



Poznań 22.05.2023r.

dr hab. inż. Roman Barczewski  
Politechnika Poznańska  
Wydział Inżynierii Mechanicznej  
Instytut Mechaniki Stosowanej  
Zakład Wibroakustyki i Diagnostyki  
Systemów  
tel. + 48 66 52684  
e-mail: roman.barczewski@put.poznan.pl

### OPINIA PROMOTORA

dotycząca rozprawy doktorskiej mgr. inż. Bartosz Jakubka pt.

Metodyka testowania poprodukcyjnego łożysk stożkowych z zastosowaniem technik  
cyfrowego przetwarzania sygnałów wibroakustycznych

*Methodology of post-production testing of tapered roller bearings with the use of techniques  
of digital processing of vibroacoustic signals*

Rozprawa doktorska magistra inżyniera Bartosza Jakubka pt. „Metodyka testowania poprodukcyjnego łożysk stożkowych z zastosowaniem technik cyfrowego przetwarzania sygnałów wibroakustycznych” wpisuje się w obszar dyscypliny inżynierii mechanicznej, w szczególności w zakresie diagnostyki wibroakustycznej maszyn i urządzeń.

Niedopuszczenie do użytkowania łożysk wadliwych, w dużej mierze zapobiega awariom maszyn wirnikowych, w których łożyska są montowane. Prowadzone przez producentów testowanie i klasyfikacja łożysk na dobre i wadliwe w zdecydowanej większości przypadków oparte jest na rozwiązaniach z lat 40-tych ubiegłego wieku i stosowaniu pomiarów prędkości drgań w trzech pasmach częstotliwości. Takie podejście ogranicza możliwości prowadzenia rozszerzonej klasyfikacji łożysk i detekcji wad produkcyjnych. Przeprowadzone w ramach pracy testy porównawcze tych samych, nowych łożysk na urządzeniach stosowanych na liniach produkcyjnych (szumomierze) i urządzeniu referencyjnym wykazały, że rozbieżności w podstawowej klasyfikacji łożysk (dobry/wadliwy) sięgają 10%. Te przesłanki były motywacją do podjęcia tematyki badawczej, której celem był wieloaspektowy rozwój metodyki poprodukcyjnego testowania łożysk tocznych.

Doktorant na podstawie przeglądu literaturowego przeanalizował i określił potencjalne możliwości oraz ograniczenia adaptacji metod stosowanych w diagnostyce eksploatacyjnej łożysk tocznych do testowania poprodukcyjnego m.in. SPM, REBAM, TESPAP, Emisji

Akustycznej (EA), operatora energetycznego Teagera-Kaisera, kurtozy widmowej oraz zaprezentował nowe metody parametryzacji i analiz sygnałów wibroakustycznych, które pozwoliłyby polepszyć trafność klasyfikacji i dałyby potencjalną możliwość detekcji wad produkcyjnych.

W aspekcie nowych rozwiązań należy podkreślić współudział w opracowaniu i autorską implementację metody ISRB (*Impact in the Structure Resonance Bands*) do testowania łożysk, która w tym obszarze stanowi novum. Na uwagę zasługuje również podjęta próba oparcia klasyfikacji łożysk i określenia charakteru wad produkcyjnych na obrazowaniu wyników parametryzacji sygnałów wibroakustycznych na płaszczyźnie  $a_{RMS} - f_{Rice'a}$ , zarówno w ujęciu krótkoczasowym jak i wartości średnich.

Istotnym elementem pracy była adaptacja stanowiska badawczego do testowania łożysk stożkowych i konfiguracja torów do wielokanałowej synchronicznej akwizycji sygnałów wibroakustycznych (WA) w szerokim paśmie częstotliwości od kilkunastu Hz do MHz (drżania i hałas w paśmie słyszalnym, ultradźwiękowym i w paśmie emisji akustycznej). Natomiast kluczowym elementem pracy było opracowanie algorytmów cyfrowego przetwarzania sygnałów WA niezbędnych do przeprowadzenia parametryzacji i analiz sygnałów (za pomocą aplikacji w środowisku DASyLab) i pozyskania szerokiego spectrum miar i charakterystyk mogących potencjalnie znaleźć zastosowanie do testowania, oceny i klasyfikacji łożysk.

