

Dr hab. inż. Piotr Lampart, prof. IMP PAN  
Instytut Maszyn Przepływowych im. R. Szewalskiego PAN

Gdańsk 14.08.2023

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Łoja wykonana na zlecenie  
Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Śląskiej  
(pismo RDIME.512.12.2023)**

### **1. Wstęp.**

Diagnostyka jest ważnym działem nauki i techniki. Pozwala na bezinwazyjną ocenę stanu technicznego maszyn i urządzeń w oparciu o pomiar sygnałów diagnostycznych, ich analizę i porównanie z wartościami nominalnymi. Daje także możliwość identyfikacji przyczyn zmiany stanu technicznego obiektu oraz prognozę rozwoju jego stanu technicznego. Rozwój metod diagnostycznych wpisuje się w aktualny nurt badań prowadzonych w wiodących placówkach naukowych w kraju i na świecie.

Przedstawiona do opinii praca doktorska mgr. inż. Pawła Łoja pt. „Diagnostyka eksploatacyjna pomp próżniowych” została wykonana w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn przy Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej pod kierunkiem Prof. dr. hab. inż. Wojciecha Cholewy. Rozprawa doktorska liczy 110 stron, zawiera spis treści, streszczenie w języku polskim i angielskim, 7 rozdziałów, spis rysunków i tabel oraz bibliografię.

### **2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Łoja podejmuje problematykę diagnostyki pomp próżniowych, zwłaszcza rotacyjnych łopatkowych pomp próżniowych. Na wstępie pracy, w rozdziale 1, Autor w sposób zwięzły wprowadza czytelnika w zadania stojące przed diagnostyką techniczną maszyn i urządzeń. Przedstawia także zakres pracy doktorskiej.

Rozdział drugi dotyczy genezy pracy 2. Przybliżono w nim tematykę zastosowania niskich ciśnień (próżni) oraz urządzeń służących do uzyskiwania próżni technicznych. Szczególną uwagę poświęcono rotacyjnym łopatkowym pompom próżniowym. Opisano zasadę ich działania oraz omówiono kwestie eksploatacyjne. Skoncentrowano się na charakterystyce najczęstszych awarii tych maszyn. Omówiono także metody diagnostyki tych urządzeń znane z literatury i zaleceń producentów. Z przedstawionej analizy wyłania się brak metod opartych na analizie sygnałów ciśnieniowych. W rozdziale 2 zdefiniowano również cel pracy, którym jest opracowanie bezinwazyjnej metody diagnostycznej do ciągłego monitorowania stanu łopatek w rotacyjnych łopatkowych pompach w oparciu o analizę sygnału ciśnienia generowanego przez pompę próżniową. Cel ten zostanie osiągnięty poprzez realizację szeregu zadań cząstkowych, między innymi poprzez:

- opracowanie i realizację stanowiska pomiarowego pozwalającego na wykonanie pomiarów, rejestracji i obróbki sygnałów ciśnienia z odpowiednio wysoką częstotliwością próbkowania,
- wytypowanie form niesprawności badanych urządzeń,



- przeprowadzenie czynnego i biernego eksperymentu diagnostycznego dla obiektów sprawnych i niesprawnych technicznie,
- analizę sygnałów ciśnienia oraz
- klasyfikację stanów łopatek i rodzajów ich uszkodzeń na podstawie uzyskanego sygnału.

W pracy sformułowano 3 następujące tezy:

- przebieg ciśnienia generowanego przez rotacyjne łopatkowe pompy próżniowe jest cennym sygnałem diagnostycznym, niosącym informację o ich stanie,
- analiza tego sygnału ciśnienia pozwala na wykrycie niesprawności, jej rodzaju i lokalizacji,
- możliwe jest opracowanie nisko-kosztowego urządzenia do ciągłego monitoringu stanu technicznego rotacyjnych łopatkowych pomp próżniowych na bazie analizy sygnału ciśnienia.

