

dr. hab. inż. Zbigniew Kneba prof. uczelni
Instytut Energii
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Okrętownictwa
Politechnika Gdańska
ul Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

Gdańsk, 01.08.2023

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej magistra inżyniera Krystiana Hennka
pt.: "Sterowanie mocą silnika spalinowego w warunkach zmiennego obciążenia"

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą opracowania recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Opolskiej z dnia 06.07.2023 roku informujące mnie o powołaniu na recenzenta pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Krystiana Hennka.

2. Aktualność tematu rozprawy

Wobec szerokiej dyskusji na temat przyszłości spalinowych układów napędowych samochodów i widocznych już zmian w produkowanych nowych ich odmianach, temat rozprawy uznaję za aktualny. Praca opiera się na wybranym spalinowym układzie napędowym popartym wieloletnimi badaniami pracowników Katedry Pojazdów Politechniki Opolskiej, na temat syntezy algorytmów sterowania silnikiem spalinowym i układem napędowym, jako zintegrowanego układu decydującego w efekcie końcowym o sile napędowej samochodu. Rozwijana siła napędowa w konkretnych warunkach drogowych zdeteminowanych prędkością samochodu, decyduje o rozwijanej mocy przez cały układ napędowy. Przy powszechnym stosowaniu dzisiaj hybrydowych układów napędowych wydawałoby się, że zagadnienia sterowania klasycznym układem napędowym są nieaktualne a jednak na rynek wprowadzane są wciąż nowe połączone spalinowo-elektryczne jednostki napędowe, w których stosuje się podpowiedzi dla kierowcy, jak ma sterować mocą jednostki napędowej dla osiągnięcia celów jazdy oszczędnej albo dynamicznej. Uważam, że proponowanie wskaźników oceny dobroci energetycznej układu napędowego samochodu jest najważniejszym zadaniem badaczym. Prowadzi to do ujednoczenia oceny nowych konstrukcji układów napędowych, tak jak dąży się do ujednoczenia testów emisyjności samochodów na całym świecie.

2. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Praca doktorska pt.: "Sterowanie mocą silnika spalinowego w warunkach zmiennego obciążenia" wykonana została pod kierunkiem promotora Pana prof. dr hab. inż. Jarosława Mamali i promotora pomocniczego dr inż. Mariusza Graby.

Przedmiotem rozprawy jest zaproponowanie sterowania mocą silnika samochodowego tak aby zminimalizować zużycie paliwa przy akceptowalnym poziomie dynamiki samochodu. Opracowano to zagadnienie dla prostego układu napędowego silnik spalinowy - przekładnia wybieralna manualnie – napęd jednej osi. W badaniach skupiono się na fazie przyspieszania samochodu od założonej prędkości początkowej do końcowej na jednym (IV) biegu. Podstawą do wyznaczenia ekonomicznej linii sterowania była charakterystyka ogólna, uzyskana z pomiarów na hamowni podwoziowej w warunkach zmiennego obciążenia dla wybranego przełożenia w układzie przeniesienia napędu i wymuszonego stałego położenia pedału przyspieszenia w procesie rozpędzania samochodu. Zweryfikowano

Wpłynęło dn. 22.08.2023

L. dz. RNDJM/12/2023

zaproponowaną linię sterowania przez liczne pomiary przyspieszania na hamowni podwoziowej na odcinku 400 m.

3. Zawartość rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa ma charakter eksperymentalno-analityczny. Treść przedstawiono na 119 stronach w tym znalazły się spis treści, wykaz oznaczeń, spis literatury i streszczenie. Pracę podzieloną na 8 rozdziałów i wiele podrozdziałów. Praca jest bogato ilustrowana głównie własnymi rysunkami autora.

Rozdział 1. pt.: „Wprowadzenie” uzasadnia aktualność podjęcia tematu sterowania układami napędowymi samochodów. Doktorant zwraca uwagę na wpływ człowieka na proces sterowania na warunki ruchu drogowego, terenu i pogody. Przywołuje liczne publikacje na temat sterowania w warunkach zmiennego obciążenia. Uzasadnia, że podejmuje temat badań fazy przyspieszania samochodu gdyż stanowi ona często graniczne obciążenie całego układu napędowego. Dążenie do zmniejszenia energochłonności ruchu samochodu nie może zmniejszyć jego bezpieczeństwa czynnego na przykład podczas manewru wyprzedzania szczególnie na drogach jednojezdniowych. Autor wybrał z literatury definicje parametrów opisujących proces przyspieszania samochodu i opisujących energochłonność ruchu i skomentował je na końcu tego rozdziału.

Rozdział 2. pt.: „Sterowanie mocą w układzie napędowym samochodu osobowego”. Autor wyjaśnił na początku rozdziału kryteria jakie musi spełniać sterowanie układem napędowym pojazdu drogowego. Zwrócił uwagę na Europejskie standardy emisji. Ten rozdział również oparty jest na pracach zacytowanych z literatury z nielicznymi komentarzami doktoranta, ze zwróceniem uwagi na trudne kwestie dalszego wykorzystania silników spalinowych do napędu samochodów. W środkowej części rozdziału zwrócono uwagę na ciągle istniejący, mimo automatyzacji, wpływ kierowcy i warunków zewnętrznych – układ Kierowca-Samochód-Otoczenie-Komunikacja. Wspomniana automatyzacja umożliwia uniemożliwienie kierowcy na jazdę nieekonomiczną lub uciążliwą dla środowiska. W tym kontekście temat rozprawy nabiera sensu. Zastosowanie układów napędowych jeszcze bardziej zautomatyzowanych na przykład hybrydowych bądź elektrycznych, powoduje zwiększenie masy i zmniejszenie ładowności samochodu a nie jest to przydatne w jazdach pozamiejskich. Autor kończy rozdział stwierdzeniem, że nie ma w literaturze jednego wskaźnika do oceny dynamiki samochodu.

Rozdział 3. pt.: „Charakterystyka strategii sterowania układem napędowym” wprowadza pojęcia, które będą wykorzystywane w dalszej części pracy przy opracowaniu badań autora. Zdefiniowano ekonomiczną linię sterowania. Opisano wyniki badań na symulatorze obciążenia drogowego według własnych testów innych autorów i testu NEDC. W ostatnim podrozdziale 3.3. przedstawiono bilans energetyczny samochodu. Trzeci rozdział jest ostatnim w którym autor wykorzystał głównie prace innych badaczy.

Rozdział 4. pt.: „Cel, teza i zakres pracy” opisuje jakimi zagadnieniami autor zajął się w rozprawie. W tym najkrótszym rozdziale autor wyjaśnia, że chce określić jak poprawić właściwości trakcyjne samochodu przy zmiennym obciążeniu układu napędowego a także, że szuka wskaźnika oceny dynamiki samochodu w fazie przyspieszania, który będzie zawierał właściwości energetyczne i dynamiczne.

Rozdział 5. pt.: „Obiekt, stanowisko, narzędzia i metodyka badań własnych” przedstawia użyty przez autora samochód, aparaturę pomiarową i sposoby prowadzenia testów przyspieszania na hamowni

podwoziowej. Przyjęto 2 sposoby testowania parametrów przy przyspieszaniu: I zwiększanie prędkości od 45 km/h do 126 km/h na IV biegu; II przyspieszanie od prędkości 45 km/h do chwili „przejechania” 400m. W czasie testów nastawiano różne stałe (podczas jednego testu) uchylenia pedału przyspieszenia. Wyniki pomiarów opracowano statystycznie prezentując je na licznych wykresach. Autor udowodnił w tym rozdziale, że opory bezwładności którymi on się zajmuje, mają dominującą rolę w zużyciu energii przez pojazd dla przyspieszeń przy stałej nastawie pedału przyspieszenia w szerokim przedziale prędkości jazdy.

Rozdział 6. pt.: „Wyznaczenie ekonomicznej linii sterowania”. Po wprowadzeniu opisującym pomiary na hamowni dla określenia jednostkowego zużycia paliwa autor przystępuje do wyznaczenia ekonomicznej linii sterowania. Opisuje tą linię w tabeli 6.1 jako kąt uchylenia pedału przyspieszenia w funkcji prędkości obrotowej. Założeniem autora jest takie zmienianie tego kąta aby dynamika rozpędzania samochodu pozostała na poziomie pracy silnika z minimalnym jednostkowym zużyciem paliwa przy charakterystykach częściowych a nie pełnej mocy, co jest lepiej widoczne na wykresie rys. 7.1 w następnym rozdziale rozprawy.

Rozdział 7. pt.: „Charakterystyka zespolona ekonomicznej linii sterowania” Chcąc zbadać wpływ odchylenia linii sterowania od ekonomicznej linii sterowania na zużycie paliwa i dynamikę autor wykonał pomiary dla 6 innych linii sterowania. Pomiary przeprowadzał dwu albo trzy krotnie dla każdej z linii. Ocenił zmiany jednostkowego zużycia paliwa, sprawności ogólnej, czasu przyspieszania, prędkości jazdy i pokonanej drogi. Udowodnił, że zastosowanie ekonomicznej linii sterowania zapewnia najwyższą sprawność silnika przy wydłużeniu czasu rozpędzania o 44% w stosunku do wykorzystania pełnej mocy silnika. Każda inna linia sterowania dawała gorsze wyniki dla tych dwóch kryteriów. Rozważania w podrozdziale 7.1 są bardzo szczegółowe i zawierają ocenę dynamiki zilustrowaną wieloma wykresami. W tym podrozdziale doktorant wprowadza definicję indeksu dynamiki i wykorzystuje ten indeks do ilustracji przebiegowego zużycia paliwa od uchylenia pedału przyspieszenia.

Rozdział 8. pt.: ”Podsumowanie i wnioski”. W rozdziale kończącym rozprawę autor podkreśla wagę sterowania w układzie napędowym samochodu przez kierowcę. Prognozuje dalsze istnienie napędów spalinowych w pojazdach. Stwierdza, że osiągnął cel pracy jakim było zaproponowanie punktów sterowania silnikiem poprawiające wskaźniki pracy układu napędowego w warunkach zmiennego obciążenia.

4. Ocena merytoryczna pracy

Dopóki nie będzie pojazdów autonomicznych to kierowca wpływa na jego energochłonność zwłaszcza w przebadanych przez autora fazach przyspieszania. Nawet po wprowadzeniu pojazdów elektrycznych ich energochłonność jest ważna. Częściowe zastąpienie kierowcy przez sterowanie elektroniczne w układzie napędowym daje wymierne korzyści przy akceptowalnych poziomach zmniejszenia dynamiki samochodu. Jednocześnie należy nadmienić, że od około 2010r producenci nagminnie wykorzystują oprogramowanie które na podstawie oceny różnych wskaźników pracy układu napędowego samochodu, podpowiada kierowcy jakiego biegu w przekładni powinien użyć w danych warunkach ruchu, czyli stosują różne linie ekonomicznego sterowania podobne do tych jakie zaproponował doktorant. Natomiast Doktorant w pracy zastosował odmienne podejście do wyznaczenia ekonomicznej linii sterowania, opierając się na częściowych charakterystykach trakcyjnych układu napędowego samochodu, co jest jego autorskim osiągnięciem.

W pierwszej części rozprawy (rozdziały 1-3) dokonano przeglądu badań innych autorów. Przegląd jest nieco zawężony głównie do prac szkoły naukowej z której wywodzi się autor. Drugi rozdział jest zredagowany nieco chaotycznie i brak w nim głównego wątku. Znajdują się w nim

zagadnienia ogólne jak normy emisji spalin i bardzo szczególnie jak wyniki pomiarów przedstawione na rys. 2.6. Kolejne rozdziały pracy są bardziej spójne i można w nich dostrzec cel jaki autor osiągnął.

Za najważniejsze osiągnięcia i główny wkład Doktoranta w rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna należy uznać:

- a) Wyodrębnienie oporu bezwładności pojazdu jako bardzo ważnego składnika oporów ruchu i zaproponowanie metodyki badań nad sterowaniem przy pokonywaniu tego oporu.
- b) Opracowanie metodyki programowania sterowania silnikiem podczas przyspieszania tak aby spełnić 2 kryteria oceny parametrów procesu, w oparciu o częściowe charakterystyki trakcyjne układu napędowego.
- c) Zdefiniowanie indeksu dynamiki jako parametru opisującego proces przyspieszania pojazdu.

Od strony merytorycznej praca została opracowana prawidłowo i nie budzi moich zastrzeżeń. Mam jednak prośbę do Doktoranta o wyjaśnienie albo doprecyzowanie następujących kwestii:

Na str. 21 9 wiersz od góry autor pisze, że zużycie paliwa i emisja, CO₂ to element decydujący o bezpieczeństwie czynnym podróżnych i marketingu samochodu. Uważam skojarzenie ilości zużywanego paliwa za dość luźno związane z bezpieczeństwem czynnym.

Na str. 24 12 wiersz od dołu chyba nie chodzi o skrzyżowaną dróg z inteligentnym oświetleniem lecz o system sterowania sygnalizatorami ulicznymi.

Na rys 3.1. Przedstawiono charakterystyki lecz nie podano dla jakiego silnika, a sięganie do literatury jest kłopotliwe gdyż jest to instrukcja do ćwiczenia laboratoryjnego.

W wielu miejscach rozprawy np. na str. 38 Doktorant używa pojęcia efektywność pracy silnika przy „dobrej dynamice” (powinno być dynamice pojazdu) ale nie ma definicji jaka dynamika jest dobra.

Autor nie pisze czy badania symulacyjne w rozdziale 3.1.3 przeprowadził on czy kto inny.

Wzór 8 na stronie 54 ma nieprawidłowo przypisaną jednostkę w [J]. Przedstawia właściwe bilansowanie strumieni energii w [J/s] a nie zużycie energii, jak autor opisuje w wykazie oznaczeń w E_T [J].

Nie zrozumiałe jest stwierdzenie na początku strony 55 „całkowite zużycie energii podczas jazdy z prędkością V=const jest równe sile napędowej.

Na stronie 59 podany cel pracy jest oczywisty, gdyż w tak skomplikowanym obiekcie jak układ napędowy samochodu zawsze istnieje możliwość poprawy wskaźników pracy w warunkach zmiennego obciążenia.

W tabelicy 5.1 zabrakło masy badanego samochodu.

Na stronie 88 w drugim akapicie od góry autor stwierdza: „Najwyższą sprawnością charakteryzuje się krzywa odpowiadająca pełnemu obciążeniu silnika”. Czy to stwierdzenie jest zgodne z przedstawioną analizą literatury i opisanymi w pracy badaniami Autora.

Przywołanie badań z literatury [14] z roku 1995 stwierdzających, że zużycie paliwa w jeździe miejskiej jest dwukrotnie większe niż w pozamiejskiej jest nieaktualne i nie pasuje do poziomu rozważań w rozprawie doktorskiej.

5. Uwagi szczegółowe dotyczące strony redakcyjnej pracy

Podczas lektury pracy można zauważyć nieliczne usterki: gramatyczne, powtórzenia treści albo potknięcia literowe. W całej pracy nie ujednolicono pojęcia energochłonności ruchu samochodu. W wielu miejscach używa słowa własności a powinien użyć słowa właściwości jakiegoś obiektu.

Wymienione powyżej uwagi krytyczne mają jedynie charakter porządkowy i nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę pracy. Mogą być pomocne Autorowi przy przygotowywaniu następnych prac.

6. Podsumowanie

Po przeczytaniu tytułu i wstępnym zapoznaniu się z pracą można by odnieść wrażenie, że w tym temacie już opracowano dawno wiele algorytmów sterowania układem napędowym, które są stosowane w nowych samochodach, jako dodatkowa informacja dla kierowcy, jaki bieg ma wybrać (jeśli ma możliwość wyboru) lub jak ma nacisnąć na pedał przyspieszenia. Lecz moim zdaniem ta praca ma walory:

- poznawczy – bo producenci nie udostępniają wiedzy jak programują sterowniki i wyznaczają linie sterowania czy jaką stosują metodykę badań. Jest to know-how koncernów motoryzacyjnych. Natomiast zastosowana w pracy metodyka wyznaczania linii sterowania oparta na częściowych charakterystykach trakcyjnych cechuje się nowym podejściem i uniwersalnością. Uniwersalnością bo może być ona implementowana do różnych nowych konfiguracji układów napędowych samochodów hybrydowych czy elektrycznych, a przy tym nie wymaga czasochłonnych badań na hamowni silnikowej.
- dydaktyczny bo kształci przyszłych programistów jak to można by zrobić, w sposób metodologiczny przedstawia wyznaczania linii sterowania, które można realizować na zajęciach ze studentami dla różnych samochodów.
- porządkujący naukę przez wprowadzenie własnej definicji indeksu dynamiki, który może być wprowadzony do rejestratorów parametrów ruchu potrzebnych dla ubezpieczycieli czy operatorów flot pojazdów.

Praca ma więc charakter użyteczny i ma wpływ na rozwój dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna.

Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Podsumowując stwierdzam że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Krystiana Henneka spełnia warunki stawiane przez ustawę o stopniach i tytułach naukowych – Ustawa z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce – Dz. U. 2022 r., poz. 574. Na tej podstawie wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Opolskiej o przyjęcie pracy doktorskiej Pana mgr. inż. Krystiana Henneka i dopuszczenie go do publicznej obrony.



