

dr inż. LESZEK MORZYŃSKI
 Centralny Instytut Ochrony Pracy
 – Państwowy Instytut Badawczy
 Kontakt: lmozyns@ciop.pl
 DOI: 10.5604/01.3001.0010.5791

System aktywnej redukcji hałasu przenikającego przez przegrody szklane, wykorzystujący algorytm rotacyjny

Fot. Kai Beercrafter/Bigstockphoto



Jedną z funkcji przegród szklanych, powszechnie stosowanych m.in. w budownictwie, jest ograniczanie hałasu. Przegrody takie charakteryzują się jednak małą izolacyjnością akustyczną dla dźwięków o niskich częstotliwościach. W artykule przedstawiono koncepcję wielokanałowego systemu aktywnej redukcji hałasu, umożliwiającego redukcję hałasu niskoczęstotliwościowego przenikającego przez przegrodę szklaną. System bazuje na sieci neuronowej, której uczenie realizuje zmodyfikowana wersja algorytmu wstecznej propagacji błędów wykorzystująca algorytm rotacyjny. Omówiono budowę i zasadę działania systemu, a także przedstawiono wyniki jego badań symulacyjnych.

Słowa kluczowe: hałas, izolacja akustyczna, przegroda szklana, aktywna redukcja hałasu, algorytm rotacyjny

The system of active control of noise filtering through glass partitions using round robin algorithm

One of the functions of glass partitions, commonly used in construction, is the reduction of noise. These partitions are characterized by low sound insulation for low frequencies. This article presents the concept of a multi-channel active noise control system that enables the reduction of low-frequency noise transmitted through the glass partition. The system is based on a neural network with the modified version of the backpropagation algorithm using a round robin algorithm. The structure and principles of the system are discussed and the results of its simulations are presented.

Keywords: noise, sound insulation, glass partition, active noise control, round robin algorithm

Wstęp

Przegrody szklane – w postaci np. szyb, okien, drzwi, witryn czy ścian – są powszechnie stosowane m.in. w budownictwie czy w pojazdach mechanicznych. Przegrody te pełnią dwie zasadnicze funkcje: umożliwiają odpowiednie oświetlenie miejsc przebywania ludzi (w tym stanowisk pracy) światłem słonecznym oraz pozwalają na obserwację odpowiednich miejsc czy też zjawisk lub procesów pracy. Poza tym bardzo często pełnią również funkcję dźwiękoizolacji. Przeszkłone powierzchnie (np. okna, drzwi) wewnątrz mieszkalnych czy pomieszczeń pracy koncepcyjnej powinny ograniczać przenikanie do nich hałasu zewnętrznego.

Okna kabin sterowniczych lub obudów dźwiękoizolacyjnych umożliwiające obserwację procesów przemysłowych powinny charakteryzować się dobrymi właściwościami dźwiękoizolacyjnymi. Potrzeba zapewnienia obserwacji procesu pracy lub też względy estetyczne są często przyczyną stosowania ścian w formie przegród szklanych, które również muszą charakteryzować się odpowiednią izolacyjnością akustyczną.

Powszechnie stosowane przegrody szklane charakteryzują się zwykle małą izolacyjnością w zakresie niskich częstotliwości akustycznych, która jednak wzrasta razem z częstotliwością dźwięku. Jednym z najbardziej istotnych elementów przegród szklanych, mających wpływ na ich izolacyjność akustyczną, jest (obok ich konstrukcji) rodzaj zastosowanych szyb [1,2]. Ich grubość i wymiary geometryczne decydują o częstotliwościach zjawisk rezonansowych oraz o występowaniu zjawiska koincydencji. W przypadku częstotliwości, dla których występują zjawiska rezonansu oraz koincydencji, obserwuje się nagły spadek izolacyjności akustycznej przegrody. Uzyskanie większej izolacyjności akustycznej, a tym samym ogra-

niczenie transmisji dźwięku przez przegrodę (co spowoduje redukcję hałasu po zewnętrznej stronie przegrody) może być osiągnięte dzięki zastosowaniu wielowarstwowej konstrukcji oraz większej grubości szyb składowych, często klejonych specjalnymi foliami lub żywicą. Wiąże się to jednak ze zwiększeniem masy przegród, co możliwe jest jedynie w ograniczonym zakresie.

Stosowanie lżejszych przegród powoduje, że ich izolacyjność akustyczna, szczególnie w zakresie niskich częstotliwości, jest stosunkowo mała, co prowadzi do narażenia pracowników na uciążliwy bądź szkodliwy hałas. Zwiększenie izolacyjności akustycznej przegród szklanych w zakresie niskich częstotliwości akustycznych może być osiągnięte poprzez zastosowanie aktywnych metod redukcji hałasu.

