



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI
I AUTOMATYKI

Gdańsk, dnia 26 lutego 2016 roku

Dr hab. inż. Grzegorz Redlarski, prof. nadzw. PG
Katedra Mechatroniki i Inżynierii Wysokich Napięć

Recenzja rozprawy doktorskiej zatytułowanej

„Koncepcja i analiza zintegrowanego przetwornika elektromechanicznego
do zastosowania w napędzie elektrycznego samochodu osobowego”

autorstwa mgr inż. Dominika Adamczyka

1. Podstawa opracowania opinii

Podstawę recenzji naukowej przedmiotowej rozprawy doktorskiej stanowi pismo Dziekana Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, Pana prof. dra hab. inż. Leona Swędowskiego (pismo L. dz.2/SD/WEiA/2016), z dnia 5 stycznia 2016 roku. Przedmiotowa opinia została opracowana w związku z wszczęciem postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora, w dyscyplinie Elektrotechnika, przez Radę Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej.

2. Doniosłość i trafność prezentowanej tematyki

Przedmiotem rozprawy było opracowanie „koncepcji oraz analiza zintegrowanego przekształtnika elektromechanicznego” dla potrzeb zastosowanie w układzie napędowym pojazdu elektrycznego. Istota propozycji polega na zastosowaniu dwuwirnikowej maszyny elektrycznej, która spełniałaby jednocześnie funkcję napędu (w miejsce silnika spalinowego) oraz elektromagnetycznego mechanizmu różnicowego (w miejsce mechanicznej przekładni zębatej, potocznie zwanej dyferencjałem). Proponowane rozwiązanie zostało osiągnięte przez zastosowanie silnika indukcyjnego klatkowego z dwoma wirnikami (zewnętrznym i wewnętrznym) oraz dodatkową przekładnię mechaniczną zmieniającą kierunek wirowania na przeciwny jednego z kół pojazdu przenoszących napęd na jezdnię.

Należy podkreślić, że opisana przez Autora propozycja nie jest nowa. Po raz pierwszy została ona wysunięta w 1914 roku przez amerykańskiego matematyka i inżyniera niemieckiego pochodzenia (urodzonego we Wrocławiu) *Charles'a Proteus'a Steinmetz'a* – twórcę silnika elektrycznego z dwoma wirnikami (*Double Rotor Machine*, DRM), którego istotą było pełnienie funkcji elektromechanicznego mechanizmu różnicowego, po jego zamontowaniu w tylnej części osi napędu samochodu terenowego firmy „Dey”. Niestety, z uwagi na nikłe zainteresowanie pojazdami elektrycznymi w owym czasie, rozwiązanie *Steinmetz'a* nigdy nie stało się popularne, a prace wynalazcy przerwała Jego śmierć, w 1923 roku.

Współcześnie prowadzone, intensywne badania naukowe związane z poszukiwaniem alternatywnych źródeł energii i/lub napędów powodują, że tematyka napędów elektrycznych pojazdów stanowi ponownie jedno z ważnych i aktualnych zagadnień techniki, podejmowanych przez liczne ośrodki naukowe z całego świata. Dodatkowo sprzyjają temu nowe i dostępne osiągnięcia w dziedzinie elektrotechniki – nieznane w czasach *Steinmetz'a* – które w sposób szczególny odnoszą się do możliwości sterowania silnikami elektrycznymi i tym samym momentem napędowym koła pojazdu.

POLITECHNIKA GDAŃSKA

tel. +48 58 347 23 17

fax: +48 58 347 21 36

e-mail: grzegorz.redlarski@pg.gda.pl

www.eia.pg.edu.pl

Wpłynęło dnia 8.03.2016 ul. G. Narutowicza 11/12

L. dz. 42/GD/WEiA 80-233 Gdańsk

3. Zawartość rozprawy – ocena merytoryczna osiągnięć Autora oraz uwagi dyskusyjne i krytyczne

Zasadniczą treść rozprawy (o objętości 137 stron) stanowi sześć rozdziałów, bogate zestawienie cytowanej literatury – liczącej 106 pozycji, właściwie dobranych oraz ilustrujących aktualny stan wiedzy i najnowsze trendy rozwojowe – a także dwa załączniki niosące szczegółowe informacje m.in. o parametrach opracowanego i wykonanego przez Autora stanowiska badawczego oraz o przygotowanym, w środowisku MAST, autorskim oprogramowaniu.

