

XV Krajowa Konferencja Automatyki

Tom II



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

XV Krajowa Konferencja Automatyki Tom II



Redaktorzy:
Zdzisław BUBNICKI
Roman KULIKOWSKI
Janusz KACPRZYK

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

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	Zdzisław BUBNICKI
Zastępca Przewodniczącego	Roman KULIKOWSKI

CZŁONKOWIE

Stanisław BAŃKA	Michał BIAŁKO
Mikołaj BUSŁOWICZ	Władysław FINDEISEN
Ryszard GESSING	Henryk GÓRECKI
Jakub GUTENBAUM	Jerzy JÓZEFczyk
Stanisław KACZANOWSKI	Tadeusz KACZOREK
Janusz KACPRZYK	Jerzy KLAMKA
Józef KORBICZ	Zbigniew KOWALSKI
Krzysztof KOZŁOWSKI	Juliusz L. KULIKOWSKI
Krzysztof KUŹMIŃSKI	Kazimierz MALANOWSKI
Krzysztof MALINOWSKI	Wojciech MITKOWSKI
Antoni NIEDERLIŃSKI	Władysław PEŁCZEWSKI
Tadeusz PUCHAŁKA	Leszek RUTKOWSKI
Stanisław SKOCZOWSKI	Roman SŁOWIŃSKI
Jerzy ŚWIĄTEK	Andrzej ŚWIERNIAK
Ryszard TADEUSIEWICZ	Piotr TATJEWSKI
Krzysztof TCHOŃ	Leszek TRYBUS
Jan WĘGLARZ	Andrzej P. WIERZBICKI

KOMITET ORGANIZACYJNY

Przewodniczący	Roman KULIKOWSKI
Zastępcy Przewodniczącego	Janusz KACPRZYK
	Stanisław KACZANOWSKI
	Tadeusz KACZOREK
	Krzysztof MALINOWSKI
Członkowie	Roman OSTROWSKI
	Tadeusz PUCHAŁKA
	Dariusz WAGNER
Sekretarze naukowci	Jan STUDZIŃSKI
	Jan W. OWSIŃSKI

ISBN 83-89475-01-4

Copyright © Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk
All rights reserved

Druk: ARGRAF, Warszawa

SYSTEMY STEROWANIA

ADAPTACYJNE ALGORYTMY STEROWANIA DLA PRZESTRZENNYCH STREF CISZY[†]

Małgorzata I. MICHALCZYK

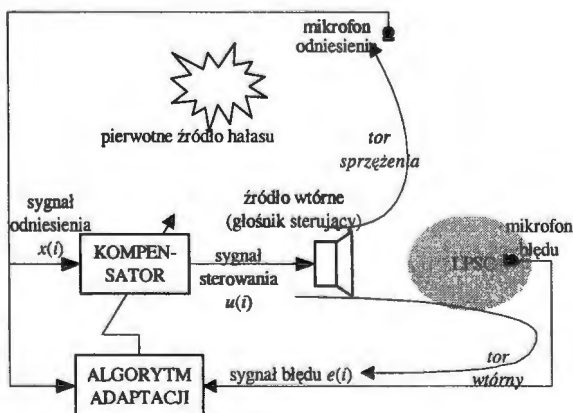
Politechnika Śląska, Instytut Automatyki
ul. Akademicka 16, 44-100 Gliwice, e-mail: malgorzata.michalczyk@polsl.pl

Streszczenie: Artykuł streszcza wyniki badań nad parametryzacją adaptacyjnych algorytmów sterowania bazujących na algorytmie LMS stosowanych w jedno- i wielokanałowych układach aktywnego tłumienia hałasu (ATH) tworzących lokalne przestrzenne strefy ciszy (LPSC) w pomieszczeniach. Pokazano, w jaki sposób błędy modeli obiektów elektroakustycznych, krok adaptacji oraz dobór rzędu filtra kompensatora wpływają na działanie układu ATH. Te obserwacje pozwoliły na sformułowanie pewnych reguł parametryzacji omawianych algorytmów stosowanych dla obiektów o skomplikowanej dynamice i silnie niestacjonarnych. Pokazano również, że poprawnie sparаметryzowane układy ATH mogą tworzyć duże, adaptacyjne strefy ciszy.

Słowa kluczowe: Adaptacyjne algorytmy sterowania, identyfikacja obiektów, algorytm LMS, aktywne tłumienie hałasu.

1. WSTĘP

Pomimo siedemdziesięcioletniej historii aktywnego tłumienia hałasu (ATH), wciąż istnieją nierozwiązane problemy ATH w pomieszczeniach. Streszczone w tym artykule wyniki badań nad tworzeniem lokalnych przestrzennych stref ciszy (LPSC) w pomieszczeniach zamkniętych z wykorzystaniem układów ATH rzuciły światło na tę problematykę.



