

mgr inż. PAWEŁ GÓRSKI

Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy

Kontakt: pawel@ciop.pl

Nowa metoda aktywnej redukcji hałasu w ochronnikach słuchu

Fot. Archiwum CIOP-PIB



Ochronniki słuchu należą do najpowszechniej stosowanych środków ograniczania narażenia na hałas na stanowiskach pracy. Popularne pasywne ochronniki słuchu, jak większość pasywnych rozwiązań, charakteryzują się małym tłumieniem w zakresie niskich częstotliwości akustycznych. Powoduje to, że pracownicy nie zawsze są odpowiednio zabezpieczeni przed hałasami niskoczęstotliwościowymi, a czasami ochronniki w zbyt dużym stopniu tłumią hałas, powodując pogorszenie zrozumiałości mowy oraz uczucie odizolowania.

Rozwiązaniem tych problemów jest zastosowanie w ochronnikach słuchu układów aktywnej redukcji hałasu (ARH). Wymaga to wykorzystania algorytmów sterowania zapewniających stabilność pracy układu ARH przy jednocześnie wysokiej skuteczności aktywnej redukcji hałasu. Przykładem rozwiązań spełniających te kryteria są układy ARH, których sterowanie bazuje na filtrach NOTCH.

Słowa kluczowe: hałas, aktywna redukcja hałasu, ochronnik słuchu

A new method of active noise reduction in hearing protectors

Hearing protectors are the most common solutions for reducing noise exposure at workstations. Commonly used passive hearing protectors, like most passive solutions, are characterized by low attenuation in the low frequencies. That is why workers are not always properly protected against low-frequency noise. Additionally, non-uniform attenuation of passive hearing protectors in that frequency band has an adverse impact on speech intelligibility. Active noise reduction (ANR) systems, which are more effective in reducing low-frequency noise, are a solution. Using ANR systems in hearing protectors requires control algorithms to ensure those systems are stable and, at the same time, provide highly effective active noise reduction. An ANR system controlled by NOTCH filters is an example of a solution that meets these criteria.

Keywords: noise, active noise reduction, hearing protector

Wstęp

Ochronniki słuchu należą do najpowszechniej stosowanych środków ograniczania narażenia na hałas na stanowiskach pracy. Są one najłatwiejszymi do zastosowania technicznymi środkami ochrony pracowników przed hałasem [1]. Należy jednak pamiętać, że środki ochrony indywidualnej powinny być stosowane dopiero po wyczerpaniu innych możliwości ograniczania zagrożenia na stanowisku pracy.

Powszechnie stosowane pasywne, czyli nie posiadające układów elektronicznych, ochronniki słuchu, jak większość rozwiązań pasywnych, charakteryzują się małym tłumieniem hałasu o niskich częstotliwościach akustycznych w zakresie od 10 do 250 Hz, zwanym hałasem niskoczęstotliwościowym [2]. Ich tłumienie 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 jedynie do pewnego stopnia. Powoduje to, że pracownicy stosujący pasywne ochronniki słuchu nie zawsze są odpowiednio zabezpieczeni przed hałasem niskoczęstotliwościowym [3, 4]. Ponadto nierównomierna charakterystyka częstotliwościowa tłumienia pasywnych ochronników słuchu (mniejsze tłumienie dźwięków o niskich częstotliwościach akustycznych, a większe dźwięków o wyższych częstotliwościach, szczególnie z zakresu mowy) ma negatywny wpływ na zrozumiałość mowy u osób stosujących ochronniki słuchu, co jest szczególnie ważne u osób wykonujących pracę wymagającą komunikacji werbalnej (np. hakowy), [5]. Noszenie ochronników słuchu naraża pracownika na odizolowanie akustyczne od świata zewnętrznego [6]. Pracownik nie słyszy np. sygnałów ostrzegawczych, odgłosu zbliżających się pojazdów czy głosu osoby przestrzegającej przed niebezpieczeństwem. Aby temu zaradzić, stosuje

