

# **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 MODELI DLA CELÓW AKTYWNEGO TŁUMIENIA HAŁASU

Jerzy KASPRZYK

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

**Streszczenie:** Do typowych zadań przy projektowaniu układów aktywnego tłumienia hałasu (ATH) należy identyfikacja obiektów elektro-akustycznych. W pracy przedstawiono przykład identyfikacji modeli transmitancji torów wtórnych i toru sprzężenia akustycznego dla trójwymiarowego układu ATH dla tworzenia lokalnych stref ciszy w pomieszczeniu. Ze względu na bardzo skomplikowaną dynamikę obiektu identyfikowane muszą być modele bardzo wysokich stopni, przy czym struktura tych modeli powinna być także wyznaczona w trakcie identyfikacji. Przedstawiono wyniki doświadczeń dla rzeczywistego obiektu, a dokładność charakterystyk częstotliwościowych otrzymanych modeli została potwierdzona przy użyciu klasycznej analizy widmowej.

**Słowa kluczowe:** Identyfikacja, aktywne tłumienie hałasu, transmitancja, charakterystyka częstotliwościowa.

### 1. WSTĘP

Obecnie identyfikacja procesów jest jednym z popularnych narzędzi badawczych. Jej celem jest znalezienie modelu matematycznego opisującego zachowanie procesu (dla zadanego celu) na podstawie wiedzy *a priori* o procesie oraz pomiarów zebranych – o ile to możliwe – w trakcie specjalnie przeprowadzonych doświadczeń identyfikacyjnych. Identyfikacja wykorzystywana jest w różnych dziedzinach nauki i techniki oraz dla różnych celów. Jednak w praktyce najczęściej potrzeba identyfikacji pojawia się przy projektowaniu układów sterowania lub dla celów predykcji. W takich przypadkach można wyróżnić fazę *identyfikacji* oraz fazę *zastosowania* modelu. W pierwszej fazie obiekt poddawany jest specjalnie zaprojektowanemu pobudzeniu i jego odpowiedź jest rejestrowana. Następnie wyznaczany jest model matematyczny opisujący zachowanie obiektu. Model ten powinien być odpowiednio *dokładny* dla celu, dla którego jest tworzony.

Celem pracy jest przedstawienie procedury identyfikacji dla *rzeczywistego* obiektu, poczynając od postawienia zadania, wyboru formy modelu, planowania eksperymentu, identyfikacji modelu obejmującej zarówno wyznaczenie jego struktury, jak i estymację parametrów, po jego testowanie. Przeprowadzona będzie jednocześnie dyskusja różnych aspektów tej procedury w odniesieniu do zadania projektowania systemu ATH. Rozpa-

trywany proces jest obiektem elektro-akustycznym, na który składają się takie urządzenia, jak mikrofony, wzmacniacze, filtry itd. oraz przestrzeń akustyczna w pomieszczeniu z pogłosem. Tego typu obiekty są trudne do identyfikacji, jako że różnią się one znacznie od typowych procesów przemysłowych. Ich dynamika jest bardzo złożona i nie da się jej modelować w postaci filtru dolnoprzepustowego.

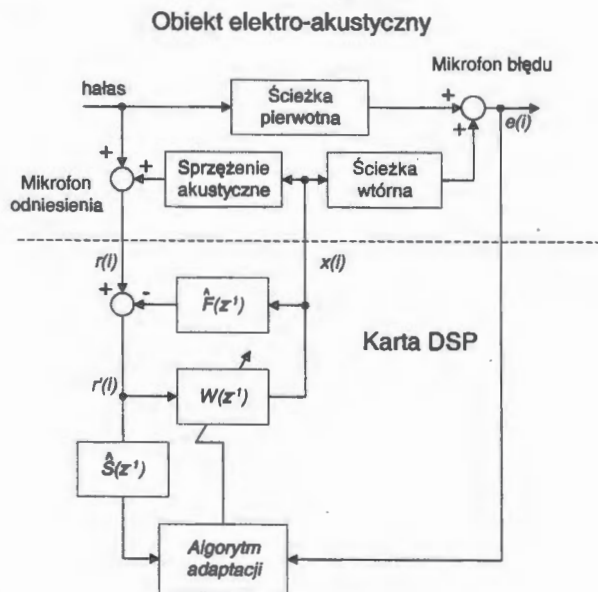
W pracy przedstawiono kolejno ideę adaptacyjnego układu ATH z kompensacją, zadanie identyfikacji w trybie *off-line* oraz procedurę identyfikacji. W trakcie planowania eksperymentu uwagę skupiono na wyborze sygnałów pobudzających. Wykorzystano tu podejście bazujące na stosowaniu wektorowych sygnałów wielosinusoidalnych ortogonalnych (WSWO), które umożliwiło uproszczenie procedury. Omówiono także kolejne problemy występujące przy identyfikacji, jak wybór formy modelu, wybór kryterium estymacji, wyznaczenie struktury oraz walidację modelu. Przedstawiono wyniki identyfikacji uzyskane w laboratorium ATH oraz porównano je z charakterystykami otrzymanymi na drodze klasycznej analizy częstotliwościowej. W badaniach korzystano z systemu komputerowego wspomagania identyfikacji *MULTI-EDIP* [9].

