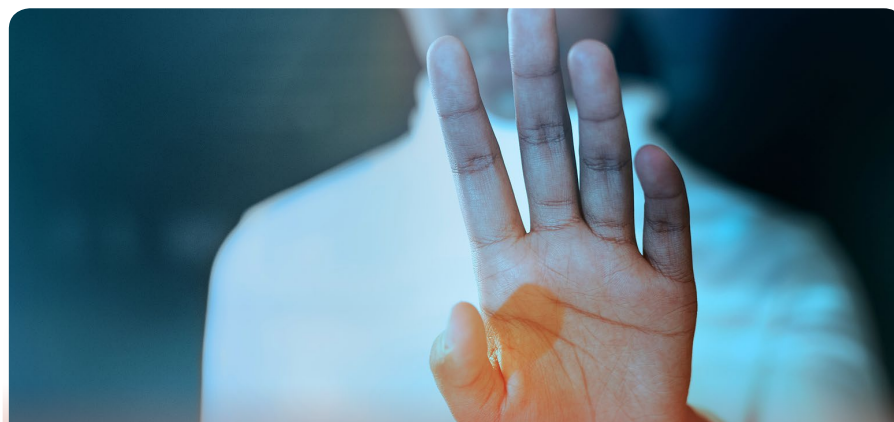




dr inż. LESZEK MORZYŃSKI (ORCID: 0000-0003-3534-3284)  
 inż. ADAM SWIDZIŃSKI (ORCID: 0000-0002-3362-013X)  
 ALIAKSANDRA SHMYK (ORCID: 0000-0001-7508-5035)  
 Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy  
 Kontakt: [Imorzyns@ciop.pl](mailto:Imorzyns@ciop.pl)  
 DOI: 10.54215/BP.2022.06.15.Morzynski

# Ultradźwiękowa technika haptyczna – działanie, zastosowania, zagrożenia

Fot. Rawpixel.com/Bigstockphoto



Ultradźwiękowa technika haptyczna to nowa, wchodząca właśnie na rynek komercyjny technika, umożliwiająca tworzenie w powietrzu nad przetwornikiem haptycznym niewidocznych obiektów, które mogą być wyczuwane za pomocą zmysłu dotyku. W technice tej skoncentrowana i odpowiednio modulowana wiązka ultradźwięków wprawia w drgania skórę człowieka, pobudzając w ten sposób znajdujące się w niej mechanoreceptory i wywołując uczucie dotyku. Technika ta ma wiele potencjalnych zastosowań – od wzbogacania rzeczywistości wirtualnej, przez interfejsy sterujące, do pomocy dla osób niepełnosprawnych wzrokowo. Z drugiej jednak strony, ze względu na zastosowanie ultradźwięków o wysokich poziomach ciśnienia akustycznego, ta technika może się stać źródłem zagrożeń dla użytkownika. W artykule omówiono zasadę działania ultradźwiękowej techniki haptycznej, jej możliwe zastosowania oraz dostępne na rynku komercyjnym ultradźwiękowe przetworniki haptyczne. Przedstawiono również wyniki wstępnej oceny zagrożenia hałasem ultradźwiękowym podczas korzystania z ultradźwiękowej techniki haptycznej, oparte na badaniach hałasu ultradźwiękowego, przeprowadzonych w odniesieniu do jednego z omówionych przetworników.

*Słowa kluczowe: ultradźwiękowa technika haptyczna, przetwornik haptyczny, hałas ultradźwiękowy*

## Ultrasonic haptic technique – operation, applications, hazards

The ultrasonic haptic technique is a new, commercially available technique that allows the creation of invisible objects in the air above the haptic device, which can be sensed by the sense of touch. In this technique, a concentrated and appropriately modulated ultrasound beam causes vibrations of the human skin, thus stimulating the mechanoreceptors located in it and causing a feeling of touch. The technique has many potential applications, ranging from enriching virtual reality through control interfaces to aids for people with visual disabilities. On the other hand, this technique, due to the use of ultrasound with high sound pressure levels, may become a source of potential hazards to its user. The article discusses the principle of operation of the ultrasonic haptic technique, its possible applications and currently commercially available ultrasonic haptic devices. The paper also presents the results of a preliminary assessment of ultrasonic noise hazard caused by the ultrasonic haptic technique based on the ultrasonic noise measurements carried out for one of the described devices.

