

Prof. dr hab. inż. Jerzy ŚWIDER  
Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny  
Instytut Automatyzacji Procesów Technologicznych  
i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania  
ul. Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, tel.: (032)237-24-60

Gliwice, 25.05.2011r.

**Recenzja**  
**rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marka Płaczka**  
**p.t.: " Modelowanie i badanie jednowymiarowych, drgających**  
**układów mechatronicznych"**

opracowana na zlecenie Prodziekana ds. Nauki Wydziału Mechanicznego Technologicznego  
Politechniki Śląskiej, pismo nr RMT0-369/D/006/10/11 z dnia 6.04.2011r.,  
wynikające z uchwały Rady Wydziału Mechanicznego Technologicznego z dnia 6.04.2011r.



### 1. Uwagi ogólne

Współcześnie w wielu układach technicznych stosuje się podzespoły, których działanie opiera się na zjawisku piezoelektrycznym (tzw. prostym lub odwrotnym). Czujniki piezoelektryczne są naklejane na powierzchnię elementów maszyn czy ustrojów nośnych w celu badania ich wytrzymałości, nośności i trwałości, a także wyznaczania cech dynamicznych tych układów. W przypadku elementów kompozytowych czujniki piezoelektryczne umieszczane są także na stałe wewnątrz części maszyn i urządzeń, już w trakcie ich wytwarzania. Coraz częściej przetworniki piezoelektryczne stosowane są również w budowie i eksploatacji maszyn jako elementy wykonawcze, w postaci zaworów piezoelektrycznych, komponentów układów mikro-mechanicznych, mikropomp, czy też liniowych oraz obrotowych silników piezoelektrycznych. Obserwuje się ciągły wzrost zainteresowania konstruktorów tego typu tworzywami oraz rozszerzenie pola możliwych ich zastosowań, głównie z uwagi na intensywny rozwój techniki piezoelektrycznej, w tym tworzenie nowych materiałów o właściwościach piezoelektrycznych, jak laminaty czy gradientowe materiały piezoelektryczne oraz opracowywanie i wdrażanie nowych technologii ich wytwarzania.

Jednym z ważnych obszarów zastosowania tworzyw o właściwościach piezoelektrycznych jest potrzeba tłumienia drgań układów technicznych i ich kontrola. W wielu ośrodkach naukowych, badawczych i przemysłowych rozwijane są zarówno pasywne, półaktywne, jak i aktywne metody sterowania drganiami mechanicznymi oraz techniki minimalizacji energii akustycznej emitowanej przez takie układy drgające. Projektowanie układów spełniających te kryteria polega na odpowiednim doborze cech konstrukcyjnych przetworników piezoelektrycznych, w szczególności wymiarów geometrycznych oraz ich

<b>BIURO DZIEKANA</b>	
RMT	2011-05-27
L. dz. 436/D/006/2011/11	



własności fizykalnych, a także zbadaniu i ustaleniu możliwości i celowości wprowadzania do obiektu dodatkowych elementów, takich jak np. pasywne obwody elektryczne. Pojawiają się zatem nowe, złożone problemy, dotyczące badania własności przetworników piezoelektrycznych oraz wyznaczania charakterystyk układów, w których są one stosowane. Ważnym zagadnieniem jest metodyka oceny wpływu poszczególnych parametrów tego typu elementów na charakterystyki dynamiczne układów, w których są one stosowane.

Na tle tak rozpoznanych zagadnień Autor rozprawy ograniczył jej tematykę do obszaru analizy jednowymiarowych, drgających wyłącznie giętnie układów mechanicznych, w postaci belek, w których przetworniki piezoelektryczne stosowane są jako tłumiki lub tzw. aktuatory drgań. Doktorant podjął w pracy próbę modelowania oraz weryfikacji analitycznej modeli matematycznych zastosowanych do tego typu środków technicznych, ze względu na spełnienie przyjętych przez siebie kryteriów szczegółowości odwzorowania układu rzeczywistego, przy jednoczesnym, możliwie największym uproszczeniu niezbędnego do tego celu aparatu matematycznego. W wyniku przeprowadzonych działań opracował On sześć różnych modeli matematycznych badanych układów, które podzielił na grupy modeli dyskretno – ciągłych oraz tzw. ciągot – ciągłych. Kolejne, przedstawiane w rozprawie modele uszczegółowił, przechodząc od założenia idealnego przytwierdzenia przetwornika piezoelektrycznego do powierzchni podukładu mechanicznego, poprzez założenie czystego ścinania warstwy pośredniczącej pomiędzy tymi elementami, aż do uwzględnienia jej mimośrodowego rozciągania. Stosując zweryfikowaną pod względem dokładności metodę przybliżoną Galerkina, wyznaczył charakterystyki badanych układów oraz przeprowadził analizę wpływu parametrów geometrycznych i tworzywowych poszczególnych ich elementów na otrzymane postacie charakterystyk dynamicznych.

