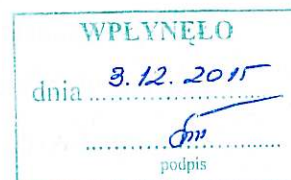


prof. dr hab. inż. Lesław **GOŁĘBIOWSKI**
Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki
Wydział Elektrotechniki i Informatyki
Politechnika Rzeszowska
tel. (017) 865 14 31, golebiye@prz.edu.pl

Rzeszów, 30.11.2015



Recenzja

pracy doktorskiej mgr inż. Sebastiana **LATOSIEWICZA**

pt.: „*Modelowanie i własności bezrdzeniowych maszyn synchronicznych tarczowych*”

dla Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej
AKADEMII GÓRNICZO-HUTNICZEJ im. STANISŁAWA STASZICA w KRAKOWIE ,
napisana na zamówienie L. Dz. WEAIIB-b/ Sekr/352/15 Dziekana,
dr hab. inż. Antoniego Cieśli, prof. AGH, z dnia 30 września 2015 roku.

1. Uwagi wstępne

Pojawienie się i rozwój wysokoenergetycznych materiałów magnetycznych umożliwia budowę maszyn elektrycznych, które charakteryzują się wysokim wskaźnikiem uzysku momentu z jednostki masy i objętości. Autor zajął się badaniem oraz porównaniem dwóch konstrukcji z polem osiowym. Jedną z nich są tarczowe silniki synchroniczne z bezrdzeniowym trójfazowym twornikiem, które są wzbudzane magnesem stałym na rdzeniu stalowym. Drugą konstrukcją są silniki wzbudzone magnesami ustawionymi w szereg Halbacha, które nie posiadają dlatego rdzenia magnetycznego. Mogą one pracować jako generatory w elektrowniach wiatrowych. Ze względu na powiększenie pojemności baterii, mogą też pracować jako silniki samochodów elektrycznych. Kandydat postawił sobie jako cel zbadanie właściwości maszyny osiowej całkowicie bezrdzeniowej dzięki magnesom ułożonym w szereg Halbacha i porównanie ich z maszyną osiową posiadającą magnesy na tarczach stalowych. Badania te przeprowadził w sposób dokładny biorąc pod uwagę wiele wskaźników oraz przebiegów, stosując zaawansowane metody numeryczne. Ponieważ opis analityczny rozpatrywanych zagadnień jest możliwy w bardzo ograniczonym zakresie, przy badaniach stosował też obliczenia metodą elementów skończonych 3D. Dzięki temu mógł uwzględnić rozproszenie strumieni, jakie zachodzi przy wewnętrznej i zewnętrznej krawędzi magnesów. Porównywał SEM generowaną przy biegu jałowym, moment elektromagnetyczny, indukcję własną i wzajemną, mo-

ment bezwładności wirnika obu typów maszyn osiowych itp. Brał pod uwagę wielkości uśrednione, jak też skład harmonicznych badanych przebiegów. Pozwoliło to Doktorantowi na wyciągnięcie wielu istotnych wniosków i uwag. W znanej mi literaturze naukowej brak jest tak głębokiej analizy porównawczej tych obu typów maszyn, które są tak zbliżone do siebie pod względem konstrukcji.

2. Cel, zakres i układ pracy

Celem, jaki doktorant postawił w pracy jest:

„poznanie własności i specyficznych cech maszyny elektrycznej całkowicie bezrdzeniowej”

Dodatkowo sformułowana została teza, która brzmi:

„Maszyny bezrdzeniowe z magnesami trwałymi stanowią istotny postęp, ale nie przełom w konstrukcji maszyn elektrycznych. Mogą one stanowić konkurencję dla maszyn tradycyjnych w zakresie małych i średnich mocy oraz niskich napięć”.

