environment. Sound perception, directional hearing and spatial orientation of people in the working environment depend on a number of factors, such as acoustic properties of the work room, noise and its parameters, the use of hearing protection, hearing loss or the use of hearing aids. Learning about the impact of these factors on perception, directional hearing and orientation requires using spatial sound and is essential for creating safe working conditions. This article presents basic information about ambisonics, a technique of spatial sound processing, and a test stand developed at the Central Institute for Labor Protection – National Research Institute for research on sound perception, directional hearing and spatial orientation of people using ambisonics.

Keywords: ambisonics, spatial sound, acoustics of the working environment, sound perception

Wstęp

Słuch jest jednym z najważniejszych zmysłów człowieka. Umożliwia pozyskiwanie istotnych informacji dotyczących otoczenia, w którym znajduje się człowiek; stanowi również, obok mowy, podstawę komunikacji werbalnej. Zmysł słuchu ma również istotne znaczenie dla prawidłowego funkcjonowania człowieka w społeczeństwie i w otaczającym go świecie. Odnosi się to również do środowiska pracy, w którym człowiek znajduje się stale pod wpływem różnorodnych bodźców akustycznych (dźwięków).

Często, szczególnie w warunkach przemysłowych, dźwięki te tworzą uciążliwy, czy wręcz szkodliwy dla zdrowia (w zależności od poziomu ciśnienia akustycznego) hałas [1]. Część z nich niesie ze sobą jednak ważne informacje o otoczeniu, w którym znajduje się człowiek, a w szczególności o potencjalnych zagrożeniach, np. o poruszającym się w pobliżu pojeździe. Istotną dla bezpieczeństwa pracowników kategorię dźwięków stanowią sygnały alarmowe, np. alarm pożarowy.

Zmysł słuchu ma szczególne znaczenie dla osób z niepełnosprawnością wzroku (niewidomych, słabowidzących), gdyż w ich przypadku informacje dźwiękowe muszą po części zrekomensować brak lub niedobór informacji, które inni odbierają zmysłem wzroku. W przypadku osób z tymi niepełnosprawnościami słuch odgrywa również ważną rolę w orientacji przestrzennej.

Dla zapewnienia bezpieczeństwa pracowników istotna jest prawidłowa percepcja tych dźwięków (rozumiana jako świadoma reakcja na bodziec słuchowy), w szczególności sygnałów alarmowych i to w sytuacji, gdy pracownik koncentruje uwagę na wykonywanych przez siebie czynnościach. Ważna jest również ocena położenia (kierunek i odległość) źródła dźwięku względem człowieka. W przypadku osób z niepełnosprawnością wzroku akustyka środowiska, w tym dźwięki pochodzące z otoczenia, mają również duży wpływ na możliwości orientacji przestrzennej.

Na percepcję sygnałów akustycznych (w tym słyszenie kierunkowe umożliwiające ocenę położenia źródła dźwięku) czy na orientację przestrzenną osób niewidomych w środowisku pracy wpływa wiele czynników. Zasadnicze znaczenie ma szeroko pojęta akustyka środowiska pracy, rozumiana zarówno jako właściwości akustyczne pomieszczeń pracy, parametry hałasu występującego w tym środowisku, jak i właściwości dźwięków użytecznych (niosących informację o środowisku pracy). Inne czynniki, które wpływają na percepcję sygnałów akustycznych, to np. ochronniki słuchu, ubytki słuchu (wynikające zarówno ze starzenia się, jak i narażenia na hałas) czy też protezy słuchu (aparaty słuchowe, implanty ślimakowe), [2]. Mając na uwadze mnogość tych czynników, konieczne jest prowadzenie badań w celu określenia wpływu poszczególnych z nich na percepcję dźwięków czy orientację przestrzenną.

Badania związane z percepcją dźwięku oraz orientacją przestrzenną wykonywane są w czołowych ośrodkach badawczych z wykorzystaniem różnych metod i stanowisk badawczych [3-10]. W kontekście takich badań, prowadzonych głównie w warunkach laboratoryjnych, istotne jest przygotowanie odpowiednich bodźców akustycznych (sygnałów testowych), w celu wykorzystania ich do oceny danej zdolności i wpływu na nią czynnika zakłócającego w ramach zaprojektowanego eksperymentu. Zastosowania dźwięku przestrzennego wymagają w szczególności badania słyszenia kierunkowego i orientacji przestrzennej. Jest to dźwięk odtwarzany za pomocą co najmniej dwóch głośników, pozwalający na stworzenie wrażenia przestrzennego rozmieszczenia źródeł dźwięku i odwzorowanie przestrzeni dźwiękowej rzeczywistego środowiska na podstawie dokonanych rejestracji sygnałów akustycznych – czyli stworzenie akustycznego obrazu wirtualnego środowiska pracy [11].

