

dr inż. LESZEK MORZYŃSKI
 dr inż. TOMASZ KRUKOWICZ
 Centralny Instytut Ochrony Pracy
 – Państwowy Instytut Badawczy
 Kontakt: lmorzyns@ciop.pl
 DOI: 10.5604/01.3001.0010.5234

Dwupłytkowa struktura aktywna do ograniczania transmisji hałasu przez obudowy i przegrody dźwiękoizolacyjne

Obudowy dźwiękoizolacyjne są jednym z podstawowych środków technicznych, stosowanych powszechnie do ograniczania hałasu. Izolacyjność przegród pasywnych maleje jednak ze spadkiem częstotliwości dźwięku. Izolacyjność w zakresie niskich częstotliwości może być zwiększona poprzez zastosowanie aktywnych metod redukcji hałasu. W artykule przedstawiono budowę i zasadę działania dwupłytkowej struktury aktywnej do ograniczania transmisji hałasu przez przegrody. Do sterowania przegrodą wykorzystano algorytm z ekstrapolacją sygnału błędu w oparciu o sygnały z przetworników drganiowych. Przedstawiono wyniki badań struktury na stanowisku laboratoryjnym.

Słowa kluczowe: hałas, izolacja akustyczna, obudowa dźwiękoizolacyjna, akustyczno-strukturalna aktywna redukcja hałasu, mikrofon wirtualny

Double-layered active structure for reducing noise transmission through sound insulating barriers

Sound insulating enclosures are a basic technical measure commonly used to reduce noise. Insulation of passive sound insulating barriers, however, decreases with a decrease in frequency. Insulation in the low frequency range can be increased by using active noise control methods. This article presents the structure and principle of operation of a double-layered active structure to limit the transmission of noise through barriers. An algorithm, which extrapolates the error microphone signal based on signals from the vibration transducers, is used for structure control. This article presents structure performance in laboratory conditions.

Keywords: noise, sound insulation, sound insulation enclosure, active structural acoustic control, virtual microphone

Fot. GarryKillian/Bigstockphoto

Wstęp

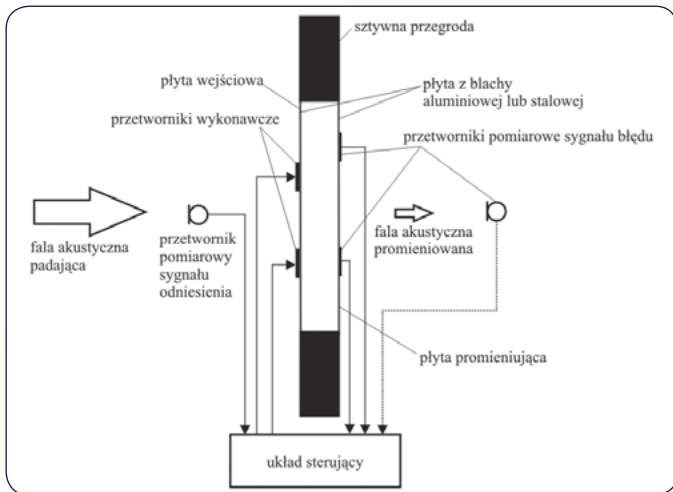
Hałas jest szkodliwym czynnikiem fizycznym, występującym powszechnie w środowisku pracy [1,2]. Głównym skutkiem nadmiernego narażenia na hałas jest powstawanie trwałego uszkodzenia słuchu, uznawanego za chorobę zawodową, której corocznie rozpoznawanych jest kilkadziesiąt przypadków [3]. Hałas, szczególnie niskoczęstotliwościowy, może być również traktowany jako czynnik uciążliwy środowiska pracy, utrudniający wykonywanie zadań wymagających zwiększonej koncentracji uwagi [1].

Do najczęściej stosowanych środków technicznych ograniczania hałasu w środowisku pracy należą obudowy i przegrody dźwiękoizolacyjne, których zadaniem

jest zapobieganie niepożądanemu przenikaniu hałasu do obszarów chronionych [1,4]. Te zabezpieczenia przeciwhałasowe, wykonane w technologii pasywnej, charakteryzują się znacznym zmniejszeniem izolacyjności wraz ze spadkiem częstotliwości ograniczanego hałasu. W przypadku niskich częstotliwości akustycznych uzyskanie lepszej izolacyjności wiąże się ze zwiększeniem ich masy oraz rozmiarów. Często zatem w przypadkach, w których masa lub rozmiary zabezpieczenia przeciwhałasowego podlegają znacznym ograniczeniom czy też istotną rolę odgrywają inne względy techniczne, np. związane z chłodzeniem maszyny będącej źródłem hałasu, nie jest możliwe dostateczne ograniczenie transmisji emitowanego hałasu.

Z tego względu w ostatnich latach coraz więcej uwagi w pracach badawczo-rozwojowych poświęca się zastosowaniu aktywnych metod redukcji hałasu (ARH), [5-8], a w szczególności akustyczno-strukturalnych układów aktywnej redukcji hałasu na drodze jego transmisji [7,8].