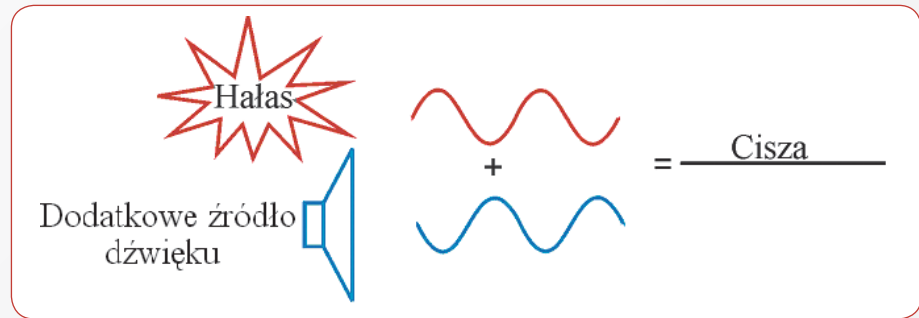
się ochronniki słuchu wyposażone w układy aktywnej redukcji hałasu [7]. Tego typu ochronniki słuchu umożliwiają skuteczniejszą redukcję hałasu niskoczęstotliwościowego [8], bez nadmiernego zwiększania tłumienia w zakresie częstotliwości wyższych [9]. Zaproponowane rozwiązanie zapewnia wysokie tłumienie w zakresie niskich częstotliwości akustycznych, powinno spowodować poprawę zrozumiałości mowy w komunikacji słownej u osób stosujących ochronniki słuchu, a jednocześnie pozwoli ograniczyć tzw. zjawisko odizolowania akustycznego [6].

Zasada działania aktywnych ochronników słuchu

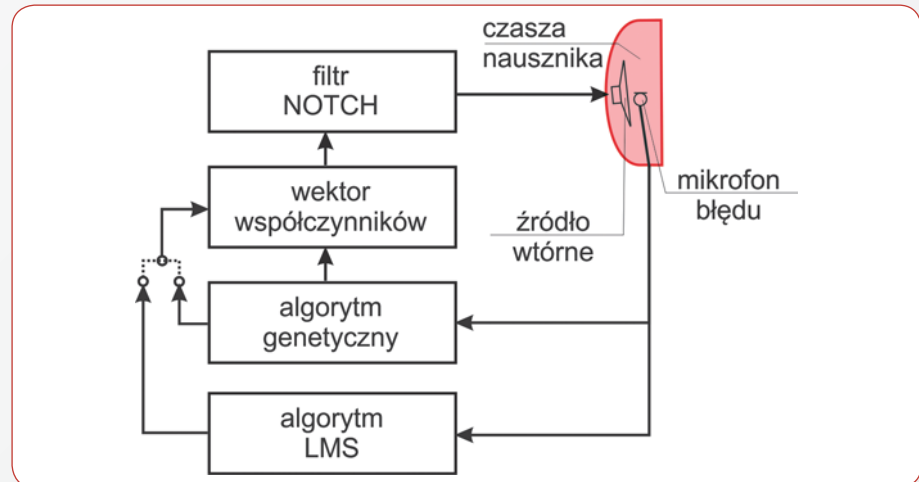
Układy aktywne należą do najbardziej zaawansowanych środków ochrony przed hałasem [10]. Istotą ich działania jest redukcja hałasu poprzez doprowadzenie dodatkowej energii akustycznej poprzez dodatkowe źródło dźwięku. Źródło to zwane jest źródłem kompensującym lub wtórnym, zaś generowany przez nie sygnał – sygnałem kompensującym. Za pomocą układu sterującego źródło wtórne generuje sygnał kompensujący w ten sposób, że po nałożeniu się fal dźwiękowych hałasu i sygnału kompensującego uzyskiwane jest obniżenie poziomu ciśnienia akustycznego (rys. 1).

Gdy sygnał kompensowany jest sygnałem sinusoidalnym, w celu jego pełnego zredukowania sygnał kompensujący powinien mieć taką samą amplitudę jak sygnał kompensowany i być przesunięty w fazie o 180° . Rys. 1. ilustruje idealny przypadek generacji sygnału kompensującego, który w wyniku nałożenia się (kompensacji) z sygnałem hałasu tworzy ciszę. Przypadek taki możliwy jest do osiągnięcia jedynie teoretycznie lub w warunkach laboratoryjnych. Nawet niewielkie odchylenia amplitudy lub przesunięcia fazy jednego z sygnałów powodują znaczne obniżenie się skuteczności działania układu, a w najbardziej niekorzystnych sytuacjach mogą prowadzić nawet do zwiększenia amplitudy sygnału skompensowanego powyżej amplitudy sygnału kompensowanego. 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.

