Łódź, 31/03/2016 r.

Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kozanecki
POLITECHNIKA ŁÓDZKA
Instytut Maszyn Przepływowych
93-005 Łódź
ul. Wólczańska 219/223
tel. (42) 631 23 61 fax. (42) 636 13 83
e-mail: *zbigniew.kozanecki@p.lodz.pl*

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bogumiła Chilińskiego pt:

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

opracowana na podstawie uchwały Rady Wydziału SiMR Politechniki Warszawskiej z dnia 24.02 2016 r.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska, poświęcona jest badaniom obejmującym interakcje pomiędzy drganiami giętnymi i skrętnymi zespołów wirujących maszyn. Rozwijane przez Doktoranta zagadnienie jest aktualne i istotne ze względów poznawczych i aplikacyjnych w praktyce inżynierskiej. Tematyka rozprawy pozwala zakwalifikować ją do dyscypliny Mechanika.

Praca obejmuje 151 stron tekstu i jest podzielona na 7 rozdziałów a w części końcowej zawiera 4 obszerne załączniki prezentujące szczegółowe rozważania związane z analizą teoretyczną oraz wynikami badań eksperymentalnych zrealizowanych przez Autora.

W obszernej części wstępnej, po wprowadzeniu czytelnika w tematykę rozprawy, Autor dokonuje syntetycznego przeglądu literatury problemu, prezentuje aktualny stan wiedzy i na tej podstawie charakteryzuje szczegółowo jej cele oraz zakres. W tej części pracy wykorzystuje również wyniki pilotażowych badań eksperymentalnych dla udokumentowania swoich wstępnych wniosków i spostrzeżeń obejmujących przede wszystkim próbę wyszczególnienia czynników, które mogą być źródłem sprzężeń rozważanych postaci drgań zespołów wirujących maszyn. Próbując na drodze analitycznej i eksperymentalnej zidentyfikować różne źródła sprzężeń w systemach wirujących maszyn, Autor (moim zdaniem bardzo trafnie) zauważa, że nawet bardzo słabe mechanizmy sprzężeń istniejące w układach wirujących maszyn

mogą wyraźnie wpływać na zachowanie dynamiczne systemu wirującego w stanach krytycznych lub w ich bezpośrednim sąsiedztwie.

Obszerna i interesująca część wstępna recenzowanej rozprawy skutkuje pojawieniem się dopiero w połowie jej treści tezy pracy mówiącej, że : *„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".*

Kolejne etapy pracy są ściśle podporządkowane próbie udowodnienia tej tezy i obejmują rozbudowaną analizę teoretyczną przyjętego modelu matematycznego z wykorzystaniem metod analitycznych (rozdział 3) oraz jego rozwiązanie numeryczne (rozdział 4) dla dwóch różnych schematów całkowania równań różniczkowych (jednokrokowy schemat Runge-Kutty rzędu czwartego oraz trzykrokowy schemat Adamsa). Umożliwiło to jakościowe porównanie rozwiązań uzyskanych w sposób analityczny z wynikami uzyskanymi na drodze obliczeń numerycznych. Ten, ważny dla udowodnienia postawionej tezy, etap pracy wykazuje jakościową zgodność struktury widma sygnałów odpowiedzi (rozwiązań w postaci funkcji czasu) analizowanego modelu dla obu sposobów uzyskiwania wyników. Szkoda tylko, że prezentowane przypadki porównania wyników uzyskanych na drodze analitycznej i numerycznej nie dotyczą zawsze tych samych częstości wymuszenia i zaburzenia oraz, że w zbiorze wyników uzyskanych na drodze analitycznej wyniki (widma) prezentowane na rys. 21 są powtórzone na rys. 23.

Ciekawym elementem zaproponowanych przez Autora badań, jest podjęta próba poszukiwania przybliżonych analitycznych rozwiązań zagadnienia związanego z dynamiką wiotkiego rotora w obecności mechanizmów umożliwiających sprzęganie się drgań skrętnych i giętnych. Uzyskanie poprawnych rozwiązań analitycznych przy tak sformułowanym zagadnieniu, nawet dla relatywnie prostego modelu fizycznego analizowanego w pracy jest zagadnieniem złożonym i pracochłonnym. Jednak pozwala to na wyodrębnienie zjawisk i zależności trudnych lub niemożliwych do identyfikacji w przypadku ograniczenia analiz do poszczególnych składników systemu wirującego maszyny.

Dlatego uważam, że sformułowany cel przeprowadzonych w rozprawie analiz, jak również ich zakres jest interesujący i oryginalny pod względem poznawczym i odpowiada poziomowi pracy doktorskiej w dyscyplinie Mechanika.

W rozdziale 5 Autor prezentuje zbudowane stanowisko badawcze oraz wybrane wyniki badań eksperymentalnych. Jak w większości przypadków związanych z badaniami eksperymentalnymi systemów wirujących maszyn, z uwagi na dostępną infrastrukturę i sprzęt pomiarowy oraz konieczność zastosowania rozwiązań technicznych i elementów nie uwzględnionych w modelu (podatne sprzęgła, laserowe czujniki pomiarowe mierzące drgania poprzeczne osadzonej mimośrodowo na wale tarczy w sposób pośredni) powodują, że bezpośrednie porównanie wyników pomiaru z obliczeniami modelowymi jest niemożliwe. Dlatego Autor wykorzystuje do tego celu analizę struktury widma wyników obliczeń modelowych i proponuje dwuetapowy proces identyfikacji parametrycznej rozważanego modelu dynamicznego. Wyniki tej identyfikacji (rys. 34) pozwoliły Autorowi na sformułowanie wniosku, że rozważany model jest identyfikowalny z badanym obiektem rzeczywistym, co pozwala na zaproponowanie uogólnionego algorytmu metody projektowania układów wirujących maszyn.