## **2. Ocena rozprawy**

Autor zawarł swoją pracę na 154 stronicach i podzielił ją na sześć rozdziałów, uzupełnionych wykazem literatury. Zamieścił w niej 116 pozycji cytowanej literatury oraz trzy źródła internetowe. Najstarsze cytowane publikacje wydane były w 1969 roku, najnowsze natomiast - w roku 2010, przy czym 75 z nich jest angielskojęzycznych, zaś dwie wydano w języku rosyjskim. Na uwagę zasługuje również fakt, że ponad 20 cytowanych pozycji, związanych z problematyką rozprawy, jest autorstwa bądź współautorstwa Doktoranta. Ponadto w pracy Autor zamieścił 58 rysunków, 26 tablic oraz 313 ponumerowanych zależności matematycznych, o numerach przyporządkowanych poszczególnym rozdziałom rozprawy. Generalnie pragnę stwierdzić, że Doktorant udowodnił swoją rozprawą, że potrafi jasno, precyzyjnie i poprawnie formułować swoje myśli, przedstawiając zarówno cel podjęcia badań, jak i stawiając wnioski wynikające z prowadzonych rozważań.



W rozdziale pierwszym, podzielonym na trzy podrozdziały Autor przedstawił kolejno przedmiot rozprawy i nakreślił jej zasadnicze cele. Dokonał przeglądu piśmiennictwa oraz zwartego przeglądu treści rozprawy. Jako oczekiwany efekt prowadzonych badań Doktorant przyjął zidentyfikowanie matematycznego modelu, odpowiedniego do opisu rozważanych układów, z uwzględnieniem wszystkich parametrów, mających wpływ na ich charakterystyki, przy jednoczesnym zmierzaniu do maksymalnego, możliwego uproszczenia jego złożoności. W sześciostronicowym przeglądzie literatury Doktorant skupił swoją uwagę na pracach, w których opisano istotę zjawiska piezoelektrycznego, charakterystyki materiałów piezoelektrycznych oraz ich zastosowania, głównie w układach pasywnej oraz aktywnej redukcji drgań układów mechanicznych, oraz układach emitujących energię akustyczną. Autor nawiązał również do prac prowadzonych w ośrodku gliwickim, dotyczących modelowania układów mechatronicznych w ujęciu grafów i liczb strukturalnych, a także badania charakterystyk tych układów oraz wpływu zjawiska piezoelektrycznego na tego typu układy techniczne. Przegląd literatury uzupełnił On o krótki opis podstawowych pozycji z zakresu teorii drgań, analizy matematycznej, wytrzymałości materiałów oraz teorii obwodów elektrycznych.

W czterostronicowym rozdziale drugim Doktorant przedstawił wykaz stosowanych oznaczeń oraz przyjęte przez Niego założenia, dotyczące modelowanych, ciągłych układów drgających.

W rozdziale trzecim Doktorant przeprowadził analizę drgań układu mechanicznego, stosując kolejno metodę dokładną Fouriera oraz metodę przybliżoną Galerkina. Wyznaczył częstości drgań własnych stalowej belki wspornikowej, będącej podukładem układu, badanego w dalszej części pracy. Zakładając wymuszenie zewnętrzne w postaci harmonicznie zmiennej siły skupionej, wyznaczył podatność dynamiczną tego układu. Otrzymane wyniki Doktorant zestawił ze sobą, weryfikując dokładność metody przybliżonej oraz proponując metodę jej korekcji. Autor wykazał, że stopień niedokładności metody przybliżonej jest zależny od nałożonych na układ warunków brzegowych, a więc przyjętego sposobu jego zamocowania oraz przyjmowanego, przybliżonego rozwiązania różniczkowego równania ruchu analizowanej belki. Stwierdził również, że w przypadku przyjętej w pracy belki wspornikowej niedokładności metody przybliżonej są największe spośród wszystkich możliwych sposobów jej zamocowania. W celu uogólnienia otrzymanych wyników Doktorant przedstawił je ponadto w postaci bezwymiarowej oraz wyznaczył podatność dynamiczną układu mechanicznego z uwzględnieniem tłumienia wewnętrznego, wprowadzając reologiczny model Kelvina – Voigta tworzywa belki.