Cel pracy został zrealizowany poprzez:

- wstępną, uproszczoną analizę maszyn osiowych z tradycyjnym układem magnesów na stalowych tarczach oraz z magnesami Halbacha,
- opracowanie zbioru przebiegów oraz parametrów, które będą porównywane dla obu typów badanych silników,
- opracowanie nowych, uniwersalnych algorytmów opartych na bezpośrednich metodach analitycznych oraz na metodzie elementów skończonych 3D,
- przeprowadzenie eksperymentów numerycznych dla wybranych układów i porównanie uzyskanych wyników, stwierdzenie wpływu konstrukcji na badane parametry maszyn,
- przeprowadzenie analizy możliwości sterowania badanych maszyn.

Opracowanie algorytmów wymagało od Doktoranta wprowadzenia założeń ułatwiających implementację, a jednocześnie określających zakres ich stosowalności. Pomimo tych uproszczeń stworzone algorytmy nie tracą na uniwersalności, a ich ideę można w odpowiedni sposób zaadaptować dla innych złożonych geometrycznie układów maszyn z magnesami trwałymi.

Układ pracy, zorganizowany w przejrzysty i logiczny sposób, ułatwia zrozumienie istoty problemu. We wstępie pracy Doktorant zaprezentował krótki rys historyczny tworzenia szyku Halbacha magnesów trwałych. Scharakteryzował materiały magnetyczne oraz ich rozwój i oznaczenia. Następnie przedstawił fizyczne sformułowanie problemu wraz z krótką charakterystyką współcześnie wykorzystywanych technologii produkcji maszyn z magnesami trwałymi. Rozważył różne podziały maszyn tarczowych ze względu na ich budowę i umieszczenie magnesów, w szczególności w szyku Halbacha. Uwzględnił skoncentrowane uzwojenie maszyn tarczowych w wykonaniu z zachodzącymi za siebie cewkami, czy też z cewkami usytuowanymi obok siebie o budowie jedno- lub dwuwarstwowej. Dokonał przeglądu literatury dotyczącej omawianego zagadnienia, w szczególności odnośnie zastosowań w elektrowniach wiatrowych. W rozdziale drugim przedstawił modele maszyn tarczowych do badań symulacyjnych. Podstawą konstrukcji obu typów badanych maszyn było zachowanie tych samych gabarytów a nie mocy znamionowej. W rozdziale trzecim Doktorant udowodnił, że dzięki uporządkowanym przebiegom natężenia magnetycznego w maszynach tarczowych, możliwe jest prowadzenie obliczeń konstrukcyjnych metodami analitycznymi. Powinny one jednak być sprawdzane obliczeniami metodą elementów skończonych. Wskazał, że dla maszyn tarczowych strumień wychodzący z magnesów jest inny niż ten, który przenika przez uzwojenia. Tym różnią się maszyny tarczowe od radialnych, a przyczyną różnicy jest posiadana przez nie duża szczelina powietrzna. Przez to nie można pominąć strumienia zamykającego się między sąsiednimi magnesami. Dla określenia tych zależności wprowadził współczynniki zobrazowane na rys. 3.3 i 3.4, a ich poprawność sprawdził obliczeniami MES 3D, których wyniki zawarł z kolei na rys. 3.5 i 3.6. Dokonał też oceny udziału przepływu prądu przez uzwojenia na wartości indukcji w obwodach. Ze względu na dużą szczelinę powietrzną udział ten wyszedł mniejszy od 1% całej wartości indukcji. Ocenił też różnicę pomiędzy strumieniem wychodzącym z magnesów i strumieniem przekraczającym środek szczeliny na poziomie 5%, przy czym znaki tej różnicy są różne dla obu rozpatrywanych typów maszyn tarczowych. Liczby te określają poziom błędu, jakiego można się spodziewać stosując obliczenia analityczne. Rozdział czwarty Autor poświęcił obliczaniu wielkości niezbędnych przy projektowaniu i symulacjach maszyn tarczowych. Moment elektromagnetyczny obliczał przy pomocy gęstości objętościowej siły Lorenza, będącej iloczynem wektorowym gęstości prądu i indukcji magnetycznej. Przy obliczeniach analitycznych przyjmował rozłożenie prądu w cienkiej warstwie prądowej w środku szczeliny powietrznej w rozłożeniu na składowe harmoniczne. Model z warstwami prądowymi na tarczy twornika nie stwarza możliwości badania wpływu osiowego ułożenia boków zezwojów w szczelinie. Do zbadania tych zależności