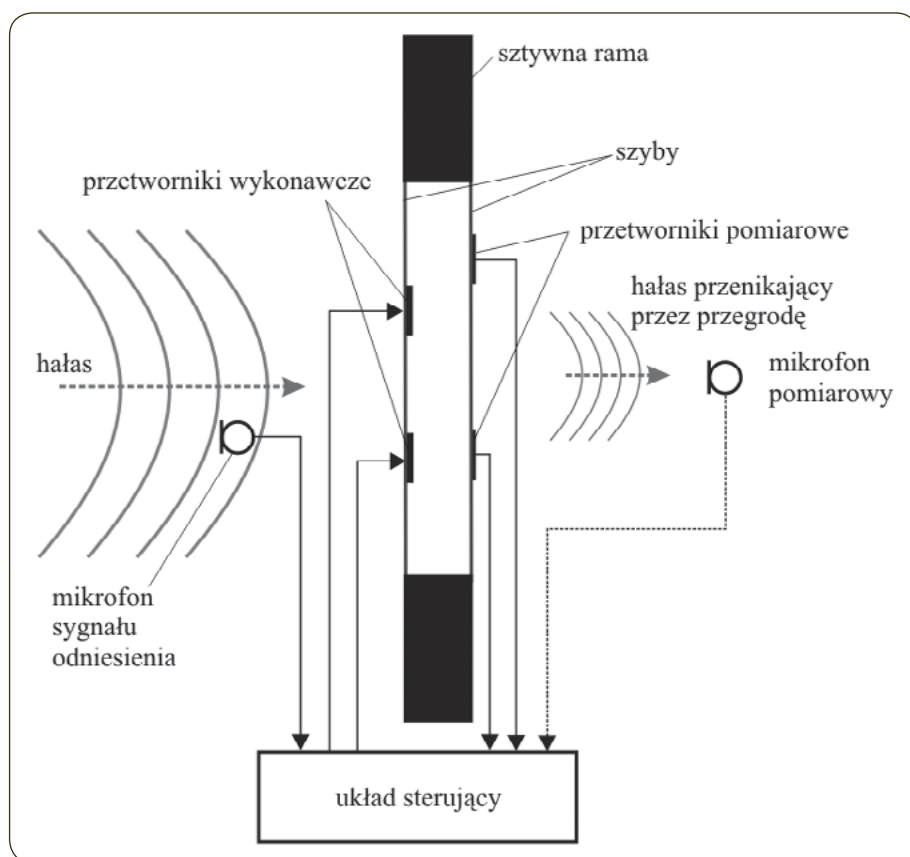
W metodach aktywnych redukcję hałasu uzyskuje się za pomocą dodatkowych, odpowiednio sterowanych, kompensujących źródeł energii wibroakustycznej. W przypadku przegród szklanych, będących strukturami dźwiękoizolacyjnymi złożonymi z jednej lub więcej szyb, redukcję hałasu przenikającego przez przegrodę można uzyskać poprzez odpowiednie sterowanie drganiami poprzecznymi jej elementów. Uzyskanie zadowalających efektów redukcji hałasu wiąże się w tego rodzaju układach z zastosowaniem adaptacyjnych, wielokanałowych układów sterowania, zawierających wiele przetworników elektromechanicznych, będących źródłem dodatkowych, kompensujących wymuszeń struktury.

W artykule zaprezentowano przykładową konstrukcję i wyniki badań symulacyjnych przegrody szklanej z wielokanałowym układem aktywnej redukcji hałasu.

Przegroda szklana z wielokanałowym systemem aktywnej redukcji hałasu

Schemat przykładowej przegrody szklanej z wielokanałowym systemem aktywnej redukcji hałasu przedstawiono na rys. 1. Przegroda ta składa się z dwóch szyb zamocowanych na wszystkich krawędziach w sztywnej ramie, między którymi znajduje się komora wypełniona powietrzem. Przegroda szklana separuje obszar chroniony od obszaru, w którym panuje hałas.

Rozważana przegroda szklana z wielokanałowym systemem aktywnej redukcji hałasu jest jednym z możliwych rozwiązań akustyczno-strukturalnych układu aktywnej redukcji hałasu, w którym materiałem konstrukcyjnym paneli jest szkło [3-6]. W układzie takim obniżenie poziomu ciśnienia akustycznego dźwięku transmitowanego przez przegrodę, a tym samym zwiększenie jej izolacyjności akustycznej, uzyskuje się na drodze redukcji drgań jej szyb (lub szyb). Na wybranej szybie układu umieszczone są elektromechaniczne



Rys. 1. Przykładowy schemat przegrody szklanej z wielokanałowym systemem aktywnego tłumienia hałasu
 Fig. 1. Sample scheme of glass partition with multichannel active noise control system

przetworniki wykonawcze, będące źródłem dodatkowych, kompensujących wymuszeń. Sygnał uchybu sterowania (sygnał błędny), stanowiący informację o skuteczności działania układu aktywnego tłumienia hałasu, może być uzyskany z przetworników piezoelektrycznych, przyklejonych na wybranej szybie, z sondy nateżeniowej lub z mikrofonu pomiarowego.