*Keywords: ultrasonic haptic technique, haptic device, ultrasonic noise*

## Wstęp

Postęp w dziedzinie nauki prowadzi do powstawania nowych rozwiązań – technik i wykorzystujących je urządzeń lub maszyn, procesów, substancji itd. – ułatwiających życie człowieka i czyniących jego pracę bardziej wydajną. Należy jednak mieć na uwadze, że każde z takich rozwiązań, choćby było bardzo przydatne w swoim podstawowym przeznaczeniu, może stanowić dla człowieka potencjalne źródło zagrożeń, które bywają niedostrzegalne, mało znaczące lub trudne do stwierdzenia. Z tego względu każda nowa technika, która jest wdrażana, powinna zostać poddana ocenie pod kątem potencjalnych zagrożeń dla ludzi. Jedną z najnowszych technik, wchodzących obecnie do użytku i mogących znaleźć w niedalekiej przyszłości szerokie zastosowanie – zarówno w środowisku życia, jak i pracy – jest ultradźwiękowa technika haptyczna (ze starogreckiego *haptikos* – dotykalny, dotykowy). Technika ta dzięki odpowiedniemu wykorzystaniu ultradźwięków umożliwia wytwarzanie w powietrzu ponad specjalnym przetwornikiem niewidocznych „obektów”, które mogą być wyczuwane za pomocą dłoni – z wykorzystaniem zmysłu dotyku.

Celem artykułu jest omówienie zagadnień związanych z ultradźwiękową techniką haptyczną i jej zastosowaniami, wraz ze wstępną oceną potencjalnych zagrożeń hałasem ultradźwiękowym (których źródłem może być właśnie ta technika) – na podstawie badań własnych realizowanych w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym (CIOP-PIB).

## Ultradźwiękowa technika haptyczna – zasada działania i ultradźwiękowe przetworniki haptyczne

Jedną z pierwszych prac, w której wykazano możliwość stymulacji za pomocą ultradźwięków receptorów czuciowych w palcach człowieka, była wydana w 1995 r. publikacja Dalecki i in. [1]. W opisanych w niej badaniach wykorzystano ultradźwięki rozchodzące się w wodzie, a uczucie dotyku było wywoływane w leżącym na powierzchni wody palcu, wyposażonym

w odpowiedni reflektor akustyczny. Wyniki tej pracy wzbudziły zainteresowanie świata naukowego i stały się podstawą do rozwoju ultradźwiękowej techniki haptycznej. W niedługim czasie wykazano, że uczucie dotyku może być wywoływane również przez ultradźwięki propagujące w powietrzu i nie jest do tego konieczne stosowanie dodatkowych reflektorów akustycznych na powierzchni skóry [2-4]. Uczucie dotyku następuje w efekcie niewielkich deformacji powierzchni skóry, powodowanych przez wysokie ciśnienie akustyczne skupionej wiązki ultradźwiękowej. Wiązka ultradźwiękowa o stałych parametrach nie wywołuje jednak bezpośrednio uczucia dotyku. Receptory czuciowe skóry reagują na drgania o częstotliwościach w zakresie 0,4-500 Hz [5], a do wywołania uczucia dotyku niezbędna jest modulacja wiązki ultradźwiękowej, dzięki której skóra wprawiana jest w drgania o częstotliwości ze wskazanego zakresu. Wytworzenie odpowiednio skoncentrowanej wiązki ultradźwiękowej wymagało opracowania odpowiednich ultradźwiękowych przetworników haptycznych. Są to matryce miniaturowych przetworników ultradźwiękowych, w których formowanie wiązki emitowanej przez nie energii akustycznej osiąga się poprzez sterowanie fazą poszczególnych sygnałów składowych.

