

dr inż. LESZEK MORZYŃSKI
 mgr inż. GRZEGORZ SZCZEPAŃSKI
 Centralny Instytut Ochrony Pracy
 – Państwowy Instytut Badawczy
 Kontakt: lmorzyns@ciop.pl
 DOI: 10.5604/01.3001.0011.6431

System aktywnej redukcji hałasu do zastosowania w hełmach strażackich – propozycja rozwiązania



Fot. Paha_/Bigstockphoto

Akustyczny sygnał uprzywilejowania emitowany przez poruszający się pojazd uprzywilejowania ma za zadanie informować pozostałych uczestników ruchu drogowego o zbliżeniu się pojazdu uprzywilejowanego i konieczności ustąpienia mu pierwszeństwa przejazdu. Głównym sposobem zapewnienia słyszalności i rozpoznawalności sygnału uprzywilejowania przez uczestników ruchu drogowego przy nieznanym i zmiennym: hałasie ruchu ulicznego, izolacyjności akustycznej pojazdów oraz hałasie we wnętrzu pojazdu, jest emisja sygnału uprzywilejowania o jak najwyższym poziomie ciśnienia akustycznego. Poziom dźwięku A sygnału uprzywilejowania docierającego do wnętrza pojazdu uprzywilejowanego może przekraczać 90 dB, co oddziałuje niekorzystnie na narząd słuchu i sprawności psychofizyczne członków załogi, jak również znacząco utrudnia porozumiewanie się we wnętrzu pojazdu. W artykule przedstawiono koncepcję budowy i wyniki badań symulacyjnych systemu aktywnej redukcji sygnału uprzywilejowania do zastosowania w hełmach strażackich, który pozwoli ograniczyć narażenie załogi na ten sygnał oraz poprawić jakość komunikacji słownej w pojeździe uprzywilejowanym. System ten jest zintegrowany z układem generacji sygnału uprzywilejowania. W algorytmie sterowania systemem zastosowano filtry *notch* i algorytm adaptacji NLMS. Konstrukcję układu sterującego oparto na mikrokontrolerze z rodziny STM32F4.

Słowa kluczowe: pojazdy uprzywilejowane, sygnał uprzywilejowania, hałas, aktywna redukcja hałasu

Active noise control system in a fire helmet – a proposal of the solution

An auditory warning signal emitted by a moving emergency vehicle is intended to inform other road users about an approaching emergency vehicle and the need to give way to it. Emission of a warning signal with the highest possible sound pressure level is the main method of ensuring the audibility and recognition of the warning signal by traffic participants at unknown and varying traffic noise, acoustic insulation of vehicles and noise in the interior of the vehicle. The A-weighted sound pressure level of the auditory warning signal reaching the interior of an emergency vehicle may exceed 90 dB, which can be harmful to the hearing, can adversely affect psychophysical fitness of the crew members and can significantly hinder verbal communication in the vehicle. This article presents the concept and results of numerical simulations of an active noise control system in fire helmets, which will reduce the exposure of the crew to the warning signal and improve the quality of verbal communication in an emergency vehicle. This system is integrated with the signal generation system. The Notch algorithm and the NLMS adaptation algorithm were used in the system's control algorithm. The construction of the controller was based on a microcontroller from the STM32F4 family.

Keywords: emergency vehicles, auditory warning signal, noise, active noise control

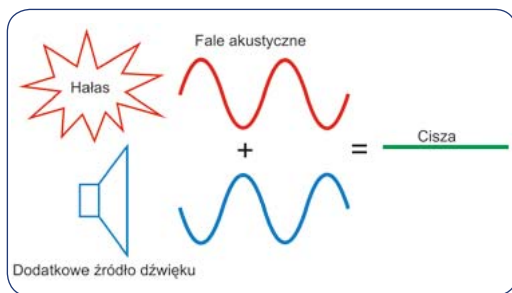
Wstęp

Od sprawnego i szybkiego przemieszczania się z miejsca na miejsce pojazdów uprzywilejowanych często zależy ludzkie życie. Wymaga to współdziałania innych uczestników ruchu drogowego, którzy nadjeżdżającemu pojazdowi uprzywilejowanemu powinni ustąpić pierwszeństwa przejazdu. Aby tego dokonać muszą oni jednak zauważyć i zlokalizować pojazd uprzywilejowany. Kierowca samochodu jest w stanie obserwować jedynie wycinek przestrzeni wokół samochodu, gdyż musi koncentrować się na obszarze znajdującym się w kierunku jazdy. Obserwacja przestrzeni w pozostałych kierunkach jest również utrudniona przez elementy własnego pojazdu oraz pojazdy innych uczestników ruchu

drogowego. Z tego powodu nadjeżdżający pojazd uprzywilejowany kierowcy zwykle najpierw słyszą, a dopiero potem widzą – lokalizując jego sygnał świetlny. Dźwiękowy sygnał uprzywilejowania powinien być zatem jak najlepiej słyszalny i rozpoznawalny dla wszystkich uczestników ruchu drogowego. Na możliwość zidentyfikowania sygnału uprzywilejowania przez uczestników ruchu drogowego wpływa szereg niezależnych czynników o nieznanym parametrach, takich jak: hałas ruchu ulicznego, izolacyjność akustyczna pojazdu, hałas wewnątrz pojazdu (np. pochodzący z układu wentylacji), dźwięki emitowane przez radio lub odtwarzacz samochodowy czy stosowanie ochronników słuchu (np. podczas prac przy drogach). Powoduje

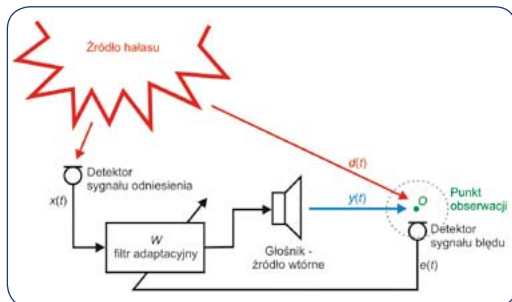
to, że decydującym czynnikiem zapewniającym prawidłową percepcję sygnału uprzywilejowania jest, obok odpowiedniej struktury czasowo-częstotliwościowej, jego wysoki poziom ciśnienia akustycznego.