Rys.1. Idea ATH dla LPSC.

Przestrzenna strefa ciszy to podprzestrzeń przestrzeni akustycznej, w której zachodzi wytłumienie hałasu (zakłócenia). Tłumienie jest rozumiane jako minimalizacja wartości średniokwadratowej zmian ciśnienia akustycznego. Ideą ATH jest wytłumienie hałasu (zakłócenia) za pomocą fal akustycznych dodatkowo wygenerowanych przez głośniki sterujące, wykorzystując zjawisko destruktywnej interferencji [27] lub kompensacji fali akustycznej [12]. W wielu praktycznych realizacjach wykazano już efektywność układów ATH (aktywne ochronniki słuchu, falowody akustyczne, układy dla ATH w środkach lokomocji i pomieszczeniach) [10,17,18]. Systemy takie są zazwyczaj cyfrowe, co umożliwia zastosowanie adaptacyjnych algorytmów sterowania, poszerzając pole możliwych zastosowań.

Układ automatycznej kompensacji pokazany na rys. 1 jest najczęściej stosowaną strukturą układu sterowania. Sygnał odniesienia $x(i)$, pozyskiwany za pomocą mikrofonu odniesienia lub nieakustycznego czujnika i niosący informację o zakłóceniu jest przetwarzany przez kompensator dając sygnał sterowania $u(i)$. Ten pobudza głośnik sterujący, który generuje falę akustyczną interferującą z hałasem i wokół mikrofonu błędny powstaje LPSC. Ponieważ nieznaną jest analityczny model kompensatora, w celu jego wyznaczenia wykorzystuje się algorytm adaptacji minimalizujący wariancję sygnału błędny $e(i)$. W układach ATH można wyróżnić dwa tory: tor wtórny i tor akustycznego sprzężenia zwrotnego będące obiektami elektroakustycznymi (EA). Każdy z nich obejmuje tor elektryczny, głośnik, mikrofon oraz przestrzeń akustyczną pomieszczenia. Tor wtórny, obejmujący głośnik sterowania i mikrofon błędny, przetwarza sygnał sterowania w sygnał błędny. W układzie kompensacji wykorzystującym mikrofon odniesienia występuje akustyczne sprzężenie zwrotne, pomiędzy głośnikiem sterującym a tymże mikrofonem. Istnienie torów wtórnego oraz akustycznego sprzężenia zwrotnego narzuca konieczność stosowania ich modeli do parametryzacji adaptacyjnych algorytmów sterowania. Oprócz modeli obiektów EA należy dobrać liczbę współczynników filtra kompensatora (filtr FIR bądź IIR) oraz krok adaptacji, który dobiera się tak, aby za-

[†]Badania współfinansowano ze środków budżetowych na naukę w roku 2005.

pewnić zbieżność algorytmu adaptacji. Problem doboru parametrów adaptacyjnego algorytmu sterowania jest jedną z głównych barier na drodze od symulacji do zastosowań układów tworzących LPSC w pomieszczeniach, a jednocześnie jest tematem niniejszego artykułu.

Artykuł jest zorganizowany następująco: (2) przedstawiony jest układ ATH: obiekt, układ oraz algorytm sterowania i wprowadzone są parametry algorytmu sterowania; szczegółowo rozważany jest dobór tych parametrów i ich wpływ na działanie układu ATH; (3) analizowany jest problem doboru kroku adaptacji i (4) problem modelowania obiektu sterowania i wpływu błędów modelowania na działanie układu, z uwzględnieniem niestacjonarności obiektów; (5) na koniec podane są przykłady działania opisanych układów.

2. UKŁAD ATH

2.1. Obiekt

W układach ATH obiektem sterowania jest obiekt EA. Omawiane badania przeprowadzono w układach jedno i trójkanałowym (1 mikrofon odniesienia, 3 mikrofony błędu i 3 głośniki sterujące). Lokalizacje mikrofonów i głośników określono arbitralnie. Układy ATH tworzące LPSC zrealizowano w laboratorium aktywnego tłumienia hałasu w Instytucie Automatyki, Politechniki Śląskiej w Gliwicach [16,20,22] w małym pomieszczeniu o objętości 22 m³ oraz dużym pomieszczeniu o objętości 177 m³.

