

Katowice, 04.04.2016r.

Dr hab. inż. Rafał Burdzik, prof. nzw. w Pol. Śl.

Katedra Budowy Pojazdów Samochodowych

Wydział Transportu

Politechnika Śląska

40-019 Katowice

Ul. Krasińskiego 8

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr. inż. Bogumiła Chilińskiego

pt.

„Sprzężenia drgań giętnych i skrętnych w dyskretnych układach wirujących o nieliniowych charakterystykach”

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo nr SIMR-29/ 4 /2016 z dnia 22.03.2016 r. Dziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych, Politechniki Warszawskiej prof. dr. hab. inż. Stanisława Radkowskiego.

1. Ocena aktualności tematu rozprawy oraz poprawności sformułowanych celu i tezy

Przedstawiona do oceny rozprawa dotyczy badań sprzężenia drgań giętnych i skrętnych w dyskretnych układach wirujących oraz wpływu tego zjawiska na prędkości krytyczne wirnika. Interakcja pomiędzy drganiami poprzecznymi i kątowymi jest istotnym zjawiskiem dla dynamiki wirników charakteryzujących się niewyrównoważeniem. Nieodłączną cechą rzeczywistych układów wirnikowych jest występowanie zaburzenia momentu obrotowego lub samego ruchu obrotowego. Pominięcie zjawiska sprzężenia drgań giętnych i skrętnych w modelu może być przyczyną poważnych konsekwencji, np. w postaci niepoprawnego określenia zbioru prędkości krytycznych. **Tematyka oraz zakres rozprawy pozwala zakwalifikować ją do dyscypliny Mechanika.**

Maszyny wirnikowe są powszechnie stosowane w licznych obszarach techniki. Ich popularność wynika z faktu, iż często stanowią jedyne mechanizmy umożliwiające przeniesienie lub przetworzenie energii. Niestety oprócz szeregu zalet maszyny wirnikowe mają także pewne wady, związane głównie z trudnościami eksploatacyjnymi wynikającymi z występującymi w wirnikach prędkościami krytycznymi. W ich otoczeniu praca wirnika jest szczególnie niebezpieczna, a w wielu przypadkach może doprowadzić do uszkodzeniem całego zespołu. Spowodowane jest to gwałtownym narastaniem amplitudy drgań w trakcie pracy z prędkościami zbliżonymi do krytycznych. Nieliniowości występujące w układach wirnikowych mogą te zjawiska dodatkowo wzmocnić lub nawet spowodować powstanie nowych stref rezonansowych. Jednym z bardziej istotnych w tym aspekcie jest zjawisko giętno-skrętnego sprzężenia drgań, którego źródłem może być niewyważenie statyczne, jako przykład nieliniowości występującej w układzie wirnikowym, prowadzącym do zmiany charakterystyki drganiowej całego układu. Najczęściej stosowane podejście rozwiązywania tego typu zagadnień bazuje na metodach numerycznych.

Dlatego z przyczyn poznawczych celowa wydaje się identyfikacja mechanizmu powstawania sprzężonych drgań giętno-skrętnych. Zastosowanie metod i rozwiązań analitycznych, wykorzystujących metody teorii układów dynamicznych, zwiększa uniwersalność uzyskanych modeli w formie jawnej zależności.

Autor rozprawy postanowił przeprowadzić modelową oraz doświadczalną analizę takich układów z wykorzystaniem metod analitycznych. Ponadto na podstawie sformułowanych wniosków zaproponował algorytm projektowania rzeczywistych układów wirnikowych. **W tym kontekście temat rozprawy należy uznać za aktualny, interesujący poznawczo i o dużym znaczeniu utylitarnym.**

Autor sformułował tezę rozprawy, jako:
„Istnieje możliwość wykorzystania analitycznych przybliżonych rozwiązań modelu matematycznego wiotkiego wirnika, uwzględniającego nieliniowe sprzężenie pomiędzy drganiami skrętnymi i giętnymi, do procesu identyfikacji modelu dynamicznego, badań doświadczalnych oraz budowy algorytmu projektowania

rzeczywistych układów wirujących, w których zjawiska związane z występowaniem wpływu drgań skrętnych na stany krytyczne są istotne.”