Polskie przepisy nie precyzują wymagań odnośnie sygnałów uprzywilejowania. Często przyjmuje się, że poziom dźwięku A sygnału uprzywilejowania w odległości 7 m przed pojazdem powinien wynosić 110 dB. Jest to zbliżone z postanowieniami Dyrektywy 2007/46/WE odnoszącej się do dźwiękowych sygnałów ostrzegawczych (klaksonów) pojazdów silnikowych, według których poziom dźwięku A tego sygnału w odległości 7 m od pojazdu powinien zawierać się w zakresie od 93 do 112 dB. W rzeczywistości poziom dźwięku A sygnału



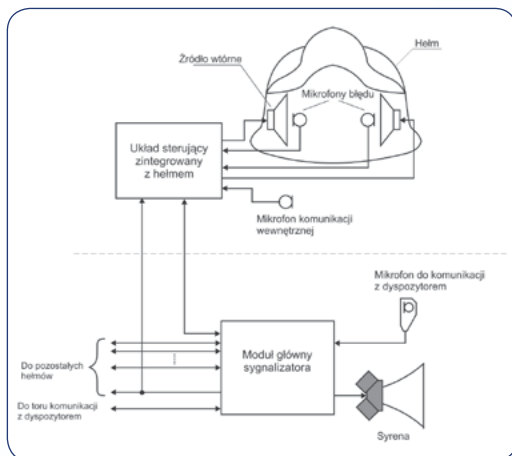
Rys. 1. Zasada aktywnej redukcji hałasu

Fig. 1. The principle of active noise control



Rys. 2. Podstawowa struktura układu aktywnej redukcji hałasu

Fig. 2. The basic structure of an active noise control system



Rys. 3. Schemat układu aktywnej redukcji hałasu do zastosowania w hełmach strażackich, zintegrowanego z układem komunikacji oraz sposób jego połączenia z modułem głównym sygnalizatora

Fig. 3. Diagram of an active noise control system in the fire helmet, integrated with the communication system and its connection with the main module of the warning device

uprzywilejowania w odległości 7 m od pojazdu mieści się najczęściej w zakresie od 95 do 115 dB [1, 2]. Ze względu na charakterystykę kierunkową syreny oraz sposób jej zamocowania, sygnał uprzywilejowania najsilniej emitowany jest w kierunku do przodu, co jest uzasadnione kierunkiem poruszania się pojazdu. W skrajnych przypadkach różnica poziomu dźwięku A z przodu i z tyłu pojazdu może być większa niż 30 dB [1]. Akustyczny sygnał uprzywilejowania dociera nie tylko do uczestników ruchu drogowego lecz także do wnętrza pojazdu uprzywilejowanego stając się tym samym uciążliwym lub wręcz szkodliwym hałasem dla jego załogi. Poziom dźwięku A sygnału uprzywilejowania w kabinie pojazdu może przekraczać 90 dB [1, 2, 3]. Hałas taki w znaczący sposób utrudnia porozumiewanie się członków załogi pojazdu między sobą oraz z dyspozytorem a także może pogarszać sprawność psychofizyczną kierowcy. Co więcej, przy długotrwałym narażeniu staje się czynnikiem szkodliwym, powodującym uszkodzenia słuchu.

Jak podano wcześniej emisja sygnału o wysokim poziomie ciśnienia akustycznego jest jedyną skuteczną metodą zapewnienia jego słyszalności i rozpoznawalności. Obniżanie poziomu emitowanego sygnału w celu poprawy komfortu akustycznego załogi pojazdu uprzywilejowanego byłoby niewłaściwym rozwiązaniem mogącym pogorszyć bezpieczeństwo ruchu drogowego i wpływającym negatywnie na szybkość przemieszczania się pojazdu uprzywilejowanego. Inną z metod ograniczania hałasu we wnętrzu pojazdu uprzywilejowanego jest zwiększanie izolacyjności jego kabiny co może skutkować nadmiernym odizolowaniem kierowcy od sygnałów i dźwięków pochodzących od pozostałych użytkowników ruchu i tym samym zwiększać ryzyko spowodowania wypadku. Spotykamy obecnie rozwiązaniem jest także zmiana położenia syreny emitującej sygnał uprzywilejowania z dachu pojazdu do jego przedziału silnikowego. Należy jednak zauważyć, że wpływa to negatywnie na jego propagację w warunkach ruchu drogowego, a tym samym na możliwość jego percepcji [4]. W takich okolicznościach odpowiednim sposobem obniżenia poziomu hałasu we wnętrzu pojazdu uprzywilejowanego może być zastosowanie metod aktywnych redukcji hałasu [5, 6, 7].

Celem artykułu jest prezentacja możliwości zastosowania metod aktywnych redukcji hałasu (ARH) do wykorzystania w hełmach strażackich.

Metody aktywne redukcji hałasu

Metody aktywne są metodami, w których do redukcji hałasu wykorzystuje się dodatkowe, odpowiednio sterowane źródła dźwięku, np. głośniki. Zasadę aktywnej redukcji hałasu przedstawiono na rys. 1. Wynika z niej, że jeśli dla hałasu, który propaguje się w powietrzu w postaci fali akustycznej, wygenerujemy za pomocą dodatkowego źródła falę akustyczną o takiej samej amplitudzie, ale przeciwnej fazie, to ich nałożenie się doprowadzi do redukcji hałasu (fala akustyczna hałasu zostaje skompensowana falą wygenerowaną).

Oczywiście całkowitą redukcję hałasu za pomocą metod aktywnych uzyskamy, gdy wytworzona dodatkowa fala akustyczna będzie idealnie odpowiadała parametrom fali akustycznej hałasu. W rzeczywistym przypadku różnice w amplitudach i fazach sygnałów akustycznych powodują, że redukcja hałasu nie jest idealna w wyniku nałożenia się fal akustycznych, otrzymuje się pewien sygnał resztkowy nazywany sygnałem błędów i oznaczany symbolem $e(t)$.