W obecnych pracach nad rozwojem tej ultradźwiękowej techniki haptycznej badacze koncentrują się na możliwościach wytworzenia wrażenia dotykania wirtualnych obiektów trójwymiarowych o wybranym kształcie, w tym obiektów zmieniających swoje położenie. Wirtualne obiekty nad płaszczyzną przetwornika można tworzyć za pomocą dwóch metod. Pierwsza polega na wytworzeniu w przestrzeni nad matrycą przetwornika haptycznego układu punktów odwzorowujących kształt danego obiektu. W celu wywołania efektu dotyku poziom ciśnienia akustycznego w tych punktach jest modulowany amplitudowo. Druga metoda wykorzystuje modulację czasowo-przestrzenną. W tym przypadku przetwornik tworzy jedną wiązkę ultradźwięków (jeden punkt skupienia), który, poruszając się, kreśli z określoną częstotliwością dany kształt w przestrzeni nad przetwornikiem [6]. W pracach Longa i Freemana oraz ich współpracowników [7, 8] przedstawiono możliwości tworzenia za pomocą ultradźwiękowego przetwornika haptycznego geometrycznych obiektów dwu- i trójwymiarowych. W pracy Longa [7] skupiono się na możliwości tworzenia punktu o zmiennym położeniu. Jeden z pierwszych prototypów ultradźwiękowego przetwornika haptycznego został opisany w pracy Iwamoto i in. [3]. Umożliwił on tworzenie pojedynczego punktu skoncentrowanych ultradźwięków. Ulepszony przetwornik, który pozwalał już na tworzenie określonych kształtów, w tym ruchomych, zaprezentowano w pracy Hosni i in. [6]. Następnym krokiem w rozwoju ultradźwiękowej techniki haptycznej było dodanie do przetwornika kamery śledzącej położenie dłoni użytkownika, co umożliwiło

pełną interakcję między przetwornikiem a osobą oraz manipulowanie generowanymi kształtami przez osobę korzystającą z przetwornika [4]. W efekcie prowadzonych badań pojawił się na rynku pierwszy komercyjnie dostępny ultradźwiękowy przetwornik haptyczny [9].

### Ultradźwiękowa technika haptyczna – potencjalne zastosowania i zagrożenia

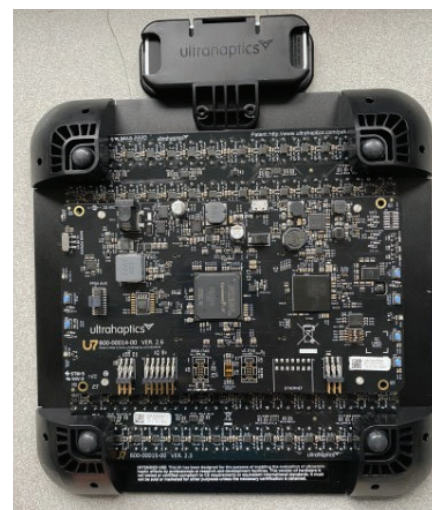
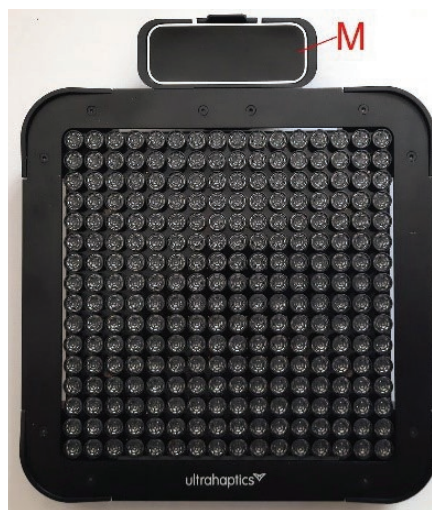
Nowa technika haptyczna ma wiele potencjalnych zastosowań w środowisku pracy i życia. Obiekty dotykowe w połączeniu ze śledzeniem ruchów dłoni umożliwiają tworzenie swego rodzaju manipulatorów przeznaczonych do sterowania systemami komputerowymi, maszynami czy urządzeniami. Takie rozwiązanie ma liczne zalety. Manipulator nie ma części mechanicznych, które mogą ulegać zużyciu lub uszkodzeniu. Może mieć dowolny kształt (przycisku, suwaka, pokrętła itd.), zmieniający się w zależności od aktualnie wykonywanej czynności, i tym samym – zastępować wiele manipulatorów jednocześnie. Istotne znaczenie ma zwłaszcza to, że w dobie pandemii spowodowanej koronawirusem SARS-CoV-2 taki manipulator – ze względu na brak materialnych elementów – sprzyja zachowaniu higieny i nie przyczynia się do rozprzestrzeniania patogenów chorobotwórczych.