Rozdział czwarty Doktorant zatytułował „*Układ mechatroniczny z szerokopasmowym, piezoelektrycznym tłumikiem drgań*” i przedstawił w nim postać analizowanego układu oraz wyjaśnił istotę jego działania. Wprowadził schemat zastępczy przetwornika piezoelektrycznego, który wraz z dołączonym rezystorem, pod względem elektrycznym opisał jako obwód szeregowy typu RC. W podrozdziale 4.1 wyprowadził sześć kolejnych modeli matematycznych rozpatrywanego układu, z których pierwsze cztery to modele dyskretno – ciągle, zaś w przypadku pozostałych - zarówno belkę wspornikową, jak i przetwornik piezoelektryczny - opisał, uwzględniając ciągły rozkład masy tych elementów, nazywając ten model „ciągło – ciągłym”. Począwszy od pierwszego modelu Doktorant uwzględniał warstwę łączącą elementy układu, zakładając bądź jej czyste ścinanie lub też uwzględniając mimośrodowe rozciąganie tej warstwy. W poszczególnych modelach matematycznych oddziaływanie przetwornika piezoelektrycznego na podukład mechaniczny Doktorant sprowadzał ponadto do momentu zginającego lub też uwzględniał naprężenia styczne, wywołwane w warstwie pośredniczącej. Równania ruchu elementów Autor wyprowadzał, stosując postulat równowagi sił i momentów zginających, działających na myślowo wycięty element układu. Uwzględnił równania konstytutywne tworzyw o własnościach piezoelektrycznych oraz równania obwodów elektrycznych, otrzymane w wyniku stosowania metody klasycznej analizy stanów nieustalonych tych obwodów. W podrozdziale 4.2 Doktorant wyznaczył podatność dynamiczną układu z szerokopasmowym, piezoelektrycznym tłumikiem drgań, stosując skorygowaną metodę przybliżoną Galerkinia. Algorytm przeprowadzanych obliczeń opisał jedynie w odniesieniu do pierwszego z opracowanych modeli matematycznych układu, natomiast rezultaty otrzymane w wyniku stosowania pozostałych modeli przedstawił On w postaci zestawionych w tablicach zależności matematycznych oraz wykresów wyznaczonych analitycznie charakterystyk. W kolejnym podrozdziale Doktorant przeprowadził analizę wpływu parametrów geometrycznych i tworzywowych elementów układu na wyznaczone charakterystyki, przedstawiając otrzymane wyniki w postaci trójwymiarowych wykresów. Na podstawie otrzymanych rezultatów Autor wywnioskował, że w kontekście przyjętych kryteriów najbardziej odpowiednim modelem matematycznym badanych układów jest model dyskretno – ciągły z uwzględnieniem mimośrodowego rozciągania warstwy kleju i momentu zginającego, wywołwanego przez przetwornik piezoelektryczny.

Identyczny układ Autor nadał piątemu rozdziałowi swojej pracy, w którym przeprowadził modelowanie i badanie układu belki z aktuatorem piezoelektrycznym. W rozdziale tym Doktorant opisał zasadę działania układu o identycznej, jak poprzednio postaci, w przypadku którego jednak przetwornik piezoelektryczny jest zasilany z zewnętrznego źródła harmonicznym napięciem prądu elektrycznego. Celem analizy



układu było wyznaczenie charakterystyki, którą Autor zdefiniował jako zależność amplitudy drgań swobodnego końca belki wspornikowej od parametrów napięcia prądu elektrycznego, doprowadzonego do naklejonego na jej powierzchni aktuatora piezoelektrycznego. Uwzględniając wnioski wysnute na podstawie analizy układu z piezoelektrycznym tłumikiem drgań, Doktorant ograniczył się do opracowania jedynie czterech dyskretno – ciągłych modeli matematycznych rozpatrywanego układu. Stosując skorygowaną metodę przybliżoną Galerkiina wyznaczył zdefiniowaną uprzednio charakterystykę, uwzględniając pierwszy z opracowanych modeli. Analogicznie jak poprzednio, prezentację rezultatów zastosowania pozostałych modeli Doktorant ograniczył do tabelarycznego zestawienia otrzymanych zależności matematycznych oraz sporządzenia i zestawienia wykresów wyznaczonej charakterystyki. Przeprowadził On ponadto analizę wpływu parametrów geometrycznych oraz tworzywowych elementów układu na jej przebieg oraz dokonał oceny dokładności opracowanych modeli matematycznych.

W rozdziale szóstym Doktorant podsumował swoją pracę, opisując skrótowo zrealizowane działania i przytaczając najważniejsze wnioski. Wskazał ponadto, że opracowana przez Niego metoda analizy tego typu drgających układów może być z powodzeniem stosowana do badania drgających, jednowymiarowych układów ciągłych o dowolnej postaci, a także rozwijana w celu analizy układów aktywnej redukcji drgań, czy też układów dwuwymiarowych. Zaznaczył On jednak, że przede wszystkim przedstawiona metodyka jest wstępem do realizacji zadania syntezy jednowymiarowych, drgających układów ciągłych, co też postawił sobie jako cel dalszych badań.