W rozdziale pierwszym, zatytułowanym „Wstęp” Autor omawia dotychczasowy stan wiedzy w dziedzinie napędów pojazdów elektrycznych, wskazuje obecnie stosowane rozwiązania i na ich tle przedstawia własną propozycję. Następnie omawia cel pracy, formułuje dwie tezy, nakreśla zakres zrealizowanych zagadnień badawczych oraz podaje zawartość kolejnych części rozprawy. W moim odczuciu rozwiązaniem lepszym byłoby takie, w którym osiągnięcia Autora, przedstawione w zestawieniu „zrealizowanych zagadnień badawczych” (str. 8) zostałyby dołączone do rozdziału 6. zawierającego „Podsumowanie i wnioski”. W moim odczuciu również tezy rozprawy, zostały sformułowane nieprawidłowo, a dodatkowo wydziwisk pierwszej z nich jest trywialny. Pierwsza z tez głosi bowiem, iż „Zaproponowana koncepcja indukcyjnej maszyny dwuwirnikowej może spełniać jednocześnie funkcję silnika napędowego oraz mechanizmu różnicowego”. Występujące w jej treści słowo koncepcja odnosi się do pewnego przypuszczenia, pomysłu, domysłu, czy też idei, która nie zawsze musi być prawdziwa, a zatem – moim zdaniem – może ewentualnie stanowić treść hipotezy badawczej będącej przypuszczeniem pewnej prawidłowości wymagającej udowodnienia, nie powinno natomiast stanowić treści tezy naukowej będącej twierdzeniem, które z natury rzeczy jest prawdziwe zawsze. O trywialnym wydziwisku tezy pierwszej świadczy zaś fakt, zastosowania przedmiotowej idei przez *Steinmetz*'a w samochodzie terenowym firmy „Dey” – co nawet Autor przyznaje, na str. 6 rozprawy. Teza druga głosząca, że „Opracowany przez Autora model pojazdu z dyferencjałem elektromagnetycznym umożliwia analizę stanów statycznych i dynamicznych pojazdu z uwzględnieniem złożonych algorytmów kontroli trakcji pojazdu”, w mojej ocenie – nie posiada struktury prawidłowej. Treść poprawnie sformułowanej tezy powinna przyjąć np. brzmienie „Zamodelowanie pojazdu elektrycznego z elektromagnetycznym mechanizmem różnicowym oraz zastosowanie zaawansowanych algorytmów kontroli trakcji pozwalają na pełną analizę stanów statycznych i dynamicznych tego pojazdu, w różnych warunkach pracy”.

W rozdziale drugim Autor przedstawia istotę funkcjonowania mechanizmu różnicowego oraz omawia wybrane rodzaje jednowirnikowych i dwuwirnikowych silników elektrycznych stanowiących napędy pojazdów elektrycznych. Podaje również propozycję elektromagnetycznego mechanizmu różnicowego oraz dokonuje oceny (stosując skalę 1 ÷ 5) możliwości zastosowania do tego celu silników trakcyjnych: indukcyjnego (*Induction Motor*, IM), synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi (*Permanent Magnet Motor*, PMM) oraz reluktancyjnego (*Switched Reluctance Motor*, SRM), typując jednocześnie rozwiązanie najkorzystniejsze (IM – tab. 1). W dalszej części rozdziału Autor podaje wybrane modele matematyczne maszyn elektrycznych, stosując formalizm *Lagrange*'a. W przypadku dwuwirnikowego silnika komutatorowego prądu stałego Autor korzysta z dostępnej literatury, natomiast wyprowadzenie układów równań różniczkowych reprezentujących modele matematyczne: dwuwirnikowego silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi oraz dwuwirnikowego silnika indukcyjnego z uzwojeniem klatkowym i cewkowym stanowią cenny i oryginalny wkład Autora. Niemniej jednak studiowane treści rozdziału drugiego nie jest zadaniem łatwym, bowiem Autor jest nieprecyzyjny w swych opisach. Przykładowo, przedstawiając charakterystyki trakcyjne układów napędowych (rys. 9), czy silnika elektrycznego (rys. 10) Autor nie podaje ani informacji o rodzaju silnika, ani nie określa jednostek występujących na osiach odciętych czy rzędnych. Wyjaśnienia wymaga również postać równania (1.15), które nie zawiera składowych M_{abq_2} oraz M_{acq_3} , które z kolei występują w funkcji podcałkowej określonej równaniem (1.12), a także sposób wyznaczenia funkcji dyssypacji *Rayleigh*'a we współrzędnych uogólnionych oraz nieuogólnionych – zgodnie z równaniami (1.25) i (1.37).

