

dr inż. LESZEK MORZYŃSKI
Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

Aktywna redukcja hałasu niskoczęstotliwościowego w dźwiękoizolacyjnych kabinach przemysłowych

W artykule opisano system aktywnej redukcji hałasu w dźwiękoizolacyjnych kabinach przemysłowych. Przedstawione zostały trzy rozwiązania techniczne tego systemu. Pierwszym rozwiązaniem jest układ do tworzenia stref cisy bazujący na dwóch głośnikach umieszczonych w narożnikach kabiny. Drugim rozwiązaniem jest aktywny ochronnik słuchu zbudowany na bazie lekkich słuchawek. Trzecim z przedstawionych rozwiązań jest aktywny zagłówek (dwa niewielkie głośniki umieszczone w górnej części oparcia fotela pracownika). W artykule przedstawiono i omówiono wyniki pomiarów skuteczności aktywnej redukcji hałasu z zastosowaniem każdego z tych trzech rozwiązań.

Active noise reduction of low frequency noise in industrial cabins

In this article a system for active noise reduction in industrial cabins is presented. Three different approaches for secondary source design and location are described. The first one is a traditional configuration of two loudspeakers located in the corners of a cabin to create quiet zones. The second approach is an active hearing protector built on the base of lightweight headphones. The third one is a kind of an active headrest (two small loudspeakers located just behind the operator's chair). In the article the results of the measurements of the efficiency of active noise reduction for each approach are presented and discussed.

Wprowadzenie

Dźwiękoizolacyjne kabiny przemysłowe są jednym ze sposobów ograniczania nadmiernego hałasu na stanowiskach pracy w przemyśle [1, 2]. Są one instalowane w tych pomieszczeniach, w których proces produkcyjny może być kontrolowany z kabiny lub możliwe jest czasowe przebywanie pracownika w kabinie. Mogą one pełnić funkcję sterowni, dyspozytorni, pomieszczeń dla dozoru technicznego itp.

Wyniki prowadzonych dotychczas m.in. w CIOP-PIB badań wykazują niezadowalającą skuteczność kabin dźwiękoizolacyjnych w zakresie niskich częstotliwości akustycznych [1, 2, 3, 4]. Jeżeli w widmie hałasu dominują składowe niskoczęstotliwościowe, to może się okazać, że zastosowanie kabiny nie stanowi dostatecznej

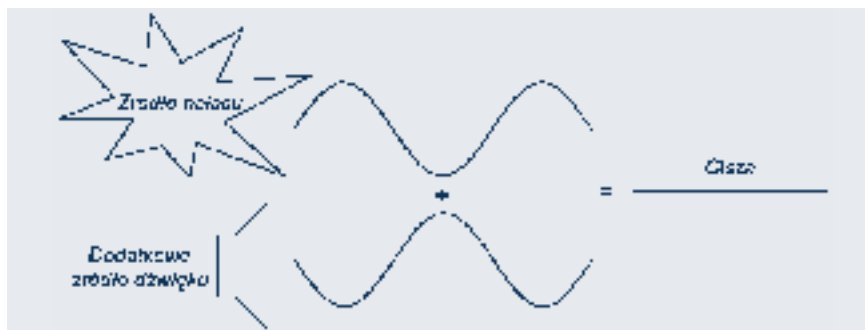
ochrony przed hałasem i mogą zostać przekroczone jego wartości dopuszczalne [1, 2, 5]. W niektórych kabinach daje się także zaobserwować zjawisko podwyższenia poziomu ciśnienia akustycznego [2, 3], co jest związane z występowaniem niekorzystnych zjawisk rezonansowych.

Poprawę właściwości dźwiękoizolacyjnych kabiny w zakresie niskich częstotliwości można osiągnąć metodami pasywnymi, np. przez zastosowanie odpowiedniej geometrii kabin, masywnych ścian oraz adaptacji akustycznych (w tym ustrojów rezonatorowych) [2, 3, 4]. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie aktywnych metod redukcji hałasu, które są szczególnie skuteczne w zakresie niskich częstotliwości akustycznych [6, 7, 8].