Lektura całości pracy skłania do sformułowania kilku uwag krytycznych i wymaga pewnych wyjaśnień związanych z przeprowadzonymi rozważaniami.

1. Wirujący wał podparty w łożyskach jest nieodłącznym elementem struktury większości maszyn i w konsekwencji stanowi najbardziej powszechne rozwiązanie techniczne związane z przekazywaniem energii mechanicznej. W części wstępnej rozprawy przedstawiono przykłady struktur wirujących różnych maszyn (rysunki 2 ÷ 5) stanowiących w każdym przypadku ważny składnik szerszego pojęcia jakim jest system wirujący maszyny, w skład którego wchodzą np. media robocze maszyny wirujące wraz ze strukturą wirnika w kanałach międzyłopatkowych czy też podatny i wirujący film olejowy łożysk ślizgowych. O dynamice systemu wirującego niektórych grup maszyn (szczególnie maszyn przepływowych) decydują czasem czynniki nie uwzględnione w relatywnie prostym modelu wiotkiego, symetrycznie podpartego w sztywnych podporach wału z zamontowaną sztywną tarczą. Dlatego, pomimo ważnych osiągnięć pracy, zamieszczona w końcowej części pracy propozycja, jak rozumiem uniwersalnego

inżynierskiego algorytmu służącego *„do budowy rzeczywistych układów wirnikowych”* jest chyba zbyt daleko idącym uogólnieniem.

2. Biegłość Autora rozprawy w operowaniu narzędziami analizy teoretycznej oraz umiejętność wyciągania uogólnionych wniosków z przeprowadzonych rozważań jest jego dużym atutem, jednak czasami prowadzi to do sytuacji trudnych do interpretacji dla czytelnika rozprawy. Proszę o szersze wyjaśnienie w jaki sposób Autor wyobraża sobie praktyczną realizację pomysłu zawartego w stwierdzeniu stanowiącym przedostatnie zdanie rozprawy; *„...występujące w układach wirnikowych sprzężenie giętno-skrętne umożliwia sterowanie drganiami poprzecznymi za pomocą drgań skrętnych i odwrotnie”.*

Ocena merytoryczna pracy i wnioski:

Przedstawiona do recenzji praca doktorska dotyczy istotnego problemu badawczego związanego ze wzbudzaniem i sprzęganiem się drgań giętnych i skrętnych wiotkich rotorów maszyn. Autor, posługując się głównie metodami analitycznymi, podjął próbę znalezienia i identyfikacji czynników, które dla relatywnie prostego symetrycznego układu wiotkiego wału mogą być powodem istnienia sprzężeń giętno-skrętnych. Pomimo ograniczeń związanych z narzuconymi sobie i zastosowanymi narzędziami badawczymi (metody analityczne i próba znalezienia przybliżonych rozwiązań analizowanego układu równań ruchu z uwzględnieniem zburzeń momentu obrotowego) oraz przyjętymi założeniami, uzyskano wyniki, które mają wartość poznawczą i utylitarną.

Do najważniejszych osiągnięć pracy zaliczam:

- Jednoznaczne wykazanie na podstawie przeprowadzonych analiz, że zaburzenia momentu obrotowego mogą mieć istotny wpływ na dynamikę wiotkiej struktury wirującej maszyny, zwłaszcza w stanach krytycznych pracy, w przypadku istnienia nawet słabego sprzężenia giętno-skrętnego.
- Wykazanie, że nawet w obecnej dobie powszechnego stosowania w obliczeniach inżynierskich analiz MES, istnieje możliwość wykorzystania analitycznych przybliżonych rozwiązań modelu matematycznego wiotkiego wirującego wału do wstępnej oceny poprawności projektu dynamicznego maszyny.

Rozprawa napisana jest poprawnym językiem i charakteryzuje się przejrzystym układem a jej podział wprowadza czytelnika w logiczny sposób w szereg założeń i problemów niezbędnych dla wyjaśnienia złożoności poruszanych zagadnień i udokumentowania sformułowanych wniosków.

Dobrym pomysłem, ułatwiającym jej czytelność, było przesunięcie do załączników szczegółowych opisów związanych z przekształceniami analizowanych równań ruchu i ich rozwiązań oraz elementów dokumentacji technicznej stanowiska badawczego i wyników dotyczących przeprowadzonych badań eksperymentalnych.

Autor bardzo dobrze opanował zagadnienia związane z modelowaniem matematycznym wirujących struktur maszyn z wykorzystaniem metod analitycznych. Ponadto wykazał się umiejętnością interpretacji osiągniętych wyników, a zamieszczone w recenzji uwagi krytyczne nie podważają osiągnięć pracy.

Pod względem merytorycznym oceniam pracę bardzo dobrze i stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Bogumiła Chilińskiego spełnia wymagania obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym oraz stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Jednocześnie chciałbym zasygnalizować, że w przypadku pozytywnego przebiegu publicznej obrony i uzyskania wyczerpujących wyjaśnień związanych z uwagami krytycznymi, rozważam postawienie wniosku o wyróżnienie pracy.