W praktycznych zastosowaniach układy aktywnej redukcji hałasu (ARH) najczęściej złożone są z układu sterującego, dodatkowego źródła dźwięku oraz detektorów sygnału hałasu (odniesienia) i sygnału błędu (sygnału hałasu po redukcji). Detektory umożliwiają układowi ARH pomiar skuteczności jego



Rys. 1. Zasada aktywnej redukcji hałasu
Fig. 1. The principle of active noise reduction



Rys. 2. Układ aktywnej redukcji hałasu ze zmodyfikowanymi filtrami NOTCH
Fig. 2. An ANR system with modified NOTCH filters

działania oraz odseparowanie sygnału przeznaczanego do redukcji. Dodatkowe źródło dźwięku umożliwia emisję sygnału kompensującego. Podstawowym elementem układu ARH jest układ sterujący. Ma on za zadanie, na podstawie sygnałów odniesienia i błędu, generowanie sygnału kompensującego emitowanego przez dodatkowe źródło dźwięku w taki sposób, aby uzyskać maksymalną kompensację sygnału hałasu. W chwili obecnej prawie wszystkie układy sterujące realizowane są w technologii cyfrowej, a głównym obszarem badań jest opracowywanie nowszych i lepszych algorytmów sterowania. Obecnie najczęściej stosowanymi algorytmami sterowania w układach ARH są algorytmy działające na podstawie adaptacyjnych filtrów cyfrowych. W tych algorytmach sygnał rejestrowany przez detektory jest przekształcany (filtrowany) przez cały czas działania układu ARH i w sposób ciągły (adaptacyjny) dostosowuje się do zmieniających się parametrów hałasu.

Podczas stosowania aktywnej redukcji hałasu w ochronnikach słuchu częstym problemem jest zapewnienie stabilności działania układów adaptacyjnych przy jednocześnie wysokiej skuteczności aktywnej redukcji hałasu [7]. Rozwiązaniem tego problemu może

być zastosowanie w układach sterujących algorytmów działających przy wykorzystaniu adaptacyjnych filtrów wycinających (NOTCH) i algorytmu genetycznego [11]. Specyfiką działania tego typu rozwiązań jest wąskopasmowy charakter działania tzn. jeden filtr NOTCH może filtrować tylko jedną, wcześniej zdefiniowaną częstotliwość, jednak ich działanie w układach ARH charakteryzuje się wysoką stabilnością i skutecznością aktywnej redukcji hałasu. W praktyce w układach ARH stosuje się wiele równoległe działających filtrów NOTCH.

Model aktywnego ochronnika słuchu

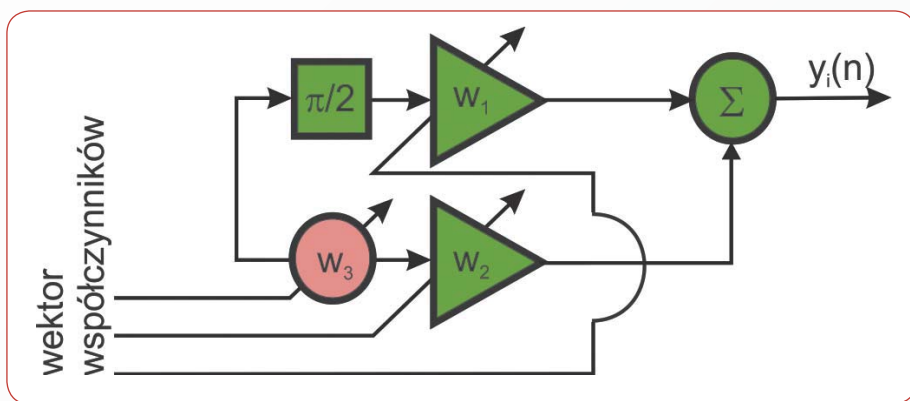
W artykule przedstawiono model ochronnika słuchu z adaptacyjnym układem aktywnej redukcji hałasu działającego, z wykorzystaniem filtrów NOTCH, algorytmów: genetycznego [12] i najmniejszych średnich kwadratów (LMS) [10]. Działanie układu aktywnej redukcji hałasu opiera się na zastosowaniu zmodyfikowanych filtrów NOTCH [13]. Modyfikacja filtrów NOTCH polega na wprowadzeniu możliwości zmiany częstotliwości sygnału odniesienia (i tym samym dopasowania się do częstotliwości sygnału redukowanego). W opisywanym rozwiązaniu podstawowym celem działania

algorytmu genetycznego jest wyznaczenie najlepszej częstotliwości filtra NOTCH. Z kolei celem działania algorytmu LMS jest kompenso-
wanie błędu wyznaczenia, przez algorytm genetyczny, częstotliwości działania filtra NOTCH. Zastosowanie algorytmu LMS do kompensacji błędu określenia częstotliwości zredukowanego sygnału przez algorytm genetyczny umożliwia znaczne przyspieszenie działania algorytmu genetycznego oraz znaczną poprawę skuteczności działania całego układu.