Aktywna redukcja hałasu polega na zastosowaniu dodatkowych, odpowiednio sterowanych źródeł dźwięku, zwanych źródłami wtórnymi. W układzie może występować jedno (układ jednokanałowy) lub więcej (układ wielokanałowy) źródeł wtórnych. Obniżenie poziomu ciśnienia akustycznego (redukcja hałasu) następuje w wyniku wzajemnego nakładania się fal akustycznych, pochodzących ze źródła wtórnego oraz źródła hałasu (źródła pierwotnego), co przedstawiono schematycznie na rys. 1.

Podstawowym problemem w układach aktywnej redukcji hałasu jest sposób sterowania źródłem wtórnym. Aby następowała redukcja hałasu, fala akustyczna generowana przez źródło wtórne musi mieć amplitudę odpowiadającą amplitudzie fali pochodzącej od źródła pierwotnego (źródła hałasu), lecz przeciwną fazę. Od tego, jak dobrze spełnione będą warunki amplitudy i fazy zależy osiągana skuteczność aktywnej redukcji. We współczesnych rozwiązaniach do sterowania źródłami wtórnymi najczęściej używa się zaawansowanych układów przetwarzania cyfrowego, gdyż tylko one są w stanie zapewnić wystarczającą dokładność sterowania. Generacja sygnału wtórnego odbywa się na podstawie informacji o sygnale hałasu, uzyskiwanych np. za pomocą mikrofonu. Układy sterujące są również w większości układami adaptacyjnymi, tzn. w sposób ciągły dostosowują swoje parametry do zmian hałasu, wykorzystując do tego informację uzyskiwaną za pomocą dodatkowego mikrofonu, tzw. detektora sygnału błędu.

W dalszej części artykułu opisano trzy możliwe rozwiązania systemu aktywnej redukcji hałasu w dźwiękoizolacyjnych kabinach przemysłowych oraz właściwości tych rozwiązań. Przedstawiono również wyniki badań przeprowadzonych z użyciem tych rozwiązań na stanowisku laboratoryjnym w Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym.



Rys. 1. Zasada aktywnej redukcji hałasu

Fig. 1. The principle of active noise reduction

Systemy aktywnej redukcji hałasu w dźwiękoizolacyjnych kabinach przemysłowych

Konstrukcja systemu aktywnej redukcji hałasu w dźwiękoizolacyjnych kabinach przemysłowych musi uwzględnić szereg specyficznych warunków związanych z właściwościami samej kabiny i panującymi w niej warunkami. Najbardziej istotnym czynnikiem jest niewielka ilość wolnego miejsca dostępnego w kabinach. Są one najczęściej zaprojektowane i wykonane w taki sposób, że trudno jest rozmieścić elementy układu aktywnej redukcji hałasu, lub mogą one być umieszczone jedynie w taki sposób, że nie zapewnią dużej skuteczności takiego układu.

Równie istotne jest też rozwiązanie zagadnień teoretycznych i praktycznych związanych z aktywną redukcją hałasu w trójwymiarowej przestrzeni zamkniętej. Skomplikowany rozkład pola akustycznego we wnętrzu kabiny ma istotny wpływ na osiąganą skuteczność aktywnej redukcji. Poprawę skuteczności możemy osiągnąć, umieszczając źródła wtórne jak najbliżej głowy pracownika, jednak takie rozwiązanie może być dla niego uciążliwe, a w niektórych przypadkach, nie do przyjęcia, ze względu na ograniczenia jakie wprowadza.

Z tych powodów zostały zaproponowane trzy rozwiązania techniczne systemu do aktywnej redukcji hałasu w kabinie przemysłowej, różniące się pod względem wygody użytkownika i osiąganych skuteczności:

- układ do tworzenia stref ciszy
- słuchawki aktywne
- zagłówek aktywny.

We wszystkich tych rozwiązaniach częścią składową systemu aktywnej redukcji był układ sterujący skonstruowany w Pracowni Aktywnych Metod Redukcji Hałasu CIOP-PIB [9]. W układzie tym zaimplementowano odpowiednie procedury realizujące sterowanie źródłami wtórnymi za pomocą adaptacyjnych filtrów cyfrowych.