Rozdział trzeci dostarcza kompleksowej informacji o sposobie modelowania układu napędowego na przykładzie prototypu elektrycznego samochodu osobowego ELV001. W rozdziale tym Autor przedstawia mapy sprawności silnika i falownika zastosowanego w pojeździe oraz podaje modele energetyczne silnika, falownika i przekładni pasowej. Uwzględnia również funkcjonowanie szeregu pomocniczych systemów pokładowych pojazdu (klimatyzację, oświetlenie, wspomaganie kierownicy, etc.) w postaci obciążenia stałego o wartości 2 kW. W dalszej części rozdziału Autor omawia istotę oporów trakcyjnych, a następnie wyprowadza zależności matematyczne reprezentujące model układu jeźdnego pojazdu czterokołowego uwzględniający nieliniowość opony. Analizując zawartość rozdziału nie znalazłem wartości współczynników opisujących stopień naładowania baterii stanowiącej źródło energii w pojeździe, zgodnie z równaniem (1.71), ani wartości współczynników nieliniowego modelu opony, opisanego zależnością (1.78), których zakres zmian powinien odpowiadać przyjętym warunkom pracy pojazdu (w danym środowisku).

Rozdział czwarty dostarcza informacji o sposobie wyznaczania parametrów badanych maszyn dwuwirnikowych oraz wybrane wyniki badań eksperymentalnych wykonanych na przygotowanym, stanowisku fizycznym wyposażonym m.in. w dwa silniki indukcyjne, sprzęgnięte z dwuwirnikową maszyną prądu stałego – która w latach 80-tych XX wieku, była przedmiotem realizacji, na Politechnice Gdańskiej, projektu „Błotniak”, którego celem było opracowanie napędu niewielkich łodzi podwodnych. Przedstawione badania mają na celu weryfikację wyników symulacji, uzyskanych na bazie opracowanych przez Autora modeli, z wynikami pomiarów. Mają również na celu potwierdzające słuszność poczynionych założeń i/lub uproszczeń. Pierwsza część przedstawionych wyników odnosi się do maszyny elektrycznej z dwoma wirnikami – typu „Błotniak” – w przypadku której Autor dokumentuje wysoką zgodność wyników symulacji i pomiarów (w stanach statycznych i dynamicznych). Autor uzasadnia również (w pełni poprawnie) nieprzydatność tego rodzaju maszyn (komutatorowych prądu stałego), jako jednostek napędowych pojazdów elektrycznych m.in. z uwagi na wysoki moment tarcia i związane z nim straty, jak i wysoce niesatysfakcjonującą sprawność. Druga część przedstawionych wyników odnosi się do dwuwirnikowego, klatkowego silnika indukcyjnego, w przypadku którego Autor najpierw dokonuje wyznaczenia niezbędnych parametrów modelu (elektrycznych, w sposób analityczny lub eksperymentalny – z pominięciem metod połowych; oraz mechanicznych). Badania te należy uznać za niepełne, gdyż Autor nie dysponował maszyną indukcyjną z dwoma wirnikami, a zatem proces pełnej weryfikacji mógł ograniczyć jedynie do przypadku, w którym zakłada się, że jeden z wirników (wirnik zewnętrzny) jest unieruchomiony, a drugi z nich (wirnik wewnętrzny) pozostaje swobodny. Szerszego komentarza wymaga rozbieżność przebiegów prądów i_3 , (rys. 92, str. 102), które różnią się w sposób znaczący (w otoczeniu prędkości znamionowej wirnika wewnętrznego). Konieczna byłaby tutaj zarówno ilościowa ocena powstałych różnic, na podstawie wcześniej zdefiniowanej miary, jak i ew. ich wpływ na pracę rozpatrywanego napędu. Proszę również o wyjaśnienie czy rozbieżności wartości prądów udarowych, wynoszące odpowiednio 21% i 7% (podane w podsumowaniu, na str. 120) odnoszą się do tego przypadku? Proszę także o wyjaśnienie faktu braku weryfikacji modelu z silnikiem synchronicznym wzbudzonym magnesami trwałymi (PMM), któremu Autor poświęcił sporą uwagę w rozdz. 2, wyprowadzając odpowiedni układ równań różniczkowych?

