



## **Opinia o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Bartosza Jakubka**

**pt.**

### **„Metodyka testowania poprodukcyjnego łożysk stożkowych z zastosowaniem technik cyfrowego przetwarzania sygnałów wibroakustycznych”**

*na zlecenie Pana Dziekana Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej*

#### **1. Wprowadzenie**

Łożyska toczne są jednym z najczęściej używanych elementów maszyn i stąd też techniki ich diagnozowania stanowią przedmiot badań od wielu lat. Na dobrą sprawę rozwój metod i środków oceny stanu łożysk można by traktować jako dobrą ilustrację rozwoju diagnostyki technicznej, a zwłaszcza diagnostyki wibroakustycznej. Wzrost poziomu drgań i hałasu generowanych przez łożyska uszkodzone jest oczywisty i w początkowym okresie stanowił przedmiot subiektywnej (organoleptycznej) oceny odpowiednio doświadczonych ekspertów. Pierwszy patent dotyczący oceny stanu łożysk techniką WA pochodzi z 1949 r.(!) Opracowano normy oceny stanu łożysk (na szczęście nieobligatoryjne) na podstawie symptomów drganiowych i hałasowych. Wielu producentów wytwarza gotowe stanowiska badawcze do diagnozowania wibroakustycznego łożysk tocznych, a wszyscy producenci łożysk tego rodzaju stanowisk używają. Powstaje zatem naturalne pytanie, czy temat nie został wyczerpany i czy można zaproponować coś istotnie nowego? Odpowiedź na pytanie jest pozytywna z dwóch powodów. Po pierwsze nie ma jak dotąd przyrządów diagnostycznych o pewności diagnozy bliskiej 100%. Przyrządy fabryczne dają współczynnik pewności powyżej 0,8. Po drugie diagnoza przyrządowa następuje na podstawie przekraczania przez pewną miarę liczbową wartości progowych, a ogromny w ostatnich latach rozwój metod pomiarowych i technik przetwarzania sygnałów pozwala niewątpliwie (przynajmniej teoretycznie) na tworzenie lepszych miar i technik wnioskowania. Dlatego też uważam, że temat rozprawy należy uznać za aktualny i zgodny z potrzebami aplikacyjnymi, chociaż zadanie poprawy istniejącego stanu rzeczy jest dość trudne. Tym samym Autor zasługuje na uznanie, że tego zadania się podjął.

#### **2. Omówienie rozprawy**

Przedstawiona do oceny praca jest stosunkowo obszerna. Wraz z załącznikami liczy 174 strony z czego 127 zasadniczego tekstu i 6 literatury (139 pozycji + 12 stron internetowych). Praca

podzielona jest na 7 rozdziałów i uzupełniona streszczeniem i wykazem oznaczeń. Spis literatury można uznać za adekwatny i wystarczający, chociaż gdy Autor odnosi się do diagnostyki eksploatacyjnej wyraźnie brakuje prac z Politechniki Śląskiej i Warszawskiej, dotyczących modelowania łożysk z uszkodzeniami doraźnymi.

We wstępie Autor formułuje cele rozprawy, którymi są:

- opracowanie metodyki poprodukcyjnego testowania stożkowych łożysk tocznych pozwalającej na uzyskanie sygnałów diagnostycznych o znanym wpływie warunków prowadzenia testów i małej podatności na zakłócenia;
  - opracowanie nowych i / lub adaptacja istniejących technik przetwarzania i parametryzacji sygnałów wibroakustycznych pozwalających polepszyć trafność klasyfikacji poprodukcyjnej i zwiększyć skuteczność detekcji wad produkcyjnych stożkowych łożysk tocznych
- oraz definiuje zakres rozprawy.

W rozdziale drugim omówiono podstawowe techniki i metody wibroakustycznej diagnostyki łożysk tocznych. Rozdział ten Autor kończy słusznym stwierdzeniem, że metodyka wykrywania uszkodzeń doraźnych nie znajduje bezpośredniego zastosowania w diagnostyce poprodukcyjnej, aczkolwiek niektóre miary mogą być wykorzystane. Zwraca również uwagę na potrzebę minimalizacji wszelkiego rodzaju zakłóceń zewnętrznych.

W rozdziale trzecim Autor omawia wytyczne normowe i zwraca uwagę na uwarunkowania, które winna spełnić optymalna metodyka diagnozowania poprodukcyjnego łożysk. Wybiera optymalny sposób smarowania, obciążenia, prędkości obrotowej, czasu uśredniania i pasm pomiarowych. Dokładnie omawia używane przez siebie stanowisko pomiarowe. Rozdział kończy się istotnym stwierdzeniem o potrzebie redukcji zakłóceń mechanicznych i elektromagnetycznych. Tutaj Autor proponuje metodę selekcji przestrzennej polegającą na użyciu 2 czujników zamocowanych w przeciwności i metodę uśredniania multisynchronicznego MSA. W efekcie proponuje wykorzystać do oceny sygnał rezydualny, w którym dominantami będą niskoenergetyczne oddziaływania łożyska.

