

Dr hab. inż. Jerzy Kasprzyk, prof. Pol. Śl.  
Wydział Automatyki, Elektroniki i Informatyki  
Politechnika Śląska  
ul. Akademicka 16  
44-100 Gliwice

Gliwice, 31.01.2014

## RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**Tytuł rozprawy: Active control of sound with a vibrating plate**

**Autor rozprawy: mgr inż. Krzysztof Mazur**

**Promotor rozprawy: dr hab. inż. Marek Pawełczyk, prof. Pol. Śl.**

### 1. Zakres, charakter i cel rozprawy

Problem redukcji hałasu ma już wieloletnią historię. W ostatnich kilku dekadach szczególną uwagę poświęcono metodom aktywnym. Na ogół oparte są one na generacji „antyhałasu” za pomocą klasycznych głośników membranowych. Jednak to rozwiązanie napotyka na trudności w środowisku przemysłowym ze względu na nieprzyjazne środowisko pracy. Alternatywnym źródłem dźwięku w takich warunkach mogą być płyty, które wprawiane w drgania za pomocą odpowiednich wzbudników, np. piezoelektrycznych, pracują jako wtórne źródło dźwięku. Płyty takie mogą także pełnić rolę aktywnej bariery akustycznej. Autor rozprawy podjął temat wykorzystania płyt drgających w układach redukcji hałasu, koncentrując się na wybranych problemach sterowania przenoszeniem dźwięku przez płyty. W szczególności dotyczy to wykorzystania układów kompensacji nieliniowej, odpowiedniego rozkładu sygnału sterującego na wiele elementów wykonawczych oraz kompensacji wpływu temperatury na działanie układu tłumienia propagacji hałasu przez płytę. W rozprawie przedstawiono także przykłady wykorzystania opracowanych algorytmów do sterowania emisją dźwięku za pomocą płyty.

Rozprawa ma charakter eksperymentalny. Autor umiejętnie wykorzystał znane z literatury metody aktywnej redukcji hałasu dokonując ich twórczej adaptacji do warunków, w jakich prowadził badania, oraz wprowadzając odpowiednie modyfikacje i ulepszenia, które w istotny sposób umożliwiły poprawę osiągniętych wyników. Na uwagę zasługują duże umiejętności Autora w zakresie implementacji zaproponowanych algorytmów oraz prowadzenia doświadczeń na obiektach rzeczywistych.

### 2. Zawartość rozprawy

Rozprawa liczy 116 stron, w tym 99 stron to tekst rozprawy podzielony na siedem rozdziałów, reszta to załącznik, bibliografia, spis oznaczeń oraz indeks.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do tematyki rozprawy. Autor przedstawił takie pojęcia jak: dźwięk, aktywne tłumienie hałasu, sterowanie płytami drgającymi. Dokonał krótkiego przeglądu klasycznych algorytmów aktywnej redukcji hałasu. Podał motywację dla prowadzonych badań oraz sformułował tezę rozprawy. Omówił także zawartość rozprawy.

Rozdział drugi, najobszerniejszy, zawiera opis liniowych algorytmów adaptacyjnych w strukturze feed-forward. Wychodząc od jednowymiarowego algorytmu FXLMS Autor przeszedł do problemu wielowymiarowego, w szczególności rozpatrzył problem rozdziału sygnału sterującego na wiele elementów wykonawczych. Następnie pokazał wyniki badań eksperymentalnych tłumienia przechodzenia sygnału dźwiękowego przez płytę z trzema elementami piezoelektrycznymi typu MFC dla różnych sygnałów hałasu. W kolejnych punktach przedstawił problem wykorzystania kilku czujników do pomiaru błędu oraz problem wyboru sposobu pomiaru sygnału błędu: mikrofon czy akcelerometr. Omówił także możliwość wykorzystania idei tzw. mikrofonu wirtualnego oraz metod powiększenia strefy ciszy.

Ponieważ drgająca płyta może być także wykorzystana jako źródło dźwięku, stąd w rozdziale trzecim Autor przedstawił wybrane problemy związane z emisją dźwięku przez płytę. Rozpatrzył system sterowania w układzie kompensacji ze stałymi parametrami oraz w układzie adaptacyjnym z pomiarem dźwięku przez mikrofon. Pokazał także wyniki eksperymentalne. Jako alternatywne rozwiązanie zaproponował układ z pomiarami za pomocą akcelerometrów, który podobny jest do układu z wirtualnym mikrofonem.

Nieliniowości występujące w układzie z drgającą płytą w istotny sposób pogarszają możliwości układu redukcji hałasu, stąd rozdział czwarty został poświęcony możliwościom przeciwdziałania temu zjawisku. Przebadano strukturę ze sprzężeniem zwrotnym z wykorzystaniem idei IMC (Internal Model Control) oraz układy kompensacji z zastosowaniem różnego rodzaju filtrów nieliniowych. Na drodze eksperymentalnej porównano wyniki zastosowania różnych algorytmów dla układów redukcji hałasu oraz generacji dźwięku.

W rozdziale piątym Autor przedstawił koncepcję dwupoziomowego systemu sterowania, obejmującego układ redukcji hałasu z jednym sygnałem sterującym jako nadrzędny, a jako podrzędny układ sterowania elementami wykonawczymi na płycie na podstawie wypracowanego sygnału z warstwy wyższej. Rozpatrzono układy z filtrami liniowymi i nieliniowymi. Przeprowadzone badania wykazały, że zaproponowane rozwiązanie prowadzi do zmniejszenia złożoności obliczeniowej algorytmów oraz pozwala uzyskać szybszą zbieżność w układzie.

Temperatura płyty ma istotny wpływ na jej własności, stąd w rozdziale szóstym Autor zaproponował zastosowanie dodatkowego układu pomiaru temperatury w celu poprawy jakości tłumienia hałasu. Identyfikując off-line parametry modelu ścieżki wtórnej dla różnych temperatur istnieje możliwość wykorzystania podejścia typu gain-scheduling z tablicą nastaw indeksowaną wartością mierzonej temperatury. Testy przeprowadzone dla hałasu tonalnego oraz dźwięku nagranych dla rzeczywistego obiektu wykazały, że podejście to rzeczywiście poprawia pracę układu w sytuacji, gdy temperatura płyty ulega zmianom.

Rozdział siódmy stanowi podsumowanie rozprawy, w którym Autor wypunktował najważniejsze, jego zdaniem, osiągnięcia pracy.

### **3. Opinia merytoryczna**

#### **Poprawność i oryginalność tezy rozprawy oraz czy teza została wykazana**

Oceniana rozprawa porusza bardzo ciekawy i trudny problem sterowania dźwiękiem za pomocą płyty drgającej (lub zestawu płyt).

W rozprawie Autor pokazał, że zaproponowany przez niego nieliniowy adaptacyjny system sterowania drganiami płyty, z odpowiednim kształtowaniem odpowiedzi częstotliwościowej, kompensacją temperatury oraz układem dystrybucji sygnału sterującego do wielu elementów wykonawczych, umożliwia zwiększenie poziomu redukcji hałasu przenoszonego przez płytę w porównaniu z klasycznymi układami sterowania.

Stąd stwierdzam, że postawiona teza jest poprawna i oryginalna, oraz w rozprawie wykazano jej słuszność.

### **Analiza źródeł i wiedza Autora w danej dyscyplinie naukowej**

Autor wprawdzie nie przeprowadził osobno przeglądu literatury, ale w trakcie czytania można zauważyć, że jego wiedza w zakresie tematyki rozprawy jest bardzo obszerna. Bibliografia liczy aż 122 pozycje, przy czym Doktorant jest współautorem 16 z nich, z czego 3 publikacje znajdują się na listach JCR z IF powyżej 0.8. Pozostałe publikacje Doktoranta pochodzą głównie z materiałów konferencji międzynarodowych. Wybór źródeł na ogół jest trafny i odpowiedni do realizacji celów pracy, a sposób prowadzenia analizy odpowiada potrzebom rozprawy.

### **Pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy w literaturze światowej**

Wśród różnych metod aktywnej redukcji hałasu stosowanie płyt drgających jest stosunkowo rzadko stosowane, głównie ze względu na pojawiające się trudności w aplikacji takich rozwiązań. Rozprawa w znaczny sposób posuwa naprzód możliwości stosowania płyt w takich układach. Przedstawione osiągnięcia Autora publikowane były także w czasopiśmie z listy JCR oraz na konferencjach międzynarodowych, o czym wspomniano wyżej.

### **Znaczenie uzyskanych wyników dla dyscypliny naukowej**

Jako szczególne osiągnięcia Autora można uznać: wykorzystanie idei mikrofonu wirtualnego bazującego na pomiarach z akcelerometrów, wprowadzenie wycieku w algorytmie LMS dla uzyskania rozkładu sygnału sterującego na wiele elementów sterujących, zastosowanie sterowania adaptacyjnego oraz adaptacyjnej struktury kompensacji do sterowania płytą drgającą, opracowanie koncepcji dwuwarstwowego systemu aktywnej redukcji hałasu oraz opracowanie idei sterowania wieloma elementami wykonawczymi na płycie drgającej za pomocą pojedynczego nieliniowego filtra sterującego. Ponadto Autor zbadał wpływ temperatury płyty na działanie systemu aktywnej redukcji hałasu i zaproponował dobór modeli torów wtórnych w zależności od temperatury. Tak więc rozprawa stanowi istotny wkład w rozwój metod aktywnej redukcji hałasu przy wykorzystaniu płyt drgających zamiast klasycznych głośników.

### **Umiejętność Autora przedstawienia uzyskanych wyników**

Autor przedstawia wyniki badań oraz analizę problemu w sposób zrozumiały i przy użyciu właściwych środków. Rozprawa posiada logiczny układ. Redakcja pracy jest staranna. Na uwagę zasługuje zamieszczenie nie tylko spisu oznaczeń, ale także indeksu ważniejszych terminów, co ułatwia czytelnikowi korzystanie z rozprawy.

#### 4. Słabe strony rozprawy

Rozprawa jest dobrze napisana i ma niewiele słabych stron. Występuje trochę błędów redakcyjnych, które zostały zaznaczone w dostarczonym egzemplarzu rozprawy i przedstawione bezpośrednio Doktorantowi, np. uparcie pisze *though* zamiast *through*. Struktura pracy w sensie podziału na punkty i podpunkty nie zawsze odpowiada przyjętym powszechnie standardom. Wielokrotnie występuje tu niepotrzebne wyróżnienie podrozdziału w podrozdziale w sytuacji braku następných podrozdziałów, np. 3.1.1 w 3.1, 4.8.1 w 4.8, 5.4.1 w 5.4. Także nie zawsze odwołanie do literatury jest najszcześniejsze. Czasami Autor odwołuje się do publikacji wtórnych, podczas gdy bardziej odpowiednie byłoby odwołanie do literatury podstawowej dla danego zagadnienia.

#### Uwagi ogólne

Autor wykonał wiele eksperymentów dla konkretných zakresów częstotliwości generowanego hałasu. Brak jednak komentarza, dlaczego wybrane zostały akurat takie częstotliwości lub takie pasma częstotliwości. Czy była to kwestia przypadku, czy za wyborem stały jakieś inne przesłanki. Podobna uwaga dotyczy doboru długości filtru FIR (np.  $N=640$  na str. 24) czy stopni wielomianów w filtrach Hammersteina (str. 69).

#### Uwagi szczegółowe

1. Str. 12, punkt 1.6.4 – RST jest po prostu układem ze sprzężeniem zwrotnym, tylko w odpowiedniej strukturze. Ponieważ układ ten nie jest w ogóle w pracy wykorzystywany, stąd jego zamieszczenie jest całkowicie zbędne.
2. Str. 20, rys. 2.3 – schemat systemu sugeruje, że mamy do czynienia tylko z trzema kanałami, brak zaznaczenia, że tych kanałów może być więcej, np. za pomocą kropek.
3. Str. 21, rys. 2.4 – co to są Output 0 i Output 1?
4. Str. 23 – dlaczego tylko 3 spośród dziewięciu elementów MFC zostały wykorzystane w badaniach? Podobnie, dlaczego użyto tylko dwóch mikrofonów błędu? Potrzebny byłby komentarz.
5. Str. 24, rys. 2.7 – Rysunek został zatytułowany jako implementacja systemu ANC, ale na schemacie znajduje się także głośnik, który tu nie jest elementem systemu ANC, lecz pełni rolę źródła hałasu pierwotnego.
6. Str. 29 – czy  $N$  i  $M$  są dla wszystkich  $c$  i  $l$  takie same?
7. Str. 32, 33 – występuje niejednoznaczność w oznaczeniu  $e(i)$ , które pojawia się zarówno jako błąd strojenia, jak i jako błąd w układzie redukcji hałasu, a to są dwie różne wielkości.
8. Str. 57 – punkt 4.2 Internal Model Control znalazł się w rozdziale 4. Nonlinear Control, tak jakby należał do algorytmów nieliniowych, tymczasem służy on tu do porównania wyników.
9. Niepotrzebne jest rozbieżenie opisu technik nieliniowych na punkt 4.3 stanowiący wprowadzenie i punkt 4.4 opisujący wykorzystane techniki, gdyż oba punkty nie do końca są spójne i czytelnik zaczyna tracić wątek, o co Autorowi chodzi w punkcie 4.3.

## 5. Wniosek końcowy

Przedstawione wyżej uwagi krytyczne mają głównie charakter redakcyjny i nie zmieniają mojej bardzo pozytywnej oceny recenzowanej pracy.

Podsumowując stwierdzam, że **rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Mazura pt. „Active control of sound with a vibrating plate”** spełnia wymagania określone w „Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym” i wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie Autora do publicznej obrony.

Jednocześnie, ze względu na wysoki poziom naukowy rozprawy oraz spełnienie przez Doktoranta wymogów formalnych, czyli co najmniej jednej publikacji w czasopiśmie z listy JCR o współczynniku IF nie mniejszym niż 0.5, **wnoszę o wyróżnienie rozprawy.**