Rozdział piąty stanowi ukoronowanie osiągnięć Autora bowiem zawiera on wyniki badań ruchu pojazdu elektrycznego typu ELV001, w rezultacie zastosowania dwóch różnych modeli układu napędowego, które uzasadniają słuszność postawionych tez naukowych. Pierwszy z modeli, zwany „energetycznym” pozwala na traktowanie komponentów układu napędowego, jako bloków o określonych wartościach mocy na wejściach i wyjściach i tym samym, na analizę sprawności wypadkowej, w odniesieniu do specyfiki ruchu pojazdu (cyklu miejskiego lub pozamiejskiego). Wyjaśnienia w tym zakresie wymaga zjawisko rosnącej sprawności układu podczas przejazdu z obciążeniem (tab. 12, kol. 3, str. 108). Natomiast drugi z modeli, zwany „obwodowym” pozwala na ostateczne zweryfikowanie efektywności rozwiązania łączącego funkcję silnika napędowego oraz mechanizmu różnicowego (w zasymulowanym cyklu jazdy po łuku). W moim odczuciu niniejszy rozdział, w sposób szczególny, świadczy o wysokim zaangażowaniu Doktoranta w realizację przedstawionej koncepcji, a uzyskane rezultaty to potwierdzają.

Rozdział szósty, zatytułowany „Podsumowanie i wnioski” stanowi podsumowanie osiągnięć Autora, do których w mojej ocenie należy przede wszystkim zaliczyć:

- wyprowadzenie układu równań różniczkowych reprezentujących modele: dwuwirnikowego silnika synchronicznego wzbudzanego magnesami trwałymi oraz dwuwirnikowego silnika indukcyjnego z uzwojeniem klatkowym i cewkowym,
- opracowanie modelu układu jezdnego pojazdu czterokołowego, przy jednoczesnym uwzględnieniu nieliniowego modelu opony (wg *Pacejki*),
- ostateczne udokumentowanie, iż dwuwirnikowa maszyna komutatorowa prądu stałego nie spełnia wymagań stawianych napędom pojazdów elektrycznych,
- przeprowadzenie szeregu symulacji i wykonanie licznych pomiarów, które pozwoliły na weryfikację zaproponowanych przez Autora, oryginalnych i ciekawych rozwiązań.

W podsumowaniu (rozdz. 6.3) widnieje również propozycja kilku kierunków dalszych badań. Tego rodzaju pozytywny stosunek Autora do tematu świadczy, że nie zamierza On poprzestać na aktualnym rozwiązaniu i zamierza je w dalszym ciągu doskonalić.