### 2. SFORMUŁOWANIE ZADANIA

ATH polega na tłumieniu niepożądanych dźwięków (hałasu) za pomocą urządzeń elektro-akustycznych. W literaturze omawianych jest wiele różnych metod ATH; por. np. [3, 10]. We współczesnych zastosowaniach ATH, których celem jest tworzenie lokalnych stref ciszy w pomieszczeniach, wykorzystywane są głównie adaptacyjne cyfrowe systemy kompensacji. Prawidłowa parametryzacja takiego układu wymaga znajomości odpowiednich modeli obiektów elektro-akustycznych. Ze względu na to, że są to układy *kompensacji*, jest oczywiste, że wyniki działania układu ATH zależą w znacznym stopniu od *dokładności* stosowanych modeli. A ponieważ własności dynamiczne przestrzeni akustycznej w pomieszczeniu z pogłosem są bardzo złożone i trudne do opisanego za pomocą modeli uzyskanych na drodze analizy zjawisk fizycznych, stąd

jedynym sposobem ich otrzymania pozostaje *identyfikacja eksperymentalna*.

Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy typowego jednowymiarowego układu kompensacji ATH [10].



Rys. 1. Schemat blokowy układu kompensacji ATH.

Zakłada się, że układ ten pracuje z okresem próbkowania  $T_s$ , a sygnały (podobnie jak i modele) są traktowane jako dyskretne w czasie. Do pomieszczenia dociera hałas, który powinien być skompensowany za pomocą fali akustycznej generowanej przez głośnik sterowany za pomocą sygnału  $x(i)$ . Celem kompensacji jest uzyskanie maksymalnego tłumienia dźwięku wokół mikrofonu błędu, którego sygnał wyjściowy  $e(i)$  oraz pochodzący z mikrofonu odniesienia sygnał  $r(i)$  wykorzystuje się do adaptacji parametrów filtra kompensacyjnego  $W(z^{-1})$ . Ścieżka pierwotna oznacza tu przestrzeń akustyczną pomiędzy oboma mikrofonami, natomiast ścieżka wtórna reprezentuje wpływ sygnału  $x(i)$  na sygnał  $e(i)$ . A ponieważ dźwięk z głośnika dociera także do mikrofonu odniesienia, stąd powstałe sprzężenie akustyczne powinno być w układzie skompensowane. W tym celu od sygnału odniesienia  $r(i)$  odejmuje się sygnał  $x(i)$  filtrowany przez model transmitancji toru sprzężenia  $\hat{F}(z^{-1})$ . Aby uzyskać niezależność działania układu od dynamiki toru wtórnego sygnał  $r'(i)$  jest dodatkowo filtrowany za pomocą modelu transmitancji tego toru  $\hat{S}(z^{-1})$ .

Zwiększenie strefy ciszy lub tworzenie kilku takich stref możliwe jest przy zwiększeniu liczby układów kompensacji [12]. W pracy rozpatrywane jest zadanie identyfikacji konieczne do sparametryzowania wielowymiarowego układu ATH składającego się z trzech pętli kompensacji. W ten sposób 3 głośniki sterujące oraz 3 mikrofony błędu i 1 mikrofon odniesienia tworzą razem 9 ścieżek wtórnych  $S_{pq}$  i 3 ścieżki sprzężenia akustycznego  $F_p$  ( $p, q = 1, 2, 3$ ), gdzie  $p$  oznacza numer głośnika, a  $q$  numer mikrofonu błędu. Każda taka ścieżka

stanowi obiekt elektro-akustyczny, na który składają się przetwornik cyfrowo-analogowy, dolnoprzepustowy filtr rekonstrukcyjny, wzmacniacz, głośnik, przestrzeń akustyczna między głośnikiem a odpowiednim mikrofonem, mikrofon, filtr antystroboskopowy i przetwornik analogowo-cyfrowy.