W rozdziale 3 przedstawiono model matematyczny wyidealizowanych sygnałów ciśnienia, które mogą w różnych sytuacjach być generowane przez rotacyjne łopatkowe pompy próżniowe, m.in. w sytuacji idealnego geometrycznie układu łopatkowego oraz w przypadku uszkodzeń zaistniałych w łopatkach roboczych. Sygnały te poddano analizie w rozdz. 4, gdzie określono ich cechy punktowe (np. wartości średnie, wariancje, współczynniki kształtu) oraz funkcyjne (m.in. widmo amplitudowe, fazowe, gęstości mocy, funkcję autokorelacji, funkcję zespoloną w płaszczyźnie drogi kątowej). Rozdział 4 poświęcono także prezentacji urządzenia opracowanego na potrzeby ciągłego monitoringu stanu technicznego badanych obiektów.

W rozdziale 5 w pierwszej kolejności przedstawiono analizę matematyczną sygnałów wyidealizowanych opisanych w poprzednim rozdziale (3 przypadki – urządzenie trzyłopatkowe o idealnej geometrii, z jedną i dwoma uszkodzonymi łopatkami). Następnie rozważano rzeczywiste sygnały ciśnienia pozyskane w trakcie czynnego eksperymentu diagnostycznego na rotacyjnej łopatkowej pompie próżniowej BUSCH model RA0100 F o wydajności 100 m<sup>3</sup>/h, mocy 2,7 kW, prędkości obrotowej 1500 obr/min (5 przypadków – brak niesprawności, jedna słabo uszkodzona łopaska, jedna mocno uszkodzona łopaska, dwie łopatki uszkodzone w różnym stopniu, pompa z awarią systemu smarowania). Dla badanych sygnałów określono cechy punktowe oraz wyznaczono wartości funkcji autokorelacji dla 1/3, 2/3 i pełnego obrotu dla badanych konfiguracji. Dla geometrii idealnej wartości funkcji autokorelacji są bliskie 1, w przypadku uszkodzeń obserwujemy gorsze skorelowanie sygnałów ciśnienia. W analizie Fouriera wyznaczono widmo amplitudowe badanych sygnałów. Dla geometrii idealnej dominującą częstotliwością jest 75 Hz (3 x 25 Hz). W przypadku uszkodzeń pojawiają się znaczące amplitudy odpowiadające częstościom niższym – 25 i 50 Hz. W wykresie biegunowym funkcji zespolonej, geometria idealna daje trójlistną koniczynę, w przypadku uszkodzeń ulega ona deformacji (zmiana wielkości listków koniczyny i przemieszczenie środka ciężkości figury od środka układu współrzędnych).

W trzeciej części rozdziału 5 przeprowadzono analizę biernego eksperymentu diagnostycznego z 47 różnych rotacyjnych łopatkowych pomp próżniowych w szerokim zakresie natężenia przepływu oraz stanu technicznego tych urządzeń. W celu klasyfikacji stanów maszyn stosowano statystyczne metody rangowe, takie jak test Mann-Whitneya. Zbiór danych poddano procesowi grupowania, wartości cech punktowych odpowiadające urządzeniom sprawnym grupowane zostały na małym obszarze w przeciwieństwie do maszyn niesprawnych. Określono współczynniki korelacji rang Spearmana dla par analizowanych cech sygnału. Wyodrębniono cechy charakteryzujące się wysoką wrażliwością na zmianę stanu maszyny i przeprowadzono analizę głównych składowych (PCA). Jako dwie podstawowe cechy sygnału wyselekcjonowano udział składowej 75Hz i odległość środka



ciężkości figury w płaszczyźnie zespolonej od środka układu współrzędnych. Dokonano podziału na 3 lub 4 grupy stanu technicznego.

W rozdziale 6 przedstawiono analizę rotacyjnej olejowej pompy próżniowej BUSCH R5 RA0100 E (o wydajności 100 m<sup>3</sup>/h, prędkości obrotowej 1500 obr/min) przed i po serwisie naprawczym, który został wykonany z uwagi na niezyskiwanie przez pompę żądanych wartości podciśnienia. W obu przypadkach określono cechy punktowe stanów maszyny, wartości funkcji autokorelacji dla 1/3, 2/3 i pełnego obrotu, widma amplitudowe, oraz kształty figur na wykresie biegunowym. Rozróżnienie stanu technicznego otrzymano poprzez porównanie odległości środka ciężkości figury w płaszczyźnie zespolonej od środka układu współrzędnych.

