



dr inż. RAFAŁ MŁYŃSKI (ORCID: 0000-0002-0500-0638)

dr inż. EMIL KOZŁOWSKI (ORCID: 0000-0003-4685-1145)

dr inż. LESZEK MORZYŃSKI (ORCID: 0000-0003-3534-3284)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: rmlynski@ciop.pl

DOI: 10.54215/BP.2023.03.6.Mlynski

Nowe rozwiązanie układu przekazywania dźwięku użytkownikowi ochronnika słuchu – koncepcja i konstrukcja

Fot. Bigstockphoto



Stosowanie ochronników słuchu wiąże się z ograniczaniem dźwięku docierającego do uszu ich użytkownika, przez co ograniczona jest również możliwość percepcji dźwięków, których odbiór jest istotny w miejscu przebywania pracownika. Z tego względu coraz powszechniej stosowane są rozwiązania w postaci układów elektronicznych wbudowanych w ochronniki słuchu, umożliwiające przekazywanie pod te ochronniki odpowiednio przetworzonych dźwięków. Rozwiązania obecnie stosowane w ochronnikach słuchu z regulowanym tłumieniem oferują możliwość wpływu na właściwości dźwięku przekazywanego użytkownikowi ograniczoną do prostej regulacji ogólnego wzmacnienia w torze odtwarzania sygnału. W artykule przedstawiono koncepcję rozwiązania przeznaczonego do wykorzystania w ochronniku słuchu i umożliwiającego dopasowanie właściwości przenoszonego dźwięku do potrzeb użytkownika dzięki poprawie odbioru użytecznych dźwięków poprzez kształtowanie charakterystyki częstotliwościowej przenoszonego dźwięku.

Słowa kluczowe: dźwięk, hałas, ochronnik słuchu, układ elektroniczny, nausznik przeciwhałasowy

A new solution of the system for transmitting sound to the user of the hearing protector – concept and design

The use of hearing protectors reduces the sound reaching the wearer's ears. As a result, the possibility of perceiving sounds, the perception of which is important in the environment of a worker's presence, is also limited. For this reason, solutions in the form of electronic systems built into hearing protectors are more and more commonly used, enabling the transmission of properly processed sounds under the hearing protectors. Solutions currently used in level-dependent hearing protectors offer the possibility of influencing the properties of the sound transmitted to the user limited to a simple adjustment of the general gain in the signal audio path. The aim of the article is to present the concept of the solution intended for use in a hearing protector and enabling the adjustment of the properties of the transmitted sound to the needs of the user, i.e. improving the reception of useful sounds. This is done by shaping the frequency response of the transmitted sound.

Keywords: sound, noise, hearing protector, electronic system, earmuff

Wstęp

Według danych GUS [1] w 2021 r. hałas stanowił największe zagrożenie spośród czynników związanych ze środowiskiem pracy i było nim zagrożonych 182,2 tys. osób. Podobną sytuację stwierdzano również w poprzednich latach: 181,7 tys. osób w 2020 r. [2], 186,4 tys. osób w 2019 r. [3]. Stosowanie ochronników słuchu, mimo że jest ostatnim z wielu rozwiązań proponowanych do wdrożenia w środowisku pracy, często stanowi jedyną możliwość ograniczenia narażenia na hałas [4] (np. gdy narażenia na hałas nie można dostatecznie zmniejszyć za pomocą środków ochrony zbiorowej lub organizacji pracy [5]). Ich stosowanie wiąże się naturalnie z ograniczaniem docierających do użytkownika dźwięków – zarówno tych niepożądanych (hałasu), jak i tych, których odbiór jest istotny w środowisku, w którym pracownik funkcjonuje. Z tego względu coraz powszechniej stosowane są rozwiązania w postaci układów elektronicznych wbudowanych w ochronniki słuchu (tzw. ochronniki słuchu z regulowanym tłumieniem), umożliwiające przekazywanie dźwięku w formie odpowiednio przetworzonego sygnału akustycznego. Stosowanie układów elektronicznych oczywiście nie wyeliminuje docierania hałasu do użytkownika ochronników słuchu. Połączenie biernego ograniczenia hałasu przez ochronnik słuchu z odtwarzaniem odpowiednio ukształtowanego sygnału akustycznego spowoduje jednak zwiększenie udziału składowych sygnału, które można uznać za użyteczne w porównaniu z właściwościami hałasu obecnego w miejscu przebywania użytkownika takiego ochronnika słuchu.

Obecne rozwiązania poprawiające odbiór dźwięków, wykorzystujące układy elektroniczne wbudowane w ochronniki słuchu z regulowanym tłumieniem, mają z góry ustalone charakterystyki częstotliwościowe przenoszenia dźwięku, więc użytkownik nie może wpływać na ich kształt, a regulacja właściwości przekazywanego dźwięku jest ograniczona do prostej regulacji ogólnego wzmacnienia w torze odtwarzania sygnału. Analiza konstrukcji kilkunastu dostępnych na rynku ochronników słuchu z regulowanym tłumieniem

