

Radom, 17.12.2016 r.

Dr hab. inż. Andrzej Puchalski, prof. nzw.
Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu
Wydział Mechaniczny
Instytut Eksploatacji Pojazdów i Maszyn

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Doroty Górnickiej pt.
„WYKORZYSTANIE SYGNAŁU DRGANIOWEGO W DIAGNOZOWANIU
USZKODZEŃ ZAWORÓW SILNIKÓW SPALINOWYCH”

Podstawą niniejszej recenzji jest pismo nr SiMR-29/32/2016 Dziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej prof. dra hab. inż. Stanisława Radkowskiego z dnia 15.12.2016 r.

1. Treść, zakres i teza rozprawy doktorskiej.

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Doroty Górnickiej obejmuje zagadnienia diagnozowania uszkodzeń w układzie zaworowym silnika spalinowego na bazie obserwacji on-line zmian cech sygnałów drgań mechanicznych w czasie eksploatacji. Rozprawa liczy 116 stron, jest podzielona na 9 rozdziałów, w tym spis literatury obejmujący 75 właściwie wybranych pozycji, w zdecydowanej większości opublikowanych w okresie ostatniej dekady.

Punktem wyjścia jest potwierdzona w wielu publikacjach naukowych niedoskonałość systemów diagnostyki pokładowej pojazdów w sferze diagnozowania uszkodzeń mechanicznych, szczególnie we wczesnych fazach ich rozwoju oraz możliwość wypełnienia tej luki informacjami pochodzącymi z sygnału drganiowego generowanego przez obiekt. Podstawową tezę pracy : **„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”**, sformułowano w rozdziale 4. Rozdział ten zawiera też podstawowe cele prowadzonych badań: wykonanie możliwie obszernego czynnego eksperymentu diagnostycznego na obiekcie rzeczywistym oraz zbadanie podatności diagnostycznej różnych znanych miar i w konsekwencji zaproponowanie miary i procedury analizy pozwalającej na diagnostykę stopnia uszkodzenia zaworu niezależnie od występujących równolegle uszkodzeń podobnych, możliwej do implementacji w trybie „on-line” niezależnie od aktualnych parametrów pracy.

Rozdziały 1 – 3, poprzedzające sformułowanie tezy obejmują wprowadzenie do problematyki systemów diagnostyki pokładowej pojazdów pod kątem konieczności i możliwości uzupełnienia zbioru parametrów obserwowanych przez system OBD w

zakresie zaplanowanych badań. W szczególności przedstawiono szereg przypadków uszkodzeń świadczących o niedoskonałości istniejących systemów diagnostyki pokładowej objawiającej się błędną identyfikacją i maskowaniem niesprawności, szczególnie we wczesnym stadium uszkodzenia.

W rozdziale 5 omówiono przyczyny i rodzaje drgań mechanicznych generowanych przez silnik spalinowy oraz miary w dziedzinie czasu, amplitudy i częstotliwości, które stosowane są jako symptom diagnostyczny. Aktualny stan wiedzy odnoszącej się do oceny stanu silników spalinowych metodami wibroakustycznymi przedstawiono w rozdziale 6.

Wyniki własnych eksperymentów badawczych oraz analiz zawarto w najobszerniejszym rozdziale 7, strony od 53 do 108, a podsumowanie w rozdziale 8.

2. Charakterystyka i ocena merytoryczna.

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi systematyczne, całościowe rozwiązanie w zakresie podjętej tematyki, poprzez analizę stanu wiedzy, określenie istniejących problemów, zaplanowanie cyklu eksperymentów badawczych oraz jasne podanie propozycji efektywnego algorytmu, wykorzystującego techniki analizy koherencyjnej, umożliwiającego wyselekcjonowanie symptomu badanego uszkodzenia. Prostota rozwiązania powoduje, iż algorytm może z powodzeniem zostać zaimplementowany jako uzupełnienie istniejących systemów diagnostyki pokładowej.

Zadania stawiane obecnie systemowi OBD pojazdów traktują zagadnienie sprawności pojazdu w dwóch płaszczyznach: diagnostyki emisyjnej oraz diagnostyki bezpieczeństwa. Dyskusyjne jest zatem, zawarte we wprowadzeniu do rozprawy stwierdzenie, że cele stawiane systemom diagnostyki pokładowej dotyczą głównie ochrony środowiska a nie oceny stanu silnika. Niezależnie od tego rozsądnym i ekonomicznie uzasadnionym wydaje się uzupełnienie systemów sterowania o analizy dodatkowych symptomów uszkodzeń mechanicznych, które dotychczas są pomijane w procesie diagnostyki pokładowej. Stosowane od chwili wprowadzenia do pojazdów układów wtryskowych w sondą lambda, adaptacyjne algorytmy sterowania posiadają szereg zalet, niemniej jednak realizując swoje zadania mogą maskować niesprawności mechaniczne, we wczesnej fazie postępującego uszkodzenia.

Rozwiązania tego problemu poszukuje się poprzez analizę parametrów procesów roboczych rejestrowanych przez systemy diagnostyki pokładowej oraz metody wykorzystujące parametry procesów „towarzyszących”, wśród których procesy wibroakustyczne są najlepszą drogą poszukiwania symptomów niesprawności mechanicznych silnika spalinowego. Autorka rozprawy, idąc tym torem rozumowania, w prowadzonych badaniach ograniczyła się do prześledzenia możliwości wykorzystania w procesie diagnozowania niesprawności silnika spalinowego parametrów procesów roboczych pozyskanych z systemu OBD i parametrów procesów drganiowych. Założono, że prawidłowa miara diagnostyczna musi wykazywać duże prawdopodobieństwo trafności diagnozy, powinna być niezależna od predyspozycji diagnosty oraz cechować się jak najmniejszą ingerencją w strukturę

badanego obiektu. Za najważniejsze wymuszenia będące źródłem procesów drganiowych przyjęto w rozprawie wymuszenia pochodzące od procesu spalania, pracy układu korbowo-tłokowego, układu rozrządu, zespołu napędowego oraz osprzętu jednostki napędowej.

Badania szeregu autorów i opublikowane wyniki badań symulacyjnych poparte weryfikacją w warunkach rzeczywistych wskazują, że obserwacji zmian stanu zaworu wylotowego można dokonać rejestrując sygnał drganiowy w dowolnie wybranym kierunku. Nierozwiązanym zadaniem pozostaje wybór optymalnej miary diagnostycznej, czego podjęła się w rozprawie jej Autorka. W celu weryfikacji postawionej tezy zaplanowano i przeprowadzono serię czynnych eksperymentów. Symulowane stany eksploatacyjne obejmowały niesprawności mechaniczne zaworu wylotowego pierwszego cylindra, odzwierciedlające naturalne wypalenie zaworu oraz niepoprawnie ustawiony luz zaworowy. Uzyskane wyniki pochodzą z badań pojazdów osobowych o różnym przebiegu i zużyciu, poczynając od samochodu fabrycznie nowego.

Sformułowano wniosek o niemożliwości wnioskowania o stanie jednostki napędowej we wczesnej fazie uszkodzeń mechanicznych, na bazie obserwacji ogólnodostępnych sygnałów pozyskanych z systemu diagnostyki pokładowej. Jednocześnie stwierdzono, że w procesie wnioskowania nie wykorzystano wszystkich informacji jakie gromadzone są przez system diagnostyki pokładowej. Zarejestrowano wybrane sygnały w układzie sterowania silnika (niewłaściwie określone na rys.7.7 i 7.8 jako parametry pracy silnika): sygnał napięciowy czujnika tlenu przed i za katalizatorem oraz sygnały krótko- i długoterminowej korekcji dawki paliwa. W przypadku uszkodzenia zaworu wylotowego sygnał korekcji długoterminowej dawki paliwa wzrasta w porównaniu z zaworem sprawnym. Czy jest to korekcja przypadkowa czy systematyczna?

Dalszym badaniom oraz analizie poddano sygnał drganiowy jednostki napędowej. Żaden z ogólnie znanych wskaźników uzyskanych w trakcie analiz czasowych jak i częstotliwościowych, przepróbkowanych do dziedziny kąta obrotu wału silnika oraz ich liniowa kombinacja, zdaniem Autorki, nie pozwoliła na zaproponowanie monotonicznej i łatwej do obliczenia miary uszkodzenia zaworu wylotowego. Wniosek ten nie poparty został jednak prezentacją wykorzystanych metod i narzędzi w celu uzyskania takiej miary.

W procedurze obliczania widma różnicowego wykorzystano sygnał zarejestrowany dla stanu jednostki po wymianie zaworu na nowy. Sygnał ten został potraktowany jako informacja o ogólnym zużyciu eksploatacyjnym obiektu z wyłączeniem niesprawności badanego zaworu wylotowego. Wydaje się, że prezentowane widma różnicowe i ich poszczególne składowe są zależne od długości rejestrowanego sygnału, sposobu uśredniania widma itp. Jednak brakuje omówienia tego problemu oraz wymagań minimalnych do realizacji algorytmu diagnozowania.

Przedstawiono przebiegi czasowe przyspieszenia drgań oraz odpowiadające im widma częstotliwościowe. Wyselekcjonowano pasma częstotliwości związane z badanym uszkodzeniem. Wskazane byłoby przeanalizowanie przykładowych

charakterystyk czasowo-częstotliwościowych dla zlokalizowania wybranych pasm w ramach cyklu pracy silnika.

Jako podstawowe osiągnięcie Autorki rozprawy należy uznać zaproponowanie i zweryfikowanie w trakcie starannie przygotowanych i przeprowadzonych badań stanowiskowych i drogowych, miary w postaci całki w ograniczonym zakresie częstotliwości z widma niekoherentnego zakłócenia (uszkodzenia). Jest to miara proporcjonalna do energii zmiennego w czasie eksploatacji nieliniowego zaburzenia sygnału. Opracowany algorytm stwarza możliwość wyodrębnienia pasm częstotliwości charakterystycznych dla różnych typów uszkodzeń, co zwiększa dodatkowo jego skuteczność.

Staranna i zwięzła redakcja pracy jest jej zaletą, ale brak niektórych informacji utrudnia interpretację przedstawionych wyników. Pojedyncze uchybienia redakcyjne (np. brak wyjaśnień niektórych skrótów, niezgodność deklarowanych na stronie 69 czterech stanów jednostki napędowej i porównywanych przebiegów czasowych na Rys. 7.20) i językowe (np. „Czas otwarcia wtryskiwacza jest wypadkową dawki paliwa”, „zastosowanie pomiaru rejestracji”) nie wpływają na jej ogólną ocenę.

Generalna opinia jest jednoznacznie pozytywna.

3. Ocena końcowa.

Przedstawiona do recenzji praca potwierdza dużą wiedzę teoretyczną i praktyczne umiejętności Autorki w zakresie metod i narzędzi badawczych, prowadzące do formułowania wniosków naukowych.

Uważam, że w przedłożonej rozprawie poprawnie sformułowano, opisano i w pełni rozwiązano oryginalne zadanie naukowe.

Na bazie obszernych czynnych eksperymentów diagnostycznych zbadano podatność różnych znanych miar i zaproponowano procedurę analizy pozwalającą na diagnostykę stopnia uszkodzenia zaworu wylotowego silnika spalinowego, niezależnie od występujących równolegle uszkodzeń podobnych, możliwą do implementacji w trybie „on-line” niezależnie od aktualnych parametrów pracy i stanu zużycia silnika.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr. inż. Doroty Górnickiej pt. „Wykorzystanie sygnału drganiowego w diagnozowaniu uszkodzeń zaworów silników spalinowych” spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki i wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Andrzej Puchalski