Kolejnym obszarem zastosowania jest rzeczywistość wirtualna. Obok obrazu i dźwięku wrażenia dotykowe generowane z wykorzystaniem ultradźwiękowej techniki haptycznej mogą stanowić doskonałe uzupełnienie rzeczywistości wirtualnej, ułatwiające zwłaszcza manipulowanie obiektami prezentowanymi w tym środowisku. Można to również wykorzystać we wszelkiego rodzaju pracach projektowych, w których model budowanego obiektu (maszyny, urządzenia, budowli) jest najpierw tworzony w rzeczywistości wirtualnej. Inny, lecz bardzo ważny potencjalny obszar zastosowań, dotyczy osób niepełnosprawnych, a przede wszystkim

osób z niepełnosprawnością narządu wzroku (niewidomych oraz słabowidzących). Dla nich ultradźwiękowy przetwornik haptyczny może pełnić rolę „dotykowego wyświetlacza”, który odpowiednio sterowany za pomocą systemu komputerowego będzie źródłem wiedzy o wybranych obiektach czy otoczeniu. Przetwornik taki mógłby posłużyć np. do tworzenia wirtualnej, dotykowej mapy pomieszczenia, do której ma wejść osoba niewidoma, dzięki czemu zapozna się ona z układem pomieszczenia oraz będzie się w nim przemieszczać pewniej i bezpieczniej. Oczywiście możliwość wskazanych zastosowań istotnie zależy od tego, z jaką dokładnością mogą być tworzone obiekty dotykowe za pomocą ultradźwiękowej techniki haptycznej w danym przetworniku i jak przekładają się one na wrażenia dotykowe wywoływane u osoby korzystającej z tego urządzenia. Temu zagadnieniu będą poświęcone badania realizowane w najbliższym czasie w CIOP-PIB, a ich wyniki zostaną zaprezentowane w kolejnych publikacjach.

Mimo wielu przewidywanych zastosowań ultradźwiękowa technika haptyczna może być źródłem potencjalnych zagrożeń dla człowieka. Hałas ultradźwiękowy [10, 11] jest uznawany za czynnik szkodliwy dla zdrowia w środowisku pracy, mogący mieć negatywny wpływ na organizm człowieka, zwłaszcza na narząd słuchu. Warunkiem wywołania wrażenia dotykowego za pomocą ultradźwięków jest określony poziom ciśnienia akustycznego w punkcie ich koncentracji, który powinien wynosić minimum 145 dB [1]. Ultradźwięki powietrzne podlegają jednak silnemu tłumieniu na drodze propagacji, dlatego poziom ich ciśnienia akustycznego przy uchu osoby obsługującej przetwornik może być znacznie niższy niż w punkcie koncentracji wiązki, co wymaga potwierdzenia w badaniach.

Jedną z pierwszych prac podejmujących temat oceny narażenia na ultradźwięki pochodzące od ultradźwiękowego przetwornika haptycznego jest praca Liebler i in. [12],



Fot. 1. Ultradźwiękowy przetwornik haptyczny STRATOS Explore – widok z góry i z dołu; M – moduł śledzenia dłoni (źródło: CIOP-PIB)  
Photo 1. Ultrasonic haptic device STRATOS Explore – top and bottom view; M – hand tracking module (source: CIOP-PIB)



Fot. 2. Ultradźwiękowy przetwornik haptyczny STRATOS Inspire; M – moduł śledzenia dłoni (źródło: CIOP-PIB)

Photo. 2. Ultrasonic haptic device STRATOS Inspire; M – hand tracking module (source: CIOP-PIB)

w której badania potencjalnego zagrożenia ultradźwiękami podczas obsługi przetwornika haptycznego przeprowadzono z wykorzystaniem symulatora głowy i torsu umieszczonego w pobliżu przetwornika.

W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki badań zrealizowanych w CIOP-PIB. Obejmowały one wstępną ocenę zagrożenia hałasem ultradźwiękowym na podstawie badań przeprowadzonych z udziałem osób symulujących użytkownika wybranego ultradźwiękowego przetwornika haptycznego.

### Konstrukcje komercyjne – wybór obiektu badań

Z racji tego, że ultradźwiękowa technika haptyczna jest techniką bardzo młodą, większość ultradźwiękowych przetworników haptycznych, których opisy można znaleźć w literaturze, dotyczy konstrukcji eksperymentalnych, stosowanych w badaniach. Oferta rynkowa takich przetworników ogranicza się obecnie do dwóch modeli oferowanych przez Ultraleap – STRATOS Explore i STRATOS Inspire.