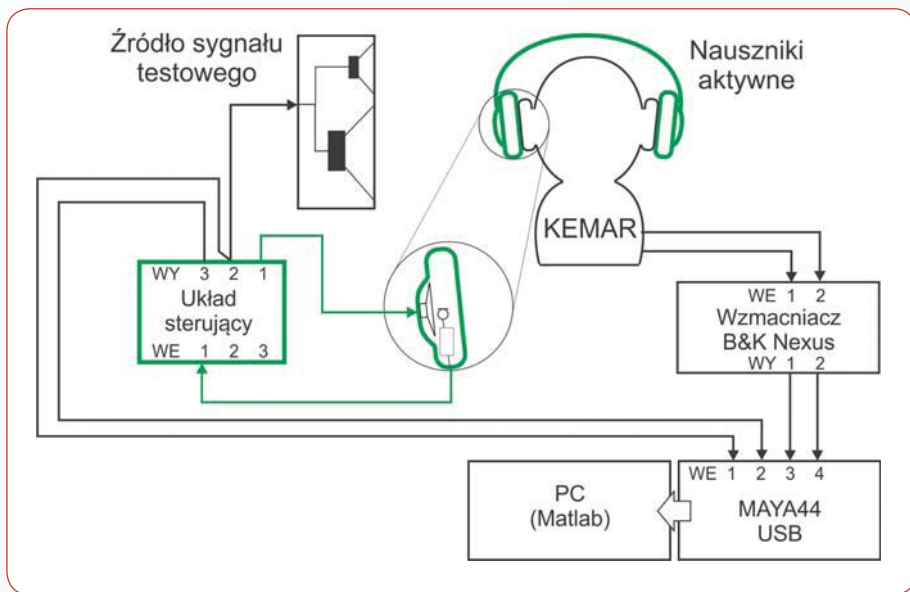
Na etapie laboratoryjnych badań modelu aktywnego ochronnika słuchu opracowano nauszniki aktywne, bazujące na lekkich, otwartych słuchawkach audio, które uzupełniono o mikrofony błędów i wstępne wzmacniacze mikrofonowe. Zastosowanie, do badań laboratoryjnych, otwartych słuchawek audio wynikało z uproszczenia modelu. W badaniach laboratoryjnych oceniano jedynie wpływ zastosowania układu aktywnej redukcji hałasu. Pominięto w nich wpływ pasywnego tłumienia ochrony słuchu. Założono, że układ aktywnej redukcji hałasu może zostać umieszczony w dowolnych ochronnikach słuchu, a wtedy jego tłumienie pasywne będzie się sumowało z dodatkową redukcją hałasu realizowaną przez układ aktywny. Na rys. 2. przedstawiono schemat blokowy ochronnika słuchu z układem aktywnej redukcji hałasu, działający z wykorzystaniem zmodyfikowanych filtrów NOTCH [11].

W filtrach NOTCH adaptacja amplitudy i fazy sygnału kompensującego odbywa się poprzez zmianę wartości współczynników filtra: w_1, w_2 . W zmodyfikowanym filtrze NOTCH zmiana częstotliwości sygnału odniesienia, realizowana jest poprzez wprowadzenie dodatkowego współczynnika w_3 , jak pokazano na rys. 3.

Proces adaptacji współczynników filtra przebiega dwuetapowo. W pierwszym etapie do adaptacji współczynników filtra wykorzystywany jest algorytm genetyczny. Układ aktywnej redukcji hałasu poszukuje wówczas częstotliwości filtra NOTCH, dla których możliwe będzie osiągnięcie największej skuteczności aktywnej redukcji hałasu. W przypadku większej liczby filtrów NOTCH algorytm genetyczny jednocześnie modyfikuje współczynniki wszystkich filtrów. 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 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 gradientowego algorytmu LMS o bardzo małym kroku adaptacji.



Rys. 3. Schemat blokowy zmodyfikowanego filtra NOTCH
Fig. 3. Block schematics of a modified NOTCH filter