Zadanie identyfikacji polega na aproksymacji transmitancji dla wszystkich wymienionych 12 ścieżek, co powinno być zrobione zanim system ATH zostanie uruchomiony. Można to osiągnąć wykonując 3 osobne doświadczenia, gdzie kolejno każdy głośnik zostanieysterowany specjalnie zaplanowanym ciągiem pobudzającym i zarejestrowane zostaną sygnały ze wszystkich mikrofonów. Następnie na drodze przetwarzania ciągów pobudzeń i odpowiedzi możliwe będzie zidentyfikowanie odpowiednich transmitancji w sposób wzajemnie niezależny. Podejście takie przedstawiono w [12]. Inną możliwość stanowią jednoczesne pobudzenie wszystkich 3 głośników w tym samym czasie i traktowanie sygnału z mikrofonu jako wyjścia obiektu MISO o 3 wejściach. Pozwala to na skrócenie czasu potrzebnego na przeprowadzenie doświadczeń, ale powoduje, że identyfikacja staje się znacznie trudniejsza. Tutaj przedstawione zostanie to drugie podejście.

Ponieważ rozpatrywany układ oparty jest na kompensacji, więc dokładność otrzymanych modeli ma bardzo duży wpływ na wyniki tłumienia. W szczególności chodzi o własności charakterystyk częstotliwościowych, jako że błędy wyznaczenia amplitudy obniżają szybkość zbieżności algorytmu adaptacji, a błędy fazy mogą nawet powodować powstanie niestabilności w układzie [7]. Błędy te nie powinny przekraczać wartości  $\pm\pi/2$ , por. [3, 10]. Ponadto w przypadku błędów modelowania sprzężenia akustycznego możliwa jest destabilizacja układu lub powstanie zjawiska chaosu [5]. Stąd celem identyfikacji jest uzyskanie modeli parametrycznych w postaci transmitancji potrzebnych do zaprojektowania odpowiednich filtrów, ale jednocześnie modele te muszą być odpowiednio dokładne w dziedzinie częstotliwości, aby zapewnić poprawną pracę układu ATH i wymaganą jakość tłumienia.

### 3. PROCEDURA IDENTYFIKACJI I POSTAĆ MODELU

Na identyfikację prowadzoną w trybie *off-line* składają się następujące etapy:

1. Wykonanie *eksperymentu* i zebranie pomiarów.
2. *Modelowanie*, tj. wybór formy i struktury modelu do opisu procesu.
3. *Estymacja* parametrów modelu zgodnie z wybranym kryterium aproksymacji.
4. *Testowanie* otrzymanego modelu.

Etapy te wykonywane są zwykle w sposób iteracyjny tworząc *procedurę identyfikacji*. Jeżeli wynik identyfikacji nie spełnia wymagań, to należy zmienić strukturę modelu i powtórzyć procedurę od kroku drugiego, aż do uzyskania odpowiedniego modelu.

Najczęściej do opisu niepewności w układzie stosuje się tzw. modele stochastyczne. W rozpatrywanym przypadku modele potrzebne są dla celów filtracji, więc mogą to być modele wejściowo-wyjściowe (tzw. „czarna skrzynka”). Ponieważ filtracja ta musi być wykonywana w czasie rzeczywistym, więc modele te powinny być odpowiednio proste, najlepiej liniowe. Z drugiej jednak strony ich struktura musi być odpowiednio bogata, aby umożliwić wystarczająco dokładną aproksymację skomplikowanej dynamiki identyfikowanych obiektów.

Rozpatrywany obiekt elektro-akustyczny można traktować jako 4 niezależne (aczkolwiek podobne) obiekty MISO o 3 wejściach (sygnałach sterujących głośnikami, generowanych przez kartę DSP) oraz 1 wyjściu (sygnał z odpowiedniego mikrofonu dostarczany do karty DSP). W dalszym ciągu rozpatrywany będzie więc problem identyfikacji pojedynczego obiektu MISO. Oznaczając jego wejścia jako  $u_1(i)$ ,  $u_2(i)$  oraz  $u_3(i)$ , a wyjście przez  $y(i)$  można zapisać równanie wyjścia modelu liniowego jako:

$$y(i) = \sum_{p=1}^3 G_p(z^{-1})u_p(i) + H(z^{-1})e(i) \quad (1)$$

gdzie  $u_p(i)$  są  $i$ -tymi próbkami wejścia  $p$  ( $p = 1, 2, 3$ ), a  $y(i)$  próbkami wyjścia.  $G_p(z^{-1})$  oznacza transmitancję toru sterowania od wejścia  $p$ .  $H(z^{-1})e(i)$  służy modelowaniu wszelkich zakłóceń oddziałujących na wyjście, przy czym  $e(i)$  jest białym szumem o zerowej wartości średniej i wariancji  $\lambda^2$ , a  $H(z^{-1})$  umożliwia przedstawienie własności statystycznych zakłócenia, jak np. gęstość widmowa mocy.  $G_p(z^{-1})u_p(i)$  można uważać za część sygnału wyjściowego generowaną przez  $p$ -ty tor sterowania.

Ponieważ każdy z torów składa się z podobnych elementów, jak przetworniki C/A, filtry, wzmacniacze itp. wydaje się uzasadnione modelowanie obiektu za pomocą struktury MISO-ARX:

$$A(z^{-1})y(i) = \sum_{p=1}^3 z^{-d_p} B_p(z^{-1})u_p(i) + e(i) \quad (2)$$

gdzie  $z^{-1}$  jest operatorem opóźnienia,  $d_p$  oznacza czas opóźnienia w torze  $p$ ,  $A(z^{-1})$  i  $B_p(z^{-1})$  są wielomianami operatora  $z^{-1}$ , odpowiednio stopnia  $dA$  i  $dB_p$ :

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{dA} z^{-dA} \quad (3)$$

$$B_p(z^{-1}) = b_{p,0} + b_{p,1} z^{-1} + b_{p,2} z^{-2} + \dots + b_{p,dB_p} z^{-dB_p} \quad (4)$$

Struktura modelu określona jest przez zbiór liczb całkowitych:

$$(dA, [d_1, d_2, d_3], [dB_1, dB_2, dB_3]) \quad (5)$$

a wektor parametrów  $\theta$  zawiera współczynniki poszczególnych wielomianów:

$$\theta = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{dA} \ b_{1,0} \ b_{1,1} \ \dots \ b_{1,dB_1} \ b_{2,0} \ b_{2,1} \ \dots \ b_{2,dB_2} \ b_{3,0} \ b_{3,1} \ \dots \ b_{3,dB_3}]^T \quad (6)$$

Zadanie wyznaczenia struktury (5) oraz estymacji parametrów (6) omówiono w punkcie 5.

Transmitancja  $p$ -tego toru sterowania jest równa

$$G_p(z^{-1}) = \frac{z^{-d_p} B_p(z^{-1})}{A(z^{-1})} \quad (7)$$

gdzie  $G_p(z^{-1})$  oznacza odpowiednio  $S_{pq}$  lub  $F_p$ . Z pewnym przybliżeniem można powiedzieć, że wielomian  $B_p(z^{-1})$  przedstawia własności specyficzne dla danego toru, a  $A(z^{-1})$  wspólne dla wszystkich torów.

Można także podać inne, istotne uzasadnienie dla wyboru formy modelu w postaci ARX. Wynika to z numerycznych aspektów algorytmu estymacji i będzie omówione w punkcie 5.

Gdyby modelować obiekt jako zbiór modeli SISO, niezależnie dla każdego głośnika, to w (7) wystąpiłby dla każdego toru inny wielomian  $A_p(z^{-1})$ , a struktura modelu SISO dla  $p$ -tego toru sterowania byłaby określona jako trójka  $(dA_p, d_p, dB_p)$ .

Do opisu dynamiki można stosować także modele prostsze, tzn. o strukturze FIR, zawierające tylko wielomiany  $B_p(z^{-1})$ . Jednak przy tak złożonej dynamice obiektu, do odpowiednio dokładnego opisu musiałyby być to wielomiany o stopniu większym niż 200, por. [12]. O ile więc można stosować modele FIR dla obiektów SISO, to dla obiektu MISO podejście takie wymagałoby rozwiązania układu równań o zbyt dużej liczbie niewiadomych.

#### 4. OPIS EKSPERYMENTU

Jest rzeczą oczywistą, że wyniki identyfikacji zależą w istotny sposób od przeprowadzonego eksperymentu. Podstawowe wymagania wobec eksperymentu to użycie sygnału *wystarczająco pobudzającego* obiekt oraz wykonanie doświadczenia w pętli otwartej, por. [2]. Aby spełnić oba wymagania doświadczenie wykonane zostało w trybie *off-line*, przed uruchomieniem układu kompensacji, dla specjalnie zaprojektowanego w tym celu sygnału pobudzającego.

