dr hab. inż. Wiesław Łyskawiński
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej
Politechnika Poznańska

WYDZIAŁ ELEKTRYCZNY
DZIEKANAT
Wpł. 28 -09- 2015
DZIEKAN
Wydziału Elektrycznego
Politechniki Poznańskiej
dr hab. inż. Zbigniew Nadolny, prof. PP

Poznań, dn. 2015-09-28

Recenzja pracy doktorskiej mgra inż. Marcina ANTCZAKA pt.

„Polowo-obwodowa analiza zjawisk elektromagnetycznych w silniku elektrycznym o biegunach wpisywanych"

1. Ocena wyboru tematu i celu pracy

Rozprawa dotyczy polowej symulacji stanów pracy silników o biegunach wpisywanych, które są zaliczane do maszyn synchronicznych magnetoelektrycznych o rozruchu bezpośrednim. Konstrukcja tego silnika jest stosunkowo nowa. Została opracowana pod koniec ubiegłego wieku. Jej zaletą jest brak podczas rozruchu pulsacji momentu pochodzącego od magnesów i znaczne ograniczenie prądu rozruchowego. Przy czym rozruch odbywa się w wyniku bezpośredniego podłączenia silnika do sieci elektrycznej. Rozwój tych maszyn jest uzależniony od doskonalenia metod symulacji stanów pracy, metod projektowania i optymalizacji oraz opracowania nowych materiałów magnetycznych.

Tematyka rozprawy bardzo dobrze wpisuje się w zakres tych prac. Do analizy stanów pracy i projektowania przetworników elektromechanicznych wykorzystuje się powszechnie możliwości, jakie stwarzają współczesne komputery. Są one stosowane m.in. do analizy zjawisk i symulacji stanów pracy przetworników. Programy symulacyjne stwarzają konstruktorowi możliwość szybkiej „wirtualnej" realizacji i weryfikacji projektu. Pozwala to uniknąć kosztownego i czasochłonnego budowania wielu prototypów. Skraca się znacznie także czas wdrażania do produkcji.

Warunkiem powodzenia nakreślonego algorytmu postępowania jest stosowanie jak najdokładniejszych modeli matematycznych przetworników elektromechanicznych. Z tego względu bardzo wysoko należy ocenić podjętą przez mgra inż. Marcina Antczaka próbę opracowania efektywnego algorytmu i oprogramowania do analizy stanów pracy i projektowania silników o biegunach wpisywanych z uwzględnieniem przemagnesowania obrotowego materiału magnetycznie twardego.

Autor pracy dobrze wpasował się w nurt prowadzonych aktualnie w tym zakresie badań. Postawił w rozprawie tezę, że do "analizy nieustalonych stanów pracy i wyznaczania parametrów funkcjonalnych silników o biegunach wpisywanych można zastosować kompleksowy polowo-obwodowy model zjawisk elektromagnetycznych uwzględniający zjawisko histerezy magnetycznej". Doktorant przyjął również, że celem pracy jest "pogłębienie teorii i udoskonalenie metod analizy nieustalonych zjawisk elektromagnetycznych w silnikach o biegunach wpisywanych".

Uważam zatem, że tematyka rozprawy jest w pełni uzasadniona, zarówno z naukowego jak też i z technicznego punktu widzenia.

2. Redakcja i zakres rozprawy

Rozprawa liczy 142 stron i składa się z 7 rozdziałów oraz spisu literatury obejmującego 139 pozycji, w tym 6 współautorskich Doktoranta.

W rozdziale pierwszym uzasadniono podjętą tematykę badań, sformułowano cel, tezę oraz podano zakres rozprawy.

W drugim rozdziale Autor przedstawił budowę i zasadę działania silników o biegunach wpisywanych, ich wady i zalety oraz możliwości wykorzystania w różnych gałęziach gospodarki. Rozdział trzeci zawiera opis wybranych skalarnych i wektorowych modeli matematycznych histerezy magnetycznej, które wykorzystano do opracowania wektorowego modelu przemagnesowania obrotowego materiałów magnetycznie twardych. Przy czym parametry modelu wektorowego wyznaczano na podstawie granicznej pętli histerezy oraz stałych materiałowych. Na przykładzie dwóch materiałów proszkowych zastosowanych do budowy wirników rozważanego silnika Doktorant zbadał przydatność modeli odwrotnych Jilesa-Athertona, Hodgdona oraz modelu z funkcją eksponencjalną do odwzorowania właściwości histerezowych materiałów magnetycznie twardych.

Polowy model sprzężonych zjawisk w silniku o biegunach wpisywanych został zaprezentowany w rozdziale czwartym. Model obejmuje równania opisujące rozkład pola magnetycznego, właściwości histerezowe materiałów magnetycznie twardych, równania obwodów elektrycznych silnika oraz równanie ruchu wirnika. W modelu właściwości magnetyczne ferromagnetyka Autor proponuje odwzorować za pomocą reluktywności magnetycznej, reluktywności różniczkowej lub wektora gęstości prądów magnetyzacji.

