

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**Tytuł rozprawy:** „Aktywna eliminacja składowych tonalnych sygnałów akustycznych”

**Autor rozprawy:** mgr inż. Michał Łuczyński

**Promotor:** prof. dr hab. inż. Andrzej Dobrucki

**Promotor pomocniczy:** dr inż. Stefan Brachmański

### I. Cel, teza, zakres i charakter rozprawy

Zasadniczym celem rozprawy było usuwanie składowych tonalnych z sygnałów akustycznych, na podstawie wyznaczonych parametrów tych składowych. Wiązało się to z koniecznością doboru lub zaproponowania algorytmów na różnych etapach przetwarzania sygnałów. Celem dualnym była ocena poprawności wyznaczania parametrów składowych tonalnych na podstawie miary skuteczności ich usuwania z sygnału.

Autor postawił następującą tezę:

*„Możliwe jest opracowanie efektywnych algorytmów aktywnej redukcji hałasów tonalnych wykorzystujących parametry tonalności”.*

Autor podkreśla znaczenie problemu obecności składowych tonalnych w sygnałach akustycznych różnego typu, w tym w szczególności w hałasie. Z punktu widzenia użytkowego oraz systemów przetwarzania sygnałów stanowią one często zakłócenie, w wielu przypadkach o dużej uciążliwości. Uciążliwość ta wynikać może zarówno z ich wysokiego, zwykle dominującego poziomu, jak również z samego charakteru dźwięku tonalnego, na który organ słuchu reaguje w sposób wyjątkowy. Ze względu na sposób pracy dużej grupy urządzeń, obecność składowych tonalnych jest zjawiskiem bardzo częstym i konieczność ich usuwania nie budzi wątpliwości. Cechą charakterystyczną sygnałów tonalnych jest ich prosty model opisany kilkoma parametrami, których wartości można skutecznie wyznaczyć. Dysponując modelem, można z kolei zastosować efektywne metody ich usuwania, dedykowane do takich typów sygnałów, zamiast metod ogólnych, właściwych do znacznie szerszej grupy sygnałów. Powyższych zagadnień, ważnych z punktu widzenia wielu zastosowań, dotyczy recenzowana rozprawa doktorska.

Rozprawa jest wielowątkowa. Zdecydowanie dominuje w niej problematyka cyfrowego przetwarzania sygnałów i sterowania, powiązanych bezpośrednio z dyscypliną automatyka, elektronika i elektrotechnika, ale także obecne są wątki dotyczące akustyki. Oprócz rozważań teoretycznych, zawiera szereg symulacji numerycznych.

## **II. Zawartość i wyniki rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Łuczyńskiego zawiera wprowadzenie, przedstawienie tezy oraz celów rozprawy, pięć rozdziałów zasadniczych, podsumowanie, spis literatury zawierający 148 pozycji, a także streszczenie w języku polskim i w języku angielskim. Manuskrypt łącznie liczy 162 strony numerowane.

W krótkim „Wprowadzeniu” Autor przedstawia tematykę pracy oraz anonsuje własne podejście do problemu redukcji zakłóceń tonalnych.

Rozdział 2 poświęca przedstawieniu tezy oraz celów rozprawy.

W rozdziale 3 omawia problematykę aktywnej redukcji hałasu. Szczegółowo odwołuje się do zaleceń Światowej Organizacji Zdrowia, obowiązujących norm, przedstawia rys historyczny rozwoju metod aktywnych, wyjaśnia podstawy fizyczne redukcji hałasu opartej o destruktywną interferencję fal, odwołuje się do ograniczeń związanych m.in. z czasem przetwarzania sygnału, obecnością przetworników i zbieżnością algorytmów adaptacyjnych. Omawia także podstawowe struktury sterowania – ze sprzężeniem zwrotnym oraz kompensację równoległą. Prezentuje popularny algorytm LMS z jego modyfikacją związaną z filtracją sygnału odniesienia - FXLMS – w przypadku obecności toru elektroakustycznego. Nawiązuje także do redukcji składowych wąskopasmowych z komponentem losowym.

W rozdziale 4 Autor przedstawia klasy tonalności sygnałów. Ponownie odwołuje się do norm dotyczących hałasów tonalnych. Zwraca uwagę na metody klasyfikacji sygnałów pod kątem dominacji składowych tonalnych. Rozpatruje również problem zmian parametrów sygnałów.

Rozdział 5, należący do najbardziej obszernych w rozprawie, dotyczy estymacji wartości parametrów składowych tonalnych. Sporą uwagę Autor poświęca wstępnemu przetwarzaniu sygnału, zwłaszcza okienkowaniu czasowemu. Kolejnym szeroko reprezentowanym wątkiem jest wzajemny wpływ parametrów oraz szumu na poprawność estymacji. Doktorant odrębnie rozpatruje zastosowanie algorytmu szybkiej transformaty Fouriera.

Rozdział 6 dotyczy syntezy sygnału kompensującego i eliminacji składowych tonalnych. Autor proponuje dwa podejścia różniące się ramką czasową, w której przeprowadzana jest

kompensacja. Dokonuje oceny skuteczności redukcji przede wszystkim tonu prostego, w tym także w obecności szumu. W końcowej części rozdziału stosuje filtrację adaptacyjną.

W rozdziale 7 Doktorant odwołuje się do kilku wybranych przykładów sygnałów powiązanych z konkretnymi zastosowaniami, dla których przeprowadza usuwanie składowych tonalnych. Dotyczy to: przydźwięku sieciowego w nagraniu, uzyskania efektu szeptu w sygnale mowy, akustycznego sprzężenia zwrotnego, hałasu wentylatora, hałasu silnika spalinowego.

W rozdziale 8 krótko podsumowano treść rozprawy oraz uzyskane wyniki.

### **III. Uwagi ogólne i dyskusyjne**

W rozprawie doktorskiej Autor rozpatrywał problem redukcji składowych tonalnych z sygnałów akustycznych. Swe rozważania wsparł szeroką analizą obowiązujących norm. Do szczegółowych badań wybrał przede wszystkim metodę parametryczną, bazującą na modelach sygnałów.

Po dogłębnej analizie rozprawy, nasuwają się wymienione niżej pytania oraz uwagi natury ogólnej.

1. Tytuł pracy oraz rozdział „Wprowadzenie” moim zdaniem bardziej trafnie i szerzej opisują przedmiot wykonanych badań, niż teza i cele rozprawy przedstawione w rozdziale 2. Teza i cele mówią wprost o redukcji hałasów tonalnych, podczas gdy w rozprawie w rozdziałach dotyczących zastosowanych algorytmów więcej uwagi poświęcono redukcji składowych tonalnych z sygnałów akustycznych (tego dotyczy również większość przykładów), nie zaś redukcji hałasu, gdzie występuje problem obecności toru elektroakustycznego, czyli obiektu sterowania. Problematyka redukcji hałasu jest bardziej obecna w rozdziałach wstępnych.
2. Prezentując podstawy fizyczne aktywnych metod redukcji hałasu, Doktorant ograniczył się do destruktywnej interferencji fal, nie wspominając o innych, których zastosowanie jest równie częste w literaturze ostatnich lat, jak zwłaszcza zmiana impedancji akustycznej środowiska lub własności struktury.
3. W kontekście wybranych metod redukcji hałasu opartych o zjawisko interferencji fal, Autor nie wspomina o problemie fizycznym polegającym na generacji stref ciszy i obszarów wzmocnienia dźwięku.
4. Wartościowym uzupełnieniem badań Doktoranta dotyczącym redukcji składowych tonalnych z sygnału, również w obecności szumu, byłoby sięgnięcie do znanych z literatury metod dekompozycji, stosowanych np. w prognozowaniu.

5. Brakuje konfrontacji zastosowanych metod z wyjątkowo prostym w implementacji, lecz jednocześnie bardzo skutecznym algorytmem znanym w literaturze pod nazwą Adaptive Line Enhancer. Takie porównanie pozwoliłoby ocenić, na ile dosyć wyrafinowane, w części bazujące na heurystyce podejście Autora jest korzystniejsze.
6. Autor zwraca uwagę na trudności w estymacji podstawowych parametrów składowej tonalnej w obecności szumu o znacznym udziale w energii całego sygnału. Nie sięga przy tym do metody korelacyjnej, która znacznie ułatwiłaby separację takich składowych i poprawne wyznaczenie parametrów.
7. Doktorant dużą uwagę poświęca okienkowaniu sygnału i po wykonaniu wielu symulacji wyciąga wnioski, które są znane z literatury. Nie odwołuje się przy tym do pojęcia wycieku widma, prowadząc rozważania na temat relacji częstotliwości składowej tonalnej do częstotliwości próbkowania i powiązanych z tym błędów estymacji amplitudy tej składowej.
8. Podobną uwagę, jak w powyższym punkcie można sformułować w stosunku do badań dotyczących zastosowania szybkiej transformaty Fouriera i m.in. wpływu liczby dodanych zer do sygnału.
9. Uwagi z punktu 7 i 8 wiążą się być może z wprowadzeniem przez Autora elementów heurystycznych do niektórych proponowanych algorytmów, a także mają wpływ na poprawność niektórych wniosków.
10. Proponowane podejście omówione teoretycznie ogranicza się przede wszystkim do jednej lub dwóch składowych tonalnych. W przytoczonych przykładach zdarzają się bogatsze sygnały. Nie jest w pełni czytelne, jak wówczas rozwiązano problemy, o których jest mowa we wcześniejszych rozdziałach, w szczególności dotyczące poprawności estymacji parametrów.
11. Autor porównuje zastosowanie algorytmu LMS i FXLMS dla aktywnej redukcji hałasu. Porównanie takie nie jest w pełni uprawnione albo wymaga wprowadzenia wielu założeń, gdyż algorytm LMS jest algorytmem wyprowadzonym przy braku obecności obiektu na drodze sygnału i dotyczy usuwania określonych składowych z sygnału, nie zaś przypadku, w którym jest mowa o interferencji fal.
12. Przedstawiając przykłady symulacyjne aktywnej redukcji hałasu, zabrakło scharakteryzowania przyjętych torów pierwotnego i wtórnego, ich własności częstotliwościowych i czasowych, co ma kluczowe znaczenie dla oceny skuteczności działania algorytmu.

#### **IV. Uwagi szczegółowe**

Kolejne tematy omawiane są w rozprawie w sposób przejrzysty, a wykresy i tabele są czytelne. Dało się jednak zauważyć m.in. następujące usterki:

1. W zapisach symboli matematycznych Autor nie wyróżnia wektorów, co np. w równaniu (10) może prowadzić do niejednoznaczności.
2. Wartościowy byłby szerszy komentarz do wyników przedstawionych w rozdziale 6.1.1 na rys. 105, dotyczących tak istotnego zmniejszenia wartości redukcji w zależności od fazy początkowej oraz środków zaradczych, jakie należałoby podjąć, aby skompensować taki błąd.
3. Omawiając przykład zamiany mowy normalnej na mowę szeptaną, Doktorant zwraca uwagę na usunięcie składowych tonalnych. Nie komentuje jednak bardzo znacznego usunięcia składowych niskoczęstotliwościowych w przedziale od 20 do ok. 600 Hz.
4. Słabo wyróżnione są tytuły rozdziałów i podrozdziałów – wszystkie wydają się być pisane czcionką o tym samym rozmiarze, co utrudnia przeglądanie rozprawy.
5. Rozdziały poświęcone wprowadzeniu, a zwłaszcza podsumowaniu są dosyć skromne. Brakuje zestawienia głównych osiągnięć Autora, a także perspektyw rozwoju tematyki badawczej.

#### **V. Uwagi redakcyjne**

Rozprawa jest napisana bardzo starannie i zawiera znikomą liczbę błędów literowych. Trudno dostrzec inne błędy językowe.

#### **VI. Podsumowanie i wnioski końcowe**

Doktorant postanowił zbadać, czy zastosowanie algorytmów opartych o modele składowych tonalnych umożliwia skuteczną ich redukcję z sygnału akustycznego. Po analizie literatury przystąpił do budowania modeli, a następnie weryfikacji proponowanych metod. Posłużył się w tym celu wieloma symulacjami numerycznymi.

Główne spostrzeżenia wynikające z lektury rozprawy zawarte zostały we wcześniejszych punktach recenzji. Można na ich podstawie wyciągnąć wniosek, że część z przeprowadzonych badań oraz uzyskanych wyników służyła potwierdzeniu wniosków znanych z literatury dotyczącej cyfrowego przetwarzania sygnałów, metod eliminacji zakłóceń oraz aktywnej redukcji hałasu. Liczę, że pozostałe przedstawione w recenzji uwagi Autor wykorzysta, jeśli zdecyduje się kontynuować swe zainteresowanie tą tematyką.

Uważam, że Autor poświęcił wiele uwagi problemom, które trudno zaliczyć do redukcji hałasów tonalnych, poszerzając tym samym zakres objęty tezą i celami rozprawy, miejscami zaburzając pewne proporcje. Nie oznacza to jednak, że zabrakło w rozprawie zagadnień związanych z redukcją hałasu. W istocie, po odpowiednim wprowadzeniu, na prostych przykładach Doktorant pokazał, że możliwe jest opracowanie efektywnych algorytmów aktywnej redukcji hałasów tonalnych (a właściwie szerzej – aktywnej redukcji składowych tonalnych) wykorzystujących parametry tonalności.

W rozprawie da się dostrzec elementy oryginalne, czy też poszerzające aktualny stan wiedzy. Autor nie wypunktował ich samodzielnie, ale w moim przekonaniu, wkładem własnym Doktoranta są w szczególności:

- zaproponowanie klasyfikacji składowych tonalnych,
- rozpatrzenie wielu metod parametrycznych redukcji składowych tonalnych z sygnałów akustycznych,
- analiza błędów estymacji parametrów składowych tonalnych,
- szerokie badania symulacyjne potwierdzające skuteczność redukcji składowych tonalnych.

Sam tekst rozprawy został opracowany starannie.

Dorobek publikacyjny Doktoranta potwierdza, że zdobył wiedzę w zakresie tematyki swoich badań, a Jego osiągnięcia zostały zaprezentowane w środowisku naukowym. Według bazy Scopus jest Autorem 10 publikacji, w tym w cenionym czasopiśmie Archives of Acoustics.

Reasumując, uważam, że przedstawiona rozprawa spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą ustawę. W związku z powyższym, wnoszę o **dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Łuczyńskiego do publicznej obrony w dyscyplinie naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika.**