Doktorant przedstawił w rozprawie proces modelowania i badania jednowymiarowych drgających układów, w których stosuje się zarówno proste, jak i odwrotne zjawisko piezoelektryczne, począwszy od wyboru metody ich analizy, weryfikacji i korekcji przyjętej metody, poprzez opracowanie ciągu modeli matematycznych i wyznaczenie charakterystyk tych układów, aż do oceny wpływu cech geometrycznych i własności fizykalnych elementów układu na te charakterystyki. Przedstawił On ponadto ocenę sformułowanych modeli matematycznych. Pomimo, że znane są w literaturze przedmiotu opracowania, w których poruszane są tego typu zagadnienia (z którymi Autor się zapoznał i cytował w swojej pracy), to Jego celem była jednak ocena i wskazanie odpowiednio precyzyjnego modelu matematycznego oraz zaproponowanie takiej metody analizy rozpatrywanych układów, aby umożliwić odpowiednio wierne odwzorowanie zjawisk w nich zachodzących przy jednoczesnej minimalizacji złożoności stosowanego aparatu matematycznego.

Jako główne osiągnięcia Doktoranta uważam zaproponowanie przybliżonej metody Galerkiina w odniesieniu do analizy drgających układów mechanicznych z przetwornikami



piezoelektrycznymi; weryfikację jej dokładności oraz wskazanie sposobu korekcji otrzymywanych przy jej zastosowaniu wyników; opracowanie metod wyznaczania charakterystyk rozpatrywanych układów drgających, z uwzględnieniem ich parametrów geometrycznych i tworzywowych, w tym - w szczególności - wpływu własności warstwy kleju łączącej przetwornik piezoelektryczny z układem mechanicznym; utworzenie autorskich modeli matematycznych, którymi opisano badany układ oraz uwzględniono w nim proces mimośrodowego rozciągania warstwy łączącej. Doktorant zrealizował cel swojej rozprawy wskazując najbardziej odpowiedni model matematyczny, którego dalsze uszczegółowienie nie przekłada się znacząco na uzyskiwane rezultaty analizy układu, natomiast przyjmując dalsze uproszczenia prowadzi się do ograniczenia dokładności prowadzonych badań i do braku możliwości określenia wpływu wszystkich parametrów układu na jego charakterystyki.

### 3. Uwagi krytyczne

W odniesieniu do opiniowanej pracy przedstawiam trzy zasadnicze uwagi krytyczne.

- Pomimo dostępnej Doktorantowi znakomitej bazy laboratoryjnej w Instytucie Automatykacji Procesów Technologicznych i Zintegrowanych Systemów Wytwarzania, a także w innych Jednostkach Wydziału, nie zdecydował się On na jakąkolwiek weryfikację doświadczalną wyników swoich badań teoretycznych. Weryfikacja doświadczalna jest nieodzownym elementem oceny poprawności, skuteczności i przydatności metod, wynikających z rozważań teoretycznych, w tym w szczególności z modelowania matematycznego. Uzupełnienie pracy o taki element w mojej ocenie znacząco podniosłoby jej wartość naukową, poznawczą i użyteczną.

- Doktorant słabo wyeksponował ewentualne praktyczne efekty swoich badań, nie przedstawiając rzeczywistych modeli układów technicznych, oraz ich modeli fenomenologicznych, które w efekcie mogłyby być sprowadzane do rozważanych przez Doktoranta modeli belki z przetwornikiem piezoelektrycznym.

- Mało przekonujące jest założenie Autora, że rozważane przez Niego modele są układami mechatronicznymi. Znane i przyjęte współcześnie definicje mechatroniki wyraźnie wskazują obszary nauki, technologii i metodyki projektowania, które decydują o zakwalifikowaniu układu, jako układu mechatronicznego. Oczekuję podczas publicznej obrony wykazania przez Doktoranta, że temat Jego rozprawy jest w zgodzie z tymi definicjami.



#### 4. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że Doktoranta udowodnił, że potrafi planować i prowadzić teoretyczne badania naukowe, z zastosowaniem metod analitycznych i numerycznych. Wyprowadzone przez Doktoranta zależności analityczne wnoszą wkład w rozwój metod opisu i badania drgań układów mechaniczno - piezoelektrycznych, znajdujących współcześnie coraz częstsze zastosowanie w budowie i eksploatacji maszyn.

Biorąc pod uwagę uzyskane efekty recenzowanej pracy doktorskiej mgr. inż. Marka Płaczka pt.: „Modelowanie i badanie jednowymiarowych, drgających układów mechatronicznych” stwierdzam, że opiniowana praca może być podstawą nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych, zgodnie z ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003r., Dz.U. Nr 65, poz. 595 i wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.