Istnieją różne techniki rejestracji i odtwarzania dźwięku przestrzennego, takie jak technika binauralna wykorzystująca funkcje przenoszenia związane z głową (ang. *Head Related Transfer Function* – HRTF), powszechnie znana technika stereofoniczna, zaawansowane techniki bezpośredniej syntezy fali akustycznej czy technika ambisoniczna. Każda z nich ma swoje zalety i wady wynikające z jednej strony z dokładności odwzorowywania rzeczywistej przestrzeni dźwiękowej, a z drugiej ze złożoności technicznej i wymagań aparaturowych niezbędnych do jej realizacji. W ostatnich latach coraz większą popularność na polu rejestracji i odtwarzania dźwięku przestrzennego zyskuje technika ambisoniczna, zwana również ambisonią.

Celem artykułu jest przedstawienie możliwości wykorzystania ambisonii do badań percepcji dźwięków (w tym słyszenia kierunkowego) i orientacji przestrzennej osób na przykładzie stanowiska laboratoryjnego, zbudowanego w laboratoriach Tech-Safe-Bio Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego.

Technika ambisoniczna

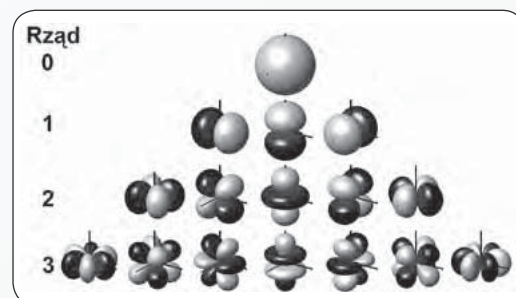
Ambisonia po raz pierwszy została opisana w pracy Michaela Gerzona na przełomie lat 60. i 70. ubiegłego wieku [12]. Jej zastosowanie daje możliwość reprodukcji dźwięku przestrzennego, zarówno w płaszczyźnie poziomej, jak i pionowej, z dokładnością znacznie większą niż w typowych systemach stereo- czy kwadrofonicznych, zależną od liczby zastosowanych głośników oraz rzędu (patrz dalej) ambisonii. Co ważne, osoba badana, wokół której utworzono obraz akustyczny z wykorzystaniem techniki ambisonicznej, może przemieszczać się w pewnym zakresie w jego obszarze.

W technice ambisonicznej do opisu dźwięku przestrzennego (pola akustycznego) stosuje się harmoniki sferyczne. Tworzą one zestawy specjalnych funkcji ortogonalnych, określonych na powierzchni sfery, za pomocą których można przedstawić inne funkcje, określone na tych sferach (na przykład: opisujące pole akustyczne). Ujmując rzecz w uproszczeniu, dźwięk przestrzenny może być zapisany jako wiele sygnałów odpowiadających kolejnym harmonikom sferycznym. Wizualizację rzędów od 0 do 3 takiego zapisu przedstawiono na rys. 1.

Należy tu zauważyć, że harmonika sferyczna rzędu 0 odpowiada charakterystyce kierunkowej mikrofonu o charakterystyce dookólnej, natomiast harmoniki sferyczne rzędu 1 odpowiadają kształtem charakterystyce kierunkowej mikrofonu o charakterystyce ósemkowej, zlokalizowanej wzdłuż kolejnych osi współrzędnych x , y i z przestrzeni trójwymiarowej. Stanowi to podstawę dla ambisonii 1. rzędu, gdyż teoretycznie składowe ambisoniczne rzędów 0 i 1 mogą być bezpośrednio zarejestrowane z zastosowaniem czterech mikrofonów: jednego o charakterystyce dookólnej i trzech o charakterystyce ósemkowej. W praktyce technicznej takie rozwiązanie jest jednak trudne w realizacji, gdyż w celu uzyskania prawidłowego odwzorowania ambisonicznego, mikrofony powinny być umieszczone w jednym punkcie przestrzeni.

