

Materiały informacyjne przeznaczone dla użytkowników ochronników słuchu dotyczące opracowanego ochronnika słuchu z układem aktywnej redukcji hałasu

Paweł Górski



CIOP-PIB, Warszawa 2013

Według danych GUS [7] hałas jest najpowszechniej występującym czynnikiem szkodliwym związanych ze środowiskiem pracy. W zagrożeniu hałasem w 2012 r. pracowało 195,5 tys. osób (co stanowiło 53,2% łącznej liczby osobo zagrożenia związanych ze środowiskiem pracy). Trwałe uszkodzenie słuchu spowodowane hałasem w pracy nadal jest jedną z najczęściej występujących chorób zawodowych (331 przypadków w 2010 roku). Sekcjami gospodarki narodowej, w których odnotowuje się największe zagrożenie hałasem i związanych z nim uszkodzeń słuchu są: przetwórstwo przemysłowe, górnictwo, budownictwo i transport. Przepisy prawa krajowego [22] wdrażające postanowienia dyrektywy 2003/10/WE [21] definiują pojęcie narażenia indywidualnego na hałas, będącego rzeczywistym poziomem narażenia pracownika na hałas po uwzględnieniu tłumienia uzyskanego w wyniku stosowania środków ochrony indywidualnej. Zgodnie z obowiązującymi przepisami pracodawca jest zobowiązany do wprowadzenia rozwiązań zapewniających obniżenie wartości narażenia indywidualnego poniżej wartości NDN. Jeżeli osiągnięcie tego nie jest możliwe za pomocą środków ochrony zbiorowej lub organizacji pracy, pracodawca ma obowiązek udostępnić pracownikom środki ochrony indywidualnej słuchu (ochronniki słuchu) i nadzorować poprawność ich stosowania.

Ochronniki słuchu są jednymi z najpowszechniej stosowanych środków ograniczania narażenia na hałas na stanowiskach pracy. Powszechnie stosowane pasywne ochronniki słuchu, jak większość rozwiązań pasywnych, charakteryzują się małym tłumieniem w zakresie niskich częstotliwości akustycznych. Tłumienie to wzrasta wraz ze wzrostem częstotliwości hałasu. Zwiększenie tłumienia w zakresie niskich częstotliwości wiąże się przede wszystkim ze zwiększeniem masy i rozmiarów ochronnika słuchu, co możliwe jest tylko do pewnego stopnia. Powoduje to, że pracownicy nie zawsze są odpowiednio zabezpieczeni przed hałasami niskoczęstotliwościowymi. Dźwięki o wyższych częstotliwościach niosące główny przekaz informacyjny sygnału mowy są bardzo dobrze tłumione, podczas gdy dźwięki niskoczęstotliwościowe będące sygnałem maskującym dla sygnału mowy są słabo tłumione. Ponadto nierównomierna charakterystyka częstotliwościowa tłumienia pasywnych ochronników słuchu (mniejsze tłumienie dźwięków o niskich częstotliwościach a większe dźwięków o wyższych częstotliwościach) ma negatywny wpływ na zrozumiałość mowy u osób stosujących ochronniki słuchu, co jest szczególnie ważne u osób wykonujących pracę wymagającą komunikacji (np.: hakowy, operator suwnicy). Pogorszenie zrozumiałości mowy