Obszerną część pracy stanowią badania eksperymentalne, których celem było określenie wpływu warunków i parametrów testowania na generowane przez łożyska sygnały wibroakustyczne (drżania, hałas, emisja akustyczna), które po parametryzacji zastosowano do oceny i klasyfikacji łożysk. Badania dotyczyły m.in. wpływu sposobu obciążenia łożysk, smarowania i jego wpływu na maskowanie wad produkcyjnych, weryfikacji i adjustacji pasm pomiarowych związanych ze zmianą prędkości obrotowej testowania, określenia fazy stabilizacji procesów wibroakustycznych i rozpoczęcia fazy wpływu zjawisk termalnych niezbędnych do określenia przedziałów czasowych prowadzenia parametryzacji sygnałów. W tej części pracy zarysowano możliwości implementacji metod redukcji zakłóceń takich jak: selekcja przestrzenna oraz dekompozycja sygnałów na składowe deterministyczne i sygnał rezydualny. Efektem tych działań było uzyskanie sygnałów diagnostycznych o małym wpływie zakłóceń lub o określonym i znanym wpływie parametrów i warunków prowadzenia testów.

Należy podkreślić, że badania eksperymentalne w Laboratorium Diagnostyki Systemów (LDS) PP, których celem było zarówno zdefiniowanie warunków i parametrów testowania oraz weryfikacja i walidacja nowych opracowanych metod parametryzacji i klasyfikacji łożysk stożkowych oraz utworzenie bazy sygnałowej i symptomowej, były prowadzone na dwóch unikalnych zestawach łożysk stożkowych. Pierwszy zestaw 50 nowych łożysk zawierał łożyska bez wad oraz z celowo wprowadzonymi wadami o znanych parametrach (tzw. eksperyment czynny). Drugi zestaw 80 łożysk dobrych i wadliwych Doktorant wyselekcjonował i pozyskał w ramach współpracy i stażu w PBF Kraśnik S.A. Łożyska te zostały sparametryzowane i sklasyfikowane w warunkach rzeczywistego testowania produkcyjnego i poddane ponownej

weryfikacji na laboratoryjnym urządzeniu referencyjnym. Dzięki takiemu podejściu uzyskane wyniki i wnioski płynące z badań prowadzonych w LDS PP mają bardzo wysokie walory poznawcze i użytkowe.

W wyniku testowania (parametryzacji i analiz) metodami cyfrowego przewarzenia sygnałów WA w LDS, dla każdego łożyska z ww. zestawu zostały wyznaczone wartości dla 282 różnych miar.

Zastosowana trzyetapowa redukcja rozmiaru zbioru miar (usuwanie redundancji m.in. na podstawie analizy korelacyjnej) umożliwiła wskazanie 8 miar o największym potencjale do prowadzenia testowania poprodukcyjnego i reklasyfikacji łożysk w oparciu o zobrazowanie wyników na płaszczyźnie  $a_{RMS} - f_{Rice'a}$ . Jako narzędzie weryfikacji doboru parametrów Doktorant zastosował do uzyskanego zbioru danych drzewo klasyfikacyjne i regresyjne CART, używane w uczeniu maszynowym do zadań klasyfikacji i regresji. Efektem implementacji CART było zarówno potwierdzenie trafności przeprowadzonej redukcji nadmiarowości zbioru, oraz potwierdzenie, że do testowania łożysk zasadne jest stosowanie miar opartych na parametryzacji przyspieszeń drgań zamiast stosowanych obecnie prędkości drgań. Najważniejszym w ujęciu użytkowym było wskazanie miary – średniej wartości szczytowej uzyskanej z krótkoczasowego przetwarzania sygnału przyspieszeń drgań w paśmie 1,5 kHz – 10 kHz na podstawie, której możliwa jest klasyfikacja łożysk z błędem 5%.

Podsumowując mogę stwierdzić, że mgr inż. Bartosz Jakubek, wykazał się ponadprzeciętnymi predyspozycjami do prowadzenia prac badawczych, dociekliwością i entuzjazmem w ich realizacji oraz wykazał się umiejętnością stosowania nowoczesnych metod badawczych i tworzenia nowych. Wyniki prac badawczych częściowo zostały opublikowane w czasopiśmie naukowych. Cele pracy zostały osiągnięte, a wyniki badań i wnioski z nich płynące mają bardzo duży potencjał poznawczy, aplikacyjny i wdrożeniowy oraz stanowią istotny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna w obszarze diagnostyki wibroakustycznej maszyn. Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i spełnia wszystkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim.

Roman Barczewski