Dla udowodnienia postawionej tezy określono następujące cele:

1. Rozwiązanie wyznaczonego układu równań opisujących układ dynamiczny, jakim jest rozpatrywany wirnik.
2. Analiza i dyskusja rozwiązań uzyskanych metodami analitycznymi. Wykorzystanie narzędzi matematycznych do analizy otrzymanych wyników.
3. Wstępna weryfikacja otrzymanych zależności z wykorzystaniem metod numerycznych.
4. Zaprojektowanie i skonstruowanie stanowiska doświadczalnego, adekwatnego do rozpatrywanego modelu.
5. Weryfikacja obliczeń teoretycznych z wykorzystaniem eksperymentu badawczego.
6. Pomyślne przeprowadzenie procesu identyfikacji parametrycznej modelu dynamicznego badanego wirnika.

Uważam, że teza pracy została sformułowana prawidłowo i ma charakter twórczy. Ponadto jednoznacznie określa kierunek badań i pozwala opracować ich plan. Pewne wątpliwości może wykazywać liczba i poziom szczegółowości określonych celów. W przedstawionym ujęciu mają one raczej charakter etapów pracy (na co zresztą wskazuje uwaga w nawiasie, str. 54). Na przyszłość proponowałbym rozróżniać etapy od celów i starać się opracować jeden cel główny, wiodący.

2. Struktura i charakterystyka rozprawy

Treść opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bogumiła Chilińskiego zawiera się na 151 stronach, podzielonych na 6 rozdziałów i 4 załączniki. Ponadto zamieszczono streszczenia w języku polskim i angielskim oraz spis literatury, składający się z 128 pozycji (w tym 3 własne pozycje samodzielne i 8 pozycji współautorskich).

Autor w pierwszym rozdziale szczegółowo przedstawił problem prędkości krytycznych w układach wirujących oraz giętno-skrętnego sprzężenia drgań. Zaprezentowano tu stosowany w pracy model dynamiczny wirnika. Ponadto wykorzystując metody przybliżone oraz zaproponowany model, wskazano na nieunikniony wpływ nieliniowości oraz sprzężenia drgań na dynamikę całego wirnika. Dodatkowo przedstawiono wyniki badań pilotażowych, zrealizowanych na stanowisku laboratoryjnym z wirnikiem zamkniętym w obudowie. Przedstawione widma amplitudowe przemieszczeń drgań potwierdzają występowanie znacznie większej liczby składowych częstotliwościowych niż wynika to z zależności przedstawionych we wcześniejszej części tego rozdziału. Ponadto Autor wskazał konieczność podjęcia badań teoretycznych i doświadczalnych nad zjawiskiem giętno-skrętnego sprzężenia drgań. Rozdział ten kończy się na 43 stronie.

Rozdział drugi zawiera tezę rozprawy. Przed jej sformułowaniem Autor wyciągnął szereg wniosków z przedstawionych we wstępie badań pilotażowych oraz przeprowadził dokładną analizę dotychczasowego stanu wiedzy na temat drgań układów wirnikowych, a w szczególności na temat sprzężenia giętno-skrętnego. Całość analizy stanowi uzasadnienie dla podjęcia tematyki rozprawy. Rozdział ten kończy się na 55 stronie.

Trzeci rozdział przedstawia obszerną analizę proponowanego dyskretnego modelu dynamicznego wirnika. Przedstawione zostały zastosowane uproszczenia modelowe, dyskusja poprawności ich zastosowania oraz wybrane metody rozwiązywania nieliniowych układów równań różniczkowych. Wykorzystując perturbacyjną metodę Kryłowa-Bogolubowa Autor przedstawił rozwiązanie analizowanego układu równań wraz z analizą otrzymanych wyników. Integralną część tego rozdziału stanowi załącznik II, w którym Autor przedstawił pełne rozwiązanie analityczne metodą Kryłowa-Bogolubowa. Rozdział ten kończy się na 70 stronie.

W rozdziale czwartym przedstawiono wstępną weryfikację otrzymanych wyników z wykorzystaniem symulacji numerycznych. Opisano zastosowane oprogramowanie (GNU Octave) oraz wykorzystane do analiz schematy całkowania. Ponadto omówiono przekształcenia rozpatrywanych równań ruchu niezbędne do

przeprowadzenia symulacji z wykorzystaniem metod numerycznych. Na podstawie otrzymanych wyników określono widma przemieszczeń drgań dla różnych przypadków analizy oraz porównano rezultaty z rozwiązaniami znalezionymi z wykorzystaniem metod analitycznych. Rozdział ten kończy się na 83 stronie.