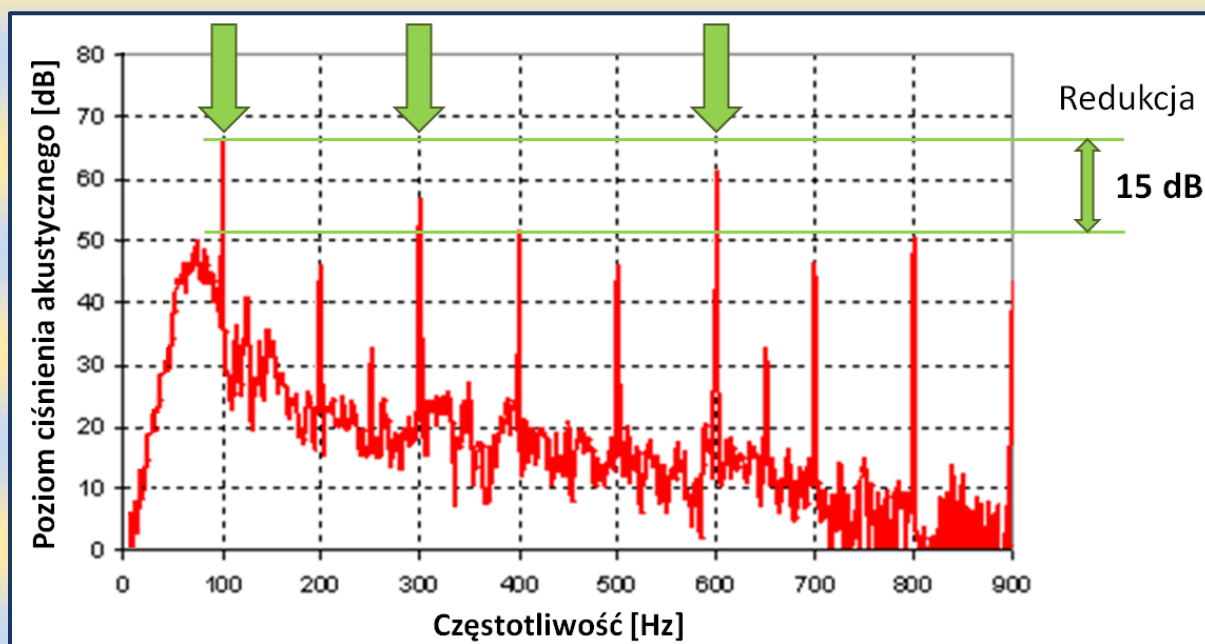
oraz uczucie odizolowania [13] podczas stosowania ochronników słuchu jest w tych przypadkach istotnym problemem.

Rozwiązaniem tych problemów jest zastosowanie w ochronnikach słuchu układów aktywnej redukcji hałasu (ARH) [15], pozwalających na skuteczną redukcję hałasu niskoczęstotliwościowego. Dzięki zastosowaniu metod aktywnych możliwe jest zwiększenie tłumienia ochronników w zakresie niskich częstotliwości akustycznych nie zwiększając nadmiernie tłumienia w zakresie częstotliwości wysokich. Rozwiązanie takie spowoduje poprawę zrozumiałości mowy w komunikacji słownej u osób stosujących ochronniki słuchu, a jednocześnie zmniejszy uczucie odizolowania.

Układy aktywne są jednym z najbardziej zaawansowanych środków ochrony przed hałasem. Istotą ich działania jest redukcja hałasu poprzez doprowadzenie dodatkowej energii akustycznej poprzez dodatkowe źródło dźwięku. Źródło to zwane jest źródłem kompensującym lub wtórnym, zaś generowany przez nie sygnał, sygnałem kompensującym. Najważniejszym elementem układu aktywnej redukcji jest układ sterujący, który odpowiedzialny jest za generację sygnału kompensującego. Jedną z najistotniejszych zalet układów aktywnych jest fakt, że skuteczność redukcji hałasu zwykle rośnie wraz ze zmniejszaniem się jego częstotliwości. Z tego powodu układy aktywne stanowią doskonałe uzupełnienie pasywnych układów redukcji hałasu w tym ochronników słuchu.

Podczas stosowania układów ARH w ochronnikach słuchu częstym problemem jest zapewnienie stabilności pracy układów przy jednocześnie wysokiej skuteczności aktywnej redukcji hałasu [15]. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie układów ARH działających przy wykorzystaniu filtrów NOTCH i algorytmu genetycznego [8]. Ograniczeniem tego typu rozwiązań jest wąskopasmowy charakter działania, a w szczególności konieczność wcześniejszego zdefiniowania zredukowanych częstotliwości. Jednak mimo wąskopasmowego charakteru działania takich algorytmów, układy takie mogą być stosowane do redukcji hałasu wielu specyficznych grup maszyn i urządzeń wytwarzających wąskopasmowy hałas stacjonarny. Są to między innymi pompy, systemy wentylacyjne, turbiny. W przypadku tego typu źródeł hałasu, do osiągnięcia wymaganej skuteczności tłumienia aktywnego ochronnika słuchu wystarczy redukcja hałasu w wybranych pasmach częstotliwości. Przykładowo, jeżeli dla źródła hałasu, którego charakterystykę widmową przedstawiono na rysunku 1,

zredukowany zostanie hałas skupiony w jedynie trzech częstotliwościach 100, 300 i 600, to możliwe jest osiągnięcie ok. 15 dB obniżenia hałasu.