Przetwornik STRATOS Explore przedstawiono na fot. 1. Jak wskazuje nazwa produktu, jest on przeznaczony głównie do prac rozwojowych i eksperymentalnych. Urządzenie nie ma pełnej obudowy i stałej osłony matrycy przetworników ultradźwiękowych, co ułatwia eksperymenty oraz zastosowanie go jako urządzenia wbudowanego w autorskich rozwiązaniach technicznych. Przetwornik zawiera matrycę przetworników ultradźwiękowych Murata MA40S4S w układzie  $16 \times 16$ , pracujących z częstotliwością 40 kHz. Powyżej matrycy przetworników zainstalowano moduł śledzenia dłoni Leap Motion Controller, umożliwiając bardzo dokładny odczyt ruchu dłoni nad matrycą przetworników ultradźwiękowych. W omawianym urządzeniu moduł śledzenia dłoni nie jest ściśle zintegrowany z przetwornikiem haptycznym (matrycą ultradźwiękową), a każde z tych urządzeń może być użytkowane niezależnie.

Widok przetwornika STRATOS Inspire przedstawiono na fot. 2. Przetwornik ten jest zasadniczo kompletnym urządzeniem, przeznaczonym do bezpośredniego użycia jako interfejs komputerowy w komercyjnych zastosowaniach. Matryca przetworników ultradźwiękowych o prostokątnym kształcie jest w pełni zintegrowana z modułem śledzenia dłoni użytkownika. Urządzenie ma pełną obudowę oraz osłonę

przetworników ultradźwiękowych i może być instalowane na ścianie lub stawiane na biurku na dołączonym do niego wsporniku.

Do przetworników haptycznych producent udostępnia zestaw narzędzi programistycznych SDK (*Software Development Kit*), zawierający funkcje bazowe, umożliwiające generowanie za pomocą przetwornika obiektów o podstawowych kształtach (punktu, koła, kwadratu) i zmianę parametrów tych obiektów (położenia względem przetwornika, rozmiaru, intensywności obiektu i in.). Do zaprezentowanych w artykule badań eksperymentalnych dotyczących zagrożenia hałasem ultradźwiękowym wybrano przetwornik STRATOS Explore.

### Wyniki badań

Wstępne badania nad zagrożeniem hałasem ultradźwiękowym, pochodzącym z ultradźwiękowego przetwornika haptycznego, przeprowadzono w komorze do badań akustycznych CIOP-PIB [13]. System pomiarowy składał się z kasety pomiarowej typu 3560C z modułem wejścia/wyjścia typu 3110 i mikrofonu pomiarowego typu 4939A11. Do przetwarzania

danych pomiarowych wykorzystano komputer ze specjalnym oprogramowaniem z modułem analizy w pasmach częstotliwości. Przetwornik umieszczono na stole znajdującym się w odległości nie mniejszej niż 1,5 m od każdej ze ścian pomieszczenia. Mikrofon pomiarowy usytuowano w odległości 10 cm od prawego ucha osoby obsługującej przetwornik haptyczny i skierowano w kierunku źródła ultradźwięków – zgodnie z zaleceniami metodyki badań oraz oceny hałasu ultradźwiękowego [14-16]. Widok stanowiska badawczego w trakcie badań przedstawiono na fot. 3.

W trakcie badań za pomocą przetwornika generowano obiekty dotykowe o wybranych kształtach i parametrach częstotliwościowo-czasowych. W przypadku każdego z generowanych kształtów pomiary hałasu ultradźwiękowego wykonano dla dwóch pozycji osoby badanej – z rękami opuszczonymi luźno wzdłuż ciała oraz z prawą ręką, która dotyka kształtu wytwarzanego przez przetwornik. Za pomocą systemu pomiarowego rejestrowano równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych pasm od 10 do 50 kHz [17]. Na rysunku (zob. rys.)



Fot. 3. Stanowisko badawcze i osoba obsługująca ultradźwiękowy przetwornik haptyczny w trakcie badań (źródło: CIOP-PIB)

Photo 3. Experimental setup and the person operating the ultrasonic haptic device during the research (source: CIOP-PIB)

przedstawiono przykładowe widmo tercjowe hałasu wytwarzanego przez ultradźwiękowy przetwornik haptyczny.

Jak można zauważyć, główna część energii akustycznej koncentruje się w paśmie tercjowym o częstotliwości środkowej 40 kHz, czyli takiej, na której pracują przetworniki ultradźwiękowe przetwornika haptycznego. W pozostałych pasmach częstotliwości obserwuje się znacznie niższe poziomy ciśnienia akustyczne. Dodatkowo pomiary w paśmie tercjowym o częstotliwości środkowej 200 Hz, czyli dla częstotliwości modulacji sygnału ultradźwiękowego, wykazały poziomy ciśnienia akustycznego mieszczące się w przedziale 50-60 dB. To oznacza, że decydujący wpływ na ocenę zagrożenia hałasem ultradźwiękowym pochodzącym od ultradźwiękowego przetwornika haptycznego ma poziom ciśnienia akustycznego notowany w paśmie o częstotliwości środkowej 40 kHz. Z tego względu w dalszej części analizy wyników badań skoncentrowano się na tym paśmie częstotliwości. Rezultaty przeprowadzonych badań dla pasma o częstotliwości środkowej 40 kHz przedstawiono w tab. 1.