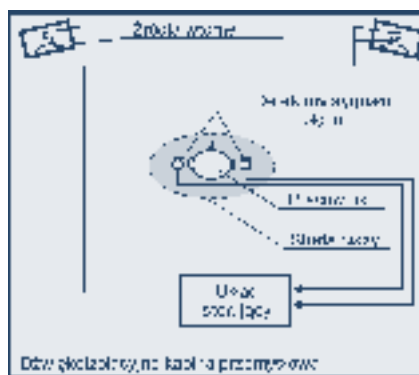
Wszystkie trzy rozwiązania systemu aktywnej redukcji hałasu w kabinach przemysłowych poddano badaniom na stanowisku badawczym znajdującym się w Laboratorium Hałasu Niskoczęstotliwościowego Instytutu. W laboratorium tym jest dźwiękoizolacyjna kabina przemysłowa, będąca odpowiednikiem kabin najczęściej stosowanych w warunkach przemysłowych. W trakcie badań wykorzystywano sygnał hałasu w postaci jednego lub sumy wielu tonów harmonicznym. Taki wybór wynika z faktu, że większość występujących w warunkach rzeczywistych hałasów

ma w swoim widmie wyraźnie zaznaczone składowe tonalne o znacznie wyższym poziomie niż pozostałe składowe widma i to one właśnie decydują o wypadkowym poziomie ciśnienia akustycznego.

W trakcie prowadzonych badań określano skuteczność oraz przestrzenny rozkład skuteczności aktywnej redukcji hałasu we wnętrzu kabiny, w szczególności w strefie, w której przebywa pracownik. Skuteczność aktywnej redukcji hałasu w danym punkcie przestrzeni jest zdefiniowana jako różnica poziomów ciśnienia akustycznego w tym punkcie – przed i po włączeniu systemu aktywnej redukcji hałasu.

Układ do tworzenia stref ciszy

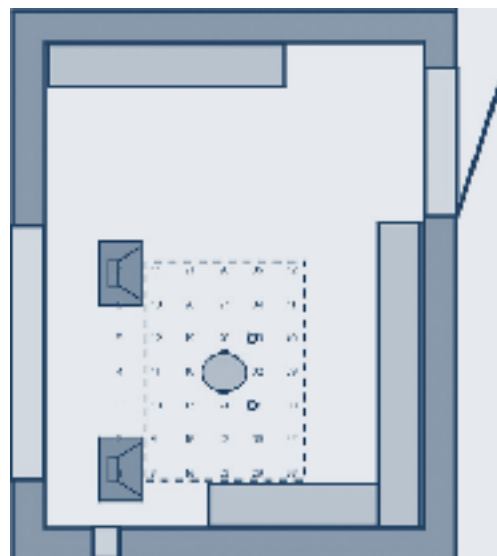
Układ do tworzenia stref ciszy jest przykładem układu do redukcji hałasu w zamkniętej przestrzeni trójwymiarowej, o dużym stopniu złożoności pod względem opisu matematycznego zachodzących w nim zjawisk fizycznych i dlatego trudnym do realizacji. Schemat układu do tworzenia stref ciszy pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat układu do realizacji stref ciszy

Fig. 2. A diagram of a system for creating quiet zones

W skład układu do tworzenia stref ciszy, oprócz układu sterującego, wchodzi dwa detektory sygnału błędów umieszczone w pobliżu głowy pracownika oraz dwa źródła wtórne umieszczone w dowolnym punkcie kabiny przemysłowej. Zadaniem układu jest wytworzenie tzw. strefy ciszy, czyli strefy o obniżonym poziomie ciśnienia akustycznego wokół głowy pracownika znajdującego się w kabinie. Jest to rozwiązanie cechujące się największą wygodą użytkownika z punktu widzenia chronionego pracownika, ale najtrudniejsze w realizacji. Źródła wtórne są umieszczone z dala od pracownika, co zapewnia mu pełną swobodę ruchów i nie ogranicza widoczności. Z drugiej jednak strony, źródła kompensujące w dużym stopniu oddziałują na siebie wzajemnie, co najczęściej prowadzi do obniżenia skuteczności i stabilności układu aktywnego

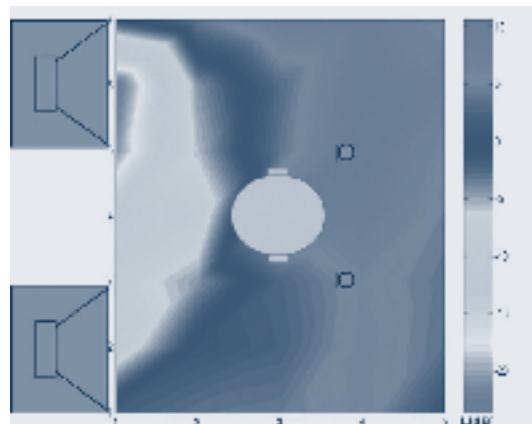


Rys. 3. Schemat rozmieszczenia źródeł wtórnych i strefy pomiarowej oraz stanowiska pracy w kabinie w trakcie pomiarów układu do realizacji stref ciszy

