

Instytut Automatyki  
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki  
Politechnika Śląska w Gliwicach

## **Active control of sound with a vibrating plate**

**Aktywne sterowanie dźwiękiem  
z zastosowaniem drgającej płyty**

Autoreferat rozprawy doktorskiej

**Krzysztof Mazur**

Promotor  
dr hab. inż. Marek Pawełczyk, prof. Pol. Śl.

Gliwice, listopad 2013

# 1 Wprowadzenie

Hałas jest jednym z najczęściej występujących zagrożeń w środowisku przemysłowym. Przy dużych poziomach ciśnienia akustycznego może on powodować ubytki słuchu, a także inne negatywne skutki zdrowotne. Redukcja hałasu jest więc istotna z punktu widzenia ochrony zdrowia ludzi. Hałas jest zwykle definiowany jako wszelki dźwięk niepożądany. Jest to zjawisko powszechne. Dla poprawy komfortu akustycznego istotna jest także jego redukcja przy niższych poziomach ciśnienia akustycznego.

Istnieje wiele metod redukcji hałasu. Tam, gdzie jest to możliwe, stosowana jest redukcja hałasu generowanego bezpośrednio przez urządzenie. Można tego dokonać zmieniając parametry obiektu lub zmieniając zasadę działania urządzenia. W przypadku, gdy jest to niewystarczające, stosuje się metody pasywne polegające na odpowiednim kształtowaniu propagacji i pochłaniania dźwięku. Przykładowo, można umieścić barierę dźwięko-izolacyjną pomiędzy źródłem hałasu, a otoczeniem. Metody pasywne mają jednak istotne ograniczenia. Są one mało efektywne dla niskich częstotliwości (Nelson & Elliott, 1993). Muszą być wówczas bardzo grube dla efektywnej redukcji. Ograniczają one zwykle także wymianę ciepła, co ma istotne znaczenia dla niektórych aplikacji, np. turbogeneratorów.

Hałas można redukować także metodami aktywnymi, gdzie redukcję hałasu uzyskuje się za pomocą odpowiedniego dodawania energii do układu. Działanie tych metod zwykle jest tłumaczone poprzez interferencję fal. Fala pochodząca od pierwotnego źródła hałasu interferuje z falą pochodzącą od źródła wtórnego, w idealnym przypadku tworząc ciszę. Typowe układy aktywnej redukcji hałasu, jako źródło wtórne wykorzystują klasyczne głośniki. Istotnym problemem w zastosowaniu tych metod w środowisku przemysłowym są warunki pracy głośników.

Jednym z alternatywnych źródeł dźwięku są głośniki zbudowane z płyt odpor-nych na trudne warunki pracy. Płyty takie mogą być wprawione w drgania za pomocą wzbudników elektrodynamicznych lub piezoelektrycznych. W stosunku do klasycznych głośników, takie płyty mogą być umieszczone pomiędzy źródłem hałasu, a miejscem gdzie hałas ma być zredukowany. Pracują one wtedy jako aktywne bariery akustyczne. Możliwe jest także użycie już istniejącej bariery pasywnej, którą stanowi obudowa urządzenia.

W pewnych przypadkach korzystne jest zbudowanie bariery aktywnej z kilku równoległych płyt (Pietrzko, 2009). Rozważane są także konstrukcje prostopadłościenne z dwoma (Wiciak, 2008), czterema (Liu *et al.*, 2010) lub pięcioma ścianami (Paweł-

czyk, 2013), które mogą służyć do izolacji akustycznej urządzenia w wielu kierunkach. Płyty są stosowane w obudowach wielu urządzeń, dla których korzystne byłoby stosowanie metod aktywnych, np. transformatorów (Rdzanek & Zawieska, 2003). Tak więc, w wielu przypadkach nie jest konieczne stosowanie dodatkowej obudowy.

W przypadku redukcji hałasu przechodzącego przez drgającą płytę, poza metodami aktywnymi stosuje się także inne metody. Można zastosować mechaniczne tłumiki drgań (Carneal *et al.*, 2004). Możliwa jest także zamiana energii drgań na energię elektryczną, a następnie dyssypacja energii w odpowiednio dostrojonych układach RLC (Tawfik & Baz, 2004; Pietrzko, 2009). Technika ta nazywana jest bocznikowaniem (shunt). Dalszą poprawę można uzyskać za pomocą metod półaktywnych modyfikujących parametry układu RLC, przykładowo poprzez sterowanie wyłączaniem poszczególnych gałęzi kluczami tranzystorowymi. W literaturze rozpatrywane są także układy odzyskiwania energii drgań (Kowal *et al.*, 2008).

W przypadku, gdy zastosowanie innych metod jest niemożliwe lub nieopłacalne, powszechnie stosowane są personalne ochronniki słuchu w postaci naszników lub wkładek dousznych. Istotną wadą ochronników pasywnych jest to, że redukują także dźwięk pożądaný oraz posiadają niskie tłumienie dla niskich częstotliwości. Obie te wady można wyeliminować poprzez zastosowanie w ochronniku metod aktywnych oraz zapewnienia komunikacji drogą radiową (Latos, 2011).

## 2 Cel i teza pracy

Niniejsza rozprawa doktorska koncentruje się na wybranych problemach występujących w aktywnym sterowaniu dźwiękiem z wykorzystaniem płyt drgających. W szczególności rozważa problemy z nieliniowością, z wpływem temperatury, a także wynikające z potencjalnego zastosowania płyt drgających w większych układach aktywnej redukcji hałasu w halach przemysłowych.

Teza pracy sformułowana jest następująco:

**Nieliniowy adaptacyjny system sterowania drganiami płyty, z kształtowaniem odpowiedzi częstotliwościowej, kompensacją wpływu temperatury oraz z układem dystrybucji sygnału sterującego do wielu elementów wykonawczych, umożliwia zwiększenie poziomu redukcji hałasu propagowanego przez płytę w stosunku do klasycznych liniowych systemów sterowania.**

### 3 Zawartość pracy

Rozprawa podzielona jest na siedem rozdziałów. Pierwszy zawiera wprowadzenie oraz przegląd popularnych algorytmów stosowanych do aktywnej redukcji hałasu i drgań.

Rozdział 2 opisuje algorytmy adaptacyjne w strukturze kompensacyjnej zastosowane do aktywnej redukcji hałasu przechodzącego przez płytę i sterowania drganiami płyty. Rozpatrzone są różne bezpośrednie cele sterowania, między innymi redukcja drgań płyty oraz hałasu mierzonego przez mikrofony błędu.

W rozdziale 3 rozpatrzony jest problem sterowania emisją dźwięku z płyty. Zastosowane są algorytmy adaptacyjne w strukturze otwartej bazujące na pomiarze emisji dźwięku. Dodatkowo zaproponowana jest idea stosowania pomiaru przyspieszenia zamiast pomiaru emisji dźwięku.

W rozdziale 4 rozpatrzony jest problem nieliniowości obiektu. Główna uwaga jest skupiona na układach nieliniowej kompensacji. Układy te są zastosowane zarówno do aktywnej redukcji hałasu, jak i do sterowania emisją dźwięku.

Rozdział 5 opisuje strukturę dwuwarstwową adaptacyjnego układu redukcji hałasu. Nieznacznie zmodyfikowane algorytmy, wcześniej stosowane do sterowania emisją dźwięku, zastosowane są do uproszczenia płyty z wieloma elementami wykonawczymi do obiektu o jednym wejściu. Następnie płyta z takim układem sterowania jest wykorzystywana przez warstwę aktywnej redukcji hałasu.

W rozdziale 6 zaprezentowano wyniki badania wpływu temperatury na charakterystyki płyty oraz działanie układu aktywnej redukcji hałasu. Rozpatrzony jest problem zbieżności algorytmu FXLMS (*Filtered-Reference Least Mean Squares*).

Rozdział 7 zawiera wnioski oraz podsumowanie wkładu autora.

Załącznik A zawiera definicje stosowanych wskaźników oceny pracy układów sterowania.

#### 3.1 Sterowanie emisją dźwięku

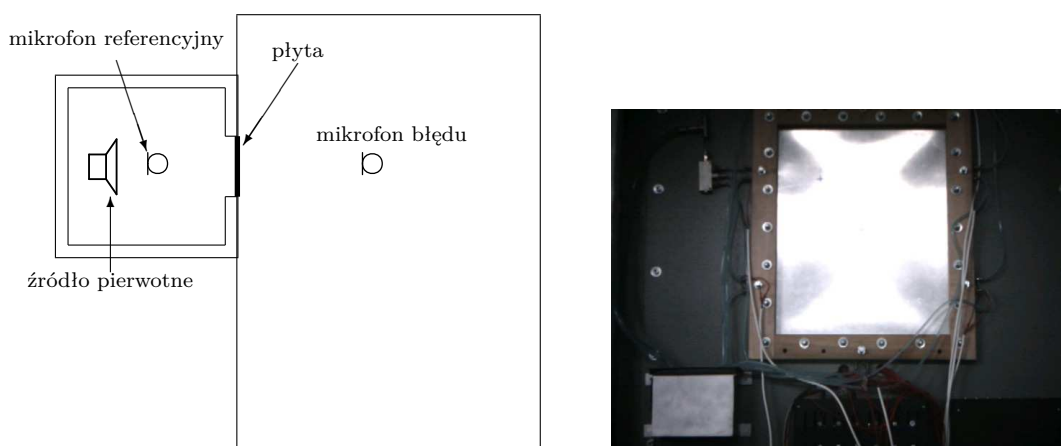
Płyty drgające mogą służyć jako źródła dźwięku. Mogą być stosowane w warunkach przemysłowych, gdzie źródło dźwięku pracuje w wysokich temperaturach, wysokiej wilgotności oraz zapyleniu. W takich warunkach klasyczne głośniki membranowe nie mogą być bezpośrednio stosowane.

Płyty drgające mają jednak dużo gorsze charakterystyki w porównaniu do głośników membranowych, ale z odpowiednim sterowaniem mogą być wystarczające do generacji sygnałów ostrzegawczych, przekazu mowy oraz aktywnej redukcji hałasu.

Charakterystykę płyty można zmienić za pomocą modyfikacji konstrukcyjnych, takich jak zmiana wymiarów, kształtu, zmiana materiału, lokalne zmiany właściwości materiału. Z punktu widzenia sterowania płytą istotne też są modyfikacje polegające na odpowiednim doborze położenia elementów wykonawczych (Wrona & Pawełczyk, 2013a) oraz pomiarowych na płycie (Wrona & Pawełczyk, 2013b).

Drugą możliwością zmian charakterystyki jest dodanie do płyty układu sterującego wymuszającego pożądane właściwości (Mazur & Pawełczyk, 2011e, 2012b). Możliwości sterowania w ten sposób są jednak ograniczone poprzez konstrukcję płyty.

Rysunek 1 przedstawia stanowisko laboratoryjne używane do badań. Fragment jednej ze ścian laboratorium stanowi aluminiowa płyta o wymiarach 40 cm × 50 cm i grubości 1 mm. Oddziela ona laboratorium od dodatkowej komory akustycznej. Do pomiaru dźwięku w wybranym punkcie pomieszczenia stosowany jest mikrofon oznaczany jako mikrofon błędu.

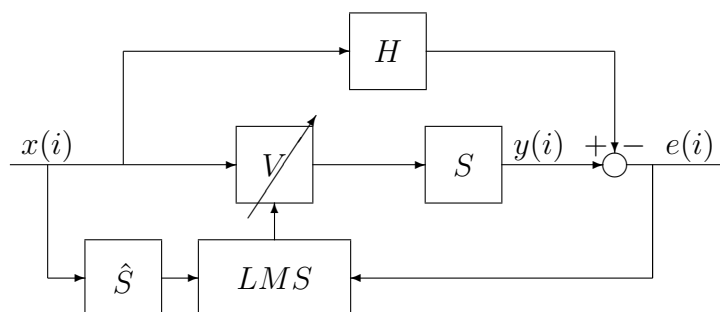


Rysunek 1: Stanowisko laboratoryjne.

W przypadku układów sterownia dźwiękiem, które mają działać z sygnałami szerokopasmowymi najczęściej stosuje się strukturę kompensacji równoległej (feedforward). Dla układów działających w pomieszczeniach tory elektroakustyczne zwykle się zmieniają w czasie z powodu poruszania się obiektów. W przypadku płyt drgających, istotnym powodem zmian torów elektroakustycznych są także zmiany temperatury (Mazur & Pawełczyk, 2011a). Tak więc zwykle najodpowiedniejsze jest zastosowanie sterowania adaptacyjnego. W systemach adaptacyjnych sterowanie obliczane jest jako wynik filtracji sygnału referencyjnego poprzez filtr adaptacyjny. Typowo stosowanym algorytmem z tej grupy jest algorytm Filtered-reference LMS (FXLMS).

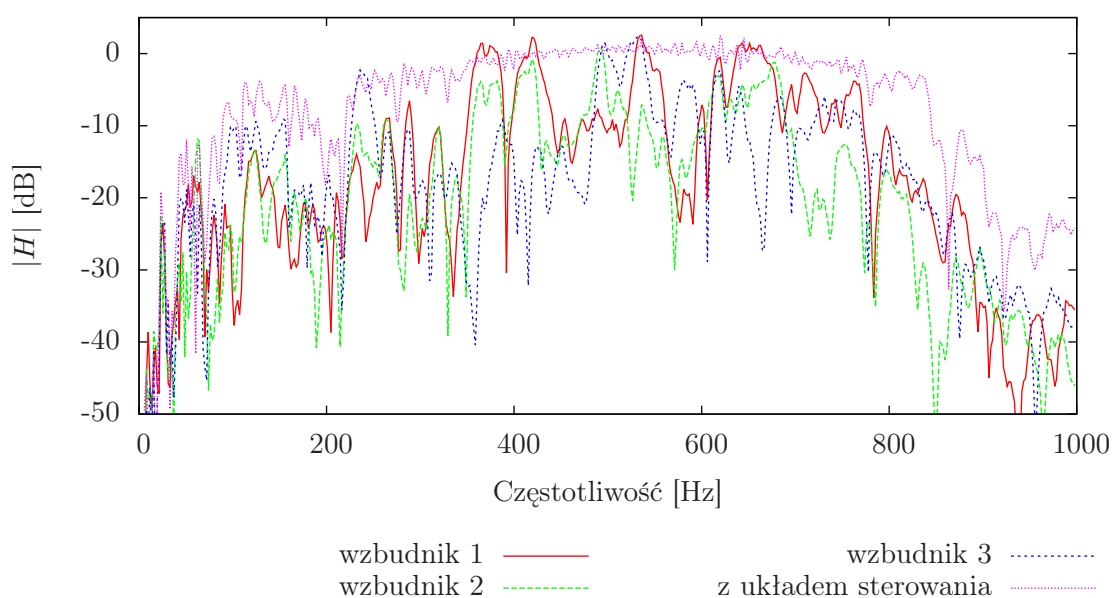
Struktura jednokanałowego układu sterowania płytą została zaprezentowana na

rysunku 2. Sygnał wejściowy  $x(i)$  jest filtrowany za pomocą filtru adaptacyjnego  $V$ , a następnie steruje torem elektroakustycznym  $S$ . Emitowany mierzony dźwięk jest porównywany z sygnałem referencyjnym przefiltrowanym za pomocą modelu referencyjnego  $H$ . Wynik tego porównania jest następnie używany przez algorytm FXLMS do adaptacji filtru sterującego. Układ taki może być rozszerzony na wiele torów wtórnych oraz wiele sygnałów błęd.



Rysunek 2: Adaptacyjny układ sterowania emisją dźwięku.

Rysunek 3 przedstawia porównanie charakterystyk amplitudowych dla torów z poszczególnymi wzbudnikami EX-1 oraz po zastosowaniu układu sterowania dla przyjętego modelu referencyjnego w postaci samego opóźnienia równego 32 okresy próbkowania. Większe opóźnienia pozwalają na uzyskanie jeszcze lepszych wyników.

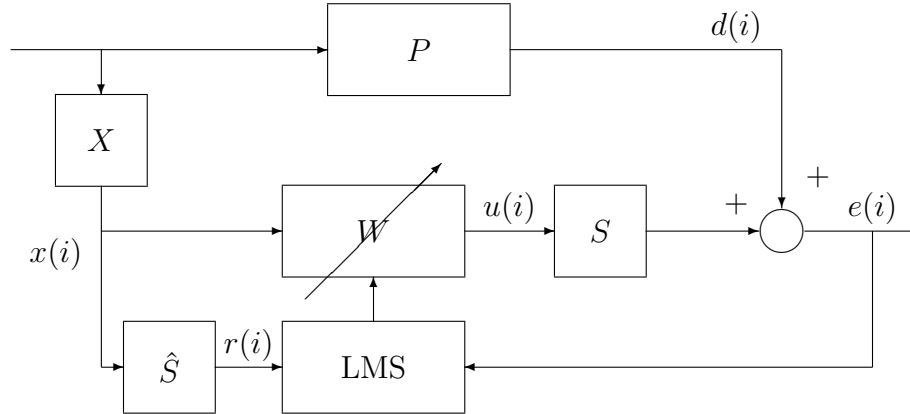


Rysunek 3: Charakterystyka amplitudowa dla różnych torów wtórnych dla poszczególnych wzbudników EX-1 oraz charakterystyka dla płyty w układzie sterowania.

Podobny układ można zastosować bazując na pomiarze wibracji (Mazur & Pawełczyk, 2011b). Dodatkowo za pomocą nieliniowych filtrów sterujących można poprawić liniowość takiego źródła (Mazur & Pawełczyk, 2011c,d).

### 3.2 Aktywna redukcja hałasu

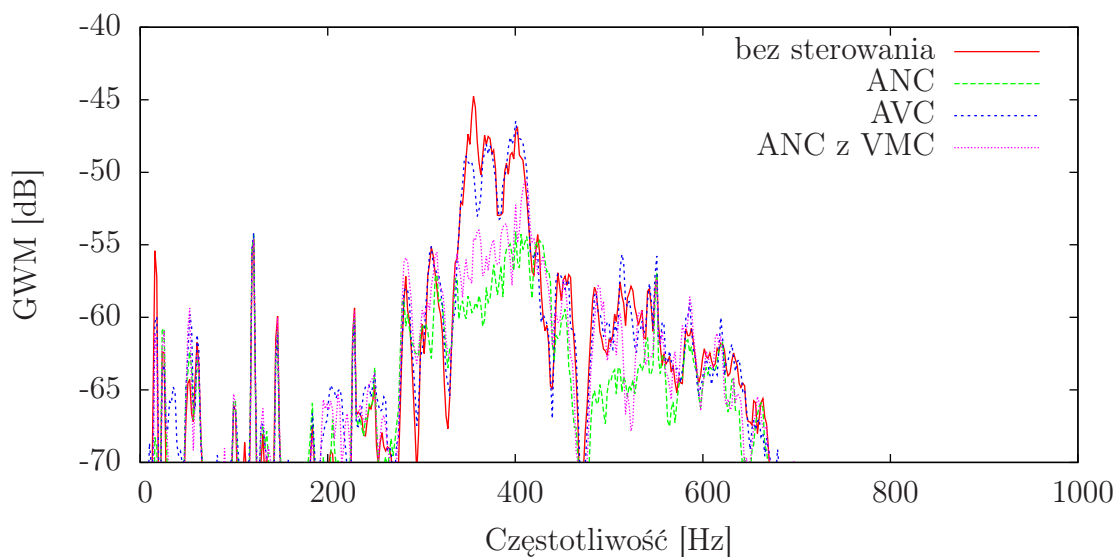
Podstawowym rozważanym zastosowaniem jest użycie płyt do aktywnej redukcji hałasu, głównie dla struktury redukcji hałasu przechodzącego przez płytę. Branych pod uwagę było bardzo wiele metod sterowania płytą (Elliott, 2001; Fahy & Gardonio, 2007). Jednym z typowych rozwiązań dla aktywnej redukcji hałasu jest struktura kompensacji zakłóceń z adaptacyjnym liniowym filtrem FIR (*Finite Impulse Response*) (rysunek 4). Innymi rozważanymi w literaturze grupami algorytmów są LQG (Leniowska, 2006), układy ze sprzężeniem zwrotnym w strukturze IMC (Pawełczyk, 2005), filtry Notch (Górski & Kozupa, 2012), regulatory bazujące na strukturze RST (Leniowska, 2011), czy proste klasyczne układy ze sprzężeniem zwrotnym (Petitjean & Legrain, 1996).



Rysunek 4: Jednokanałowy układ redukcji hałasu wykorzystujący algorytm FXLMS.

Rysunek 5 przedstawia gęstość widmową mocy hałasu mierzoną przez mikrofon dla różnych celów układu sterowania. Układ aktywnej redukcji hałasu (ANC) bezpośrednio redukujący hałas mierzony przez ten mikrofon zapewnia dużo większą redukcję, niż układ projektowany w celu redukcji samych drgań płyty (AVC). Układ ANC jednak tworzy tylko lokalną strefę ciszy, poza którą hałas jest nawet wzmacniany. Układy AVC są z kolei efektywne tylko dla częstotliwości bliskim rezonansom płyty (Fahy & Gardonio, 2007).

Gdy generacja lokalnych stref ciszy jest wystarczająca, a umieszczenie w danym miejscu mikrofonu błędu jest niekorzystne, możliwe jest przybliżenie działania takiego

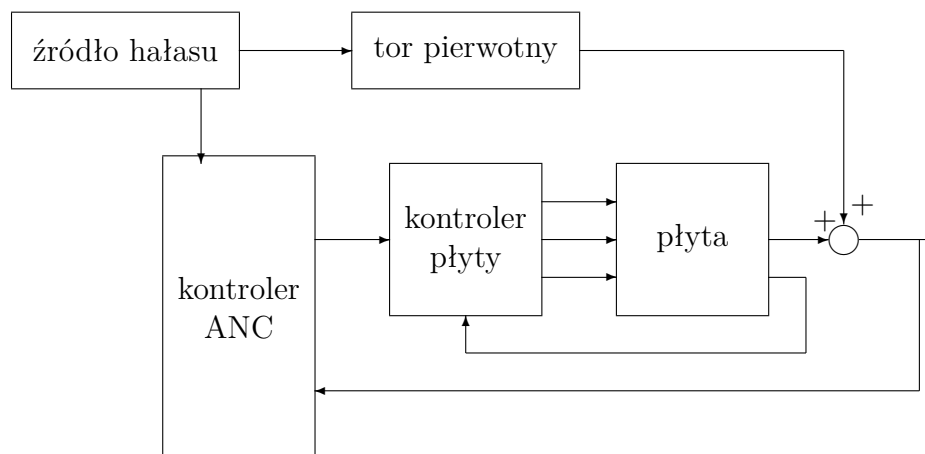


Rysunek 5: Porównanie działania różnych układów dla hałasu szerokopasmowego w zakresie od 300 Hz do 550 Hz.

układu za pomocą układu z mikrofonami wirtualnymi (VMC). Układ taki w czasie pracy wykorzystuje tylko pomiar przyspieszenia, tak jak układ AVC (Mazur & Pawełczyk, 2012a). W pewnych przypadkach połączenie AVC i ANC może poprawić średnią redukcję na stosunkowo dużym obszarze, większym od długości fali (Mazur & Pawełczyk, 2010b).

### 3.3 Dwuwarstwowa struktura układu aktywnej redukcji hałasu

Rysunek 6 pokazuje ideowy schemat dwuwarstwowej struktury sterowania z płytą drgającą. Struktura ta została zaproponowana dla celów budowy bardziej złożonych systemów aktywnej redukcji hałasu wykorzystujących wiele płyt. Ze względu na to, że na pojedynczej płycie zwykle stosuje się wiele elementów wykonawczych, całkowita liczba elementów wykonawczych w takim zastosowaniu może być bardzo duża. Korzystne jest wtedy uwzględnienie w układzie aktywnej redukcji hałasu tylko poszczególnych płyt, a sterowanie wieloma elementami wykonawczymi pozostawić dedykowanym układom sterowania w warstwie bezpośredniej.



Rysunek 6: Dwuwarstwowy układ aktywnej redukcji hałasu

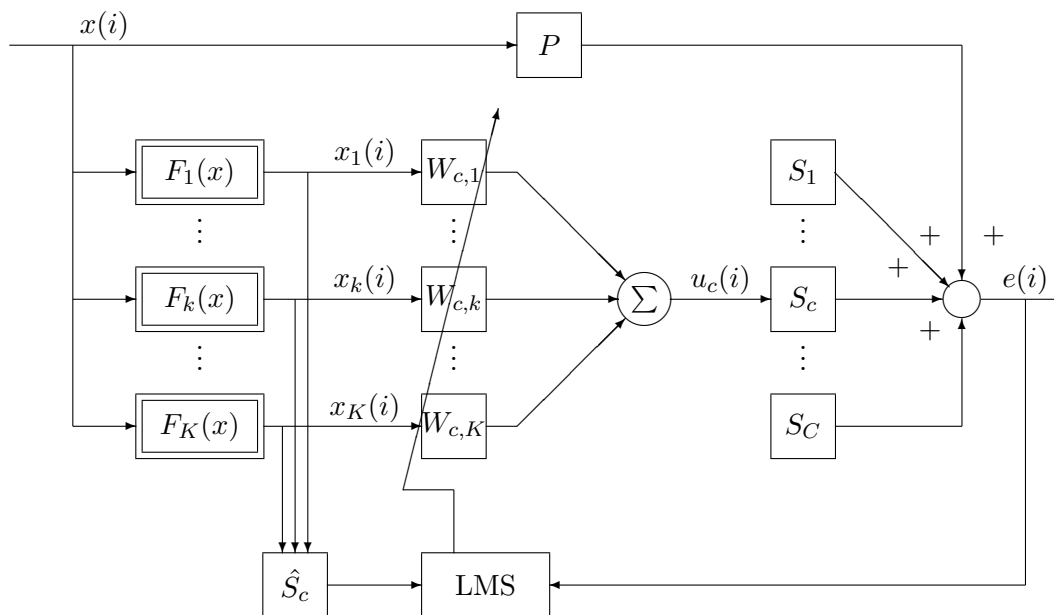
### 3.4 Kompensacja nieliniowa

Istotnym problemem jest nieliniowość płyt związana z samymi drganiami płyty, jak i z zastosowaniem nieliniowanych elementów wykonawczych, takich jak elementy MFC (Stuebner *et al.*, 2009). Jednym z rozważanych metod rozwiązania tego problemu jest zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (Hansen & Snyder, 1997). Z powodu dużej złożoności obliczeniowej oraz trudności w adaptacji w przypadku aktywnej redukcji hałasu stosowane zwykle są dużo prostsze struktury nieliniowe, między innymi filtry Volterry, FSLMS, czy Generalized FLANN (George & Panda, 2013).

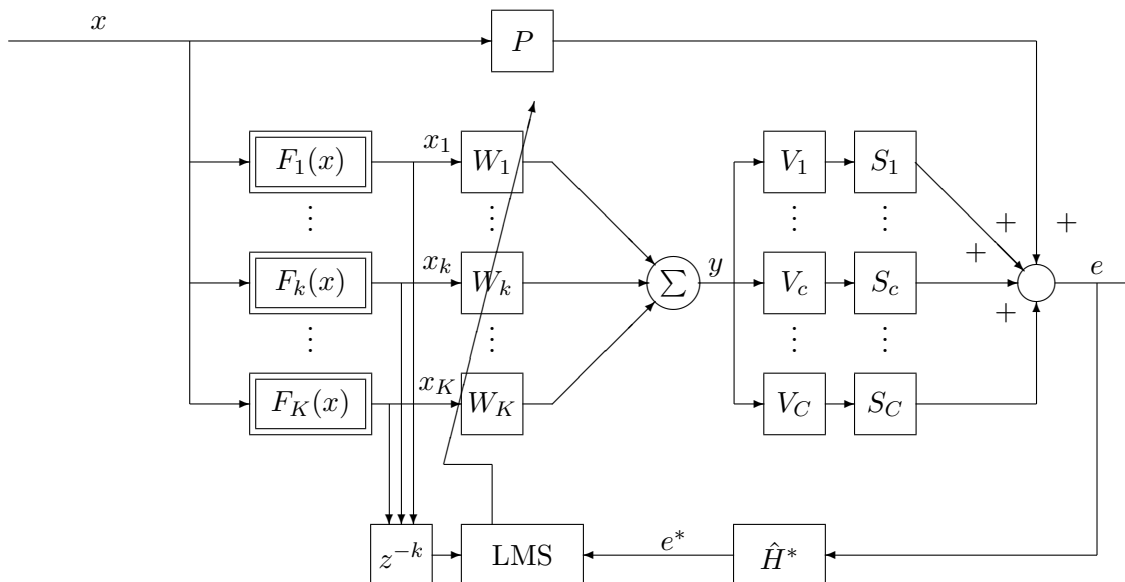
Rysunek 7 przedstawia schemat blokowy zastosowanego rozwiązania. Sygnał referencyjny jest przetwarzany przez zestaw filtrów nieliniowych o stałych parametrach. Tak uzyskane sygnały są następnie filtrowane przez liniowe filtry sterujące. Do adaptacji filtrów zastosowany jest tutaj algorytm FXLMS, natomiast z powodu istnienia wielu sygnałów referencyjnych korzystne jest zastosowanie struktury z filtracją sygnału błędu (FELMS), zamiast z filtracją sygnału odniesienia (FXLMS) (Mazur & Pawełczyk, 2012c, 2013c).

Struktura z filtracją sygnału błędu zmniejsza liczbę potrzebnych operacji filtracji sygnału referencyjnego. Natomiast w przypadku wielu elementów wykonawczych na pojedynczej płycie stosowane jest wiele kosztownych obliczeniowo filtrów nieliniowych. Ta niedogodność może być wyeliminowana poprzez zastosowanie nieliniowego układu ANC na płycie z odpowiednim układem sterowania zapewniającym sterowanie poszczególnych wzbudników (Mazur & Pawełczyk, 2013a,b).

Powstały układ prezentuje rysunek 8. Wyjście funkcji nieliniowej jest filtrowane przez filtry  $V_c$ , odpowiednie dla każdego wzbudnika. W zależności od wyboru filtru



Rysunek 7: Fragment układu aktywnej redukcji hałasu z nieliniowymi filtrami sterującymi Hammersteina i algorytmem FXLMS dla  $c$ -tego kanału.

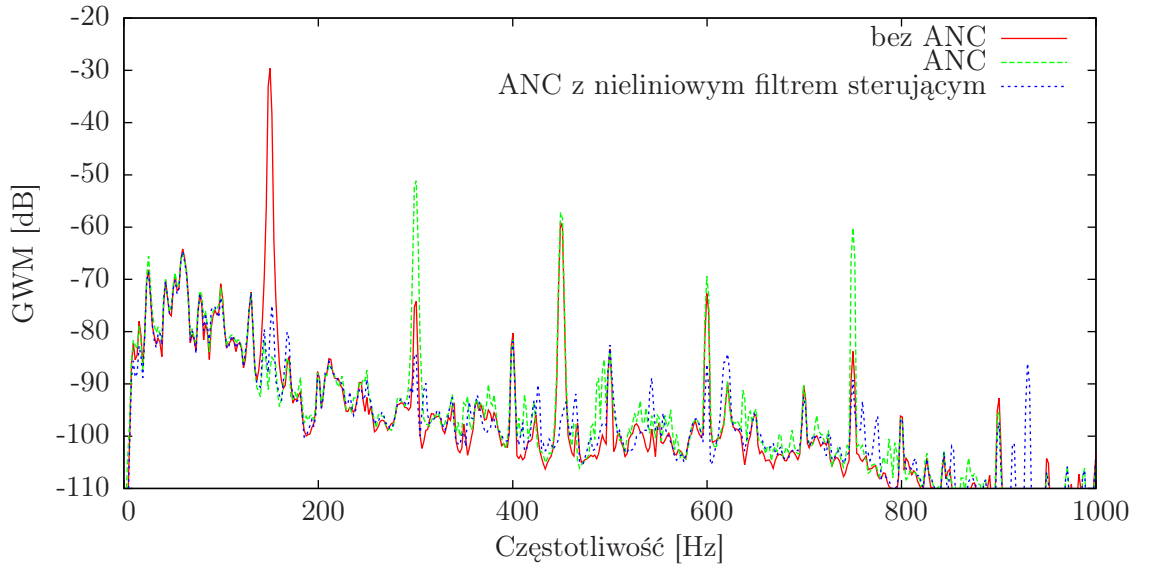


Rysunek 8: Układ aktywnej redukcji hałasu z nieliniowymi filtrami Hammersteina w strukturze dwuwarstwowej.

$V_c$ , filtracja błędu poprzez  $\hat{H}^*$  może być wymagana. W proponowanym systemie jest ona pominięta, ponieważ filtry  $V_c$  są dobrane tak, by linearyzować odpowiedź fazową płyty — wprowadzać stałe opóźnienie.

Rysunek 9 przedstawia wyniki redukcji hałasu dla układu sterowania z liniowym filtrem sterującym oraz proponowanego układu zaprezentowanego na rysunku 8. Pożądana odpowiedź  $H$  jest równa  $z^{-16}$ . Rząd filtra liniowego  $V$  został ustawiony na  $N_V = 256$ , a filtra sterującego na  $N = 256$ . Pierwsze pięć wyrazów rozwinięcia trygonometrycznego stosowanego w algorytmie FSLMS było użyte jako funkcje  $F_k$ .

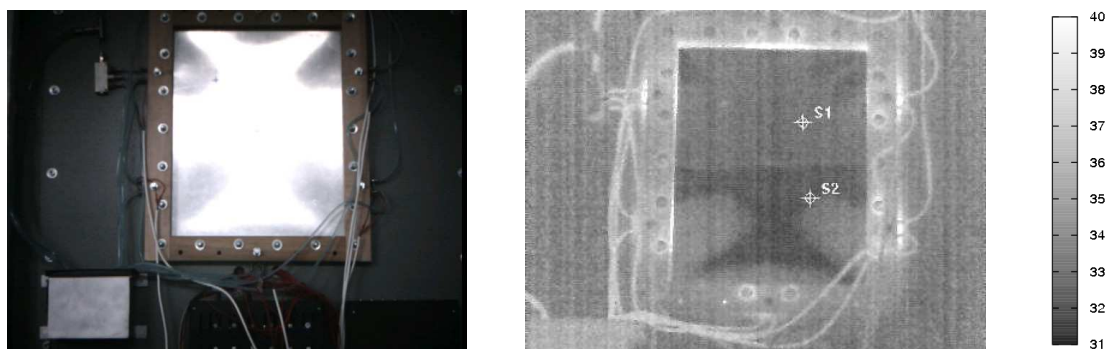
Algorytm FXLMS z liniowym filtrem sterującym uzyskuje redukcję na poziomie 18.9 dB, ale po zastosowaniu krzywej korekcyjnej A wartość ta spada do 11.0 dB, ponieważ wprowadzane są harmoniczne o częstotliwościach, na które ludzkie ucho jest bardziej czułe. Układ nieliniowy zapewnia redukcję na poziomie 28.3 dB oraz 30.6 dB po zastosowaniu krzywej korekcyjnej A.



Rysunek 9: Gęstość widmowa mocy sygnału z mikrofonu błędu dla różnych układów sterowania, dla hałasu tonalnego 155 Hz.

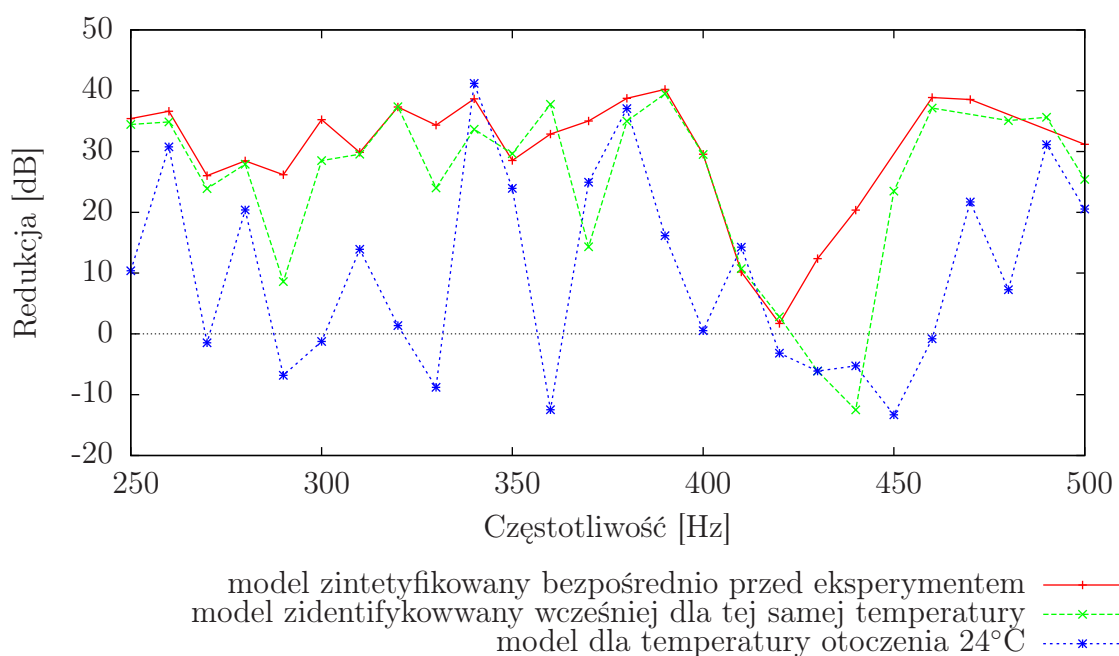
### 3.5 Wpływ temperatury

W przypadku sztywno zamocowanych płyt zauważono, że bardzo istotny wpływ na charakterystyki płyty ma temperatura (Mazur & Pawełczyk, 2010a, 2011a). Do badań nad wpływem temperatury zastosowano stanowisko laboratoryjne z regulacją temperatury płyty za pomocą ogniw Peltiera (rysunek 10).



Rysunek 10: Płyta przy temperaturze  $32^{\circ}\text{C}$  (strona lewa), oraz jej obraz w podczerwieni zamieniony na przybliżoną temperaturę oraz położenia czujników temperatury (strona prawa).

Zmiany te są na tyle istotne, że algorytm FXLMS bez adaptacji toru wtórnego nie jest zawsze zbieżny (rysunek 11). W celu zachowania zbieżności konieczna jest adaptacja toru wtórnego. Zwykle w takich przypadkach stosuje się identyfikację on-line (Kuo & Morgan, 1996). Natomiast, zadowalające rezultaty uzyskano za pomocą podejścia typu gain-scheduling z wyborem modelu na podstawie pomiaru temperatury.



Rysunek 11: Wyniki redukcji hałasu tonalnego dla temperatury  $28^{\circ}\text{C}$  (zastosowano algorytm FXLMS z wyciekem).

## 4 Podsumowanie

W rozprawie wykazano, że zaproponowane metody mogą być z powodzeniem stosowane do sterowania dźwiękiem za pomocą płyty drgającej. Skupiono się głównie na problemie aktywnej redukcji hałasu, gdzie pożądanym stanem jest cisza. Natomiast te same algorytmy mogą być stosowane dla znanego sygnału zadanego. Dla przykładu, zastosowano je dla sterowania emisją dźwięku z płyty.

Zauważono, że dla sztywno umocowanej płyty, temperatura ma istotny wpływ na jej odpowiedź. Zmiany te są wystarczające do rozbieżności algorytmu FXLMS. Adaptacja modelu toru wtórnego jest konieczna. Algorytm wyboru modelu spośród wcześniej zidentyfikowanych na bazie mierzonej temperatury płyty został zaproponowany jako prostsza alternatywa dla zwykle używanej identyfikacji on-line toru wtórnego.

Skuteczność systemu aktywnej redukcji hałasu z liniowym kompensatorem dla prostych sygnałów, takich jak sygnał tonowy, okazała się znacząco gorsza z powodu generacji harmoniczných w związku z nieliniowością obiektu. Skuteczność ta może być poprawiona za pomocą użycia struktury ze sprzężeniem zwrotnym IMC, ale najlepsze efekty zostały uzyskane za pomocą nieliniowych kompensatorów. Dla bardziej złożonych sygnałów, tj. sygnałów losowych oraz rzeczywistego hałasu szerokopasmowego, uzyskana poprawa była dużo mniejsza, bo redukcja była ograniczona przez inne czynniki, np. problemy z przyczynowością.

Dwuwarstwowa struktura została zaproponowana, by uprościć użycie płyt drgających w większych systemach aktywnej redukcji hałasu. W jej założeniach każda płyta ma dedykowany sterownik w warstwie bezpośredniej. Taka struktura jest także korzystna w przypadku układu nieliniowej kompensacji dla pojedynczej płyty. Dzięki tej strukturze możliwe jest sterowanie wielu elementów wykonawczych przez tylko jeden filtr nieliniowy. Takie rozwiązanie znacząco zmniejsza nakład obliczeniowy i daje możliwość stosowania bardziej złożonych filtrów nieliniowych.

Za najważniejsze swoje osiągnięcia, przedstawione w rozprawie doktorskiej, autor uważa:

- Wprowadzenie wycieku w algorytmie LMS w celu sterowania rozłożeniem wymuszenia na wiele elementów wykonawczych.
- Zastosowanie idei mikrofonów wirtualnych bazującej na pomiarze drgań akcelerometrami.
- Zastosowanie idei mikrofonów wirtualnych do sterowania emisją dźwięku z płyty.

- Zastosowanie adaptacyjnego sterowania w strukturze kompensacji równoległej, powszechnie stosowanego dla Aktywnej Redukcji Hałasu, do sterowania emisją dźwięku z płyty.
- Zastosowanie adaptacyjnej struktury kompensacji z nieliniowymi filtrami sterującymi do sterowania płytą drgającą.
- Opracowanie idei dwuwarstwowego systemu Aktywnej Redukcji Hałasu, z warstwą bezpośrednią odpowiedzialną za sterowanie płytą i warstwą wyższą stanowiącą standardowy układ Aktywnej Redukcji Hałasu.
- Opracowanie idei sterowania płytą drgającą z wieloma elementami wykonawczymi, za pomocą pojedynczego nieliniowego filtra sterującego.
- Zbadanie wpływu temperatury płyty na działanie systemu Aktywnej Redukcji Hałasu oraz zaproponowanie wyboru modeli torów wtórnych w zależności od temperatury.

## Bibliografia

- [1] Carneal, J. P., Charette, F., & Fuller, C. R. 2004. Minimization of sound radiation from plates using adaptive tuned vibration absorbers. *Journal of Sound and Vibration*, **270**, 781–792.
- [2] Elliott, S. J. 2001. *Signal Processing for Active Control*. Academic Press, London.
- [3] Fahy, F., & Gardonio, P. 2007. *Sound and Structural Vibration*. Second edition edn. Elsevier, Oxford.
- [4] George, N. V., & Panda, G. 2013. Advances in active noise control: A survey, with emphasis on recent nonlinear techniques. *Signal Processing*, **93**, 363–377.
- [5] Górski, P., & Kozupa, M. 2012. Variable Sound Insulation Structure with MFC Elements. *Archives of Acoustics*, **37**(1), 115–120.
- [6] Hansen, C. H., & Snyder, S. D. 1997. *Active Control of Noise and Vibration*. E & FN Spon, London.

- [7] Kowal, J., Pluta, J., Konieczny, J., & Kot, A. 2008. Energy recovering in active vibration isolation system—results of experimental research. *Journal of Vibration and Control*, **14**(7), 1075–1088.
- [8] Kuo, S. M., & Morgan, D. R. 1996. *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*. Wiley, New York.
- [9] Latos, M. 2011. *Active noise reducing earplug with speech signal processing*. Ph.D. thesis, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland.
- [10] Leniowska, L. 2006. Effect of active vibration control of a circular plate on sound radiation. *Archives of Acoustics*, **31**(1), 77–87.
- [11] Leniowska, L. 2011. An Adaptive Vibration Control Procedure Based on Symbolic Solution of Diophantine Equation. *Archives of Acoustics*, **36**(4), 901–912.
- [12] Liu, C., Li, F., Fang, B., Zhao, Y., & Huang, W. 2010. Active control of power flow transmission in finite connected plate. *Journal of Sound and Vibration*, **329**, 4124–4135.
- [13] Mazur, K., & Pawełczyk, M. 2010a. Active structural acoustic control using the Filtered-Reference LMS algorithm with compensation of vibrating plate temperature variation. *In: XV International Conference on Noise Control „Noise Control 2010”, Książ, 6–9 June, CD-ROM*.
- [14] Mazur, K., & Pawełczyk, M. 2010b. Adaptive active noise control of sound transmitted through a plate with insufficient acoustic isolation. *In: 57th Open Seminar on Acoustics OSA 2010, 20-24 Sept., Gliwice*.
- [15] Mazur, K., & Pawełczyk, M. 2011a. Active noise-vibration control using the filtered-reference LMS algorithm with compensation of vibrating plate temperature variation. *Archives of Acoustics*, **36**(1), 65–76.
- [16] Mazur, K., & Pawełczyk, M. 2011b. Adaptive equalization of sound radiation from a plate using acceleration sensors. *Pages 49–56 of: Polish-German Structured Conference on Acoustics, Jurata, Poland 13-16.09.2011.*, vol. 2.
- [17] Mazur, K., & Pawełczyk, M. 2011c. Feed-forward compensation for nonlinearity of vibrating plate. *In: 10th Conference on Active Noise and Vibration Control Methods MARDiH, June 6–8*.

- [18] Mazur, K., & Pawełczyk, M. 2011d. Feed-forward compensation for nonlinearity of vibrating plate as the sound source for Active Noise Control. *Mechanics and Control*, **30**(3), 146–150.
- [19] Mazur, K., & Pawełczyk, M. 2011e. Feed-forward equalization of sound radiation from a vibrating plate. *In: 10th Conference on Active Noise and Vibration Control Methods MARDiH, June 6–8*.
- [20] Mazur, K., & Pawełczyk, M. 2012a. Aktywna Redukcja Hałasu przechodzącego przez płytę drgającą z mikrofonem wirtualnym (in Polish). *Pages 185–191 of: Materiały XL Zimowej Szkoły Zwalczania Zagrożeń Wibroakustycznych, Gliwice-Szczyrk, 27 Feb. to 2 Mar*.
- [21] Mazur, K., & Pawełczyk, M. 2012b. Feed-forward equalization of sound radiation from a vibrating plate. *Mechanics and Control*, **31**(1), 35–39.
- [22] Mazur, K., & Pawełczyk, M. 2012c. Nonlinear Active Noise Control of sound transmitted through a plate. *Pages 159–162 of: 59th Open Seminar on Acoustics joint with Workshop on Strategic Management of Noise including Aircraft Noise*.
- [23] Mazur, K., & Pawełczyk, M. 2013a. Active Noise Control with a single nonlinear control filter for a vibrating plate with multiple actuators. *In: XVI International Conference on Noise Control NOISE CONTROL 2013, CD*.
- [24] Mazur, K., & Pawełczyk, M. 2013b. Active Noise Control with a single nonlinear control filter for a vibrating plate with multiple actuators. *Archives of Acoustics*, **38**(4).
- [25] Mazur, K., & Pawełczyk, M. 2013c. Hammerstein nonlinear active noise control with the Filtered-Error LMS algorithm. *Archives of Acoustics*, **38**(2), 197–203.
- [26] Nelson, P. A., & Elliott, S. J. 1993. *Active Control of Sound*. Academic Press, Cambridge.
- [27] Pawełczyk, M. 2005. *Feedback Control of Acoustic Noise at Desired Locations*. Silesian University of Technology, Gliwice.
- [28] Pawełczyk, M. 2013. *Application-Oriented Design of Active Noise Control Systems*. Academic Publishing House EXIT, Warsaw.

- [29] Petitjean, B., & Legrain, I. 1996. Feedback controllers for active vibration suppression. *Journal of Structural Control*, **3**(1-2), 111–127.
- [30] Pietrzko, S. J. 2009. *Contributions to Noise and Vibration Control Technology*. AGH—University of Science and Technology Press, Kraków.
- [31] Rdzanek, W. P., & Zawieska, W. M. 2003. Vibroacoustic analysis of a simply supported rectangular plate of a power transformer casing. *Archives of Acoustics*, **28**(2), 117–125.
- [32] Stuebner, M., Smith, R. C., Hays, M., & Oates, W. S. 2009. Modeling the nonlinear behavior of Macro Fiber Composite actuators. *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites 2009, Proceedings of the SPIE*, **7289**, 728913–728918.
- [33] Tawfik, M., & Baz, A. 2004. Experimental and Spectral Finite Element Study of Plates with Shunted Piezoelectric Patches. *International Journal of Acoustics and Vibration*, **9**(2), 87–97.
- [34] Wiciak, J. 2008. Sound radiation by set of L-jointed plates with four pairs of piezoelectric elements. *The European Physical Journal Special Topics*, **154**(1), 229–233.
- [35] Wrona, S., & Pawełczyk, M. 2013a. Controllability-oriented placement of actuators for active noise-vibration control of rectangular plates using a memetic algorithm. *Archives of Acoustics*, **38**(4).
- [36] Wrona, S., & Pawełczyk, M. 2013b. Observability-oriented placement of sensors for active noise-vibration control of flexible structures using a memetic algorithm. *In: Proc. Active Noise and Vibration Control Methods MARDiH, Kraków-Rytro, Poland*.