Ważną częścią pracy jest rozdz. 7, który zawiera podsumowanie otrzymanych wyników pracy i oryginalnych elementów badań. Autor koncentruje się na wypełnieniu celu pracy, czyli opracowaniu metody diagnostycznej stanu rotacyjnych łopatkowych pomp próżniowych w oparciu o analizę sygnału ciśnienia generowanego przez pompę próżniową, oraz udowodnieniu postawionych tez. Najlepszą badaną metodą diagnostyczną okazuje się być analiza sygnału ciśnienia w płaszczyźnie zespolonej. Rozdział 7 zawiera też rekomendację do dalszych badań w kierunku rozszerzenia metody diagnostycznej na grupę pomp suchych.

### **3. Ocena rozprawy doktorskiej**

Ocenę rozprawy doktorskiej wypada rozpocząć od jej mocnych stron. Nie ma wątpliwości, że Doktorant zrealizował postawiony w pracy cel i opracował skuteczną metodę diagnostyki stanu technicznego rotacyjnych łopatkowych pomp próżniowych w oparciu o analizę sygnału ciśnienia generowanego przez pompę próżniową. Udowodnił także postawione w rozdz. 2 tezy pracy. Mgr inż. P. Łój rozwiązał samodzielnie oryginalny problem naukowy. Otrzymał wartościowe rezultaty, które wnoszą istotny wkład do inżynierii mechanicznej. Autor opracował przy tym własne narzędzie diagnostyczne oraz kompletne urządzenie do ciągłego monitoringu stanu technicznego rotacyjnych łopatkowych pomp próżniowych na bazie analizy sygnału ciśnienia. Jako najbardziej wartościową metodę diagnostyczną autor uznał analizę sygnału ciśnienia w dziedzinie zespolonej, która pozwala na identyfikację i lokalizację uszkodzenia.

Sposób przygotowania do badań jest prawidłowy i logiczny. Prawidłowy jest także dobór metod badawczych, procedur pomiarowych i narzędzi informatycznych. Realizacja prac wymagała od Autora głębokiej wiedzy w zakresie diagnostyki technicznej, technik pomiarowych i analizy statystycznej. Opis kluczowych zagadnień w ramach przyjętej problematyki badawczej przedstawiony w rozdz. 2 pozostaje zwięzły i poprawny.

Należy szczególnie podkreślić szeroki zakres badań wykonanych w celu pozyskania dużej bazy danych diagnostycznych (przebadano bowiem w sumie prawie 50 różnych urządzeń). Badania te, jak i opracowanie wyników wykonano z dużą starannością. Wyniki obliczeń są należycie ilustrowane. Opracowanie graficzne rysunków i tabel w zdecydowanej większości nie budzi zastrzeżeń. Sformułowane wnioski z badań również nie budzą zastrzeżeń.

Praca napisana jest przy użyciu poprawnej i zaawansowanej terminologii. Dobór cytowań i odwołanie do literatury przedmiotu wydają się także właściwe.

Praca ma również swoje słabe strony, które przeważnie przeplatają się ze stronami mocnymi. Praca jest zredagowana zwięźle, lecz niezbyt starannie. Można mieć uzasadnione zastrzeżenia do staranności edycji tekstu – brakuje ostatniego proof-readingu, który pozwoliłby wyeliminować liczne literówki, ominięte spójniki lub przyimki, także nadmiarowe



słowa, które w efekcie prowadzą do niegramatycznych sformułowań. Szczególnie dotkliwe jest nieumiejętne wykorzystanie automatu do numeracji rysunków i tabel, które prowadzi od powtórzeń słów. Szwankuje też interpunkcja w połączeniu z cytowaniem pozycji literatury. Można znaleźć strony (np. str. 28), gdzie jest 5 literówek i 5 innych błędów w wykorzystaniu automatu!