O właściwościach dźwiękoizolacyjnych przegrody, a pośrednio o możliwościach poprawy jej właściwości dźwiękoizolacyjnych, decyduje konstrukcja oraz własności tworzących ją elementów (w szczególności szyb). Najmniejszą izolacyjność struktura taka ma dla częstotliwości drgań własnych. Z tego powodu należy dążyć do tego, aby częstotliwości własne szyb (lub szyb (w przypadku przegrody wielowarstwowej) w jak najmniejszej liczbie pokrywały się z dominującymi częstotliwościami składowych dźwięku wymuszającego drgania szyb. Częstotliwości drgań własnych płyty zależą od jej wymiarów, stałych materiałowych (modułu Younga i współczynnika Poissona) oraz od sposobu jej zamocowania.

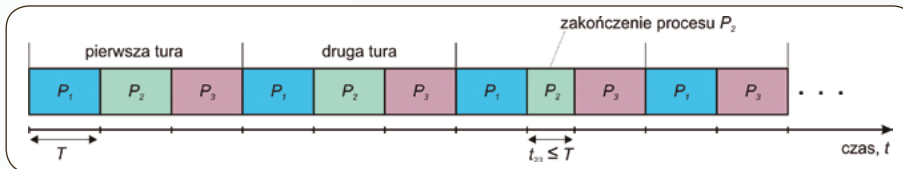
Wymiary (szerokość i wysokość) przegrody szklanej w warunkach rzeczywistych wynikają najczęściej z jej zastosowania. Zmiana częstotliwości drgań własnych możliwa jest zatem poprzez zmianę grubości szyb oraz materiału, z którego jest wykonana. W przypadku prze-

grody złożonej z dwóch szyb istotny wpływ na izolacyjność akustyczną ma komora pomiędzy szybami. Częstotliwość rezonansowa tak powstałego układu masa – powietrze – masa może w znacznym stopniu wpływać na obniżenie izolacyjności akustycznej przegrody.

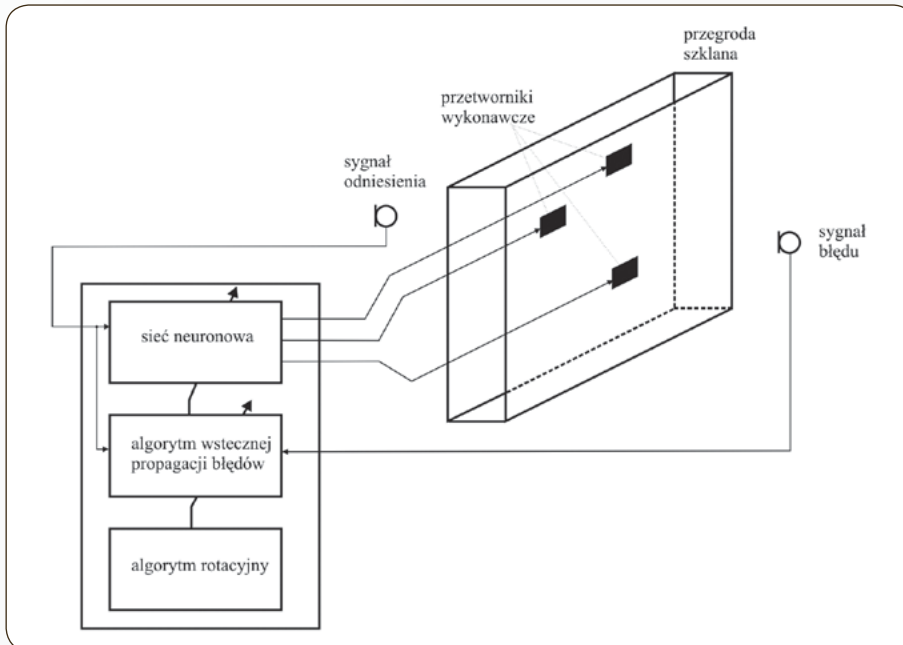
Obecność dwóch szyb i komory daje szersze niż w przypadku pojedynczej szyby możliwości kształtowania charakterystyki częstotliwościowej układu poprzez dobór materiału konstrukcyjnego oraz ich grubości w odniesieniu do każdej szyby z osobna. Wpływ na tę charakterystykę ma także objętość komory oraz rodzaj wypełniającego ją gazu.