Pomimo wydawałoby się prostej zasady aktywnej redukcji hałasu, to jej praktyczna realizacja napotyka wiele trudności technicznych. Na rys. 2. przedstawiono schemat podstawowego układu aktywnej redukcji hałasu. Celem jego działania jest redukcja hałasu w punkcie O zwanym punktem obserwacji. Aby tego dokonać musimy znać amplitudę i fazę sygnału hałasu w tym punkcie (określanego jako sygnał kompensowany $d(t)$), a następnie za pomocą głośnika umieszczonego w innym punkcie przestrzeni wygenerować akustyczny sygnał kompensujący, $y(t)$, który po dotarciu do punktu obserwacji będzie miał taką samą amplitudę jak fala hałasu, ale przeciwną fazę. Należy przy tym uwzględnić zmiany amplitudy i fazy sygnału na drodze jego propagacji w powietrzu (w danej chwili czasu amplituda i faza sygnału np. w pobliżu głośnika będą inne niż np. w punkcie obserwacji i zależą od odległości pomiędzy tymi punktami).

W układach aktywnej redukcji hałasu informację o sygnale hałasu uzyskuje się za pomocą mikrofonu nazywanego detektorem sygnału odniesienia. Sygnał odniesienia, $x(t)$ z tego detektora jest przetwarzany poprzez filtrację za pomocą filtra sterującego W w taki sposób, aby uzyskać odpowiedni sygnał kompensujący. Parametry filtra W mogą być wyznaczone na drodze obliczeń, jeżeli znane są odległości pomiędzy poszczególnymi elementami układu ARH i punktu obserwacji, oraz właściwości pozostałych elementów układu ARH np. głośnika. Częściej stosowanym rozwiązaniem jest jednak zastosowanie tzw. filtra adaptacyjnego, który przy wykorzystaniu odpowiednich algorytmów adaptacji (takich jak np. algorytm najmniejszych średnich kwadratów – LMS) potrafi samodzielnie dobrać sobie parametry optymalne (czyli pozwalające na redukcję hałasu w punkcie obserwacji) wykorzystując sygnał błędów pobierany za pomocą mikrofonu błędów umieszczonego w punkcie obserwacji.

Koncepcja systemu aktywnej redukcji hałasu do zastosowania w hełmach strażackich zintegrowanego z układem komunikacji oraz generacji sygnału uprzywilejowania

Ze względu na brak precyzyjnych i jednoznacznych przepisów dotyczących akustycznych sygnałów uprzywilejowania producent sygnalizatora uprzywilejowania może ustalić własne parametry czasowe – częstotliwościowe tego sygnału. Po wszechnie jednak stosowane są trzy charakterystyczne rodzaje sygnału uprzywilejowania:

- Le-On (nazwa angielska: Hi-Lo) – sygnał tonalny o skokowo zmieniającej się częstotliwości pomiędzy dwiema wartościami np. 950 i 1150 Hz (czyli naprzemiennie ton wysoki i niski). Zmiana częstotliwości sygnału następuje w odstępach czasu wynoszących ok. 0,5 s

- Wilk (nazwa angielska: Wail) – sygnał tonalny o płynnie zmieniającej się częstotliwości w zakresie od ok. 500 do 2000 Hz. Czas narastania i opadania częstotliwości sygnału jest taki sam, a pełny okres zmian jest stosunkowo długi i wynosi ok. 8 s

- Pies (nazwa angielska: Yelp) – pod względem częstotliwościowym jest to sygnał zbliżony do sygnału „Wilk”, różna jest natomiast czasowa struktura jego zmian. Jest to sygnał o płynnie zmieniającej się częstotliwości z zakresu np. od 600 do 1800 Hz, przy czym w przeciwieństwie do sygnału „Wilk” czasy narastania i opadania częstotliwości są różne, a pełny okres zmian znacznie krótszy: wynosi ok. 0,25 s.

Tonalny (sinusoidalny) charakter emitowanego sygnału uprzywilejowania z pewnością jest czynnikiem predestynującym do zastosowania metod aktywnych redukcji hałasu. Dotychczasowe prace badawcze w tym zakresie koncentrowały się na układach umieszczanych w zagłówku fotela kierowcy lub przy noszaku pacjenta przewożonego karetką pogotowia ratunkowego [8, 9]. Zważywszy, że częstotliwość sygnału uprzywilejowania dochodzi do 2000 Hz uzyskanie odpowiednio dużej strefy ciszy, obejmującej obszar, w którym może poruszać się głowa kierowcy lub pacjenta jest problematyczne. W pracach badawczych, prowadzonych w CIOP-PIB [10] koncentrujących się na kierowcy pojazdu uprzywilejowanego zaproponowano zastosowanie nagłównych słuchawek

jako źródła wtórnego układu aktywnej redukcji hałasu. Dzięki temu uzyskano dużą skuteczność aktywnej redukcji hałasu, a jednocześnie zachowano możliwość odbierania przez kierowcę innych, użytecznych, płynących z otoczenia dźwięków. Takie rozwiązanie techniczne nie jest jednak właściwe dla strażaków, gdyż słuchawki będą kolidowały z podstawowym wyposażeniem strażaka jakim jest jego hełm. Możliwe jest jednak zintegrowanie układów aktywnej redukcji hałasu z hełmem strażackim. Co więcej, zważywszy, że generator sygnału uprzywilejowania stanowi również element wyposażenia pojazdu, możliwe jest zintegrowanie układów aktywnej redukcji hałasu w hełmach strażackich z układem komunikacji i układem generacji sygnału uprzywilejowania. W rozwiązaniu tym zastosowanie w układzie komunikacji układów odszumiania sygnału mowy powinna pozwolić na poprawę jakości komunikacji słownej pomiędzy członkami załogi oraz dyspozytorem. Schemat takiego rozwiązania przedstawiono na rys. 3. Zgodnie z przyjętą koncepcją rozwiązania hełmy strażackie połączone są z modułem głównym sygnalizatora, zawierającym generator sygnałów uprzywilejowania, układ odszumiania sygnału mowy w łączności z dyspozytorem oraz mikser sygnałów komunikacji odpowiedzialny za pobieranie i rozprowadzanie sygnałów komunikacji z i do członków załogi użytkujących hełmy.

