

Recenzja pracy 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.**

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Mazura została opracowana na prośbę Dziekana Wydziału Automatyki, Elektroniki i Informatyki, prof. dr hab. inż. Adama Czornika, na podstawie pisma RAu/527/2013/2014 z dnia 19 grudnia 2013 r.

1. Ogólna charakterystyka pracy

Praca poświęcona jest zagadnieniu aktywnej redukcji dźwięku - nurtowi badań objętemu anglojęzyczną nazwą *Active Noise Control* (ANC). To tematyka nowoczesna, aktualna i ważna, zarówno z poznawczego jak i z aplikacyjnego punktu widzenia. Celem rozprawy było opracowanie i przetestowanie algorytmów sterujących do aktywnej redukcji fal akustycznych o częstotliwościach poniżej 1000 Hz, propagowanych przez źródło, którym była płyta o prostokątnych kształtach. Płyta pobudzana była do drgań wymuszonych za pośrednictwem głośnika, natomiast sterowanie realizowano za pomocą aktuatorów piezoelektrycznych (MFC) i/lub elektrodynamicznych (EX_1), rozmieszczonych odpowiednio na jej powierzchni. Jako czujniki w układzie sterowania zastosowano mikrofony i akcelerometry. W pracy analizowano dwa zagadnienia, które mogą być rozwiązywane przy pomocy płyt traktowanych jako źródła:

- problem aktywnej redukcji hałasu, gdzie zadaniem jest cisza,
- problem sterowania emisją dźwięku z płyty.

Rozważono zagadnienia związane z nieliniowością obiektu, wpływem temperatury, jak również problemy wynikające z potencjalnego zastosowania drgających płyt jako elementów składowych złożonego układu aktywnej redukcji hałasu. Autor sformułował następującą tezę:

Nieliniowy adaptacyjny system sterowania drganiami płyty, z kształtowaniem odpowiedzi częstotliwościowej, kompensacją wpływu temperatury oraz z układem dystrybucji sygnału sterującego do wielu elementów wykonawczych, umożliwi zwiększenie poziomu redukcji hałasu propagowanego przez płytę w stosunku do klasycznych liniowych systemów sterowania.

Rozprawa napisana jest po angielsku. Składa się z 7 rozdziałów poświęconych kolejno:

Rozdz. 1 – wstępny, zawiera wprowadzenie do tematu, opis stosowanych sensorów i aktuatorów, przegląd klasycznych algorytmów sterowania stosowanych w podejściu ANC oraz tezę, motywację i omówienie zawartości rozprawy.

Rozdz. 2. – przedstawia różne strategie sterowania adaptacyjnego typu *feed-forward*, uwzględniając przypadek minimalizacji drgań płyty i minimalizacji ciśnienia akustycznego w wybranym obszarze, w oparciu o pomiar z mikrofonu błędu. Skuteczność redukcji badano zarówno w odniesieniu do prostych sygnałów tonowych, jak również w odniesieniu do zakłóceń bardziej złożonych, tzn. sygnałów losowych oraz rzeczywistego hałasu szerokopasmowego.

Rozdz. 3. - został poświęcony zagadnieniu sterowania emisją dźwięku z płyty. Zastosowano algorytmy adaptacyjne w strukturze otwartej, bazujące na pomiarze emisji dźwięku. Dodatkowo przetestowano układ sterowania, w którym zamiast pomiaru z mikrofonu błędu, zastosowano sygnał przyspieszenia uzyskany z akcelerometrów naklejonych na płycie (tzw. układ z mikrofonami wirtualnymi -VMC).

W rozdziale 4. badano problem nieliniowości obiektu. Zaobserwowano, że wyższe harmoniczne nie są wystarczająco tłumione przez liniowe sterowanie w układzie typu *feedforward* i przeanalizowano różne typy nieliniowej kompensacji. W zaproponowanym rozwiązaniu zastosowano nieliniowy model Hammersteina. Na uwagę zasługuje rozdzielanie sygnału z wyjścia nieliniowego filtra typu Hammersteina na trzy dedykowane toru sprzężone bezpośrednio z układami wykonawczymi typu EX-1. Przedstawiono wyniki badań doświadczalnych, w których dla prostych tonów 382 i 504 Hz osiągnięto korzystniejszą - w stosunku do metody z filtrem liniowym - redukcję hałasu.

Rozdz. 5. - opisuje strukturę dwuwarstwową adaptacyjnego układu redukcji hałasu. W układzie tym pracują dwa kompensatory typu *feed-forward*. Pierwszy służy do sterowania emisją dźwięku, a zastosowane uproszczenie umożliwia sprowadzenie modelu obiektu z wieloma elementami wykonawczymi do modelu o jednym wejściu. Następnie płyta z takim układem sterowania jest wykorzystywana przez warstwę aktywnej redukcji hałasu z drugim kompensatorem. Proponowane rozwiązanie zmniejsza nakład obliczeń i może być zastosowane zarówno w odniesieniu do filtrów liniowych jak i nieliniowych.

W rozdziale 6. zaprezentowano wyniki badania wpływu temperatury na charakterystyki płyty oraz na działanie układu aktywnej redukcji hałasu. Rozpatrzono problem zbieżności algorytmu FXLMS (*Filtered-Reference Least Mean Squares*) przy różnych wartościach temperatury otoczenia. Zaobserwowano, że zmiana temperatury o 4^o C może powodować brak zbieżności i zaproponowano odpowiednie dostrajanie modelu.

Rozdział 7. zawiera podsumowanie i wnioski końcowe.

Rozprawę uzupełniają: Glosariusz, Index, Dodatek oraz spis literatury, który liczy 122 pozycje. Literatura przedmiotu cytowana przez Autora jest właściwie dobrana.

2. Uwagi szczegółowe

Praca reprezentuje wysoki poziom i wskazuje dobre przygotowanie warsztatowe Autora: znajomość zaawansowanych metod numerycznych oraz umiejętność prowadzenia badań doświadczalnych. Dostrzegam jednak elementy wymagające uwag krytycznych lub polemicznych:

1. Na rys. 2.5. i 2.21. zamieszczono schematy stanowiska laboratoryjnego, ale opisy są za mało szczegółowe. Brakuje danych geometrycznych (wymiarów pomieszczeń, odległości mikrofonów). W pracy przydałaby się analiza dotycząca lokalizacji mikrofonu błędu w polu akustycznym (strefa Fresnela czy Fraunhofera?). I chociaż w obu strefach możliwa jest skuteczna redukcja dźwięków, to było by to bardzo pomocne w formułowaniu dalszych wniosków.
2. W pracy brakuje też danych technicznych (np. typ głośnika, mikrofonu, wzmacniaczy, parametry układu sterowania). Nasuwają się pytania o możliwości układu sterowania, np. czy sygnały wyjściowe z torów układu sterowania były wysyłane synchronicznie na aktuatory?
3. W testach opisywanych w rozprawie zmieniała się konfiguracja sensorów i elementów wykonawczych. Na rys. 2.15 mamy dwa akcelerometry i dwa aktuatory MFC, a do rys. 2.17, gdzie zestawiono 3 wyniki:
 - a. dla układu bez redukcji,
 - b. z redukcją ANC,
 - c. z redukcją AVC,

brakuje schematu sterowania. Nie wiadomo czy jest to wynik porównywalny z przypadkami z rys. 2.10, 2.11, 2.12 itp., gdzie stosowano 3 elementy MFC (rys. 2.6)? Być może niekorzystny wynik redukcji AVC (zaledwie 0.4 dB, Tab. 2.1) wynika z faktu, że moc dostarczana w tym przypadku do 2 tylko elementów MFC jest zbyt mała, aby skutecznie redukować drgania płyty? Wiadomo też, że zmniejszenie amplitudy drgań płyty nie zawsze jest związane z proporcjonalną redukcją ciśnienia akustycznego. W przypadku, gdy regulator pracuje przy dużym wzmocnieniu (znaczna moc podawana na elementy wykonawcze), poziom ciśnienia akustycznego może nawet wzrosnąć w porównaniu do układu bez sterowania.

4. Zastosowane w testach próbkowanie 2 kHz (str. 23) jest wprawdzie zgodne z twierdzeniem Kotielnikowa-Shannona, ale w praktycznych zastosowaniach jest zwykle niewystarczające do redukcji drgań. Czy sprawdzano o ile zredukowała się amplituda drgań płyty w tym przypadku?
5. Dyskusyjna wydaje się uwaga na stronie 46¹ i 56₃, z której wynika wniosek o nieliniowości źródła z powodu obecności składowych harmoniczných w odpowiedzi na pobudzenie sygnałem o jednej częstotliwości. Płyta oczywiście może być źródłem o własnościach nieliniowych (wpływają na to rodzaj mocowania brzegowego, niejednorodność materiału płyty, odchylenia od grubości, lokalne warstwy kleju sensorów i aktuatorów, ich niezaniebdywalne strefowe/punktowe obciążenie powierzchni, itp.). Niemniej jednak typowa odpowiedź cienkiej płyty (spełniającej założenia teorii Kirchoffa-Love'a) na pobudzenie harmoniczne o wybranej częstotliwości zawiera zazwyczaj składowe harmoniczne o częstotliwościach równych częstotliwościom drgań własnych płyty, co wynika z postaci rozwiązania równania drgań (3.8). Obecność składowych harmoniczných na rys. 3.7 nie jest zatem wyłącznie efektem nieliniowości drgań, tylko cechą płyty jako drgającej struktury lepko-sprężystej o parametrach rozłożonych.
6. W nieliniowości źródła Autor upatruje również niezbyt skuteczną redukcję ANC s.34 (6 dB, 3 dB, Tab. 2.1). Tymczasem znaczna poprawa skuteczności w testach z liniowym i nieliniowym kompensatorem wynika z Tabeli 4.2. W teście tym próbkowanie zostało zwiększone dwukrotnie, czyli do wartości 4 kHz. Wniosek ten nie znalazł się w Podsumowaniu. Nasuwa się też pytanie, czy przy większej ilości elementów wykonawczych redukcja hałasu okaże się skuteczniejsza?

3. Uwagi natury redakcyjnej

1. Komentowane w tekście rysunki powinny być zamieszczane - w miarę możliwości - w pobliżu ich opisu, a na pewno nie powinny znaleźć się w innym podrozdziale, jak ma to miejsce np. z rysunkami 2.12 i 2.13, które opisano w 2.5.5, a zamieszczono w podpunkcie 2.6.1, rysunkami 2.22, 2.23 i 2.24 - które znalazły się za *Podsumowaniem* 2.9, czy rys. 3.7 i 3.7 - które opisano w p. 3.2, a umieszczono w p. 3.3., itd.
2. Komentarze do niektórych rysunków są zbyt lakoniczne. Podczas kiedy jeszcze można się domyślić, że zastosowany w testach hałas nagrano w hali przemysłowej, ale redukcję hałasu prowadzono już w warunkach laboratoryjnych (co nie wynika z opisu, rys. 2.11), to już w przypadku rysunków 2.22 i 2.23 zupełnie nie można przewidzieć, w jaki sposób zmierzono i w jakiej odległości/płaszczyźnie przedstawiono prezentowane mapy - a to bardzo obniża ich znaczenie.
3. Nie są też zrozumiałe: rys. 3.14 (błędny podpis); rys. 4.8 (zawiera symbole, które nie pasują do wzoru (4.6)). Nie wiadomo, co przedstawia rys. 5.3? (na podstawie opisu, s.78₁₂, spodziewamy się redukcji poziomu ciśnienia akustycznego w układzie ze sterowaniem?)

4. Podsumowanie

Doktorant dowiódł postawionej tezy wnosząc tym samym wkład w rozwiązanie wybranych problemów z zakresu aktywnej redukcji dźwięków. Do osiągnięć Autora zaliczam:

- Wprowadzenie „wycieku” w algorytmie LMS w celu sterowania rozłożeniem wymuszenia na wiele elementów wykonawczych.
- Zastosowanie idei mikrofonów wirtualnych, bazującej na pomiarze drgań za pomocą akcelerometrów.
- Zastosowanie idei mikrofonów wirtualnych do sterowania emisją dźwięku z drgającej płyty.
- Zastosowanie adaptacyjnego sterowania typu *feed-forward*, do sterowania emisją dźwięku z płyty.
- Zastosowanie adaptacyjnej struktury kompensacji z nieliniowymi filtrami do sterowania płytą drgającą.
- Opracowanie idei dwuwarstwowego systemu Aktywnej Redukcji Hałasu (ANC), z warstwą bezpośrednią odpowiedzialną za sterowanie płytą i warstwą wyższą stanowiącą standardowy układ Aktywnej Redukcji Hałasu.
- Opracowanie idei sterowania płytą drgającą z wieloma elementami wykonawczymi, za pomocą pojedynczego nieliniowego filtra sterującego.
- Zbadanie wpływu temperatury płyty na działanie systemu Aktywnej Redukcji Hałasu oraz zaproponowanie wyboru modeli torów wtórnych w zależności od temperatury.

Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Mazura spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Biorąc pod uwagę wkład merytoryczny Autora, wysoki stopień trudności prowadzonych badań oraz trzy współautorskie publikacje w czasopiśmie z tzw. „listy filadelfijskiej” (JCR) o współczynniku IF 2012: 0.829, wnioskuję o jej wyróżnienie.

L. Lewicki

