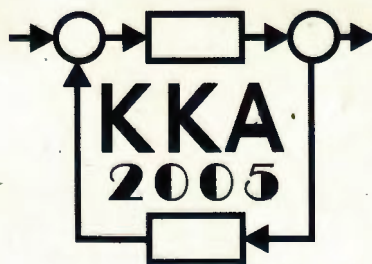


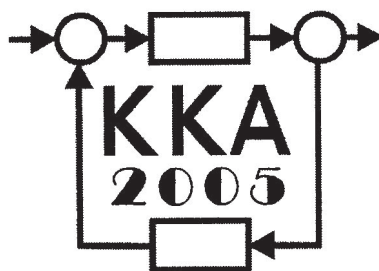
# **XV Krajowa Konferencja Automatyki**

## **Tom I**



**Redaktorzy:  
Zdzisław Bubnicki  
Roman Kulikowski  
Janusz Kacprzyk**

# XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom I



Redaktorzy:  
Zdzisław BUBNICKI  
Roman KULIKOWSKI  
Janusz KACPRZYK

**ORGANIZATOR**

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

**WSPÓŁORGANIZATORZY**

Politechnika Warszawska

Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów

Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

## **ORGANIZATOR**

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk  
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

## **WSPÓLORGANIZATORZY**

Politechnika Warszawska  
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów  
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

## **KOMITET PROGRAMOWY**

Przewodniczący  
Zastępca Przewodniczącego

Zdzisław BUBNICKI  
Roman KULIKOWSKI

## **CZŁONKOWIE**

Stanisław BAŃKA  
Mikołaj BUSŁOWICZ  
Ryszard GESSING  
Jakub GUTENBAUM  
Stanisław KACZANOWSKI  
Janusz KACPRZYK  
Józef KORBICZ  
Krzysztof KOZŁOWSKI  
Krzysztof KUŹMIŃSKI  
Krzysztof MALINOWSKI  
Antoni NIEDERLIŃSKI  
Tadeusz PUCHAŁKA  
Stanisław SKOCZOWSKI  
Jerzy ŚWIĄTEK  
Ryszard TADEUSIEWICZ  
Krzysztof TCHOŃ  
Jan WĘGLARZ

Michał BIAŁKO  
Władysław FINDEISEN  
Henryk GÓRECKI  
Jerzy JÓZEFczyk  
Tadeusz KACZOREK  
Jerzy KLAMKA  
Zbigniew KOWALSKI  
Juliusz L. KULIKOWSKI  
Kazimierz MALANOWSKI  
Wojciech MITKOWSKI  
Władysław PEŁCZEWSKI  
Leszek RUTKOWSKI  
Roman SŁOWIŃSKI  
Andrzej ŚWIERNIAK  
Piotr TATJIEWSKI  
Leszek TRYBUS  
Andrzej P. WIERZBICKI

## **KOMITET ORGANIZACYJNY**

Przewodniczący  
Zastępcy Przewodniczącego

Roman KULIKOWSKI  
Janusz KACPRZYK  
Stanisław KACZANOWSKI  
Tadeusz KACZOREK  
Krzysztof MALINOWSKI  
Roman OSTROWSKI  
Tadeusz PUCHAŁKA  
Dariusz WAGNER  
Jan STUDZIŃSKI  
Jan W. OWSIŃSKI

Członkowie

Sekretarze naukowci

**ISBN 83-89475-00-6**

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk  
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

# IDENTYFIKACJA I ROZPOZNAWANIE

# IDENTYFIKACJA ON-LINE W UKŁADZIE AKTYWNEGO TŁUMIENIA HAŁASU – NOWA METODA Z DZIEDZINY WIDM WYŻSZYCH RZĘDÓW

Teresa GŁÓWKA

Politechnika Śląska, Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki  
ul. Akademicka 16, 44-101 Gliwice, e-mail: tglowka@ia.polsl.gliwice.pl

**Streszczenie:** W pracy omówiono problem identyfikacji modeli torów: wtórnego i akustycznego sprzężenia zwrotnego w trakcie pracy adaptacyjnego kompensacyjnego układu aktywnego tłumienia hałasu (ATH). Układ ATH charakteryzuje m.in. obecność sprzężeń zwrotnych, mały stosunek sygnału użytecznego do szumu oraz skorelowanie sygnału wejściowego z zakłóceniem. Utrudnia to prawidłową identyfikację wyżej wymienionych modeli. Dla ominięcia tych trudności zaproponowano nowe podejście do identyfikacji, oparte na widmach wyższych rzędów. Wybrano i zaprezentowano metodę opartą na scałkowanych bispektrach, a rezultaty jej zastosowania porównane zostały z wynikami uzyskanymi metodami klasycznymi, opartymi na widmach 2 rzędu (gęstości widmowej mocy). Przedstawione oceny charakterystyk amplitudowo-fazowych zostały obliczone na podstawie danych pochodzących z eksperymentu laboratoryjnego oraz symulacji komputerowych.