Algorytm rozwiązywania równań kompleksowego modelu polowo-obwodowego silnika o biegunach wpisywanych zaprezentowano w rozdziale piątym. Rozkład pola magnetycznego wyznaczono wykorzystując metodę elementów skończonych krawędziowych. Do odwzorowania przemagnesowania obrotowego materiału magnetycznie twardego zaproponowano algorytmy bazujące na modelu wektorowym i na zmodyfikowanym modelu wektorowym histerezy. Do rozwiązywania nieliniowych równań polowo-obwodowego modelu dyskretnego Autor zastosował metodę Newtona-Raphsona wykorzystując procedurę gradientów sprzężonych z prekondycjonowaniem diagonalnym.

W ramach rozdziału szóstego opisano opracowane przez Doktoranta oprogramowanie do analizy zjawisk elektromagnetycznych i symulacji stanów pracy silnika o biegunach wpisywanych. Oprogramowanie wykorzystano w badaniach silnika z uzwojeniem wpisującym skupionym umieszczonym w żłobkach stojana oraz silnika, w którym do wpisywania biegunów wykorzystano uzwojenie stojana. Dokonano analizy porównawczej wyników symulacyjnych i pomiarowych rozpatrywanego silnika.

W ostatnim rozdziale podsumowano wyniki prac i zestawiono najważniejsze osiągnięcia Autora.

Uważam, że treść i zakres rozprawy są zgodne z jej tytułem. Układ pracy jest logiczny i spójny. Rozprawa napisana jest komunikatywnie, a jej redakcja jest poprawna. Autor w sposób jasny i jednoznaczny precyzuje cel, tezę i założenia upraszczające. Niewątpliwie świadczy to o jego dojrzałości naukowej. Dobór

literatury wskazuje na to, że Doktorant ma duże rozeznanie i na bieżąco śledzi publikacje z dziedziny będącej przedmiotem jego zainteresowań. Bogaty i trafnie dobrany materiał graficzny przygotowano bardzo starannie, co jeszcze bardziej sprzyja zrozumieniu intencji Autora.

Zauważone uchybienia redakcyjne wymieniłem w „Uwagach szczegółowych".

3. Ocena wartości naukowej

Mgr inż. Marcin Antczak udowodnił słuszność postawionej w rozprawie tezy oraz osiągnął zamierzony cel. Wykazał się przy tym bardzo dużą wiedzą i pomysłowością zarówno w zakresie modelowania zjawisk elektromagnetycznych, jak i projektowania oraz badania silników o biegunach wpisywanych. Doktorant opracował oryginalny, kompleksowy polowo-obwodowy model symulacyjny silnika o biegunach wpisywanych, w którym uwzględnił m.in. przemagnesowanie obrotowe materiału magnetycznie twardego.

Na podstawie tego modelu opracował efektywny algorytm i oprogramowanie do analizy nieustalonych stanów pracy rozpatrywanych silników. W celu zweryfikowania wiarygodności opracowanego polowo-obwodowego modelu symulacyjnego oraz zaproponowanej metody analizy i projektowania silników synchronicznych o biegunach wpisywanych, zaprojektowano i zbudowano prototyp takiego silnika. Doktorant uzyskał dobrą zbieżność wyników obliczeń z rezultatami pomiarów potwierdzając w ten sposób dużą wiarygodność opracowanego modelu symulacyjnego.

Rozprawa cechuje się bardzo wysokim poziomem naukowym. Do najważniejszych osiągnięć Autora zaliczam:

1. opracowanie oprogramowania do modelowania rodziny pętli histerezy za pomocą skalarnych odwrotnych modeli Jilesa-Athertona, Hodgdona i modelu z funkcją eksponencjalną oraz identyfikacji parametrów tych modeli,
2. opracowanie algorytmów i procedur modelowania przemagnesowania obrotowego materiałów magnetycznie twardych oraz wyznaczenie współczynnika anizotropii tych materiałów na zbudowanym stanowisku pomiarowym,
3. sformułowanie równań polowo-obwodowego modelu dyskretnego zjawisk i opracowanie procedur rozwiązania tych równań z wykorzystaniem m.in. algorytmu gradientów sprzężonych z prekondycjonowaniem diagonalnym,
4. opracowanie oraz doświadczalne zweryfikowanie wiarygodności algorytmu i oprogramowania do analizy stanów nieustalonych silników o biegunach wpisywanych.

Na uwagę zasługuje także bardzo dobrze opanowana przez Doktoranta umiejętność formułowania wniosków na podstawie uzyskanych wyników symulacji i rezultatów badań eksperymentalnych oraz formułowania wytycznych dotyczących projektowania tego typu silników.

Recenzowana praca wnosi duży wkład w pogłębienie wiedzy w zakresie analizy i projektowania silników o biegunach wpisywanych.