Rys. 4. Schemat stanowiska laboratoryjnego
Fig. 4. A test stand

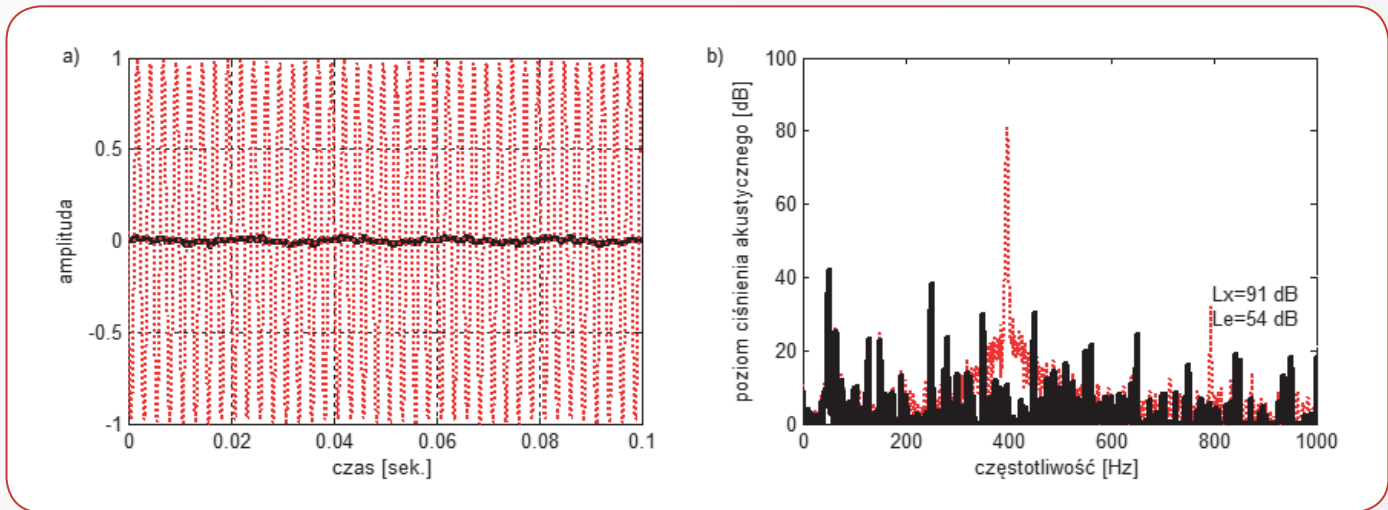
Badania laboratoryjne

W celu sprawdzenia poprawności działania modelu aktywnego ochronnika słuchu przeprowadzono badania laboratoryjne. Na schemacie stanowiska laboratoryjnego (rys. 4.) kolorem zielonym oznaczono elementy modelu – nauszniki aktywne i układ sterujący. Na etapie badań laboratoryjnych układ sterujący aktywnego ochronnika słuchu miał możliwość generacji sygnału hałasu. Umożliwiło to badanie maksymalnych możliwości algorytmu aktywnej redukcji hałasu opracowanego rozwiązania.

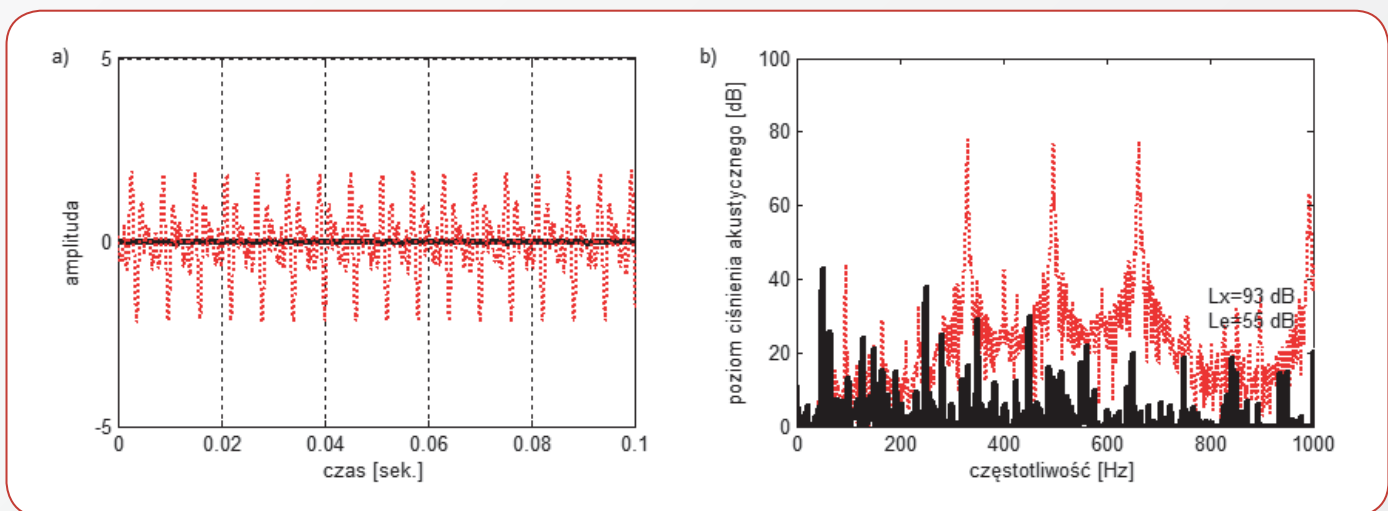
W trakcie badań laboratoryjnych pomiary przeprowadzono za pomocą oscyloskopu Tektronics, manekina pomiarowego KEMAR połączonego ze wzmacniaczem Nexus oraz karty pomiarowej MAYA44 USB wraz z oprogramowaniem. W trakcie badań sygnałem hałasu były sygnały testowe generowane przez układ sterujący i emitowane przez źródło

dźwięku, którym był aktywny głośnik Solo1 firmy MicroLab.

