

Poznań, 28 marzec 2018 r.

Prof. dr hab. inż. Jerzy Merkisz
Instytut Silników Spalinowych i Transportu
Wydział Maszyn Roboczych i Transportu
Politechnika Poznańska

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Krawczyka
pt. „**Linear Generator Operated in Oscillating Mode as an Electric Vehicle
Range Extender**”
(promotor: prof. dr hab. inż. Antoni Szumanowski)

Podstawa opracowania:

Zlecenie

Politechniki Warszawskiej

Nr SIMR-4a/1/2018

z dnia 19.02.2018

1. OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY

Doktorant, mgr inż. Paweł Krawczyk podjął w pracy właśnie taki temat, stawiając sobie za jej cel, rozpoznanie wspomnianego zjawiska za pomocą badań symulacyjnych.

Rozprawę napisano w języku angielskim, liczy ona 235 stron tekstu obejmującego 7 rozdziałów, wykaz oznaczeń i skrótów oraz spis literatury zawierający 138 pozycji oraz załączniki.

W rozdziale pierwszym zatytułowanym **Introduction and goals of thesis** Doktorant przedstawił wstępne rozpoznanie tematyki rozprawy oraz tezy swojej pracy.

Postawiona została hipoteza mówiąca, że odpowiednio sterowany generator liniowy, w ramach urządzenia rozszerzającego zasięg, może zapewnić lepszą sprawność energetyczną samochodowi elektrycznemu o rozszerzonym zasięgu jazdy.

Wydaje się, że postawiona już na wstępie teza może być przedwczesna. Zasadne więc byłoby jej umieszczenie po krytycznym przeglądzie literatury i ocenie bieżących działań w tym temacie. Autor wprawdzie przedstawia tutaj wstępne informacje dotyczące układów o tłokach swobodnych, jednak na tej tematyce koncentruje się w kolejnym rozdziale. Właściwsze wydaje się więc jej przedstawienie na zakończenie rozdziału 2.

W rozdziale drugim Autor dokonuje analizy samochodu elektrycznego o rozszerzonym zasięgu. Podane zostały typy pojazdów o takiej funkcjonalności oraz ich bazowa struktura. To tutaj pojawiają się szczegółowe informacje o rozwiązaniach technicznych układów o tłokach swobodnych. W rozdziale tym podjęta zostaje decyzja dotycząca wyboru rozwiązania analizowanego w dalszej części pracy.

W tym samym rozdziale Autor przedstawia model silnika o tłokach swobodnych. Wydaje się, na podstawie kolejnych treści pracy, że model ten jest potraktowany bardzo ogólnikowo, w porównaniu do dalszych modeli układów elektrycznych napędu.

Rozdział trzeci, w którym zawarto podstawy Autorskiego stanowiska do badań generatora liniowego. Autor już na wstępie informuje o zastąpieniu silnika o tłokach swobodnych układem elektrycznym. Silnik taki prawdopodobnie nie umożliwi uzyskania rzeczywistych warunków pracy silnika spalinowego, co może powodować, że uzyskane wyniki będą obarczone błędem „układu rzeczywistego”. Niestety błąd ten jest minimalizowany, gdyż silnik elektryczny nie będzie odwzorowywał pracy silnika spalinowego z jego fluktuacjami prędkości obrotowej i zmianą przyspieszeń podczas wykonywania zwrotów zewnętrznych.

Rozdziały te są ze sobą powiązane logicznie, jednak Autor nie wskazuje czytelnikowi wniosków z bieżących rozdziałów i nie wytycza kierunków dalszych prac. Każdy z rozdziałów kończy się więc bez żadnego konkretnego przewidywania dalszego działania.

Rozdział czwarty dotyczy weryfikacji modelu symulacyjnego generatora liniowego z użyciem testów stanowiskowych. Wykorzystując model symulacyjny laboratoryjnego generatora liniowego, zawartego w wirtualnym stanowisku badawczym, przedstawiono podobieństwa i różnice wartości i przebiegu parametrów między wynikami symulacji a wynikami pomiarów na stanowisku laboratoryjnym.

Tematem rozdziału piątego były testy generatora liniowego i urządzenia rozszerzającego zasięg pojazdu elektrycznego. Nacisk położona na sterowanie wartościami napięcia i prądu generatora liniowego z magnesami trwałymi podczas ładowania akumulatorów litowo-jonowych. W rozdziale tym dokonano także porównania sprawności między urządzeniem rozszerzającym zasięg z silnikiem o tłoku swobodnym połączonym z generatorem liniowym a urządzeniem z rzędowym silnikiem spalinowym połączonym z generatorem wyposażonym w wirnik. Porównano sprawności różnych generatorów oraz silników (o tłokach swobodnych i konwencjonalnych).

Rozdział szósty poświęcono symulacjom samochodu elektrycznego o rozszerzonym zasięgu. Dokonano dyskusji trybów pracy urządzenia rozszerzającego zasięg i strategii jego sterowania wraz z ograniczeniami. Nacisk położono na sterowanie okresami pracy urządzenia rozszerzającego zasięg w czasie cyklu jazdy w sposób, który ograniczy prąd akumulatora oraz straty w układzie napędowym.

Dokonano analiz związanych ze strategią sterowania pojazdu range extender w porównaniu do innych pojazdu tego typu oraz do pojazdu hybrydowego. Wykonano analizy dotyczące zużycia paliwa, energii elektrycznej, łącznego zużycia energii, kosztów użytkowania oraz emisji

dwutlenku węgla. Jest to najobszerniejszy rozdział pracy.

Ostatni rozdział podsumowuje rozprawę i zawiera wniosek, że główny cel pracy został osiągnięty poprzez realizację celów szczegółowych. Autor dosłownie przepisał cele szczegółowe zmieniając jedynie formę czasowników na dokonaną. Wydaje się, że we wnioskach te cele powinny być nieco bardziej rozwinięte, gdyż wpływają na końcowy wniosek główny.

2. OCENA ROZPRAWY

2.1. Uwagi ogólne

Pod względem merytorycznym i metodycznym pracę oceniam bardzo wysoko, gdyż ogólnie odpowiada postawionemu celowi, sformułowanym zadaniom badawczym i jest dostosowana do obowiązujących w tym zakresie wymogów. Układ logiczny treści rozprawy jest dość przejrzysty (pewne uwagi zaprezentowano wcześniej przy omawianiu zawartości pracy), a prezentowane treści są ze sobą dość dobrze powiązane z układem rozpatrywanych zagadnień. Pewną wątpliwość powoduje sam tytuł rozprawy, który dotyczy szerokiego zakresu prac (nie tylko symulacyjnych). Niestety praca dotyczy głównie zagadnień symulacyjnych, a badania na obiektach rzeczywistych ograniczono do minimum.

Przedstawiona w pracy koncepcja to innowacyjne rozwiązanie mogące znacząco poprawić opłacalność stosowania urządzenia typu range extender oraz jego sprawność w układzie zasilania. Zaproponowane rozwiązanie wykorzystuje dobrze przemyślaną konstrukcję, mogącą potencjalnie umożliwić stosowanie range extenderów w większości pojazdów elektrycznych, zgodnie z życzeniami klienta. Szacowane przez Autora oszczędności w eksploatacji pojazdu wynikające z zastosowania zaproponowanego systemu mogą pozwolić na dalszy wzrost konkurencyjności pojazdów elektrycznych na rynku samochodowym. Zwiększenie zasięgu pojazdów elektrycznych rozszerza zakres ich zastosowań do podróży pozamiejskich, zmniejszając również liczbę niezbędnych stacji ładowania akumulatorów.

Z obliczeń termodynamicznych wynika, że przy zaproponowanych ustawieniach i cyklu pracy układu, sprawność systemu zwiększającego zasięg, przyczyni się do zmniejszenia zużycia paliwa i tym samym emisji CO₂. Zastosowanie generatora liniowego o zaproponowanej konstrukcji, ma pozwolić na uzyskanie możliwie dużej mocy przy zachowaniu odpowiedniego chłodzenia. Podjęta przez Autora problematyka jest ważna i bieżąca, a proponowane rozwiązanie może przyczynić się do znaczącego zwiększenia zasięgu i sprawności układów napędowych pojazdów elektrycznych z układami typu range extender. Strategia kontroli układu zasilania, bazująca na utrzymaniu jak najmniejszej wartości prądu pobieranego z akumulatora, poprzez prąd generowany przez range extender oznacza mniejsze straty energii w układzie oraz

stabilniejszą jego pracę. Wprowadzenie zaproponowanego rozwiązania do użytku wymaga odpowiedniego doboru parametrów i ustawień pracy systemu zasilania, minimalizując również nagłe skoki zapotrzebowania na energię przez pojazd, co Autor uwzględnił w swoich rozważaniach.

Wnioski z przeprowadzonych analiz i badań są sformułowane trafnie i adekwatnie do ich zakresu i charakteru. Całość pracy cechuje staranna jej redakcja i poprawny styl pisarstwa (szczególnie, że pracę przedstawia się w języku angielskim). W zakresie omawianych zagadnień występują silne akcenty praktyczne wywodzące się z dobrego rozeznania Autora w zakresie rozpatrywanej problematyki.

Najważniejsze osiągnięcia pracy:

1. Sformułowanie ciekawego, wynikającego z praktycznego zastosowania problemu dotyczącego pojazdów typu range extender.
2. Szeroki zakres prac symulacyjnych: naukowych oraz ekonomicznych,
3. Staranne i przejrzyste wykonanie pracy. Poprawny język techniczny i konsekwencja w stosowaniu terminologii.

Budzi jednak pewien niedosyt lub zastrzeżenia kilka fragmentów rozprawy, które nie obniżają mojej ogólnej, pozytywnej oceny wszystkich aspektów pracy (wyboru tematu, uzasadnienia, analiz, przeprowadzonych badań, wnioskowania, itp.).

1. Tytuł pracy (o czym już wspomniano) sugeruje szeroki przekrój badań związanych z pojazdami typu range extender. W pracy natomiast takich badań eksperymentalnych trudno się doszukać. Dlaczego nie sprecyzowano tytułu pracy, który w dużym stopniu odpowiadałby jej zawartości?
2. W pracy dotyczącej pojazdów elektrycznych ważnym aspektem powinno być odróżnienie baterii od akumulatora. Oczywistym jest fakt występowania w języku angielskim słowa „battery”, jednak, dlaczego Autor stosuje ten wyraz również w streszczeniu polskim (użyto 12-krotnie, słowo akumulator nie pojawia się wcale)? Powszechnie bateria to ogniwo, które nie podlega ładowaniu, która to czynność jest kluczowym zagadnieniem tej pracy.
3. Brak jest w pracy logicznego schematu postępowania w celu uzyskania potwierdzenia postawionej hipotezy. Autor wskazuje na kolejne etapy badań, jednakże brak jest ogólnego celu takich działań.
4. Czy zastosowanie dwusuwowego silnika o swobodnych tłokach (przeciwsobnych) ma szansę zaistnienia w pojazdach samochodowych? Czy możliwe jest spełnienie limitów emisji spalin przez taki układ? Stwierdzenie takie wydaje się bardzo ryzykowne. Czy było

podyktowane takie rozwiązanie, które wymagałoby znacznych nakładów, aby spełnić np. obecne normy emisji? Autor wspomina o silnikach dwusuwowych Hondy i przytacza odwołania do literatury [32] (jednak jest ona z 2003 roku!). Wówczas nawet normy emisji spalin z silników dwusuwowych motocykli były bardziej liberalne.

5. Czy w badaniach stanowiskowych zastąpienie silnika o tłokach swobodnych silnikiem elektrycznym pozwala na uwzględnienie:
 - 5.1. Zmian prędkości obrotowej i liniowej, a co z tym się wiąże wartości i „jakości” generowanego napięcia/prądu?
 - 5.2. Nierównomierności tej prędkości, wynikającej ze stochastycznego procesu spalania?
6. Istotnym problemem współczesnych silników spalinowych jest kontrola ich procesu spalania. W jaki sposób autor chciałby tego dokonać w silniku dwusuwowym? Przedstawiony schemat układu nie wskazuje (Autor również o tych układach nie wspomina w pracy) na zastosowanie urządzeń sterujących (przepustnica, zmienny wznios zaworów, upust spalin, kierownice łopatek sprężarki).
7. W pracy doktorskiej Autor wyróżnia emisję cząstek stałych (PM) jako jeden z głównych problemów obecnie użytkowanych silników spalinowych. Stąd oczekiwać można, że analiza wyników zawierać będzie odniesienie do emisji cząstek dla proponowanego rozwiązania z range extenderem w porównaniu do standardowego pojazdu hybrydowego. Zaprezentowane zostały natomiast porównania emisji CO₂ z badań symulacyjnych do emisji dla pojazdu BMW i3 z range extenderem.
8. Z uwagi na powyższe, czy Autor oczekuje, że zastosowanie proponowanego rozwiązania w praktyce nie będzie wymagało dodania układów oczyszczania spalin lub filtrów cząstek stałych w celu spełnienia wymogów norm unijnych? Jeżeli nie, to czy zostało to uwzględnione w porównaniu kosztów proponowanego rozwiązania do dostępnych na rynku alternatyw?
9. W opisie proponowanego rozwiązania Autor zasugerował zastosowanie sprężyn jako metody odbicia tłoka w silniku bezkorbowym. Czy dokonano analizy sił tam występujących? Sprężyny te muszą mieć odpowiednio dobrany współczynnik sprężystości tak, aby był jak najlepiej dobrany do parametrów operacyjnych silnika i zakresu ruchu tłoków. Czy należy uwzględnić rozszerzalność cieplną ruchomej masy podczas nagrzewania się silnika do optymalnej temperatury pracy? Czy zmiany te wpłyną na możliwość kontroli procesu spalania i prędkości silnika przez układ sterowania silnikiem?
10. Zakładając brak dodatkowych kosztów zastosowanie zaproponowanego rozwiązania w pojazdach elektrycznych pozwoliłoby na zwiększenie ich ogólnej sprawności i zasięgu oraz

zmniejszenie zapotrzebowania na regularne ładowanie akumulatorów.

11. We wnioskach stwierdzono, że zastosowanie proponowanego rozwiązania zmniejszy emisję CO₂ z pojazdu, czy ta redukcja wynika jedynie z mniejszego zużycia paliwa? Jeżeli tak to można również oczekiwać zmniejszenia poziomu emisji innych związków szkodliwych emitowanych przez silniki spalinowe.

2.2. Uwagi szczegółowe

Rozprawa jest starannie opracowana pod względem redakcyjnym. Zwraça uwagę ogólnie poprawny zapis jednostek miar i bardzo dobra czytelność zamieszczonych (w dużej liczbie) rysunków. Terminologia stosowana w pracy jest ogólnie poprawna i konsekwentnie przestrzegana. Poniżej przedstawiono wybrane uwagi szczegółowe:

Uwagi edytorskie

1. Str. 31, zużycie paliwa w l/100 km. Wymagane dm³ lub jednostki SI
2. Str. 35, ak. 2: Autor stosuje czysto polską frazę „w okolicy”, która jest kalką językową. W tym kontekście sugeruje się zastosowanie „in the range of” lub „about”.
3. Str. 37 oraz 103: Autor często używa słowa „exemplary”, które w języku angielskim zwykle oznacza najbardziej pozytywny przykład, godny naśladowania, opisując rysunki takie jak 2.3 (str. 37) lub 3.8 (str. 103). Sugeruje się stosowanie słowa „example” jako opisu przebiegu przykładowego.
4. Str. 58. Błędne odwołanie do rysunku 2.32.
5. Str. 64. Niezbyt jasne jest pojawienie się wartości $\frac{\eta_{ind}}{\eta_{Otto}} = 0.594$.
6. Str. 88 i 89: brak opisu oznaczeń na rysunkach
7. Str. 58: czy dane na rys. 2.25 oraz 2.26 dotyczą analizowanego modelu silnika o tłokach swobodnych? Należy to wyraźnie określić, gdyż raczej te wielkości dotyczą typowego silnika spalinowego. Czy przyjęty model uzyskuje prędkości rzędu 8000 cykli na minutę??
8. Str. 158. W pracy pojawia się słowo „incitements”, typowym słowem w tym miejscu byłoby słowo „increments”.

Uwagi merytoryczne

1. Czy hipoteza badawcza nie jest przedstawiona zbyt wcześnie (na trzeciej stronie Wprowadzenia?). Ogólnie można hipotezę przedstawić na podstawie analiz literatury przedmiotu. Tutaj pojawia się ona bardzo szybko, przy szcążkowym określeniu, że takie rozwiązania (swobodnego tłoka) są już opisane. Pełną analizę Autor prowadzi w rozdziale kolejnym.

- Wydaje się więc, że kolejność przedstawiania niektórych faktów jest tutaj zamieniona.
2. Czy proponowana strategia kontroli poprzez zmniejszenie natężenia prądu uzyskiwanego z akumulatora wymaga dodatkowych elementów do pomiaru i monitorowania chwilowego stanu systemu zasilania?
 3. W pracy odnotowano, że ładowanie akumulatorów odbywa się do poziomu 96,1% pełnego naładowania z powodu spadku wydajności procesu przy niskich natężeniach. Czy to oznacza, że w proponowanym układzie przewiduje się stosowanie jedynie ładowania typu CC (constant current) zamiast najczęściej obecnie używanej metody łączonej CC-CV (constant current-constant voltage)?
 4. Jeżeli możliwy zakres błędu między wynikami badań symulacyjnych a testami stanowiskowymi wynosi poniżej 14,5%, to czy uzyskanie 10% wyższej sprawności proponowanego układu dla testów symulacyjnych obarczone jest tym samym błędem?
 5. Uzyskane wyniki sprawności odnoszą się do symulacji, przez co trudno określić czy wartości uzyskane w rzeczywistych warunkach będą do nich zbliżone, zwłaszcza w przypadku poruszania się pojazdu pod górkę lub w niesprzyjających warunkach pogodowych.

3. PODSUMOWANIE

Na podstawie analizy treści stwierdzam, że oceniana praca mieści się w dyscyplinie naukowej *Budowa i eksploatacja maszyn*.

Temat dysertacji jest ważny w eksploatacji pojazdów (nie tylko spalinowych, ale głównie elektrycznych), a uzyskane wyniki mogą być w już obecnie wykorzystane w praktyce eksploatacyjnej. Równocześnie temat rozprawy jest niedostatecznie opisany w literaturze, a sam sposób rozwiązania tematu jest oryginalnym rozwiązaniem Autora i stanowi o niewątpliwej wartości pracy. Zadanie, którego podjął się Autor należy do trudnych, bowiem jego realizacja wymagała zastosowania oryginalnych modeli z jednoczesnym uzyskaniem zadowalających wyników prowadzonych symulacji. Z tego powodu podjęcie się tak trudnego zadania przez Autora uważam za cenną wartość pracy.

W przedstawionym zadaniu naukowym Autor wykazał się samodzielnością w formułowaniu oryginalnych problemów i ich rozwiązywaniu oraz umiejętnością prowadzenia unikalnych eksperymentów i prac symulacyjnych. Przeprowadzone rozważania teoretyczne i uzyskane wyniki badań są przekonujące i w pełni potwierdzają postawiony w pracy cel.

Pod względem metodologicznym praca jest prawidłowa. Autor potwierdził umiejętność formułowania tez, prowadzenia badań i analiz w sposób uporządkowany i metodyczny oraz pra-

widłowe podejście do interpretacji wyników. Na podkreślenie zasługuje również poziom redakcyjny i edytorski pracy oraz fakt jej publikacji w języku angielskim.

Zawarte w opinii uwagi krytyczne nie wpływają na ogólną pozytywną ocenę pracy. Należy zaznaczyć równocześnie, że niektóre z uwag mają charakter dyskusyjny czy wyjaśniający albo stanowią alternatywne podejście do zagadnienia.

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa mgra inż. Pawła Krawczyka pt. „**Linear Generator Operated in Oscillating Mode as an Electric Vehicle Range Extender**” spełnia wymagania stawiane pracom na stopień doktora nauk technicznych, w rozumieniu art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie mgra inż. Pawła Krawczyka do publicznej obrony ocenianej dysertacji.

Ponadto biorąc powyższe pod uwagę, wnioskuję do Rady Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej o wyróżnienie przedmiotowej pracy doktorskiej.

A handwritten signature in black ink, consisting of several loops and a long tail extending upwards and to the right.