Streszczenie jest sformułowane zbyt ogólnie. Brakuje krótkiego opisu rezultatów badań oraz konkretnych wniosków w zakresie proponowanych metod diagnostycznych. Streszczenie w języku angielskim jest wiernym tłumaczeniem wersji polskiej, stąd poprzednie uwagi są również aktualne. Warto streszczenia w obu językach poprawić przed wysłaniem do systemu zbierania danych nt. prac doktorskich.

Edycja wzorów jest przeważnie dość staranna. Wzory powinny być jednak czytane razem z tekstem; wymagane jest zatem stosowanie ogólnych zasad interpunkcji. Przydałby się także oddzielny spis oznaczeń stosowanych we wzorach wraz z przypisaniem jednostek miar. Jako  $I$  oznaczono wielkość, którą określono jako natężenie przyływu gazu przez pompę. Wielkość ta ma wymiar mocy! Określenie wielkości fizycznej jest sprawą nomenklaturową, takie określenie stosuje się w książce J. Groszkowskiego z 1983r. W nowoczesnej nomenklaturze z dziedziny przepływów natężenie przyływu gazu jest wielkością, którą wyraża się zwykle w kg/s. W tym nietypowym ujęciu, dla uniknięcia niejasności, warto w opisie na str. 14-15 natężenie przepływu gazu, jak i inne wielkości fizyczne uzupełnić jednostkami miar.

Zapis równań 40 - 41 wyraźnie szwankuje. Dla  $k < 0$ ,  $k + |k| = 0$ , dlatego to wyrażenie występujące w sumie we wzorze (40) nie ma dużego sensu. Znormalizowana funkcja autokorelacji (41) powinna być innej, bardziej złożonej postaci, aby otrzymać wartości funkcji autokorelacji w zakresie od -1 do 1, wygodne dla celów porównawczych. Prawidłowe definicje znormalizowanej funkcji autokorelacji można znaleźć np. w Wikipedii. We wzorze 42 też jest przeoczenie.

W nawiązaniu do uwagi powyżej, otrzymane wartości znormalizowanej funkcji autokorelacji budzą dużo wątpliwości. Rys. 57 - 60 i tab. 15, warianty S4 i S5 – dlaczego wartości dla pełnego obrotu są tak niskie, dlaczego część dodatnia rozkładu przeważa mocno nad częścią ujemną rozkładu. Podobnie Rys. 98 - 99 i tab. 27, warianty S9 i S10 – dlaczego wartości dla pełnego obrotu są niskie. Z kolei Rys. 38, 39 i tab. 9 warianty S2 i S3 - czy rzeczywiście wartości dla 1/3 i 2/3 obrotu powinny być zgodne do 3 miejsca po przecinku? To wskazuje raczej na przyjęcie złej definicji znormalizowanej funkcji autokorelacji i wynikające stąd kłopoty w porównaniu stanów maszyny. Nie zmienia to jednak faktu, że wartości funkcji autokorelacji posiadają ograniczone znaczenie diagnostyczne, co też jest jednym z wniosków niniejszej pracy.

Rozdz. 5.3 – brakuje wyjaśnienia, czym jest test Manna-Whitneya i bardziej szczegółowego opisu rysunków 78 - 89. Również można pokusić się o bardziej szczegółową analizę wyznaczonych współczynników korelacji rang Spearmana w Tab. 20.

#### **4. Wniosek końcowy.**

Przedstawiona rozprawa doktorska posiada wysoką wartość naukową i utylitarną. Autor rozwiązał samodzielnie oryginalny problem badawczy z zakresu diagnostyki rotacyjnych łożatkowych pomp próżniowych. Wykazał się przy tym dużą wiedzą z zakresu diagnostyki technicznej, techniki pomiarowej i analizy statystycznej. Opracował urządzenie do diagnostyki i monitorowania stanu rotacyjnych łożatkowych pomp próżniowych w

oparciu o analizę sygnału ciśnienia generowanego przez pompę próżniową, gotowe do zastosowania przez producentów pomp.

Wysokiej oceny rozprawy nie podważają sformułowane w recenzji uwagi krytyczne i dyskusyjne. W konkluzji stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Pawła Łoja spełnia wymagania dla prac doktorskich zapisane w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, oraz wnioskuję o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a large, stylized initial 'P' followed by several loops and a final upward stroke.