Rozwiązanie problemu jednoczesnej rejestracji sygnałów odpowiadającym harmonikom sferycznym 1. rzędu zostało przedstawione przez firmę Soundfield w 1978 r. Opracowany przez to przedsiębiorstwo tzw. mikrofon ambisoniczny jest w rzeczywistości zespołem czterech mikrofonów (kapsuł mikrofonowych) o charakterystyce kardoidalnej, umieszczonych blisko siebie w miejscach odpowiadających ścianom czworoszczanu foremego. Konstrukcja taka jest obecnie powszechnie stosowana w mikrofonach ambisonicznych 1. rzędu. Przykładowy mikrofon ambisoniczny 1. rzędu przedstawiono na fot. 1.

Mikrofon ambisoniczny pozwala na rejestrację czterokanałowego sygnału w tzw. formacie A, czyli takim, który może być, na drodze prostych operacji matematycznych, przekształcony do tzw. formatu B, zawierającego odpowiednio sygnały W, X Y i Z, odpowiadające pierwszym czterem harmonikom sferycznym (czyli tak, jak



Rys. 1. Harmoniki sferyczne rzędów 0 – 3 (kolor jasnoszary – część dodatnia, kolor ciemnoszary – część ujemna). Źródło: Wikipedia [13]
Fig. 1. Spherical harmonics of 0 – 3 rows (light gray – positive part, dark gray – negative part). Source: Wikipedia [13]



Fot. 1. Mikrofon ambisoniczny 1. rzędu
Photo 1. First-order ambisonic microphone

gdyby zostały zarejestrowane mikrofonem dookólnym i trzema o charakterystyce ósemkowej). Kapsuły mikrofonowe mikrofonu ambisonicznego teoretycznie powinny znajdować się dokładnie w tym samym punkcie przestrzeni z uwagi na potrzebę uniknięcia przesunięć fazowych pomiędzy sygnałami. Nie jest to jednak wykonalne fizycznie ze względu na ich rozmiar. Z tego względu przy konwersji sygnałów z formatu A do B dokonuje się ich matematycznej korekcji, mającej na celu ograniczanie różnic fazowych, wynikających z ich położenia. Korekcja ta w największym stopniu wpływa na lokalizację dźwięku w zakresie wysokich częstotliwości.

Zastosowanie harmonik sferycznych wyższego rzędu zwiększa rozdzielczość lokalizacji źródeł dźwięku, jednak uzyskanie składowych ambisonicznych wyższego rzędu wymaga zastosowania mikrofonów ambisonicznych o innej konstrukcji,

mających najczęściej postać kuli z równomiernie rozmieszczonymi na jej powierzchni mikrofonami wszechkierunkowymi, z których sygnał poddawany jest obróbce matematycznej [14].

Dźwięk zarejestrowany z użyciem techniki ambisonicznej może być dekodowany i odtwarzany w różnych układach głośników. W celu uzyskania dźwięku przestrzennego w płaszczyźnie horyzontalnej wymagane jest zastosowanie co najmniej 3 głośników, natomiast do uzyskania sferycznego dźwięku przestrzennego wymagane jest zastosowanie co najmniej 4 głośników. W praktyce, w celu uzyskania dobrych wrażeń odsłuchowych, wymagane jest zastosowanie większej liczby głośników. Liczba głośników nie może być również zbyt duża w stosunku do rzędu ambisonii, gdyż może prowadzić do zniekształceń w obrazie akustycznym. Lokalizacja głośników w ambisonii nie jest sztywno zdefiniowana (w odróżnieniu od innych systemów wielokanałowych).