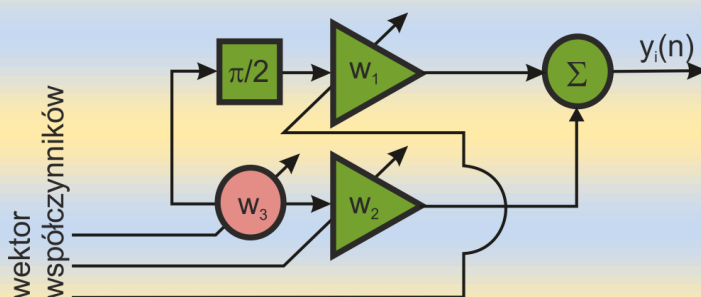


Rysunek 1 Przykładowa skuteczność aktywnej redukcji hałasu

Zagadnienie zastosowania aktywnych metod redukcji hałasu w ochronnikach słuchu było na przestrzeni ostatnich lat przedmiotem wielu prac badawczych [1, 9, 16, 17], które zaowocowały opracowaniem szeregu rozwiązań praktycznych. Prace w tym obszarze prowadzone są również w CIOP-PIB [5, 11, 12]. W ich wyniku opracowano między innymi model aktywnego ochronnika słuchu wykorzystującego analogowe układy sterowania ze sprzężeniem zwrotnym [5, 12]. Szybki postęp w dziedzinie wytwarzania i programowania cyfrowych procesorów sygnałowych (DSP) umożliwił opracowanie cyfrowych układów sterowania systemu aktywnej redukcji hałasu wykorzystujących różne algorytmy adaptacyjne działające w czasie rzeczywistym [15, 20]. Obecnie najczęściej spotykanym podejściem do realizacji systemów aktywnej redukcji hałasu jest zastosowanie do sterowania źródłem wtórnym algorytmu FXLMS w strukturze ze sprzężeniem do przodu [9] lub jego modyfikacji [18]. Podstawowym problemem związanym z zastosowaniem systemów aktywnej redukcji hałasu w ochronnikach słuchu jest zapewnienie stabilności układu w przypadku wystąpienia nagłych zmian warunków akustycznych. Jedną z możliwości wyeliminowania tego problemu jest zastosowanie w systemie układu sterowania wykorzystujący algorytm o stałych parametrach. W układzie sterowania zaimplementowany

jest filtr cyfrowy, w którym współczynniki filtra nie zmieniają się w trakcie pracy układu aktywnej redukcji hałasu. Zaletą takiego rozwiązania układu sterowania jest również zmniejszenie wymaganej mocy obliczeniowej procesora zastosowanego w układzie sterującym, co może wpłynąć korzystnie na koszt i energochłonność rozwiązania. Wartości współczynników filtra zwykle ustalane są doświadczalnie na podstawie pomiarów wykonanych w trybie off-line. Dla poprawnej pracy układu aktywnej redukcji hałasu, przy każdej zmianie warunków akustycznych, konieczny jest dobór nowych wartości współczynników filtra cyfrowego. Do automatycznego wyznaczenia tych współczynników może zostać zastosowany algorytm genetyczny. Algorytmy genetyczne są algorytmami optymalizacji [19] coraz powszechniej stosowanymi w różnych obszarach nauki i techniki, w tym również w obszarze metod aktywnych redukcji hałasu [8].

