

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka
Politechnika Śląska
Instytut Elektrotechniki i Informatyki
Gliwice, ul. Akademicka 10

Gliwice, dnia: 23.02.2016 r.

O C E N A

rozprawy doktorskiej mgr inż. Dominika Adameczyka pt „Koncepcja i analiza zintegrowanego przetwornika elektromechanicznego do zastosowania w napędzie elektrycznego samochodu osobowego” wykonanej pod kierunkiem dr hab. inż. Andrzeja Wilka.

Recenzję opracowałem na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, pismo: L. dz. 3/SD/WEiA/2016 z dnia 05.01.2016 r.

Tematyka rozprawy

Pojazd z napędem elektrycznym jest kompatybilny dla środowiska. Już dzisiaj miasta mają problem ze smogiem w udziale którego mają także pojazdy spalinowe. Oprócz miast pojazdami z napędem elektrycznym są zainteresowane także lotniska, parki i sanatoria. Doceniają to koncerny samochodowe, które oferują rozwiązania różnych wersji pojazdów z napędem hybrydowym i elektrycznym. Pojazdy z napędem elektrycznym były już budowane XIX wieku, jednak z uwagi na ich ograniczony zasięg i cenę, produkcja ich została zaniechana. Dopiero pod koniec XX wieku zaistniały warunki techniczne (ogniwa litowo-jonowe, energo- i mikro- elektronika, magnesy trwałe NdFeB) do budowy napędów elektrycznych i ich aplikacji w pojazdach. Koncerny samochodowe stosują różne warianty rozwiązania napędów elektrycznych. Poszczególne elementy układu napędowego, ich rozmieszczenie w pojeździe i całe układy są chronione patentami. Układ napędowy którym zajmuje się Doktorant jest rozwiązaniem oryginalnym, jego struktura bazuje na koncepcji Steinmetza, który zaproponował układ napędowy pojazdu elektrycznego z silnikiem pełniącym funkcję napędową i mechanizmu różnicowego. W recenzowanej dysertacji doktorskiej, analizowany układ napędowy w sposób istotny rozszerza koncepcję Steinmetza. W zbudowanym modelu laboratoryjnym wykorzystuje współczesne rozwiązania przetwornika elektromechanicznego oraz współczesne możliwości jego zasilania i sterowania momentem. Temat uważam za aktualny.

Charakterystyka rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje w sumie 137 stron. Treść rozprawy jest podzielona na 6 rozdziałów, zestawienie literatury i dwa załączniki.

W rozdziale wstępnym przedstawiono przegląd budowy układów napędowych oraz ich rodzaje stosowane w elektrycznych samochodach osobowych. Na tej podstawie przedstawiono koncepcję elektrycznego układu napędowego - rys.7. Układ ten nie jest stosowany w żadnym z produkowanym przez koncerny samochodzie. Układ napędza bezpośrednio dwa koła pojazdu, jednym dwuwirnikowym silnikiem indukcyjnym bądź silnikiem z magnesami trwałymi, przy czym jeden z wirników jest uzwojony i pełni funkcję twornika. Końcówki uzwojenia są wyprowadzone na pierścienie ślizgowe. Jeden z wirników napędza jedno koło jezdne samochodu, a drugi wirnik napędza, poprzez przekładnię zmieniającą kierunek obrotów, drugie koło jezdne. Zaproponowana koncepcja układu

Wpłynęło dnia	19.02.2016
L. dz.	34/SD/WEiA

napędowego spełnia także funkcję mechanizmu różnicowego. W ostatnim punkcie rozdziału pierwszego podano cel badawczy, zdefiniowano tezę i przedstawiono zakres pracy.

W rozdziale drugim przedstawiono różne warianty rozwiązania dwuwirnikowych silników elektrycznych stosowanych w układach napędowych samochodów elektrycznych i ich aplikacji do elektromagnetycznego mechanizmu różnicowego. Przedstawiono budowę i zasadę działania mechanizmu różnicowego. Opracowano i opisano modele matematyczne wybranych silników elektrycznych w wykonaniu dwuwirnikowym: komutatorowego prądu stałego wzbudzanego elektromagnetycznie, synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi oraz indukcyjnego. Podano przykłady ich wykonania i parametry silników dwuwirnikowych oraz przedstawiono laboratoryjne stanowisko badawcze.

W rozdziale 3 przedstawiono modele energetyczne składowych części układu napędowego osobowego samochodu elektrycznego ELV001. Mapy sprawności silnika oraz falownika zastosowanego w pojeździe ELV001. Przedstawiono modele matematyczne: oporów trakcyjnych, zasobnika energii, układu jezdnego pojazdu, nieliniowego modelu opony oraz modelu układu jezdnego pojazdu czterokołowego.