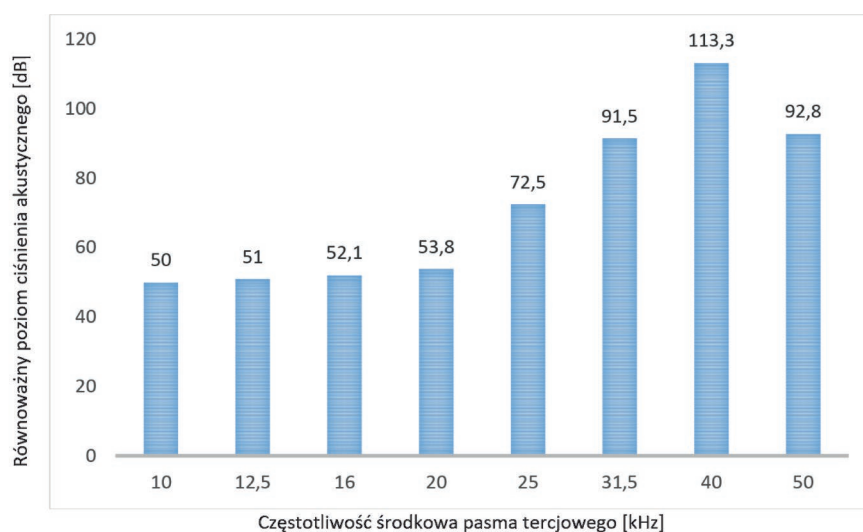
W przypadku każdego z generowanych obiektów górny wiersz zawiera wyniki pomiarów dla osoby z rękami wzdłuż ciała, dolny wiersz natomiast – dla osoby dotykającej kształtu.

Ocena zagrożenia hałasem ultradźwiękowym, wytwarzanym przez ultradźwiękowy przetwornik haptyczny, polegała na odniesieniu wyników przeprowadzonych pomiarów do obowiązujących w Polsce wartości dopuszczalnych hałasu ultradźwiękowego [11]. Wielkościami charakteryzującymi hałas ultradźwiękowy w środowisku pracy są:

- równoważne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych od 10 do 40 kHz, odniesione do ośmiogodzinnego dobowego lub przeciętnego tygodniowego czasu pracy, określonego w Kodeksie pracy;
- maksymalne poziomy ciśnienia akustycznego w pasmach tercjowych o częstotliwościach środkowych od 10 do 40 kHz.

Obowiązujące w Polsce dopuszczalne wartości hałasu ultradźwiękowego podano w tab. 2.

Wykonane pomiary i uzyskane wyniki badań w postaci równoważnych poziomów ciśnienia akustycznego umożliwiają bezpośrednie odniesienie się jedynie do pierwszej z wymienionych wielkości. Jak wynika z tab. 2, w przypadku pasma tercjowego o częstotliwości środkowej 40 kHz wartość dopuszczalna równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego odniesionego do ośmiogodzinnego czasu pracy wynosi 110 dB. Przy założeniu ośmiogodzinnej ekspozycji na hałas wytwarzany przez przetwornik wartości równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego w tym tercjowym paśmie częstotliwości nie powinny zatem przekraczać 110 dB. Natomiast przy krótszym czasie ekspozycji wartości te mogą być odpowiednio wyższe – przy założeniu, że nie zostanie przekroczona wartość dopuszczalna



Rys. Przykładowe widmo tercjowe hałasu ultradźwiękowego przetwornika haptycznego

Fig. An example of a third octave spectrum of ultrasonic noise of an ultrasonic haptic device

Tabela 1. Wyniki badań hałasu ultradźwiękowego emitowanego przez przetwornik haptyczny

Table 1. The results of the ultrasonic noise measurements of the ultrasonic noise emitted by the haptic device