W kraju badania nad zastosowaniem algorytmów genetycznych w układach aktywnej redukcji hałasu prowadzone były w CIOP-PIB [10, 14] i koncentrowały się na optymalizacji parametrów układu sterowania w systemach ARH. W wyniku prowadzonych prac w układach ARH zastosowano zmodyfikowane filtry NOTCH [3, 4] o parametrach ustalanych za pomocą



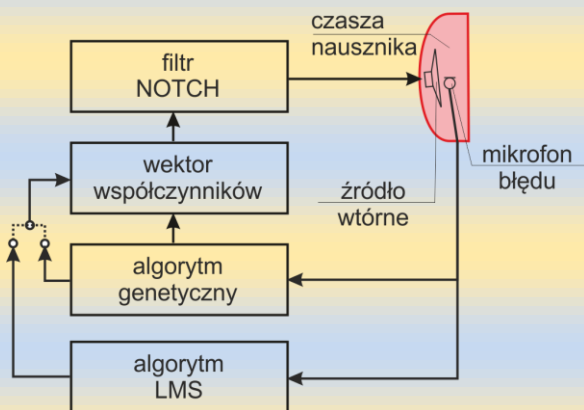
Rysunek 2. Schemat blokowy zmodyfikowanego filtra NOTCH.

algorytmu genetycznego. Modyfikacja filtrów NOTCH polega na wprowadzeniu możliwości zmiany częstotliwości sygnału odniesienia (i tym samym dopasowania się do częstotliwości sygnału

redukowanego), poprzez wprowadzenie dodatkowego współczynnika decydującego o częstotliwości generowanego sygnału odniesienia, jak pokazano na rysunku 2. Adaptacja amplitudy, fazy i częstotliwości sygnału kompensującego odbywa się poprzez zmianę wartości współczynników w_1 , w_2 i w_3 zgodnie z zależnością (1).

$$y(n) = w_1 \sin(w_3 \omega(n)) + w_2 \cos(w_3 \omega(n)) \quad (1)$$

Celem adaptacji współczynników filtra NOTCH jest osiągnięcie jak największej skuteczności układu ARH, w szczególności ustalenie zredukowanych częstotliwości. Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy ochronnika słuchu z układem aktywnej redukcji hałasu, działający z wykorzystaniem filtrów NOTCH. Proces adaptacji współczynników filtra



Rysunek 3. Układ aktywnej redukcji hałasu ze zmodyfikowanymi filtrami NOTCH.

przebiega dwuetapowo. W pierwszym etapie do adaptacji współczynników filtra wykorzystywany jest algorytm genetyczny i na tym etapie układ aktywnej redukcji hałasu poszukuje najlepszą częstotliwość filtra NOTCH. W przypadku większej liczby filtrów NOTCH algorytm genetyczny jednocześnie modyfikuje współczynniki wszystkich filtrów. Działanie algorytmu genetycznego [2] rozpoczyna się od utworzenia populacji początkowej osobników (zestawów współczynników filtrów). Dla każdego filtra niezbędne będzie określenie trzech współczynników. Liczba genów w każdym osobniku uzależniona jest od liczby zaimplementowanych filtrów NOTCH, a ich liczbę określa się przez pomnożenie liczby współczynników w filtrze i liczby zaimplementowanych filtrów. Wybór osobnika o najlepszym przystosowaniu polega na znalezieniu takiej kombinacji jego genów, dla których układ aktywnej redukcji hałasu osiąga największą skuteczność. Dla tego osobnika odczytywane są wartości współczynników filtrów NOTCH i przypisywane są do wektora współczynników filtrów. Po sprawdzeniu warunku końca którym w prezentowanym algorytmie jest określona liczba generacji, algorytm genetyczny kończy pracę lub wraca do etapu tworzenia nowych osobników przy wykorzystaniu operatorów selekcji, krzyżowania i mutacji [8].

Po zakończeniu działania algorytmu genetycznego i ustaleniu współczynników filtra NOTCH, układ aktywnej redukcji hałasu przechodzi do trybu pracy sterowanie procesem aktywnej redukcji hałasu odbywa się z bez dalszej zmiany wartości współczynników odpowiadających za zmianę częstotliwości (w_3). Na tym etapie współczynniki filtrów NOTCH (w_1 i w_2) adaptowane są z zastosowaniem algorytmu LMS o bardzo małym kroku adaptacji. Zastosowanie algorytmu LMS wynika z faktu, że algorytm genetyczny wybiera zredukowane

częstotliwości ze skończoną dokładnością. Ze względu, na fakt że jest to algorytm stochastyczny błędy te mogą się znacznie różnić po kolejnych uruchomieniach tego samego algorytmu. Efektem nieidealnego określenia redukowanej częstotliwości jest tzw. dudnienie.

