

## O C E N A

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Michała Sekreckiego pt. „Comparative Analysis of Electromechanical Drives fo Light Electric Vehicle Application” wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. Antoniego Szumanowskiego**

Recenzję opracowałem na zlecenie Dziekana Wydziału Samochodów i Maszyn Roboczych Politechniki Warszawskiej, pismo: SiMR-29/18/2016 z dnia 21.07.2016 r.

#### **Tematyka, cel i tez rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr inż. Michała Sekreckiego koncentruje się na analizie porównawczej wpływu wielobiegowej przekładni na rozpraszanie energii w elektromechanicznym układzie napędowym lekkiego pojazdu elektrycznego.

Pojazdy elektryczne, w stosunku do pojazdów z silnikami spalinowymi, charakteryzują się przekładniami mechanicznymi o mniejszej liczbie stopni przełożenia prędkości obrotowej. Tak na przykład pojazdy szynowe mają tylko jeden stopień przełożenia prędkości obrotowej, w całym zakresie prędkości jazdy  $0 < v < v_{\max}$ . Przykładem są lokomotywy, pociągi i tramwaje napędzane silnikami indukcyjnymi zasilanymi z sieci trakcyjnej poprzez falowniki. Wał silnika jest połączony z kołami jezdnyymi pojazdu poprzez przekładnię mechaniczną o niezmiennym przełożeniu. Silnik elektryczny pracuje zatem z prędkością obrotową zmienianą w przedziale  $0 < n < n_{\max}$ . Jednak algorytm jazdy pojazdów szynowych różni się od jazdy pojazdów drogowych, w szczególności w warunkach miejskich. Częste starty, hamowanie i postoje, powodują większe zużycie energii na przejechanie 100 km w mieście w stosunku do jazdy ze stałą prędkością. Straty mocy w uzwojeniach silnika i falownika są funkcją prądu (momentu obciążenia) w kwadracie, a straty w obwodzie magnetycznym są nieliniową funkcją prędkości obrotowej, do tego dodają się straty mechaniczne, tarcia i wentylacji. Przy małej prędkości obrotowej straty mocy stanowią znaczący procent w stosunku do mocy pobieranej przez silnik. Poprzez odpowiednie dopasowanie stopni przełożenia przekładni mechanicznej można minimalizować rozpraszanie energii w czasie jazdy pojazdu elektrycznego ze zmienną prędkością. Ponadto przekładnia mechaniczna o zmienianym przełożeniu determinuje parametry trakcyjne pojazdu i umożliwia zmniejszenie masy silnika napędowego. W silnikach wzbudzanych magnesami trwałymi, a te są głównie stosowane w napędach elektrycznych pojazdów drogowych, rozpraszanie energii można minimalizować poprzez dostosowanie stopnia przełożenia przekładni do aktualnych warunków jazdy, to jest prędkości i momentu obciążenia. W ten sposób można minimalizować straty energii elektrycznej w układzie napędowym pojazdu. Analiza strat jest podstawą do zaprojektowania przekładni mechanicznej, liczby stopni przełożenia i automatycznego synchronicznego ich przełączania. Zagadnienie staje się ważne, wchodzimy w okres dynamicznego rozwoju pojazdów elektrycznych i wprowadzania ich do ruchu, szczególnie w miastach. Algorytm jazdy pojazdu oprócz innych parametrów, powinien uwzględniać minimalne straty energii w układzie napędowym. Temat rozprawy uważam za aktualny i bardzo ważny, a jej celem jest wskazanie rozwiązania technicznego przekładni wielobiegowej ograniczającego straty energii w układzie napędowym pojazdu elektrycznego.



Teza pracy brzmi: „It is possible to reduce the energy consumption of the electric vehicle power train by the implementation of properly controlled automatic multispeed transmission between traction motor and wheels”. (Zużycie energii w układzie napędowym pojazdu elektrycznego można zmniejszyć poprzez wprowadzenie odpowiednio kontrolowanego automatycznego stopnia przełożenia prędkości obrotowej między silnikiem napędowym i kołami.)

### **Charakterystyka rozprawy**

Rozprawa doktorska liczy 151 stron i jest podzielona na 6 numerowanych rozdziałów. Do rozprawy dołączony jest 1 załącznik liczący 13 stron, spis literatury zawierający 70 pozycji, w tym 1 pozycja Doktoranta i aż 42 pozycje zawierające odnośniki do witryn internetowych producentów samochodów, w których są zawarte dane pojazdów, artykuły oraz nowinki techniczne, streszczenie w języku angielskim i polskim oraz wykaz używanych symboli. Rozprawa napisana jest w języku angielskim.

W rozdziale pierwszym, Autor przedstawił krótko zakres pracy zrealizowanej w ramach doktoratu.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawił model matematyczny baterii zasilającej pojazd elektryczny oraz jej charakterystyki. Dla baterii Li-Ion wykonał testy symulacyjne w środowisku MATLAB/Simulink. Wyniki tych testów podał w postaci charakterystyk napięciowo - prądowych. Wykonał także badania laboratoryjne wraz z opisem stanowiska i metodyki badań. Wynikiem tych badań są charakterystyki. Rozdział zamyka model symulacyjny przekładni wielobiegowej w tym model synchronizatora i koncepcję rozwiązania automatycznej wielobiegowej przekładni dedykowanej do pojazdu elektrycznego.

Rozdział trzeci zawiera testy symulacyjne układu przeniesienia napędu w pojeździe elektrycznym z i bez przekładni wielobiegowej. Przedstawiono model symulacyjny dla środowiska MATLAB/Simulink. Przeprowadzono rozważania na temat strategii zmiany biegów dla przekładni dwubiegowej i trzybiegowej oraz dla reduktora (przekładni jednostopniowej o stałym przełożeniu). Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych uwzględniających straty energii podczas zmiany stopnia przełożenia przekładni oraz wskazano najlepsze i najgorsze warunki zmiany stopnia przełożenia.

W rozdziale czwartym zaprezentowano stanowisko laboratoryjne, na którym prowadzone były testy oraz wyniki badań laboratoryjnych przekładni wielobiegowej zamontowanej w układzie napędowym pojazdu elektrycznego. Przedstawiono algorytm sterowania zmianą biegów. Opisano automatyczną przekładnię wielobiegową, która jest oryginalną rozwiązaniem modelowym. Następnie przedstawiono mechanizmy automatycznej zmiany biegów wykorzystujących rozwiązania mechaniczne i elektromechaniczne. Rozdział zamykają wyniki badań laboratoryjnych przekładni wielobiegowej.

W rozdziale piątym przedstawiono analizę otrzymanych wyników z badań laboratoryjnych, porównując przekładnię trzybiegową z reduktorem.

Rozdział szósty zawiera dyskusję wyników badań oraz podsumowanie rozprawy. Zamieszczono w nim rozwiązanie automatycznej przekładni trzybiegowej sterowanej przy pomocy silnika krokowego, będącej przedmiotem zgłoszenia patentowego (zgłoszenie nie jest wymienione w spisie literatury). Na zakończenie stwierdzono, że teza została udowodniona.

Dodatkami w rozprawie są: lista zamieszczonych rysunków, lista zamieszczonych tabel i spis literatury.



W załączniku 1 do rozprawy przedstawiono model matematyczny silnika synchronicznego oraz akumulatora.

### **Zrealizowane zadania badawcze**

W rozprawie Doktorant skoncentrował się na analizie wpływu przekładni wielobiegowej na zużycie energii w układzie napędowym pojazdu elektrycznego. Porównano zużycie energii w układach napędowych z reduktorem i przekładniami: dwu- i trzy-stopniowymi. Zaprezentowano nową konstrukcję przekładni wielostopniowej z synchronizatorem zmieniającym przełożenie silnikiem krokowym. Opracowano model symulacyjny kompletnego układu napędowego pojazdu elektrycznego. Przeanalizowano warunki konieczne do płynnej zmiany przełożeń w zautomatyzowanej przekładni wykorzystywanej w układzie napędowym pojazdu elektrycznego. Opracowane modele zostały wykorzystane w symulacyjnych badaniach porównawczych różnych rodzajów konfiguracji układu napędowego. Wyniki badań symulacyjnych zostały zweryfikowane w badaniach laboratoryjnych: akumulatora Li-Ion i kompletnego układu napędowego z przekładnią wielobiegową sterowaną silnikiem krokowym. Badania te wykazały, że zużycie energii w układzie napędowym pojazdu elektrycznego zależy od przekładni, a poprzez kontrolowaną automatyczną zmianę stopnia jej przełożenia można minimalizować zużycie energii elektrycznej.

### **Wartościami naukowymi pracy są:**

- model i badania symulacyjne kompletnego elektrycznego układu napędowego pojazdu z przekładnią wielostopniową,
- badania laboratoryjne potwierdzające poprawność opracowanego modelu i badań symulacyjnych,
- opracowanie 3-biegowej przekładni z synchronizatorem i krokowym silnikiem wykonawczym.

### **Uwagi dyskusyjne**

1. Monografia jest w języku angielskim, jest także jednostronicowe streszczenie w j. polskim, lecz nie ma tytułu w j. polskim.
2. W spisie treści podano tylko skróty pełnego tytułu rozdziału, dotyczy do np. rozdziałów: 2.2; 3; 4; 5).
3. Autor na początku rozprawy zamieścił wykaz używanych symboli („List of used symbols and abbreviations”). Część symboli użytych w treści rozprawy nie jest ujęta w spisie. Np.:  $\gamma$ - tread ramp angle, lub  $\eta_{th}$  – tread efficiency itd.
4. Do oznaczenia momentu mechanicznego, obrotowego stosowane są przemiennie litery  $M$  lub  $T$  od słów moment - torque.
5. Straty (rozproszenie) przedstawiono jako moment  $\Delta M$  i wyrażono w Nm. W literaturze przez straty rozumie się zwykle rozpraszanie energii lub mocy  $\Delta P_m$ , których jednostkami są  $J = Ws$  i  $W$ . Także jednostką strat w żelazie jest  $W$ , a nie  $Nm$ .
6. Rezystancja elektrolitu i elektrod wyrażona jest w  $\omega$ , powinno być  $\Omega$ .
7. Formatowanie spisu symboli również jest chaotyczne. W tekstach technicznych jednostki pisane są czcionką prostą, a oznaczenia wielkości czcionką pochyłą, kursywą (patrz – Krystyn Pawluk: Jak pisać teksty techniczne poprawnie – internet). W pracy doktoranta nie można znaleźć takiej reguły – symbole i jednostki pisane są w sposób dowolny.

8. Opisy osi wykresów przedstawionych w pracy są niejednolite. Pomijając wykresy zaczerpnięte z literatury, Autorowi zdarza się w skrajnym przypadku pominąć opis osi (np. rys. 4.17, 4.20). Czcionka użyta do opisywania wykresów, zarówno wielkość jak i jej rodzaj, znacznie lepiej prezentuje się o ile są wykonane jednakowo. Czytając kolejne wykresy znajdujemy niestety różne sytuacje.
9. W tekście znajduje się również kilka literówek.
10. Autor nie zamieścił w spisie literatury swoich publikacji (oprócz 1) i zgłoszenia patentowego.

Uwagi powyższe nie obniżają wartości naukowo – badawczej pracy, którą oceniam bardzo dobrze.

### **Konkluzja**

Praca doktorska mgr inż. Michała Sekreckiego pt.: “Comparative Analysis of Elektromechanical Drives for Light Electric Vehicle Application”, wykonana pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Antoniego Szumanowskiego, obejmuje pełny cykl badaczy: opracowanie modeli, badania symulacyjne, budowę stanowisk badawczych i przeprowadzenie weryfikujących badań laboratoryjnych modelowych (w skali mocy rzeczywistej) układów napędowych pojazdów elektrycznych.

Według mojej oceny Doktorant zrealizował zadanie badawcze przedstawione w opisie celu pracy i zdefiniowane w tezie w tym:

- wykazał się dobrą umiejętnością w opracowaniu modeli symulacyjnych elektromechanicznych układów napędowych i ich badaniami, a także sprawnością w budowaniu laboratoryjnych stanowisk badawczych i przeprowadzaniu badań modeli fizycznych tych układów,
- opracował model kompletnego układu napędowego pojazdu elektrycznego oraz model synchronizatora,
- zaprezentował nowe rozwiązanie 3-biegowej przekładni sterowanej za pomocą silnika krokowego,
- porównał zużycie energii w układach napędowych z przeniesieniem napędu za pomocą reduktora oraz przekładni wielobiegowych (2 i 3 stopnie przełożenia),
- wykazał dużą wiedzę w tematyce układów napędowych samochodów elektrycznych i bardzo dobre rozeznanie literatury w tej tematyce.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska ma jasno sprecyzowany cel, a postawione zadanie zostało zrealizowane poprzez badania symulacyjne i eksperymentalne. Uważam, że recenzowana praca doktorska spełnia wymagania obowiązującej *Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz.U. 2014 poz. 1852) i wnioskuje o dopuszczenie Doktoranta do jej publicznej obrony.