Rodzaj obiektu dotykowego i jego parametry	Pozycja osoby badanej	Równoważny poziom ciśnienia akustycznego w paśmie tercjowym o częstotliwości środkowej 40 kHz [dB]
Punkt na wysokości 20 cm, modulacja amplitudowa, 200 Hz	ręce opuszczone wzdłuż ciała	113,3
	prawa ręka dotyka kształtu wytwarzanego przez przetwornik	103,0
Punkt na wysokości 30 cm, modulacja amplitudowa, 200 Hz	ręce opuszczone wzdłuż ciała	112,5
	prawa ręka dotyka kształtu wytwarzanego przez przetwornik	96,6
Kóło o średnicy 5 cm na wysokości 20 cm, modulacja czasowo-przestrzenna, 200 Hz	ręce opuszczone wzdłuż ciała	98,5
	prawa ręka dotyka kształtu wytwarzanego przez przetwornik	98,3
Kwadrat o boku 8 cm na wysokości 20 cm, modulacja czasowo-przestrzenna, 200 Hz	ręce opuszczone wzdłuż ciała	98,5
	prawa ręka dotyka kształtu wytwarzanego przez przetwornik	98,3
Kwadrat o boku 10 cm na wysokości 15 cm, modulacja czasowo-przestrzenna, 200 Hz	ręce opuszczone wzdłuż ciała	98,5
	prawa ręka dotyka kształtu wytwarzanego przez przetwornik	98,4

maksymalnego poziomu ciśnienia akustycznego w tym paśmie częstotliwości. Ze względu na ustalony charakter emitowanego hałasu ultradźwiękowego można oszacować, że wartości maksymalnych poziomów ciśnienia akustycznego są zbliżone do zmierzonych wartości równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego, a zatem są znacząco poniżej wartości dopuszczalnej, wynoszącej 130 dB.

W przeprowadzonych badaniach największą wartość równoważnego poziomu ciśnienia akustycznego – wynoszącą 113,3 dB – zanotowano

dla generowanego punktu i modulacji amplitudowej. W przypadku modulacji czasowo-przestrzennej oraz generowanych kształtów – koła i kwadratu – odnotowano o kilkanaście decybeli niższe równoważne poziomy ciśnienia akustycznego (do 98,5 dB). Warto zauważyć, że w przypadku kształtów koła i kwadratu oraz modulacji czasowo-przestrzennej położenie ręki operatora miało znikomy wpływ na mierzone wartości. Inna sytuacja występowała w przypadku punktu, gdyż położenie ręki osoby badanej mogło zmienić wynik pomiaru nawet o 16 dB.

Tabela 2. Wartości dopuszczalne hałasu ultradźwiękowego

Table 2. Ultrasonic noise limit values

Częstotliwość środkowa pasma tercjowego [kHz]	Dopuszczalny równoważny poziom ciśnienia akustycznego, odniesiony do ośmiogodzinnego dobowego lub przeciętnego tygodniowego wymiaru czasu pracy, określonego w Kodeksie pracy [dB]	Dopuszczalny maksymalny poziom ciśnienia akustycznego [dB]
10 12,5 16	80	100
20	90	110
25	105	125
31,5 40	110	130

## Podsumowanie

Ultradźwiękowa technika haptyczna jest nową techniką o szerokim obszarze możliwych zastosowań, zwłaszcza jako rozwiązanie wspierające osoby z niepełnosprawnościami. Ze względu na sposób działania ta technika może być jednocześnie potencjalnym źródłem zagrożeń dla użytkownika. Odnotowane w trakcie wstępnych badań ultradźwiękowego przetwornika haptycznego poziomy ciśnienia akustycznego ultradźwięków przy uchu osoby korzystającej z przetwornika w najmniej korzystnych przypadkach przekraczały 110 dB. Oznacza to, że w przypadku długotrwałego, ośmiogodzinnego korzystania z przetwornika haptycznego mogłoby dojść do przekroczenia wartości dopuszczalnych hałasu ultradźwiękowego. Przewidywane obecnie zastosowania obejmują głównie krótkotrwałe korzystanie z przetwornika – w takim przypadku wartości dopuszczalne hałasu ultradźwiękowego nie powinny zostać przekroczone.