potrzebny był model MES 3D. Autor wyprowadził wzór na moment elektromagnetyczny stosowany dla maszyn PMBLDC i AC w formie sumy iloczynów prądów uzwojeń i indukowanych w nich sił elektromagnetycznych (napięć) wytworzonych przez strumienie magnesów stałych (4.29). Przeprowadził porównanie tego wzoru z podanym w literaturze [34] i udowodnił różnicę sięgającą do 6%. Opis matematyczny zagadnienia przy pomocy sformułowania analitycznego pozwolił na zachowanie analogii końcowych wzorów i umożliwił stworzenie uniwersalnych algorytmów, które dają się zastosować do obu maszyn tarczowych. W rozdziale piątym przeprowadzono analizę rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej oraz symulacje stanu ustalonego dla obu typów maszyn tarczowych przy pomocy stało-czasowych obliczeń MES 3D. Przy symulacjach stanu ustalonego wykorzystano zasilanie uzwojeń stojana przemiennym prądem trójfazowym. Dodatkowo, przy zasilaniu prądem stałym jednego uzwojenia wyznaczono indukcyjności własne i wzajemne uzwojeń. W rozdziale szóstym Autor dokonał porównania wyników obliczeń analitycznych oraz dokonanych metodą MES 3D dla obu typów maszyn tarczowych. W rozdziale siódmym przeanalizował maszyny tarczowe pod kątem obiektu sterowania. Zwrócił uwagę na bardzo małą reakcję oddziaływania twornika oraz, związaną z tym dużą rolę rezystancji uzwojeń i źródła zasilania. Z tego powodu można przyjąć liniową charakterystykę magnesów trwałych, założyć sinusoidalną zależność strumieni sprzężonych z uzwojeniami od położenia wirnika i zastosować do analizy model Parka. Autor zauważył dużą zależność charakterystyk od dokładności przyjętych wartości rezystancji i indukcyjności rozproszenia. Zwrócił uwagę na brak tłumienia występujących drgań mechanicznych oraz modulacje prądów twornika. Cztery dodatki zawierają wyniki i analizę przeprowadzonych eksperymentów numerycznych. Pracę wieńczy obszerna literatura.

3. Merytoryczna ocena pracy

Cel pracy zrealizowano poprzez:

- stworzenie uniwersalnego algorytmu analitycznego, umożliwiającego obliczanie parametrów obu rozpatrywanych maszyn tarczowych przy różnych ich wymiarach,
- sprawdzenie wyników analitycznych przy pomocy MES 3D i stwierdzenie występowania pomijalnie małego błędu,
- wyciągnięcie bardzo obszernych wniosków z wyników badań symulacyjnych,

Poprzez zrealizowanie celu pracy, udowodniono tezę. Pod względem merytorycznym praca

nie budzi wątpliwości. Oceniam wkład pracy Doktoranta w opracowanie rozprawy jako duży. Podczas jej realizacji wykazał się świetną znajomością zagadnień maszyn elektrycznych jak i umiejętnością posługiwania się zaawansowanym aparatem matematycznym. Należy podkreślić też doskonałą znajomość literatury dotyczącej badanego tematu i umiejętność posługiwania się zawartymi w niej wiadomościami. Szkoda, że trudności związane z finansami uniemożliwiły Mu sprawdzenie otrzymanych zależności na modelu rzeczywistym.