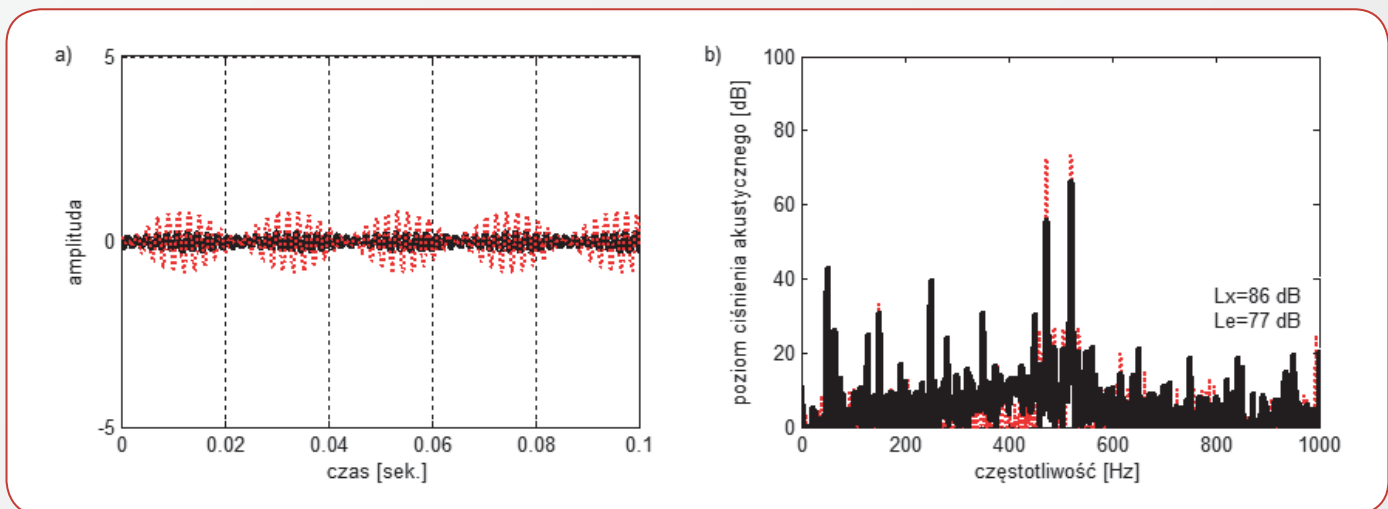
Głównym celem badań laboratoryjnych była analiza możliwości zastosowania algorytmu LMS do zmniejszenia błędu wyznaczenia częstotliwości zredukowanego sygnału przez algorytm genetyczny oraz oszacowanie skuteczności zaproponowanego rozwiązania układu ARH. Badania laboratoryjne polegały na uruchamianiu poszczególnych elementów kodu oprogramowania i przeprowadzaniu pomiarów sygnałów elektrycznych na wyjściach układu sterującego. Przeliczenie tych sygnałów na wartości poziomu ciśnienia akustycznego miało na celu uproszczenie analizy prezentowanych wyników i zostało przeprowadzone na podstawie wartości zmierzonych w procesie kalibracji poszczególnych elementów modelu aktywnego ochronnika słuchu. Na tym etapie badań laboratoryjnych wszystkie sygnały występujące w modelu