pokazała, że regulacja wzmocnienia we wszystkich przypadkach poza jednym jest realizowana w sposób ogólny i odbywa się płynnie z użyciem gałki potencjometru, skokowo za pomocą jednego przycisku/przełącznika albo płynnie lub skokowo, gdy układ jest wyposażony w dwa służące do tego celu przyciski. Tylko jedno z analizowanych nauszników przeciwhałasowych dawały użytkownikowi możliwość wpływania na charakterystykę częstotliwościową przenieszonego dźwięku w sposób uproszczony – poprzez opcję wyboru rodzaju tej charakterystyki (zapewniającego np. wrażenie przekazywania dźwięku po filtracji niskoczęstotliwościowej lub wysokoczęstotliwościowej). Zalety i wady ochronników słuchu z regulowanym tłumieniem były analizowane w przeszłości. Przykładowo nauszniki przeciwhałasowe z regulowanym tłumieniem mogą się przyczynić do poprawy zrozumiałości mowy względem nauszników bez układu elektronicznego [6] albo nie mieć na nią istotnego wpływu [7]. Obserwowano również, że stosowanie układu regulowanego tłumienia może utrudniać komunikację werbalną w warunkach hałasu [8]. Podobnie jest w przypadku sygnałów ostrzegawczych. Wyniki badań wskazują, że stosowanie ochronników słuchu z regulowanym tłumieniem w obecności hałasu nierazkwiąże się z brakiem wpływu na zdolność do wykrywania sygnału ostrzegawczego albo rozpoznawania kierunku jego docierania, ale może też prowadzić do pogorszenia się tej zdolności [9-11]. Wyposażenie ochronników słuchu w układ elektroniczny nie zawsze jest zatem korzystne w sytuacjach, gdy duże znaczenie ma prawidłowa percepcja sygnałów akustycznych uznawanych za użyteczne, takich jak mowa czy sygnały ostrzegawcze. Problem z odbiorem dźwiękowych sygnałów bezpieczeństwa w obecności hałasu, w kontekście relacji składowych widmowych takich sygnałów i hałasu, jest rozpatrywany w PN-EN ISO 7731:2009 – zgodnie z tą normą w analizie mogą być uwzględniane także właściwości stosowanych ochronników słuchu [12]. W celu poprawy percepcji sygnałów użytecznych wskazana byłaby możliwość dopasowywania kształtu charakterystyki częstotliwościowej układu przekazywania dźwięku pod ochronniki słuchu w zależności od warunków ich stosowania i potrzeb użytkownika. W takim układzie możliwe byłoby m.in. zwiększenie wzmocnienia w pasmach częstotliwości związanych z komunikacją werbalną z jednoczesnym ograniczeniem przenoszenia dźwięku w pozostałych pasmach, aby poprawić komfort prowadzenia takiej komunikacji w sytuacjach, gdy będzie to istotne, w tym również w momentach względnej ciszy. Możliwe byłoby również np. zwiększenie wzmocnienia w pasmach częstotliwości, w których ulokowane będą dominujące składowe dźwiękowego sygnału bezpieczeństwa, a więc sygnału ostrzegającego, który jest emitowany np. przez określoną maszynę lub przemieszczający się pojazd.

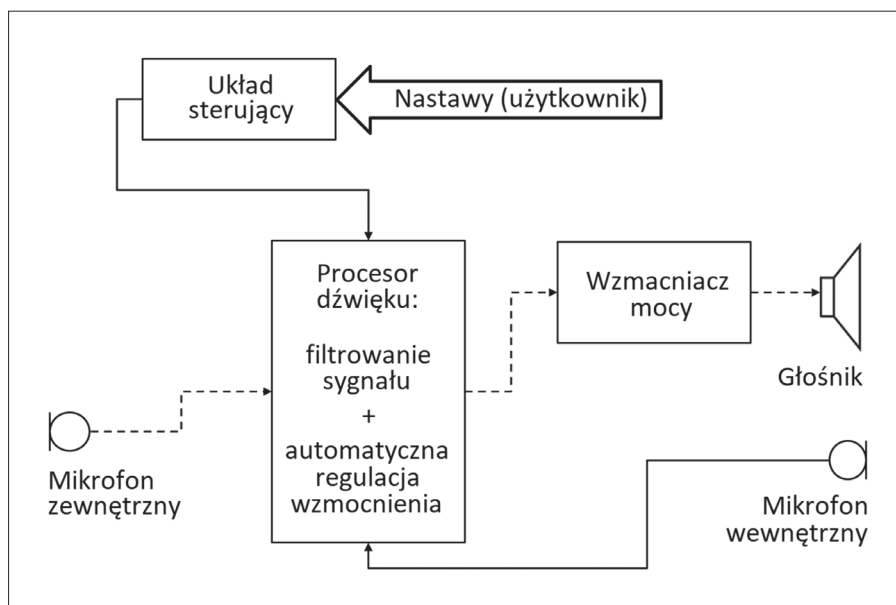
Możliwość wpływania na charakterystykę częstotliwościową przenoszenia dźwięku pod ochronnik słuchu z wykorzystaniem układu elektronicznego jest o tyle korzystna, że może ona uzupełnić oczekiwania i potrzeby użytkownika ochronnika słuchu względem właściwości ograniczania dźwięku przez ten ochronnik słuchu wykorzystywany w trybie pasywnym, tj. bez układu elektronicznego. Ochronnik słuchu zrealizowany w formie pasywnej bariery ograniczającej dźwięki otoczenia odznacza się bowiem nierównomierną charakterystyką w funkcji częstotliwości, zarówno w przypadku wkładek, jak i nauszników przeciwhałasowych [13, 14]. W szczególności możliwość eksperymentalnego doboru nastaw charakterystyki przenoszenia dźwięku pozwoliłaby użytkownikowi ochronnika słuchu dostosować – metodą kolejnych prób – jego funkcjonowanie do indywidualnych potrzeb. Tego rodzaju rozwiązanie umożliwiłoby również skonfigurowanie układu elektronicznego w taki sposób, aby charakterystyka częstotliwościowa przenoszenia dźwięku pod ochronnik słuchu (z uwzględnieniem jego pasywnego tłumienia) była możliwie najbardziej płaska. Przy takim rozwiązaniu uzyskany zostanie efekt minimalnego wpływu ochronnika słuchu na charakterystykę częstotliwościową sygnału akustycznego docierającego pod ten ochronnik w połączeniu z funkcjonalnością kontroli nad dźwiękiem przenoszonym pod ochronnik słuchu. W tej sytuacji kontrola polega na dostosowaniu wzmocnienia sygnału do wymogu zapewnienia bezpiecznych warunków pracy. Uzyskanie możliwie płaskiej charakterystyki przenoszenia dźwięku pod ochronnik słuchu jest istotne dla osób, które muszą zabezpieczać słuch i wykonują pracę, której jakość zależy od wrażenia słuchowego związanego z odbieranymi dźwiękami.

Zagadnienie korygowania charakterystyki częstotliwościowej w systemach przekazywania dźwięku obejmuje filtrację sygnału akustycznego na etapie jego obróbki cyfrowej [15].

Celem artykułu jest przedstawienie koncepcji rozwiązania, które może zostać wykorzystane w ochronniku słuchu i umożliwi kształtowanie charakterystyki częstotliwościowej dźwięku przenoszonego pod ten ochronnik, z uwzględnieniem kompletnego toru akustycznego, tj. od mikrofonu po przetwornik elektroakustyczny odtwarzający dźwięk. Funkcjonalność zaproponowanego rozwiązania w postaci układu przekazywania dźwięku odróżnia je od układów obecnie stosowanych w powszechnie dostępnych ochronnikach słuchu. Omówiono konstrukcję zaproponowanego układu przekazywania dźwięku i zaprezentowano wyniki badań dotyczące przenoszenia sygnału akustycznego przez ten układ, zamontowany w przykładowym nauszniku przeciwhałasowym. Przeprowadzone prace pozwoliły poznać zakres częstotliwości, jaki będzie mógł być uwzględniony w docelowym rozwiązaniu układu przekazywania dźwięku użytkownikowi ochronnika słuchu.

Budowa układu przekazywania dźwięku

Zgodnie z założeniem dotyczącym funkcjonalności opracowywanego układu przekazywania dźwięku układ taki ma umożliwiać regulację kształtu charakterystyki częstotliwościowej sygnału docierającego pod ochronnik słuchu. W związku z tym podstawowym blokiem funkcjonalnym układu przekazywania dźwięku pod ochronnik słuchu jest układ regulacji charakterystyki częstotliwościowej i wzmocnienia. Układ ten musi realizować filtrację sygnału w wybranych pasmach częstotliwości oraz zapewniać automatyczną regulację wzmocnienia przefiltrowanego sygnału przekazywanego pod ochronnik słuchu do wartości zapewniających spełnienie jego funkcji ochronnych. Zagadnienie filtracji sygnałów w pasmach częstotliwości, omawiane już wcześniej na łamach miesięcznika [15], obejmuje implementację filtrów cyfrowych o szerokości oktawy w procesorze dźwięku. Taka implementacja stanowi podstawę do realizacji układu regulacji charakterystyki częstotliwościowej i wzmocnienia. Propozycje innych rozwiązań, m.in. wykorzystanie filtrów analogowych lub układu z filtrami cyfrowymi zrealizowanymi w układzie mikroprocesorowym ogólnego przeznaczenia, wyeliminowano na etapie prac koncepcyjnych. Wykorzystanie procesora dźwięku pozwala np. na uzyskanie znacznie mniej złożonej konstrukcji elektronicznej (w przeciwieństwie do układu z filtrami analogowymi) i większej odporności na zakłócenia. Jednocześnie przy niewiele wyższych kosztach zapewniona jest znacznie prostsza niż w przypadku układu z procesorem ogólnego przeznaczenia implementacja przyjętych filtrów pasmowych oraz pozostałych funkcji układu przekazywania dźwięku. Co jednak bardziej istotne, zastosowanie procesora przeznaczonego do pracy z cyfrowym sygnałem audio zapewnia dostateczną moc obliczeniową do zaimplementowania niezbędnych funkcji przetwarzania sygnału. Schemat blokowy układu przekazywania dźwięku (zgodnie z przyjętą koncepcją) przedstawiono na rys. 1. Linią przerywaną zaznaczono główny tor przekazywania sygnału audio, począwszy od mikrofonu zlokalizowanego na zewnątrz ochronnika słuchu (mikrofonu zewnętrznego) do głośnika odtwarzającego dźwięk pod tym ochronnikiem. Proces filtrowania sygnału z wykorzystaniem procesora dźwięku jest kontrolowany przez układ sterujący, którego nastawy wprowadzane są przez użytkownika. Układ został uzupełniony o mikrofon wewnętrzny, tj. zlokalizowany pod ochronnikiem słuchu, który jest wykorzystywany w procesie kontrolowania poziomu dźwięku A sygnału emitowanego pod ochronnikiem słuchu. Sygnał elektryczny uzyskiwany z wyjścia mikrofonu wewnętrznego niesie informację, która pozwala ustalić odpowiedni poziom wzmocnienia sygnału emitowanego przez głośnik zainstalowany w czasie ochronnika słuchu. Kontrola poziomu



Rys. 1. Schemat blokowy koncepcji układu przekazywania dźwięku, zrealizowanego z wykorzystaniem procesora dźwięku
 Fig. 1. Block diagram of the concept of system for transmitting sound implemented with the use of a sound processor

dźwięku. A emitowanego sygnału zapewnia bezpieczne warunki użytkowania ochronnika słuchu dzięki ograniczaniu wzmocnienia w taki sposób, aby nie zostały przekroczone wartości parametrów emitowanego sygnału zdefiniowane jako dopuszczalne ze względu na ochronę słuchu.

Sterowanie układem przekazywania dźwięku

Sterowanie układem przekazywania dźwięku wymaga wyposażenia ochronnika słuchu w odpowiedni interfejs. W dostępnych na rynku ochronnikach słuchu z regulowanym tłumieniem sterowanie odbywa się za pomocą kilku – najczęściej dwóch lub trzech – przycisków umieszczonych na jednej z czasz nausznika prze-

ciwchałosowego. W przypadku opracowywanego układu przyjęcie takiego rozwiązania (tj. sterowania charakterystyką częstotliwościową układu przenoszenia dźwięku pod ochronnik słuchu) byłoby niepraktyczne. Sterowanie wzmocnieniem sygnału w szeregu oktaowych pasm częstotliwości wymagałoby użycia wielu przycisków albo opracowania sposobu przejmowania funkcji obsługi kolejnych pasm z wykorzystaniem niewielkiej liczby przycisków. Zdecydowano więc, że sterowanie nastawami układu przekazywania dźwięku będzie się odbywało z użyciem interfejsu zlokalizowanego poza ochronnikiem słuchu, a sygnały sterujące z tego interfejsu będą przesyłane do układu przekazywania dźwięku drogą radiową. Biorąc pod uwagę obecny stan techniki, najbardziej praktycznym rozwiązaniem

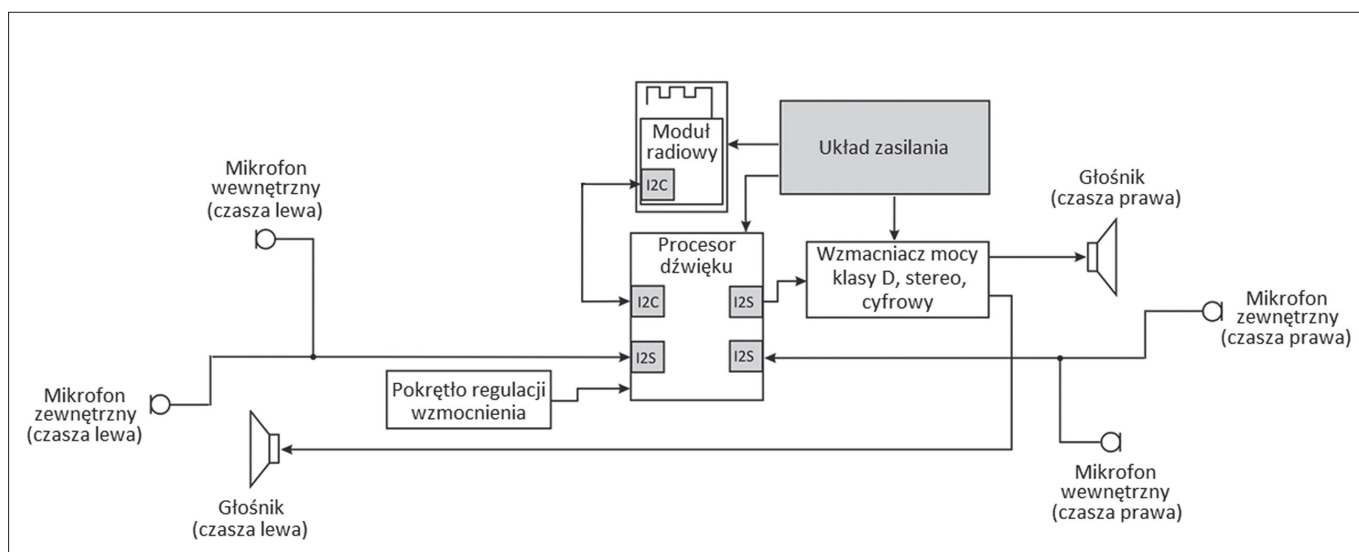
interfejsu sterowania jest wykorzystanie do tego celu urządzenia przenośnego, np. smartfona. Za pomocą wybranego standardu komunikacji bezprzewodowej smartfon ten komunikuje się z układem przekazywania dźwięku, zamontowanym w nauszniku przeciwhałasowym. Interfejs ma więc formę specjalnej aplikacji uruchamianej na urządzeniu przenośnym (smartfonie), co pozwoliło również na realizację innych funkcji, takich jak zapamiętywanie określonych ustawień czy korzystanie z ustawień predefiniowanych.

Zgodnie z założeniami interfejs sterowania układem przekazywania dźwięku będzie wykorzystywany do zmiany parametrów pracy tego układu tylko wtedy, gdy zajdzie taka potrzeba. Użytkownik ochronnika słuchu wyposażonego w układ przekazywania dźwięku będzie mógł w dowolnym momencie zmienić ustawienia pracy tego układu, tj. skorygować charakterystykę częstotliwościową dźwięku przekazywanego pod ochronnik słuchu. Ciągła komunikacja między interfejsem a układem przekazywania dźwięku wbudowanym w nausznik przeciwhałasowy nie jest jednak potrzebna. Układ przekazywania dźwięku może funkcjonować samodzielnie, bez konieczności ciągłej kontroli jego pracy przez aplikację zainstalowaną w smartfonie.

Testowane rozwiązanie modelowe

Bazując na omówionej koncepcji budowy układu przekazywania dźwięku, opartego na procesorze dźwięku, opracowano projekt tego układu i wykonano jego model, zamontowany w nauszniku przeciwhałasowym. Schemat układu przekazywania dźwięku przedstawiono na rys. 2.

Centralnym elementem układu jest procesor dźwięku, który odpowiada za filtrację sygnałów akustycznych docierających do mikrofonów zewnętrznych (tj. po ich przetworzeniu na sygnał elektryczny, a następnie do postaci cyfrowej), a także za automatyczną regulację głośności



Rys. 2. Schemat zaprojektowanego układu przekazywania dźwięku
 Fig. 2. Diagram of the designed system for transmitting sound

sygnałów przesyłanych do wzmacniacza mocy. Filtrowanie sygnałów otrzymanych z mikrofonów zewnętrznych zrealizowano z wykorzystaniem zaimplementowanych w procesorze dźwięku filtrów cyfrowych o szerokości oktawy, gdzie kolejne częstotliwości środkowe filtrów odpowiadają tym standardowo rozpatrywanym w zagadnieniach stosowania ochronników słuchu i wynoszą: 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz i 8000 Hz [15]. Procesor dźwięku komunikuje się z modułem radiowym poprzez interfejs I²C (oznaczany też I2C). Moduł radiowy, pracujący w standardzie Bluetooth, umożliwia komunikację z urządzeniem przenośnym typu smartfon w celu przekazywania do procesora dźwięku danych o zadawanych ustawieniach układu przekazywania dźwięku.

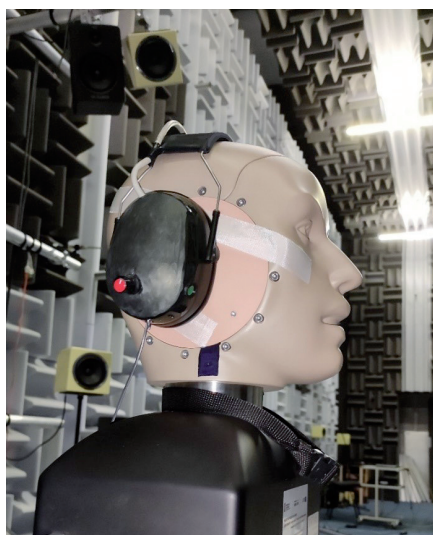
W układzie przekazywania dźwięku zastosowano cztery mikrofony pomiarowe – po dwa na każdą czaszę nauszniaka przeciwhałasowego. Mikrofony zewnętrzne służą do rejestracji sygnałów akustycznych na zewnątrz nauszniaka, które po przetworzeniu w procesorze dźwięku są odtwarzane pod jego czaszami. Mikrofony wewnętrzne służą do kontroli poziomu ciśnienia akustycznego pod czaszami ochronnika. Do zbudowania układu wybrano cyfrowe mikrofony typu MEMS, przeznaczone do montażu powierzchniowego, które do przesyłania danych pomiarowych wykorzystują interfejs I²S (oznaczany też I2S). Do odtwarzania dźwięku służą miniaturowe głośniki dynamiczne. Wzmacniacz mocy sterujący głośnikami jest połączony z procesorem dźwięku poprzez interfejs I²S. Układ przekazywania dźwięku wyposażono ponadto w pokrętkę, pozwalającą użytkownikowi ochronnika słuchu na bezpośrednią regulację głośności odtwarzanego dźwięku.

Integracja układu przekazywania dźwięku z nauszniakiem przeciwhałasowym

Płytki z obwodami elektronicznymi, realizującymi przedstawione rozwiązanie układu przekazywania dźwięku pod ochronnik słuchu, zaprojektowano i wykonano w taki sposób, aby można je było zintegrować z czaszami nauszniaka przeciwhałasowego.

Wpływ układu przekazywania dźwięku na sygnał pod nauszniakiem przeciwhałasowym

W testowanym rozwiązaniu uwzględniono pełny zakres częstotliwości, które są rozpatrywane m.in. przy doborze ochronników słuchu (kolejne pasma oktawowe o częstotliwościach środkowych mieszczących się w przedziale od 125 Hz do 8000 Hz) ze względu na potrzebę ustalenia, w jakim zakresie częstotliwości możliwe jest kształtowanie charakterystyki częstotliwościowej dźwięku przekazywanego pod ochronnik



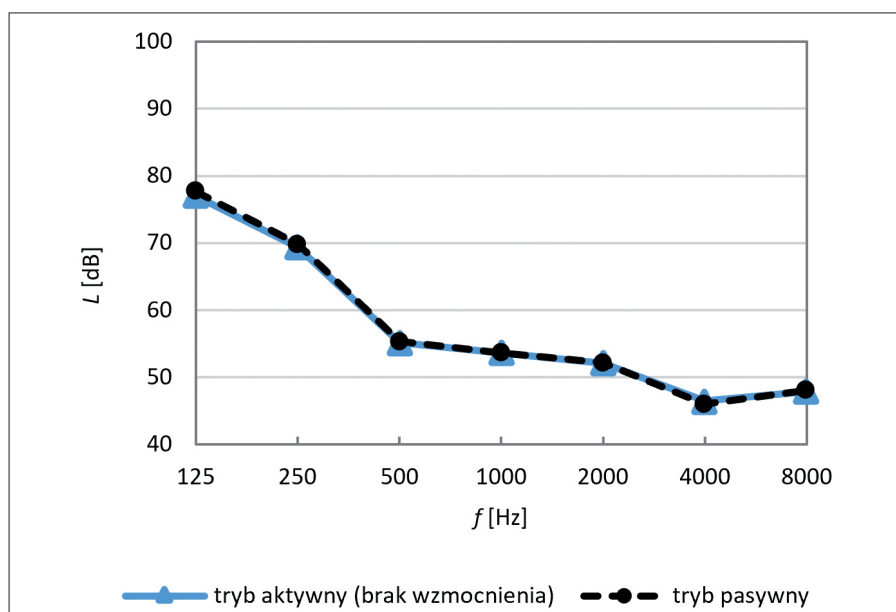
Fot. Tester akustyczny z założonym nauszniakiem przeciwhałasowym zawierającym układ przekazywania dźwięku

Photo. Acoustic test fixture with an earmuff containing the sound transmission system

słuchu. Zgodnie z tym, co przedstawiono przy analizie cyfrowej filtracji sygnału reprezentującego przekazywany dźwięk, możliwość wpływu na kształt takiej charakterystyki podlega ograniczeniom nie na etapie cyfrowego przetwarzania tego sygnału, lecz na etapie jego odtwarzania przez przetwornik elektroakustyczny [15]. Analiza możliwości kształtowania charakterystyki częstotliwościowej sygnału akustycznego za pomocą filtrów cyfrowych, zaimplementowanych w procesorze dźwięku, potwierdziła, że taki

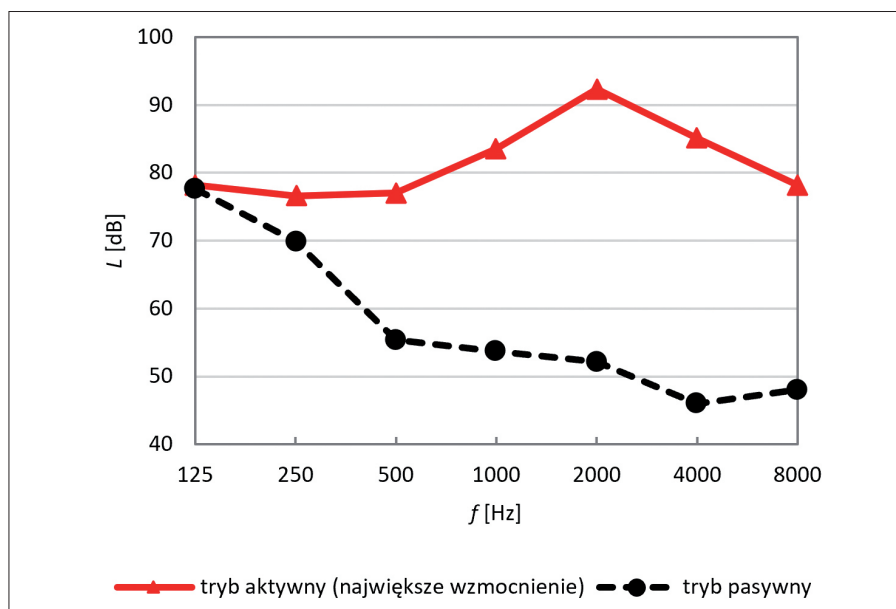
sposób realizacja operacji filtrowania sprawdza się na etapie obróbki dźwięku. W przypadku rozwiązania opisywanego w tym artykule sprawdzono natomiast, w jakim zakresie możliwe jest wpływanie na ogólną charakterystykę dźwięku przenoszonego pod ochronnik słuchu, gdy ten dźwięk jest odtwarzany przez miniaturowy głośnik zamontowany w czaszy modelowego nauszniaka przeciwhałasowego.

Pomiary charakterystyki częstotliwościowej sygnału przenoszonego przez układ przekazywania dźwięku, zintegrowany z nauszniakiem przeciwhałasowym, przeprowadzono z wykorzystaniem testera akustycznego (tzw. symulatora głowy), przeznaczonego do badań właściwości akustycznych ochronników słuchu i spełniającego wymagania odnośnej normy ANSI/ASA S12.42 [16]. Tester akustyczny z założonym modelowym nauszniakiem przeciwhałasowym pokazano na zdjęciu (zob. fot.). Pomiary wykonano w komorze do badań akustycznych o krótkim czasie pogłosu, w laboratoriach TECH-SAFE-BIO Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego (CIOP-PIB). Sygnał elektryczny z zestawu mikrofonowego symulatora ucha testera akustycznego podawany był na wejście modułu pomiarowego, umożliwiającego analizę mierzonego sygnału w rozpatrywanych oktafowych pasmach częstotliwości. Sygnałem testowym był szum różowy o wartości równoważnego poziomu dźwięku A wynoszącej 94 dB, emitowany przez zestaw głośnikowy ustawiony wprost testera akustycznego w odległości 1,5 m. Stosunkowo



Rys. 3. Wpływ włączenia układu przekazywania dźwięku przy braku wzmocnienia na charakterystykę częstotliwościową sygnału pod nauszniakiem przeciwhałasowym; tryb aktywny oznacza włączenie układu przekazywania dźwięku, tryb pasywny oznacza jego wyłączenie; L – poziom ciśnienia akustycznego w oktafowych pasmach częstotliwości zmierzony pod nauszniakiem przeciwhałasowym; f – częstotliwość

Fig. 3. The effect of switching on the sound transmission system in the absence of amplification on the frequency response of the signal under the earmuff; active mode means turning on the sound transmission system, passive mode means turning it off; L – sound pressure level in octave frequency bands measured under the earmuff; f – frequency



Rys. 4. Wpływ włączenia układu przekazywania dźwięku przy największym wzmocnieniu na charakterystykę częstotliwościową sygnału pod nausznikiem przeciwhałasowym; tryb aktywny oznacza włączenie układu przekazywania dźwięku, tryb pasywny oznacza jego wyłączenie; L – poziom ciśnienia akustycznego w oktaowych pasmach częstotliwości zmierzony pod nausznikiem przeciwhałasowym, f – częstotliwość

Fig. 4. The effect of switching on the sound transmission system at the highest amplification on the frequency response of the signal under the earmuff; active mode means turning on the sound transmission system, passive mode means turning it off; L – sound pressure level in octave frequency bands measured under the earmuff; f – frequency

duża wartość równoważnego poziomu dźwięku A wynikała z konieczności zapewnienia odpowiedniego stosunku sygnału do szumu w przypadku, gdy nausznik przeciwhałasowy był umieszczony na testerze akustycznym, co wiązało się z tłumieniem dźwięku przez ten nausznik.

Na rys. 3 zamieszczono wykres zawierający wartości poziomu ciśnienia akustycznego w oktaowych pasmach częstotliwości zmierzone mikrofonem testera akustycznego (symulatora głowy), gdy założony był na niego nausznik przeciwhałasowy. Pomiary przeprowadzono w dwóch sytuacjach: 1) gdy układ przekazywania dźwięku był wyłączony (tryb pasywny), 2) gdy układ przekazywania dźwięku był włączony i ustawiono największe możliwe do uzyskania tłumienie sygnału przez filtry cyfrowe. Druga wymieniona sytuacja pojęciowo jest równoważna brakowi wzmocnienia sygnału (tryb aktywny – brak wzmocnienia). Układ przekazywania dźwięku nie przenosi wtedy sygnału akustycznego pod czasze nausznika przeciwhałasowego, co pozwala ocenić zdolność układu do tłumienia przekazywanego dźwięku oraz jego szumu własne. Wyniki pomiarów zamieszczone na rys. 3 wskazują, że wartości poziomu ciśnienia akustycznego zmierzone w poszczególnych pasmach częstotliwości przy włączonym układzie przekazywania dźwięku, gdy ustawiono brak wzmocnienia sygnału (tj. w przypadku maksymalnego tłumienia), są tożsame z wartościami uzyskanymi w trybie pasywnym. Oznacza to, że układ przekazywania dźwięku w odpowiedni sposób może ograniczać przenoszenie sygnału pod ochronnik słuchu oraz że jego szumy własne są pomijalnie małe.

Z kolei na rys. 4 zamieszczono wartości poziomu ciśnienia akustycznego w rozpatrywanych oktaowych pasmach częstotliwości, zmierzone mikrofonem testera akustycznego (symulatora głowy) pod nausznikiem przeciwhałasowym. Pomiary te również przeprowadzono w dwóch sytuacjach, tj. gdy układ przekazywania dźwięku był wyłączony i gdy był włączony. W przypadku włączonego układu przekazywania dźwięku ustawiono największe możliwe do uzyskania tłumienie sygnału przez ten układ, tj. przez zaimplementowane filtry cyfrowe. W przypadku włączonego układu przekazywania dźwięku można alternatywnie mówić o największym możliwym do uzyskania wzmocnieniu sygnału przez ten układ (tryb aktywny – największe wzmocnienie). Uzyskane dane wskazują, że przetwornik elektroakustyczny zamocowany w czaszy modelowego nausznika przeciwhałasowego przenosi sygnał w pasmach o częstotliwości z zakresu od 250 Hz do 8000 Hz. W przypadku pasma o częstotliwości 250 Hz wzrost poziomu ciśnienia akustycznego osiąga niemal 7 dB. W pasmach o wyższej częstotliwości dźwięku zwiększenie poziomu ciśnienia akustycznego jest większe – od niemal 22 dB w pasmie 500 Hz i ponad 40 dB w pasmie 2000 Hz do ponad 30 dB w pasmie 8000 Hz. Biorąc pod uwagę potencjalne zastosowania ochronników słuchu, uzyskane wyniki należy uznać za wystarczające. W praktyce dźwiękami istotnymi w środowisku pracy są te związane z porozumiewaniem się przy pomocy mowy oraz dźwiękowe sygnały bezpieczeństwa – zasadniczo obejmują one częstotliwości wzmocniane przez układ przekazywania dźwięku. Ponadto zmniejszona zdolność układu przekazywania dźwięku do przenoszenia dźwięków o niskich częstotli-

wościach (lub brak takiej możliwości) nakłada się na mniejszą skuteczność ograniczania hałasu przez pasywne ochronniki słuchu, więc potrzeba wzmocnienia sygnału docierającego pod ochronnik słuchu w zakresie najniższych częstotliwości również jest ograniczona.

Uzyskiwanie stosunkowo dużych wartości poziomu ciśnienia akustycznego sygnału odtwarzanego przez przetwornik elektroakustyczny układu przekazywania dźwięku musi być limitowane ze względu na konieczność zachowania bezpiecznych warunków stosowania ochronnika słuchu. Elementem opracowywanego rozwiązania jest więc odpowiednie ograniczenie wzmocnienia sygnału akustycznego przekazywanego pod ochronnik słuchu. Poziom ciśnienia akustycznego sygnału przy maksymalnym występowaniu układu odtwarzającego dźwięk nie może bowiem stwarzać zagrożenia dla użytkownika ochronnika słuchu [5]. Uwzględniając poziom ekspozycji na hałas odniesiony do ośmiogodzinnego dobowego wymiaru czasu pracy ($L_{EX,8h}$), należy zapewnić nieprzekraczanie wartości 80 dB, co wynika z danych dotyczących oczekiwanego trwałego przesunięcia progu słyszenia związanego z ekspozycją na hałas [17]. W związku z tym właściwości przenoszenia sygnału akustycznego w zaprezentowanym modelowym rozwiązaniu, gdzie poziom ciśnienia akustycznego w poszczególnych pasmach częstotliwości przyjmuje wartości 80-90 dB, w obecności hałasu o równoważnym poziomie dźwięku A wynoszącym 94 dB, są wystarczające do uzyskania wzmocnienia sygnału spełniającego założenia co do funkcjonalności opracowywanego rozwiązania. Dalsze istotne zwiększanie wzmocnienia sygnału w torze odtwarzania sygnału audio nie jest celowe ze względu na ochronę słuchu użytkownika ochronników słuchu.

Podsumowanie

Zintegrowanie układu przekazywania dźwięku (według przedstawionej koncepcji) z pasywnym ochronnikiem słuchu umożliwia kształtowanie charakterystyki częstotliwościowej dźwięku docierającego do użytkownika, z zachowaniem podstawowej funkcjonalności ochronnika słuchu, tj. zabezpieczenia słuchu przed hałasem.

