



## **WYBRANE PROBLEMY STEROWANIA DŹWIĘKIEM**

### **The selected problems of sound control**

**Andrzej Gołaś**

Katedra Mechaniki i Wibroakustyki, Akademia Górniczo-Hutnicza,  
Al. Mickiewicza 30, Kraków 30-059, [ghgolas@cyf-kr.edu.pl](mailto:ghgolas@cyf-kr.edu.pl)

#### **STRESZCZENIE**

Dowolny system akustyczny może być traktowany jako system sterowania w którym możemy wyróżnić wejścia, wyjścia i zmienne stanu. Tradycyjne metody sterowania dźwiękiem są związane z metodami pasywnymi. Aktywne metody sterowania parametrami pola akustycznego są związane z ingerencją w strukturę dźwiękową poprzez wprowadzenie dodatkowych źródeł dźwięku. Jest to problem tzn. zagadnienia odwrotnego tzn. jak znaleźć rozkład źródeł dźwięku o sterowanych parametrach dynamicznych (zmienne w czasie charakterystyki kierunkowe i fazowe) aby otrzymać oczekiwany rozkład pola akustycznego. Stworzenie takiego systemu jest związane z koniecznością rozwiązania wielu problemów cząstkowych jak: budowa modeli pola akustycznego obejmującego zależności fazowe, budowa algorytmów sterowania realizujących przyjęte kryteria rozkładu dźwięku w badanej przestrzeni. W referacie przedstawione są rezultaty badań zespołu kierowanego przez autora w obszarze aktywnej redukcji dźwięku oraz aktywnego sterowania parametrami pola akustycznego [4,7]. W szczególności referat przedstawia zastosowania metody elementów skończonych i brzegowych do sterowania dźwiękiem poprzez estymację odpowiedzi impulsowej którą wyznacza się na podstawie charakterystyk statycznych. Również przedstawione są adaptacyjne i nieadaptacyjne układy do sterowania rozkładem pola akustycznego. Główną częścią takiego systemu są cyfrowe filtry o skończonej odpowiedzi impulsowej. W referacie omówiono również teorię optymalnej filtracji, która została wykorzystywana do zaprojektowania wielopunktowych źródeł dźwięku ze zmiennymi w czasie charakterystykami kierunkowymi.

#### **WPROWADZENIE**

Dźwięk wydaje się być immanentną cechą rzeczywistości otaczającej człowieka. Od najdawniejszych czasów starano się poznać i opisać zjawiska powstawania, rozprzestrzeniania i percepcji dźwięku. Podstawowym celem badań były próby znalezienia praw, oraz powstałych na ich bazie modeli, opisujących pole akustyczne.

Wraz z rozwojem techniki komputerowej pojawiła się koncepcja sterowania dźwiękiem [7]. Wydaje się, że pod tym pojęciem należy rozumieć próbę całościowego ujęcia problemu kreowania wrażenia fonicznego odbieranego przez człowieka. Trzeba bowiem

podkreślić, iż wszelka aktywność w dziedzinie kształtowania sygnału akustycznego docierającego do słuchacza, powinna opierać się o psychoakustyczne przesłanki percepcji dźwięku. Sterowanie dźwiękiem należy równocześnie traktować jako syntezę pewnych ewolucyjnych przemian w dziedzinie adaptacji akustycznej oraz w przetwarzaniu sygnałów. Wynika z tego jednoznacznie, iż idea sterowania dźwiękiem obejmuje sterowanie parametrami źródła dźwięku, sterowanie parametrami samego sygnału dźwiękowego oraz sterowanie wartościami parametrów otoczenia odbiorcy.

Podstawowe znaczenie dla sterowania dźwiękiem mają osiągnięcia elektroakustyki, która zajmuje się zapisywaniem, przechowywaniem, przesyłaniem i odtwarzaniem sygnałów akustycznych odbieranych przez człowieka. W całej historii technologia dźwięku miała charakter interdyscyplinarny, opierała się na chemii i fizyce, a szczególnie na elektronice, magnetyzmie i akustyce. Jednakże nie była ona i nie powinna być celem samym w sobie. Przetworzony sygnał mowy powinien spełniać kryterium zrozumiałości, natomiast sygnał foniczny musi spełniać tzw. kryteria wierności. Kryteria wierności są oczywiście subiektywne, ponieważ ostateczna ocena jakości dźwięku jest oparta na wrażeniu słuchaczy. Dlatego nadrzędne wydaje się rozważanie percepcji dźwięków przez człowieka, a właściwie próba wyrażenia właściwości percepcji za pomocą parametrów obiektywnych.

Sterowanie dźwiękiem związane jest przede wszystkim z identyfikacją parametrów pomieszczenia. Takie podejście determinowane jest możliwością korekcji wpływu parametrów akustycznych pomieszczenia na sygnał dźwiękowy odbierany przez słuchacza. Prowadzi to w konsekwencji do wirtualnego pomieszczenia o parametrach zapewniających optymalny odbiór wrażeń dźwiękowych.

Realizacja techniczna sterowania dźwiękiem jest wynikiem ewolucyjnego rozwoju aktywnych metod sterowania energią wibroakustyczną. Podstawową cechą układów aktywnych jest konieczność umieszczania w układzie dodatkowego, zewnętrznego źródła energii. Układy te, odpowiednio sterowane, mogą dostarczać lub absorbować energię w określony sposób z dowolnych miejsc układu. Geneza metod aktywnych wywodzi się z zasady interferencji, której podstawowa teoria w przestrzeni trójwymiarowej została podana w 1690 r. przez matematyka i fizyka holenderskiego Ch. Huyghensa (1629-1695).

Aktywne metody sterowania parametrami pola akustycznego polegają na świadomym ingerowaniu w strukturę tego pola za pomocą dodatkowych źródeł dźwięku. Przyczyny takiej modyfikacji pola mogą być różnorodne. Do najważniejszych należą konieczność poprawy parametrów akustycznych pomieszczeń odsłuchowych dla uzyskania optymalnych warunków odsłuchowych dla sygnałów muzycznych lub dobrej zrozumiałości mowy oraz konieczności redukcji hałasu (dźwięków niepożądanych), zwłaszcza o niskoczęstotliwościowej charakterystyce. Stosowanie metod aktywnych było ograniczone niemożnością praktycznej realizacji założeń projektowych. W latach siedemdziesiątych nastąpił gwałtowny rozwój badań związanych z możliwością sterowania dźwiękiem. Było to spowodowane szybkim rozwojem elektroniki, która umożliwiła stosowanie aktywnej filtracji oraz sterowania adaptacyjnego. Podstawowym kryterium w zastosowaniu układów elektronicznych jest czas, konieczny do generacji odpowiedniego sygnału będącego odpowiedzią źródeł wtórnych na sygnał pochodzący ze źródeł pierwotnych. Gwałtowny rozwój elektroniki, informatyki, teorii regulacji i sterowania umożliwiają, na obecnym etapie rozwój techniki, praktyczne ich zastosowanie.

Zbudowanie systemu sterowania dźwiękiem wymaga rozwiązania całego szeregu problemów cząstkowych, takich jak:

- Budowa modeli pola akustycznego uwzględniających zależności fazowe,
- Opracowanie algorytmów sterowania dźwiękiem wg przyjętych kryteriów,

- Budowa rzeczywistego systemu sterowania realizującego rozkład pola wg zadanego kryterium.

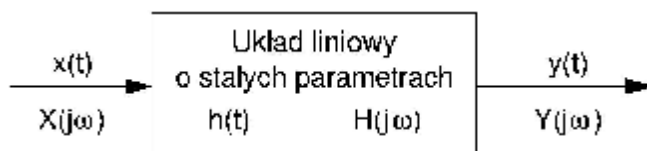
Wydaje się, że obecny rozwój techniki w szczególny sposób predysponuje technologię sterowania dźwiękiem do praktycznego zastosowania. Zręby teoretyczne zostały położone wprawdzie już kilkanaście lat temu, jednak nastąpiło swoiste opóźnienie spowodowane wyjątkową zależnością rozwoju sterowania dźwiękiem od postępu w elektronice, informatyce i automatyce, a w szczególności w teorii i zastosowaniach praktycznych przetwarzania sygnałów. Istotnym etapem dla pojawiania się zastosowań praktycznych sterowania dźwiękiem było opracowanie i udostępnienie cyfrowych procesorów sygnałowych, pełniących podstawową rolę w przetwarzaniu sygnałów w czasie rzeczywistym. Ich dostępność, wraz z kompletnymi systemami programowymi, pozwala na coraz szersze zastosowanie w działaniach naukowo-badawczych i wdrożeniowych.

## WYKORZYSTANIE ODPOWIEDZI IMPULSOWEJ DO SYNTEZY DŹWIĘKU

Własności układu liniowego można opisać za pomocą odpowiedzi impulsowej (odpowiedź układu na deltę Diraca lub Kroneckera), która jest odwrotną transformatą Fouriera z transmitancji widmowej. Stąd, odpowiedź impulsowa zawiera opis szeregu zmian jakim podlega sygnał dźwiękowy na swojej drodze z jednego punktu do innego w polu akustycznym.

Pojęcie odpowiedzi impulsowej jest skrótem myślowym. W rzeczywistości należałoby użyć sformułowania odpowiedź impulsowa drogi transmisji dźwięku w polu akustycznym - pomiędzy źródłem a odbiornikiem.

Według teorii sterowania, własności układu liniowego są znane, jeśli znana jest jego odpowiedź impulsowa. Jeżeli zatem, drogę transmisji dźwięku przedstawi się w postaci układu liniowego o jednym wejściu jak na rys.1. to zależność pomiędzy sygnałem wejściowym i wyjściowym przedstawiona jest zależnością 1.



Rys 1. Model układu liniowego

gdzie:  $h(t)$  – odpowiedź impulsowa w postaci czasowej,  $H(j\omega)$  – transmitancja widmowa układu liniowego,

$x(t)$  – wejściowy sygnał w postaci czasowej,  $X(j\omega)$  – postać widmowa sygnału wejściowego,  $y(t)$  – wyjściowy sygnał w postaci czasowej,  $Y(j\omega)$  – postać widmowa sygnału wyjściowego,

$$Y(j\omega) = H(j\omega) X(j\omega) \quad (1)$$

Jeżeli funkcja transmitancji widmowej układu  $H(j\omega)$ , poddana zostanie odwrotnej transformacji Fouriera zapisanej jako:

$$h(\tau) = F^{-1}[H(j\omega)] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} H(j\omega) e^{j\omega\tau} d\omega \quad (2)$$

to funkcja  $h(\tau)$  nazywana jest odpowiedzią impulsową układu. Jest ona także określana mianem odpowiedzi układu w pewnej chwili  $t$  na wymuszenie funkcją delty Diraca  $\delta$  w chwili  $(t - \tau)$ .

W teorii liniowych układów duże znaczenie ma zależność (3) nazywana splotem. Wykorzystuje ona funkcję odpowiedzi impulsowej  $h(\tau)$ .

$$y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t - \tau)h(\tau)d\tau \quad (3)$$

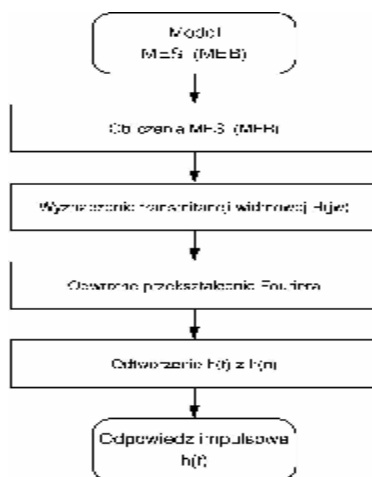
Zgodnie ze zależnością (3), sygnał na wyjściu liniowego układu stacjonarnego jest splotem dwóch funkcji – sygnału wejściowego i odpowiedzi impulsowej.

Dla liniowego układu stacjonarnego transmitancja widmowa  $H(j\omega)$  jest związana z odpowiedzią impulsową przez przekształcenie Fouriera. Tak więc, znając funkcję  $H(j\omega)$  układu zawsze można wyznaczyć jego odpowiedź impulsową.

Zastosowanie splotu w zagadnieniach syntezy dźwięku układów ma tę zaletę, że znajomość funkcji odpowiedzi impulsowej  $h(\tau)$  pozwala na formalne rozwiązanie danego problemu w dziedzinie czasu. Innymi słowy mówiąc – dowolny liniowy układ stacjonarny można opisać w dziedzinie czasu za pomocą odpowiedzi impulsowej, albo też w dziedzinie częstotliwości za pomocą transmitancji widmowej.

Do wyznaczenia odpowiedzi impulsowej wirtualnego wnętrza wykorzystuje się metody falowe lub geometryczne modelowania pola akustycznego [4]. Do pierwszej grupy zaliczyć możemy Metodę Elementów Skończonych MES i Metodę Elementów Brzegowych MEB. Do drugiej zaklasyfikujemy metody: promieniową, źródeł pozornych oraz stożków i ostrosłupów. Ze względu na lepszą jakość otrzymanych wyników poniżej przedstawiony zostanie sposób wyznaczenia odpowiedzi impulsowej na bazie modelu MES lub MEB.

Praktyczne wyznaczenie odpowiedzi impulsowej układu akustycznego w oparciu o przygotowany model MES lub MEB wymaga wykonania czynności przedstawionych schematycznie na rys. 2.



Rys.2. Algorytm wyznaczenia odpowiedzi impulsowej

Dane wejściowe stanowi *model* przygotowany do obliczeń metodą elementów skończonych bądź brzegowych w postaci siatki węzłów, zdefiniowanych warunków brzegowych oraz wprowadzonego źródła dźwięku i określonego punktu (punktów) obserwacji.

Wyznaczenie transmitancji widmowej  $H(j\omega)$  odbywa się zgodnie z zależnością (1). Następnie  $H(j\omega)$  poddawana jest odwrotnemu przekształceniu Fouriera, w wyniku którego uzyskiwana jest dyskretna odpowiedź impulsowa  $h(n)$ .

Na podstawie odpowiedzi impulsowej możemy wyznaczyć szereg parametrów m.in. czas wczesnego zaniku, czas pogłosu (4), zrozumiałość mowy (5), wyrazistość (6), jasność (7), czasowy środek ciężkości, siła dźwięku, stosunek sygnału do szumu czy położenie środka ciężkości sygnału itd. Wskaźniki te pozwalają nam na obiektywną ocenę jakości wnętrza akustycznych. Wybrane z nich przedstawiono poniżej.

$$\int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau = \int_0^{\infty} h^2(\tau) d\tau - \int_0^t h^2(\tau) d\tau \quad (4)$$

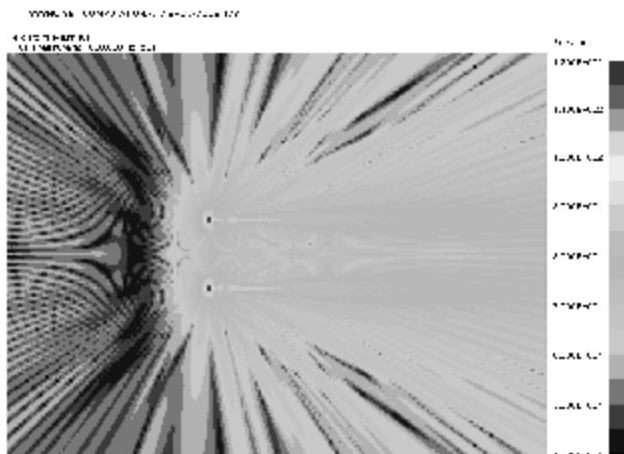
$$m(f_m) = \int_0^{\infty} h^2(t) e^{-j\omega t} dt / \int_0^{\infty} h^2(t) dt \quad (5)$$

$$D_{50} = \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_0^{\infty} h^2(t) dt} * 100\% \quad (6)$$

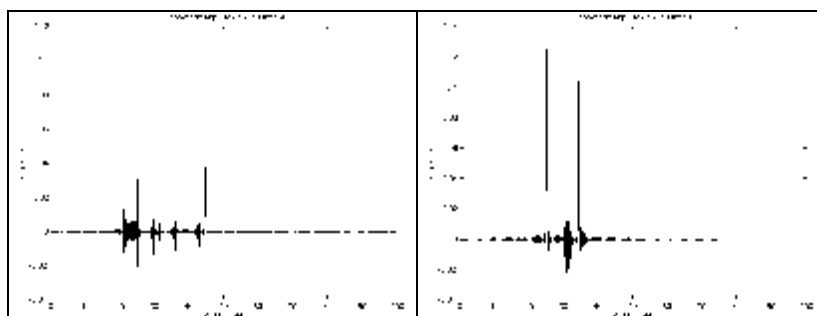
$$C_{50} = 10 \log_{10} \left( \frac{\int_0^{50ms} h^2(t) dt}{\int_{50ms}^{\infty} h^2(t) dt} \right) \quad (7)$$

Biblioteczne programy MES i MEB pozwalają na wyznaczenie rozkładu pola akustycznego w dziedzinie częstotliwości. Przykładowe takie rozkłady przedstawiono na rys. 3.

Olszewski [10] w swojej pracy doktorskiej przedstawił praktyczne metody wyznaczania odpowiedzi impulsowej rys.4 jak i wyżej wymienionych parametrów akustycznych.



Rys.3. Rozkład poziomu ciśnienia akustycznego modelu dwóch źródeł o charakterystyce kierunkowej dla częstotliwości  $f=1000$  Hz.



Rys.4. Przykładowe odpowiedzi impulsowe wyznaczone przy wykorzystaniu metod MES i MEB

Omówione powyżej metody pozwalają na syntezę dźwięku dzięki wykorzystaniu odpowiedzi impulsowej we wnętrzu już istniejących, tzn. „rzeczywistych” jak również w „wirtualnych”.

## WYKORZYSTANIE KOREKTORÓW CYFROWYCH DO STEROWANIA DŹWIĘKIEM

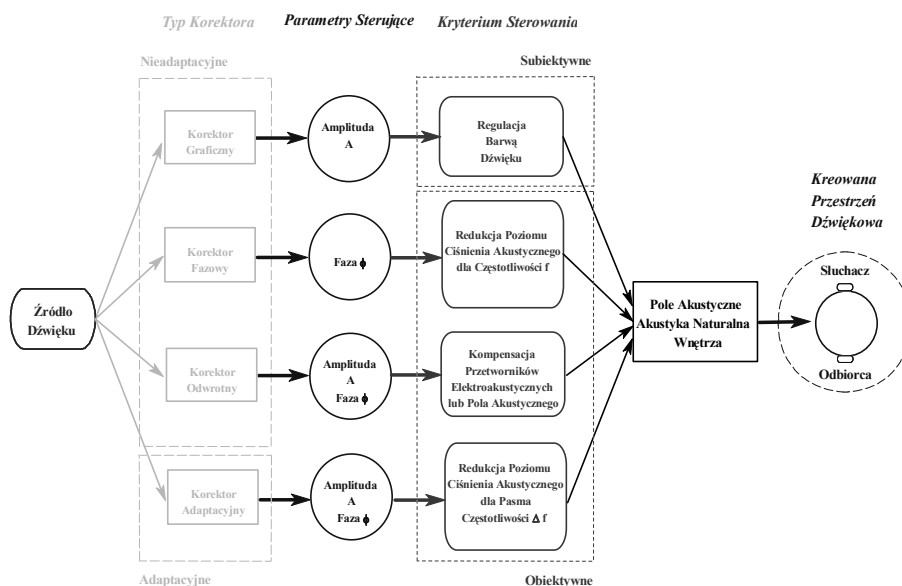
Szybki rozwój techniki cyfrowej przyczynił się do powstania procesorów sygnałowych, które umożliwiają przetwarzanie danych w czasie rzeczywistym. Na bazie tych urządzeń powstało wiele układów pozwalających na sterowanie dźwiękiem w przestrzeni. Nowego znaczenia nabrało również słowo korektor, do niedawna postrzegane jako urządzenie analogowe z wszystkimi wadami i zaletami układów analogowych. Dzisiaj używając słowa korektor mamy na myśli układy cyfrowe takie jak **cyfrowe korektory graficzne**, umożliwiające sterowanie barwą dźwięku na płaszczyźnie amplitudowo-częstotliwościowej, **cyfrowe korektory fazowe** pozwalające na kreowanie struktury dźwięku na płaszczyźnie amplitudowo-fazowej, **cyfrowe korektory odwrotne** pozwalające kompensować charakterystyki torów elektroakustycznych, jak również najnowsze **cyfrowe korektory adaptacyjne**, łączące te funkcje i umożliwiające sterowanie dźwiękiem według zadanego kryterium.

Na rys.5. przedstawiono schematycznie, wykonane korektory cyfrowe, które szerzej opisane zostały w pracach W.Ciesielki [1,2,5,7].

W niniejszym podrozdziale przedstawione zostały cyfrowe korektory, umożliwiające aktywne sterowanie dźwiękiem według zadanego kryterium. Kryteria podzielono na dwie grupy: kryteria obiektywne i subiektywne. Podstawy teoretyczne zaprojektowanych i wykonanych systemów ASD bazują na teorii filtrów cyfrowych, w oparciu o które zaprojektowane i oprogramowane zostały cyfrowe korektory: graficzny, fazowy, odwrotny i adaptacyjny. Poniżej zamieszczono formułę matematyczną pozwalającą na wyznaczenie korektora odwrotnego.

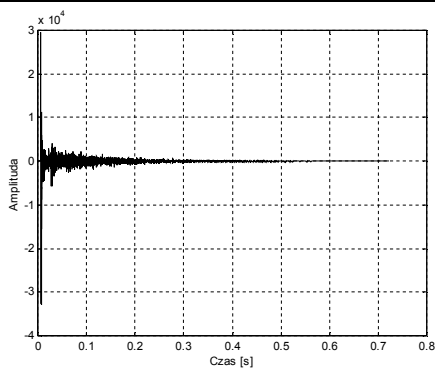
$$H(z) * H_{odw}(z) = 1 \quad (8)$$

gdzie:  $H(z)$  – transmitancja toru elektroakustycznego,  $H_{odw}(z)$  - transmitancja korektora odwrotnego

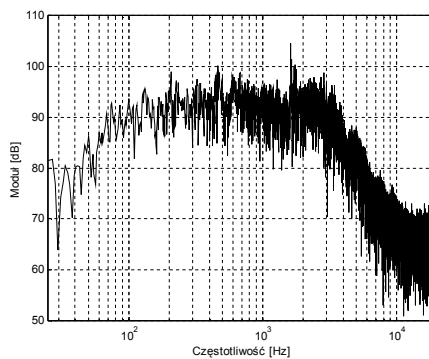


Rys.5. Wykorzystanie korektorów cyfrowych do sterowania dźwiękiem [2]

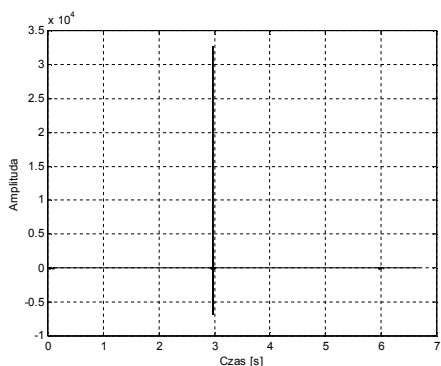
Opisane systemy zaimplementowane zostały na dwóch kartach z procesorami sygnałowymi: stałoprzecinkowym TMS320C25 i zmiennoprzecinkowym TMS320C31 firmy Texas Instruments oraz popularnych kartach dźwiękowych. W podrozdziale przedstawione zostały przykładowe wyniki skuteczności działania korektora odwrotnego (rys.6-9) zastosowanego do korekcji akustyki wybranego wnętrza oraz korektora adaptacyjnego umożliwiającego aktywną redukcję dźwięku w przestrzeni 3D (rys.10). Zaprojektowane i wykonane systemy dają dobre efekty w sterowaniu dźwiękiem i mogą być stosowane jako niezależne systemy modyfikujące klimat akustyczny w przestrzeni ograniczonej lub stanowić element systemów wielokanałowych aktywnego sterowania dźwiękiem.



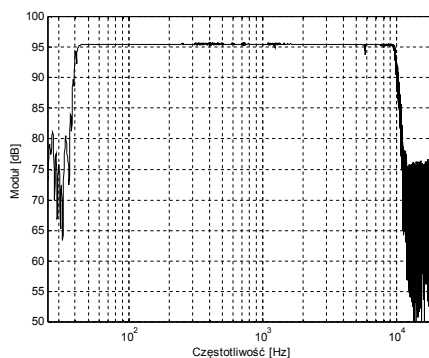
Rys. 6. Odpowiedź impulsowa zarejestrowana w pomieszczeniu laboratoryjnym



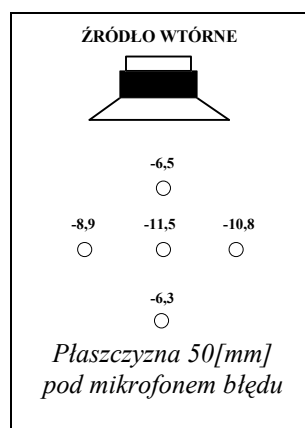
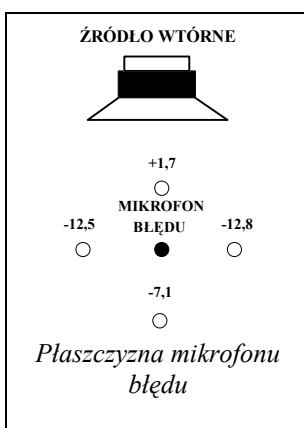
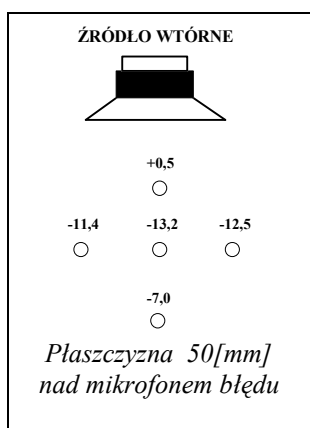
Rys. 7. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa systemu elektroakustycznego



Rys. 8. Odpowiedź impulsowa systemu elektroakustycznego po korekcy korektorem odwrotnym



Rys. 9. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa systemu elektroakustycznego po korekcy korektorem odwrotnym



Rys.10. Strefa ciszy uzyskana dla szumu białego filtrowanego filtrem oktawowym 125Hz

## STEROWANIE ROZKŁADEM POLA AKUSTYCZNEGO POPRZEZ ZMIANNĘ CHARAKTERYSTYK DYNAMICZNYCH ŹRÓDŁA

Sterownie rozkładem pola akustycznego można przeprowadzić na drodze sterowania charakterystyką kierunkową i mocą źródła promieniującego energię akustyczną. Sterowanie charakterystyką kierunkową wielopunktowego źródła dźwięku może się odbywać na drodze zmian wzmocnień amplitud i faz sygnałów transmitowanych przez poszczególne źródła składowe (rys. 11,12).

Od dłuższego czasu autor [3,6,7], podobnie jak wiele zespołów w kraju i za granicą, zajmują się taką tematyką. Doświadczenia wskazują, że do zastosowań związanych ze sterowaniem dźwiękiem w większości przypadków konieczna jest możliwość zmiany charakterystyki kierunkowej źródła w czasie pracy. Wręcz trudno sobie wyobrazić sterowanie rozkładem pola akustycznego bez umiejętności budowy źródeł o zadanych charakterystykach kierunkowych.

Układ umożliwiający zmianę charakterystyki kierunkowej źródła składa się z dwóch głównych części: układu generowania stałej charakterystyki kierunkowej w szerokim paśmie częstotliwości i układu „obracania” tej charakterystyki. Te dwa układy stanowią układ kształtowania charakterystyki kierunkowej.

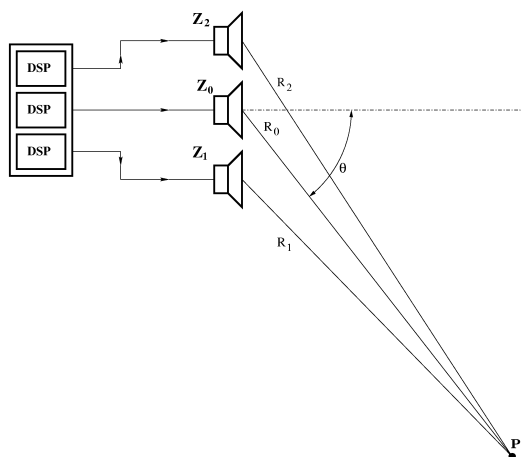
Zasadniczą ideą sterowania rozkładem pola akustycznego jest wytworzenie w zadanym obszarze przestrzeni pola akustycznego o zadanej strukturze. Przy czym pod pojęciem struktury pola rozumiemy rozkład amplitud, stosunków fazowych dla danych częstotliwości.

Aby zrealizować niniejszą ideę konieczne jest rozwiązanie zagadnienie projektowania wielopunktowych źródeł dźwięku (rys.11). Przy założeniu źródeł punktowych i braku wpływu obudowy na charakterystykę kierunkową wyprowadza się wzory pozwalające na uzyskiwanie założonych charakterystyk kierunkowych. Warunki nakładane na charakterystyki przyjmują postać:

- kąta maksymalnego promieniowania,
- kąta minimum promieniowania,
- szerokości wiązki głównej,
- stosunku maksimum wiązki głównej i bocznych.

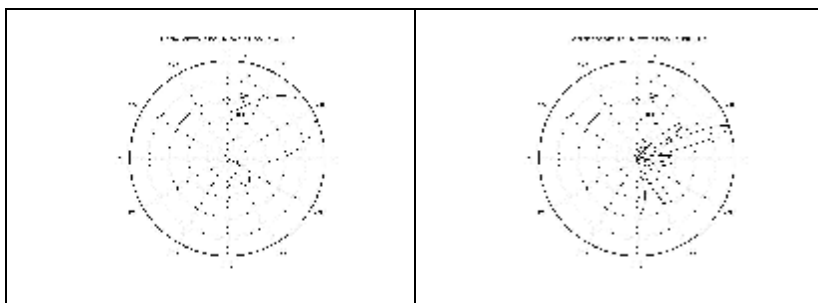
Dla takich warunków oblicza się wartości wzmocnień poszczególnych źródeł. Przy czym nie zawsze udaje się spełnić wszystkie nałożone warunki jednocześnie. Do uzyskiwania charakterystyk kierunkowych bez listków bocznych wykorzystuje się metodę zwaną „linear tapering”.

Praktyczne i teoretyczne prace nad źródłami wielopunktowymi koncentrują się na samych źródłach. Zachowanie źródła w pomieszczeniu zamkniętym jest zależne od samego pomieszczenia. Warunki akustyczne pomieszczenia, które decydują o zachowaniu źródła opisuje się wielkością zwaną „promieniem granicznym”.



Rys. 11. Idea kształtowania charakterystyki wielopunktowego źródła dźwięku

Realizacja takiego układu wymaga skonstruowania wielopunktowego źródła dźwięku oraz układu zasilającego to źródło w postaci zespołu przetworników cyfrowo-analogowych oraz wzmacniaczy. Taki układ sterowania powinien umożliwić wielokanałowe przetwarzanie danych i odtwarzanie sygnałów kontrolnych. Realizację rejestracji poszczególnych nastaw dla źródła (do celów dalszej analizy). Zasadniczym elementem układu sterowania musi być szybki procesor sygnałowy (wydaje się konieczne wykorzystanie nawet kilkunastu kanałów wyjściowych).

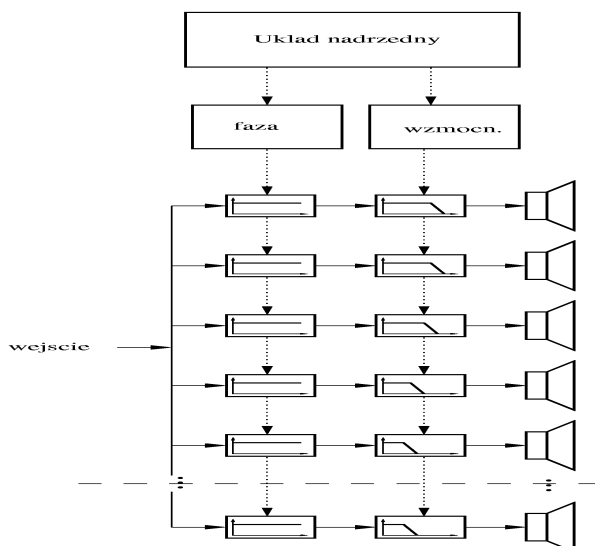


Rys.12. Charakterystyki kierunkowe uzyskane przy różnych pobudzeniach źródeł składowych przy częstotliwości 400, 500, 600, 700, 1000 i 2000 Hz

Rysunek 13 przedstawia poglądowo układ źródła ze sterowaną charakterystyką kierunkową. Nadrzędny układ sterowania określa kierunek maksymalnego promieniowania źródła i ostrość charakterystyki kierunkowej może to być komputer osobisty, lub inne źródło nastaw, w zależności od zastosowania źródła w konkretnym układzie. Na tej podstawie układ sterowania fazą syntezuje filtry przesuwające fazę (filtry FIR wszechprzepustowe) i zadaje je podsystemowi przesuwania fazy. Jednocześnie układ kontroli wzmocnienia syntezuje dolnoprzepustowe filtry określające wzmocnienie w funkcji częstotliwości dla

poszczególnych źródeł.

Do tak skonfigurowanego układu przetwarzającego jest podawany sygnał, który zostaje rozdzielony na tory dla poszczególnych źródeł. Po obróbce sygnał jest promieniowany przez przetworniki elektroakustyczne.



Rys 13. Schemat źródła o sterowanej charakterystyce kierunkowej

Podsumowując niniejszy podrozdział można powiedzieć, że system sterowania rozkładem pola akustycznego poprzez zmianę charakterystyk dynamicznych źródła pozwoli na sterowanie dźwiękiem w zadanym wnętrzu lub pozwoli na modyfikację klimatu akustycznego w pewnym zadanym - ograniczonym obszarze. Tak więc, aby sterować dźwiękiem w dużych obszarach, celowe staje się zaprojektowania i zbudowania kompleksowego systemu sterowania dźwiękiem bazującego na wielokryterialnym wskaźniku jakości, który obejmować będzie zarówno kryteria *obiektywne* i *subiektywne* odsłuchu dźwięku.

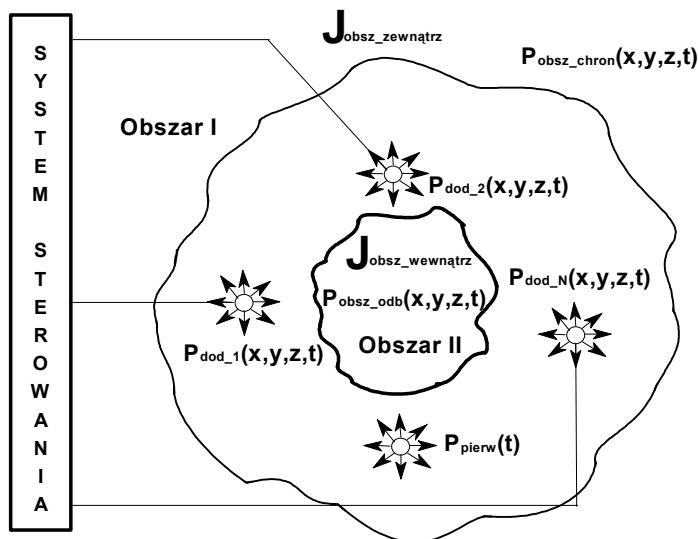
## PODSUMOWANIE

Można wyobrazić sobie, że omówione metodologiczne rozwiązywanie problemów cząstkowych pozwala na stworzenie kompleksowego układu sterowania. Idea systemu sterowania przedstawiono na rys. 14.

System aktywnego sterowania rozkładem dźwięku w przestrzeni otwartej funkcjonować będzie wykorzystując następujące kryterium jakości:

1. W wybranym obszarze analizowanej przestrzeni dokonuje się syntezy dźwięku spełniającej kryteria obiektywne takie jak: zrozumiałość mowy, równomierność nagłośnienia, przestrzenność odsłuchu jak i subiektywne nie mniej ważne zależne od indywidualnych upodobań słuchacza czy odbiorcy np. barwa dźwięku.
2. W pozostałej części analizowanej przestrzeni dokonuje się syntezy dźwięku mającej na celu minimalizację poziomu dźwięku.

Wielokryterialny wskaźnik jakości, który obejmować będzie zarówno kryteria *obiektywne* i *subiektywne* odsłuchu dźwięku podano w postaci formuł matematycznych (9-11).



Rys.14. Idea działania systemu sterowania dźwiękiem w dużych przestrzeniach

$P_{pierw}(t)$  – ciśnienie generowane przez źródło pierwotne (źródło wzorcowe),  
 $P_{dod_1}(x,y,z,t) - P_{dod_N}(x,y,z,t)$  – ciśnienia generowane przez źródła dodatkowe,  
 $P_{obsz_odb}(x,y,z,t)$  – ciśnienie w obszarze najlepszej jakości odbioru dźwięku,  
 $P_{obsz_chron}(x,y,z,t)$  – ciśnienie w obszarze chronionym.

Wskaźnik jakości systemu sterowania dźwiękiem w dużych przestrzeniach

$$J_{systemu} = f(J_{obsz\_zewnatrz}, J_{obsz\_wewnatrz}) \quad (9)$$

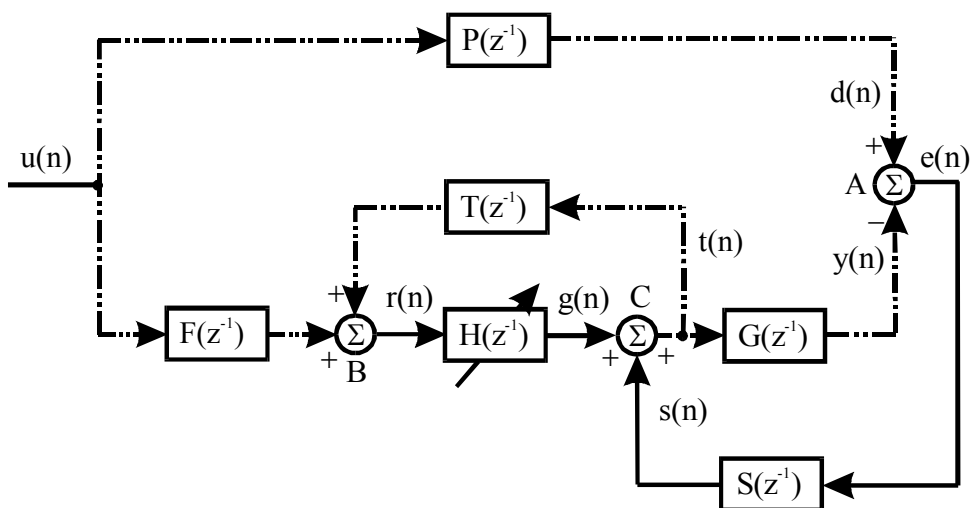
Wskaźnik jakości dla obszaru zewnętrznego

$$J_{obsz\_zewnatrz}(t)_{\min} = \int_0^{\infty} (p_{obsz\_chron}(x,y,z,t) - p_{pierw}(x,y,z,t))^2 dt \quad (10)$$

Wskaźnik jakości dla obszaru wewnętrznego

$$J_{obsz\_wewnatrz}(t)_0 = \int_0^{\infty} (p_{obsz\_odbiorcy}(x,y,t) - p_{pierw}(t))^2 dt \quad (11)$$

Na rysunku 15 przedstawiono schemat blokowy jednej ścieżki systemu ASD z transmitancjami. W strukturze systemu możemy wydzielić dwie zasadnicze ścieżki: elektryczną i akustyczną. Ścieżkę elektryczną oznaczono linią ciągłą, w jej skład wchodzi dwie transmitancje  $H(z^{-1})$  i  $S(z^{-1})$ . Ścieżka akustyczna oznaczona jest linią przerywaną i należą do niej transmitancje  $P(z^{-1})$ ,  $F(z^{-1})$ ,  $G(z^{-1})$  i  $T(z^{-1})$ . Na rysunku naniesiono trzy punkty A, B i C. Punkt A mikrofonu błędu, punkt B mikrofon referencyjny, natomiast punkt C źródło dodatkowe.



Rys. 15. Schemat blokowy systemu sterowania dźwiękiem z transmitancjami  
 $P(z^{-1})$  – pole akustyczne między źródłem pierwotnym i mikrofonem błędu  
 $F(z^{-1})$  - pole akustyczne między źródłem pierwotnym i mikrofonem referencyjnym  
 $G(z^{-1})$  - pole akustyczne między źródłem dodatkowym i mikrofonem błędu  
 $T(z^{-1})$  - pole akustyczne między źródłem wtórnym i mikrofonem referencyjnym  
 $H(z^{-1})$  – cyfrowy korektor adaptacyjny lub nieadaptacyjny  
 $S(z^{-1})$  – kompensator sprzężenia zwrotnego

## LITERATURA

1. W.CIESIELKA, A.GOŁAŚ, An adaptive, active noise reduction system in closed space. Fort Lauderdale, Florida USA, Active 99, 1999, pp.683-694
2. W.CIESIELKA, Wykorzystanie korektorów cyfrowych do syntezy dźwięku, Rozprawa doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2002
3. I.CZAJKA, Źródło dźwięku o zmiennej charakterystyce kierunkowej, V Szkoła Metody Aktywne Redukcji
4. A.GOŁAŚ, Metody komputerowe w akustyce wewnątrz i środowiska. Wydawnictwo AGH, Kraków 1995
5. A.GOŁAŚ, W.CIESIELKA, The application of LMS and NLMS adaptive algorithms to active noise control in limited space. Krynica, Noise Control 98, 1998, pp.491-496

6. A.GOŁAŚ, I.CZAJKA, Koncepcja źródła dźwięku o sterowanej charakterystyce kierunkowej XLVI Otwarte Seminarium z Akustyki OSA'99 PTA Kraków-Zakopane 1999 s.389-392
7. A.GOŁAŚ, i [wsp], Podstawy sterowania dźwiękiem w pomieszczeniach. Wydawnictwa AGH, Kraków 2000
8. A.GOŁAŚ, R.OLSZEWSKI, Zagadnienia modelowania warunków brzegowych w akustycznych modelach MES i MEB, IV Krakowa Konferencja MSK'03 Metody i Systemy Komputerowe Kraków, 2003
9. H.ŁOPACZ, Metody impulsowe w badaniach procesów wibroakustycznych. Rozprawa doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 1992
10. R.OLSZEWSKI, Zastosowanie metody elementów skończonych i brzegowych do analizy pola akustycznego, Rozprawa doktorska – złożona do recenzji
11. J.WIERZBICKI, Analiza własności akustycznych pomieszczeń metodami symulacyjnymi. Rozprawa Doktorska. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 1995