

Łódź, 30 listopada 2020 r.

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

Recenzja pracy doktorskiej mgr. inż. Pawła Troki pt:
**„Analiza numeryczna drgań łopatek wirnikowych turbin parowych metodą
„Tip-Timing”**

opracowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych
PAN z dnia 13 października 2020.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska dotyczy rozwoju koncepcji bezinwazyjnej oceny stanu dynamicznego łopatkowych wieńców osiowych maszyn przepływowych, szczególnie łopatek turbin gazowych i parowych, w trakcie funkcjonowania.

Rozwijane przez Doktoranta zagadnienie jest aktualne i istotne ze względów poznawczych i aplikacyjnych w praktyce inżynierskiej. Stanowi ono od wielu lat przedmiot zainteresowania zespołu badawczego pracującego w IMP PAN pod kierunkiem promotora rozprawy prof. Romualda Rządkowskiego.

W części wstępnej pracy (rozdziały 1, 2 oraz 3) Doktorant charakteryzuje stan wiedzy i historię rozwoju metod pomiaru drgań wirujących łopatek znaną w literaturze pod ogólną nazwą „*blade tip-timing*”. Te metody, wykorzystywane w badaniach eksperymentalnych i w diagnostyce układów łopatkowych maszyn przepływowych, charakteryzują się złożoną obróbką sygnałów pomiarowych rejestrowanych bezkontaktowymi czujnikami (najczęściej indukcyjnymi) rozmieszczonymi w korpusie maszyny i rejestrującymi moment „pojawienia” się wierzchołka pióra każdej kolejnej łopatki badanego wieńca w strefie pomiarowej przed czołem czujnika.

Złożonej i trudnej problematyce obróbki i interpretacji sygnałów pomiarowych rejestrowanych trakcie badań wirujących wieńców łopatkowych maszyn przepływowych metodami „*blade tip-timing*” poświęcona jest rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Troki.

Tematyka rozprawy pozwala zakwalifikować ją do dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, a jej podstawowym celem jest udoskonalenie istniejących procedur i programów służących wiarygodnej interpretacji sygnałów pomiarowych rejestrowanych w różnych konfiguracjach pomiarowych stosowanych w metodzie diagnostycznej oceny stanu dynamicznego wirujących wieńców łopatkowych „*blade tip-timing*”.

Wiarygodna ocena stanu dynamicznych wirujących łopatek osiowej maszyny przepływowej w trakcie jej funkcjonowania, a w szczególności możliwość wykrywania uszkodzeń wirujących elementów wchodzących w skład tej struktury ma duże znaczenie poznawcze i utylitarne związane z bezpieczeństwem eksploatacyjnym.

Dlatego uważam, że wybór tematu oraz sformułowany cel rozprawy jest oryginalny pod względem poznawczym i odpowiada poziomowi pracy doktorskiej w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

Założenia i szczegółowe cele pracy sformułowane przez Autora dotyczą opracowania i weryfikacji zestawu własnych autorskich algorytmów i programów do analizy drgań łopatek wirującego wieńca maszyny w różnych konfiguracjach pomiarowych. Konfiguracje te obejmują:

- A. Opracowanie algorytmu i programu numerycznego do analizy i interpretacji wyników drgań łopatek wirnikowych na bazie sygnału czasu przyjscia łopatek dla przypadku kilku czujników umieszczonych na obwodzie wieńca i uwzględnieniu aproksymacji prędkości obrotowej wału z wykorzystaniem czujnika raz na obrót nieliniową metodą sumy najmniejszych kwadratów.
- B. Porównanie wyników analizy i interpretacji wyników pomiarów uzyskanych na zbudowanym stanowisku badawczym i opracowanych autorskimi algorytmami z rzeczywistymi zadanymi w czasie eksperymentu na stanowisku parametrami drgań wirujących łopatek.