Prototyp aktywnego ochronnika słuchu składa się ze nauszników pasywnych oraz układu



Rysunek 4. Nauszniki Faser N1 z układem ARH

aktywnej redukcji hałasu (ARH) zamontowanego wewnątrz nauszników. Jako podstawę opracowania elementów elektronicznych przyjęto kształt czasz niezależnych nauszników Faser N1 (Rysunek 4), z producentem których podpisano stosowną umowę. Nauszniki te charakteryzują się masą 264 g i średnią siłą docisku 11 N, a średnie ciśnienie poduszek uszczelniających wynosi 2933 Pa. Tłumienie dźwięku i

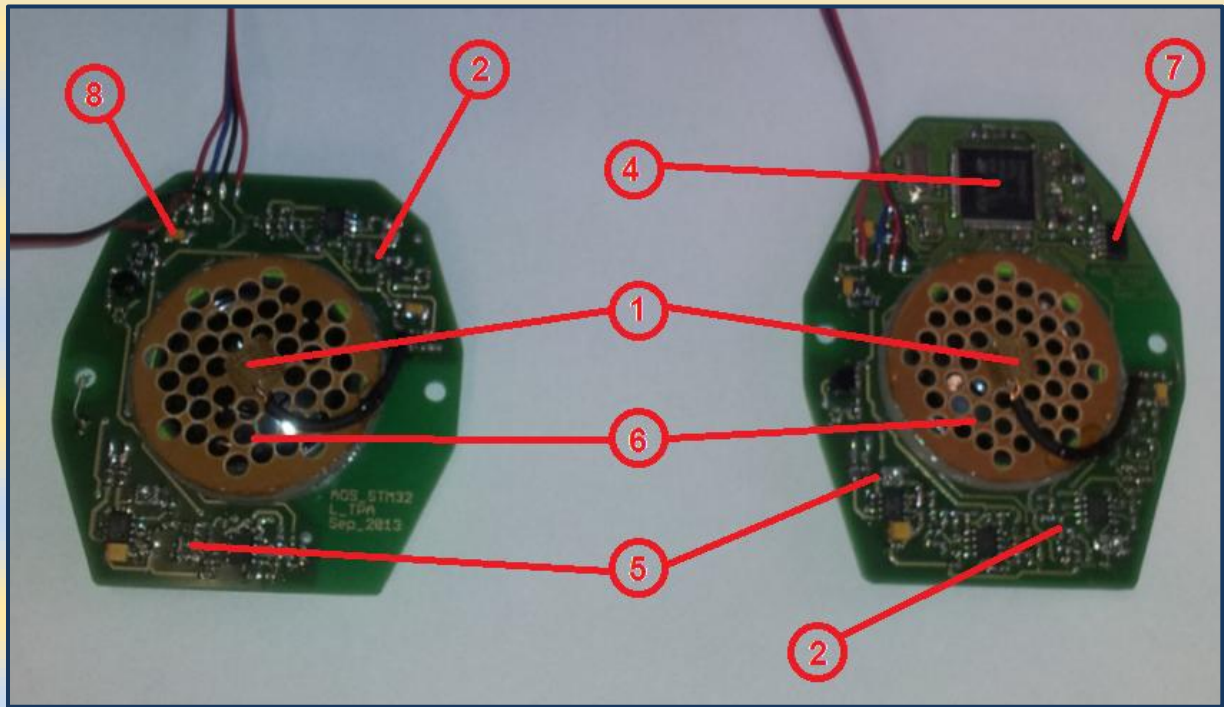
odchylenie standardowe wyznaczone zgodnie z normą PN-EN 24869-1 przedstawiono w tablicy 1.

Tablica 1. Tłumienie dźwięku i odchylenie standardowe nauszników Faser N1

Częstotliwość [Hz]	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Tłumienie dźwięku [dB]	11,4	14,4	20,0	28,5	30,2	25,4	31,0	33,2
Odchylenie standardowe [dB]	3,1	2,5	2,7	2,4	2,6	2,8	3,2	5,3

W prototypie aktywnego ochronnika słuchu wszystkie niezbędne układy elektroniczne podzielono na dwie płytki drukowane dopasowane do wnętrza nauszników Faser N1 (Rysunek 5). Układy elektroniczne prototypu aktywnego ochronnika słuchu, podobnie jak testowy układ ARH, zawierają układy wykonawcze w postaci dwóch detektorów sygnału

błędu (1) i dwóch źródeł wtórnych (6), bloków wzmacniaczy wejściowych (2) i wyjściowych (5), bloku przetwarzania cyfrowego (4) oraz bloku zasilania (8). Prototyp wyposażono także w złącze diagnostyczne (4) umożliwiające zaprogramowanie układu cyfrowego lub ewentualną zmianę parametrów działania układu ARH.