Rozdział piąty zawiera opis czynnego eksperymentu laboratoryjnego. Przedstawiono założenia przyjęte podczas projektowania stanowiska badawczego i wykonane stanowisko, umożliwiające zrealizowanie eksperymentu umożliwiającego analizę dynamiki rozważanego modelu. Eksperyment badawczy przeprowadzono dla różnych wartości fluktuacji momentu. Na podkreślenie zasługuje także ocena wpływu zastosowanego toru pomiarowego na otrzymywane wyniki. Dalszą analizę wyników Autor również przeprowadził w dziedzinie częstotliwości, co umożliwia ocenę jakościową zgodności uzyskanych wyników eksperymentalnych z rezultatami rozwiązań analitycznych oraz symulacji numerycznych. W efekcie Autor udowadnia poprawność identyfikacji parametrycznej modelu dynamicznego. Dodatkowo Autor przedstawia propozycję wykorzystania wyników w projektowaniu rzeczywistych układów wirnikowych w postaci algorytmu. **Należy więc stwierdzić, że Autor zweryfikował w sposób doświadczalny postawioną w rozprawie tezę.** Integralną część tego rozdziału stanowią załączniki III i IV, w których Autor zamieścił odpowiednio dokumentację techniczną stanowiska badawczego oraz przedstawił zestawienie wyników badań doświadczalnych. Rozdział ten kończy się na 99 stronie.

Rozdział szósty to podsumowanie rozprawy. Autor zdecydował się na podsumowanie w formie skrótowego omówienia kolejnych rozdziałów rozprawy. Całość rozprawy została odniesiona do postawionej tezy wraz z oceną zrealizowania postawionych celów. Zalecam na przyszłość podjęcie próby sformułowania wniosków końcowych, które jednoznacznie podkreślają osiągnięcia pracy, umożliwiając pozycjonowanie uzyskanych wyników do aktualnego stanu wiedzy oraz mogą wskazywać kierunki dalszych badań. Rozdział ten kończy się na 103 stronie.

Ostatni numerowany rozdział rozprawy to bibliografia. Należy wskazać na rozległy i aktualny przegląd literatury. Spis literatury kończy się na 114 stronie.

3. Ocena rozprawy

Merytoryczna ocena opiniowanej rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bogumiła Chilińskiego jest bardzo dobra. Podjęta tematyka jest ważna i ma charakter interdyscyplinarny. Pod względem rozważań teoretycznych wnosi wkład w dyscyplinę mechanika, zaś jej użytkarny charakter może znaleźć zainteresowanie w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. W dobie „nadmiernego” wykorzystywania programów numerycznych, nie tylko do celów inżynierskich ale także naukowych o charakterze poznawczym, podejście analityczne poparte identyfikacją na podstawie badań obiektu rzeczywistego stanowi dużą wartość opiniowanej rozprawy. Częstokroć użytkownicy programów numerycznych, korzystają z nich bez znajomości „solvera” całkowicie ufając wiedzy, umiejętnością i koncepcji autorów. Takie podejście umożliwia poddawanie w wątpliwość uzyskane wyniki i co ważniejsze sformułowane na ich podstawie wnioski. Dlatego jawna postać analityczna zależności dynamicznych, nawet uproszczonych, stanowi mocny fundament w dyskursie naukowym.

Autor rozprawy wykazał słuszność postawionej tezy i zaproponował model dynamiczny oraz rozwiązał go na drodze analitycznej. Otrzymane wyniki wykorzystał do zaplanowania eksperymentu, na podstawie którego zweryfikował swoje rozważania. Ponadto na podstawie badań pomyślnie przeprowadził identyfikację rozpatrywanego w rozprawie modelu dynamicznego. Efektem końcowym jest algorytm projektowanie rzeczywistych układów wirnikowych. Tym samym należy uznać, że cel rozprawy został zrealizowany.

Autor nie ustrzegł się błędów, jednak zdecydowana większość z nich, którą wskazałem w recenzowanym egzemplarzu, została poprawiona i w książkowej wersji rozprawy nie występuje. Błędy te jednak nie wpływają na moją wysoką ocenę opiniowanej rozprawy doktorskiej.