W zaproponowanym rozwiązaniu hełm strażacki będzie zawierał dwa adaptacyjne układy aktywnej redukcji hałasu (w odniesieniu do każdego z uszu strażaka). Będą to układy sterowania ze sprzężeniem w przód, wykorzystujące sygnał odniesienia dostarczany bezpośrednio do układu generacji sygnału uprzywilejowania. Schemat tego rozwiązania przedstawiono na rys. 4. W hełmie strażackim umieszczone zostaną na wysokości uszu strażaka dwa źródła wtórne (miniaturowe głośniki) układów aktywnej redukcji hałasu oraz dwa mikrofony sygnału błędu. Ze względu na integrację z układem komunikacji hełm będzie wyposażony w mikrofon komunikacji wewnętrznej, a źródła wtórne będą jednocześnie pełnić rolę źródeł sygnału komunikacji, przychodzącego z modułu głównego sygnalizatora. Zintegrowany z hełmem układ sterujący będzie realizował dwa adaptacyjne filtry sterujące dla układów aktywnej redukcji hałasu oraz adaptacyjny filtr do odszumiania sygnału mowy rejestrowanej przez mikrofon komunikacji wewnętrznej hełmu.

Uwzględniając sinusoidalny charakter sygnału uprzywilejowania oraz możliwość pobierania sygnału odniesienia bezpośrednio z generatora tego sygnału do sterowania procesem aktywnej redukcji hałasu oraz do odszumiania sygnału mowy zaproponowano zastosowanie wąskopasmowych filtrów adaptacyjnych typu *notch* [11, 12, 13]. W celu poprawy szybkości adaptacji filtra sterującego (czyli zmian jego współczynników w celu osiągnięcia wartości optymalnych, zapewniających najlepszą redukcję hałasu) do jego adaptacji zostanie zastosowany algorytm z normalizacją o zmiennym kroku adaptacji – NLMS (znormalizowany algorytm LMS) [6, 11, 14]. Po uwzględnieniu w układach aktywnej redukcji hałasu tzw. ścieżki wtórnej $S(z)$, czyli transmitancji obejmujących fragment układu elektroakustycznego oraz toru akustycznego pomiędzy źródłem wtórnym a mikrofonem błędu uzyskano ostatecznie typowy algorytm Fx-NLMS dla

regulatora w postaci filtra *notch*, którego schemat przedstawiono na rys. 5.

Jak wynika ze schematu – $P(z)$ oznacza ścieżkę pierwotną (czyli ścieżkę sygnału uprzywilejowania, $x_0(n)$, od generatora do ucha strażaka), $S(z)$ – wspomnianą wcześniej ścieżkę wtórną, $\hat{S}(z)$ – model ścieżki wtórnej, $W(z)$ – filtr sterujący *notch* posiadający dwa współczynniki $w_0(n)$ i $w_1(n)$, $d(n)$ – sygnał kompensowany (czyli sygnał uprzywilejowania bezpośrednio przy uchu strażaka), $y(n)$ – sygnał kompensujący (czyli inaczej sygnał redukujący sygnał uprzywilejowania), NLMS – znormalizowany algorytm LMS, a $e(n)$ – sygnał błędu (czyli sygnał resztkowy powstały po zredukowaniu sygnału uprzywilejowania w pobliżu ucha strażaka). Filtr *notch* wymaga zastosowania dwóch sygnałów odniesienia przesuniętych względem siebie w fazie o 90°. Jednym z sygnałów odniesienia jest generowany sygnał uprzywilejowania $x_0(n)$. Sygnał przesunięty w fazie o 90°, $x_1(n)$, może być uzyskany różnymi metodami, co obrazują przerywane linie na schemacie. Jedną z nich jest przesuwanie w fazie sygnału uprzywilejowania $x_0(n)$ za pomocą odpowiedniego układu przesuwnika fazy, reprezentowanego na schemacie jako blok z oznaczeniem „90°”. W zaproponowanym rozwiązaniu technicznym, którego jednym z elementów jest generator sygnału uprzywilejowania, lepszą metodą będzie jednak bezpośrednie generowanie sygnału przesuniętego w fazie, $x_1(n)$, równoległe z sygnałem uprzywilejowania $x_0(n)$. Kolejne próbki sygnałów $x_0(n)$ i $x_1(n)$ wyznaczone są zatem jako wartości funkcji sinus i cosinus dla odpowiednio zmiennego argumentu.

Zgodnie z algorytmem Fx-NLMS wagi filtra sterującego adaptowane są zgodnie z zależnościami:

$$\begin{aligned} w_0(n+1) &= w_0(n) - \mu(n)x'_0(n)e(n) \\ w_1(n+1) &= w_1(n) - \mu(n)x'_1(n)e(n) \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie $x'_0(n) = \hat{s}^T x_0(n)$ i $x'_1(n) = \hat{s}^T x_1(n)$ są przetworzonymi sygnałami odniesienia, natomiast $\mu(n)$ jest zmiennym krokiem adaptacji, który w algorytmie z normalizacją wyznaczany jest według zależności:

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{L\hat{P}_x(n)} \quad (2)$$

gdzie:

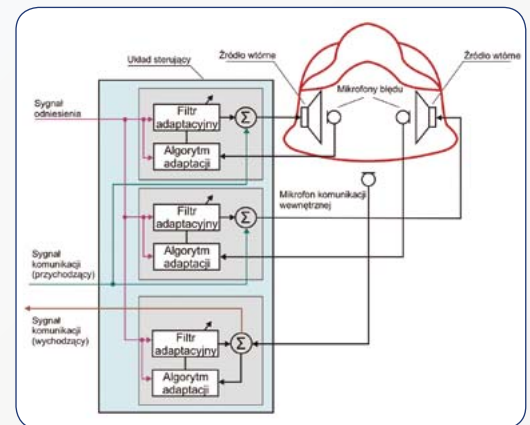
L – liczba współczynników filtra
 $\hat{P}_x(n)$ – estymata mocy sygnału $x(n)$ w chwili n ,
 α – tzw. znormalizowany krok adaptacji, spełniający warunek:

$$0 < \alpha < 2 \quad (3)$$

Wyznaczenie zmiennego kroku korekcji zgodnie z (2) wymaga oszacowania mocy sygnału odniesienia $x(n)$. Jedną z powszechnie znanych metod szacowania tej mocy jest metoda przesuwanej okna prostokątnego o szerokości M próbek. W metodzie tej szacowanie mocy sygnału wykonywane na podstawie następującej zależności:

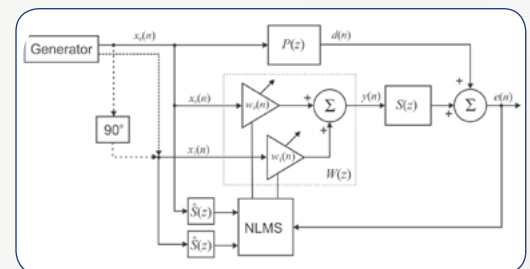
$$\begin{aligned} \hat{P}_x(n) &= \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} x^2(n-m) = \\ &= \hat{P}_x(n-1) + \frac{x^2(n) - x^2(n-M)}{M} \end{aligned} \quad (4)$$

Zaletą tej metody jest dokładność szacowania, natomiast wadą – duże wymagania dotyczące pamięci. Jednak w praktyce rozwiązaniem tego pro-



Rys. 4. Schemat struktury wewnętrznej układu sterującego zintegrowanego z hełmem strażackim

Fig. 4. Diagram of the internal structure of a controller integrated with a fire helmet



Rys. 5. Algorytm sterowania dla układów ARH w hełmie strażackim

Fig. 5. Control algorithm for active noise control systems in a fire helmet

blemu jest przyjęcie w algorytmie szerokości okna równej liczbie współczynników filtra adaptacyjnego, wtedy równanie (2) upraszcza się do postaci:

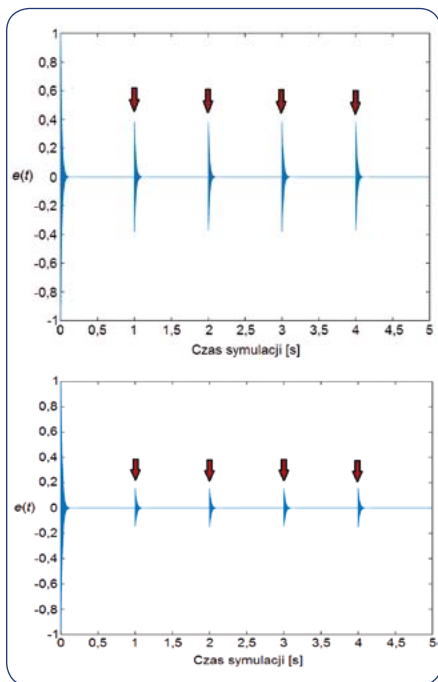
$$\mu(n) = \frac{\alpha}{x^T(n)x(n)} \quad (5)$$

Badania symulacyjne układu aktywnej redukcji hałasu oraz układu odszumiania mowy

Badania symulacyjne układów aktywnej redukcji hałasu oraz układów odszumiania sygnału mowy miały za zadanie sprawdzenie przyjętych rozwiązań oraz ich implementacji w układzie cyfrowym jak również ocenę ich potencjalnej skuteczności. Przeprowadzone badania symulacyjne były dwójakiego rodzaju. Pierwsze z nich były badaniami czysto numerycznymi przeprowadzonymi w środowisku obliczeniowym Matlab. W badaniach drugiego rodzaju wykorzystano platformę sprzętową mikrokontrolera STM32F4 (jako docelowego mikrokontrolera do realizacji modelu zaproponowanego rozwiązania technicznego), która przetwarzała rzeczywiste sygnały elektryczne. Ten drugi rodzaj badań pozwolił w szczególności na weryfikację kodów oprogramowania przeznaczonych do wykorzystania w układzie modelowym. Badania przeprowadzono dla różnych rodzajów sygnału uprzywilejowania. W symulacjach układu aktywnej redukcji hałasu modelem ścieżki pierwotnej był filtr dolnoprzepustowy mający dwadzieścia współczynników a modelem ścieżki wtórnej filtr pasmowoprzepustowy o 15 współczynnikach.

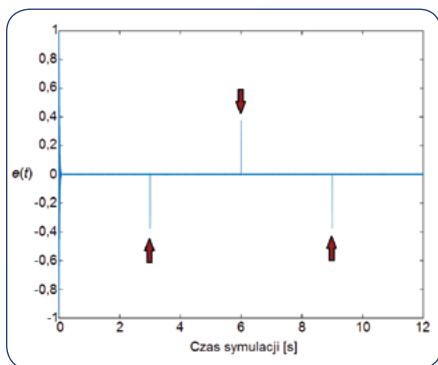
Badania symulacyjne w środowisku Matlab

Wyniki badań symulacyjnych w środowisku Matlab prezentowane są w formie wykresów przebiegów czasowych sygnałów (obrazujących kolejne wartości sygnału w dziedzinie czasu)



Rys. 6. Sygnał błędu dla sygnału Le-On o częstotliwościach składowych 500 i 1000 Hz (po lewej) oraz 950 i 1150 Hz (po prawej)

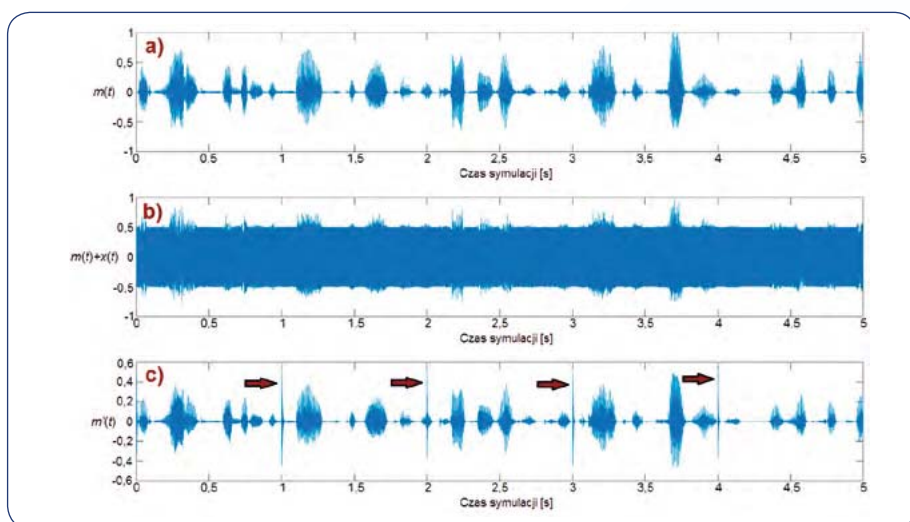
Fig. 6. Error signal for Hi-Lo signal with frequencies of 500 and 1000 Hz (left) and 950 and 1150 Hz (right)