Realizacja tych celów pracy stanowi przykład klasycznego podejścia do badań naukowych opartego na weryfikacji postawionej hipotezy badawczej eksperymentem. Jednak w tym przypadku dodatkowo pozwoliła ona Doktorantowi na opracowanie wiarygodnej procedury pozwalającej na symulację sygnału pomiarowego dla założonego stanu dynamicznego wieńca łopatkowego. Symulator ten, pozwalając na wygenerowanie teoretycznego (symulowanego) sygnału odpowiadającego założonemu stanowi dynamicznemu wieńca stanowi cenne narzędzie umożliwiające weryfikowanie poprawności ciągle rozwijanych procedur i programów służących

analizie i interpretacji wyników pochodzących z sygnału czasu przejścia wierzchołków łopatek wirującego wieńca w metodzie „*blade tip-timing*”.

W następnych etapach pracy Doktorant zrealizował kolejne cele, które obejmują:

- C. Porównanie wyników analizy i interpretacji „surowych” pomiarów pochodzących z zaczerpniętych wyników badań eksperymentalnych drgań łopatek wirnikowych sprężarki osiowej silnika lotniczego SO-3 i wysokich łopatek ostatniego stopnia parowej turbiny kondensacyjnej 380 MW opracowanych własnymi autorskimi programami z wynikami analiz otrzymanych z wykorzystaniem innych programów opisanych w literaturze przedmiotu.
- D. Analiza dynamiczna łopatek wirnikowych ostatniego stopnia kondensacyjnej turbiny parowej dla zmiennego ciśnienia w skraplaczu dla różnych zakresów mocy turbiny.

Przyjęta, interesująca metodyka realizacji celów pracy, polegająca na opracowaniu szeregu procedur (programów) służących obróbce i interpretacji rejestrowanych w trakcie badań, wyników dla różnych konfiguracji układu pomiarowego i porównaniu osiągniętych wyników z wynikami badań zaczerpniętymi z literatury pozwoliła pozytywnie zweryfikować własne koncepcje Doktoranta. Z drugiej strony opracowanie nowych procedur pozwalających na teoretyczną symulację sygnału pomiarowego dla określonego (założonego) stanu dynamicznego wieńca łopatkowego i wygenerowanie teoretycznego (symulowanego) sygnału odpowiadającego założonemu stanowi dynamicznemu wieńca jest dużym osiągnięciem pracy. Pozwala to powstanie narzędzia diagnostycznego, które może stanowić cenny wkład w rozwój metod diagnozowania nazywanych „*blade tip-timing*”. Wyniki uzyskane z teoretycznych symulacji symptomów pomiarowych dla założonych stanów dynamicznych (np. inicjalizacja pęknięcia łopatki wirującego wieńca i jego propagacja) mogą zostać wykorzystane jako bazowe relacje diagnostyczne typu **wada-symptom** w procesie diagnozowania rzeczywistych uszkodzeń maszyn przepływowych.

Ocena formalnej strony pracy:

Rozprawa, wraz z załącznikami, liczy 211 stron i jest podzielona jest na 12 rozdziałów a w części końcowej zawiera 8 załączników prezentujące szczegółowe wyniki badań w postaci tabel. Charakteryzuje się poprawnym układem, a jej podział w sposób logiczny wprowadza czytelnika w szereg problemów technicznych niezbędnych dla wyjaśnienia złożoności poruszanych zagadnień.

W części wstępnej, po wprowadzeniu czytelnika w tematykę rozprawy (rozdziały 1, 2 i 3 i 4), Autor dokonuje syntetycznego przeglądu literatury problemu, prezentuje aktualny stan wiedzy i na tej podstawie charakteryzuje szczegółowo cele oraz zakres prezentowanej pracy.

Rozdział 5 zawiera opis modeli matematycznych i algorytmów użytych w autorskich programach opracowanych w ramach pracy. Rozdział 6 zawiera weryfikację opracowanego przez Doktoranta programu obróbki i interpretacji danych pomiarowych z wykorzystaniem sygnalizowanego powyżej programu-symulatora umożliwiającego wygenerowanie teoretycznego sygnału odpowiadającego pewnemu, teoretycznie założonemu stanowi dynamicznemu wieńca łopatkowego. Ten zakończony pozytywnymi wynikami eksperyment numeryczny potwierdził poprawność opracowanego programu analizy i pozwolił na realizację następnych celów pracy.