Testowano różne sygnały pobudzające, jednak najlepsze wyniki otrzymywano w przypadku stosowania WSWO, których generację opisano w [4]. Sygnały takie zapewniają bowiem odpowiednie pobudzenie w pełnym zakresie częstotliwości pracy układu oraz brak korelacji pomiędzy poszczególnymi wejściami, dzięki czemu

stosując odpowiednie przetwarzanie sygnałów można było zidentyfikować jednocześnie wszystkie 3 tory sterowania na podstawie danych pochodzących z jednego doświadczenia.

Planowanie eksperymentu obejmuje także określenie takich parametrów, jak częstotliwość próbkowania i czas trwania eksperymentu. Tutaj częstotliwość próbkowania  $f_s = 500 \text{ Hz}$  narzucona została przez zastosowanie modelu, gdyż założono, że system powinien tłumić zakłócenia w zakresie do około  $150 \text{ Hz}$ . Natomiast jako kompromis między wymaganiami dokładności modelu a czasem trwania eksperymentu przyjęto liczbę próbek  $N = 4096$ , bazując na doświadczeniach a priori.

Wynika stąd, że pobudzenie powinno składać się z  $K = 2048$  sinusoid, przy czym wymaganie ortogonalności najłatwiej spełnić przydzielając kolejne harmoniczne częstotliwości podstawowej  $\Omega = 2\pi/K$  do kolejnych wejść:

$$u_p(i) = \sum_{m=0}^{K-2} A \sin [(3m+p-1)\Omega i + \Phi_m], \quad (8)$$

gdzie fazy  $\Phi_m$  można generować np. zgodnie z algorytmem minimalizującym współczynnik szczytu [13].

Dla tak skonstruowanego sygnału na etapie wstępnego przetwarzania danych można wykonać specjalną filtrację w dziedzinie częstotliwości. Otóż dzięki temu, że poszczególne sygnały wejściowe są wzajemnie ortogonalne, możliwa jest dekompozycja spektrum sygnału wyjściowego na 3 spektra częściowe, z których każde zawiera tylko linie dla tych częstotliwości, które występują w odpowiednim sygnale wejściowym. W ten sposób stosując odwrotną transformatę Fouriera można uzyskać oceny przebiegów czasowych *wyjść cząstkowych* dla poszczególnych torów sterowania, a co za tym idzie sprowadzić zadanie identyfikacji obiektu MISO do identyfikacji 3 niezależnych modeli SISO, por. [6].

## 5. IDENTYFIKACJA I TESTOWANIE MODELU

Kolejnymi etapami po zebraniu danych jest estymacja modelu dla założonej struktury oraz testowanie modelu. Klasycznym podejściem do zadania estymacji parametrów modelu jest minimalizacja funkcji strat  $V(\theta)$ , definiowanej jako suma kwadratów błędów predykcji:

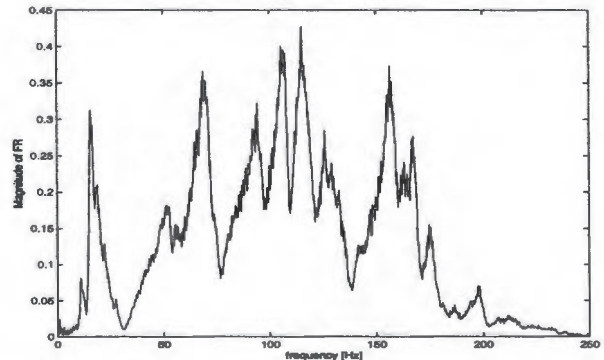
$$\theta = \arg \min \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^2(i). \quad (9)$$

W przypadku modelu typu ARX błąd predykcji  $\varepsilon(i)$  można przedstawić w postaci liniowej funkcji parametrów:

$$\varepsilon(i) = A(z^{-1}) \left[ y(i) - \sum_{p=1}^3 B_p(z^{-1}) u_p(i - d_p) \right], \quad (10)$$

co umożliwi skorzystanie z klasycznej metody najmniejszych kwadratów. W przypadku wyboru innych struktur modeli, jak np. ARMAX, błędy wyjścia OE itd. minimalizacja funkcji strat wymaga stosowania metod optymalizacji nieliniowej, np. w algorytmie RPE jest to metoda Newtona-Raphsona, por. [11].