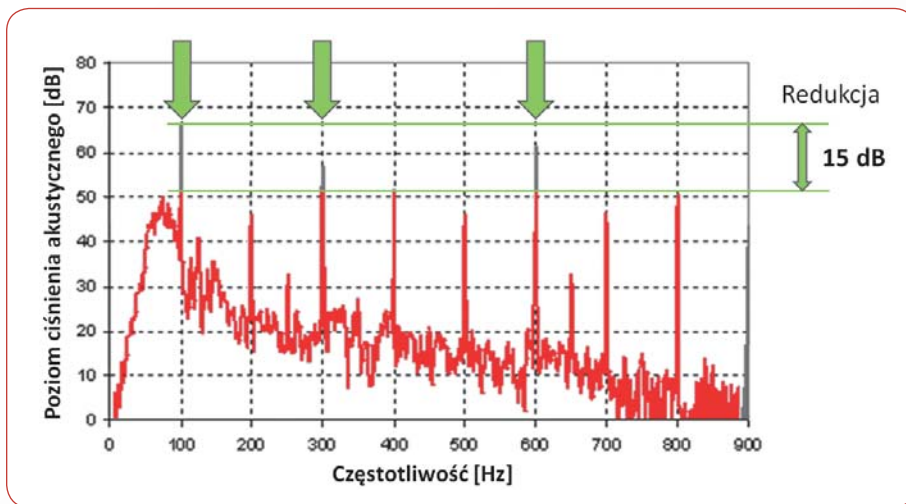
Rys. 5. Wyniki pomiarów hałasu (ton o częstotliwości 400 Hz), układ ARH wyłączony (kolor czerwony) i układ ARH włączony (kolor czarny)
 Fig. 5. Results of noise measurements (tone of 400 Hz), ANR system disabled (red) and ANR system activated (black)



Rys. 6. Wyniki pomiarów hałasu (trójton o częstotliwościach 360, 500 i 660 Hz), układ ARH wyłączony (kolor czerwony) i układ ARH włączony (kolor czarny)
 Fig. 6. Results of noise measurements (tones of 360, 500 and 660 Hz), ANR system disabled (red) and ANR system activated (black)



Rys. 7. Wyniki pomiarów hałasu (dwuton o częstotliwościach 475 i 525 Hz), układ ARH wyłączony (kolor czerwony) i układ ARH włączony (kolor czarny)
 Fig. 7. Results of noise measurements (tones of 475 and 525 Hz), ANR system disabled (red) and ANR system activated (black)



Rys. 8. Przykładowa charakterystyka widmowa hałasu

Fig. 8. Sample noise spectrum characteristics

ochronnika słuchu były generowane i przetwarzane we wnętrzu układu sterującego, a następnie, jako wynik działania układu aktywnej redukcji hałasu, wyprowadzane na zewnątrz do celów pomiarowych.

Na rys. 5-7. przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów dla algorytmu sterującego z działającymi algorytmami genetycznym i LMS. W przypadkach pokazanych na rysunkach algorytm genetyczny generował 15 generacji o 50-osobniczej populacji, prawdopodobieństwa krzyżowania i mutacji były równo odpowiednio 0,8 i 0,1, a krok adaptacji algorytmu LMS ustalono na 0,1. We wszystkich przedstawionych przykładach sygnał błędu obliczono na podstawie wektora o długości 500 próbek.

Na rys. 5. przedstawiono wyniki działania układu sterującego w trakcie redukcji sygnału hałasu w postaci tonu o częstotliwości 400 Hz. Przed uruchomieniem układu sterującego poziom ciśnienia akustycznego w całym paśmie sygnału hałasu (L_x) wynosił 91 dB, a po uruchomieniu układu sterującego (L_e) obniżył się do 54 dB. Skuteczność aktywnej redukcji modelu ochronnika słuchu wynosiła zatem 37 dB.

Na rys. 6. pokazano wyniki działania układu sterującego w trakcie redukcji sygnału hałasu w postaci trzech tonów o częstotliwościach 360, 500, 660 Hz. Przed uruchomieniem układu sterującego poziom ciśnienia akustycznego sygnału hałasu (L_x) wynosił 93 dB, a po uruchomieniu układu sterującego obniżył się do 55 dB (L_e), zatem skuteczność aktywnej redukcji hałasu wynosiła 38 dB. W przykładach przedstawionych na rys. 5 i 6. tak wysokie wartości skuteczności aktywnej redukcji hałasu wynikały z uproszczenia, dzięki któremu algorytm genetyczny nie musiał poszukiwać najlepszej częstotliwości. W trakcie opisanych badań laboratoryjnych w oprogramowaniu algorytmu sterowania na stałe przypisano częstotliwości działania filtrów NOTCH równe częstotliwościom składowych sygnału hałasu.

Z kolei na rys. 7. przedstawiono przykładowe wyniki pomiarów przeprowadzonych bez uprzedniego wskazywania algorytmowi sterowania częstotliwości składowych sygnału hałasu, czyli w wersji docelowej algorytmu sterowania. Przed uruchomieniem układu sterującego poziom ciśnienia akustycznego sygnału hałasu wynosił 86 dB (L_x), a po jego uruchomieniu obniżył się do 77 dB (L_e). W tym przypadku osiągnięto 9 dB-ową skuteczność aktywnej redukcji modelu ochronnika słuchu.