Stanowisko laboratoryjne CIOP-PIB do badań percepcji dźwięków

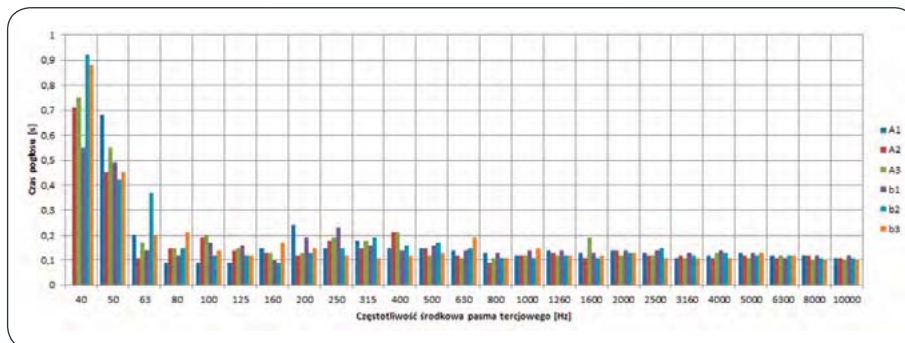
Stanowisko laboratoryjne do badań percepcji dźwięków i orientacji przestrzennej osób (zwane dalej stanowiskiem do odtwarzania dźwięku przestrzennego) z zastosowaniem techniki ambisonicznej zostało wykonane w komorze do badań akustycznych w laboratoriach Tech-Safe-Bio CIOP-PIB. Komora ta (fot. 2.) jest pomieszczeniem typu *box in a box* (z angielskiego „pudełko w pudełku” – w akustyce jest to zespół dwóch pomieszczeń, z których jedno znajduje się wewnątrz drugiego, odseparowanych od siebie materiałami tłumiącymi dźwięki rozchodzące się drogą powietrzną i materiałową) o dużej izolacyjności akustycznej.

Podstawowymi parametrami cechującymi komorę są czas pogłosu i poziom tła akustycznego. Na rys. 2. przedstawiono wyniki sześciu pomiarów (z wykorzystaniem metody MLS) czasu pogłosu komory w pasmach tercjowych, dotyczące dwóch różnych lokalizacji źródła dźwięku (na środku komory i w jej rogu); z umieszczonymi wewnątrz elementami wyposażenia badawczego. Czas pogłosu pozwala ocenić m.in., jaka część energii fali akustycznej jest pochłaniana przez powierzchnie pomieszczenia (ściany, sufit, podłoga), czy też w jakiej odległości od źródła dźwięku dominuje fala akustyczna pochodząca bezpośrednio od źródła, a w jakiej fale odbite od jego powierzchni. Jest to istotne dla badań percepcji dźwięku, gdyż duże czasy i związana z nimi obecność fal odbitych pogarszają np. możliwość oceny lokalizacji źródeł dźwięku.

Z badań wynika, że średni czas pogłosu w komorze w odniesieniu do częstotliwości powyżej 63 Hz nie przekracza 0,2 s. Dłuższe czasy pogłosu w zakresie najniższych częstotliwości wynikają z konstrukcji komory (nie jest to komora w pełni bezechowa), a w szczególności konstrukcji podłogi, która jest elementem odbijającym dźwięki o najniższych częstotliwościach. Na wyższe czasy pogłosu w zakresie niskich częstotliwości wpły-



Fot. 2. Komora do badań akustycznych
Photo 2. Acoustic chamber



Rys. 2. Czas pogłosu komory do badań akustycznych w pasmach tercjowych (pomiar A1-A3 – głośnik umieszczony na środku komory b1-b3 – głośnik umieszczony w rogu komory)

Fig. 2. Reverberation time of the acoustic chamber in one-third octave bands (measurements A1-A3 – loudspeaker placed in the middle of the chamber; b1-b3 – loudspeaker placed in the corner of the chamber)

wają również kształt powierzchni i współczynnik pochłaniania dźwięku materiału pokrywającego ściany komory.

Poziom dźwięku A tła akustycznego w komorze nie przekracza 20 dB, natomiast poziom ciśnienia akustycznego (bez korekcji) jest większy i zawiera się w przedziale od 40 do 45 dB (co wynika z podwyższonych poziomów ciśnienia akustycznego tła akustycznego w zakresie częstotliwości poniżej 63 Hz). W przypadku częstotliwości powyżej 63 Hz komora charakteryzuje się krótkim czasem pogłosu i niskim poziomem tła akustycznego, mając w tym zakresie właściwości zbliżone do komory bezechowej.

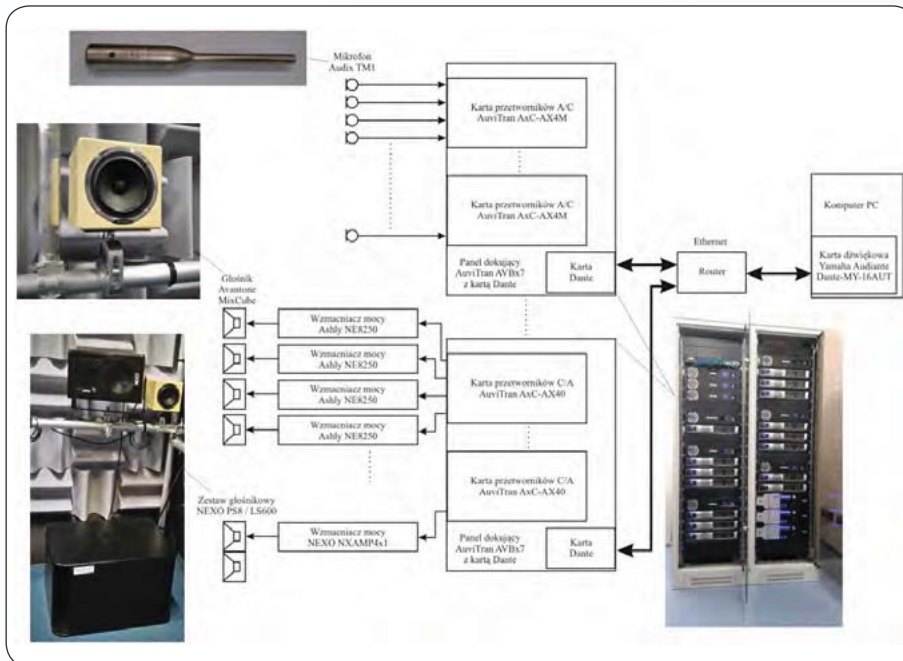
Omawiana komora jest wyposażona w wielokanałowy system akustyczny, umożliwiający odtwarzanie i pomiary dźwięków w jej wnętrzu. System ten składa się ze 126 głośników (120 głośników Avantone MixCube oraz 6 zestawów głośnikowych Nexo LS600/PS8) i 80 mikrofonów Audix TM1 rozmieszczonych na stelażu z rur aluminiowych o średnicy 50 mm, zamocowanym do ścian komory. Schemat wielokanałowego

systemu do odtwarzania i pomiarów dźwięków przedstawiony został na rys. 3.

System ten wykorzystuje sieć DANTE (*Digital Audio Network Through Ethernet*), w której transmisja cyfrowych sygnałów akustycznych realizowana jest poprzez sieć Ethernet.

Zbudowane w CIOP-PIB stanowisko laboratoryjne do odtwarzania dźwięku przestrzennego z wykorzystaniem techniki ambisonicznej przedstawiono na fot. 3. Ma ono kształt sfery, wewnątrz której zlokalizowane jest siedzisko osoby badanej.

Dźwięki wykorzystywane w badaniach dotyczących percepcji dźwięku i orientacji przestrzennej osób powinny odwzorowywać rzeczywiste akustyczne środowisko pracy lub tworzyć środowisko do niego zbliżone. Z tego względu na potrzeby laboratorium gromadzone są obecnie próbki dźwiękowe w postaci nagrań ambisonicznych z różnego rodzaju środowisk pracy. Do nagrań tych wykorzystywany jest wspomniany wcześniej mikrofon ambisoniczny firmy



Rys. 3. Schemat wielokanałowego systemu do odtwarzania i pomiarów dźwięków
Fig. 3. Schematic diagram of a multichannel sound reproduction and recording system



Fot. 3. Stanowisko laboratoryjne do badań percepcji dźwięku i orientacji przestrzennej umożliwiające odtwarzanie dźwięku przestrzennego z wykorzystaniem techniki ambisonicznej
Photo 3. Laboratory stand for reproducing spatial sound using ambisonics for research on sound perception and spatial orientation

Sennheiser, współpracujący z wielokanałowym, cyfrowym rejestratorem sygnałów fonicznych.

Rejestrator ten umożliwia jednoczesny zapis czterech sygnałów, pochodzących z mikrofonu ambisonicznego, przy zachowaniu jednakowych parametrów rejestracji w każdym z kanałów. Na potrzeby laboratorium rejestrowane są również dźwięki różnego rodzaju źródeł w technice monofonicznej. Wykorzystując programy przeznaczone dla techniki ambisonicznej można bowiem „umieścić” takie źródło w dowolnym miejscu przestrzeni odsłuchowej, wzbogacając akustyczny obraz wirtualnego środowiska pracy o dodatkowe elementy.