Dlatego też moja ocena całości rozprawy doktorskiej jest jednoznacznie pozytywna.

4. Uwagi i zapytania

Staranna lektura rozprawy prowadzi do następujących uwag i pytań:

1. Autor prowadzi obszerne analityczne obliczenia pierwszego przybliżenia w metodzie Kryłowa-Bogolubowa, później natomiast wykorzystuje oprogramowanie do obliczeń symbolicznych. Czy nie byłoby lepiej w całości obliczeń zastosować jedną technikę?
2. Prowadzone w pracy rozważania bazują na bardzo prostym modelu. Czy jest możliwe zastosowanie takiego modelu do analizy złożonych układów wirnikowych np. takich jakie zostały przedstawione we wstępie pracy. Jeśli tak, to w jaki sposób?
3. Autor przedstawia charakter pracy typowej maszyny wirnikowej, koncentrując się głównie na jej ruchu ustalonym (dot. str. 21). Natomiast na eksploatację takiej maszyny bardzo duży wpływ mają stany przejściowe. W związku z tym wydaje się celowe uwzględnienie tego zjawiska w przeprowadzonych rozważaniach.
4. Numeryczne rozwiązywanie równań różniczkowych nie jest zagadnieniem łatwym ze względu na brak jednoznacznej metodyki w doborze metod oraz parametrów prowadzonych analiz. W wielu przypadkach umiejętne zastosowanie konkretnego schematu całkowania znacznie skraca czas rozwiązywania lub poprawia precyzję. W związku z tym, próba zastosowania dwóch metod numerycznego rozwiązywania analizowanego zagadnienia jest w pełni uzasadniona. Niemniej jednak wątpliwości budzi samo porównanie otrzymanych wyników, ponieważ obie metody zostały sprawdzone dla różnych zestawów danych (dot. str. 77-79).

Drobne uwagi redakcyjne zaznaczyłem na otrzymanym egzemplarzu i nie mają one istotnego znaczenia dla wartości merytorycznej pracy.

5. Konkluzja

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Bogumiła Chilińskiego wyróżnia się pod względami jakości prowadzonych rozważań analitycznych oraz weryfikacji na drodze symulacji numerycznych i badań eksperymentalnych na obiekcie rzeczywistym. Na podkreślenie zasługuje także poprawność zaplanowanego

i wykonanego eksperymentu badawczego, z zachowaniem staranności pomiarowej. Realizacja określonych etapów pracy (str. 54) oraz uzyskane wyniki potwierdzają poprawność przyjętej metodyki postępowania zmierzającej do udowodnienia sformułowanej tezy. Pozwala to na wnioskowanie o umiejętności i dojrzałości mgr. inż. Bogumiła Chilińskiego w prowadzeniu badań naukowych oraz rzetelnym opanowaniu „warsztatu badawczego”. Dodatkowo należy podkreślić użyteczny charakter dysertacji co umożliwia ekstrakcję jej rezultatów do wielu obszarów inżynierskich, szczególnie w zakresie budowy i diagnostyki maszyn.

Przedstawione uwagi nie mają większego wpływu na fakt samodzielnego zrealizowania przez Autora zadania naukowo-badawczego. Do rozwiązania zagadnienia Doktorant wykazał się wiedzą z metodyki rozwiązywania nieliniowych równań różniczkowych, wykorzystał poprawnie dobrane metody badawcze wykazując się umiejętnością prowadzenia eksperymentu oraz skutecznie przeprowadził identyfikację modelu dynamicznego.

Uważam, że opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Bogumiła Chilińskiego pt. „Sprzężenia drgań giętnych i skrętnych w dyskretnych układach wirujących o nieliniowych charakterystykach” spełnia wymogi określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki. Może zatem służyć jako podstawa do rozpatrzenia wniosku o nadanie Kandydatowi stopnia doktora nauk technicznych. W związku z powyższym stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. inż. Bogumiła Chilińskiego do publicznej obrony opiniowanej rozprawy jako dzieła w zakresie dyscypliny Mechanika.

Jednocześnie z uwagi na moją wysoką ocenę rozprawy, jej nowatorski charakter i użyteczne znaczenie oraz dojrzałość i rzetelność badawczą Kandydata, zwracam się do Rady Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej o rozpatrzenie możliwości wyróżnienia przedmiotowej pracy.

Rafał Bwoźlik