Rys. 7. Sygnał błędu dla sygnału Wilk o częstotliwościach z zakresu 500 – 1500 Hz

Fig. 7. Error signal for the Wilk signal with frequencies in the range 500 – 1500 Hz

w symulowanym układzie, w szczególności sygnału błędu $e(t)$. Wartości sygnałów w symulacjach unormowano w taki sposób, żeby wartości sygnału uprzywilejowania zawierały się w przedziale $<-1,1>$. Wyniki badań symulacyjnych w układzie ARH dla sygnału Le-On przedstawiono na rys. 6. Badania te dotyczyły dwóch sygnałów Le-On różniących się częstotliwościami przełączanych tonów. W pierwszym przypadku były to częstotliwości 500 i 1000 Hz, w drugim 950 i 1150 Hz. Okres trwania każdego z tonów składowych wynosił 1 s. Na przebiegach czasowych sygnału błędu można zauważyć jego skokowe zmiany w chwilach zmiany częstotliwości generowanego sygnału. Związane jest to z koniecznością dostosowania się (adaptacji) układu sterującego do zmienionych parametrów sygnału uprzywilejowania. Wartość sygnału błędu od momentu przełączenia częstotliwości sygnału uprzywilejowania szybko maleje w wyniku adaptacji wag filtra (sygnał zostaje zredukowany niemal do zera), jednak pojawiające się w sygnale błędu zmiany o charakterze hałasu impulsowego (zaznaczone na rysunkach strzałkami), pomimo niewielkiej amplitudy i krótkiego czasu trwania, mogą być od-



Rys. 8. Wyniki badań symulacyjnych odszumiania sygnału mowy dla sygnału Le-On (500 i 1000 Hz); a) oryginalny sygnał mowy, b) zaszumiony sygnał mowy, c) odszumiony sygnał mowy

Fig. 8. Simulation results of a denoising speech signal for Hi-Lo signal (500 and 1000 Hz); a) original speech signal, b) noisy speech signal, c) denoised speech signal

birane przez człowieka jako nieprzyjemne trzaski. Amplituda powstających zmian jest tym mniejsza im mniejsza jest różnica częstotliwości pomiędzy składowymi sygnałami.

Na rys. 7. przedstawiono wyniki badań symulacyjnych (sygnał błędu) układu ARH w przypadku sygnału Wilk. Częstotliwość sygnału Wilk zmieniała się w zakresie od 500 do 1500 Hz, a przebieg zmian częstotliwości miał charakter piłokształtny tzn. częstotliwość w sposób liniowy narastała a następnie opadała. Układ bardzo skutecznie redukuje sygnał uprzywilejowania jednak podczas zmiany kierunku zmian częstotliwości (z rosnącą na malejącą i na odwrót) w sygnale błędu pojawiają się impulsy akustyczne podobnie jak w przypadku sygnału Le-On (zaznaczone na rysunkach strzałkami).

Na rys. 8. przedstawiono wyniki badań symulacyjnych odszumiania sygnału mowy z sygnału Le-On, złożonego z dwóch generowanych na zmianę tonów o częstotliwościach 500 i 1000 Hz. W badaniach symulacyjnych wykorzystano sygnał mowy, $m(t)$, zarejestrowany w postaci pliku cyfrowego, na który nakładano sygnał uprzywilejowania $x(t)$. Jak wynika z przedstawionych wykresów (odszumiony sygnał mowy $m'(t)$ na rys. 6.), sygnał uprzywilejowania został prawie całkowicie odfiltrowany z sygnału mowy. Wyjątek stanowią odcinki czasu, w których następuje zmiana częstotliwości sygnału uprzywilejowania. W miejscach tych, w odszumionym sygnale mowy pojawiają się impulsy sygnału (zaznaczone na rysunku strzałkami), które będą przez osobę słuchającą komunikatu odbierane jako nieprzyjemne trzaski. Jest to zjawisko analogiczne do omówionego w przedstawionych uprzednio wynikach badań układu aktywnej redukcji hałasu dla sygnału Le-On.

Badania symulacyjne z wykorzystaniem platformy sprzętowej mikrokontrolera STM32F4

W badaniach symulacyjnych realizowanych na platformie sprzętowej mikrokontrolera STM32F4 działanie układu ARH sprowadzono do operacji arytmetycznych, realizowanych przez mikrokontroler na próbkach sygnałów z wykorzystaniem opracowanego oprogramowania. Schemat układu, w którym prowadzono badania, przedstawiono na rys. 9. W układzie zaimplementowano algorytmy realizujące generator sygnału uprzywilejowania, adaptacyjny filtr notch, oraz filtry odwzorowujące ścieżki pierwotną