**Słowa kluczowe:** aktywne tłumienie hałasu, analiza widmowa, identyfikacja procesów, procesy niegaussowskie, układy ze sprzężeniem zwrotnym

## 1. WPROWADZENIE

Dzięki postępowi jaki dokonał się w ostatnich latach w nauce i technice, *aktywne tłumienie hałasu* (ATH), czyli redukcja niepożądanego dźwięku na skutek zjawisk fizycznych, zachodzących w miejscu spotkania się dwóch fal akustycznych: pierwotnej (niepożądanego hałasu) i wtórnej (specjalnie wytworzonej, o określonych parametrach w stosunku do fali pierwotnej), jest coraz częściej stosowane w praktyce, głównie wtedy, gdy nie można (ze względów technicznych lub ekonomicznych) zastosować tłumienia pasywnego (izolacji od źródła dźwięku) [8, 10, 14]. Dotyczy to szczególnie sytuacji, w których hałas ma składowe niskoczęstotliwościowe, niebezpieczne dla ludzkiego zdrowia i trudne do pasywnego wytłumienia (gdyż im dłuższa fala, tym grubsza musi być warstwa izolująca). Jakość tłumienia w układach ATH zależy od znajomości modeli torów: wtórnego i akustycznego sprzężenia zwrotnego [3, 9]. Ponieważ zazwyczaj nie dysponujemy modelami fenomenologicznymi tych torów, muszą one zostać uzyskane w drodze identyfikacji zanim układ zacznie pracować (*off-line*). Od dokładności zidentyfikowanych modeli zależy stabilność

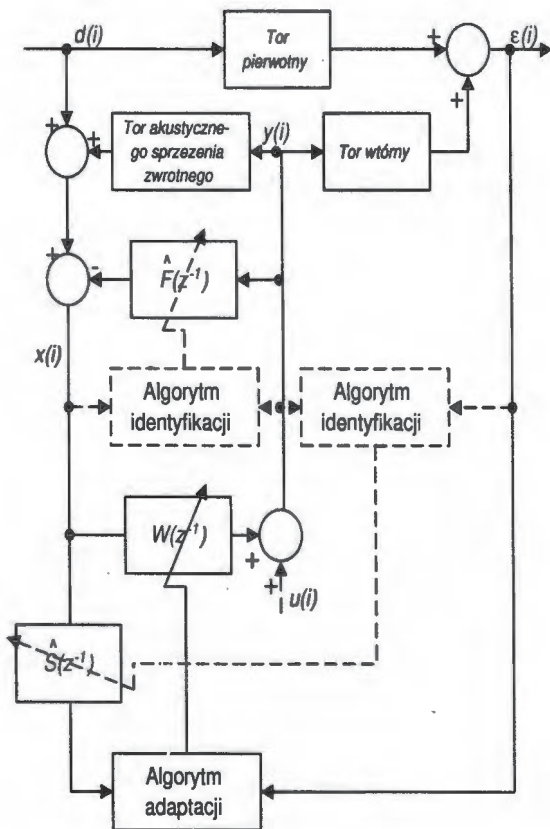
układu i zbieżność algorytmu adaptacji [8]. W niektórych przypadkach modele te muszą być uaktualniane w trakcie pracy układu (*on-line*) ze względu na zachodzące w pomieszczeniu zmiany geometrii (np. przesuwanie mikrofonów, głośników, przemieszczanie się ludzi) i warunków fizycznych (np. zmiana temperatury czy wilgotności). Z identyfikacją *on-line* związany jest szereg trudności, takich jak: obecność sprzężeń zwrotnych, mały stosunek sygnału użytecznego do szumu, czy też złożoność obiektu, wymagająca estymacji modeli o setkach parametrów, dlatego też wybór metody nie jest sprawą łatwą [4, 5, 12, 13]. W pracy zostało zaproponowane nowe podejście do identyfikacji w układach ATH, wykorzystujące metodę opartą na widmach wyższych rzędów.