W akustyczno-strukturalnych układach aktywnej redukcji hałasu efekt obniżenia poziomu ciśnienia akustycznego promieniowanego przez strukturę dźwięku osiąga się redukując drgania elementów składowych struktury, którymi najczęściej są płyty materiału tworzącego daną obudowę czy przegrodę [9-14]. Akustyczno-strukturalne układy aktywnej redukcji hałasu (określane także mianem struktur inteligentnych, ze względu na wykorzystanie



Rys. 1. Schemat dwupłytywnej aktywnej struktury dźwiękoizolacyjnej
Fig. 1. A scheme of an active sound insulation double-layered structure

adaptacyjnych algorytmów sterowania), mogą być stosowane do ograniczania transmisji hałasu przez obudowy oraz przegrody, stanowiąc całość lub wybrany element danego zabezpieczenia przeciwhałasowego.

Struktura aktywna ma postać płyty lub układu płyt wykonanych z blachy, uzupełnionych o przetworniki i układy elektroniczne, umożliwiające sterowanie jej drganiami w celu ograniczenia transmitowanego przez nią hałasu. Może ona być elementem wykonanej – niezależnie od hałaśliwej maszyny – obudowy dźwiękoizolacyjnej lub też elementem składowym samej maszyny (obudowy i osłony maszyn wchodzące w skład ich konstrukcji również pełnią rolę dźwiękoizolacji). Rozwiązanie takie stanowi skuteczną alternatywę wobec układów pasywnych przy ograniczaniu transmisji hałasu niskoczęstotliwościowego.

Celem artykułu jest prezentacja budowy i wyników badań własnych dwupłytywnej struktury aktywnej.

Dwupłytywa struktura aktywna

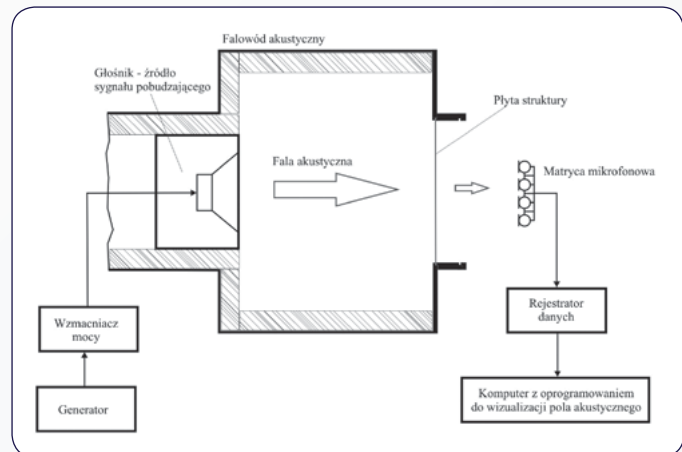
Podstawowy schemat dwupłytywnej aktywnej struktury dźwiękoizolacyjnej przedstawiono na rys. 1. Składa się ona z dwóch płyt – podpartych lub sztywno zamocowanych na wszystkich krawędziach – oraz komory je rozdzielającej, wypełnionej w tym przypadku powietrzem. Płytę wewnętrzną (tzn. znajdującą się po stronie źródła hałasu) określa się mianem wejściowej, a zewnętrzną (tzn. znajdującą się po stronie obszaru chronionego przed hałasem) – promieniującej. Komora pomiędzy płytami ma istotny wpływ na izolacyjność akustyczną struktury. Struktury dwupłytowe w porównaniu z jednopływowymi cechuje większa izolacyjność pasywna, jak również możliwość zastosowania bardziej zaawansowanych strategii sterowania.

Na płycie wejściowej rozmieszczone są, połączone z układem sterującym, przetworniki wykonawcze, wprowadzające dodatkowe drgania kompensujące drgania struktury. Sterowanie ma na celu ograniczenie energii akustycznej promieniowanej ze struktury do chronionego obszaru.

Sterowanie odbywa się z wykorzystaniem sygnałów: odniesienia (inaczej: sygnału hałasu) oraz błędu (uchybu sterowania) – jego źródłem mogą być umieszczone na płycie promieniującej przetworniki piezoelektryczne lub mikrofon (względnie: zestaw mikrofonów), umieszczony w obszarze chronionym. Na działanie struktury aktywnej, a tym samym na osiągnięte rezultaty redukcji transmitowanego hałasu ma wpływ wiele parametrów, a w szczególności: rodzaj materiału, z którego wykonano płyty struktury i ich wymiar, objętość komory powietrznej, przyjęta strategia sterowania oraz rodzaj i rozmieszczenie przetworników wykonawczych i pomiarowych.