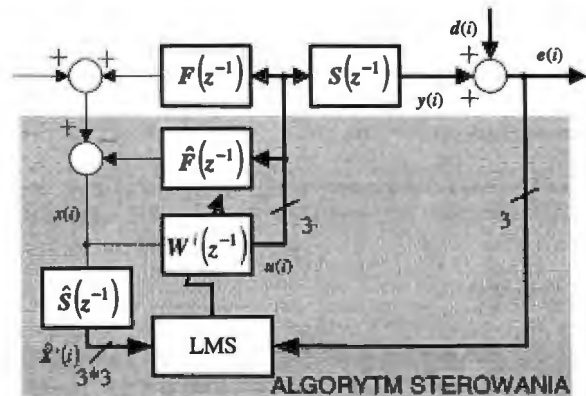
Własności elementów elektronicznych obiektów EA mogą ulegać zmianom, również zakłócenie może mieć charakter niestacjonarny. Jednakże przestrzeń akustyczna zmienia się daleko bardziej. Każda zmiana konfiguracji przestrzennej pomieszczenia, jak otwarcie drzwi, okna lub poruszanie się wewnątrz osoby powodują zmiany dynamiki obiektu EA. Na potrzeby przeprowadzonych badań rozróżniono trzy rodzaje niestacjonarności [22]:

- slabe niestacjonarności, powodowane przez zmiany temperatury i wilgotności powietrza, itp., nie wpływające w znaczący sposób na dynamikę obiektów EA, a więc i na działanie układu ATH.
- silne niestacjonarności – spowodowane przez zmiany konfiguracji pomieszczenia, np. otwarcie drzwi, poruszanie się osób wewnątrz. W przypadku ich wystąpienia algorytm sterowania jest odporny na błędy modeli torów wtórnych, lecz wrażliwy na błędy modeli torów akustycznego sprzężenia zwrotnego [1].
- bardzo silne niestacjonarności (ang. *severe*), spowodowane przez przemieszczanie mikrofonów błędu w pomieszczeniu. Przemieszczenia powodują olbrzymie zmiany dynamiki torów wtórnych, a więc i zmiany błędów fazowych modeli torów wtórnych, które mogą przekroczyć $\pm\pi/2$ rad, co powoduje rozbieżność adaptacyjnego algorytmu sterowania [18].

2.2. Struktury układu sterowania

Najczęściej stosowaną strukturą układu ATH jest układ automatycznej kompensacji z pomiarem sygnału odniesienia za pomocą mikrofonu. W takich układach, zwłaszcza wykorzystywanych dla tworzenia LPSC w pomieszczeniach występuje akustyczne sprzężenie zwrotne między głośnikiem (głośnikami) sterującym a mikrofonem odniesienia. Jeżeli jest więc możliwość, sygnał odniesienia należy pozyskiwać za pomocą czujnika nieakustycznego np. tachometru. W przypadku gdy nie ma dostępu pomiarowego do sygnału odniesienia, lub hałas pochodzi z wielu źródeł stosuje się [11] układ z modelem wewnętrznym – IMC (*Internal Model Control*). Bardzo rzadko stosuje się klasyczne metody sterowania, np. regulację PI lub minimalnowariancyjną, głównie z powodu zerowego wzmocnienia składowej stałej przez obiekty EA [28].

Jednokanałowy układ ATH może wprowadzić tworzyć duże LPSC [6], jednak zazwyczaj dla zwiększenia obszaru tłumienia stosuje się układy wielokanałowe [17,18,27]. Są one efektywniejsze, ale ich parametryzacja jest trudniejsza [17,23].



Rys. 2. Schemat blokowy trójkanałowego układu ATH z jednym mikrofonem odniesienia.

2.3. Algorytm sterowania

W układach ATH najczęściej stosowanym adaptacyjnym algorytmem sterowania jest algorytm FX-LMS [10,18], krótko przypomniany poniżej, by wprowadzić oznaczenia [22,23]. Zgodnie z rys. 2 w przypadku wielokanałowym wektor sygnału sterowania $u(i)$ jest wyliczony poprzez filtrację sygnału odniesienia $x(i)$ przez filtr kompensatora $W^i(z^{-1})$: $u(i) = W^i(z^{-1})x(i)$. Akustyczne sprzężenie zwrotne jest neutralizowane z wykorzystaniem modelu toru tego sprzężenia $\hat{F}(z^{-1})$. Macierz filtrowanego sygnału odniesienia $\hat{x}'(i)$ jest uzyskana przez filtrację sygnału odniesienia przez macierz $\hat{S}(z^{-1})$ modeli kanałów toru wtórnego. Wektor sygnałów błędów $e(i)$ jest sumą wektora zakłóceń $d(i)$ i wektora sygnału sterowania $u(i)$ przetworzonego przez tor wtórny $S(z^{-1})$. Algorytm FX-LMS minimalizuje [26]:

$$\xi(i) = E\{e^T(i)e(i)\}. \quad (1)$$

uaktualniając wektor współczynników $w(i)$ kompensatora według:

$$w(i+1) = w(i) - \mu \hat{X}'(i)e(i), \quad (2)$$

gdzie μ jest krokiem adaptacji.