W rozdziałach 7, 8 i 9 oraz 11 przedstawiono wyniki realizacji kolejnych celów pracy (C i D) dotyczących porównania wyników analizy i interpretacji „surowych” pomiarów pochodzących z rzeczywistych wyników badań eksperymentalnych drgań łopatek wirnikowych sprężarki osiowej silnika lotniczego SO-3 i wysokich łopatek ostatniego stopnia turbiny parowej turbozespołu 380 MW, opracowanych własnymi autorskimi programami z wynikami analiz otrzymanych z wykorzystaniem innych programów opisanych w literaturze przedmiotu.

Rozdział 10 dotyczy analizy własnych badań eksperymentalnych przeprowadzonych przez Doktoranta na zbudowanym w IMP PAN dedykowanym stanowisku badawczym, których celem była weryfikacja procedur pozwalających na teoretyczną symulację sygnału pomiarowego dla określonego (założonego) stanu dynamicznego wieńca łopatkowego i umożliwiające wygenerowanie teoretycznego (symulowanego) sygnału odpowiadającego temu założonemu stanowi dynamicznemu wieńca. W rozdziale 12 zamieszczono wnioski i propozycje dalszego ukierunkowania prac badawczych związanych z rozwojem metod „*blade tip-timing*”.

Należy jednak zauważyć, że publikacja interesujących merytorycznie wyników pracy wymagać będzie od Autora dokładnej korekty redakcyjnej tekstu i oraz części materiału ilustracyjnego.

Ocena merytoryczna pracy:

Przedstawiona do recenzji praca dotyczy bardzo istotnego i aktualnego problemu związanego z rozwojem metod badania dynamiki wieńców łopatkowych osiowych turbin i sprężarek w trakcie ich funkcjonowania. Uzyskane i zaprezentowane w pracy wyniki mają dużą wartość poznawczą i użyteczną oraz znacząco rozszerzają dotychczasowe możliwości badań diagnostycznych wirujących układów łopatkowych.

Za najbardziej istotne osiągnięcia Doktoranta uważam:

1. Opracowanie nowych wiarygodnych procedur programowych służących obróbce i interpretacji wyników pomiarów drgań łopatek wirnikowych na bazie sygnałów czasu przyścia łopatek, dla kilku czujników umieszczonych na obwodzie wirującego wieńca z uwzględnieniu aproksymacji prędkości obrotowej.
2. Opracowanie programowego symulatora pozwalającego na wygenerowanie teoretycznego (symulowanego) sygnału odpowiadającego założonemu stanowi dynamicznemu wirującego wieńca łopatkowego. Symulator ten stanowi cenne narzędzie umożliwiające weryfikowanie poprawności ciągle rozwijanych procedur i programów służących analizie i interpretacji wyników pochodzących z sygnału czasu przejścia wierzchołków łopatek wirującego wieńca rejestrowanych w metodzie „*blade tip-timing*”. Wyniki uzyskane z takich symulacji dla założonych teoretycznie uszkodzeń wieńca łopatkowego mogą zostać wykorzystane do zbudowania biblioteki bazowych relacji diagnostycznych typu *wada-symptom* w procesie diagnozowania stanu technicznego osiowych maszyn przepływowych.

Doktorant bardzo dobrze opanował zagadnienia związane z badaniami wirujących struktur łopatkowych maszyn przepływowych z wykorzystaniem metod obróbki szybkozmiennych sygnałów pomiarowych. Ponadto wykazał się umiejętnościami planowania i prowadzenia badań eksperymentalnych i budowania algorytmów nowoczesnych kodów obliczeniowych.

Mając na uwadze te ponadprzeciętne wyniki Doktoranta osiągnięte w trakcie realizacji rozprawy, stawiam wniosek o wyróżnienie recenzowanej pracy doktorskiej.

Wniosek końcowy

Pod względem merytorycznym oceniam pracę bardzo pozytywnie i stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Troki spełnia wymagania obowiązującej Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym oraz wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