Wyniki badań, nawet przy poczynionych uproszczeniach, mają zastosowanie praktyczne. Stworzone oprogramowanie może zostać wykorzystane do szerszego badania maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi, oraz służyć jako punkt wyjścia do implementacji aplikacji analizujących ich struktury trójwymiarowe.

4. Edytorska ocena pracy

Praca jest napisana poprawnie pod względem stylistycznym i ortograficznym. Zastosowano poprawne słownictwo naukowe i techniczne. Układ treści, podział na rozdziały, przyjęcie celu pracy oraz sformułowanie wniosków końcowych są przejrzyste. Wybór literatury jest odpowiedni i reprezentatywny dla dziedziny wiedzy obejmującej zagadnienia analizowane w pracy. Należy też zwrócić uwagę na dorobek własny Doktoranta. Nie ustrzegł się jednak kilku błędów edytorskich, które przedstawiłem mu w bezpośredniej rozmowie. Błędy te jednak są marginalne i nie pomniejszają wartości merytorycznej pracy.

4. Uwagi krytyczne i pytania

Wnikliwa analiza pracy nasuwa kilka krytycznych uwag i pytań. Uwagi te raczej wskazują kierunki dalszych badań i nie są argumentami dyskredytującymi osiągnięcia Doktoranta.

1. Czym jest spowodowane występowanie harmonicznych parzystych w przebiegach SEM indukowanych w uzwojeniach stojana przez pola magnesów trwałych (str. 85) ? Czy powodem jest zbyt krótki czas obliczanego przebiegu i ewentualne zniekształcenia na jego początku (rys. 5.5) ? Wydaje się, że obliczenia winny obejmować kilka okresów czasowych a do analizy harmonicznych powinien być wzięty ostatni okres czasowy.
2. Proszę ustosunkować się do nietłumionych drgań kąta mocy oraz do modulacji prądu twornika po skokowej zmianie obciążenia, które zostały przedstawione na rys. 7.3 i 7.4.
3. Proszę wyjaśnić rolę współczynników przedstawionych na rys. 3.3 i 3.4, w szczególności współczynnik ζ .
4. Jaki może mieć wpływ mała wartość indukcyjności własnych i wzajemnych maszyn tarczowych na proces ich sterowania ?

5. Podsumowanie

Doktorant wykazał się umiejętnością poprawnego wyboru i sformułowania naukowego celu pracy. Następnie logicznie i konsekwentnie, z dobrą znajomością zagadnienia, cel ten zrealizował. Badania maszyn tarczowych zrealizował dla obu ich typów, przy różnych wymiarach oraz dla różnych typów uzwojeń. Stworzył oprogramowanie analityczne, które sprawdził pod względem dokładności metodą MES 3D. Może ono być zastosowane również do innych, podobnego typu maszyn z magnesami trwałymi. W rozdziale ósmym wyciągnął bardzo interesujące wnioski z badań, a w Podsumowaniu wytyczył kierunki dalszych badań w uzależnieniu od jakości stosowanych magnesów trwałych.

Analiza efektywności metod oraz wpływu dobieranych parametrów na wyniki została przeprowadzona dla licznych przykładów i odniesiona zarówno do wyników analitycznych jak i obliczeń MES 3D. Uzyskane wyniki potwierdzają postawioną przez Doktoranta na wstępie tezę.

Uważam, że Doktorant w pełni zrealizował cel pracy; nie ma błędów merytorycznych.

Stwierdzam, że praca mgr inż. Sebastiana LATOSIEWICZA spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim zawarte w Ustawie o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. oraz Rozporządzeniu Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 i Rozporządzeniu Ministra Edukacji i Nauki z dnia 15 grudnia 2005 r. **W związku z tym proszę Radę Wydziału Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie o dopuszczenie jej do publicznej obrony i w wyniku jej poprawności nadanie Doktorantowi stopnia doktora.**

PRZEWODNICZĄCY
Oddziału Rzeszowskiego PTETIS
Lesław Gotębiowski
prof. dr hab. inż. Lesław Gotębiowski