W układzie jednokanałowym $w(i)$ jest wektorem współczynników kompensatora $W'(z^{-1})$. Filtrowany sygnał odniesienia $x'(i)$ otrzymuje się poprzez filtrację sygnału odniesienia przez model toru wtórnego $\hat{S}(z^{-1})$, a sygnał błędu $e(i)$ jest sumą sygnału zakłócenia $d(i)$ i przetworzonego przez tor wtórny $S(z^{-1})$ sygnału sterowania. Równanie (2) przyjmuje postać $w(i+1) = w(i) - \mu x'(i)e(i)$.

2.4. Parametryzacja algorytmu sterowania

Przed uruchomieniem układu ATH algorytm FX-LMS powinien zostać sparametryzowany. Muszą zostać podane następujące parametry algorytmu: krok adaptacji μ , rząd filtru kompensatora N , model toru wtórnego $\hat{S}(z^{-1})$ (lub macierz modeli w przypadku układu wielokanałowego) oraz model toru akustycznego sprzężenia zwrotnego $\hat{F}(z^{-1})$ (lub macierz $\hat{F}(z^{-1})$).

3. KROK ADAPTACJI

Dobór kroku adaptacji. Odpowiedni dobór parametrów jest warunkiem zbieżności algorytmu sterowania. W przypadku pominięcia błędów modelowania toru wtórnego uważa się [10,18,29], że zbieżność algorytmu (w przypadku układu jednokanałowego) zapewnia dobór kroku adaptacji z zakresu:

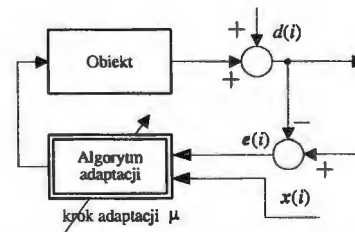
$$0 < \mu < \frac{2}{\lambda_{\max}}, \quad (3)$$

gdzie λ_{\max} jest największą wartością własną macierzy autokorelacji $R_{x',x'}$ filtrowanego sygnału odniesienia $x'(i)$. Dobór kroku adaptacji będzie niezależny od mocy filtrowanego sygnału odniesienia, jeżeli zastosuje się znormalizowany algorytm FX-LMS (NFX-LMS) [10].

Podstawowym warunkiem zbieżności algorytmu FX-LMS jest (3). Przeprowadzono wiele analiz algorytmu FX-LMS wyprowadzając podobne warunki zbieżności, np. [13,19]. Okazuje się jednak, że nie zawsze zapewniają one zbieżność algorytmu, zwłaszcza w zastosowaniu do tworzenia LPSC w pomieszczeniach [22,24]. Wciąż brak więc wskazówek jak zapewnić zbieżność algorytmu FX-LMS w przypadku złożonej dynamiki niestacjonarnego obiektu EA, gdy wymagane jest szybkie nadążanie układu ATH za zmianami dynamiki obiektu. Wymagana wtedy duża wartość kroku adaptacji może spowodować stan pre-chaotyczny układu ATH [1,14,15,22,30].

Zachowanie pre-chaotyczne algorytmu sterowania. Dla dużych wartości kroku adaptacji adaptacja może

być interpretowana jako nieliniowe sprzężenie zwrotne (rys. 3). Im większy krok adaptacji tym większy jest wpływ nieliniowości algorytmu adaptacji na zachowanie układu ATH, co prowadzi do zachowań pre- oraz chaotycznych [14,15,22]. Pokazano, że wraz ze wzrostem kroku adaptacji μ układy ATH (również z nieaktywnym czujnikiem odniesienia) wykorzystujące algorytmy sterowania oparte o algorytm LMS (NFX-LMS, FX-LMS) mogą generować niepożądane fale dźwiękowe, nawet jeżeli nie są one obecne w tłumionym zakłóceniu. Ich liczba i amplituda zależą od wartości kroku adaptacji [14,15,22]. Występowanie akustycznego sprzężenia zwrotnego dodatkowo powoduje quasi-okresowe zachowanie układu ATH.



Rys. 3. Schemat układu ATH z uwzględnieniem nieliniowości algorytmu sterowania.

Układ wielokanałowy. Dobór kroku adaptacji μ dla układu wielokanałowego jest zadaniem o wiele trudniejszym niż w przypadku układu jednokanałowego. Najprostszym rozwiązaniem jest wybór μ skalarnego, jednak zastosowanie macierzy kroków adaptacji μ daje o wiele lepsze rezultaty [23].