Kluczowym dla pracy jest rozdział 4, w którym opisano wykonany przez Autora eksperyment badawczy na zbiorze 80 nowych łożysk 513-716A wyprodukowanych w PBF Kraśnik S.A., które zostały sklasyfikowane przez producenta na stanowisku w hali produkcyjnej jako dobre (30 sztuk), wadliwe ze względu na zbyt wysoki poziom drgań (30 sztuk) i wadliwe ze względu na subiektywną ocenę głośności pracy (20 sztuk). Łożyska te były poddane reklasyfikacji w dziale kontroli przy wykorzystaniu systemu SKF. Taka klasyfikacja prowadzi do rozrzutu 12,5%, a poza tym wielokrotna

klasyfikacja tego samego łożyska na stanowisku referencyjnym daje różne wyniki i różne klasyfikacje(!).

Celowość doskonalenia metodyki diagnozowania jest zatem zupełnie oczywista.

W obszernym eksperymencie Autor przebadał 248 różnych miar, z których wybrał 26 słabo skorelowanych i porównał z klasyfikacją fabryczną, by w kolejnym etapie wybrać 8 miar.

W rozdziale 5 Autor proponuje metody przetwarzania obserwowanych sygnałów, w tym metodę pomiaru uderzeń w pasmach rezonansowych i zobrazowania wyników na płaszczyźnie  $a_{RMS} - f_{RICE}$ .

W rozdziale 6 dokonano reklasyfikacji łożysk wykorzystując metodykę proponowaną przez Doktoranta i porównano wyniki z obiema klasyfikacjami fabrycznymi. Biorąc pod uwagę fakt wysokiej rozbieżności obu klasyfikacji fabrycznych można by potraktować propozycję Autora jako rozstrzygnięcie.

W rozdziale 7 Autor podsumowuje badania wieloma wnioskami szczególnymi (3 i pół strony) o różnym ciężarze gatunkowym i wnioskami ogólnymi, z których można wyodrębnić informację, że proponowana przez Niego metodyka jest pod wieloma względami lepsza od stosowanej przez producenta i celowa jest próba wdrożenia.

### 3. Uwagi krytyczne i zapytania

1° Nie rozumiem zupełnie sformułowania o niepostawieniu tezy pracy. Każda logicznie przeprowadzona rozprawa stara się czegoś dowieść, a Autor wykazał, że pomimo wieloletniej praktyki w tym względzie jest możliwe (i celowe) uzyskanie lepszych wyników diagnozowania łożysk tocznych technikami WA dzięki wykorzystaniu nowoczesnych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów.

2° Praca zredagowana jest starannie i napisana w zasadzie poprawnym językiem technicznym. Najistotniejsze uchybienia można znaleźć w rysunkach technicznych. Na rysunku 3.9 brak krawędzi otworu obudowy, a na rysunku 3.15 niezidentyfikowane szare plamy sugerują, że łożyska nie da się napiąć. Elementy okrągłe powinny mieć zaznaczone osie (!). Fotografie 3.9, 3.10 mają przestawione nakrętki.

Styl rozprawy należy uznać za poprawny. Osobiście wyrzuciłbym jedynie co najmniej 70% wyrażen „w oparciu” (może być na podstawie, w wyniku czegoś, uwzględniając itp.) oraz zastąpił bardzo często używane „poprzez” słowem „przez”.

3°. Muszę przyznać, że Autor nader delikatnie krytykuje ustalenia aktualnych norm i stara się swoją metodykę do tych ustaleń dopasować. Czy zdaniem Autora, biorąc pod uwagę doświadczenie zdobyte podczas wykonywania tej pracy, nie byłoby najlepiej dopasować parametry analizy (liczbę pasm, ich szerokość, prędkość obrotową, obciążenie łożyska) do cech dynamicznych systemu *mechaniczna część stanowiska ↔ łożysko*, jak chociażby prędkość uzależnić od liczby elementów tocznych i częstości rezonansowych itp.

4° Napięcie wstępne badanych łożysk nie powinno być zbyt duże, by nie tłumić dodatkowo drgań, lecz dlaczego nie dobiera się tak relacji między obciążeniem wzdłużnym i poprzecznym, by faktyczny kąt działania łożyska był równy konstrukcyjnemu? Przecież wtedy wystąpią równe naciski na całej długości styku rolki z bieżnią (i tak tu łożysko powinno pracować). Poza tym zaproponowany w pracy sposób realizacji siły wzdłużnej wydaje się być mało dokładny.

#### 4. Opinia końcowa

Z pełnym przekonaniem uważam, że wyniki i wnioski podane w pracy zawierają istotną wartość naukową. Autor wykazał się umiejętnością postawienia zadania i rozwiązania go na drodze eksperymentalnej poprawnie planując i wykonując skomplikowane badanie. Wykazał się przy tym rzetelną wiedzą z zakresu techniki pomiarowej i nowoczesnych metod cyfrowego przetwarzania sygnałów. Praca ma duży potencjał aplikacyjny, a umiejętność nawiązania współpracy z producentem (widoczna w pracy) rokuje nadzieję na uzyskanie wdrożeń. Tematyka nie jest zamknięta i sugeruję kontynuację.

#### Konkluzja

**Uważam, że praca doktorska „Metodyka testowania poprodukcyjnego łożysk stożkowych z zastosowaniem technik cyfrowego przetwarzania sygnałów wibroakustycznych” bez zastrzeżeń spełnia wymogi Ustawy i stawiam wniosek o dopuszczenie jej Autora Pana mgr. inż. Bartosza Jakubka do publicznej obrony.**