Metody te wymagają filtracji danych przy użyciu ocen parametrów uzyskanych w trakcie działania algorytmu. Jeśli spojrzeć na wykres typowej zależności amplitudy od częstotliwości w dowolnej ścieżce elektroakustycznej, to można zauważyć wiele dolin i pików, por. rys. 2. Świadczy to o tym, że w modelu transmitancyjnym powinno występować wiele zer (odpowiadających dolinom) i biegunów (odpowiadających pikom) bliskich okręgu jednostkowego. To niestety prowadzi do niestabilności numerycznej wszystkich metod opartych na RPE. Podobnie dzieje się też w przypadku metody zmiennej instrumentalnej. Poza tym metody te w przypadku tak wysokich stopni wielomianów, jakie są tu wymagane, byłyby zbyt czasochłonne. Stanowi to dodatkowe uzasadnienie dla wyboru modelu w postaci ARX, do przedstawionego już w punkcie 3.



Rys. 2. Charakterystyka amplitudowa obiektu

Jednak oprócz estymacji parametrów trzeba także dokonać identyfikacji stopni wielomianów i czasów opóźnienia w modelu. W rozpatrywanym przypadku trudno jest bowiem określić strukturę modelu bazując na analizie zjawisk fizycznych w obiekcie, tym bardziej, że skomplikowana dynamika wymaga stosowania wielomianów bardzo wysokich stopni. Na ogół problem ten rozwiązuje się poprzez iteracyjne poszukiwania odpowiedniej struktury w zadanym a priori zakresie i wybór modelu zgodnie z określonym kryterium. Kryterium to powinno brać pod uwagę z jednej strony dokładność modelu, a z drugiej jego złożoność. Typowe podejście polega na połączeniu kryterium estymacji ze swego rodzaju „karą” za liczbę parametrów modelu. W literaturze można spotkać różne propozycje kompromisu między złożonością a dokładnością, do najpopularniejszych należą tzw. kryteria informacyjne:

- Akaike [1]:  $AIC = N \log V(\theta) + 2n$ ;
- Bayesa [15]:  $BIC = N \log V(\theta) + n \log N$ ;

gdzie  $n$  oznacza liczbę parametrów modelu (wymiar wektora  $\theta$ ). Zgodnie z kryterium informacyjnym wybiera się ten model, dla którego osiąga ono minimum.



Oprócz kryterium wyboru trzeba także określić strategię poszukiwań. Problem staje się bardzo trudny w przypadku identyfikacji modeli o wielu wejściach, gdyż liczba dopuszczalnych struktur rośnie wykładniczo z liczbą wielomianów w modelu. Przykład takiej strategii opisano w [8] i został on zaimplementowany w systemie *MULTI-EDIP* [9], którego inteligentne wsparcie w tym zakresie wykorzystano do rozwiązania tego zadania. Wiele badań wykazało użyteczność i efektywność zaproponowanego algorytmu, chociaż oparty został na pewnej heurystyce i oczywiście nie gwarantuje, że minimum globalne zostanie na pewno osiągnięte. W systemie *MULTI-EDIP* wymagane jest tylko podanie zakresu poszukiwań, stąd biorąc pod uwagę wymiary oraz złożoność dynamiki, a także wiedzę wynikającą z poprzednich doświadczeń przyjęto, że opóźnienia  $d_p$  w modelu należy poszukiwać w zakresie od 4 do 10, a stopnie wielomianów od 60 do 100.

Kolejny problem, który należy rozwiązać, to wybór kryterium pozwalającego sprawdzić, czy model jest odpowiednio dokładny dla postawionego celu, zanim jeszcze zostanie poddany ostatecznej akceptacji w wyniku jego stosowania. Procedura taka nazywa się walidacją [2]. W rozpatrywanym przypadku problem polega na tym, że dla celów filtracji potrzebny jest model parametryczny, którego estymacja oparta jest na minimalizacji błędu predykcji w dziedzinie czasu, podczas gdy dla celów poprawnego działania układu kompensacji ATH wymagana jest wysoka dokładność modeli torów wtórnego i sprzężenia akustycznego w dziedzinie częstotliwości, o czym wspomniano w punkcie 2.