W rozdziale czwartym zidentyfikowano parametry silnika: rezystancję i indukcyjności własne uzwojeń, nieliniową indukcyjność rotacji G_{af} , współczynnik tarcia lepkiego wirników i momenty bezwładności wirników. G_{af} – indukcyjność rotacji jest pojęciem wprowadzonym przez Doktoranta parametr ten zaimplementowano do modelu matematycznego napędu z dwuwirnikowym silnikiem i przeprowadzono jego weryfikację.

Rozdział piąty obejmuje analizę układu napędowego pojazdu z wykorzystaniem modelu obwodowego oraz badania symulacyjne. Przedstawiono w nim wybrane wyniki symulacji przejazdu pojazdu ELV001 z wykorzystaniem napędu producenta. Wykonano badania symulacyjne, przejazdu pojazdu ELV001, z napędem dwuwirnikowym silnikiem indukcyjnym (DRM IM): w cyklu ECE miejskim i pozamiejskim, sprawdzono pracę napędu w czasie jazdy po łuku. Zweryfikowano w ten sposób działanie DRM IM jako napędu pojazdu i jako elektromagnetycznego mechanizmu różnicowego. Wykorzystując model „energetyczny” wyznaczono zasięgi i sprawności układu napędowego przy różnej prędkości pojazdu. W podsumowaniu oceniono dwuwirnikową maszynę indukcyjną jako zintegrowany przetwornik elektromechaniczny pełniący podwójną funkcję w napędzie samochodu elektrycznego.

Rozdział szósty obejmuje wnioski z przeprowadzonych badań i symulacji, podsumowuje osiągnięcia Doktoranta i propozycję dalszych badań.

W Załączniku 1 przedstawiono szczegółową budowę stanowiska pomiarowego do badania DRM. Parametry zasobnika energii zastosowanego w samochodzie ELV001 oraz wymagania stawiane elektrycznym pojazdom osobowym w ruchu miejskim. W Załączniku 2 przedstawiono budowę stanowiska pomiarowego do badania DRM, parametry zasobnika energii zastosowanego w samochodzie ELV001 i wymagania stawiane elektrycznym pojazdom osobowym w ruchu miejskim.

Zrealizowane zadania badawcze

Doktorant miał do dyspozycji trzy fizyczne modele silników DRM: komutatorowy z łodzi „Błotniak”, indukcyjny Sg 132 M4 oraz samochód ELV 001 z zabudowanymi dwoma silnikami wzbudzanymi magnesami trwałymi napędzającymi, poprzez przekładnie, koła jezdne. Te trzy warianty rozwiązania napędu pojazdu wszechstronnie przebadał. Zakres tych badań obejmował:

- przegląd konstrukcji i stawianym wymagań silnikom napędowym samochodów elektrycznych,

- modele matematyczne maszyn dwuwirnikowych: prądu stałego ze wzbudzeniem elektromagnetycznym, synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi i indukcyjnych klatkowych,
- modele matematyczne elementów składowych układu napędowego i układu jezdnego,
- budowę stanowiska badawczego do pomiaru parametrów DRM,
- badania eksperymentalne na zestawionym układzie,
- symulacje przejazdu pojazdu ELV001 z napędem fabrycznym,
- symulacje układu jezdnego pojazdu ELV001 z napędem DRM IM.

Rozprawa doktorska mgr inż. Dominika Adamczyka pt.: *Koncepcja i analiza zintegrowanego przetwornika elektromechanicznego do zastosowania w napędzie elektrycznego samochodu osobowego*” rozwija w sposób twórczy rozwiązanie układu napędowego pojazdu elektrycznego. Praca jest zrealizowana w pełnym cyklu badawczym, zawiera bowiem: modele matematyczne, badania symulacyjne oraz badania eksperymentalne przeprowadzone na samochodzie ELV001 i na stanowisku laboratoryjnym.

Główne osiągnięcia rozprawy obejmują modele matematyczne: trzech wariantowych rozwiązań silników dwuwirnikowych i układu jezdnego pojazdu, które wykorzystano w badaniach symulacyjnych pracy układu napędowego w stanach ustalonych i nieustalonych z uwzględnieniem złożonych algorytmów kontroli trakcji pojazdu.

Uwagi dyskusyjne

1. Silnik napędowy z podwójnym wirnikiem charakteryzuje się tym, że momenty elektromagnetyczne działające na wirniki są identyczne. Natomiast momenty obciążenia kół jezdnych nie muszą być identyczne. Przykładem może być poślizg jednego koła jezdnego. Jak w tej krytycznej sytuacji zachowa się układ napędowy, czy nie spowoduje rozpędzenia koła które jest w poślizgu?
2. Układ napędowy, według koncepcji Doktoranta, jest rozwiązaniem alternatywnym do zabudowy silników elektrycznych w kołach jezdnych. Chcę podkreślić, że umieszczenie silnika w miejsce rozrządu jest korzystniejsze, gdyż nie podwyższa masy kół, które nie są amortyzowane.
3. Silniki komutatorowe prądu stałego są dogodnym modelem do analizy pracy układu napędowego. Zgadzam się z Doktorantem, że praktyczne ich wykorzystanie w napędach pojazdów to już historia. Aplikacje silników indukcyjnych w napędach pojazdów ma sens, przykładem mogą być pojazdy szynowe. W samochodach elektrycznych, w szczególności osobowych, standardowo napęd bazuje na silnikach wzbudzanych magnesami trwałymi, które przy tych samych parametrach znamionowych mają około 30% mniejszą masę, mają dużo większą przeciążalność momentem i mają o kilka procent wyższą sprawność. Wydaje się, że rozwiązanie układu napędowego pojazdów drogowych z wykorzystaniem silników wzbudzanych magnesami trwałymi jest obecnie najkorzystniejsze.
4. Silniki indukcyjne klatkowe są stosowane w napędach pojazdów elektrycznych. Przykładem są pojazdy typu MELEX. W pojazdach tych układ elektromechaniczny składa się z silnika indukcyjnego, sprzęgła, przekładni mechanicznej o zmienianym przełożeniu i dyferencjału połączonego z wałkami kół jezdnych. Zaletą rozwiązania MELEX jest praca silnika przy stosunkowo dużej prędkości obrotowej i możliwość wykorzystania skrzyni biegów. Daje to w efekcie małą masę silnika oraz dopasowywanie prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego silnika do aktualnych warunków trakcyjnych pojazdu. Silnik bezpośrednio sprzęgnięty z wałkami kół jezdnych ma znacznie większą masę. Straty energii w maszynie elektrycznej są związane z masą maszyny, straty energii występują także w przekładniach mechanicznych. Rozpraszanie energii przekłada się wprost na zasięg

- pojazdu. Powstaje pytanie, które z wymienionych rozwiązań będzie mieć większy zasięg, przy tym samym obciążeniu trakcyjnym i tej samej zużytej energii? Innymi słowami w którym układzie napędowym są większe straty energii?
5. Silnik elektryczny z dwoma wirnikami, pod względem mechanicznym, ma budowę złożoną, wynika to z łożyskowania dwóch koncentrycznych, wirujących wirników, przy czym w jednym jest uzwojenie izolowane wyprowadzone na pierścienie ślizgowe, a w drugim jest uzwojenie klatkowe bądź magnesy trwałe, rzutuje to na cenę silnika. Według mojego rozeznania cena silników indukcyjnych seryjnych o mocy 30 kW wynosi: klatkowego 5400 zł i pierścieniowego 13800 zł. Jest to moc zbliżona do wymagań napędowych samochodu osobowego.
 6. Silnik zabudowany w pojeździe, a w szczególności na moście kół jezdnych jest narażony na drgania. Z tego powodu silniki trakcyjne konstruuje się z większą szczeliną powietrzną, a ta zwiększa reaktancję rozproszenia. W silnikach indukcyjnych wpływa to moment maksymalny. Podany w pracy moment maksymalny silnika Sg 132 M4 wynosząca 3,8 M_N, w wykonaniu trakcyjnym jako DRM będzie znacznie mniejszy.
 7. Wymiarowanie współczynników tarcia lepkiego jak w tabelach: 5 - str.79, 7 – str.82 i 11 str. 100, nie zgadza się wymiarowo zapisem równań: 1.10 i 1.11 – str.39 oraz 1.52 i 1.53 str.55.
 8. Te same symbole oznaczają co innego, np. D_s –str.95 oznacza średnice i współczynników tarcia lepkiego wymieniony w pkt 7.
 9. Nie podaje uwag dotyczących korekty tekstu.

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

Konkluzja

Mgr inż. Dominik Adamczyk w swojej pracy doktorskiej pt.: „*Koncepcja i analiza zintegrowanego przetwornika elektromechanicznego do zastosowania w napędzie elektrycznego samochodu osobowego*”, wykonanej pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Andrzeja Wilka, udowodnił, że zintegrowany układ napędowy samochodu pracuje poprawnie i może być korzystną alternatywą do tradycyjnych układów napędowych samochodów elektrycznych.

Na podstawie przedstawionej rozprawy stwierdzam, że Autor:

- posiada dużą wiedzę w zakresie układów napędowych samochodów elektrycznych,
- ma bardzo dobrą umiejętność w opracowaniu modeli matematycznych: silników elektrycznych wraz z układem zasilania i układem jezdnym,
- wzorowo opracował modele matematyczne trzech maszyn DRM, ich programy symulacyjne i przeprowadził badania symulacyjne i eksperymentalne.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska ma jasno sprecyzowany cel, a postawione zadanie zostało zrealizowane w pełnym cyklu badawczym.