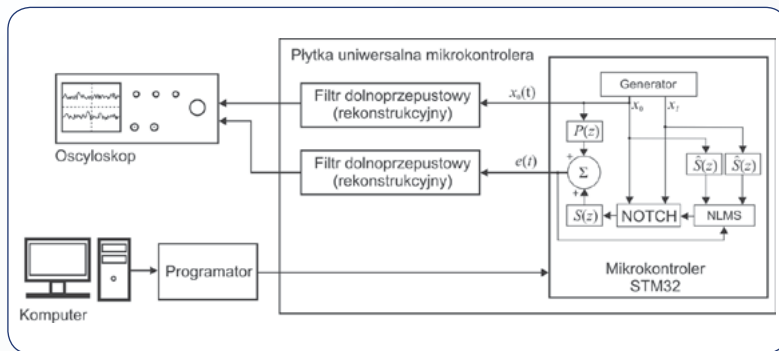
i wtórną. Pomiędzy tymi blokadami oprogramowania przekazywane były próbki przetwarzanych sygnałów. Na zewnątrz mikrokontrolera przy zastosowaniu przetworników cyfrowo-analogowych wyprowadzono sygnały odniesienia (będący jednocześnie sygnałem uprzywilejowania) oraz błędu. Sygnały te po przefiltrowaniu za pomocą dolnoprzepustowych filtrów rekonstrukcyjnych były obserwowane na ekranie oscyloskopu. Na rys. 10. przedstawiono wyniki badań dla sygnału Le-On i Wilk. W obu przypadkach sygnał hałasu został zredukowany o ok. 15 dB. Na przedstawionych oscylogramach w sygnale błędu nie są widoczne zmiany o charakterze impulsowym uwidocznione w badaniach symulacyjnych. Zmiany te są w znacznym stopniu ograniczone w wyniku filtracji sygnału błędu dolnoprzepustowym filtrem rekonstrukcyjnym zastosowanym w układzie symulacyjnym na platformie sprzętowej. W układzie rzeczywistym sygnał błędu nie jest filtrowany (filtrowany jest sygnał kompensujący), więc w układzie rzeczywistym można również spodziewać się słyszalnych trzasków w wytłumionym lub odfiltrowanym sygnale.

Badania właściwości układu odszumiania sygnału mowy przeprowadzono w układzie pomiarowym, którego schemat przedstawiono na rys. 11. Odtwarzany komputerowo sygnał mowy, podawany był na jedno z wejść mikrokontrolera. Sygnał ten był sumowany z sygnałem uprzywilejowania, tworząc sygnał pierwotny. Sygnał pierwotny sumowany był z sygnałem wyjściowym z filtra notch. Uzyskany w wyniku tej operacji sygnał błędu, będący odszumionym sygnałem mowy, podawano przez dolnoprzepustowy filtr rekonstrukcyjny na jedno z wejść oscyloskopu. Na drugie wejście oscyloskopu podawano zrekonstruowany sygnał odniesienia.

Badania odszumiania sygnału mowy przeprowadzono dla dwóch rodzajów sygnału uprzywilejowania: Le-On (500 Hz i 1000 Hz) oraz Wilk (500 – 1500 Hz). Ich wyniki przedstawiono na rys. 12. i 13. Z przedstawionych oscylogramów wynika, że układ odszumiania sygnału mowy działa w sposób prawidłowy, eliminując sygnał uprzywilejowania z zaszumionego sygnału mowy.

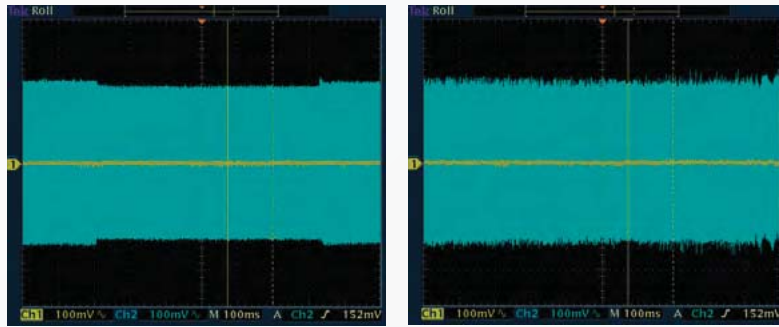
Podsumowanie

W artykule przedstawiono koncepcję układu aktywnej redukcji hałasu w helmie strażackim zintegrowanego z układem komunikacji oraz układem generacji sygnału uprzywilejowania. Przeprowadzono



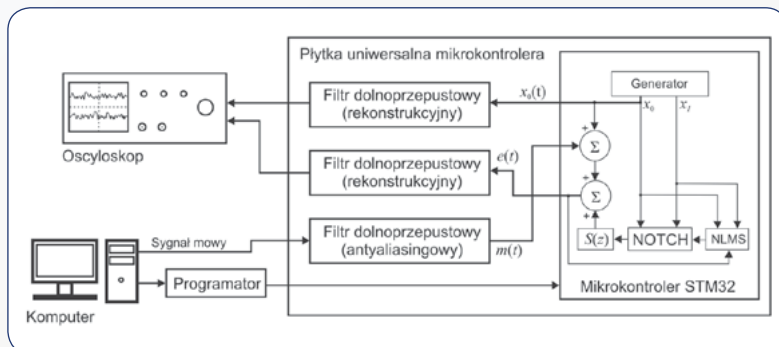
Rys. 9. Schemat układu do badań symulacyjnych z wykorzystaniem platformy sprzętowej mikrokontrolera STM32F4

Fig. 9. Diagram of a system for simulations using a hardware platform of an STM32F4 microcontroller



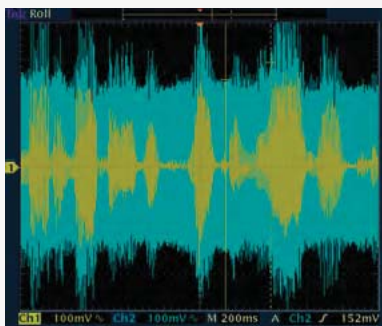
Rys. 10. Oscylogramy sygnału pierwotnego (niebieski) i błędny (żółty) dla sygnałów Le-On o częstotliwościach składowych 500 i 1000 Hz (po lewej) oraz sygnału Wilk o częstotliwościach z zakresu 500 – 1500 Hz (po prawej)

Fig. 10. Waveforms of the primary signal (blue) and error signal (yellow) for warning Hi-Lo signals with frequencies of 500 and 1000 Hz (left) and Wail signal with frequencies in the range of 500 – 1500 Hz (right)



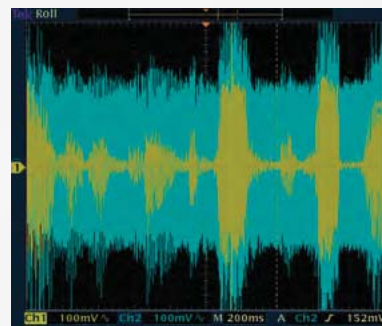
Rys. 11. Schemat układu pomiarowego do weryfikacji poprawności implementacji algorytmu odszumiania sygnału mowy