Jako kryterium walidacji zaproponowano ocenę dokładności modelu opartą na porównaniu dla każdego toru sterowania charakterystyki częstotliwościowej  $G_p(j\omega)$  otrzymanego modelu parametrycznego ze wzorcem  $G_p(j\omega)$  dla częstotliwości względnych  $\omega$ , będących wielokrotnościami częstotliwości podstawowej  $\Omega = 2\pi/N$ . Jako wzorec proponuje się tu charakterystykę otrzymaną na drodze klasycznej analizy widmowej. W celu walidacji modelu definiuje się błąd fazy

$$\Delta\varphi_p(\omega) = \left| \arg(G_p(j\omega)) - \arg(G_p(j\omega)) \right| \quad (11)$$

i sprawdza, czy nie przekracza on granicy  $\pi/2$  dla częstotliwości  $\omega$  w przewidywanym zakresie pracy. Jednocześnie definiuje się wskaźnik dokładności charakterystyki amplitudowej w postaci błędu średniokwadratowego:

$$D_p = \sqrt{\frac{1}{m_2 - m_1 + 1} \sum_{m=m_1}^{m_2} \left( |G_p(j\Omega m)| - |G_p(j\Omega m)| \right)^2}, \quad (12)$$

gdzie  $\Omega m_1$  i  $\Omega m_2$  odpowiadają dolnej i górnej granicy częstotliwości pracy.

Aby zwiększyć pewność, że wzorce  $G_p(j\omega)$  dobrze aproksymują własności obiektu, na potrzeby tej pracy przyjęto, że wyznaczone powinny być one na podstawie dodatkowych doświadczeń, w których kolejno każdy z głośników pobudzany jest sygnałem wielosinusoidalnym o pełnym widmie. Charakterystyki poszczególnych ścieżek obliczono korzystając z empirycznego estymatora ETFE [11]. Testowanie modelu dla innego zbioru danych niż ten, który był użyty do estymacji, nosi nazwę walidacji skrośnej (ang. *cross-validation*) i jest zalecane w literaturze.

## 6. WYNIKI IDENTYFIKACJI

Wyniki identyfikacji struktury modeli oraz wartości kryterium oceny jakości dla jednej ze ścieżek wtórnych przedstawiono w tabeli 1. W dwóch pierwszych wierszach pokazano wyniki dla modeli MISO-ARX, natomiast w wierszu trzecim wyniki uzyskane przy wykorzystaniu metody opartej na dekompozycji spektrum sygnału wyjściowego na 3 spektra częściowe i identyfikacji modeli SISO osobno dla każdego toru sterowania.

Na podstawie wyników można stwierdzić, że uzyskane modele spełniają przedstawione w punkcie 2 wymagania dokładności charakterystyk częstotliwościowych. Jednocześnie w rozpatrywanym przykładzie kryterium BIC, w którym zwiększa się karę za złożoność modelu, wydaje się być bardziej przydatne. Modele wybrane na podstawie AIC posiadają znacznie wyższe stopnie wielomianów przy praktycznie porównywalnej dokładności ich charakterystyk częstotliwościowych.

Wykorzystanie metody bazującej na dekompozycji daje wyniki porównywalne z klasycznym podejściem do identyfikacji modeli MISO. Natomiast jej niezaprzeczalną zaletą jest znaczne uproszczenie problemu. W tym przypadku bowiem mamy do czynienia z trzema układami równań o wymiarach  $dA_p + dB_p$  każdy, zamiast jednego układu o wymiarach  $dA + dB_1 + dB_2 + dB_3$ , a zadanie poszukiwania struktury

Tabela 1. Wyniki identyfikacji

Lp.	Kryterium wyboru / wybrana struktura	Tor 1		Tor 2		Tor 3	
		$D_1$	$\max\Delta\varphi_1(\omega)$	$D_2$	$\max\Delta\varphi_2(\omega)$	$D_3$	$\max\Delta\varphi_3(\omega)$
1	BIC / (51, [6 5 7], [41 50 49])	0.0106	1.342	0.0252	0.364	0.0152	0.569
2	AIC / (79, [6 5 7], [57 80 77])	0.0105	1.497	0.0248	0.288	0.0142	0.607
3	BIC / Tor 1: (71, 6, 69) Tor 2: (80, 5, 79) Tor 3: (73, 7, 73)	0.0093 - -	2.075 - -	- 0.0238 -	- 0.314 -	- - 0.0142	- - 0.628

modelu w siedmiowymiarowej przestrzeni liczb całkowitych sprowadza się do trzech zadań poszukiwania w przestrzeniach trójwymiarowych.

Pewien niepokój może tu jednak wzbudzać przekroczenie przez błąd fazy ograniczenia  $\pi/2$  dla toru pierwszego. Wynik ten wystąpił dla częstotliwości 118 Hz i zdarzył się tylko w tym jednym przypadku. Jednak w pierwszym i drugim wierszu tabeli błąd fazy dla tego toru jest także dość duży i występuje dla tej samej częstotliwości. Stąd wniosek, że w trakcie pracy układu ATH mogą wystąpić problemy z tłumieniem dla tej częstotliwości. Jednocześnie tak zły wynik pojawił się tylko dla tej jednej ścieżki wtórnej, dla pozostałych ścieżek elektro-akustycznych wyniki były równie dobre dla każdego z torów sterowania.