Podsumowanie

W artykule przedstawione zostały podstawowe zagadnienia dotyczące techniki ambisonicznej przetwarzania sygnałów akustycznych, jak również wykonane w CIOP-PIB stanowisko laboratoryjne, bazujące na tej technice. Stanowisko to umożliwia wytwarzanie sygnałów akustycznych w postaci dźwięku przestrzennego na potrzeby badań w zakresie percepcji dźwięków (w tym słyszenia kierunkowego) i orientacji przestrzennej osób, przeprowadzanych pod kątem poprawy warunków pracy, w szczególności realizację wirtualnego akustycznego środowiska

pracy zbliżonego swoimi właściwościami do środowiska rzeczywistego. Pozwala to na uzyskanie lepszego odniesienia do warunków rzeczywistych w warunkach laboratoryjnych, a tym samym zwiększa miarodajność realizowanych badań.

Obecnie gromadzone są próbki w postaci nagrań dźwięków z różnych środowisk pracy, co pozwoli poszerzyć możliwości wykorzystania stanowiska.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Engel Z., Koradecka D., Augustyńska D., Kowalski P., Morzyński L., Zera J. *Zagrożenia wibroakustyczne* [w:] Koradecka D. (red.): *Bezpieczeństwo i higiena pracy*. CIOP-PIB, Warszawa 2008
- [2] Alali K. A., Casali J. G. *The challenge of localizing vehicle backup alarms: Effects of passive and electronic hearing protectors, ambient noise level, and backup alarm spectra content*. "Noise & Health" 2011, Vol. 13:99-12
- [3] Blauert J. *Spatial Hearing: The Psychophysics of Human Sound Localization*. MIT Press, Cambridge 1996
- [4] Skrodzka E., Czechrya B., Tomaszewski F. *Identyfikacja i klasyfikacja źródeł dźwięków i drgań istotnych w orientacji przestrzennej osób niewidomych w dużym mieście*. 56. otwarte seminarium z akustyki, Goniądz nad Biebrzą, 15-18 września 2009 r.
- [5] Młyński R., Kozłowski E. *Examination of recognition of the direction from which an industrial truck auditory danger signal was coming*. "Measurement Automation Monitoring" 2017, Vol.63, No. 1
- [6] Młyński R., Kozłowski E. *Directivity of hearing of auditory danger signal emitted by overhead crane*. "Medycyna Pracy" 2016, 67, 5:589-597
- [7] Młyński R., Kozłowski E. *Ocena obszaru słyszalności dźwiękowej sygnału bezpieczeństwa emitowanego przez wózek jezdniowy*. „Medycyna Pracy” 2015, 66, 2:173-184
- [8] Poveda-Martinez P., Peral-Orts Ramon, Campillo-Davo N., Nescolarde-Selva J., Lloret-Climent M., Ramis-Soriano J. *Study of the effectiveness of electric vehicle. Warning sound depending on the urban environment*. "Applied Acoustic" 2017, Vol. 116:317-328
- [9] Grifford R.H., Grantham W., Sheffield S.W., Davis T. J., Dwyer R., Dorman M. F. *Localization and interaural time difference (ITD) thresholds for cochlear implant recipients with preserved acoustic hearing in the implanted ear*. "Hearing Research" 2014, Vol. 312:28-37
- [10] Zhang W., Samarasinghe P.N., Chen H., Abhayapala T.D. *Surround by Sound: A Review of Spatial Audio Recording and Reproduction*. "Appl. Sci". 2017, 532,7
- [11] Kucharski M., Stankiewicz T. *Dopasowanie toru transmisji dźwięku do warunków odsłuchowych*. Magisterska praca dyplomowa, Kraków 2012/2013
- [12] Gerzon M., *Periphery With-height sound reproduction*. "Journal of the Audio Engineering Society" 1973, Vol. 21, No. 1:2-10
- [13] Ambisonics <https://en.wikipedia.org/wiki/Ambisonics>
- [14] Plessas P. *Rigid sphere microphone arrays for spatial recording and holography, master thesis*. Graz University of Technology, University of Music and Performing Arts, 2009

Publikacja opracowana w ramach realizacji zadania badawczego z działalności statutowej, finansowanej w latach 2016-2017 ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Autorzy pracy pragną podziękować p. dr. inż. Witoldowi Mikulskiemu oraz p. techn. Jerzemu Kozłowskiemu za pomoc w zakresie pomiarów parametrów akustycznych komory badań akustycznych.