Jak podano wcześniej, w przypadku układów aktywnych poprawę izolacyjności przegrody uzyskuje się poprzez odpowiednie sterowanie jej drganiami własnymi. Skuteczność tego rozwiązania jest związana z rodzajem i rozmieszczeniem przetworników elektromechanicznych, będących źródłem wymuszeń kompensujących oraz rejestrujących sygnał uchybu sterowania. Przyjmuje się, że optymalne rozmieszczenie przetworników to takie, które pozwala na sterowanie określonym zbiorem częstotliwości własnych przegrody.

Optymalizacja rozmieszczenia przetworników jest możliwa, gdy znane są częstotliwości własne każdej z szyb oraz rozkład powierzchniowy drgań każdej z nich dla rozpatrywanych czę-



Rys. 2. Zasada działania algorytmu rotacyjnego przedstawiona na osi czasu (na przykładzie trzech procesów P_1 , P_2 i P_3)
Fig. 2. The principle of round-robin algorithm presented on the timeline (on the example of three processes P_1 , P_2 i P_3)



Rys. 3. Schemat przykładowego wielokanałowego systemu aktywnej redukcji hałasu przenikającego przez szklane przegrody działającego z wykorzystaniem sieci neuronowej i algorytmu rotacyjnego

Fig. 3. Scheme of an exemplary multi-channel active noise control system for noise transmitted by glass partitions, operating using neural network and rotation algorithm

stotliwości własnych. W przypadku przegrody wielowarstwowej drgania każdej z szyb mogą być sterowane z osobna oraz na każdej z nich możliwe jest umieszczenie czujnika prędkości objętościowej lub przyspieszenia. Najczęściej do redukcji drgań w akustyczno-strukturalnych układach aktywnej redukcji hałasu wykorzystuje się przetworniki elektro-mechaniczne, bazujące na elementach piezoelektrycznych. Mogą to być przetworniki piezoceramiczne, wytwarzane na bazie kryształów [7], w tym także jako kompozyty [3]. W ostatnim czasie w układach aktywnych coraz częściej stosuje się również magnetoelektryczne przetworniki inercyjne, znane z konstrukcji głośników typu DML (ang. *Distributed Mode Loudspeaker*), przytwierdzone bezpośrednio do powierzchni drgającej [8].

Wielkościami, które mogą być używane do oceny jakości sterowania w aktywnej redukcji dźwięku transmitowanego przez przegrody szklane są: prędkość objętościowa, moc akustyczna, ciśnienie akustyczne mierzone w polu dalekim oraz przyspieszenie drgań. Pomiar prędkości objętościowej realizuje się najczęściej przetwornikami piezoelektrycznymi w postaci folii wykonanej z materiału PVDF. Zaletą takich

przetworników jest ich mała masa własna, możliwość łatwego ich kształtowania pod kątem lepszego pomiaru drgań w szerokim zakresie częstotliwości. Wadą przetworników (która dotyczy wszystkich przetworników piezoceramicznych) jest ich duża wrażliwość na zakłócenia od zewnętrznych pól elektrycznych.

Wyznaczenie mocy akustycznej dokonywane jest z wykorzystaniem matryc mikrofonów lub sond natężeniowych. Wadą takiego rozwiązania jest jednak konieczność umieszczania wymienionych elementów wokół przegrody dźwiękoizolacyjnej, co nie zawsze jest do zaakceptowania, zwłaszcza jeśli redukuje ona hałas emitowany do wnętrza pomieszczenia (np. kabiny pojazdu). Zaletą pomiaru mocy akustycznej jest możliwość lepszej obserwacji układu w porównaniu z czujnikami realizującymi pomiar prędkości objętościowej. Pomiar ciśnienia akustycznego wiąże się z takimi samymi wadami i zaletami, jak pomiar mocy akustycznej, przy czym jest on mniej dokładny.

Z badań przedstawionych m.in. w artykule opublikowanym w „Archive of Acoustics” wynika, że największą poprawę izolacyjności akustycznej aktywnego układu dźwiękoizo-

lacyjnego uzyskuje się, gdy wielkością oceny jakości sterowania jest moc akustyczna [5]. Jest to rozwiązanie niepraktyczne ze względu na eksploatację układu w warunkach rzeczywistych. Rozmieszczenie mikrofonów do pomiaru mocy akustycznej wiąże się z umieszczeniem statywów, przeprowadzeniem przewodów itd. Niewiele gorsze efekty można uzyskać, stosując czujniki prędkości objętościowej w formie folii PVDF, umieszczone na płycie promieniującej dźwięk do otoczenia [9,10].

Kolejnym zagadnieniem, związanym z opracowaniem wielokanałowego systemu aktywnej redukcji hałasu przenikającego przez przegrody szklane, jest wybór sposobu sterowania i jego realizacji. Najczęściej stosowaną obecnie strategią sterowania aktywnymi układami dźwiękoizolacyjnymi, którą można również odnieść do przegród szklanych, jest sterowanie adaptacyjne z wyprzedzeniem (sprzężeniem do przodu, ang. *feedforward*), realizowane w technice cyfrowej. Innym rozwiązaniem algorytmu stosowanego do sterowania drganiami poprzecznymi płytowych układów dźwiękoizolacyjnych, jest algorytm oparty na sieci neuronowej [3].

Sieci neuronowe są jednym z najbardziej popularnych narzędzi matematycznych, wykorzystywanych do sterowania i identyfikacji nieliniowych układów dynamicznych. W zagadnieniach identyfikacji sieć neuronowa pełni rolę modelu parametrycznego zidentyfikowanego układu. W systemach sterowania sieć neuronową wykorzystuje się jako regulator. Najbardziej powszechną strukturą sieci neuronowych jest struktura wielowarstwowa z jedną warstwą ukrytą, której zadaniem jest aproksymacja szukanej funkcji nieliniowej poprzez superpozycję funkcji aktywacji.

Rozważania przedstawione w dalszej części artykułu dotyczą systemu aktywnej redukcji hałasu w odniesieniu do przegród szklanych, działającego na podstawie sieci neuronowej.

Zastosowanie algorytmu rotacyjnego w systemie aktywnej redukcji hałasu przenikającego przez szklane przegrody

Algorytm rotacyjny (inaczej: karuzelowy, ang. *Round Robin*) jest powszechnie stosowany w systemach komputerowych. Jest to najprostszy algorytm szeregowania procesów (inaczej zadań, programów) realizowanych w systemie komputerowym, przyznający każdemu z nich odpowiednie przedziały czasowe, w których mogą być realizowane, nie uwzględniając żadnych priorytetów. Podstawą do rozpoczęcia działania algorytmu jest przyjęcie pewnego okresu czasu T , przez który będą wykonywane kolejne procesy: $P_1, \dots, P_i, \dots, P_N$. Po uruchomieniu algorytmu procesy realizowane są turami w kolejności ponumerowania. W pierwszej turze przez

czas T realizowany jest proces P_i , po upływie którego jest on wstrzymywany i rozpoczyna realizacja procesu P_2 (trwająca tak samo długo) itd. W ten sposób (tj. fragmentami) realizowane są kolejne procesy od P_1 do P_N , po czym następuje powrót do realizacji procesu P_1 i realizacja drugiej tury algorytmu przebiegającej identycznie jak pierwsza.

Poszczególne procesy realizowane są do momentu ich zakończenia, przy czym w ostatniej turze danego procesu czas przeznaczony na jego realizację może być równy lub krótszy od T . Po zakończeniu realizacji procesu P_i nie jest on już uwzględniany w kolejnych turach algorytmu rotacyjnego.

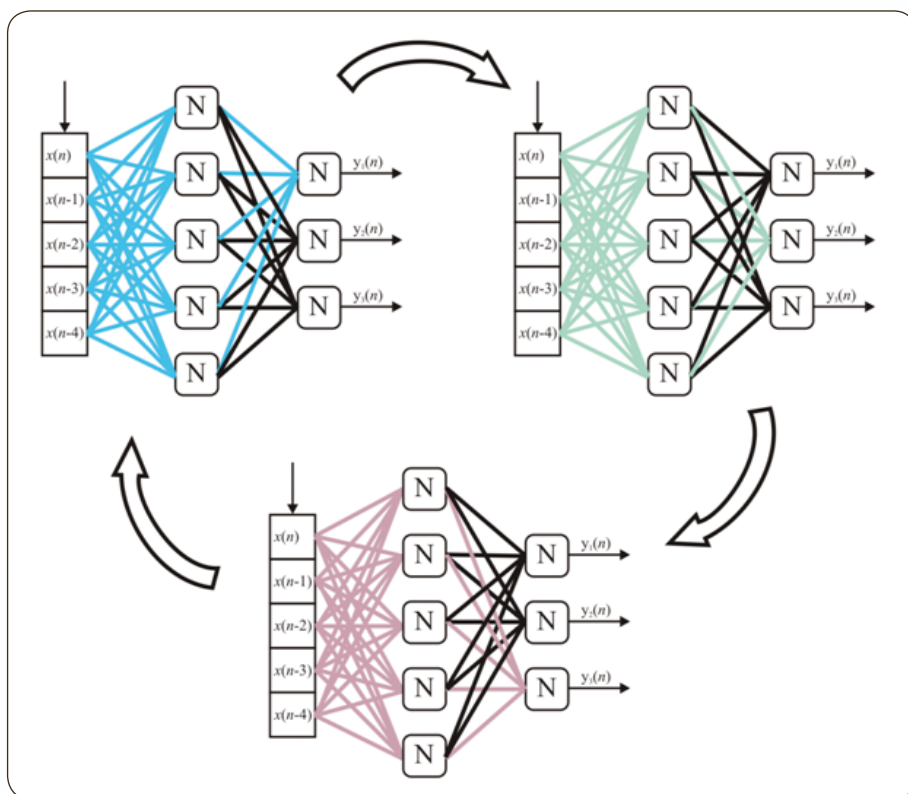
Graficznie działanie algorytmu rotacyjnego zobrazowano na rys. 2.