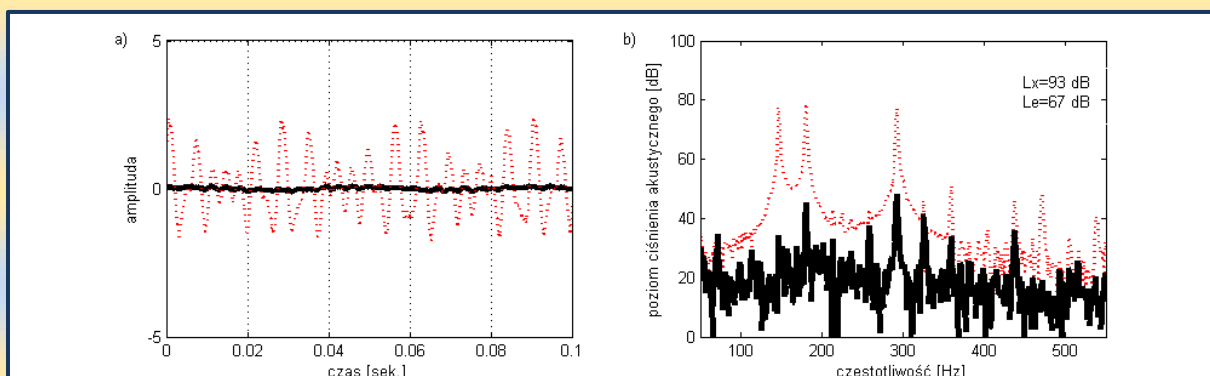


Rysunek 5. Widok elementów elektronicznych prototypu aktywnego ochronnika słuchu

Na obu płytkach umieszczono po jednym torze bloków sygnałów wejściowych i wyjściowych wraz z układami wykonawczymi. Jedynie na płytce lewej umieszczono blok zasilania, a jedynie na płytce prawej blok przetwarzania cyfrowego. Jako układy wykonawcze zastosowano mikrofony elektretowe oraz mylarowe głośniki. Mikrofony błędu zamocowano w centralnej części osłony głośnika, z membraną umieszczoną prostopadle do membrany głośnika.

Opisywany prototyp poddano szczegółowym badaniom weryfikacyjnym. W ich trakcie przeprowadzono badania symulacyjne dotyczące wyboru algorytmu sterującego oraz ustalenia parametrów tego algorytmu w celu osiągnięcia najwyższej możliwej skuteczności aktywnej redukcji hałasu. Przeprowadzono także badania laboratoryjne poszczególnych elementów układu oraz końcowej wersji aktywnego ochronnika słuchu. Badania te wykazały, że możliwe jest osiągnięcie skuteczności aktywnej redukcji hałasu na poziomie ok. 25 dB, co

pokazują wyniki badań przedstawione na rysunku 6. Na wykresach przedstawiono przebieg czasowy (po lewej stronie) oraz charakterystykę widmową (po prawej stronie) sygnałów przed włączeniem układu ARH (kolor czerwony) i po jego uruchomieniu (kolor czarny) zarejestrowane podczas badań weryfikacyjnych. Sygnałem redukowanym był sygnał wielotonalny, złożony z tonów o częstotliwościach 141, 174 i 300 Hz. Dodatkowo na rysunku 1 zamieszczono informację o sumarycznym poziomie ciśnienia akustycznego zarejestrowanego sygnału przed redukcją (L_x) równym 93 dB i po redukcji (L_e) równym 67 dB.