Fig. 3. An arrangement of secondary sources, the measurement zone and a workstation in an industrial cabin for a system for creating quiet zones

nej redukcji oraz powoduje konieczność stosowania bardziej zaawansowanych technik sterowania w celu przeciwdziałania tym zjawiskom. Ponadto, w kabinie należy zapewnić wystarczające miejsce na umieszczenie źródeł kompensujących, co niekiedy jest warunkiem niemożliwym do spełnienia.

Na rys. 3. przedstawiono schematycznie wygląd kabiny przemysłowej, która była wykorzystywana w trakcie badań oraz sposób umieszczenia w niej źródeł wtórnych i detektorów sygnału błędów w stosunku do miejsca przebywania pracownika. Zaznaczono również siatkę punktów pomiarowych.



Rys. 4. Mapa rozkładu skuteczności aktywnej redukcji hałasu układu do tworzenia stref ciszy dla tonu o częstotliwości 100 Hz

Fig. 4. A map of the efficiency of active noise reduction of a system for creating quiet zones for a pure tone of the frequency of 100 Hz

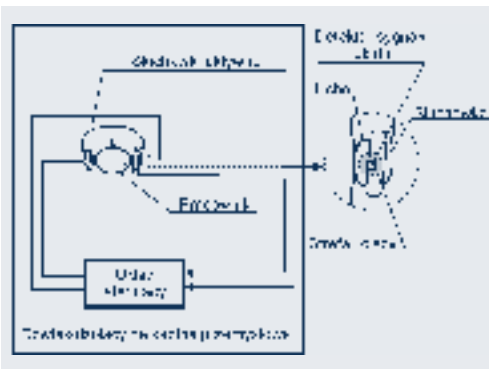
Przeprowadzone badania wykazały, że trudno jest uzyskać zadowalającą skuteczność i stabilność układu, szczególnie w odniesieniu do sygnałów, w których występuje wiele składowych tonalnych. Na rys. 4. (str. 5.) pokazano mapę rozkładu skuteczności aktywnej redukcji dla tonu o częstotliwości 100 Hz.

Z rys. 4. wynika, że w odniesieniu do częstotliwości tłumionego tonu 100 Hz obszary o obniżonym poziomie mają nieregularny kształt, a aktywna redukcja hałasu w obszarze, gdzie znajduje się głowa pracownika dochodzi maksymalnie do 5 dB. W pozostałej części pomieszczenia występują obszary o podwyższonym poziomie ciśnienia akustycznego. W przypadku składowych widmowych o wyższych częstotliwościach, obszary podwyższonego i obniżonego poziomu ciśnienia akustycznego mają jeszcze bardziej nieregularny kształt i wokół głowy pracownika mogą tworzyć się również obszary podwyższonego poziomu ciśnienia akustycznego. Trudne jest również uzyskanie stabilnej pracy układu, szczególnie w przypadku występowania większej liczby składowych częstotliwościowych w widmie hałasu.

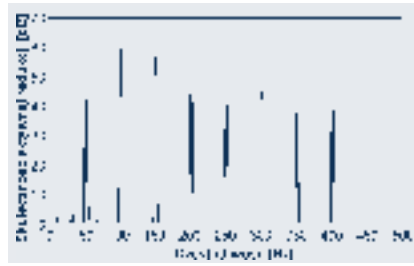
Słuchawki aktywne

Alternatywną metodą tworzenia stref cisy jest zastosowanie sterowanych cyfrowo słuchawek aktywnych. Schemat układu pokazano na rys. 5.

Zadaniem słuchawek aktywnych jest redukcja hałasu w obszarze bezpośrednio pod słuchawkami, czyli wewnątrz małżowiny usznej. Ponieważ do sterowania pracą słuchawek jest niezbędna informacja zwrotna o efekcie ich działania, we wnętrzu każdej słuchawki umieszczono miniaturowy mikrofon sygnału błędu. Słuchawki aktywne od typowych nauszników przeciwhałasowych z układem aktywnej redukcji hałasu różnią się tym, że redukują jedynie dźwięki niepożądane, szczególnie w zakresie niższych częstotliwości, nie ograniczając przy tym percepcji innych



Rys. 5. Schemat układu redukcji hałasu w postaci słuchawek aktywnych
 Fig. 5. A diagram of a system with active headphones



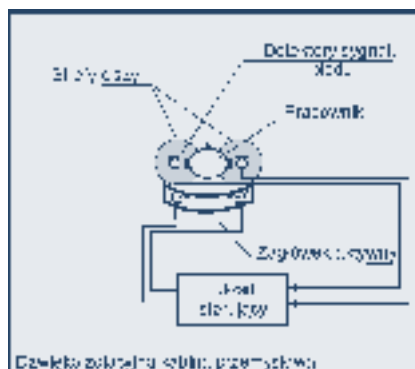
Rys. 6. Skuteczność aktywnej redukcji dla słuchawek aktywnych
 Fig. 6. The efficiency of active noise reduction of active headphones

dźwięków. Takie rozwiązanie jest wolne od ograniczeń przestrzennych i charakteryzuje się dużą skutecznością, jednak może być postrzegane przez pracowników jako uciążliwe, ze względu na dyskomfort stałego przebywania w słuchawkach.

Badania słuchawek aktywnych prowadzono przy użyciu testera słuchawkowego mającego postać walca wykonanego z metalu, w którego wnętrzu umieszczono mikrofon pomiarowy. Jak pokazują wyniki badań przedstawione na rys. 6., słuchawki aktywne charakteryzują się dużą skutecznością aktywnej redukcji dochodzącą do 60 dB (rzeczywiste tłumienie hałasu przez słuchawki będzie niższe – rzędu 30 dB, ze względu na przewodzenie dźwięków drogą kostną). Duża skuteczność słuchawek aktywnych wynika z faktu, że tworzone są jedynie niewielkie obszary obniżonego poziomu ciśnienia akustycznego, tuż pod przetwornikami (głośnikami) słuchawek, bezpośrednio przy uszach pracownika. Przetworniki słuchawek, będące źródłami wtórnymi nie wpływają na siebie wzajemnie, co pozwala uniknąć wielu niekorzystnych efektów akustycznych.

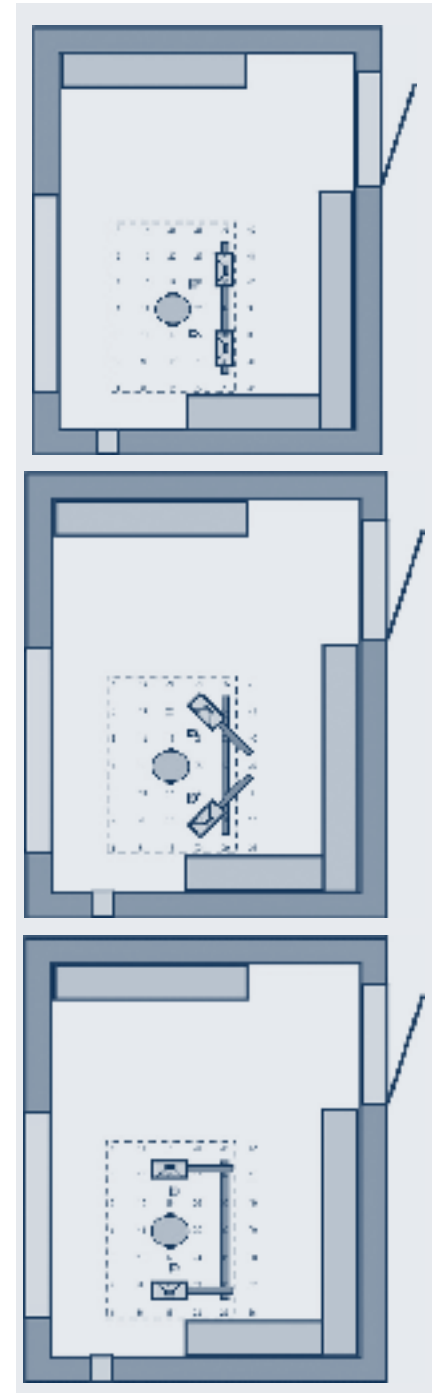
Zagłówek aktywny

Aktywny zagłówek jest rozwiązaniem pośrednim pomiędzy wcześniej opisanymi słuchawkami aktywnymi a układem do generacji stref cisy. Schemat układu przedstawiono na rys. 7.

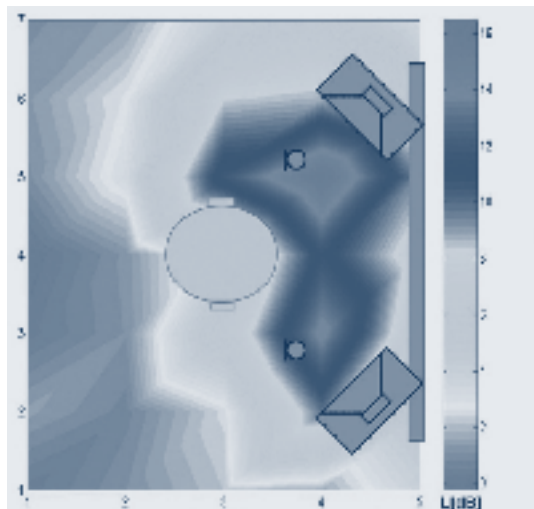


Rys. 7. Schemat układu zagłówka aktywnego
 Fig. 7. A diagram of a system with an active headrest

Znacznie mniejsze głośniki niż w układzie do tworzenia stref cisy, są umieszczone w bezpośrednim sąsiedztwie głowy operatora, w zagłówku fotela. Dzięki temu tworzone są niewielkie strefy cisy po obu stronach głowy pracownika, wokół jego uszu. Takie umieszczenie głośników oraz ich niewielka moc powoduje, że oba kanały w znacznie mniejszym

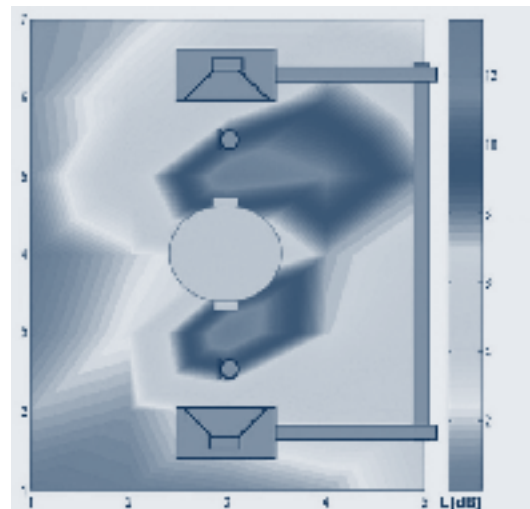


Rys. 8. Różne pozycje głośników aktywnego zagłówka podczas badań laboratoryjnych
 Fig. 8. Different positions of the loudspeakers of a headrest during laboratory tests



Rys. 9. Mapa rozkładu skuteczności aktywnej redukcji hałasu aktywnego zagłówka dla hałasu w postaci sumy składowych tonalnych z przedziału 50 – 400 Hz i głośników zagłówka ustawionych pod kątem 45°

Fig. 9. A map of the efficiency of active noise reduction of an active headrest for noise consisting of harmonic tones from the range of 50 to 400 Hz and for the loudspeakers of a headrest placed at an angle of 45°



Rys. 10. Mapa rozkładu skuteczności aktywnej redukcji hałasu aktywnego zagłówka dla hałasu w postaci sumy składowych tonalnych z przedziału 50 – 400 Hz i głośników zagłówka skierowanych bezpośrednio w stronę uszu pracownika

Fig. 10. A map of the efficiency of active noise reduction of an active headrest for noise consisting of harmonic tones from the range of 50 to 400 Hz and for loudspeakers of a headrest placed towards to the worker's ears

stopniu oddziałują na siebie wzajemnie niż w układzie do tworzenia stref ciszy, zatem skuteczność i stabilność takiego rozwiązania jest większa. Jednocześnie zapewnia on pracownikowi większy komfort niż słuchawki aktywne. Elementy zagłówka zawężają jednak zakres wykonywanych ruchów głową i prowadzonych obserwacji. Nie mogą być więc stosowane na stanowiskach, na których charakter pracy wymaga wykonywania takich czynności.

Badania aktywnego zagłówka prowadzono przy różnych ustawieniach głośników zagłówka. Jak pokazano na rys. 8, głośniki te były ustawione prostopadle lub ukośnie do osi łączącej uszy pracownika, bądź skierowane bezpośrednio w kierunku uszu pracownika.

Badania były prowadzone dla tonów i hałasów będących sumą tonów z przedziału od 50 do 400 Hz.

Na rys. 9. i 10. pokazano przykładowe mapy rozkładu skuteczności aktywnej redukcji hałasu w przypadku badanego zagłówka przy jego dwóch różnych ustawieniach i przy hałasie w postaci sumy tonów od 50 do 400 Hz.

Z przeprowadzonych badań wynika, że najlepsze efekty uzyskuje się, gdy głośniki zagłówka są umieszczone na wprost uszu pracownika. W takim przypadku skuteczność aktywnej redukcji dochodzi do 12 dB (rys. 10.). Gorsze wyniki uzyskuje się, gdy głośniki zagłówka są umieszczone ukośnie do głowy pracownika (rys. 9.), jednak są one i tak o wiele lepsze niż w przypadku układu do tworzenia stref ciszy.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano możliwości zastosowaniu układu aktywnej redukcji hałasu do ograniczania hałasu niskoczęstotliwościowego oddziałującego na pracowników w dźwiękoizolacyjnych kabinach przemysłowych. Przedstawiono trzy rozwiązania techniczne takiego układu: układ do tworzenia stref ciszy, słuchawki aktywne i zagłówek aktywny. Wszystkie trzy rozwiązania działają, wykorzystując uniwersalny układ sterujący opracowany w CIOP-PIB i zostały przebadane pod kątem ich właściwości na stanowisku badawczym zbudowanym z wykorzystaniem dźwiękoizolacyjnej kabiny przemysłowej.

Najmniej skuteczny i jednocześnie najbardziej podatny na utratę stabilności okazał się układ do tworzenia stref ciszy. Bardzo dużą skutecznością charakteryzują się słuchawki aktywne, jednak mogą być postrzegane przez pracowników jako uciążliwe w użytkowaniu, a czasami mogą utrudniać pracownikowi wykonywanie powierzonych mu zadań. Najlepszym rozwiązaniem okazał się zagłówek aktywny. Zapewnia on dużą skuteczność aktywnej redukcji hałasu, dochodzącą do 12 dB, a także zapewnia pracownikowi odpowiednią wygodę użytkowania. Wybór rozwiązania, które należy zastosować

w danej kabinie powinien się odbywać na podstawie analizy panujących w niej warunków, wymaganej wartości redukcji hałasu oraz względów użytkowych.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Engel Z. *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. PWN, Warszawa 2001
- [2] Kaczmarska A., Augustyńska D., Engel Z., Górski P. *Przemysłowe zabezpieczenia przed hałasem infradźwiękowym i niskoczęstotliwościowym. Wybrane elementy i modele*. CIOP, Warszawa 2001
- [3] Kaczmarska A. *Metody redukcji hałasu niskoczęstotliwościowego w kabinach przemysłowych*. Praca doktorska. CIOP, Warszawa 1997
- [4] Kaczmarska A., Augustyńska D. *Ograniczenie hałasu niskoczęstotliwościowego w kabinach przemysłowych*. CIOP, Warszawa 1999
- [5] Pawełczyk-Łuszczynska M., Augustyńska D., Kaczmarska A., Sliwińska-Kowalska M., Kameduła M. *Hałas infradźwiękowy – dokumentacja*. „Podstawy i Metody Oceny Środowiska Pracy”, 2(28), 2001
- [6] Engel Z., Makarewicz G., Morzyński L., Zawieska W.M. *Metody aktywnej redukcji hałasu*. CIOP, Warszawa 2001
- [7] Hansen C.H., Snyder S.D. *Active Control of Noise and Vibration*. E & FN Spon, London 1997
- [8] Morzyński L. *Redukcja hałasu w falowodzie akustycznym z zastosowaniem adaptacyjnych sterowników cyfrowych*. „Bezpieczeństwo Pracy”, 4(321), 1998, 12-17
- [9] Górski P., Zawieska M.W. *System aktywnej redukcji dla hałasów o przebiegu okresowym*. Materiały XLIX Otwartego Seminarium z Akustyki OSA 2002, str. 121-126

Publikacja została opracowana na podstawie wyników zadania badawczego II-5.09 programu wieloletniego pn. „Dostosowywanie warunków pracy w Polsce do standardów UE” dofinansowywanego przez Komitet Badań Naukowych w latach 2002-2004. Główny koordynator: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy