

mgr inż. TOMASZ KRUKOWICZ  
 dr inż. LESZEK MORZYŃSKI  
 Centralny Instytut Ochrony Pracy  
 – Państwowy Instytut Badawczy

# Algorytm sterowania aktywnego układu dźwiękochłonno-izolacyjnego z wykorzystaniem sieci neuronowej i algorytmu genetycznego

W artykule przedstawiono algorytm sterowania aktywnym ustrojem dźwiękochłonno-izolacyjnym wykorzystującym materiały inteligentne. Algorytm działa w oparciu o sieci neuronowe i algorytm genetyczny. Opis algorytmu poprzedzono krótkim omówieniem materiałów inteligentnych wykorzystywanych do budowy aktywnych układów dźwiękochłonno-izolacyjnych z uwzględnieniem zjawisk degradujących skuteczność omawianych układów wykorzystujących klasyczne techniki sterowania. Przedstawiono wyniki symulacji numerycznych działania aktywnego układu dźwiękochłonno-izolacyjnego. Rezultaty przeprowadzonych symulacji pozwalają stwierdzić, że opracowany algorytm pozwoli na konstruowanie aktywnych ustrojów dźwiękochłonno-izolacyjnych o dużej efektywności.

## A smart active structural acoustic control utilizing neural networks and genetic algorithm

In this paper a algorithm for smart active structural acoustic control systems is presented. The algorithm utilizes neural networks and a genetic algorithm. Derivation of the algorithm is preceded by a brief overview about smart materials and smart structures including the description of the phenomena that may decrease efficiency control of the classic approach over smart active structural acoustic systems. Examples of numerical simulations of performance smart active structural acoustic control systems are presented which show that by using proposed algorithm in smart active structural acoustic control systems high noise reduction can be assured.

## Wstęp

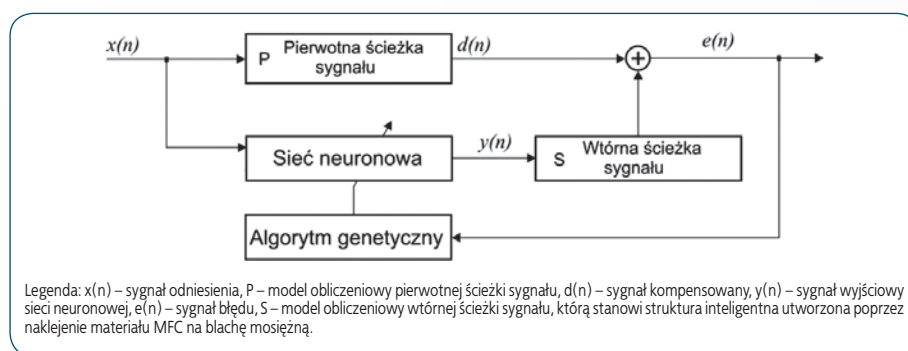
Pasywne metody redukcji hałasu cechują się małą skutecznością w zakresie częstotliwości poniżej 500 Hz [1]. Osiągnięcie pożądanych skutków wiąże się w tym przypadku ze znaczącym zwiększeniem gabarytów i masy zabezpieczeń przeciwhałasowych, co znacząco wpływa na koszty ich wykonania i instalacji. Często również, z uwagi na ograniczony rozmiar dostępnej przestrzeni, czy też ze względów technologicznych związanych np. z chłodzeniem danego urządzenia lub maszyny, niemożliwe jest zastosowanie skutecznych, pasywnych środków ograniczania hałasu. Pomocne w takich sytuacjach może być zastąpienie tradycyjnych materiałów konstrukcyjnych wykorzystywanych do budowy obudów dźwiękochłonno-izolacyjnych tzw. strukturami inteligentnymi [2], tworzonymi poprzez połączenie materiałów konstrukcyjnych (np. stali) z materiałami inteligentnymi.

Materiały inteligentne różnią się od powszechnie stosowanych materiałów konstrukcyjnych tym, że są w stanie adaptować się do zmieniającego się otoczenia. Z punktu widzenia systemów aktywnej redukcji hałasu i drgań (ARHD) najbardziej znaczącą różnicą pomiędzy klasycznymi materiałami konstrukcyjnymi a materiałami inteligentnymi jest to, że te pierwsze można scharakteryzować używając stałych sprężystości wiążących nacisk i odkształcenie, zaś w drugich pełna charakterystyka wymaga uwzględnienia w opisie fizycznym dodatkowych własności tych materiałów. Jest to realizowane poprzez wprowadzenie odpowiedniego składnika naprężeń i odkształceń oraz dodatkowych zmiennych, które te dodatkowe zależności charakteryzują.

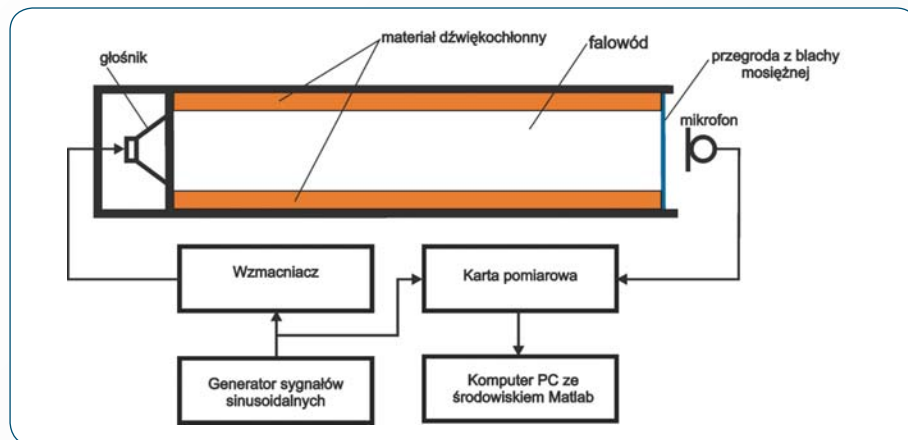
Znamienną cechą materiałów inteligentnych jest możliwość zmiany ich właściwości fizykochemicznych poprzez zmianę wartości dodatkowych zmiennych. Do zmiennych wpływających na relację pomiędzy naciskiem i odkształceniem zalicza

się m.in. temperaturę, pole elektryczne oraz pole magnetyczne. Ustalanie wartości tych zmiennych może mieć charakter dynamiczny, wskutek czego możliwe jest dostosowanie właściwości materiału do zmiennych warunków pracy. Grupą materiałów inteligentnych powszechnie wykorzystywanych w systemach ARHD są materiały piezoelektryczne. Do tej grupy zalicza się materiały piezoceramiczne oraz materiały piezopolimerowe.

Materiałami piezoceramicznymi najczęściej używanymi do celów aktywnej redukcji hałasu i drgań są materiały wykonane z ceramiki PZT, czyli ceramiki wytwarzanej na bazie cyrkoniano-tytaniau ołowiu ( $\text{PbZrTiO}_3$ ). Ceramika PZT jest stosowana do budowy czujników drgań (przetworniki mechano-elektryczne) oraz elementów generujących drgania (przetworniki elektro-mechaniczne). Innym typem materiałów inteligentnych wykonanych z ceramiki PZT są kompozyty piezoceramiczne (PFC). Materiały piezopolimerowe w systemach ARHD i drgań



Rys. 1. Struktura modelu obliczeniowego systemu ARHD wykorzystującego sieć neuronową i algorytm genetyczny  
Fig. 1. Numerical model of active noise and vibration algorithm based on a neural network and genetic algorithm



Rys. 2. Stanowisko laboratoryjne do badań właściwości struktur inteligentnych  
Fig. 2. Laboratory stand for determination of intelligent structures properties

pełnią głównie funkcję czujników. Najczęściej wykorzystywanymi do tego celu materiałami są tzw. folie PVDF (*Polyvinylidene fluoride*) wykonane na bazie polifluorku winylidenu. Szczegółowe informacje na temat materiałów inteligentnych wykorzystywanych do ARHD można znaleźć w wielu publikacjach [3-4, 8-10].

W przypadku opracowywania układów dźwiękochłonno-izolacyjnych materiały inteligentne wykorzystuje się do minimalizacji drgań mechanicznych ich elementów konstrukcyjnych. Jest to osiągane poprzez dynamiczną zmianę ich parametrów.

Przykładem struktury inteligentnej stosowanej jako materiał konstrukcyjny w obudowach dźwiękochłonno-izolacyjnych jest blacha (np. stalowa), na której powierzchni zamocowano materiał inteligentny. Materiał pod wpływem przyłożonego napięcia elektrycznego zmienia swój kształt, powodując jednoczesne odkształcenie blachy. Napięcie jest generowane przez układ sterujący, który na podstawie pomiarów przyspieszenia drgań na elemencie konstrukcyjnym ustala taką wartość napięcia, aby suma przyspieszeń materiału konstrukcyjnego pobudzanego drogą powietrzną przez źródło hałasu i materiału inteligentnego była jak najmniejsza. Zmniejszenie drgań mechanicznych elementów konstrukcyjnych powoduje zmniejszenie promieniowania dźwięku. Znaczące obniżenie promieniowania dźwięku w opisanym układzie wymaga rozwiązania wielu problemów, z których najważniejsze jest właściwe rozmiesz-

czenie materiału inteligentnego na powierzchni materiału konstrukcyjnego oraz zastosowanie odpowiedniego algorytmu sterowania. Rozwiązania problemu rozmieszczenia materiałów inteligentnych zostały przedstawione w licznych pracach badawczych, natomiast zagadnienie sterowania ciągle pozostaje otwarte i wymaga dalszych badań.

W artykule przedstawiono algorytm sterowania strukturami inteligentnymi, które zostaną wykorzystane do budowy aktywnych ustrojów dźwiękochłonno-izolacyjnych wykorzystywanych w produkcji obudów dźwiękochłonno-izolacyjnych oraz części maszyn i urządzeń emitujących hałas do środowiska. Przedstawiono wyniki wybranych symulacji numerycznych, które są punktem wyjściowym do opracowania wspomnianych układów.

### Sterowanie aktywnym układem dźwiękochłonno-izolacyjnym z wykorzystaniem sieci neuronowej i algorytmu genetycznego

Wymuszone drgania struktur inteligentnych mają charakter nieliniowy, bo stosowane czujniki i przetworniki są często przesterowane odbieranymi sygnałami wykorzystywanymi do aktywnej kompensacji hałasu. Obniżenie poziomu dźwięku wymaga zastosowania nieliniowych technik sterowania [5]. Do tego typu technik zalicza się m.in. algorytm wykorzystujący sieci neuronowe. Jedną z podstawowych właściwości

sieci neuronowych jest ich zdolność uczenia się i uogólniania nabytej wiedzy. W zastosowaniach sieci neuronowych w systemach ARHD wiedza ta jest wykorzystywana do generowania przez sieć sygnału sterującego strukturą inteligentną, przy czym sygnał ten jest generowany na podstawie pomiarów ciśnienia akustycznego lub przyspieszenia drgań emitowanych przez układ dźwiękochłonno-izolacyjny.

Wspomniane problemy dotyczące praktycznego zastosowania materiałów i struktur inteligentnych w układach ARHD są trudne do rozwiązania przy użyciu typowych metod uczenia sieci neuronowych. Z tego względu na uczenie sieci neuronowej konieczne jest zastosowanie metod losowego przeszukiwania przestrzeni dostępnych rozwiązań, np. algorytmów genetycznych.

Algorytmy genetyczne (AG) są metodami optymalizacji globalnej, wzorowanymi na systemach biologicznych. Działanie AG opiera się na wykorzystaniu mechanizmów doboru naturalnego i dziedziczenia. Zaadaptowanie AG do rozpatrywanych procesów obróbki sygnałów wibroakustycznych (z uwzględnieniem sieci neuronowej i jej uczenia się) wynika z ogólnej analogii mechanizmów rozpatrywanych procesów, tj. stosując algorytm genetyczny przyporządkowuje się odpowiednim elementom biologicznym odpowiednie elementy fizyczne (parametry, charakterystyki czy wielkości fizyczne).

AG charakteryzują się dużą efektywnością dla wielowymiarowych problemów optymalizacji. Algorytmy te operują na zbiorach zakodowanych parametrów zadania optymalizacji (tzw. osobnikach lub chromosomach), wykonując cykliczne operacje selekcji, krzyżowania i mutacji [6, 7]. W procesie uczenia sieci neuronowej zakodowanymi parametrami są połączenia międzyneuronowe sieci (tzw. wagi). Połączenia te są reprezentowane przez wartości liczbowe. Zwiększenie wartości liczbowej odpowiada wzmocnieniu połączenia pomiędzy poszczególnymi neuronami. Uczenie sieci neuronowej sprowadza się zatem do odpowiedniego doboru wartości połączeń międzyneuronowych.

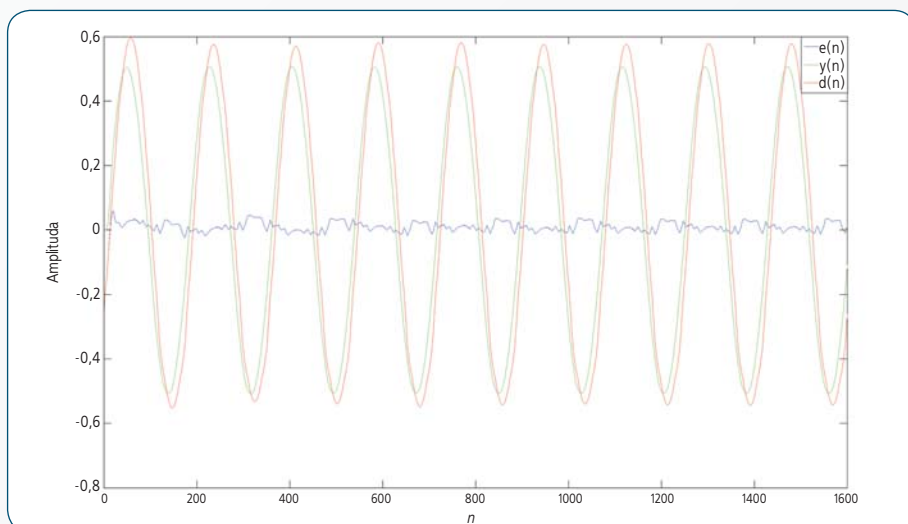
### Symulacje numeryczne

W trakcie badań realizowanych w Pracowni Aktywnych Metod Redukcji Hałasu CIOP-PIB przeprowadzono symulacje numeryczne działania systemu ARHD wykorzystującego sieć neuronową i algorytm genetyczny.

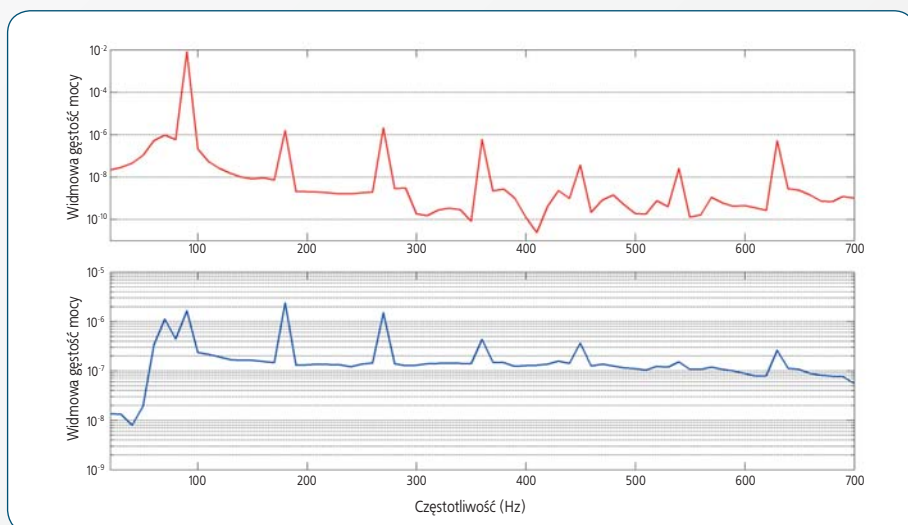
Na rys. 1. pokazano schemat blokowy modelu obliczeniowego systemu ARHD. Modele pierwotnej (P) i wtórnej ścieżki (S) sygnału wyznaczono z wykorzystaniem technik identyfikacji systemów, tj. modelowania układów fizycznych z wykorzystaniem ogólnych modeli i metod optymalizacji.

Symulacje numeryczne działania układu aktywnej redukcji hałasu wykonano z wykorzystaniem sygnałów zarejestrowanych w układzie rzeczywistym będącym częścią stanowiska laboratoryjnego znajdującego się w Pracowni Aktywnych Metod Redukcji Hałasu CIOP-PIB (rys. 2.).

Źródłem sygnału odniesienia był głośnik w obudowie podłączony do wzmacniacza mocy



Rys. 3. Przebiegi czasowe sygnałów w symulacjach numerycznych działania układu dźwiękochłonna-izolacyjnego, odpowiedź układu  $d(n)$  (linia czerwona), odpowiedź sieci neuronowej  $y(n)$  (linia zielona), sygnał błędny  $e(n)$  (linia granatowa)  
 Fig. 3. Timings of smart structure based active noise and vibration control numerical simulation, primary path output signal (red), neural network response (green), error signal (navy blue)



Rys. 4. Analiza częstotliwościowa: sygnał kompensowany (linia czerwona), sygnał błędny (linia granatowa)  
 Fig. 4. Frequency analysis: primary output signal (red), error signal (navy blue)

pobudzanego z generatora sygnału sinusoidalnego. Wyjście generatora było podłączone do karty pomiarowej. Drugie z wejść karty pomiarowej podłączono do mikrofonu, którego zadaniem było rejestrowanie sygnału kompensowanego  $d(n)$  na wyjściu falowodu.

Podczas badań głośnik był pobudzany sygnałami o dużej amplitudzie, tak aby uzyskać nieliniowe drgania przegrody, zbliżone do drgań występujących w warunkach rzeczywistych.

Zadaniem algorytmu genetycznego jest taki dobór połączeń międzyneuronowych, aby wartość średniokwadratowa  $E$  obliczanego sygnału błędny  $e(n)$  była jak najmniejsza.

Na rys. 3. i 4. przedstawiono wyniki symulacji numerycznych działania systemu ARHD wykorzystującego przedstawiony algorytm sterowania.

Z przeprowadzonych symulacji wynika (rys. 3.), że zastosowanie omówionego algorytmu sterowania powinno pozwolić na zmniejszenie poziomu

energii sygnału kompensowanego o około 20 dB, co w świetle obecności zjawisk nieliniowych jest wynikiem zadowalającym. Analiza widmowa sygnału kompensującego i kompensowanego (rys. 4.) pokazuje natomiast, że algorytm sterowania jest w stanie skompensować nie tylko składową podstawową sygnału kompensowanego ale także wyższe harmoniczne powstałe na skutek zjawisk nieliniowych.

### Podsumowanie

Jednym z problemów aplikacyjnych aktywnych układów dźwiękochłonna-izolacyjnych jest zapewnienie ich wysokiej skuteczności, gdy poddawane są działaniu przenoszonych drogą powietrzną drgań o wysokiej amplitudzie. W przypadku dużych amplitud drgań układy dźwiękochłonna-izolacyjne wykazują zachowania nieliniowe, co wymaga stosowania

nieliniowych technik sterowania. Przedstawione badania symulacyjne pokazują, że zastosowanie sieci neuronowych oraz algorytmu genetycznego do sterowania aktywnym układem dźwiękochłonna-izolacyjnym może zapewnić wysoką skuteczność redukcji emitowanego dźwięku dla nieliniowych zakresów pracy układu. W wyniku doboru parametrów sieci neuronowej z użyciem algorytmu genetycznego uzyskano zmniejszenie średniej wartości kwadratu błędny o 20 dB.

W świetle występowania zjawisk nieliniowych na drodze propagacji dźwięku można stwierdzić, że przedstawiony algorytm sterowania aktywnymi układami dźwiękochłonna-izolacyjnymi zapewni ich dużą efektywność. Konieczne jest prowadzenie dalszych prac, zmierzających do opracowania aktywnego ustroju dźwiękochłonna-izolacyjnego. Opracowanie ustroju pozwoli na konstruowanie nowych technicznych zabezpieczeń przeciwhałasowych. Charakterystycznymi właściwościami zabezpieczeń przeciwhałasowych wykorzystujących aktywne układy dźwiękochłonna-izolacyjne będą niewielka masa oraz wysoka skuteczność w zakresie niskich częstotliwości.

### PIŚMIENNICTWO

- [1] Engel Z., Makarewicz G., Morzyński L., Zawieska W.M. *Metody aktywne redukcji hałasu*. CIOP, Warszawa 2001
- [2] Engel Z., Sikora J. *Obudowy dźwiękochłonna-izolacyjne: podstawy projektowania i stosowania*. AGH, Kraków 1998
- [3] Górski P., Kozupa M. *Noise reduction using an active structure of variable sound insulation*. Proc. of Noise Control 2010, 6-9 June, Zamek Książ, Wałbrzych
- [4] Kurnik W., Tylikowski A. *Mechanika elementów laminowanych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997
- [5] Krukowicz T. *Active noise control algorithm based on a neural network and nonlinear input-output system identification model* "Archives of Acoustics" 2010, 35, 2:191-202
- [6] Makarewicz G. *Genetic algorithm – based active noise control systems – simulations using Internet*. "Archives of Acoustics" 2004, 29, 2:177-189
- [7] Morzyński L., Mikulski W. *Opracowanie algorytmów genetycznych do minimalizacji ryzyka zawodowego związanego z ekspozycją na hałas w przedsiębiorstwach produkcyjnych*; Etapy 1-3: Sprawozdania z realizacji projektu 2.R.18, CIOP-PIB, Warszawa 2008-2010
- [8] Moheimani S.O.R. & Fleming A.J. *Piezoelectric Transducers for Vibration Control and Damping*. Springer-Verlag 2006
- [9] Pietrzakowski M. *Warstwy piezoelektryczne w sterowaniu wybranymi postaciami drgań*. Zbiór referatów II Szkoły „Aktywne metody redukcji drgań i hałasu”, Kraków-Zakopane 1995
- [10] Tokhi M.O. *Intelligent methods for active noise and vibration control*. Proc. of the 13th Intern. Conference: Noise Control'04, Gdynia, Poland 2004

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