Przeprowadzone pomiary właściwości przenoszenia sygnału akustycznego w nauszniku przeciwhałasowym z zamontowanym układem przekazywania dźwięku potwierdzają możliwość wykorzystania opracowanego rozwiązania w praktyce oraz uzyskania jego zakładanej funkcjonalności. Układ ma odpowiednią dynamikę, tj. z jednej strony jest zdolny do ograniczania przekazywania sygnału akustycznego pod ochronnik słuchu, z drugiej natomiast zapewnia dostateczne wzmocnienie sygnału akustycznego przekazywanego użytkownikowi.

Przeprowadzone pomiary pokazały, że miniaturowy głośnik, wybrany do zbudowania modelu układu przekazywania dźwięku, zamontowany

w czasochłonnej pracy przeciwhałasowej, jest zdolny do odtwarzania sygnału w siedmiu spośród ośmiu oktaowych pasm częstotliwości rozpatrywanych w zagadnieniach dotyczących ochrony słuchu. Brak możliwości wzmocnienia sygnału dotyczy jedynie pasma o najmniejszej częstotliwości środkowej wynoszącej 125 Hz. Zakres częstotliwości sygnałów, które najczęściej mogą mieć znaczenie w percepcji dźwięków użytecznych przez użytkownika ochronnika słuchu, mieści się zatem w zakresie częstotliwości skutecznie przenoszonych przez układ przekazywania dźwięku zainstalowany w nauszniku przeciwhałasowym.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Warunki pracy w 2021 roku. Warszawa, Gdańsk: Główny Urząd Statystyczny, 2022.
- [2] Warunki pracy w 2020 roku. Warszawa, Gdańsk: Główny Urząd Statystyczny, 2021.
- [3] Warunki pracy w 2019 roku. Warszawa, Gdańsk: Główny Urząd Statystyczny, 2020.
- [4] MŁYŃSKI R., KOZŁOWSKI E., ADAMCZYK J. Assessment of impulse noise hazard and the use of hearing protection devices in workplaces where forging hammers are used. Archives of Acoustics. 2014, 39(1): 73-79, doi: 10.2478/aoa-2014-0008.
- [5] Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne (Dz.U. nr 157 poz. 1318).
- [6] HISELIUS P., EDVALL N., REIMERS D. To measure the impact of hearing protectors on the perception of speech in noise. International Journal of Audiology. 2015, 54 (Suppl. 1): 3-8.
- [7] NORIN J.A., EMANUEL D.C., LETOWSKI T.R. Speech intelligibility and passive, level-dependent earplugs. Ear and Hearing. 2011, 32: 642-649.
- [8] BOCKSTAEL A. i in. Speech perception in noise with active and passive hearing protectors: Acoustical analysis. Proceedings of 39th International Congress on Noise Control Engineering, Lisbon (Portugal), 2010, t. 4, s. 2958-2967.
- [9] GIGUÈRE C. i in. A multidimensional evaluation of auditory performance in one powered electronic level-dependent hearing protector. 19th International Congress on Sound and Vibration 2012, ICSV 2012, Vilnius (Lithuania), 8-12 July 2012, t. 2, s. 1660-1667.
- [10] 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 spectral content. Noise Health. 2011, 13(51): 99-112, doi: 10.4103/1463-1741.77202.
- [11] MLYNSKI, R., KOZLOWSKI, E. Localization of Vehicle Back-Up Alarms by Users of Level-Dependent Hearing Protectors under Industrial Noise Conditions Generated at a Forge. International Journal of Environmental Research and Public Health. 2019, 16: 394.
- [12] PN-EN ISO 7731:2009. Ergonomia – Sygnały bezpieczeństwa dla obszarów publicznych i obszarów pracy – Dźwiękowe sygnały bezpieczeństwa.
- [13] ZIAYI GHAHNAVIEH N., POURABDIAN S., FOROUHARMAJD F. Protective earphones and human hearing system response to the received sound frequency signals. Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control. 2018, 37(4): 1030-1036, doi: 10.1177/1461348418765958.
- [14] CARILLO K., SGARD F., DOUTRES O. Numerical study of the broadband vibro-acoustic response of an earmuff. Applied Acoustics. 2018, 134: 25-33, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.12.025.
- [15] MŁYŃSKI R., KOZŁOWSKI E., MORZYŃSKI L., SWIDZIŃSKI A. Propozycje rozwiązań filtrowania sygnału w elektronicznych systemach przekazywania dźwięku. Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka. 2021, 11: 22-27, doi: 10.54215/BP.2021.11.8.Mlynski.
- [16] ANSI/ASA S12.42-2010. Methods for the measurement of insertion loss of hearing protection devices in continuous or impulsive noise using microphone-in-real-ear or acoustic test fixture procedures.
- [17] PN-ISO 1999:2000 Akustyka – Wyznaczenie ekspozycji zawodowej na hałas i szacowanie uszkodzenia słuchu wywołanego hałasem.

Opracowano na podstawie wyników V etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w zakresie zadań służb państwowych ze środków Ministerstwa Rodziny i Polityki Społecznej (zadanie nr 2.SP.03 pt. „Opracowanie systemu przekazywania dźwięku pod ochronnik słuchu sterowanego bezprzewodowo przez użytkownika”). Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

POLECAMY

Monografia pt. **“New techniques and methods for noise and vibration measuring, assessing and reducing”** pod redakcją dr. hab. inż. Dariusza Plebana, profesora CIOP-PIB, zawiera zbiór referatów przedstawionych na konferencji Noise Control 2022, dotyczących zagadnień związanych z ochroną człowieka i środowiska naturalnego przed zagrożeniem hałasem i drganiami mechanicznymi.



Publikacja jest dostępna w wersji cyfrowej:

