

prof. dr hab. Inż. Andrzej Dobrucki
Politechnika Wrocławska
Wydział Elektroniki
Katedra Akustyki i Multimediów
Wybrzeże Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
Tel. 71 320 30 68
e-mail: andrzej.dobrucki@pwr.wroc.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Łukasza Nowaka

pt. „ Adaptive feedback control system for reduction of vibroacoustic emission” (Adaptacyjny system sterowania ze sprzężeniem zwrotnym dla redukcji transmisji wibroakustycznej)

Rozprawa doktorska została wykonana w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk. Promotorem rozprawy jest dr hab. inż. Mirosław Meissner, zaś promotorem pomocniczym dr inż. Tomasz G. Zieliński. Rozprawa, napisana w języku angielskim, podzielona jest na 6 rozdziałów, z których pierwszy stanowi wprowadzenie, zaś ostatni zawiera uwagi podsumowujące. Praca poprzedzona jest streszczeniami w języku polskim i angielskim oraz wykazem ważniejszych skrótów i oznaczeń, zawiera też spis literatury liczący 103 pozycje. Osobno Autor dostarczył spis własnych publikacji liczący 13 pozycji. Rozprawa liczy 136 stron, zawiera 51 rysunków i 20 tabel.

We wstępie Autor podaje wprowadzenie do problemu, krótki przegląd literatury, tezę i zakres pracy. Tezę pracy Autor formułuje następująco:

„Drgania cienkiej płyty o dowolnych warunkach brzegowych pobudzonej zewnętrzną siłą harmonicznie zmienną w czasie mogą być modyfikowane za pomocą zewnętrznego aktywnego systemu sterowania zawierającego skończoną liczbę par piezoelektrycznych czujników i pobudników w ten sposób, aby amplituda ciśnienia akustycznego wytwarzanego przez płytę była minimalizowana w wybranym punkcie przestrzeni”.

W zagadnieniach aktywnego tłumienia hałasu emitowanego do otoczenia można wyróżnić dwa zagadnienia:

- Minimalizacja poziomu hałasu (ciśnienia akustycznego) w określonym obszarze przestrzeni, np. w punkcie
- Minimalizacja mocy akustycznej źródła.

Oczywiście pierwsze zagadnienie jest łatwiejsze do realizacji, ponieważ zmniejszenie poziomu hałasu w jednym obszarze, może powodować jego znaczne zwiększenie gdzie indziej. Zagadnienie można rozwiązywać stosując w pętli sprzężenia zwrotnego jeden mikrofon i oczywiście odpowiedni układ sterujący. W drugim przypadku stosuje się większą liczbę mikrofonów, zaś układ sterujący oraz algorytmy sterowania są bardziej złożone. Niebanalność problemu postawionego przez Autora rozprawy polega na tym, że w realizowanym przez niego systemie w ogóle nie ma mikrofonów w pętli sprzężenia zwrotnego, a algorytm sterowania opiera się na matematycznym modelu drgań płyty oraz promieniowania przez nią dźwięku.

W rozdziale 2 rozpatrywane są zagadnienia związane z drganiami belek i cienkich płyt. Zagadnienie drgań struktur rozwiązywane jest poprzez zastosowanie analizy modalnej. Stosując metody analityczne (dla belki) i numeryczne wyznacza się częstotliwości własne oraz funkcje własne - rozkłady amplitud dla poszczególnych częstotliwości własnych, a następnie rozwiązuje się zagadnienie dla dowolnej częstotliwości i dowolnego rozkładu siły pobudzającej na powierzchni

struktury poprzez jej rozłożenie względem ortogonalnych funkcji własnych i wyznaczenie współczynników (amplitud) poszczególnych modów. Podejście takie jest klasyczne. Autor zwraca uwagę, że przy pobudzeniu struktury jego częstotliwością własną, amplituda odpowiedniego modu staje się nieskończona. Niewystępowanie tego zjawiska Autor tłumaczy słusznie nieliniowościami i tłumieniem. Można jeszcze podać trzecią przyczynę: częstotliwość własna jest zwykle liczbą niewymierną i osiągnięcie dokładnej takiej częstotliwości pobudzenia jest niemożliwe. Niemniej jednak, w dalszym ciągu pracy (w rozdziale 4.7) Autor sprawdza liniowość odpowiedzi płyty na pobudzenie okołorezonansowe i stwierdza, że nieliniowości są zwykle do pominięcia. W dalszej części rozdziału 2 Autor przeprowadza przykładowe obliczenia dla płyty aluminiowej o wymiarach 30 cm - długość, 20 cm - szerokość, 1 mm - grubość, różniących się nieco warunkami brzegowymi. W pierwszym przypadku płyta zaopatrzona jest na środku krótszego boku w wypustkę o długości 6 cm (i nieznanej szerokości), która jest zaciskana. W drugim przypadku płyta jest zaciśnięta wzdłuż całego krótszego boku, nie jest jasne czy wymiar 30 cm jest liczony od punktu zaciśnięcia, czy też jest to długość całej płyty - w tym przypadku efektywna długość byłaby mniejsza niż 30 cm. Wreszcie trzeci przypadek stanowi płyta zaciśnięta w środkowej części krótszego boku na szerokości 5 cm i głębokości 1 cm. Wyniki różnią się dosyć znacznie. Autor zwraca uwagę, że w porównaniu z przypadkiem 2, w przypadku 3 pojawia się dodatkowy mod drgań, jako piąty z kolei. Częstotliwości pozostałych modów i rozkłady amplitud na powierzchni dla pozostałych modów różnią się nieznacznie. Autor nie zwraca jednak uwagi na fakt, że wartości częstotliwości własnych dla przypadku 1 różnią się bardzo znacznie od tych wartości dla pozostałych dwóch przypadków, mimo, że rozkłady amplitud na powierzchni są podobne, występuje nawet dodatkowy mod nr 5, który wystąpił dla przypadku 3. Nie potrafię sobie wytłumaczyć tak dużych różnic wartości częstotliwości własnych dla podobnych w końcu struktur i oczekuję tu komentarza Autora. W końcowej części rozdziału Autor sprawdza dokładność obliczonych numerycznie funkcji własnych poprzez kontrolę ich ortogonalności. Tak, jak należało się spodziewać, największe odchyłki od ortogonalności wykazują obliczone funkcje własne dla najbardziej zgrubnego podziału, w miarę jego zagęszczania, również odchyłki od ortogonalności maleją. Zwraca uwagę, pisze o tym również Autor, że iloczyny skalarne różnych niedokładnie obliczonych funkcji własnych mają znaki dodatnie. Nie widzę dla tego żadnego uzasadnienia, wg mnie znak błędu powinien być losowy. Też jestem ciekaw komentarza Autora w tej sprawie.

Rozdział 3 poświęcony jest promieniowaniu drgających płyt. Rozważane jest proste zagadnienie promieniowania płyty prostokątnej jako płaskiej struktury dla trzech przypadków: bez obciążenia ośrodkiem, z uwzględnieniem ośrodka o małej gęstości (powietrze), z uwzględnieniem ośrodka o dużej gęstości (woda). Obliczane jest pole akustyczne bliskie i dalekie. Jak należało się spodziewać, powietrze prawie nie wpływa na wartość częstotliwości rezonansowej płyty, a nawet, dla niektórych przykładów, częstotliwość ta nieco rośnie. Autor słusznie tłumaczy to błędami obliczeniowymi. Chcę tu wspomnieć, że swego czasu zajmowałem się zagadnieniem sprzężenia drgań i promieniowania dla płyty okrągłej i obciążenia powietrzem oraz opracowałem kombinowaną metodę FEM-BEM do obliczania sprzężenia (patrz rozdział 4 książki „Przetworniki elektroakustyczne”). Stwierdziłem tam, że w pobliżu częstotliwości rezonansowej struktury bezstratnej tłumienie drgań spowodowane promieniowaniem istotnie obniża dobroć rezonansu i redukuje amplitudę drgań. To jest jeszcze jeden przyczynek do dyskusji, dlaczego w rezonansie wychylenia nie są nieskończone. W rozdziale (3.2.2) równanie falowe w postaci (3.1) jest nieprawidłowe. Gęstość ośrodka traktuje się tu jako stałą, i można ją uprościć. Równanie falowe przechodzi w równanie Helmholtza o postaci:

$$\Delta p + \frac{\omega^2}{c_w^2} p = 0$$

W takim razie w drugim składniku powinien być znak (+) zamiast (-). Mam również wątpliwość co do warunku brzegowego (3.3). Jest tam chyba po lewej stronie o jeden operator nabła (∇) za dużo.

W podrozdziale 3.3 rozważane jest pole dalekie. Wydaje mi się, że w zagadnieniu aktywnej redukcji hałasu, należy zajmować się wyłącznie polem dalekim, ponieważ w polu bliskim zmiany przestrzenne ciśnienia akustycznego są bardzo „szybkie” i nieuniknione błędy algorytmów (np. błędy zaokrągleń), całkowicie mogą zniweczyć funkcjonowanie algorytmu w punkcie. Promieniowanie płaskiej struktury w nieskończonej odgradzie jest zagadnieniem prostym, ponieważ ciśnienie akustyczne w dowolnym punkcie pola może być obliczone z całki Rayleigha. Jest to jednak przypadek mało praktyczny. Dla rozwiązania zagadnienia promieniowania płyty swobodnej Autor opracował algorytm bazujący na pośredniej (indirect) wariacyjnej metodzie elementów brzegowych. Podejście to jest słuszne, ponieważ obliczanie pola akustycznego struktury o dowolnym rozkładzie prędkości na powierzchni metodami analitycznymi prowadziłoby do zbyt skomplikowanych wzorów i chyba jest nieopłacane. Doświadczenia wykazały, że opracowana metoda sprawdza się, zwłaszcza w polu dalekim.

Kolejny rozdział dotyczy zastosowania elementów piezoelektrycznych jako czujników i pobudników drgań płyty stosowanych do automatycznego sterowania. W rozdziale tym przedstawiono teorię czujników i pobudników piezoelektrycznych, stosowanych do detekcji i wzbudzania drgań w strukturach z dominującymi naprężeniami zginającymi i odkształceniami poprzecznymi. Teoria ta jest dobrze znana, a wyprowadzanie wzorów - zbędne. W dalszej części rozdziału Autor zajmuje się układami kondycjonowania sygnałów, uzyskanych z czujników - przedstawia podstawowe właściwości wzmacniaczy ładunku i napięcia. Wskazuje na podstawową zaletę wzmacniacza ładunkowego w porównaniu z napięciowym: niezależność czułości od pojemności przewodów doprowadzających. Definiuje czułość wzmacniacza napięciowego jako stosunek napięcia wyjściowego do ładunku wytworzonego przez czujnik. W takim razie wymiar tej wielkości powinien być V/C, a nie C/V, jak to występuje we wzorze (4.17). *Nota bene*, tak naprawdę wymiar wielkości G^V wg wzoru (4.17) rzeczywiście jest V/C (jest to odwrotność pojemności). Przedstawiono praktyczną realizację zbudowanych przetworników. Na uwagę zasługuje pomysłowa technologia montażu przetworników: na brzegach klejem nieprzewodzącym (epoksy), a w środku klejem przewodzącym. Technologia taka zapewnia kontakt elektryczny z podłożem, a jednocześnie zapobiega przypadkowym zwarciom obu powierzchni przetwornika. Nie analizowałem zdolności patentowej tego rozwiązania, ale Autor powinien się tym zainteresować, o ile nie jest za późno - w przypadku publikacji rozwiązania nie można patentować. Autor analizuje czułość sensora w zależności od miejsca jego zamocowania. W przypadku belki, największa czułość występuje w pobliżu jej zaciśniętego końca - tam występują największe odkształcenia. W przypadku płyty, w której występują rozkłady odkształceń również w kierunku y (szerokość), czułość w funkcji miejsca mocowania zbadana została zarówno numerycznie, jak i eksperymentalnie. Uzyskane wyniki są na ogół zgodne, chociaż w kilku przypadkach występują dość znaczne rozbieżności. Autor bada również eksperymentalnie liniowość odpowiedzi struktury w funkcji amplitudy napięcia pobudzającego aktuator piezoelektryczny dla częstotliwości rezonansowych. Świadczy to o dużej staranności procedury badawczej. W zakresie użytych napięć, drgania struktury można uznać za liniowe. Świadczyć to może o tym, że nie nieliniowość, a tłumienie jest główną przyczyną ograniczenia amplitudy odpowiedzi. Moim zdaniem, tego należało oczekiwać.

Rozdział 5 jest kluczowym rozdziałem rozprawy. W rozdziale tym przedstawiono realizację adaptacyjnego systemu sterowania: *hardware* i *software*, opartego na opisanych poprzednio

modelach drgań i promieniowania. Sterowanie realizowano za pomocą par przetworników piezoelektrycznych, z których jeden był czujnikiem dostarczającym sygnał będący podstawą sterowania, a drugi pobudnikiem, realizującym sterowanie w pętli sprzężenia zwrotnego. W przeprowadzonych eksperymentach mikrofon służył jedynie do oceny skuteczności sterowania, nie był on natomiast elementem systemu.

Badano, zarówno teoretycznie, jak i doświadczalnie system z pojedynczą pętlą sprzężenia zwrotnego (pojedyncza para czujnik - pobudnik), jak i kilkoma takimi pętlami (do czterech). W przypadku zmiany zewnętrznego pobudzenia system sterowania automatycznie „dopasowuje się” do zmienionych warunków. Ważnym wnioskiem z rozważań, potwierdzonym eksperymentalnie jest to, że w przypadku pobudzenia rezonansowego, tylko parametry modalne związane z tym rezonansem mogą być brane pod uwagę, parametry pozostałych modów nie wpływają na system sterowania. System sterowania pracuje w zakresie małych częstotliwości - do 500 Hz. Gdy poziom użytego sterowania przekracza pewną krytyczną wartość, system traci stabilność i w drganiach pojawiają się mody o częstotliwościach większych - z zakresu 1 - 2 kHz. Moim zdaniem jest to zjawisko naturalne, o prostu ujemne sprzężenie zwrotne przechodzi w dodatnie. Skuteczność sterowania jest różna. W niektórych przypadkach uzyskano redukcję poziomu dźwięku w określonym punkcie przekraczającą 10 dB, co należy uznać za wynik dobry. W innych przypadkach redukcja nie przekraczała 1 dB. Stwierdzono też, że zastosowanie kilku pętli sprzężenia zwrotnego poprawia redukcję poziomu dźwięku w porównaniu do pojedynczej pętli. To też jest ważny wynik.

W ostatnim, 6 rozdziale Autor deklaruje udowodnienie tezy pracy, oraz wymienia swoje główne osiągnięcia. Należą do nich:

- Opracowanie aktywnego systemu sterowania drganiami płyt, w którym uzyskuje się redukcję poziomu dźwięku emitowanego przez płytę w określonym punkcie w oparciu o detekcję drgań płyty oraz model drgań i model promieniowania dźwięku,
- Określenie, że sterowanie może być stosowane dla pobudzenia płyty częstotliwościami rezonansowymi i dla każdego rezonansu niezależnie,
- Opracowanie modeli i algorytmów drgań płyty, opartych na analizie modalnej
- Opracowanie modelu promieniowania płyty za pomocą pośredniej wariacyjnej metody elementów brzegowych
- Staranne przebadanie opracowanych modeli oraz systemu sterowania.

W ostatniej części rozdziału Autor określa kierunki dalszych prac: zastosowanie metody do bardziej złożonych geometrii, wdrożenie nowych, bardziej efektywnych algorytmów, integracja systemu z analizą dynamiki struktury.

Wyniki uzyskane w rozprawie są bardzo interesujące. Sam przebieg procesu badawczego świadczy o dużej staranności Autora. Stara się on rozwiewać wszelkie pojawiające się wątpliwości poprzez przeprowadzenie eksperymentów weryfikujących. Dotyczy to np. weryfikacji ortogonalności wektorów własnych struktury, czy też badanie wpływu nieliniowości na drgania struktury. Nieraz ta staranność wydaje mi się aż przesadna, niemniej jednak jest ona godna uznania. Teoretyczne rozważania w rozprawie oparte są na ogół na wiedzy znanej, ale podkreślić należy, że implementacja rozważań teoretycznych do praktycznych rozwiązań - zarówno algorytmiczno-numerycznych, jak i hardware'owych została dokonana przez Doktoranta samodzielnie. Zauważone i wypunktowane błędy mają charakter pomyłek i nie wpływają na wartość pracy.

Redakcja pracy jest również staranna, a jej język - poprawny. Znalazłem kilka, nie wartych wspomnienia literówek. Pewne zastrzeżenia redakcyjne budzi sposób opisu tabel - opisy te znajdują się pod tabelami. Zwykle tytuły tabel znajdują się bezpośrednio nad tabelą, natomiast podpisy

znajdują się pod rysunkami. Niezbyt szczęśliwie zakończony jest rozdział 3. Na ostatniej jego stronie (55) znajdują się tylko dwa wyrazy. Jest to niezręczność redakcyjna.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Łukasza Nowaka pt. „Adaptive feedback control system for reduction of vibroacoustic emission” spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003 nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami) i wnioskuję o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Andrzej Dobek

Wrocław, 12.10.2014