

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Doroty Górnickiej  
pt. **Wykorzystanie sygnału drganiowego w diagnozowaniu  
uszkodzeń zaworów silników spalinowych**

opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych  
Politechniki Warszawskiej prof. dr hab. inż. Stanisława Radkowskiego  
z dnia 15.12.2016 r.

**1. Uwagi ogólne**

Praca doktorska mgr inż. Doroty Górnickiej została wykonana w Zakładzie Podstaw Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Zbigniewa Dąbrowskiego. Przedstawiona do recenzji praca zawiera 116 stron, ze spisem treści, streszczeniem w języku polskim i angielskim, wprowadzeniem, 8 głównymi rozdziałami i spisem literatury zawierającym 75 pozycji.

Poświęcona jest ważnej, z praktycznego punktu widzenia, tematyce diagnozowania uszkodzeń mechanicznych zaworów silnika spalinowego w warunkach maskowania zużycia eksploatacyjnego przez układy wykonawcze sterujące pracą silnika. Zaproponowana i wykorzystana metoda bazująca na wykorzystaniu sygnałów drganiowych jako nośnika informacji o stanie układu mechanicznego stanowi propozycję uzupełnienia aktualnie stosowanych systemów diagnostyki pokładowej w pojazdach samochodowych. Wykorzystaniem metod wibroakustycznych w diagnostyce pojazdów zajmuje się wiele ośrodków naukowo-badawczych w Polsce i na świecie. W nurt ten wpisuje się recenzowana rozprawa mgr inż. Doroty Górnickiej.

## 2. Charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

Rozprawę doktorską otwiera wprowadzenie stanowiące zwięzłe przedstawienie możliwości diagnostycznych istniejących systemów oceny stanu „on-line” oraz nakreślenie problemu diagnozowania uszkodzeń mechanicznych, w przeciwieństwie do niesprawności emisyjnych, często pomijanych lub maskowanych przez systemy OBD, szczególnie w ich wczesnych fazach. Autorka wykazuje celowość działań ukierunkowanych na uzupełnienie systemów sterowania o zdolność oceny stanu niesprawności układów mechanicznych.

W rozdziale 2 zwięzłe przybliżona została zasada działania systemów diagnostyki pokładowej OBD. W kolejnych podrozdziałach przedstawiono ważniejsze etapy rozwoju wymogów emisyjnych i systemów OBD, diagnozowane przez system uszkodzenia oraz ingerencję układu sterowania w parametry regulacyjne silnika. Rozdział zakończony jest przytoczeniem przykładów uszkodzeń mechanicznych, pomijanych przez system OBD w procesie diagnozowania.

W kolejnym 3 rozdziale Autorka przedstawia możliwości uzupełnienia zbioru parametrów obserwowanych przez system diagnostyki pokładowej. Ta część rozprawy stanowi przegląd możliwych do wykorzystania w procesie diagnozowania nośników informacji o stanie obiektu technicznego. Rozdział zakończony jest uzasadnieniem ograniczenia się w dalszych rozważaniach, do wykorzystania w procesie diagnozowania niesprawności silnika spalinowego parametrów procesów roboczych pozyskanych z systemu OBD oraz parametrów procesów wibroakustycznych tj. wykorzystania sygnału drganiowego.

W rozdziale 4 Autorka stawia tezę, że:

***Możliwe i celowe jest zbudowanie systemu diagnostycznego, który wykorzystuje symptom wibroakustyczny oraz dane przetwarzane w systemie OBD do wykrywania wczesnych faz rozwoju uszkodzeń zaworów silników spalinowych.***

Aby wykazać poprawność postawionej tezy, Autorka przeprowadziła czynne eksperymenty badawcze skupiając się na możliwościach wykorzystania informacji

z samego systemu diagnostyki pokładowej oraz generowanej energii wibroakustycznej mierzonej na korpusie silnika. Określiła także kryteria dla propozycji miary uszkodzenia zaworu wylotowego silnika spalinowego. Poszukiwana estymator miał być prostą, nie wymagającą angażowania zaawansowanego aparatu matematycznego czy aparatury pomiarowo-analizującej miarą, taką by poszukiwany symptom był łatwy do zaimplementowania w istniejących systemach diagnostyki pokładowej. Zaproponowanie miary spełniającej takie wymogi umożliwiłoby uzupełnienie diagnostyki „on-line” w sferze wykrywania wczesnych faz niesprawności mechanicznych.

Zdaniem recenzenta, w kontekście sformułowanego tematu rozprawy, zarówno cel jak i teza pracy zostały sformułowane poprawnie.

W dalszej części rozprawy (rozdział 5) Autorka przybliżyła problem emisji energii wibroakustycznej silnika spalinowego wskazując jednocześnie na możliwość wykorzystania drgań mechanicznych generowanych przez silnik jako symptomu diagnostycznego. Autorka omówiła rozkład sił w układzie korbowym. Przedstawione zostały również modele potwierdzające występowanie sprzężenia drgań giętnych i skrętnych. Rozważania prowadzą do twierdzenia, iż obserwacji zmian stanu zaworu wylotowego można dokonać obserwując sygnał drganiowy na dowolnie wybranym kierunku. Rozdział zakończony jest przeglądem prostych miar dla sygnałów wibroakustycznych stosowanych w ocenie stanu obiektów technicznych.

Rozdział 6 opisujący aktualny stan wiedzy stanowi bardzo szerokie spektrum analiz literatury związanych z wykorzystaniem sygnałów wibroakustycznych jako nośników informacji o stanie technicznym obiektu. Stanowi mocne uzasadnienie wybranych przez Autorkę rozwiązań i potwierdza kompetentną i wnikliwą ocenę aktualnie stosowanych metod diagnostycznych bazujących na metodach drganiowych.

W rozdziale 7 Autorka opisała badania eksperymentalne przeprowadzone na dwóch obiektach w różnych stanach eksploatacyjnych. Pierwszy z eksperymentów (obiekt fabrycznie nowy) stanowi bazę do drugiego eksperymentu uwzględniającego znaczne zużycie eksploatacyjne badanego obiektu. Autorka przedstawia wyniki analiz sprawdzających użyteczność sygnałów pozyskanych z systemu diagnostyki pokładowej oraz sygnału drganiowego rejestrowanego na głowicy silnika w procesie

diagnozowania uszkodzenia zaworu wylotowego. Przedstawione wyniki potwierdzają użyteczność sygnału drganiowego w procesie diagnozowania wypalenia zaworu. Efektem jest propozycja prostej monotonicznej miary diagnostycznej, niewrażliwej na zmienne warunki prowadzenia obserwacji. Dodatkowo Autorka sprawdza reakcję miary na równoległe występującą niesprawność układu w postaci zwiększonego luzu zaworowego. Wyselekcjonowanie zakresów częstotliwości charakterystycznych dla dwóch rozważanych niesprawności pozwoliło na jednoznaczne rozróżnienie typu niesprawności jednostki napędowej i w efekcie propozycję relatywnie prostego dwutorowego algorytmu diagnostycznego.

### **3. Ocena redakcyjna**

Opracowanie redakcyjne recenzowanej dysertacji jest na wysokim poziomie. Struktura i podział pracy jest prawidłowy. W ujęciu całościowym praca jest dopracowana i precyzyjna, aczkolwiek fragmenty opisujące związki przyczynowo skutkowe mające dostarczyć dowodów na udowodnienie tez są bardzo obszerne. W rozdziale 5 Autorka bardzo szeroko i wyczerpująco opisuje i analizuje procesy generowania drgań mechanicznych przez silnik spalinowy. Szczegółowo przedstawia te zagadnienia dla układu korbowo-tłokowego pomija jednak rozważania i opis dla układu rozrządu i jego elementów w tym analizowanego zaworu wylotowego. Prowadzi to do pewnych dysproporcji i trudności w lekturze zwłaszcza w przypadku czytelników słabiej zorientowanych w tematyce generowania drgań w silnikach spalinowych. Ilość materiałów ilustracyjnych zamieszczonych w pracy jest wystarczająca, choć w przypadku rozdziałów 2, 5 oraz 6 mogłaby być większa, co wzbogaciłoby te rozdziały. Jakość prezentowanych wyników pomiarów w postaci przebiegów czasowych oraz widm częstotliwościowych stwarza pewne trudności w bezpośredniej ocenie (np. Rys. 7.10, 7.13, 7.20, 7.24). Znacznie bardziej czytelne byłyby rysunki dwukrotnie większe tzn. na szerokość strony. Powyższe drobne uwagi, mam nadzieję i sędzę, że Autorka uwzględni w swoich kolejnych tekstach. Mogą one jedynie przyczynić się do polepszenia jakości opracowania przyszłych publikacji Autorki.

#### 4. Uwagi szczegółowe i krytyczne

Spotyka się pewne niezgrabności stylistyczne niekiedy wynikłe tylko z błędów literowych.

Z obowiązku recenzenta pragnę zwrócić uwagę na pewne niedociągnięcia oraz kwestie wymagające wyjaśnienia jak np.

- W rozdziale 5 Autorka szeroko opisuje i analizuje procesy generowania drgań mechanicznych przez silnik spalinowy. Szczegółowo przedstawia te zagadnienie dla układu korbowo-tłokowego. Pewien niedosyt pozostawia brak przeprowadzenia analiz związanych z układem rozrządu zwłaszcza, że niesprawność elementu tego układu jest przedmiotem analizowanej rozprawy doktorskiej.
- Rozdział 7 opisuje eksperyment badawczy. O ile schemat przebiegu badań stanowiskowych jest przedstawiony jasno krótko i precyzyjnie, o tyle zakres badań jest podany w różnych miejscach rozprawy utrudniając określenie liczby eksperymentów. Również opis samego toru pomiarowego (rys 7.9 oraz 7.18) jest bardzo skrótowy i praktycznie nie zawiera informacji o parametrach metrologicznych wykorzystanego sprzętu. Nie podano sposobu mocowania czujnika przyspieszeń drgań jego czułości oraz zakresu częstotliwości pomiarowej, a w przypadku karty rejestrującej nie podano podstawowych parametrów (częstotliwości próbkowania, ilości kanałów rejestracji, próbkowanie synchroniczne/asynchroniczne, rozdzielczość pomiarowa itp.). Przy zastosowaniu komercyjnego sprzętu pomiarowego jaki jest wykazany w pracy informacje tego typu z pewnością poprawiły by jej czytelność.
- Jak uzasadnić założenie liniowych trendów zmian pomiędzy poszczególnymi wartościami wyznaczonych estymatorów dla konkretnych punktów pracy silnika np. Rys. 7.12a, 7.14. Jeżeli na osi rzędnych przedstawione są poszczególne dyskretne wartości przełożenia skrzyni biegów (numer biegu) to czy celowym jest rozciąganie estymatora pomiędzy tymi wartościami czy nie lepiej było – jak jest to w części pracy operować wykresami słupkowymi?

- Rysunek 7.34 przedstawia rozważania dla przypadku zwieszonego luzu zaworowego, nie podano jednak konkretnych szczegółów dotyczących regulacji tegoż luzu (jaki układ rozrządu, jaka metoda regulacji, jak zmierzony i z jaką dokładnością).
- Przedstawiono metodę synchronizacji czasowej poprzez przepróbowanie sygnału wibroakustycznego. Niejasne jest jednakczy dla procedury na Rys. 7.29 analizowane były widma z przebiegów czasowych dla pojedynczej realizacji czy uśrednione po opisanej synchronizacji, a jeśli uśrednione to z ilu cykli?
- Nie podano informacji o oprogramowaniu (nazwa, wersja itp.) wykorzystanym do rejestracji wyników oraz analiz. Jest to niezwykle istotne z punktu widzenia technicznej możliwości zaimplementowania zaproponowanego algorytmu w komputerze pokładowym pojazdu samochodowego.

## 5. Podsumowanie i ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Doktorantka w swojej pracy zajęła się ważnym i aktualnym zagadnieniem efektywnego wspomaganie systemu diagnostycznego silnika spalinowego w warunkach maskowania uszkodzeń mechanicznych przez adaptacyjne układy zasilania. Wykazała przy tym bardzo dobre opanowanie warsztatu badawczego w szczególności w zakresie eksperymentalnym oraz analitycznym.

Na podstawie analizy przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej pt. *„Wykorzystanie sygnału drganiowego w diagnozowaniu uszkodzeń zaworów silników spalinowych”* wyrażam opinię, że mgr inż. Dorota Górnicka zrealizowała podstawowy cel rozprawy czyli dowiodła prawdziwości tezy, że możliwe jest zbudowanie prostego systemu oceny stanu zaworu wylotowego silnika spalinowego bazującego na sygnale drganiowym z algorytmem obliczeniowym zdatnym do łatwej aplikacji w trybie on-line. W trakcie realizacji pracy doktorskiej wykazała się umiejętnością prowadzenia eksperymentów naukowych oraz stosowania współczesnych narzędzi badawczych. Kandydatka zastosowała w swoich badaniach nowoczesne przyrządy pomiarowe oraz oprogramowanie. Na szczególne podkreślenie zasługuje propozycja algorytmu diagnozowania niesprawności zaworu wykorzystująca

prostą miarę bazującą na sygnale wibroakustycznym. W wyniku analizy efektywności prostych miar diagnostycznych Autorka zaproponowała metodę diagnozowania bazującą na obserwacji zmian nieliniowych cech sygnału drganiowego w czasie eksploatacji (zużycia). Efektem końcowym pracy jest propozycja efektywnego algorytmu, wykorzystującego techniki analizy koherencyjnej, umożliwiającego wyselekcjonowanie symptomu badanego uszkodzenia. Prostota takiego rozwiązania powoduje, iż algorytm może z powodzeniem zostać zaimplementowany jako uzupełnienie istniejących systemów diagnostyki pokładowej.

**Na podstawie recenzowanej pracy doktorskiej stwierdzam, że mgr inż. Dorota Górnicka potwierdziła umiejętność samodzielnego postawienia i rozwiązania zadania naukowego oraz wykazała się wiedzą w zakresie doskonalenia i rozwoju metod diagnostyki wibroakustycznej silników spalinowych pojazdów samochodowych. Opiniowana praca doktorska spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim sformułowane w obowiązującej ustawie o stopniach i tytule naukowym (w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003) i może być dopuszczona do publicznej obrony.**