Na rys. 3. przedstawiono schemat przykładowego wielokanałowego systemu aktywnej redukcji hałasu, przenikającego przez przegrody szklane. W systemie tym zastosowano trzy przetworniki wykonawcze, umieszczone na szybie szklanej przegrody złożonej z dwóch szyb rozdzielonych komorą powietrzną i jednego detektora sygnału błędu w postaci mikrofonu. W układzie sterowania zastosowano sieć neuronową, wykorzystującą algorytm wstecznej propagacji błędów, którego działanie jest modyfikowane przez algorytm rotacyjny.

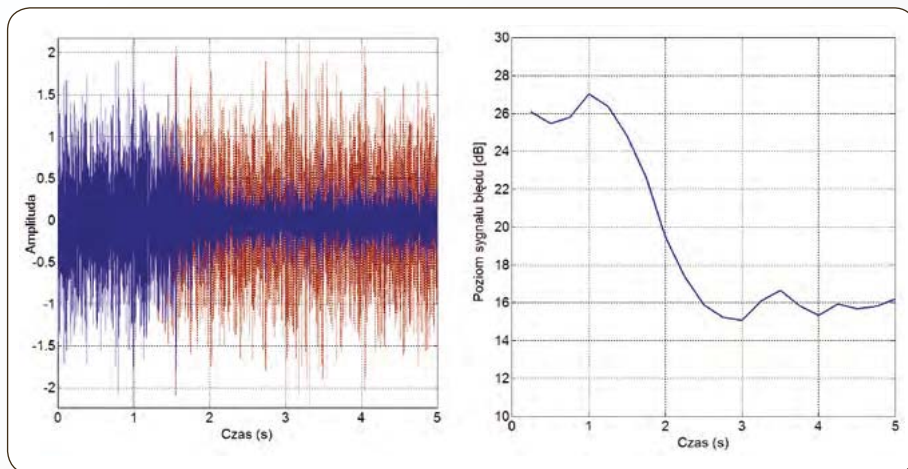
W omawianym systemie algorytm rotacyjny decyduje, które fragmenty sieci neuronowej podlegają procesowi uczenia, a także w jakiej kolejności i przez jaki czas. W przypadku sieci neuronowej możliwe są różne warianty takiego podziału procesu uczenia. Schemat przykładowego przebiegu procesu uczenia sieci neuronowej z wykorzystaniem algorytmu rotacyjnego przedstawiono na rys. 4. Widać na nim wielowarstwową sieć neuronową mającą trzy neurony w warstwie wyjściowej i pięć neuronów w warstwie ukrytej. Prostokąt z literą „N” symbolizuje sumator i funkcję aktywacji neuronu, natomiast pogrubione połączenia symbolizują wagi połączeń synaptycznych.

Adaptowane w danym etapie procesu uczenia wagi połączeń synaptycznych oznaczono kolorem, natomiast wagi niepodlegające procesowi adaptacji zaznaczono na czarno. W zastosowanym wariantcie podziału procesu uczenia, w kolejnych jego etapach adaptowane są wagi synaptyczne jednego (kolejnego) neuronu w warstwie wyjściowej i wszystkich neuronów w warstwie ukrytej. Pełna tura algorytmu rotacyjnego składa się zatem z trzech etapów uczenia sieci neuronowej.

W celu zbadania właściwości systemu aktywnej redukcji hałasu z algorytmem rotacyjnym, algorytm zastosowany w strukturze z rys. 3. zaimplementowano w środowisku Matlab/Simulink. Pierwotne oraz wtórne ścieżki sygnału modelowano filtrami o skończonej odpowiedzi impulsowej odpowiednio 16. i 3. rzędu. Częstotliwość próbkowania



Rys. 4. Schemat przebiegu uczenia sieci neuronowej z wykorzystaniem algorytmu rotacyjnego
Fig. 4. Diagram of neural network learning process with the use of round robin algorithm