4. Redakcja rozprawy

Strona redakcyjna rozprawy stanowi jej najsłabsze ogniwo. Autor nie tylko popełnił szereg usterek redakcyjnych (np. brak przywołania tab. 2 na str. 26), czy potknięć językowych (związanych m.in. ze stylem pewnych sformułowań, czy używaniem źle brzmiących sformułowań, typu „w *oparciu*”), które w pewnym sensie Go usprawiedliwiają, gdyż w sposób naturalny towarzyszą treściom długich utworów naukowych, redagowanych przez jedną osobę i z tego względu są trudne do całkowitego wyeliminowania. Niemniej jednak występują tutaj i takie usterki, które nie powinny mieć miejsca w żadnej rozprawie naukowej, a już z pewnością w rozprawie doktorskiej. Do najistotniejszych spośród nich muszą zaliczyć sytuacje w których:

- rysunki i ich opisy znajdują się na różnych stronach, a opis jest chaotyczny. Przykładowo na str. 31 Autor przedstawia rysunki od 36 do 39, opisuje rys. 36, rys. 38 i rys. 39 oraz rys. 40 i rys. 41 (które znajdują się na str. 32), nie wspominając o rys. 37 z tejże strony, a dodatkowo odwołuje się do rys. 56 na str. 48. Ponadto Autor zostawia szereg pustych przestrzeni na wielu stronach, które można by wykorzystać do prawidłowego skorelowania treści rysunków z opisami (np. na str. 36 Autor podaje jedynie 5 linijek tekstu stanowiącego zapowiedź treści kolejnego podrozdziału, w jakim celu?).
- występują błędy ortograficzne! Przykładowo słowo *korzystny* pisane jest przez „ż” (str. 12), a wyraz pozamiejski (str. 105) pisany jest raz łącznie, a innym razem oddzielnie (na tej samej stronie, w kolejnej linii), etc.
- w wielu miejscach treści rozprawy zostały sformułowane dwuznacznie, a czasem towarzyszą im inne usterki np. niedokończone zdania. Przykładowo na str. 63 widnieje sformułowane o treści *Model matematyczny zasobnika energii...*, które nagle urywa się.
- nagminnie w sposób niekonsekwentny stosowane jest różnego rodzaju wypunktowanie, np. na str. 8 „-” inne niż na str. 13 „•” i jeszcze inne niż na str. 33 „>”,
- brak konsekwencji w podpisach rysunków, raz są wyśrodkowane (np. rys. 1, na str. 1) innym razem wyrównane do prawej strony (większość rysunków w pracy); brak konsekwencji podczas stosowania wcięć rozpoczynających akapity, raz występują (np. akapit pierwszy na stronie 4), a innym razem ich brak (większość akapitów w pracy); wcięcia numerów wzorów są różne, np. na str. 77, etc.
- nie znalazłem również (pomimo dwukrotnego przeszukania zawartości pracy) przywołań pozycji literatury podanych w zestawieniu pod numerami [15], [27], [37] i [87],
- strony zawierające „spis treści” oraz „wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów” stanowią integralną część opiniowanej rozprawy, zatem powinny być również ponumerowane.

Uważam, że ww. „usterki” nie powinny mieć miejsca!

5. Wniosek końcowy

Uwagi podniesione podczas opiniowania zawartości merytorycznej rozprawy, jak i wskazane, poważne usterki redakcyjne nie wpływają na moją ostateczną ocenę, która jest jednoznacznie pozytywna. W mojej ocenie wyniki rozprawy udowadniają postawione w jej wstępie tezy naukowe, a także dokładają się do aktualnego dorobku w dyscyplinie Elektrotechnika, w zakresie rozwiązań napędów stosowanych, w pojazdach elektrycznych. Opiniowana rozprawa jest w tym zakresie wysoce interesująca i oryginalna, toteż warto w przyszłości również przemyśleć osiągnięte rezultaty w kierunku użytecznym. Recenzowana rozprawa wskazuje ponadto, iż Doktorant realizując podjęty temat z sukcesem posiadał ogólną wiedzę w dyscyplinie Elektrotechnika, która jak sądzę w przyszłości zaowocuje podjęciem, kolejnych, również ciekawych oraz zawansowanych prac badawczych.

Biorąc powyższe pod uwagę stwierdzam, że – w moim przekonaniu – opiniowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim w *Ustawie 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki* i tym samym wnioskuję do Rady Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Grzegorz Redlański