W Centralnym Instytucie Ochrony Pracy – Państwowym Instytucie Badawczym realizowane są, opisane dalej w artykule, badania obejmujące opracowanie dwupłytywnej struktury aktywnej. Pierwszym krokiem do skonstruowania jej modelu było określenie rodzaju materiału, z którego zostanie wykonana, a także jej wymiarów. Materiałami najczęściej wykorzystywanymi do wykonania obudów maszyn i urządzeń czy też innych przegród dźwiękoizolacyjnych są stal i aluminium. Przyjęto, że do wykonania modelu zostaną użyte blachy aluminiowe o grubości 2 mm. Rozmiary poprzeczne modelu struktury były zdefiniowane przez rozmiary okna do badań struktur aktywnych znajdujących się na stanowisku laboratoryjnym w Instytucie i wynoszą 400 x 600 mm. Odległość pomiędzy płytami struktury wynosiła 25 mm.

Kolejnym etapem w opracowaniu modelu struktury aktywnej był dobór i rozmieszczenie



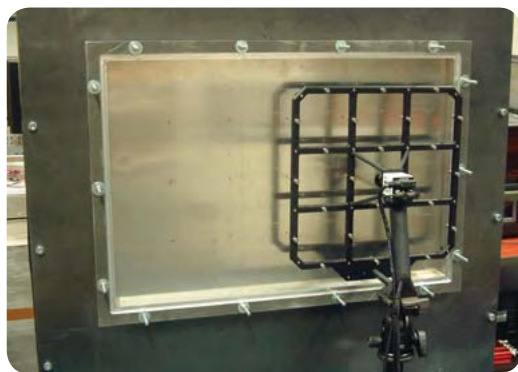
Rys. 2. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania rozkładu powierzchniowego natężenia dźwięku płyty z użyciem metod holografii akustycznej

Fig. 2. A diagram of a measuring system for determining surface distribution of sound intensity radiated by a panel with the use of acoustic holography

przetworników wykonawczych i pomiarowych. Ze względu na możliwość sterowania przy użyciu klasycznych wzmacniaczy mocy, bez konieczności stosowania wysokich, niebezpiecznych dla człowieka napięć, jako przetworniki wykonawcze zastosowano magnetoelektryczne przetworniki inercyjne, które zamontowano na płycie wejściowej struktury. Jako przetworników pomiarowych użyto dwóch przetworników piezoelektrycznych typu MFC, które zamontowano na płycie promieniującej struktury.

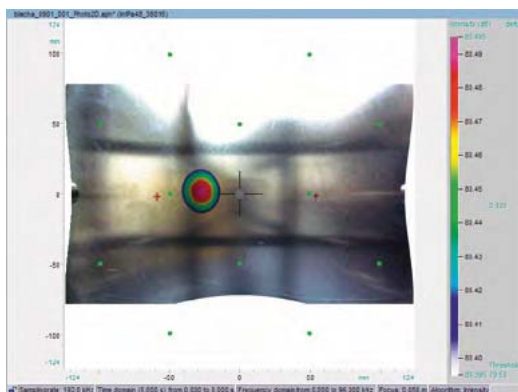
Sposób rozmieszczenia przetworników pomiarowych i wykonawczych ma decydujący wpływ na efektywność sterowania drganiami struktury aktywnej. Powinny one zostać zatem rozmieszczone w miejscach największych amplitud drgań powierzchni w odniesieniu do zadanej liczby częstotliwości drgań własnych. W realizowanych badaniach do wyznaczania rozkładu powierzchniowego drgań użyto metody eksperymentalnej z zastosowaniem holografii akustycznej pola bliskiego, uwzględniając fakt, że rozkłady powierzchniowe wielkości akustycznych są ściśle powiązane z rozkładem powierzchniowym drgań płyty [15,16]. W celu wyznaczenia miejsc maksymalnych amplitud drgań płyt struktury, a tym samym miejsc rozmieszczenia przetworników, zestawiono układ pomiarowy zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 2.

Do wyznaczenia rozkładu powierzchniowego natężenia dźwięku wykorzystano matrycę mikrofonową, zawierającą łącznie 48 mikrofonów rozmieszczonych parami na równomiernie rozłożonej siatce wewnątrz prostokąta o wymiarach 300 x 330 mm. Matryca ta zawiera również kamerę wizyjną, umożliwiającą nałożenie wyników analizy bezpośrednio na obraz badanego obiektu. Matryca mikrofonowa była podłączona do rejestratora danych, który gromadził je w czasie rzeczywistym, a następnie przesyłał do kom-



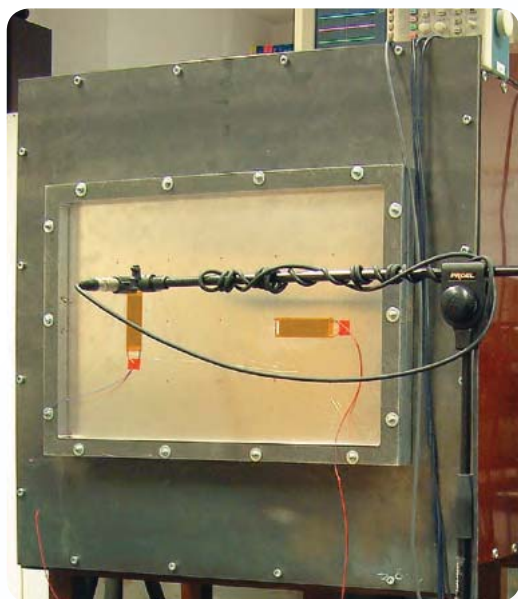
Fot. 1. Stanowisko laboratoryjne w trakcie badań rozkładu powierzchniowego natężenia dźwięku z wykorzystaniem matrycy mikrofonowej (matryca mikrofonowa w położeniu skrajnym prawym)

Photo 1. A laboratory stand during measurements of sound intensity distribution using a microphone array (microphone array at extreme right)



Rys. 3. Wyniki badań natężenia dźwięku promieniowanego przez płytę wejściową – położenie skrajne lewe. Maksymalne wartości natężenia dźwięku obrazuje barwny obszar w pobliżu środka obrazu (wartości od 80,395 dB do 80,495 dB). Osie pionowa i pozioma wykresu określa odległość od środka obszaru obrazu w mm (od -124 do 124)

Fig. 3. Results of measurements of sound intensity radiated by an incident panel (for microphone array at extreme left). Maximum sound intensity values are represented by the colorful area close to the middle of the picture. Vertical and horizontal axes of the chart mark the length from its center in millimeters.



Fot. 2. Opracowany model wielowarstwowej struktury aktywnej na stanowisku laboratoryjnym

Photo 2. The developed model of a multilayer active structure on a laboratory stand

putera wyposażonego w oprogramowanie umożliwiające ich przetwarzanie i wizualizację. Badana płyta była pobudzana do drgań sygnałem akustycznym.

Przed przystąpieniem do badań z wykorzystaniem matrycy mikrofonowej płytę pobudzono do drgań sygnałem tonalnym o zmiennej częstotliwości, mierząc poziom ciśnienia akustycznego transmitowanego przez płytę. Maksymalną wartość poziomu ciśnienia akustycznego uzyskano w przypadku częstotliwości tonu pobudzającego, wynoszącej 220 Hz. Dalsze badania płyt i struktury prowadzono w odniesieniu do pobudzenia o tej częstotliwości.

W związku z rozmiarami matrycy mikrofonowej, mniejszymi od rozmiarów płyty oraz koniecznością umieszczenia matrycy w bliskiej odległości od badanej płyty, pojedynczy pomiar nie pozwalał na obserwację całej jej powierzchni. Z tego powodu pomiary rozkładu natężenia dźwięku wykonano w trzech położeniach matrycy mikrofonowej względem drgającej płyty: skrajnym lewym, środkowym i skrajnym prawym (fot. 1). W badaniach tych wyznaczano obszary o maksymalnej wartości natężenia dźwięku odpowiadające obszarom płyty o maksymalnych amplitudach drgań.

Przykładowy wynik wizualizacji rozkładu natężenia dźwięku uzyskany w trakcie badań przedstawiono na rys. 3. Badania wykazały występowanie dwóch obszarów o największych wychyleniach drgań zlokalizowanych w lewej i w prawej połowie tej płyty. Taki układ maksimum drgań odpowiada drugiemu modowi¹ drgań płyty prostokątnej.

Po zidentyfikowaniu obszarów płyty, w których występują maksima amplitud drgań, naklejono w tych miejscach przetworniki wykonawcze. Taką samą procedurę zastosowano do wyznaczenia miejsc umieszczenia przetworników pomiarowych na płycie promieniującej struktury. Powstała w ten sposób strukturę przedstawiono na fot. 2.

Układ sterujący zawiera w swojej strukturze rdzeń zmiennoprzecinkowego procesora sygnałowego (DSP) TMS320C6747 oraz procesora RISC ARM926EJ-S o architekturze ARMv5. Moduł ewaluacyjny mikroprocesora rozbudowano o kompatybilną z tym modułem kartę rozszerzeń audio, wyposażoną w cztery dwukanałowe przetworniki analogowo-cyfrowe (A/C) typu sigma delta o rozdzielczości 24 bitów PM1802 oraz wielokanałowy kodek AK4588, z którego wykorzystywany jest 8-kanałowy, 24-bitowy przetwornik cyfrowo-analogowego (C/A).

W oprogramowaniu układu sterującego zaimplementowano algorytm sterowania strukturą aktywną, którego schemat przedstawiono

na rys. 4. Jest to wielokanałowy algorytm FXLMS, w którym sygnał błędu, pozwalający układowi na ocenę jakości sterowania, jest sygnałem z wirtualnego mikrofonu błędu², ekstrapolowanym (wyznaczanym) na podstawie sygnałów z drganiowych przetworników pomiarowych. W algorytmie tym $W_j(z)$ oznacza transmitancję poszczególnych filtrów realizujących sterowanie drganiami płyty. Transmitancje $S(z)$ i ich estymaty opisują tzw. ścieżki wtórne sygnału. Szerszy opis algorytmu FXLMS znaleźć można w literaturze [7,8,10,15]. Zastosowanie wirtualnego mikrofonu błędu wynika z tego, że większą efektywność redukcji hałasu uzyskuje się w układach, w których wykorzystuje się sygnał błędu z mikrofonu, ale zastosowanie w układzie rzeczywistego mikrofonu błędu utrudnia zastosowanie układu w praktyce (jest to dodatkowy, podatny na uszkodzenia element, który musi być umieszczony w pewnej odległości od struktury).

W przyjętym algorytmie sterowania sygnał z wirtualnego mikrofonu błędu jest ekstrapolowany z sygnałów z przetworników drganiowych. Każdy z fragmentów drgającej płyty, w których przyklejono przetwornik drganiowy jest źródłem dźwięku, docierającego do mikrofonu sygnału błędu poprzez ścieżkę akustyczną o transmitancji $A_n(z)$ (rys. 4.). Wyznaczanie wirtualnego sygnału błędu $e_c(k)$, przy wykorzystaniu sygnałów z przetworników drganiowych, wymaga zatem estymat tych transmitancji, czyli modeli filtrów ekstrapolujących, oznaczonych na rys. 4. symbolami $F_n(z)$.

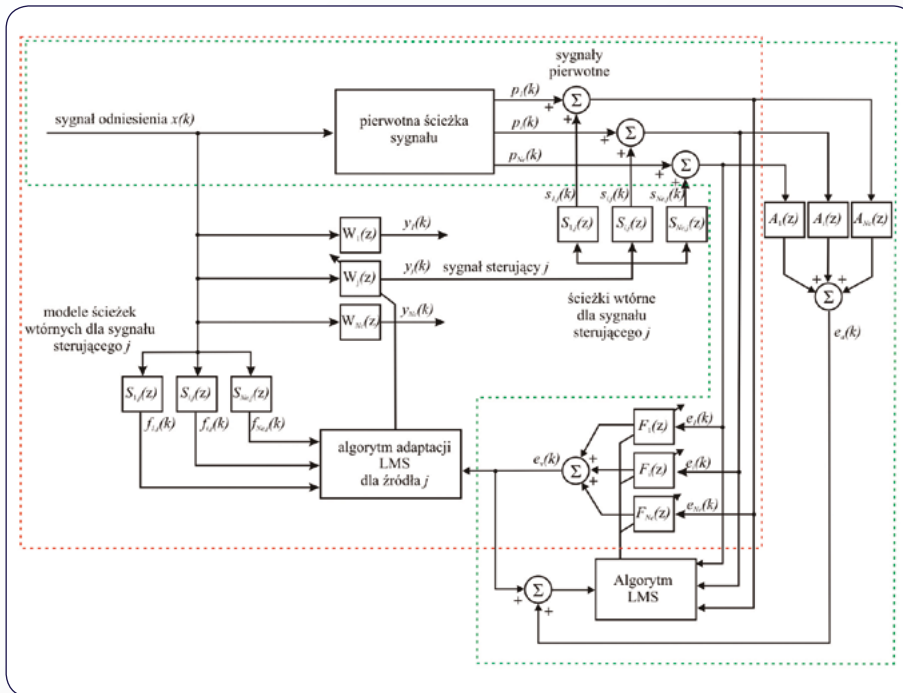
Działanie przedstawionego algorytmu musi być zatem realizowane w dwóch etapach. Etap pierwszy obejmuje wykonanie modeli filtrów ekstrapolujących sygnał błędu z mikrofonu wirtualnego. Elementy układu biorące udział w tym procesie zaznaczono na schemacie (rys. 4.) kolorem zielonym i zieloną ramką. Biorą one udział jedynie w procesie wyznaczania modeli filtrów ekstrapolujących. Zadanie to realizowane jest w trybie off-line i wymaga zastosowania czujnika, w postaci mikrofonu sygnału błędu, umieszczonego w pobliżu struktury aktywnej. Drugi etap działania algorytmu obejmuje już właściwy proces sterowania aktywną redukcją hałasu, w którym sygnałem błędu jest ekstrapolowany sygnał z wirtualnego mikrofonu błędu.

Badania laboratoryjne

Opracowany model dwupłytywowej struktury aktywnej poddano badaniom laboratoryjnym w celu weryfikacji poprawności działania algorytmu sterującego oraz jego implementacji w układzie sterującym. Na stanowisku

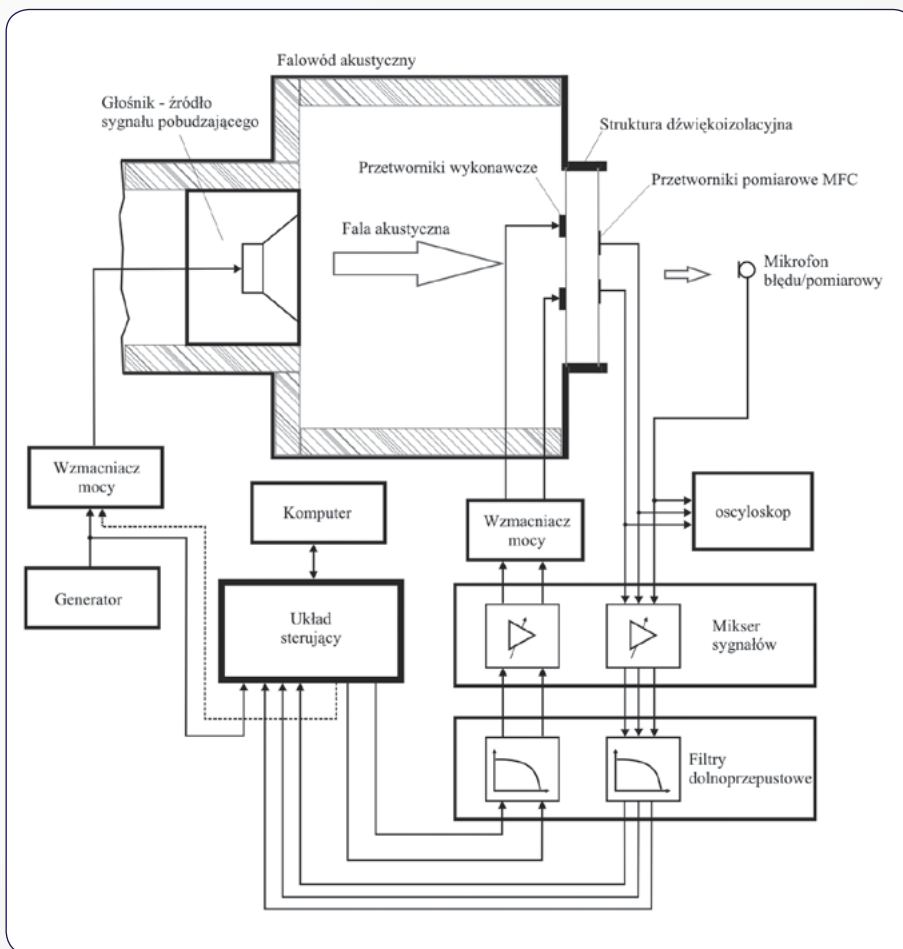
¹ Jest to inaczej rodzaj (sposób) drgań dla danej częstotliwości rezonansowej.

² Mikrofon pozorny, niereeczywisty, wykreowany w systemie przetwarzania sygnału. Wyznaczany podczas operacji matematycznych sygnał z takiego mikrofonu odpowiada sygnałowi z rzeczywistego mikrofonu, który znajdowałby się w jego miejscu.



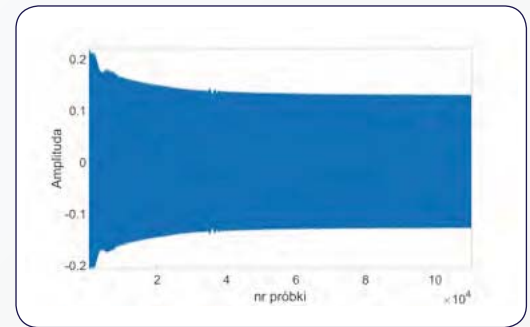
Rys. 4. Algorytm sterowania strukturą aktywnej: kolor zielony – etap identyfikacji filtrów do ekstrapolacji sygnału mikrofonowego, kolor czerwony – etap sterowania procesem ARH

Fig. 4. An algorithm of active structure control: green – identification of filters for extrapolation of microphone signal, red – active noise control



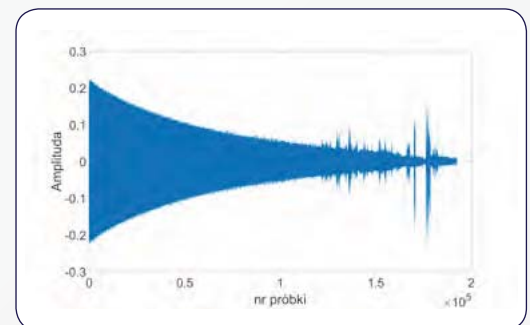
Rys. 5. Schemat układu do badań testowych dwupłytowej struktury aktywnej

Fig. 5. A scheme of a system for testing a double-layered active structure



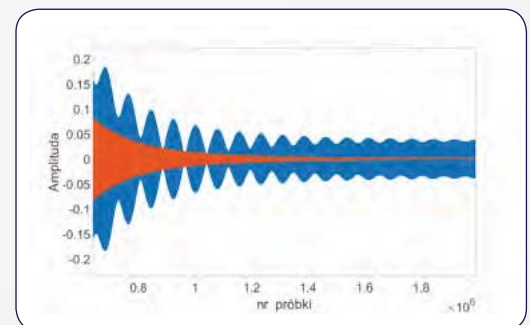
Rys. 6. Sygnał błędny w procesie ARH w układzie z detektorem sygnału błędny w postaci mikrofonu

Fig. 6. Error signal in the system for active noise control with an error signal detector in the form of a microphone



Rys. 7. Sygnał błędny w procesie ARH w układzie z detektorem sygnału błędny w postaci przetworników drganiowych MFC

Fig. 7. Error signal in the system for active noise control with an error signal detector in the form of MFC transducers



Rys. 8. Sygnał błędny w procesie ARH w układzie z ekstrapolowanym sygnałem błędny (kolor pomarańczowy – ekstrapolowany sygnał błędny, kolor niebieski – rzeczywisty sygnał błędny)

Fig. 8. Error signal in the system for active noise control with an extrapolated error signal detector in the form of MFC transducers (orange – extrapolated error signal, blue – real error signal)

laboratoryjnym zestawiono układ pomiarowy, którego schemat przedstawiono na rys. 5.

Strukturę aktywną zamontowano na stanowisku laboratoryjnym. Źródłem sygnału wymuszającego był umieszczony w falowodzie głośnik w obudowie zamkniętej, który w trakcie badań weryfikacyjnych był pobudzany odpowiednio wzmacnionym sygnałem o częstotliwości 220 Hz (odpowiadającej jednej z częstotliwości drgań własnych układu) z generatora. Na tym etapie badań nie stosowano detektora sygnału odniesienia w postaci mikrofonu. Z tego względu sygnał z generatora był również bezpośrednio pobierany przez układ

sterujący jako sygnał odniesienia. Sygnałami wchodzącymi do układu sterującego były również sygnały z detektorów sygnału błędu – dwóch przetworników piezoelektrycznych MFC oraz z mikrofonu (w zależności od eksperymentu, przedstawiony na schemacie mikrofon pełnił rolę mikrofonu błędu lub mikrofonu pomiarowego). Układ sterujący sterował pracą trzech przetworników wykonawczych.

W torach sygnałowych, zarówno wejściowych, jak i wyjściowych, zastosowano filtry dolnoprzepustowe oraz zestaw regulowanych przedwzmacniaczy w postaci miksera sygnałów. Filtry dolnoprzepustowe o częstotliwości odcięcia 1000 Hz pełniły w torach wejściowych funkcję filtrów antyaliasingowych, a w torach wyjściowych funkcję filtrów rekonstrukcyjnych. Przedwzmacniacze miksera sygnałów umożliwiały regulację amplitud sygnałów w poszczególnych torach. Mikser sygnałów umożliwiał również łączenie elementów badanego układu oraz rekonfigurację tych połączeń, a także zapewniał niezbędne napięcie zasilania (tzw. phantom) mikrofonowi pomiarowemu. Sygnały z detektorów pomiarowych w trakcie badań były również bezpośrednio obserwowane na ekranie oscyloskopu, co pozwalało na szybką, pobieżną ocenę działania struktury aktywnej, a w szczególności procesu adaptacji paramentów filtra sterującego. Układ sterujący połączono z komputerem za pomocą złącza USB, dzięki czemu możliwe było załadowanie do układu sterującego oprogramowania oraz jego uruchomienie, jak również pobieranie z układu sterującego takich danych, jak wektory próbek przetwarzanych sygnałów czy też zestawy współczynników realizowanych filtrów adaptacyjnych.

Podczas opisywanych badań, sprawdzając poprawność implementacji algorytmu sterowania, porównano działanie dwupłytywowej struktury aktywnej, w której sygnał błędu jest ekstrapolowanym sygnałem mikrofonu wirtualnego z działaniem struktur, w których sygnał błędu był sygnałem z mikrofonu lub z przetworników drganiowych MFC. Na rys. 6-8 przedstawiono wynik działania struktur aktywnych przy zastosowaniu różnych rodzajów detektorów sygnału błędu.

Na rys. 6. widoczny jest przebieg sygnału błędu w przypadku struktury, w której pochodzi on z mikrofonu błędu. Jak można zauważyć, sygnał ten jest zbieżny, a układ działa w sposób prawidłowy, znacząco redukując hałas. Widoczne skokowe zmiany sygnału błędu w końcowej części wykresu są zakłóceniami zewnętrznymi, rejestrowanymi przez mikrofon błędu (hałas z otoczenia). Uzyskana wartość redukcji wynosi w tym przypadku 21 dB.

Na rys. 7. pokazano przebieg sygnału błędu (w punkcie obserwacji) w przypadku struktury, w której detektorami sygnału błędu w układzie sterowania są przetworniki drganiowe MFC.

Sygnał rejestrowany mikrofonem pomiarowym świadczy o globalnym działaniu układu. Jak widać na wykresie, układ działa w sposób prawidłowy, jednak uzyskiwana wartość aktywnej redukcji jest znacząco mniejsza niż w przypadku struktury z mikrofonem błędu i wynosi 7 dB.

Przebieg sygnału błędu w przypadku struktury, w której sygnał błędu jest ekstrapolowany z sygnałów z przetworników drganiowych przedstawiono na rys. 8. Przebieg w kolorze pomarańczowym jest ekstrapolowanym sygnałem błędu, a przebieg w kolorze niebieskim jest rzeczywistym sygnałem błędu zmierzonym mikrofonem pomiarowym. Jak wynika z wykresu, układ działa w sposób prawidłowy, a uzyskiwana rzeczywista redukcja hałasu jest znacznie lepsza, niż w przypadku stosowania sygnałów drganiowych, ale gorsza w porównaniu z detektorem mikrofonowym i wynosi 18 dB.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono konstrukcję dwupłytywowej struktury aktywnej do ograniczania transmisji hałasu przez obudowy i przegrody dźwiękoizolacyjne. Została ona wykonana z: dwóch płyt aluminiowych, rozdzielonych przestrzenią powietrzną, układu sterującego oraz przetworników wykonawczych i pomiarowych, rozmieszczonych na powierzchniach struktury. Ograniczenie transmisji hałasu przez strukturę osiągnęte jest poprzez redukcję drgań jej powierzchni.

W algorytmie sterowania struktury zastosowano ekstrapolację sygnału błędu z wirtualnego mikrofonu błędu, wykorzystując sygnał z przetworników drganiowych. Pozwoliło to na usunięcie z układu sterowania mikrofonu sygnału błędu, niepraktycznego w eksploatacji układu rzeczywistego, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej efektywności aktywnej redukcji hałasu.

Badania laboratoryjne wykazały, że redukcja transmitowanego hałasu w układzie z wirtualnym mikrofonem błędu wynosiła 18 dB i była tylko o 3 dB gorsza od osiągniętej w układzie, w którym użyto rzeczywistego mikrofonu sygnału błędu. Wyniki badań wskazują zatem, że zaproponowane rozwiązanie może być efektywne w ograniczaniu transmisji hałasu przez obudowy i przegrody, w szczególności hałasu o dominujących componentach wąskopasmowych i tonalnych. Tego rodzaju hałas wytwarzany jest przez wiele rodzajów typowych źródeł, takich jak silniki, pompy, kompresory.

Struktury aktywne, takie jak przedstawiono w artykule, mogą być wykorzystywane do budowy nowoczesnych maszyn i urządzeń (jako integralne elementy konstrukcyjne ich osłon), obudów dźwiękoizolacyjnych hałaśliwych maszyn i urządzeń lub też przegród oddzielających

miejsca hałaśliwe od obszarów, w których przebywają pracownicy.

Dalsze prace nad opisanym w artykule rozwiązaniem i wynikające z nich praktyczne jego zastosowanie mogą zatem przyczynić się do poprawy warunków pracy z zakresie narażenia na szkodliwy lub uciążliwy hałas niskoczęstotliwościowy, w przypadku którego powszechnie stosowane układy pasywne cechują się małą izolacyjnością.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Engel Z., Koradecka D., Augustyńska D., Kowalski P., Morzyński L., Zera J. *Zagrożenia wibroakustyczne* [w:] Koradecka D. (red.) *Bezpieczeństwo i higiena pracy*. CIOP-PIB, Warszawa 2008
- [2] *Warunki pracy w 2014 r.* Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2015
- [3] Instytut Medycyny Pracy im. prof. dr med. Jerzego Nofera, dane o zapadalności na choroby zawodowe http://www.imp.lodz.pl/home_pl/o_inytucie/reg_and_databases/work_dissises1/dane_o_zapadalnosci/
- [4] Engel Z., Sikora J. *Obudowy dźwiękochłonne-izolacyjne: podstawy projektowania i stosowania*, Wyd. AGH, Kraków 1998
- [5] Engel Z., Makarewicz G., Morzyński L., Zawieska W.M. *Metody aktywnej redukcji hałasu*. CIOP, Warszawa 2001
- [6] Fuller C.R., Elliott S.J. and Nelson P.A. *Active Control of Vibration*. Academic Press, 1996
- [7] Hansen C., Snyder S., Qiu X., Brooks L., Moreau D. *Active control of noise and vibration*. CRC Press, 2012
- [8] Sen M. Kuo and Dennis Morgan *Active noise control systems: algorithms and DSP implementations*. John Wiley & Sons Inc., 1995
- [9] Leniowska L., Mazan D. *MFC sensors and actuators in active vibration control of circular plate*. "Archives of Acoustics" 2015, 40 2:257-265
- [10] Mazur K., Pawełczyk M. *Active noise-vibration control using the filtered-reference lms algorithm with compensation of vibrating plate temperature variation*. "Archives of Acoustics" 2011, 36, 1:65-76
- [11] Mazur K., Pawełczyk M. *Hammerstein nonlinear active noise control with the Filtered-Error LMS algorithm*. "Archives of Acoustics" 38.2 (2013): 197-203
- [12] Pietrzko S. *Contributions to noise and vibration control technology*. Akademia Górniczo-Hutnicza, 2009
- [13] Pietrzko S., Qibo Mao *New results in active and passive control of sound transmission through double wall structures*. "Aerospace Science and Technology" 2008, 12.1:42-53
- [14] Wrona S., Pawełczyk M. *Controllability-oriented placement of actuators for active noise-vibration control of rectangular plates using a memetic algorithm*. "Archives of Acoustics" 2013, 38, 4:529-536
- [15] Maynard J.D., Williams E.G., and Lee Y. *Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH*. "JASA" 1985, 78, 1395
- [16] Wu S.F. *Techniques for Implementing Near-Field Acoustical Holography*. "Sound & Vibration" 2010, 2:12-16

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.