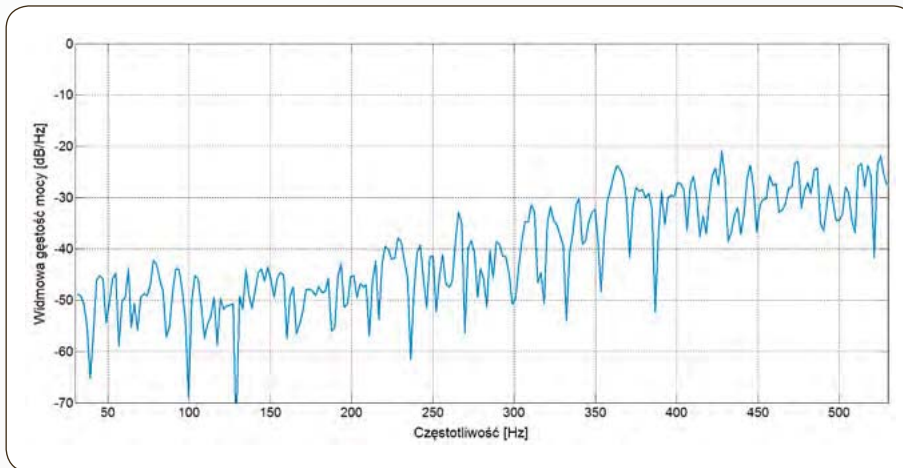
Rys. 5. Przebiegi czasowe sygnałów błędów (kolor granatowy) oraz kompensowanego (kolor czerwony), po prawej poziom sygnału błędów, czas trwania etapu równy 64 okresom próbkowania
Fig. 5. Error signal (navy blue) and compensated signal (red), and on the right the plot of the error signal level for the duration of round robin algorithm stage equal 64 samples

wynosiła 8000 Hz. Rotacja procesu uczenia symulowanej sieci neuronowej przebiegała zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 4. Sygnałem referencyjnym w badaniach symulacyjnych był filtrowany szum Gaussa. Zastosowanie takiego sygnału miało za zadanie oddać warunki rzeczywiste, tzn. symulować maszynę lub urządzenie.

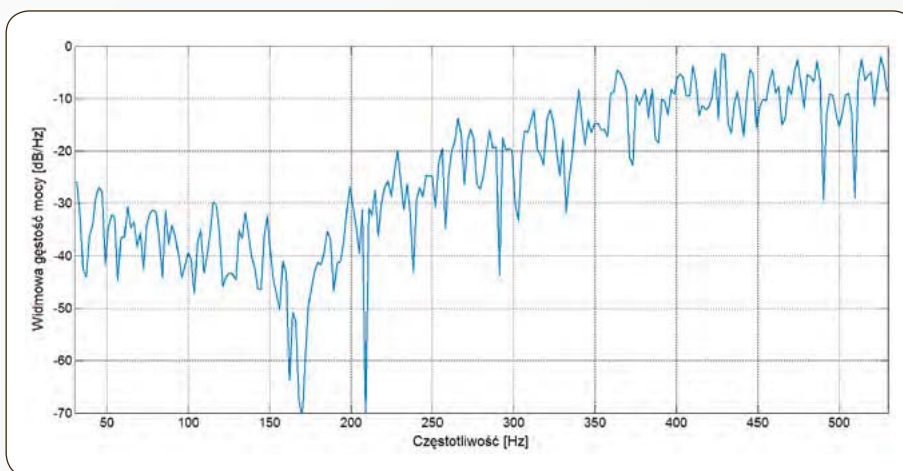
Przeprowadzono badania w odniesieniu do trzech różnych czasów trwania etapu algorytmu rotacyjnego, wynoszących: 4000, 1000 i 64 próbki oraz badania w stosunku do

układu, w którym nie stosowano algorytmu rotacyjnego (adaptowane były jednocześnie wszystkie elementy sieci neuronowej) Wybrane wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych przedstawiono na rys. 5., 6. i 7. Na rys. 5. pokazano przebiegi czasowe sygnałów: błędów oraz kompensowanego, a także poziom sygnału błędów w badaniach, w których czas trwania etapu algorytmu rotacyjnego był równy 64 okresom próbkowania.

Na rys. 6. i 7. przedstawiono widma gęstości mocy odpowiednio: sygnału błędów i sygnału



Rys. 6. Widmowa gęstość mocy sygnału błędu
Fig. 6. Spectral power density of the error signal



Rys. 7. Widmowa gęstość mocy sygnału kompensowanego
Fig. 7. Spectral power density of the compensated signal

kompensowanego. We wszystkich z przeprowadzonych badań poziom sygnału błędowego po ustabilizowaniu się procesu adaptacji wynosił 16 dB. Różny jednak był czas zbiegania algorytmu i wynosił od ponad 5 s w przypadku układu, w którym czas trwania etapu algorytmu rotacyjnego odpowiadał 4000 próbkom sygnału, do 2 s w układzie bez algorytmu rotacyjnego.