*Statystyki i widma rzędów wyższych niż 2* pozwalają na uzyskanie pewnych dodatkowych informacji o przetwarzanych sygnałach, niemożliwych do otrzymania na poziomie statystyk i widm drugiego rzędu. Oparte na nich metody pozwalają wyeliminować (w praktyce znacznie zredukować) wpływ gaussowskich zakłóceń na wyniki identyfikacji. Ponadto za ich pomocą można np. ustalić czy sygnał jest minimalno- czy nieminimalnofazowy lub rozpoznać i scharakteryzować różne typy nielinowości [15, 16]. Dlatego też metody bazujące na statystykach i widmach wyższych rzędów stały się obecnie istotnym narzędziem w cyfrowym przetwarzaniu sygnałów i identyfikacji. W pracy została zaproponowana metoda oparta na *scałkowanych bispektrach*, czyli scałkowanych widmach trzeciego rzędu (ang. *integrated bispectra*, IB) [16, 18]. Metoda ta ma podstawowe zalety metod wykorzystujących niescałkowane widma wyższych rzędów, a ponadto charakteryzuje się względną prostotą obliczeniową.

## 2. SFORMUŁOWANIE PROBLEMU

Układ ATH może być zrealizowany jako układ regulacji lub – rozpatrywany w tym artykule – układ kompensacji, który przedstawiono na rys. 1.

*Tor pierwotny* jest przestrzenią akustyczną między źró-



Rysunek 1. Układ ATH. Linia przerywaną zaznaczono elementy związane z identyfikacją *on-line*.

dłm hałasu (zakłócenia)  $d(i)$  a mikrofonem błędu, wokół którego powstaje lokalna przestrzenna strefa ciszy. Na tor wtórny składa się zbiór elektrycznych i akustycznych elementów pomiędzy wytworzeniem sygnału sterującego  $y(i)$  a mikrofonem błędu, tj. przetwornik C/A, filtr rekonstruujący, wzmacniacz, głośnik i przestrzeń akustyczna między głośnikiem a mikrofonem błędu. Sygnał sterujący  $y(i)$  jest wynikiem filtracji sygnału odniesienia  $x(i)$  (czyli hałasu zmierzonego blisko źródła mikrofonem odniesienia), przez filtr cyfrowy  $W(z^{-1})$ , którego parametry zmieniają się za pomocą algorytmu adaptacji. Algorytm ten minimalizuje wartość średniokwadratową sygnału błędu  $\varepsilon(i)$ , a do wyznaczenia parametrów filtra  $W(z^{-1})$  wykorzystuje sygnał odniesienia  $x(i)$  przefiltrowany przez model toru wtórnego  $\hat{S}(z^{-1})$ . Dźwięk wygenerowany przez głośnik sterujący dociera nie tylko do mikrofonu błędu, lecz również do mikrofonu odniesienia, tworząc akustyczne sprzężenie zwrotne. Tor akustycznego sprzężenia zwrotnego jest zbudowany analogicznie do toru wtórnego. Jego wpływ na sygnał odniesienia jest kompensowany przez model  $\hat{F}(z^{-1})$  toru akustycznego sprzężenia zwrotnego. Podstawowe trudności związane z identyfikacją *on-line*, występujące w omawianym układzie, to:

- sprzężenia zwrotne (akustyczne oraz wprowadzone przez algorytm adaptacji) [4, 5], stąd został wprowadzony do układu zewnętrzny sygnał pobudzający  $u(i)$ ,
- jednoczesny wpływ zakłócenia na sygnał sterujący

$y(i)$  oraz zmienną wyjściową  $\varepsilon(i)$ , aby tego uniknąć została zaproponowana metoda z dziedziny widm wyższych rzędów,

- niski stosunek sygnału użytecznego do szumu, wynikający z tego, iż obecność sygnału pobudzającego  $u(i)$  redukuje wartość tłumienia, wobec czego jego wariancja musi być odpowiednio mała.

W dalszej części artykułu zagadnienie zostało zawężone do identyfikacji modelu toru wtórnego  $\hat{S}(z^{-1})$ . Celem identyfikacji jest znalezienie modelu  $\hat{S}(z^{-1})$ , mając dane sygnały: sterujący  $y(i)$  i błędu  $\varepsilon(i)$ , przy czym pomiary zbierane są w trakcie pracy układu ATH. Poniżej w poniższych rozważaniach identyfikacji modelu akustycznego sprzężenia zwrotnego  $\hat{F}(z^{-1})$  można dokonać w taki sam sposób.

