

Katowice, dn. 13.05.2018

dr hab. inż. Jakub Bernatt, prof. KOMEL  
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL  
Al. Roździeńskiego 188  
40-203 Katowice

## OCENA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. PAWŁA KRAWCZYKA

PT. „**LINEAR GENERATOR OPERATED IN OSCILLATING MODE AS ELECTRIC VEHICLE RANGE  
EXTENDER**” WYKONANEJ POD KIERUNKIEM PROF. DR HAB. INŻ. ANTONIEGO SZUMANOWSKIEGO

Recenzję opracowałem na zlecenie Dziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej, umowa nr 1150/000032/2018 z dnia 16.02.2018 r.

### *Tematyka rozprawy*

Tematyka rozprawy dotyczy analizy możliwości i zasadności stosowania urządzenia zwiększającego zasięg samochodu elektrycznego (tzw. „range extendera”), w którym użyto silnik o tłoku swobodnym oraz generator liniowy z magnesami trwałymi. Autor kładzie największy nacisk na analizę samego generatora oraz sposobów jego sterowania, jako elementu kluczowego dla sprawności i wydajności całego urządzenia jakim jest „range extender”.

Temat jest jak najbardziej aktualny, w dobie stale zwiększającego się upowszechniania pojazdów o napędzie elektrycznym (jest to trend światowy jednocześnie bardzo wyraźnie zauważalny w Polsce). Niestety pojazdy elektryczne mają, w porównaniu do pojazdów z silnikami o wewnętrznym spalaniu, dużo mniejszy zasięg, co jest skutkiem wielokrotnie niższego wskaźnika gęstości zgromadzonej energii elektrycznej w akumulatorach w stosunku do gęstości energii zgromadzonej w paliwie płynnym. Mimo, iż elektryczne silniki napędowe pojazdów elektrycznych mają sprawność przetwarzania energii wielokrotnie wyższą niż silniki z wewnętrznym spalaniem, to pojazdy elektryczne ciągle mają zasięgi jazdy kilkukrotnie mniejsze niż pojazdy „klasyczne”.

Urządzenia zwiększające zasięg pojazdów elektrycznych (czyli z języka angielskiego range extender-y) są jednym ze sposobów zwiększenia autonomii (zasięgu) pojazdów elektrycznych. Znane są wirujące „range extendery”, autor jednak skupił się na generatorze liniowym, wykazując jego zalety w porównaniu do urządzeń wirujących, jak również wykazał zalety silników z tłokiem swobodnym pracujących jako napęd generatora liniowego.

## *Charakterystyka rozprawy*

Rozprawa wraz z załącznikami liczy 235 stron stron podzielonych na 7 ponumerowanych rozdziałów. Do rozprawy dołączone są dwa obszerne załączniki (modele matematyczne oraz opis stanowiska badawczego) a także spis literatury zawierający 138 pozycji, w tym publikacji własnych autora liczący 5 pozycji (w tym jedną samodzielną).

W początkowej części rozprawy zamieszczono szczegółowy wykaz oznaczeń.

### Rozdział pierwszy

W rozdziale pierwszym autor uzasadnia swoje zainteresowanie generatorami liniowymi o ruchu oscylującym współpracującymi z silnikami spalinowymi o tłoku swobodnym. Autor stawia tutaj hipotezę mówiącą, że odpowiednio sterowany generator linowy wraz z silnikiem o tłoku swobodnym może ograniczyć zużycie energii pojazdu.

W rozdziale pierwszym zdefiniowano cele i tezę pracy. Tezę zawarto w słowach: „W pojeździe wyposażonym w urządzenie zwiększające zasięg jest możliwym zwiększenie dostępnego zasięgu dzięki zastosowaniu silnika z tłokiem swobodnym wraz z generatorem liniowym, a także możliwym jest ograniczenie zużycia energii poprzez odpowiednią kontrolę „range extendera” pozwalającą na zmniejszenie wartości natężenia prądu pobieranego z baterii w czasie jej wysokiego obciążenia”.

### Rozdział drugi

Rozdział drugi zawiera ogólną analizę samochodów elektrycznych posiadających „range extendery”. Autor przedstawia tutaj przegląd rozwiązań pozwalających na zwiększanie zasięgu, skupia się na rozwiązaniu w postaci silnika z tłokiem swobodnym i generatorem liniowym, przeprowadza przegląd konstrukcji i wybiera rozwiązanie będące przedmiotem pracy. Zostają tutaj przedstawione modele matematyczne wybranych rozwiązań.

### Rozdział trzeci

W rozdziale trzecim doktorant koncentruje się na konstrukcji stanowiska do badań generatora liniowego wraz z opisem poszczególnych komponentów wchodzących w jego skład. Przedstawiony zostaje także model matematyczny całego stanowiska.

### Rozdział czwarty

W czwartym rozdziale zawarto model symulacyjny całego urządzenia jakim jest „range extender” z silnikiem o tłoku swobodnym i generatorem liniowym, a także autor zweryfikował model symulacyjny generatora liniowego na podstawie testów laboratoryjnych. Po weryfikacji modelu generatora liniowego model ten mógł być użyty do wykorzystania w całościowym modelu symulacyjnym samochodu elektrycznego.

### Rozdział piąty

Rozdział piąty zawiera wyniki testów laboratoryjnych generatora liniowego i całego, zasymulowanego „range extendera”. W części pierwszej tego rozdziału przedstawiono wyniki testów generatora liniowego przy uwzględnieniu wpływu sterowania wartościami napięcia i prądu wyjściowego generatora podczas procesu ładowania baterii litowo-jonowej. W dalszej części zawarte są wyniki symulacji pracy „range extender’a”, również w trybie rozruchu urządzenia, tj. podczas pracy silnikowej generatora liniowego. W tej części pracy zawarte są również porównania sprawności generatorów liniowego i wirującego, a także sprawności silników z tłokiem swobodnym oraz rzędowego.

### Rozdział szósty

W rozdziale szóstym autor przeprowadza symulacje samochodu elektrycznego wyposażonego w „range extender”. Po przedstawieniu symulowanego pojazdu autor omawia tryby pracy urządzenia zwiększającego zasięg oraz strategie sterowania, głównie mające na celu ograniczenie poboru prądu z baterii, co zmniejsza wartość strat w układzie napędowym niezależnie od cyklu w którym porusza się pojazd, gdyż celem jest uzyskanie docelowej wartości zasięgu jazdy pojazdu. Autor wykazał, że strategia ograniczania prądu jest lepsza niż strategia ograniczania mocy pobieranej, a także strategia z ciągle pracującym „range extenderem”.

W drugiej części tego rozdziału autor porównał otrzymane wyniki do pojazdu wyposażonego w „range extender” z silnikiem rzędowym i generatorem wirującym, a także do pojazdów hybrydowych.

### Rozdział siódmy

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie pracy wraz z wykazaniem, że możliwy jest do osiągnięcia cel pracy jakim było zwiększenie zasięgu jazdy samochodu elektrycznego poprzez zastosowanie urządzenia zwiększającego zasięg („range extendera”) złożonego z silnika spalinowego o tłoku swobodnym i generatora liniowego pracującego przy odpowiednim sterowaniu. Co więcej, uzyskano lepsze rezultaty w porównaniu do obecnie znanych i stosowanych rozwiązań.

## *Główne osiągnięcia rozprawy*

Do głównych osiągnięć rozprawy zaliczam:

- opracowanie metody zwiększenia zasięgu pojazdu elektrycznego poprzez zastosowanie generatora liniowego i silnika spalinowego o tłoku swobodnym,
- opracowanie modelu matematycznego urządzenia zwiększającego zasięg („range extender-a”) bazującego na proponowanym rozwiązaniu ,
- opracowanie modelu symulacyjnego, wykonanie modelu laboratoryjnego, a także przeprowadzenie testów urządzenia na stanowisku laboratoryjnym,
- wykazanie, że proponowane rozwiązanie ma lepsze parametry energetyczne od znanych obecnie rozwiązań, m.in. bazujących na silniku tłokowym i wirującym generatorze z magnesami trwałymi.

Doktorant podjął się analizy tematu, który po dopracowaniu szczegółów technicznych, z uwagi na światowe zainteresowanie tematyką elektromobilności może mieć zastosowanie praktyczne.

## *Uwagi*

Nie mam istotnych uwag merytorycznych do treści rozprawy, do metodologii prowadzonych prac, do opracowanych modeli matematycznych ani sposobu wykonywania badań czy ich interpretacji. Jedynie pragnę zwrócić uwagę, że zamiast mówić o urządzeniu rozszerzającym zasięg należałoby mówić o urządzeniu zwiększającym zasięg (zasięg jazdy może być mały lub duży, ale nie szeroki).

Ponadto uważam, że doktorant zbyt optymistycznie przyjął cenę baterii litowo-jonowych na poziomie 250 \$/kWh. Takie ceny są obecnie nieosiągalne dla gotowych baterii (zawierających BMS, systemy stabilizacji temperatury, zabezpieczenia i układy łączeniowe, obudowy i inne elementy mechaniczne). Cena 250 \$/kWh może być przyjmowana jedynie dla samych ogniw, natomiast dla baterii do zastosowań w automotive jest według mojej wiedzy co najmniej dwukrotnie zaniżona. Jednak to w niczym nie umniejsza wartości rozprawy, co więcej, gdyby autor przyjął wyższe poziomy cen baterii, to proponowane rozwiązanie miałoby jeszcze większe zalety w stosunku do rozwiązań polegających na zwiększaniu zasięgu samochodu elektrycznego poprzez zwiększanie pojemności baterii.

Doktorant wykazał się dobrą znajomością literatury światowej, choć pominął liczne prace i publikacje polskich autorów czy z polskich ośrodków naukowych i badawczych. Dotyczy to zwłaszcza tematyki maszyn z magnesami trwałymi, którą prowadzi prof. Tadeusz Glinka, a także niestety nie zauważono prac z zakresu elektromobilności Instytutów BOSMAL czy KOMEL

Pozostałe uwagi do dyskusji/wyjaśnienia, a także uwagi drobne i językowe:

- str. 22 oraz str. 84 – silniki z magnesami trwałymi mogą mieć inną liczbę faz niż 3 i takie rozwiązania są znane zarówno w kraju jak i proponowane przez firmy zagraniczne (choćby TM4),
- str. 79 fig. 2.36 – brak zaznaczenia ładowarki pokładowej na blokowym schemacie elektrycznym, a przynajmniej toru ładowania stacjonarnej baterii,
- str. 92 i dalsze – autor bardzo lakonicznie odnosi się do cechy silnika z tłokiem swobodnym jaką jest możliwość zmiany skoku tłoka (oraz stopnia sprężania silnika) co umożliwia zasilanie silnika różnymi paliwami. Mam tutaj na myśli odwzorowanie tej cechy w stanowisku laboratoryjnym i przeprowadzenie stosownych badań. Co prawda tarcza „wałku korbowego” ma otwory umożliwiające zmianę skoku generatora liniowego, ale należałoby to szerzej skomentować,
- str. 143 – omawiając rezystancję wewnętrzną baterii jako zależną od SOC należałoby odnieść się również do zależności tej rezystancji od temperatury, zwłaszcza wskazać na jej istotny wzrost w temperaturach niższych od zera st. C,
- str. 150 – tabela 6.1 – szkoda, że autor nie odniósł się do krajowych publikacji i wyników badań samochodów elektrycznych, choćby prezentowanych przez KOMEL czy BOSMAL,
- str. 175 – błędnie podano zapotrzebowanie EV na energię jako 45.64kW/100 km.

Osobną kwestią wymagającą uwagi jest problematyka drgań zespołu silnik z tłokiem swobodnym – generator liniowy. Z uwagi na ruch posuwisto-zwrotny tłoka oraz części ruchomej generatora cały układ może generować drgania, które będą przenosiły się na konstrukcję pojazdu i będą trudne do eliminacji. Generator liniowy z natury swojej konstrukcji generuje drgania o dużo większej amplitudzie czy też przyspieszeniu niż generator wirujący.

Błędy językowe lub w pisowni:

- raczej należy używać sformułowania „design is done”, zamiast „design is made”
  - autor nie ustrzegł się drobnych błędów literowych, które nie zmniejszają wartości merytorycznej rozprawy, ale zmieniają znaczenie słów, np. str. 42 „staring” zamiast „starting”, str. 87 „motel” zamiast „model” oraz „radios” zamiast „ratios” itd.

## *Konkluzja*

Doktorant mgr inż. Paweł Krawczyk w swojej pracy doktorskiej pt. „**LINEAR GENERATOR OPERATED IN OSCILLATING MODE AS ELECTRIC VEHICLE RANGE EXTENDER**” wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Antoniego Szumanowskiego udowodnił, że możliwym jest zwiększenie zasięgu samochodu elektrycznego poprzez zastosowanie urządzenia zwiększającego zasięg bazującego na silniku z tłokiem swobodnym i generatorze liniowym. Dzięki odpowiednio opracowanej strategii sterowania urządzeniem osiągnięto zmniejszenie zużycia energii niezbędnej do przejechania założonego dystansu. Oczywistym jest fakt, że stosowania „range extendera” jest uzasadnione tylko w tych przypadkach, gdzie profil użytkownika pojazdu elektrycznego zakłada jego wykorzystywanie do jazd znacznie przekraczających odległości możliwe do przebycia z wykorzystaniem energii elektrycznej zgromadzonej w bateriach (ca 100-150 km). Dla takich założeń doktorant porównał proponowane nowatorskie rozwiązanie z innymi urządzeniami umożliwiającymi osiągnięcie założonego dystansu jazdy, dla różnych trybów jazdy wykazał przewagi proponowanego rozwiązania zarówno pod względem efektywności energetycznej jak i kosztowej.

Autor udowodnił, że najlepsze rezultaty, tzn. najmniejsze zużycie energii elektrycznej dla założonego dystansu jazdy uzyskuje się podczas pracy urządzenia zwłaszcza podczas poboru z baterii prądu o dużym natężeniu.

Doktorant opracował stosowne modele matematyczne, które następnie zweryfikował podczas badań i testów na wykonanym stanowisku laboratoryjnym. Rozprawa napisana jest bardzo poprawnie, zachowano w niej logiczną ciągłość prowadzonego postępowania. Mimo wskazanych uwag stwierdzam, iż rozprawa całościowo obejmuje tematykę urządzenia zwiększającego zasięg zamontowanego w samochodzie elektrycznym, ze szczególnym uwzględnieniem zagadnień związanych z generatorem liniowym. Praca doktorska jest obszerna i kompleksowa, przygotowana bardzo starannie.

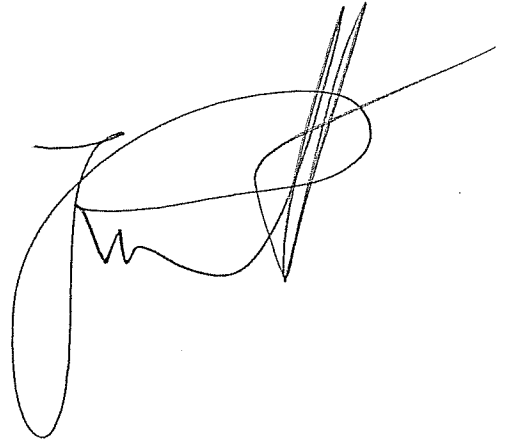
Tematyka, której podjął się doktorant jest jak najbardziej aktualna, zarówno w kraju jak i za granicą prowadzi się wielowątkowe prace nad pojazdami elektrycznymi. Doktorant nie tylko wzorowo przygotował modele symulacyjne, ale też co zasługuje na uznanie, przygotował i przeprowadził liczne, żmudne badania laboratoryjne, uzyskując przy tym bardzo dobrą zbieżność pomiędzy wynikami obliczeń, a pomiarami.

Należy podkreślić, że po dalszych badaniach związanych zwłaszcza z problematyką drgań zespołu temat pracy i osiągnięte rezultaty mogą mieć charakter aplikacyjny.

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Krawczyka pt. „**LINEAR GENERATOR OPERATED IN OSCILLATING MODE AS ELECTRIC VEHICLE RANGE EXTENDER**” ma jasno sprecyzowany cel. Przedstawione zadanie zostało w pełni zrealizowane na drodze badań symulacyjnych i pomiarów laboratoryjnych. Według mojej oceny spełnione są wymagania art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym. Wnioskuje o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony recenzowanej rozprawy doktorskiej.

### ***Wniosek o wyróżnienie***

Jeśli praca doktorska mgr inż. Pawła Krawczyka zostanie przyjęta to wnioskuję o jej wyróżnienie. Mimo przedstawionych uwag, głównie pozamerytorycznych, w pracy kompleksowo przeanalizowane zostały możliwości zwiększania zasięgu pojazdu elektrycznego, jak również niezwykle kompleksowo i starannie została przeprowadzona analiza urządzenia bazującego na silniku z tłokiem swobodnym i generatorze liniowym. Doktorant przeanalizował nie tylko sam generator, ale całe urządzenie i dla różnych trybów jazdy i różnych celów dzięki opracowanym modelom matematycznym i ich weryfikacji na stanowisku badawczym wykazał przewagi zaproponowanego rozwiązania. Ponadto na korzyść przemawia potencjalny charakter aplikacyjny zaproponowanego rozwiązania.

A handwritten signature in black ink, consisting of several overlapping loops and a long horizontal stroke extending to the right.