Głównym wnioskiem płynącym z przeprowadzonych badań symulacyjnych jest to, że krótszy czas zbiegania algorytmu zapewnia odpowiednio częste przełączanie fragmentów sieci neuronowej podlegających adaptacji, czyli krótszy czas trwania etapu algorytmu rotacyjnego. Wartość końcowa poziomu sygnału błędowego we wszystkich przypadkach była bliska 16 dB, przy wartości początkowej wynoszącej 26 dB, co oznacza, że skuteczność aktywnej redukcji hałasu może wynosić nawet 10 dB.

Wynika z tego, że algorytm rotacyjny nie wpływa na możliwość do uzyskania skuteczności, a jedynie na czas zbiegania algorytmu, zapewniając jednocześnie mniejsze zapotrzebowanie na moc obliczeniową niezbędną do

realizacji algorytmu sterowania (w każdym etapie algorytmu rotacyjnego wykonywana jest jedynie część obliczeń, jaka byłaby wykonywana, gdyby adaptowano jednocześnie wszystkie współczynniki sieci neuronowej). Na wykresach widmowych gęstości mocy można zauważyć, że kompensacja hałasu zachodzi w szerokim paśmie częstotliwości. Ponadto nie zauważa się powstania dodatkowych składowych częstotliwościowych.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły prawidłowe działanie opracowanego algorytmu sterowania i przyjętego schematu adaptacji wag sieci neuronowej. Skuteczność aktywnej redukcji hałasu dla sygnału kompensowanego w postaci filtrowanego szumu Gausa dochodziła do 10 dB. Uzyskane wyniki pokazały zatem, że algorytm rotacyjny może być z powodzeniem stosowany w wielokanałowych systemach aktywnej redukcji hałasu, takich jak przedstawiony w artykule

układ aktywnej redukcji hałasu przenikającego przez przegrody szklane.

Badanie własności akustycznych przegród szklanych z układami aktywnej redukcji hałasu stwarza możliwości zastosowań szczególnie w sytuacjach, gdzie przegrody szklane nie mogą być zastąpione innego rodzaju przegrodami. W przypadku złożonych obliczeniowo algorytmów sterowania zastosowanie algorytmu rotacyjnego pozwala zmniejszyć chwilowe zapotrzebowanie na moc obliczeniową układu sterującego, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej skuteczności aktywnej redukcji i krótkiego czasu zbiegania algorytmu sterującego. Dzięki temu możliwe jest zastosowanie w układach aktywnej redukcji hałasu bardziej złożonych algorytmów sterowania (co może poprawić skuteczność aktywnej redukcji), a także zastosowanie słabszych pod względem obliczeniowym, lecz mniej kosztownych układów mikroprocesorowych do realizacji układu sterowania.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Iżewska A. *Właściwości akustyczne szyb zespolonych*. „Świat Szkła” 2005:28-31
- [2] Iżewska A. *Ocena akustyczna szyb zespolonych*. „Świat Szkła” 2009:54-57
- [3] Krukowicz T., Morzyński L. *Algorytm sterowania aktywnego układu dźwiękochłonno-izolacyjnego z wykorzystaniem sieci neuronowej i algorytmu genetycznego*. „Bezpieczeństwo Pracy. Nauka i Praktyka” 2012,492,9:27-29
- [4] Wrona S., Pawełczyk M. *Feedforward Control of a Light-Weight Device Casing for Active Noise Reduction*. „Archives of Acoustics”, 2016, Vol. 41, No.3:499-505
- [5] Mazur K., Pawełczyk M. *Active Noise Control with a single nonlinear control filter for a vibrating plate with multiple actuators*. „Archives of Acoustics” 2013,38.4:537-545
- [6] Pietrzko S. *Contributions to noise and vibration control technology*. Akademia Górniczo-Hutnicza, 2009
- [7] Baudry M., Berry A., Micheau P. *Decentralized active vibration control of a flexible plate using PZT actuator – PVDF sensor pairs*. „Proceedings of ACTIVE” 2004,04:20-22
- [8] Ho Jen-Hsuan and Arthur Berkhoff *Comparison of various decentralised structural and cavity feedback control strategies for transmitted noise reduction through a double panel structure*. „Journal of Sound and Vibration” 2014,333.7:1857-1873
- [9] Elliott S. J., Johnson M. E. *Radiation modes and the active control of sound power* „J. Acoust. Soc. Am.” 1993,94:2194-2204
- [10] Henriouille K., Sas P. *Experimental validation of a collocated PVDF volume velocity sensor/actuator pair*. „Journal of Sound and Vibration” 2003, Vol. 265, issue 3:489-506

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, sfinansowanego w latach 2014-2016 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.