Rysunek 6. Przebieg czasowy i charakterystyka widmowa sygnałów przed (kolor czerwony) i po (kolor czarny) włączeniu układu ARH aktywnego ochronnika słuchu

Rozwiązanie to obok zwiększenia skuteczności ochrony przed hałasem w zakresie niskich częstotliwości akustycznych umożliwi poprawę zrozumiałości mowy w komunikacji słownej z osobami stosującymi ochronniki słuchu. Opisywane rozwiązanie ułatwi możliwość ostrzegania pracowników przed niebezpiecznymi sytuacjami, a przez to zwiększy bezpieczeństwo pracowników użytkujących ochronniki słuchu.

Bibliografia

1. Canetto P., Hearing Protectors: Topicality and Research Needs; JOSE, 15(2), 2009; pp. 141-153
2. Goldberg D., E., Algorytmy genetyczne i ich zastosowania, Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 2003,
3. Górski P., Model of active hearing protector controlled by NOTCH filters, 20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20), Bangkok, Thailand, lipiec 2013
4. Górski P., Morzyński L., Algorytm sterowania z filtrem NOTCH i algorytmem genetycznym, 59 Otwarte Seminarium z Akustyki, OSA, Boszkowo, wrzesień 2012.
5. Górski P., Morzyński L., Aktywny ochronnik słuchu z zewnętrznym układem zasilania, Bezpieczeństwo Pracy – Nauka i Praktyka, 3/2001, pp. 10 – 13.
6. Górski, P., Morzyński, L., Active Noise Reduction Algorithm Based on NOTCH Filter and Genetic Algorithm, Archives of Acoustic, vol. 38, no. 2, 2013, 185-190
7. GUS, Warunki pracy w 2012 r., Warszawa 2013
8. Gwiazda T. D., Algorytmy genetyczne kompendium – Tom I i II, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa, 2007,
9. Kannan G., Panahi I. M. S., Briggs R. W., Sequentially Adapted Parallel Feedforward Active Noise Control of Noisy Sinusoidal Signals, Advances in Acoustics and Vibration, Article ID 694290, Volume 2009
10. Makarewicz G., Application of genetic algorithm an active noise control system, Archives of Acoustics, 2007, vol. 32,no. 4, pp. 839-849
11. Makarewicz G., Wybrane cyfrowe systemy aktywnej redukcji hałasu, monografia, Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa, 2002
12. Makarewicz G., Zawieska W., Morzyński L., Górski P., Aktywny ochronnik słuchu z łącznością wewnętrzną, Noise Control'01, 2001, pp. 395 – 400.
13. Mejia J., Dillon H., Fisher M., Active cancellation of occlusion: An electronic vent for hearing aids and hearing protectors, JASA, vol. 124(1), July 2008
14. Morzyński L. The use of genetic algorithms for limitation of occupational exposure to noise – simulation research, Proc. of NOISE CONTROL'10, Zamek Książ, Wałbrzych, 6-9 June 2010.

15. Pawelczyk M., Adaptive noise control algorithms for active headrest system, Control Engineering Practice, vol. 12, no. 9, 2004
16. Pawelczyk M., Latos M., Earplug actuator selection for a miniature personal active hearing protection system, Archives of Acoustics, vol. 35, no. 2, 2010
17. Prashanth M. K. V., Design of a headset prototype for speech detection and noise reduction, 17th International Congress on Sound and Vibration (ICSV17), Cairo, Egypt, 18-22 July 2010
18. Ray L., Solbeck J.A., Streerer A. D., Collier R. D., Hybrid feedforward-feedback active noise reduction for hearing protection and communication, JASA, vol. 120(4), October 2006
19. Tadeusiewicz R., Algorytmy genetyczne, Referat wygłoszony w ramach Uniwersytet Otwarty (UO) AGH, Kraków, 1 marca 2008
20. Tokhi M. O., Hossain M. A., and M. H. Shahed, Parallel Computing for Real-Time Signal Processing and Control, Springer, London, UK, 2003
21. Dyrektywa 2003/10/WE parlamentu europejskiego i rady z dnia 6 lutego 2003 r. w sprawie minimalnych wymagań w zakresie ochrony zdrowia i bezpieczeństwa dotyczących narażenia pracowników na ryzyko spowodowane czynnikami fizycznymi (hałasem)
22. 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 (dziennik ustaw z 2005 r. nr 157 poz. 1318)

Publikacja opracowana na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego pn. Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, finansowanego w latach 2011-2013 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut ochrony Pracy-Państwowy Instytut Badawczy.