## 7. UWAGI KOŃCOWE

W pracy przedstawiono procedurę identyfikacji obiektów elektro-akustycznych MISO. Stwierdzono, że w celu poprawnej parametryzacji układu kompensacji ATH identyfikowane powinny być modele typu ARX. Dzięki wykorzystaniu własności sygnałów WSWO oraz specjalnej filtracji możliwe było przeprowadzenie identyfikacji wszystkich potrzebnych modeli na podstawie tylko jednego doświadczenia. Omówiono także problem wyboru struktury modeli oraz ich walidacji. Jako test oceny jakości modelu zaproponowano porównanie charakterystyk częstotliwościowych modeli uzyskanych metodami parametrycznymi z otrzymanymi za pomocą klasycznej analizy widmowej. Wyniki identyfikacji rzeczywistego obiektu elektro-akustycznego pokazały, że możliwe jest uzyskanie odpowiednio dokładnych modeli nieparametrycznych w dziedzinie częstotliwości, mimo że identyfikację prowadzono metodą parametryczną opartą na minimalizacji błędu predykcji w dziedzinie czasu.

### MODEL IDENTIFICATION FOR ACTIVE NOISE CONTROL

**Abstract:** One of the typical problems in active noise control (ANC) system design is identification of an electro-acoustic plants. In the example considered models are required to parameterize an adaptive feedforward ANC system creating a local 3-dimensional zone of quiet in an enclosure. The structure of a multi-channel control system involves the necessity of identification of transfer functions for secondary and acoustic feedback paths. Complexity of the plant implies that identified models should be of a very high order. Since there are no prerequisites for model structure assumption, delays and polynomial orders are to be identified too. The results of real-world experiments are presented and accuracy of frequency response estimates of parametric models is proved using a classical spectral analysis.

## Literatura

- [1] Akaike H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Trans. on Autom. Control*, AC-19, 667-674.
- [2] Bohlin T. (1991) *Interactive System Identification: Prospects and Pitfalls*. Springer Verlag, Berlin.
- [3] Elliot S. J. (2001) *Signal Processing for Active Control*. Academic Press.
- [4] Figwer J. (1996) Multisine Excitation for Process Identification. *Archives of Control Sciences*, 5, 279-295.
- [5] Figwer J., Błazej M (2003) Chaos in Active Noise Control Systems. *Proceedings of 10th Int. Congress on Sound and Vibration ICSV 2003*, Stockholm (CD).
- [6] Figwer J., Niederliński A., Kasprzyk J. (1993) A New Approach to the Identification of Linear Discrete-Time MISO Systems. *Archives of Control Sciences*, 2, 223-239.
- [7] Hansen C. H., Snyder S. D. (1997) *Active Control of Noise and Vibration*. Cambridge University Press.
- [8] Kasprzyk J. (1997) Model Structure Determination in Parametric Model Identification. *Systems Science*, 23, 89-95.
- [9] Kasprzyk J. (2003) MULTI-EDIP – An Interactive Software Package for Process Identification. *Proceedings of 13th IFAC Symposium on System Identification*, 1484-1489, Rotterdam.
- [10] Kuo S. M., Morgan D. R. (1996) *Active Noise Control Systems. Algorithms and DSP Implementations*. J. Wiley & Sons, N. York.
- [11] Ljung L. (1999). *System identification - Theory for the user* (2nd ed.). Prentice-Hall, Upper Saddle River, N.J.
- [12] Michalczyk M. I. (2004). *Adaptive Control Algorithms for Three-Dimensional Zones of Quiet*. Jacek Skalmierski Computer Studio, Gliwice.
- [13] Ouderaa E. Van der, Schoukens J., Renneboog J. (1988). Peak factor minimization of input and output signals of linear systems. *IEEE Trans. on Instrum. Meas.*, 37, 207-212.
- [14] Pintelon R., Schoukens J. (2001). *System Identification. A Frequency Domain Approach*. IEEE Press, New York.
- [15] Schwarz G. (1978). Estimating the dimension of a model. *Ann. Statist.*, 6, 461-464.



**Instytut Badań Systemowych  
Polskiej Akademii Nauk**

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