

dr hab. inż. Rafał Longwic, prof. PL

Lublin, 15 września 2015

Politechnika Lubelska

Wydział Mechaniczny

Katedra Pojazdów Samochodowych

RECENZJA

Rozprawy Doktorskiej

mgr. inż. Tomasza Szczepańskiego

Podstawą niniejszej recenzji jest pismo Prodziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej prof. nzw. dr. hab. inż. Witolda Marowskiego nr SiMR-29/23/2015 z dnia 17 lipca 2015 roku.

1. Charakterystyka ogólna rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska pt.: „Metoda oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych” składa się ze 132 stron, w tym ze streszczenia, wykazu oznaczeń, siedmiu numerowanych rozdziałów i wykazu piśmiennictwa. W poszczególnych rozdziałach poruszono następujące zagadnienia:

Rozdział pierwszy zawiera krótkie definicje pojęć stosowanych w rozprawie: model silnika wykorzystywany w dysertacji, parametry pracy silnika, warunki pracy silnika, stan pracy silnika, proces stanu pracy silnika i proces warunków jego pracy, proces statyczny i dynamiczny, stan dynamiczny i statyczny, warunki dynamiczne i statyczne, użytkowe właściwości silnika spalinowego.

Rozdział drugi zawiera: analizę stanu wiedzy w zakresie badań silników spalinowych w stanach dynamicznych oraz jej syntezę. Opisano stan wiedzy w zakresie: teoretycznych podstaw pracy silnika w stanach dynamicznych, porównania

stanów statycznych i dynamicznych, badania silnika w testach dynamicznych, modelowania pracy silnika lub jego części w stanach dynamicznych, wybranych warunków dynamicznych pracy silnika.

W **rozdziale trzecim** przedstawiono szczegółowo cel pracy i jej zakres. Sformułowano tezę pracy.

W **rozdziale czwartym** opisano własną metodę oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych. Wymieniono najistotniejsze elementy tej oceny: korektę przesunięć fazowych w torach pomiarowych, zmianę zależności operatorowych silnika na zależności funkcyjne, wprowadzenie dziedziny zbioru warunków, niepowtarzalność stanów pracy silnika w danych warunkach pracy, wizualizację wielowymiarowych zależności.

Rozdział piąty poświęcony jest badaniom empirycznym wykorzystywanym do weryfikacji proponowanej metody. Opisano sposób weryfikacji metody, szczegóły w zakresie prowadzonych badań empirycznych, sposób przygotowania wyników badań empirycznych do weryfikacji metody.

W **rozdziale szóstym** zaprezentowano zastosowanie i weryfikację proponowanej metody oceny użytkowych właściwości silnika w stanach dynamicznych. Posługując się wynikami badań empirycznych pokazano: korektę przesunięć fazowych w torach pomiarowych, zmianę zależności operatorowych silnika na zależności funkcyjne, wprowadzenie dziedziny stanów, niepowtarzalność stanów pracy silnika w danych warunkach pracy, wizualizację wielowymiarowych zależności.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie i wnioski oraz propozycje dalszych kierunków badań.

W **rozdziale ostatnim** przedstawiono wykaz piśmiennictwa. Składa się on z 88 pozycji. Zdecydowana większość prac posiada datę publikacji po roku 2002.

Pracę napisano czcionką Times New Roman o wielkości 10 pkt, z interlinią 1,5 pkt. Praca zawiera 115 rysunków, trzy tabele i 16 zależności matematycznych.

2. Ocena podjętej tematyki i treści rozprawy

Rozważania dotyczące specyfiki pracy silnika spalinowego w warunkach dynamicznych prowadzi się od początku ubiegłego wieku. Czyni się to z uwagi na oczywiste fakty, które wskazują, że praca silnika spalinowego pojazdu trakcyjnego

przebiega głównie w warunkach dynamicznych. Mimo to nie opracowano dotychczas spójnej i jednoznacznej metodyki badań silnika spalinowego w warunkach dynamicznych – nie powstały uregulowania normatywne dotyczące tego typu badań. W ostatnim okresie wzrasta wprawdzie zainteresowanie zagadnieniami pracy silnika w warunkach dynamicznych ale jednak głównie z uwagi na uregulowania prawne dotyczące poziomu emisji składników toksycznych spalin, które to uregulowania wymuszają kontrolę emisji w warunkach dynamicznych.

Istnieje natomiast niedostatek prac, w których wyjaśnianoby eksperymentalnie specyfikę pracy silnika spalinowego w warunkach dynamicznych oraz przyczyny obserwowanych różnic w przebiegu procesów roboczych w stosunku do porównywalnych warunków statycznych. Istnieje również, o czym wspomniano, istotny brak w zakresie metodyki oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w warunkach dynamicznych. Prowadząc własne badania w tym zakresie sądziłem, że do wspomnianej oceny i porównań może posłużyć test polegający na swobodnym rozpędzaniu silnika. Zachęcałoby do tego prostota jego realizacji a więc i pełna powtarzalność. Niestety złożoność zjawisk fizycznych towarzyszących próbie swobodnego rozpędzania oraz znaczący wpływ prędkości początkowej, z której realizowany jest ten test nie pozwalają na uznanie tej metody jako mogącej służyć do oceny własności użytkowych silników spalinowych. Dodatkowo bardzo silnie uwidacznia się w próbie swobodnego rozpędzania wpływ warunków pracy na pomiar ciśnień wewnątrz komory spalania. Niesie to za sobą szereg trudności obliczeniowych przy wyznaczaniu parametrów pracy silnika w warunkach dynamicznych. Bardzo dużą trudność stanowi również pomiar natężenia emisji spalin. Jest to natomiast bardzo dobra metoda, która pozwala na obserwację specyfiki pracy silnika spalinowego w warunkach dynamicznych, a od dawna stosowana jest w diagnostyce.

Przedstawiona rozprawa doktorska uzupełnia wspomniany niedostatek w zakresie opracowania spójnej metodyki, która umożliwiłaby ocenę właściwości użytkowych silnika. Autor podjął się realizacji bardzo ambitnego celu tj.

opracowania metody oceny użytkowych właściwości silnika spalinowego w stanach dynamicznych dzięki rozwiązaniu najważniejszych problemów metodycznych.

Określono powyższe problemy metodyczne. Bardzo trafnie sformułowano je jako:

1. Istnienie przesunięć fazowych w torach pomiarowych.
2. Operatorowy charakter zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami pracy silnika.
3. Wielowymiarowość zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami pracy silnika.
4. Stosunkowa duża niepowtarzalność wartości wielkości fizycznych.
5. Problemy z wizualizacją zależności pomiędzy poszczególnymi parametrami pracy silnika.

Autor na podstawie analizy wstępnej wskazał problemy najistotniejsze czego wyraz dał w sformułowanej tezie pracy:

„Dzięki aproksymacji zależności operatorowych, opisujących właściwości silnika, funkcjami o wartościach liczbowych oraz racjonalizacji oceny niepowtarzalności wyników badań empirycznych istnieje możliwość kompleksowego ujęcia zagadnienia stanów dynamicznych w silniku spalinowym, co w konsekwencji doprowadzi do oceny jego użytkowych właściwości w czasie dynamicznej pracy”.

Tezę powyższą konsekwentnie dowodzą w kolejnych rozdziałach pracy począwszy od rozdziału pierwszego gdzie zdefiniowano stosowane pojęcia. W zakresie tym istnieją w odniesieniu do stanów dynamicznych nieścisłości i błędy metodologiczne. Autor podjął próbę naprawy tego stanu rzeczy. Pracę oparł o dwa konsekwentnie wykorzystywane pojęcia: warunków pracy silnika i stanów pracy silnika. Sformułowano dodatkowo pojęcia procesu statycznego i dynamicznego, stanu statycznego i dynamicznego oraz kluczowe dla pracy pojęcie użytkowych właściwości silnika.

W pracy zawarta jest szczegółowa analiza stanu wiedzy w zakresie działania silników spalinowych w stanach dynamicznych. Autor dokonał bardzo trafnego doboru piśmiennictwa. Jest ono aktualne a całą płaszczyznę dotychczasowej wiedzy w

zakresie tematu podzielono na główne wątki tj. podstawy teoretyczne, porównanie stanów statycznych i dynamicznych, badania silników w testach dynamicznych, modelowanie pracy silnika w stanach dynamicznych, szczegółowa analiza pracy silnika w stanach dynamicznych. Przedstawiono również krótką syntezę wykonanej analizy piśmiennictwa. Wykazano, że istnieje niedostatek prac poruszających tematykę podjętą w rozprawie.

Najistotniejszym rozdziałem pracy jest rozdział czwarty, w którym autor podjął próbę rozwiązania metodologicznych problemów związanych z oceną właściwości użytkowych silnika w stanach dynamicznych. W zakresie problemu z przesunięciem fazowym w torach pomiarowych omówiono przyczyny występowania tego typu przesunięć. Proponuje się wykonanie korekcji przesunięć poprzez wyznaczenie funkcji określającej zależność czasu zwłoki pomiaru od natężenia przepływu spalin $T(V_s)$. Zaproponowano metodę empiryczną dla określenia tej funkcji. Miałaby ona polegać na przeprowadzeniu serii testów odpowiedzi na wymuszenie impulsowe. W dalszej części omawianego rozdziału pokazano teoretyczną metodę ustalania przebiegu $T(V_s)$. Wykazano, że funkcja ta ma postać funkcji hiperbolicznej. Opisano trudności metodologiczne w zakresie ustalenia stałych współczynników funkcji hiperbolicznej. Zwrócono uwagę na fakt, że wspomniana funkcja odzwierciedla wiele zjawisk okresowych występujących w analizowanych przebiegach a zatem powstaje potrzeba ograniczenia zakresu optymalizowanych współczynników funkcji hiperbolicznej. Metoda ta jest jednak wątpliwa bo funkcja opisująca kryterium optymalizacji nie musi mieć maksimum lokalnego w przyjętej dziedzinie funkcji. Zaproponowano zatem metodykę polegającą na znajdowaniu teoretycznej zależności $T(V_s)$ na podstawie krótkich funkcji korelacji określonych dla krótkich przedziałów czasu. Opisano ograniczenia i zagrożenia wynikające z przyjęcia takiej metody.

W rozdziale 4.2 pracy przedstawiono zmianę zależności operatorowych na zależności funkcyjne. Przedstawiono model przyczynowo - skutkowy silnika typu „czarna skrzynka”. Opisano zależnością 4.7 model fizyczny odzwierciedlający w najprostszym sposobie warunki dynamiczne pracy silnika i pokazano uproszczenie ww.

równania w przypadku zaistnienia warunków statycznych. Dla przyjętego modelu zapisano zależność operatorową obrazującą natężenie emisji spalin $E_x(t)$. Przyjęto, że dziedziną wspomnianej zależności operatorowej są wartości ze zbioru prędkości obrotowa wału korbowego silnika, momentu oporów zadanego na wale korbowym silnika, parametru sterowania silnikiem. Bardzo ciekawe rozważania prowadzono na stronie 41 pracy. W warunkach dynamicznej pracy silnika dany stan pracy silnika jest warunkiem początkowym dla kolejnego stanu pracy silnika. Zachodzi zatem pytanie w jak dalekiej chwili czasowej ten wpływ jest istotny. Z problemem tym stykałem się zwłaszcza w próbie swobodnego rozpędzania silnika. Autor stwierdza, że dla potrzeb określenia natężenia emisji spalin istotny jest stan pracy poprzedzający stan analizowany a zatem przyjmuje we wzorze 4.12 wartość parametru $k=1$. W dalszym akapicie wprowadzono pochodną funkcji natężenia emisji spalin. Wyjaśniono sens wprowadzenia kolejnych pochodnych dla analizy pracy silnika w warunkach dynamicznych.

W rozdziale 4.3 opisano metodę wprowadzania dziedziny zbioru warunków. Metodę taką stosowałem w analizach dotyczących próby swobodnego rozpędzania. Przyjmowałem podział parametru wejściowego jakim była prędkość obrotowa na przedziały, które przyporządkowane były poszczególnym cyklom pracy silnika. Nie określałem jednak, że wartością reprezentatywną w danym przedziale jest wartość najliczniej występująca a wartość średnia. Podejście autora jest jednak ciekawe a poruszenie tego tematu wskazuje, że dogłębnie przeanalizował on specyfikę analizy danych rejestrowanych w warunkach dynamicznych. Słusznie zauważono również, że zaletą stosowania dziedziny zbioru warunków jest możliwość wyboru najistotniejszych zbiorów warunków pracy silnika pod względem różnych kryteriów istotności.

W rozdziale 4.4 autor poruszył zagadnienie niepowtarzalności stanów pracy silnika. Zagadnienie to jest w mojej ocenie podobne ilościowo zarówno w warunkach dynamicznych jak i statycznych. Pod warunkiem, że prawidłowo prowadzony będzie eksperyment w warunkach dynamicznych a niepowtarzalności poszukiwać będziemy

w odpowiadających sobie stanach pracy silnika. Zgadzam się, że przyczyną niepowtarzalności są zjawiska przypadkowe i niedoskonałość analizy wyników badań. Trzeba zatem dochować staranności w zakresie przyjętej metody analizy wyników badań ale jeśli już taką metodę przyjmujemy to obserwowana niepowtarzalność jest złożeniem (superpozycją) wymienionych przyczyn i nie ma możliwości aby wskazać na ilościowy udział danej przyczyny w poczynionej obserwacji. Autor próbuje zastosować pojęcie zbiorów rozmytych do prowadzenia analizy w zakresie niepowtarzalności. Świadczy to o doskonałym przygotowaniu metodologicznym autora pracy ale mnie ta metoda nie przekonuje. Uważam, że wystarczające jest w tym zakresie podejście Heywooda opisaną prostą zależnością 4.16 – choć w prostocie tej są pewne szczegóły istotne dla analiz prowadzonych w warunkach dynamicznych.

W rozdziale 4.5 dokonano usystematyzowania w zakresie metod wizualizacji zależności wielowymiarowych opisujących pracę silnika w warunkach dynamicznych. Nie są to metody nowe ale systematyka ta jest istotna z punktu widzenia całościowej metodyki opisu własności użytkowych silnika w stanach dynamicznych. Przytoczono zatem dwie metody: wizualizację wyników w pojedynczym zbiorze stanów pracy i wizualizację zależności dla kilku sąsiadujących zbiorów stanów.

Autor nie kończy swojej dysertacji na rozdziale 4. W rozdziale 5 opisuje badania empiryczne wykorzystane do weryfikacji metody. Badania te prowadzone były na hamowni podwoziowej według trzech testów: Autobahn, FTP-75 oraz Stop&Go. Rejestrowano między innymi takie parametry jak: prędkość obrotową silnika, moment oporów na wale korbowym silnika, stopień ustawienia urządzenia sterującego silnikiem, natężenia przepływu powietrza w kolektorze dolotowym, natężenie emisji węglowodorów, natężenie emisji tlenku węgla, natężenie emisji tlenków azotu, natężenie emisji dwutlenku węgla, natężenie emisji cząstek stałych. Przebiegi ww. parametrów w zależności od czasu pokazano na kolejnych rysunkach zamieszczonych w pracy. Prowadzono po pięć realizacji danego testu.

W rozdziale 6 zastosowano metodykę opisaną w rozdziale 4 do danych empirycznych, których sposób pozyskania i wstępnej analizy opisano w rozdziale 5.

Oczywiście konsekwencją nadzwyczaj metodologicznie poprawnego rozdziału 4 jest pełne powodzenie w zakresie zastosowania proponowanej metody oceny własności użytkowych silnika do zbioru danych empirycznych. Rozdział 6 nie jest jednak jedynie miejscem gdzie dowodzi się ostatecznie tezę postawioną w pracy. Zawiera on wiele ciekawych informacji na temat specyfiki pracy silnika w warunkach dynamicznych. Najciekawsze są według mnie pod tym względem wykresy natężenia emisji w dziedzinie prędkości obrotowej i pochodnej prędkości obrotowej.

W rozdziale 7 zawarto podsumowanie wyników pracy w zakresie oceny metody, możliwości wykorzystania metody oraz propozycji dalszego rozwoju omawianego zagadnienia. Zawarte spostrzeżenia są trafne i precyzyjne. Dowodzą, że zrealizowano cel pracy i potwierdzono postawioną tezę.

Podsumowując należy stwierdzić, że praca stanowi istotny wkład autora w zagadnienie badań silnika spalinowego w warunkach dynamicznych. Istota i nowość podjętego problemu dotyczą w głównej mierze zaproponowanej metody oceny własności użytkowych silnika. Praca oparta jest o niezwykle precyzyjnie i starannie przygotowane i wykonane analizy teoretyczne i badania empiryczne. Autor stworzył w pełni dysertabilne opracowanie naukowe. Należy podkreślić, że oceniana rozprawa doktorska jest jedną z nielicznych dotyczących pracy silnika w warunkach dynamicznych – bardzo trudnych w opisie teoretycznym i weryfikacji empirycznej. Świadczy to o odwadze autora ale również i o jego doskonałym przygotowaniu metodologicznym do prowadzenia pracy naukowej. W powyższy sposób uzasadniam konieczność wyróżnienia rozprawy a formalny wniosek w tej sprawie przedstawiam w punkcie 4 recenzji.

3. Uwagi krytyczne do rozprawy doktorskiej

Szczegółowa analiza treści rozprawy skłania do sformułowania kilku uwag krytycznych, mających w większości charakter dyskusji naukowej:

1. W zamieszczonym spisie oznaczeń zwyczajowo należało podać jednostki miary przy wymienionych wielkościach fizycznych.

2. Uważam, że pojęcie stan dynamiczny i warunki dynamiczne można stosować zamiennie. Autor czyni tak wielokrotnie w pracy. Dla przykładu proces swobodnego rozpędzania silnika jest zbiorem stanów dynamicznych ale każdy z tych stanów określa warunki początkowe dla stanu kolejnego. Zatem można chyba stwierdzić, że proces ten przebiega w warunkach dynamicznych.
3. Na stronie 33 w wierszu 14 stwierdzono, że czas zwłoki T jest funkcją natężenia emisji spalin V_s – chodzi chyba o natężenie przepływu spalin. Na dole strony 33 opisując sposób empirycznego poszukiwania zależności $T(V_s)$ popełniono ten sam błąd. Ponadto przedstawiona metoda empiryczna budzi moje wątpliwości w zakresie nieuwzględnienia lepkości gazów spalinowych, które w różnych warunkach pracy silnika znajdować się będą w odmiennych udziałach objętościowych w spalinach. Dlatego też uważam, że w zależności 4.2 parametr A winien być opisany jako czynne pole przekroju przewodu.
4. Na stronie 9, 39, 40 i 42 przedstawiono model przyczynowo – skutkowy silnika typu „czarna skrzynka”. Dlaczego w modelu tym nie uwzględniono wektora zakłóceń, które z założenia mają charakter losowy? Elementami tego wektora mogą być parametry otoczenia, losowe oscylacje parametrów sterowania silnikiem lub losowe procesy w komorze spalania powodujące niepowtarzalność kolejnych obiegów termodynamicznych silnika. Takie podejście dałoby możliwość głębszego wnioskowania w zakresie obserwowanej niepowtarzalności pracy silnika. Profesor Cichy w swoich pracach proponował również wprowadzenie wektora obrazującego konstrukcję silnika. Wektor ten miał określać możliwe do zmiany parametry konstrukcyjne i nastawy eksploatacyjne.
5. Autor definiuje niepowtarzalność procesów roboczych za pomocą wskaźnika będącego ilorazem odchylenia standardowego i wartości średniej danego parametru. Uczynił to wzorem prac Heywooda – strona 48,

zależność 4.16. **Należało podać jakim wzorem określone jest odchylenie standardowe występujące w tej zależności.** W pracach traktujących o silnikach spalinowych bardzo często popełniany jest bowiem błąd. Otóż pod pierwiastkiem widnieje wartość średnia a suma dzielona jest przez liczbę obserwacji - k. Uważam jednak, że z formalnego punktu widzenia mamy tu do czynienia z pewną nieściśłością matematyczną. Średnie odchylenie standardowe liczone jest dla skończonej populacji a we wzorze określającym ten parametr występuje nie wartość średnia a wartość oczekiwana w populacji μ . Jeżeli pod znakiem sumy znajduje się wartość średnia to suma ta winna być dzielona przez k-1 a nie k. Parametr taki nazywany jest wówczas estymatorem odchylenia standardowego i oznaczany jest najczęściej przez s. Estymator odchylenia standardowego obliczany jest dla próby z populacji. W prowadzonych badaniach proces ma nieskończenie wiele realizacji a wykonujemy próbę o niewielkiej liczności. Heywood badał niepowtarzalność w warunkach statycznych na podstawie realizacji kilkuset cykli pracy silnika. Stąd przyjmował, że próba jest duża i zbliżona do liczności skończonej populacji. W badaniach w warunkach dynamicznych nie jest możliwe zrealizowanie tak licznej próby z uwagi na możliwość uszkodzenia silnika stąd ten szczegół jest istotny i winien być opisany w pracy.

6. Na stronie 45 pracy autor pisze: „Proponuje się dla każdego parametru wejściowego wyznaczenie jego histogramu, który pokaże jak często występują poszczególne wartości. Wówczas możliwe będzie stwierdzenie, które wartości są najważniejsze (najliczniejsze)”. Czy ta sama metoda określenia „ważności” wartości może być zastosowana dla małej liczby obserwacji w zbiorze danego parametru wejściowego? Czy nie byłoby bezpieczniej posługiwać się wartością średnią z obserwacji?
7. Na stronie 47 użyto pojęcia: „zbiór stanów o dużej mocy”. Jak autor definiuje to pojęcie?

8. Z uwagi na moje naukowe zainteresowania niepowtarzalnością pracy silnika spalinowego proszę o próbę wyjaśnienia - jakie powody po stronie przebiegu procesów roboczych silnika wpływają na obserwowaną niepowtarzalność w zakresie emisji składników toksycznych spalin?
9. Autor na stronie 32 pracy stwierdza, że: „Każdy tor pomiarowo – rejestracyjny ma inny czas opóźnienia T, mierzony od chwili zaistnienia mierzonego zjawiska fizycznego do chwili jego zarejestrowania”. Czy jest tak w istocie jeśli używamy karty pomiarowej z tzw. pamięcią wewnętrzną? Uważam, że stwierdzenie to jest zasadne raczej w odniesieniu do pomiarów emisji spalin.

4. Ocena końcowa rozprawy

Przedstawione uwagi krytyczne mają w głównej mierze charakter dyskusji naukowej i nie wpływają na ogólną bardzo wysoką ocenę rozprawy. Uważam, że kandydat rozwiązał złożony problem naukowy, wykazał się samodzielnością w pracy oraz odpowiednią wiedzą teoretyczną i praktyczną w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn. **Podsumowując stwierdzam, że Kandydat spełnia wymagania stawiane przez ustawę z 14 marca 2003 r. „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” i wnioskuję o dopuszczenie mgra inż. Tomasza Szczepańskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej. Jednocześnie proszę o rozważenie wniosku o wyróżnienie rozprawy doktorskiej.**