### 3. OPIS METODY IDENTYFIKACJI

Można wykazać [18], że przy spełnieniu następujących warunków:

- układ jest przyczynowy i stabilny,
- zewnętrzny sygnał pobudzający  $u(i)$  jest nieskorelowany z zakłóceniem,
- zewnętrzny sygnał pobudzający  $u(i)$  jest stacjonarnym procesem losowym o zerowej wartości oczekiwanej i niesymetrycznej względem wartości oczekiwanej funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa dla każdej chwili czasu  $i$  (aby jego scałkowane bispektrum było niezerowe),
- zakłócenie  $d(i)$  jest stacjonarnym procesem losowym o zerowej wartości oczekiwanej i symetrycznym, dla każdej chwili czasu  $i$ , rozkładzie gęstości prawdopodobieństwa, np. gaussowskim, (aby jego scałkowane bispektrum było zerowe),

ocena charakterystyki amplitudowo-fazowej toru wtórnego  $\hat{S}(j\omega T)$  może zostać wyrażona następującym równaniem:

$$\hat{S}(j\omega T) = \left( \frac{IB_{y\varepsilon}(j\omega T)}{IB_{yy}(j\omega T)} \right)^*, \quad (1)$$

w którym licznik jest scałkowanym bispektrum wzajemnym sygnałów  $y(i)$  i  $\varepsilon(i)$ :

$$IB_{y\varepsilon}(j\omega T) = \sum_{\tau=-\infty}^{+\infty} E\{\tau_{2y}(i+\tau)\varepsilon(i)\}e^{-j\omega T\tau}, \quad (2)$$

mianownik jest scałkowanym bispektrum sygnału  $y(i)$ :

$$IB_{yy}(j\omega T) = \sum_{\tau=-\infty}^{+\infty} E\{\tau_{2y}(i+\tau)y(i)\}e^{-j\omega T\tau}, \quad (3)$$

a czynnik  $\tau_{2y}(i) = y^2(i) - E\{y^2(i)\}$ . Symbolem \* oznaczono liczbę zespoloną sprzężoną. Wyznaczenie oceny charakterystyki amplitudowo-fazowej (1) może zostać

dokonane w następujący sposób. Mając dane ciągi  $N$  próbek sygnałów  $y(i)$  i  $\varepsilon(i)$  ( $i = 0, 1, \dots, N-1$ ), obliczone zostaje  $r_{2y}(i)$  jako:

$$r_{2y}(i) = y^2(i) - \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N y^2(k). \quad (4)$$

Następnie oblicza się oceny scałkowanego bispektrum (3) oraz scałkowanego bispektrum wzajemnego (2) dla kolejnych częstotliwości  $\Omega n$ , ( $\Omega = 2\pi/N$ ,  $n = 0, 1, \dots, N/2$ ) mnożąc przez siebie odpowiednie  $N$ -punktowe dyskretne transformaty Fouriera sygnałów  $y(i)$ ,  $\varepsilon(i)$  oraz  $r_{2y}(i)$ :

$$IB_{yy}(j\Omega n) = \frac{1}{N} R_{2y}(j\Omega n) Y^*(j\Omega n), \quad (5)$$

$$IB_{y\varepsilon}(j\Omega n) = \frac{1}{N} R_{2y}(j\Omega n) E^*(j\Omega n), \quad (6)$$

gdzie

$$Y(j\Omega n) = \sum_{i=0}^N y(i) e^{-j\Omega n i}, \quad (7)$$

$$E(j\Omega n) = \sum_{i=0}^N \varepsilon(i) e^{-j\Omega n i}, \quad (8)$$

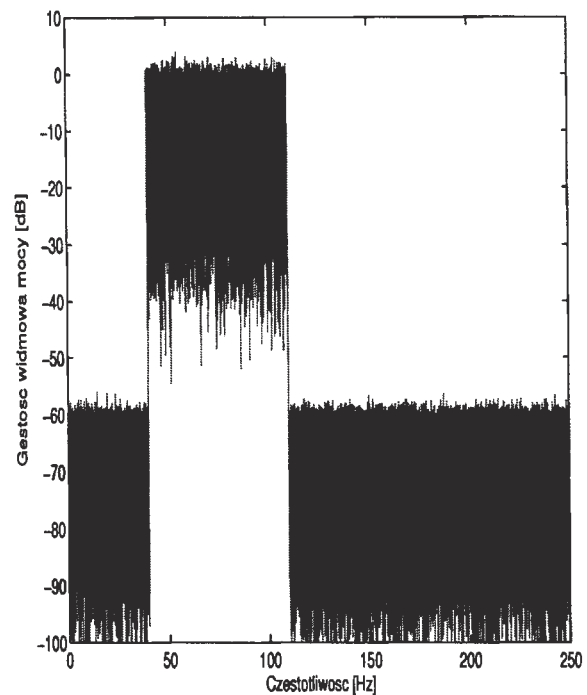
$$R_{2y}(j\Omega n) = \sum_{i=0}^N r_{2y}(i) e^{-j\Omega n i}. \quad (9)$$

Szukana ocena charakterystyki amplitudowo-fazowej  $\hat{S}(j\Omega n)$  jest stosunkiem obliczonych ocen widm (6) i (5), zgodnie z równaniem (1). Oba widma należy wygładzić w dziedzinie częstotliwości oknem o długości  $(2M+1)$  [18]. Przyjmując  $M=0$  (bez wygładzania), czynnik  $R_{2y}(j\Omega n)$  może zostać uproszczony i ocena  $\hat{S}(j\Omega n)$  staje się *doświadczalnym estymatorem transmitancji* [11], wobec czego rząd metody identyfikacji maleje do dwóch. Współczynniki modelu toru wtórnego  $\hat{S}(z^{-1})$  (filtr typu IIR lub FIR) można otrzymać za pomocą *metody błędu równaniowego* (ang. *Equation Error Formulation, EEF*) [18], lub też (tylko filtry typu FIR) obliczając odwrotną dyskretną transformatę Fouriera oceny  $\hat{S}(j\Omega n)$  [1]. Istnieją również algorytmy adaptacji, zawierające procedury przetwarzania blokowego, w których może być bezpośrednio użyta ocena charakterystyki amplitudowo-fazowej, bez obliczania współczynników modelu parametrycznego [2].

#### 4. PRZYKŁAD

W punkcie tym są przedstawione wyniki wykonanych eksperymentów ilustrujące działanie zaproponowanej metody identyfikacji. Wyniki te zostały porównane z rezultatami zastosowania powszechnie używanych metod: RLS i klasycznej analizy widmowej [11].

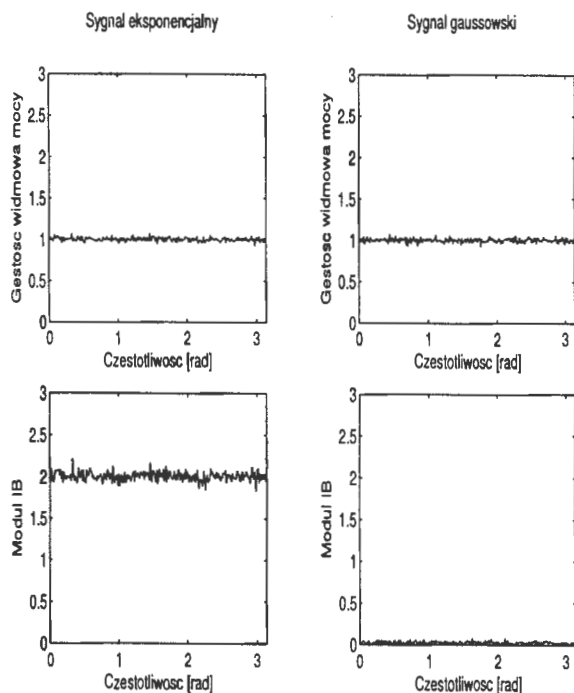
Laboratorium ATH znajduje się w Instytucie Automatyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach [7]. Pomieszczenie laboratorium ma ok. 23 m<sup>3</sup> objętości. Mikrofon błędu został umieszczony ok. 2,5 m od źródła hałasu i ok. 0,5 m



Rysunek 2. Gęstość widmowa mocy zakłócenia.

od głośnika sterującego, natomiast mikrofon odniesienia umieszczono bardzo blisko źródła hałasu. W trakcie eksperymentu system pracował z częstotliwością próbkowania  $f_s = 500$  Hz. Przedział częstotliwości, w których mogło nastąpić tłumienie był ograniczony od dołu do 20 Hz (przez dynamiczne własności głośników) i od góry do 150 Hz (przez analogowe filtry anty-aliasingowe). Hałas generowano jako gaussowski szum szerokopasmowy o paśmie przepuszczania od 40 do 110 Hz. Gęstość widmowa mocy hałasu pokazana jest na rys. 2. Strojenie filtru  $W(z^{-1})$  (filtr FIR o 300 parametrach) następowało za pomocą algorytmu adaptacji FxLMS [10]. Modele torów wtórnego i akustycznego sprzężenia zwrotnego zostały najpierw zidentyfikowane *off-line* i nie były zmieniane w trakcie zbierania danych. Wynik identyfikacji *off-line* został potraktowany jako wzorzec, do którego następnie porównywano oceny uzyskane w identyfikacji *on-line*. Po włączeniu układu tłumienie osiągnęło wartość 4,9 dB, a po wprowadzeniu zewnętrznego sygnału pobudzającego wartość ta nieco zmalała do 4,5 dB. Zgodnie z założeniami metody wybrano niegaussowskie pobudzenie (biały szum eksponencjalny, o zerowej wartości oczekiwanej). Jego własności niegaussowskie są pokazane na rys. 3.

Sekwencja 1024 próbek pobudzenia została powtórzona 10 razy, a następnie dane uśredniono [6]. Zalecą takiego postępowania było zwiększenie stosunku sygnału użytecznego do szumu bez pogorszenia tłumienia, a także poprawienie „właściwości gaussowskich” zakłócenia, zgodnie z *Centralnym Twierdzeniem Granicznym* [17]. Wadą było oczywiście 10-krotne wydłużenie czasu eksperymentu. W każdej z porównywanych metod wyznaczono model parametryczny toru wtórnego (filtr FIR o 100 współczynników): dla metody RLS bezpośredniego, natomiast dla nieparametrycznych metod ocena cha-



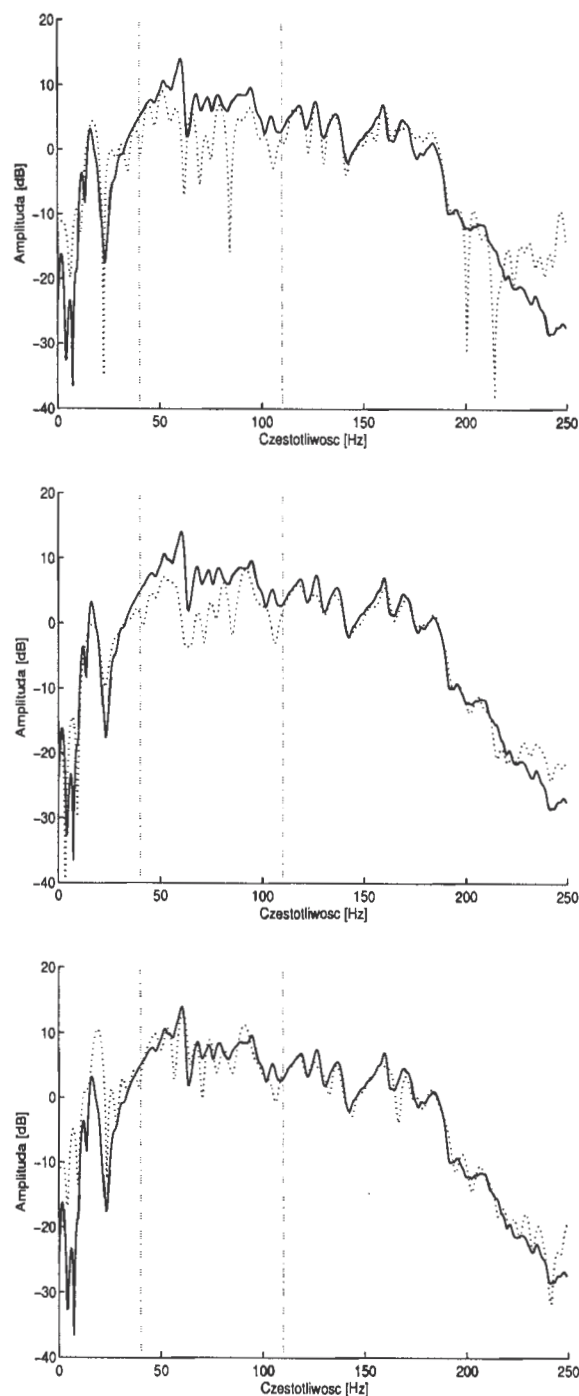
Rysunek 3. Własności niegaussowskie pobudzenia. Po lewej stronie gęstość widmowa mocy i moduł scałkowanego bispektrum białego szumu o rozkładzie eksponencjalnym, po prawej to samo dla białego szumu gaussowskiego.

Charakterystyki amplitudowo-fazowej  $\hat{S}(j\Omega n)$  została przekształcona na filtr FIR za pomocą metody EEF. Oceny widm uzyskanych w metodach nieparametrycznych zostały wygładzone w dziedzinie częstotliwości (przyjęto parametr wygładzania  $M = 3$ ) Moduły charakterystyk amplitudowo-fazowych otrzymanych filtrów są pokazane na rys. 4. Łatwo zauważyć, że metoda oparta na scałkowanych bispektrach daje lepsze rezultaty w przedziale częstotliwości w którym działało zakłócenie.

Laboratoryjny układ ATH został również zasymulowany w środowisku Matlab. Eksperyment symulacyjny został powtórzony 100 razy a wyniki identyfikacji są pokazane na zbiorczych wykresach na rys. 5. Zgodnie z oczekiwaniami w zakresie częstotliwości, w którym działało zakłócenie, metody RLS oraz klasyczna analiza widmowa dają obciążone oceny, w przeciwieństwie do metody opartej na scałkowanych bispektrach. Świadczy to o tym, że w dziedzinie widm wyższych rzędów wpływ zakłócenia na wyniki identyfikacji został bardzo zmniejszony. Można jednak zauważyć, że tam, gdzie zakłócenie nie działa, metoda oparta na scałkowanych bispektrach daje nieco gorsze oceny, gdyż jest bardziej czuła na błędy numeryczne.

## 5. PODSUMOWANIE

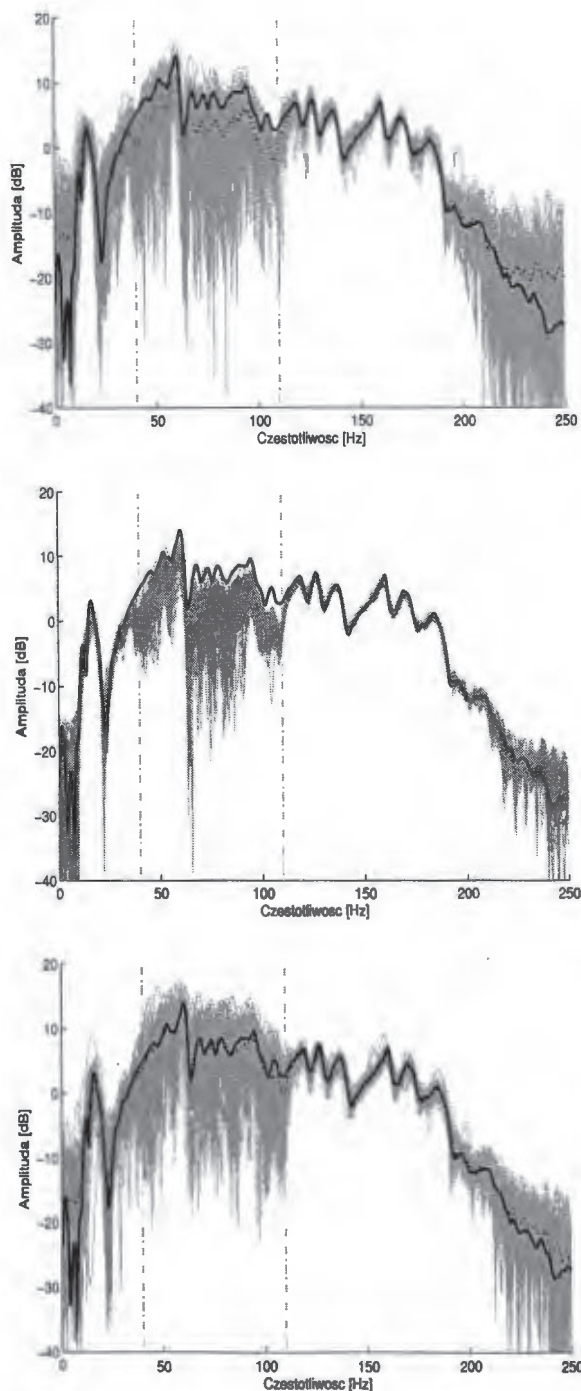
W artykule przedstawiono nową metodę identyfikacji *on-line* modeli torów: wtórnego i akustycznego sprzężenia zwrotnego w adaptacyjnym kompensacyjnym układzie



Rysunek 4. Moduły charakterystyk amplitudowo-fazowych ocen toru wtórnego, dane z eksperymentu laboratoryjnego. Linia przerywaną zaznaczono uzyskane oceny, linią ciągłą wzorzec (otrzymany *off-line*).

ATH, wykorzystywanym do tworzenia lokalnych przestrzennych stref ciszy. Metoda bazuje na widmach wyższych rzędów, a korzyścią z jej stosowania jest redukcja wpływu zakłóceń na wyniki identyfikacji. W pracy zamieszczono również rezultaty badań laboratoryjnych i symulacyjnych potwierdzających efektywność tej metody.





Rysunek 5. Moduły charakterystyk amplitudowo-fazowych ocen toru wtórnego, dane z 100 symulacji komputerowych. Szarym kolorem zaznaczono wszystkie uzyskane oceny, linią przerywaną średnią ocen, linią ciągłą wzorzec (otrzymany *off-line*).

#### ON-LINE IDENTIFICATION IN ACTIVE NOISE CONTROL SYSTEMS – A NEW METHOD FROM HIGHER ORDER SPECTRA DOMAIN

**Abstract:** In the paper a problem of the on-line model identification of secondary and feedback paths in the feedforward active noise control (ANC) systems is considered. Many reasons, i.e. inherent feedbacks, low signal-to-noise ratio, and correlation of the input and the disturbance, make such identification

very difficult. To bypass these difficulties a new approach to the identification based on the higher-order spectra is presented. The integrated bispectrum-based identification method is proposed and the results of its applying are provided and compared with the results derived from the classical methods. The estimates are computed on the basis of data acquired in the laboratory (real-world) experiment as well as in the computer simulations.

#### Literatura

- [1] Blahut R.E. (1985) Fast Algorithms for Digital Signal Processing. Addison-Wesley Publishing Co.
- [2] Farhang-Boroujeny B. (1999) Adaptive Filters: Theory and Applications. J. Wiley & Sons, New York.
- [3] Figwer J. (2003) A New Method of On-Line Model Identification and Update for Multichannel Active Noise Control Systems. Archives of Control Sciences, Vol. 13, No 2, 141-155.
- [4] Figwer J. (2002). Closed-Loop System Identification with Multisine Excitation. Proceedings of the 8th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics, Szczecin, Poland, 2-5 September, Vol. 1, 477-482.
- [5] Figwer J. (2003) Model Identification and Update Under Operation of Active Noise Control Systems. Pomiar Automatyka Kontrola, Vol. 11, 22-25.
- [6] Figwer J. (1996) Multisine Excitation for Process Identification. Archives of Control Sciences, Vol. 5, No 3-4, 279-295.
- [7] Figwer J., Czyż K. (2003) Remote Active Noise Control Laboratory. Archives of Control Sciences, Vol. 13, No 2, 231-247.
- [8] Hansen C.H., Snyder S.D. (1997) Active Control of Noise and Vibration. Cambridge University Press.
- [9] Kasprzyk J. (2003) Model Identification for Active Noise Control System Design. Proceedings of Conference Active Noise and Vibration Control, MAR-DIH'2003, Kraków, Poland.
- [10] Kuo S.M., Morgan D.R. (1996) Active Noise Control Systems. Algorithms and DSP Implementations. J. Wiley & Sons, Inc., New York.
- [11] Ljung L. (1999) System Identification - Theory for the User. Prentice Hall PTR.
- [12] Michalczyk M.I. (2004) Electro-Acoustic Plant Modelling for Active Noise Control Systems. Proceedings of the 10th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR2004, Międzyzdroje, 1075-1081.
- [13] Michalczyk M.I. (2004) Influence of Electro-Acoustic Plant Modelling Errors on Active Noise Control System Performance. Proceedings of

the 10th IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics MMAR2004, Międzyzdroje, 2004, 1081-1086.

- [14] Nelson P.A., Elliott S.J. (1992) Active Control of Sound. Academic Press, London.
- [15] Nikias C.L., Mendel J.M. (1993) Signal Processing with Higher-Order Spectra. IEEE Signal Processing Magazine, 10, 4, 1-15.
- [16] Nikias C.L., Petropulu A.P. (1993) Higher-Order Spectra Analysis - A Nonlinear Signal Processing Framework, PTR Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- [17] Serfling R.J. (1980) Approximation Theorems for Mathematical Statistics. J. Wiley & Sons, Inc., New York.
- [18] Tugnait J.K., Zhou Y. (2000) On Closed-Loop System Identification Using Polyspectral Analysis Given Noisy Input-Output Time-Domain Data. Automatica, Vol. 36, 1795-1808.



**Instytut Badań Systemowych  
Polskiej Akademii Nauk**

**ISBN 83-89475-02-2**