Przedstawione w pracy wyniki i płynące z nich wnioski stanowią wstępną ocenę możliwych zagrożeń powodowanych przez ultradźwiękową technikę haptyczną. Opisanie badania zostały zrealizowane z udziałem jednej osoby stojącej w pobliżu przetwornika haptycznego. Jednakże ze względu na silne tłumienie ultradźwięków w powietrzu w przypadku osób o innym wzroście lub znajdujących się w innej pozycji względem przetwornika ekspozycja na hałas ultradźwiękowy może być większa. Duży wpływ na wyniki pomiarów hałasu ultradźwiękowego mogą mieć również parametry generowanego obiektu dotykowego, które w badaniach wstępnych zostały sprawdzone tylko w ograniczonym zakresie. Niezbędne jest zatem przeprowadzenie szerszych, bardziej szczegółowych badań hałasu ultradźwiękowego, emitowanego przez ultradźwiękowe przetworniki haptyczne. Takie badania są obecnie realizowane w CIOP-PIB, a ich wyniki oraz płynące z nich wnioski zostaną przedstawione w kolejnej publikacji zespołu realizującego badania.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] DALECKI, D., et al. Tactile perception of ultrasound. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1995, 97: 3165-3170.
- [2] GAVRILOV, L.R., TSIRULNIKOV, E.M., DAVIES, I. ab I. Application of focused ultrasound for the stimulation of neural structures. *Ultrasound in Medicine & Biology*. 1996, 22(2): 179-192.
- [3] IWAMOTO, T., TATEZONO, M., SHINODA, H. Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound. [In:] M. Ferre (ed.), *Haptics: Perception, Devices and Scenarios Lecture (6<sup>th</sup> International Conference, EuroHaptics 2008, Proceedings)*; 2008 June 10-13, Madrid (Spain), Berlin: Springer; 2008, pp. 504-513.
- [4] CARTER, T., et al. UltraHaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces (Proceedings of the 26<sup>th</sup> annual ACM symposium on User interface software and technology UIST'13); 2013 October 8-10; St. Andrews (United Kingdom); 2013, pp. 505-514.
- [5] GESCHIEDER, G.A., et al. A four-channel analysis of the tactile sensitivity of the fingertip: frequency selectivity, spatial summation, and temporal summation. *Somatosensory & Motor Research*. 2002, 19(2): 114-124.
- [6] HOSHI, T., et al. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*. 2010, 3(3): 155-165.
- [7] LONG, B., et al. Rendering volumetric haptic shapes in mid-air using ultrasound. *ACM Transactions on Graphics*. 2014, 33(6): 1-10.
- [8] FREEMAN, E., et al. Textured surfaces for ultrasound haptic displays, *Proc. of 19<sup>th</sup> ACM International Conference on Multimodal Interaction (ICMI' 2017: Proceedings of the 19<sup>th</sup> ACM International Conference on Multimodal Interaction)*; 2017 November 13-17; Glasgow (Scotland); 2017, pp. 491-492.
- [9] Ultraleap, STRATOS Explore, <https://www.ultraleap.com/product/stratos-explore>.
- [10] KORADECKA, D. (red.). *Bezpieczeństwo i higiena pracy*, Warszawa: CIOP-PIB, 2008.

[11] Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. poz. 1286).

[12] LIEBLER, M., et al. Experimental characterization of high-intensity focused airborne ultrasound fields. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2020, 148(3): 1713-1722.

[13] MORZYŃSKI, L., et al. Laboratory for testing of sound perception in virtual acoustic working environment (Proceedings of 48<sup>st</sup> Spanish Congress on Acoustics, *Tecni Acustica 2017*); 2017 October 3-6, A Coruña (Spain), 2017.

[14] RADOSZ, J. Methodology issues of ultrasonic noise exposure assessment. *Noise Control Engineering Journal*. 2012, 60(6): 645-654.

[15] RADOSZ, J. Ultrasonic Noise Measurements in the Work Environment. [In:] D. Pleban (ed.), *Occupational Noise and Workplace Acoustics – Advances in Measurement and Assessment Techniques*, Boca Raton: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2021.

[16] PN-Z-01339:2020-12. Hałas ultradźwiękowy – Wymagania dotyczące wykonywania pomiarów w środowisku pracy.

[17] MORZYŃSKI, L., SWIDZIŃSKI, A., SHMYK, A. Wstępna ocena zagrożeń hałasem ultradźwiękowym przy korzystaniu z ultradźwiękowych przetworników haptycznych. [W:] M. Drewniak, A. Zawadzka (red.), *Interdyscyplinarność, czyli współczesne wyzwanie dla naukowców*, cz. 6., Wydawnictwo Naukowe INTELECT, Waleńców, lipiec 2021, s. 32-39.

*Opracowano i wydano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2020-2022 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju (projekt nr II.PB.13 pt. „Rozwój i badania ultradźwiękowej technologii haptycznej ze szczególnym uwzględnieniem możliwości jej zastosowania na potrzeby osób z niepełnosprawnościami”). Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.*