Podsumowanie

Przedstawiony w artykule uproszczony model aktywnej redukcji hałasu wykorzystuje zmodyfikowane filtry NOTCH. Mimo wąskopasmowego charakteru działania tego typu filtrów, wykorzystujące je układy aktywnej redukcji hałasu mogą być stosowane do redukcji hałasu wielu specyficznych grup maszyn i urządzeń wytwarzających wąskopasmowy hałas stacjonarny, takich jak pompy, systemy wentylacyjne, turbiny. W przypadku tego typu źródeł hałasu do osiągnięcia wymaganej skuteczności tłumienia aktywnej redukcji hałasu wystarczy redukcja hałasu w wybranych pasmach częstotliwości.

Przykładowo, jeżeli dla źródła hałasu, którego charakterystykę widmową przedstawiono na rys. 8., zredukowane zostaną jedynie wąskopasmowe składowe hałasu o częstotliwościach: 100, 300 i 600, to możliwa jest redukcja poziomu ciśnienia akustycznego w całym paśmie o ok. 15 dB. Analizy teoretyczne wykazały, że dla ochronnika słuchu z opisywanym układem aktywnej redukcji hałasu maksymalna teoretyczna skuteczność redukcji hałasu wynosi ok. 40 dB.

Wyniki badań laboratoryjnych modelu aktywnej redukcji hałasu potwierdziły prawidłowe działanie wszystkich elementów algorytmu sterowania. Badania laboratoryjne

wykazały także ok. 9 dB skuteczność aktywnej redukcji hałasu modelu aktywnej redukcji hałasu. Skuteczność ta może zostać poprawiona poprzez wprowadzenie dodatkowych korekcji we wzmacnieniach rejestrowanych i generowanych przez układ sterujący sygnałów hałasu i kompensującego.

Zastosowanie lżejszych pasywnych ochronników słuchu o niższym tłumieniu, wyposażonych jednocześnie w układy aktywnej redukcji hałasu zwiększające ich tłumienie w zakresie niskich częstotliwości akustycznych, z pewnością poprawi jakość przekazu i sygnały ostrzegawcze u osób stosujących te ochronniki słuchu, zapewniając jednocześnie wystarczającą ochronę przed hałasem.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Kozłowski E. *Środki ochrony narządu słuchu*, Państwowa Inspekcja Pracy, Warszawa 2012
- [2] Alves-Pereira M. *Noise-induced extra-aural pathology: a review and commentary*. "Aviation, Space, and Environmental Medicine" 1999,70 (3 Pt 2), A7-21
- [3] Canetto P. *Hearing Protectors Topicality and Research Needs*. "JOSE" 2009,15,2:141-153
- [4] Kotarbińska E., Kozłowski E. *Measurement of Effective Noise Exposure of Workers Wearing Ear-Muffs*. "JOSE" 2009,15,2:193-200
- [5] McBride M., Hodgesa M. and Frencha J. *Speech intelligibility differences of male and female vocal signals transmitted through bone conduction in background noise: Implications for voice communication headset design*. "International Journal of Industrial Ergonomics" 2008,Vol. 38, Issues 11-12:1038-1044
- [6] Mejia J., Dillon H., Fisher M. *Active cancellation of occlusion: An electronic vent for hearing aids and hearing protectors*. "JASA" 2008,Vol. 124,1,July
- [7] Pawełczyk M. *Adaptive noise control algorithms for active headrest system*. "Control Engineering Practice" 2004,12,9
- [8] Pawełczyk M., Latos M. *Earplug actuator selection for a miniature personal active hearing protection system*. "Archives of Acoustics" 2010,35,2:213-222
- [9] Pleban D. *Acoustic modelling of machines using the inversion method for the purposes of the acoustic assessment of machines*. "Archives of Acoustics" 2007,32,2: 321-327
- [10] Zawieska M. W. *Wybrane zagadnienia aktywnej redukcji hałasu na przykładzie transformatorów*. CIOP-PIB, Warszawa 2007
- [11] Górski P., Morzyński L. *The control algorithm with NOTCH filter and genetic algorithm*. 59th Open Seminar on Acoustics, Poznań – Boszkowo, Poland 2012
- [12] Makarewicz G. *Application of genetic algorithm an active noise control system*. "Archives of Acoustics" 2007,32,4:839-849
- [13] Górski P. *Model of active hearing protector controlled by NOTCH filters*. 20th International Congress on Sound and Vibration (ICSV20), Bangkok, Thailand, lipiec 2013

Publikacja opracowana na podstawie wyników II etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, sfinansowanego 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.