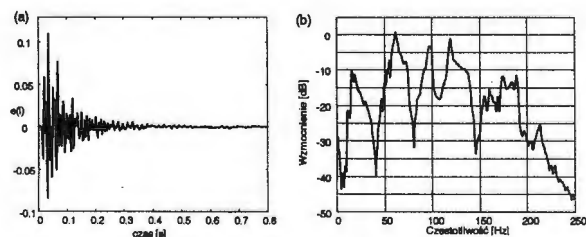
Szybka adaptacja dla obiektów niestacjonarnych. W trakcie działania układu ATH zmiana zakłócenia lub niestacjonarność obiektu sterowania mogą spowodować konieczność dostosowania się układu do nowych warunków. Zdarza się to często w układach tworzących LPSC lecz jest rzadko uwzględniane w literaturze. Jeżeli silne niestacjonarność mają mały zasięg przestrzenny [22] układ może działać zadowalająco bez żadnych dodatkowych modyfikacji. Jednak szybkie zmiany położenia mikrofonów błędów wymagają szybkiej reakcji, co można uzyskać wybierając dużą wartość kroku adaptacji. W oparciu o wyniki oryginalnych badań eksperymentalnych pokazano [7], że im szybciej mikrofon błędów jest poruszany, tym większa powinna być wartość kroku adaptacji. Najlepszym rozwiązaniem byłaby więc dodatkowa adaptacja kroku adaptacji.

4. WPŁYW MODELI OBIEKTÓW ELEKTRO-AKUSTYCZNYCH

4.1. Identyfikacja modeli

Ważnym etapem projektowania układu ATH jest parametryzacja algorytmu sterowania za pomocą modeli parametrycznych obiektu EA [10,18]. Ponieważ modeli tych praktycznie nie da się uzyskać analitycznie [28], najlepszą metodą ich uzyskania jest ich identyfikacja. Obiekty EA w układach ATH tworzących LPSC mają bardzo złożone własności dynamiczne [20] (rys. 4). Aby

oddać złożoność dynamiki tych obiektów należy stosować modele o wielu parametrach. Wykorzystując Kryterium Informacyjne Bayesa (BIC) pokazano [20,22], że do modelowania obiektów EA w małym pomieszczeniu powinno się wykorzystywać modele z około 200 parametrami, zaś w dużym pomieszczeniu – z 200-400. Pokazano również, że generalnie filtry typu IIR nie mają przewagi nad filtrami typu FIR w modelowaniu obiektów tego typu.



Rys. 4. Odpowiedź impulsowa przykładowego toru wtórnego (a) oraz jego charakterystyka amplitudowa (b).

4.2. Tor wtórny

Algorytm FX-LMS jest zbieżny pod warunkiem, że błędy fazowe $\Delta\Phi_S(\omega T)$, $\omega T \in [0, 2\pi)$ modelu toru wtórnego są mniejsze od $\pm\pi/2$ [18]:

$$\forall_{0 \leq \omega < 2\pi} |\Delta\Phi_S(\omega T)| < \frac{\pi}{2}. \quad (4)$$

W literaturze twierdzi się, że do modelowania tego toru wystarczy wykorzystać kilka początkowych elementów jego odpowiedzi impulsowej [8,29] lub nawet tylko jego czas opóźnienia [19]. Jednakże pokazano [9,13], że zastosowanie tylko czasu opóźnienia zapewnia zbieżność algorytmu sterowania tylko dla pewnych zakresów częstotliwości. Poza tym, błędy fazowe modelu toru wtórnego, nawet jeśli mniejsze niż $\pm\pi/2$, mają znaczny wpływ na zbieżność algorytmu FX-LMS [17], mimo, że nie da się prosto opisać zależności pomiędzy błędami modelowania a jakością działania układu [17]. Natomiast prawie nie analizowano w literaturze wpływu błędów amplitudowych modelu na działanie układów ATH.

Przeprowadzono eksperymenty symulacyjne (oparte na danych zarejestrowanych w układzie rzeczywistym) [21,22] by przeanalizować wpływ błędów modelowania toru wtórnego na działanie układu tworzącego LPSC w pomieszczeniach. Wyniki badań sugerują użycie co najmniej 100 parametrów modelu w przypadku układu w małym pomieszczeniu, by zapewnić zadowalające działanie układu. Ciekawym spostrzeżeniem była rozbieżność algorytmu sterowania przy spełnionym warunku (4) spowodowana dużymi błędami amplitudowymi.

Nawet jeśli tor wtórny modelowany jest poprawnie istnieje problem wolnej zbieżności algorytmu FX-LMS, spowodowany dużą złożonością dynamiki tegoż toru. Różnice we wzmacnieniu tego toru dla różnych częstotliwości (nawet kilkadziesiąt decybeli dla składowych w zakresie kilku Hz) sprawiają, że niektóre częstotli-

ści są tłumione bardzo szybko, inne bardzo wolno – dobór kroku adaptacji jest wtedy wyjątkowo trudny. Większość rozwiązań tego problemu jest złożona obliczeniowo, np. algorytm Gaussa-Newtona [29] lub algorytmy ortogonalizujące funkcję autokorelacji filtrowanego sygnału odniesienia [10,18,25]. Jednym z rozwiązań w dziedzinie czasu, które nie zwiększa złożoności obliczeniowej algorytmu sterowania jest algorytm *Inverse* FX-LMS (IFX-LMS) [2]. Pokazano analitycznie i eksperymentalnie, że jego szybkość zbieżności jest taka sama jak w przypadku algorytmu LMS – niezależna od dynamiki toru wtórnego [2].

4.3. Tor akustycznego sprzężenia zwrotnego

Akustyczne sprzężenie zwrotne można w prosty sposób neutralizować za pomocą filtracji sygnału sterowania przez model toru akustycznego sprzężenia zwrotnego $\hat{f}(z^{-1})$ [18]. Model ten jest zazwyczaj identyfikowany *off-line*, przed uruchomieniem układu i powinien zapewniać minimalny błąd predykcji jednokrokowej. Analizy oparte o BIC pokazały, że modele toru akustycznego sprzężenia zwrotnego muszą być wysokiego rzędu, nawet ponad 400 [20,22]. Należy pamiętać, że tor ten jest niestacjonarny i przy zmianach konfiguracji pomieszczenia pojawiają się błędy modelowania.

Wyniki eksperymentów przeprowadzonych w rzeczywistych układach ATH [1,22] pokazały, że błędy modelowania toru akustycznego sprzężenia zwrotnego mają duży wpływ na działanie układu ATH. W pewnych przypadkach niewielkie nawet błędy wpływają na układ tak, jak brak neutralizacji akustycznego sprzężenia zwrotnego, dla dużych błędów układ ATH nawet wzmacnia hałas. Błędy te powodują pre-chaotyczne zachowanie układu ATH – generowane są pulsujące dodatkowe składowe częstotliwościowe [14,15]. Istnieje więc potrzeba dodatkowej kompensacji na bieżąco wspomnianych błędów modelowania.

Pokazano również [1,22], że im większy jest rząd N filtru kompensatora tym błędy mniej wpływają na działanie układu. Pokazano, że adaptowany filtr FIR wysokiego rzędu może kompensować błędy modelowania toru akustycznego sprzężenia zwrotnego zapewniając odpowiednie działanie układu ATH. W konsekwencji zastosowanie neutralizacji akustycznego sprzężenia zwrotnego za pomocą modelu identyfikowanego *off-line* wspomaganego przez filtr kompensatora wysokiego rzędu okazało się skutecznym i prostym rozwiązaniem, zwłaszcza w porównaniu z innymi często stosowanymi metodami:

- dodatkową neutralizacją *on-line*, ponieważ dodatkowy algorytm identyfikacji komplikuje działanie algorytmu sterowania [18],
- zastosowaniem filtru typu IIR (w algorytmie FU-LMS), co może spowodować rozbieżność algorytmu sterowania [18].

Rząd N filtru kompensatora powinien być dostosowany do złożoności widmowej zakłócenia. Niezależnie od

istnienia akustycznego sprzężenia zwrotnego wysoki rząd filtru kompensatora musi być stosowany w przypadku nieznanego lub znanego szerokopasmowego zakłócenia losowego [18], o ile nie ma większych ograniczeń na złożoność obliczeniową algorytmu. Jednakże prostota algorytmów bazujących na algorytmie LMS powinna umożliwić implementację z wykorzystaniem nawet ograniczonych środków [4].

4.4. Niestacjonarności obiektów

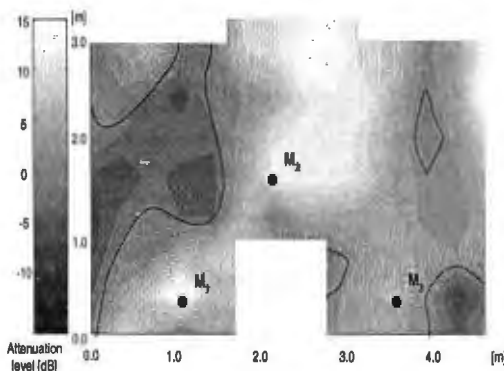
Niestacjonarności obiektów EA sklasyfikowane jako silne rzadko powodują rozbieżność algorytmu sterowania [1]. Bardzo silne niestacjonarności o małym zakresie przestrzennym (np. szybkie ruchy mikrofonu błędu po okręgu o średnicy ok. 40 cm) mogą nie wpływać negatywnie na działanie opisanych układów ATH dzięki zastosowaniu adaptacyjnego algorytmu sterowania i doborze dużej wartości kroku adaptacji [7].

Jednak bardzo silne niestacjonarności o dużym zakresie przestrzennym (ruchy mikrofonów błędu w zakresie 1,2 m [5]) powodują silne zmiany własności dynamicznych toru wtórnego, a więc i pojawienie się dużego błędu fazowego modeli torów wtórnych i akustycznego sprzężenia zwrotnego, który może spowodować rozbieżność algorytmu adaptacji opartego o algorytm FX-LMS.

Na podstawie wyników eksperymentów przeprowadzonych w układzie ATH stwierdzono, że zwiększenie zakresu ruchów mikrofonu błędu powoduje konieczność zastosowania dodatkowej identyfikacji *on-line* modeli obiektów EA, która to zapewnia zadowalającą jakość działania układu ATH [5].

5. PRZYKŁADY DZIAŁANIA UKŁADÓW ATH

Przeprowadzono wiele eksperymentów w opisanych układach zarówno w małym jak i dużym pomieszczeniu [7,22]. Najwyższe tłumienie (nawet do 40 dB), do poziomu tła, uzyskiwane jest zarówno w układzie kompensacji, jak i IMC [3] dla zakłóceń okresowych (pojedynczych tonów, lub sygnałów o kilku częstotliwościach składowych). Niższe tłumienie rejestrowano dla zakłóceń losowych (szumów pasmowych, nagranych rzeczywistych hałasów, np. hałasu samochodu osobowego).



Rys. 5. LPSC w dużym pomieszczeniu.

Dla tego typu zakłóceń wyraźnie lepsze wyniki uzyskano w układzie kompensacji. W obu testowanych pomieszczeniach i we wszystkich układach otrzymano duże LPSC [6, 23]. Największe strefy uzyskano tłumiąc hałas samochodu w dużym pomieszczeniu (rys. 5) – średnica strefy tłumienia powyżej 10 dB przekracza 1,6 m, a tłumienie zarejestrowane w mikrofonach błędu wyniosło 14 do 19 dB [23].

6. PODSUMOWANIE

Pokazano, że odpowiednio sparametryzowane adaptacyjne algorytmy sterowania tworzą duże lokalne przestrzenne strefy ciszy, które mogą przemieszczać się śledząc ruch mikrofonu błędu. W szczególności pokazano, że:

- Obiekty elektroakustyczne w układach ATH tworzących lokalne przestrzenne strefy ciszy są niestandardowymi obiektami sterowania, które muszą być modelowane z wykorzystaniem dużej liczby parametrów.
- Literaturowe ograniczenia na dobór kroku adaptacji nie zapewniają zbieżności algorytmów sterowania opartych o algorytm FX-LMS i stosowanych w realizacjach systemów aktywnego tłumienia hałasu tworzących lokalne przestrzenne strefy ciszy w pomieszczeniach.
- Wpływ nieliniowego sprzężenia wprowadzanego przez algorytm adaptacji na działanie adaptacyjnego układu aktywnego tłumienia hałasu wzrasta wraz ze wzrostem wartości kroku adaptacji algorytmu sterowania powodując chaotyczne zachowania układu.
- Eliminację negatywnego wpływu dynamiki toru wtórnego na szybkość zbieżności algorytmu sterowania można osiągnąć wprowadzając nową modyfikację algorytmu FX-LMS – algorytm IFX-LMS.
- O ile dopiero duże błędy modelowania toru wtórnego powodują pogorszenie jakości działania układu ATH, układ ten jest niezwykle silnie wrażliwy na nawet małe błędy modelowania toru akustycznego sprzężenia zwrotnego, chyba, że zastosowano filtr kompensatora bardzo wysokiego rzędu
- Dzięki zastosowaniu adaptacyjnych algorytmów sterowania przestrzenne strefy ciszy mogą nadążać za zmianą położenia mikrofonów błędu.

ADAPTIVE CONTROL ALGORITHMS FOR THREE-DIMENSIONAL ZONES OF QUIET

Abstract: The paper summarises the research on parameterisation of adaptive control algorithms based on the FX-LMS algorithm for active noise control (ANC) systems. These single- and multi-channel systems were built in enclosures to create three-dimensional zones of quiet (3D ZoQs). On the basis of results of simulation and real-world experiments it was shown how the electro-acoustic plant modelling errors, adaptation parameter and controller filter order choice influence the ANC system performance, also in nonstationary conditions. These observations were used to formulate some

parameterisation rules and hints for systems with electro-acoustic plants characterised by complicated dynamics and strong nonstationarities. The properly parameterised ANC systems were shown to create large adaptive, spatially moving 3D ZOQs.

Literatura

- [1] Błażej M. (2002), Neutralizacja akustycznego sprzężenia zwrotnego w układach tworzenia przestrzennych lokalnych stref ciszy, *Mat. XIV KKA*, 915-920.
- [2] Błażej M. (2002) Convergence speed Equalisation for FX-LMS Algorithm, *Proc. 7th IEEE Int. Conf. on MMAR*, 1139-1144.
- [3] Błażej M. (2002) Układ regulacji dla przestrzennych stref ciszy, *XLIX Otwarte Seminarium Akustyki*, 263-268, PTA.
- [4] Błażej M. (2002) Application of TMS320C31 DSP in Active Noise Control, *Proc. of IFAC Workshop on Programmable Devices and Systems*, 31-34, Elsevier Science Ltd.
- [5] Błażej M. (2003), On-line Identification for Active Noise Control, *Proc. of IFAC Workshop on Programmable Devices and Systems*, 223-228, Elsevier Science Ltd.
- [6] Błażej M. (2003) Comparison of Different Control Structures of Active Noise Control Systems, *Materiały Konf. MARDiH*, wersja CD.
- [7] Błażej M., Ogonowski Z. (2001) Niestacjonarność przestrzennych stref ciszy, *Mat. XLVIII Otwarte Seminarium Akustyki*, 197-202, Oficyna Wyd. Polit. Wroc.
- [8] Boucher C.C., Elliott S. J. Nelson P.A. (1991), Effects on errors in the plant model on the performance of algorithms for adaptive feedforward control, *IEE Proc. F*, **138**(4), 313-319.
- [9] Chen G., Sone T., Saito N., Abe M., Makino S. (1998) The stability and convergence characteristics of the delayed-x LMS algorithm in ANC systems, *Journal of Sound and Vibration*, **216**(4), 637-648.
- [10] Elliott S.J. (2001) *Signal Processing for Active Control*, Academic Press.
- [11] Elliott S.J., Sutton T.J. (1996) Performance of Feedforward and Feedback Systems for Active Noise Control, *IEEE Trans. SAP*, **4**(3), 214-223
- [12] Engel Z., Makarewicz G., Morzyński L., Zawieska W.M. (2001) *Metody aktywne redukcji hałasu*, Wyd. CIOP, Warszawa.
- [13] Feintuch P.L., Bershada N.J., Lo A.K. (1993) A Frequency Domain Model for "Filtered" LMS Algorithms - Stability Analysis Design and Elimination of the Training Mode, *IEEE Trans. SP*, **41**(4), 1519-1531.
- [14] Figwer J., Błażej M. (2003) A New Look on Adaptation In Active Noise Control Systems, *PAK*, **11**(3).
- [15] Figwer J., Błażej M. (2003) Chaos in Active Noise Control Systems, *10th Int. Congress on Sound and Vibration ICSV 2003*, wersja CD, Stockholm.
- [16] Figwer J., Ogonowski Z., Pawełczyk M. (2002) Stanowiska laboratoryjne do badań algorytmów aktywnego tłumienia hałasu, *Mat. XLIX Otwarte Seminarium Akustyki*, 169-174, PTA.
- [17] Hansen C., Snyder S.D. (1997) *Active Control of Noise and Vibration*, Cambridge University Press.
- [18] Kuo S.M., Morgan D.R. (1996), *Active Noise Control System, Algorithms and DSP Implementations*, J. Wiley & Sons Inc., New York.
- [19] Long G., Ling F., Proakis J.G. (1989) The LMS Algorithm with Delayed Coefficient Adaptation, *IEEE Trans. ASSP*, **37**(9), 1397-1405.
- [20] Michalczyk M.I. (2004) Electro-Acoustic Plant Modelling for Active Noise Control Systems, *Proc. 10th IEEE Int. Conf. on MMAR*, 1075-1081.
- [21] Michalczyk M.I. (2004) Influence of Electro-Acoustic Plant Modelling Errors on Active Noise Control System Performance, *Proc. 10th IEEE Int. Conf. on MMAR*, 1081-1086.
- [22] Michalczyk M.I. (2004) *Adaptive control algorithms for three-dimensional zones of quiet*. Skalmierski Computer Studio, Gliwice.
- [23] Michalczyk M.I. (2004) Multichannel active noise control, *Proc. IFAC Workshop on Programmable Devices and Systems PDS'2004*, 366-371.
- [24] Michalczyk M.I. (2005) Dobór kroku adaptacji dla algorytmu FX-LMS, przyjęte na XV KKA.
- [25] Michalczyk M., Figwer J. (2001) Active noise Control Using Orthogonal Filters. *Proc. 7th Int. Conf. on MMAR*, 1033-1038.
- [26] Mitra S.K., Kaiser J.F. editors (1993) *Handbook of digital signal processing*. J. Wiley.
- [27] Nelson P.A., Elliott S.J. (1992) *Active Control of Sound*, Academic Press Ltd.
- [28] Niederliński A. (1999) Identyfikacja i adaptacja dla aktywnego tłumienia hałasu, *Mat. XIII KKA*, 37-44
- [29] Widrow, B., Stearns, S.D. (1985) *Adaptive Signal Processing*. Prentice Hall, NJ.
- [30] Williams G.P. (1997) *Chaos Theory Tamed*. Joseph Henry Press, Washington D.C.



Instytut Badań Systemowych
Polskiej Akademii Nauk

ISBN 83-89475-01-4