Fig. 11. Diagram of a measurement system used to verify the correctness of the implementation of the speech denoising algorithm



Rys. 12. Oscylogram sygnału pierwotnego (niebieski) i odszumionego sygnału mowy (żółty) układu do weryfikacji działania algorytmu odszumiania mowy dla sygnału Le-On (500 i 1000 Hz)

Fig. 12. Waveforms of the primary signal (blue) and the denoised speech signal (yellow) in a system used to verify the correctness of the implementation of the speech denoising algorithm for Hi-Lo signal (500 and 1000 Hz)



Rys. 13. Oscylogram sygnału pierwotnego (niebieski) i odszumionego sygnału mowy (żółty) układu do weryfikacji działania algorytmu odszumiania mowy dla sygnału Wilk (500 – 1500 Hz)

Fig. 13. Waveforms of the primary signal (blue) and the denoised speech signal (yellow) in a system used to verify the correctness of the implementation of the speech denoising algorithm for the Wail signal (500 – 1500 Hz)

dwa rodzaje badań symulacyjnych układu aktywnej redukcji hałasu i układu odszumiania mowy dla różnych rodzajów sygnału uprzywilejowania. W oparciu o przeprowadzone badania, jedno numeryczne, przeprowadzone w środowisku Matlab, oraz drugie symulacyjne, przy wykorzystaniu platformy sprzętowej w postaci mikrokontrolera STM32F4 wykazano, że układ oraz algorytm zaimplementowany do odszumiania sygnału mowy działa w sposób prawidłowy. Wyniki potwierdzają możliwość opracowania takiego rozwiązania, które pozwoli na ograniczenie narażenia załogi pojazdu strażackiego na hałas sygnalizatora uprzywilejowania, poprawi jej komfort akustyczny jak również poprawi jakość komunikacji słownej pomiędzy członkami załogi oraz dyspozytorem. W badaniach symulacyjnych hałas docierający do uszu strażaka został zredukowany praktycznie do poziomu szumów tła natomiast przefiltrowany sygnał mowy jest zbliżony do oryginalnego. Pewnym problemem są jednak pojawiające się w sygnałach błędny i przefiltrowanym zmiany o charakterze impulsowym w chwilach czasowych, w których następują zmiany parametrów sygnału uprzywilejowania. Zmiany te nie mają znaczącego wpływu na osiągnięte efekty w postaci redukcji hałasu czy poprawy zrozumiałości odszumionego komunikatu słownego, jednak mogą być odbierane jako nieprzyjemne trzaski. Wyeliminowanie tego efektu jest możliwe poprzez modyfikację sygnału uprzywilejowania w sposób, który zapewni płynne dostosowywanie się parametrów filtra sterującego do zmian parametrów sygnału. W przypadku sygnału Hi-Lo może to być stopniowe, szybkie wyciszenie i pogłośnienie sygnału uprzywilejowania tuż przed i tuż po zmianie jego częstotliwości tak, aby zmiana częstotliwości sygnału następowała przy jego wartościach bliskich zeru. W przypadku sygnału Wilk może to być zmiana sposobu modulacji częstotliwościowej tego sygnału z piłokształtnej na sinusoidalną.

Kolejnym krokiem na drodze rozwoju zaproponowanej koncepcji będzie budowa modelu urządzenia i jego badania w warunkach laboratoryjnych.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Morzyński L. *Badania hałasu powodowanego przez sygnalizatory dźwiękowe pojazdów przywilejowanych*. Materiały XLIII Zimowej Szkoły Zwalczenia Zagrożeń Wibroakustycznych, Gliwice-Szczyrk, 02.03-06.03.2015:23-28
- [2] Górski P. *Occupational exposure to noise from authorized emergency vehicle sirens* "International Journal of Occupational Safety and Ergonomics" 20.3 (2014), pp. 515-523
- [3] Górski P. *Problem zawodowego narażenia kierowców na hałas pochodzący od dźwiękowych sygnałów uprzywilejowania*, Przegląd Komunikacyjny, 4/2014, str. 6-13
- [4] Górski P., Zawieska W. M. *The influence of location of the privileged vehicle siren on the vehicle traffic safety*. Inter-Noise, 2014
- [5] Engel Z., Makarewicz G., Morzyński L., Zawieska W. M. *Metody aktywnej redukcji hałasu*. CIOP, Warszawa 2001
- [6] Hansen C. H., Snyder S., Qiu X., Brooks L., Moreau D. *Active control of noise and vibration*, CRC Press, 2013
- [7] Pawełczyk M. *Active noise control-a review of control-related problems*. "Archives of Acoustics" 33.4 (2008): 509-520
- [8] Usagawa Tsuyoshi *An active Control System of Ambulance Siren by means of Loudspeakers Mounted in Headrest*, Inter-Noise 2003, Seogwipo, Korea, 2003, 1020-1024
- [9] Sepehr H., Ahmadi M. & Brennan P. (2008, May). *Siren noise attenuation by non-linear processing of time-frequency information*. 7th WSEAS International Conference on Signal Processing, Istanbul, Turkey
- [10] Morzyński L., Górski P. *Sygnalizator ostrzegawczy w pojazdach uprzywilejowanych zintegrowany z systemem aktywnej redukcji hałasu* „Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka” 2008, 442-443, 7-8:24-27
- [11] Kuo S. M., Morgan D. R. *Active Noise Control Systems. Algorithms and DSP Implementations*. Jaon Wiley & Sons, New York 1996
- [12] Górski P. *Model of active hearing protector controlled by notch filters*. "International Congress on Sound and Vibration" (ICSV20), lipiec 2013
- [13] Górski P., Morzyński L. *Active noise reduction algorithm based on NOTCH filter and genetic algorithm*. "Archives of Acoustic", vol. 38, no. 2, 2013, pp. 185-190
- [14] Makarewicz G. *Wybrane cyfrowe systemy aktywnej redukcji hałasu, monografia*. Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa 2002

Publikacja opracowana w ramach realizacji zadania badawczego z działalności statutowej, finansowanej w latach 2014-2017 ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.