4. Uwagi ogólne

W trakcie zapoznawania się z treścią rozprawy nasunęło mi się kilka pytań i uwag o charakterze dyskusyjnym.

1. W rozprawie Doktorant opisał i przetestował trzy modele odwzorowania pętli histerezy materiałów magnetycznych: Hodgdona, Jilesa-Athertona i z funkcją eksponencjalną. Czy Autor mógłby porównać te modele z innymi modelami odwzorowania histerezy magnetycznej opisywanymi w literaturze?
2. W opracowanym modelu silnika z biegunami wpisywanymi wykorzystano wektorowe potencjału magnetyczny **A** i elektryczny **T**. Jaka jest przydatność do opracowania takiego modelu potencjałów skalarnych magnetycznego i elektrycznego?
3. W algorytmie rozwiązywania nieliniowych równań dyskretnego modelu polowo-obwodowego rozpatrywanego silnika wykorzystano m.in. metodę gradientów sprzężonych z prekondycjonowaniem diagonalnym. Jakie były przesłanki wyboru tej metody?
4. Silniki z biegunami wpisywanymi stanowi ciekawą alternatywę dla innych silników prądu przemiennego, gdyż podczas rozruchu pobierają mniejszy prąd. Czy możliwy jest rozruch tych silników bez wykorzystania klatki rozruchowej, co uprościłoby strukturę podobnie jak w silniku histerezowym? Czy Doktorant mogłyby dokonać oceny porównawczej obu struktur?
5. Jakie Autor widzi problemy związane z udoskonaleniem opracowanego polowo-obwodowego modelu silnika, których jeszcze nie rozwiązano i mogą stanowić tematykę przyszłych dociekań? Czy istnieje możliwość kontynuacji badań? Które z nich warto kontynuować?

5. Uwagi szczegółowe

Poniżej przedstawiono wykaz uwag dotyczących uchybień o różnym charakterze w tym także natury merytorycznej, uporządkowanych w kolejności wynikającej z ich występowania w tekście:

1. strona 6 (s.6) (wiersz 6 od dołu = w6d) - zamiast określenia "materiałów magnetycznych miękkich" powinno być "materiałów magnetycznie miękkich",
2. s.13 w15d - czy w celu stwierdzenia, że silniki są zasilane jednofazowo potrzebne są badania literaturowe? ,
3. s.14 (wiersz 17 od góry=w17g) - zamiast "medycznego" powinno być "medyczny",
4. s.16 w9g - zaimek "one" jest niepotrzebny,
5. s.20 w równaniu (3.7) nie zostało wyjaśnione jak jest określany zakres całkowania od H_1 do H_2,
6. s.13 w20g - koniec zdania powinien brzmieć "..., szczególnie *w* przypadku nietypowych warunków eksploatacyjnych.",
7. s.24 - brak opisu współczynników występujących w funkcji f'(B) (w8g) oraz g'(B) (w10g),
8. s.29 w11g - czy odpowiedź na wymuszenie może być "konstruowana"?
9. s.30 w3d - zamiast "miedzy" powinno być "między",

10. s.37 w7g - w wyrażeniu opisującym b_k występują współczynniki α_1 i α_2, które pojawiły się wcześniej w funkcji f'(B) na s.24; czy to są te same współczynniki?,
11. s.30 w5g - zamiast "Indukcja" powinno być "Indukcję",
12. s.39 - niepoprawne sformułowania "pod wpływem spowodowane zmianą" (w8d) oraz "są zbliżone do liniowych [95] uzyskuje się" (w7d),
13. s.41 w4g - zamiast "funkcja" powinno być "funkcje",
14. s.42 - czy kąt φ_k w zależności (3.64) jest tym samym kątem, co w wyrażeniach (3.41) i (3.43),
15. s.43 w4d - powinno być "rozwiązania" zamiast "rozwiązana",
16. s.47 w2g - czy wartości stałych anizotropii K_1 i K_2 z zależności (3.72) dobierano "drogą prób i błędów", czy jednak było to działanie celowe?,
17. s.49 w2g - wiersz nie wypełniony tekstem,
18. s.49 w3g - niepoprawne sformułowanie "w polowym modelu polowo-obwodowym zjawisk w silniku o biegunach wpisywanym",
19. s.54 w5d - zamiast "natężeniem" powinno być "natężenia",
20. s.55 w3g - zamiast "katy miedzy" powinno być "kąty między",
21. s.55 w zal. (4.14) użyto niepoprawnego oznaczenia tensora reluktywności ν_{aA}, jakie znaczenie ma indeks a użyty we wzorze (4.15),
22. s. 58 w zal. (4.25) i (4.26) brakuje symbolu Δ, a w równaniu (4.27) ostatni składnik powinien być dodawany a nie odejmowany,
23. s.59 w1g - wiersz nie wypełniony tekstem,
24. s.64 w1d i w2d - opis wielkości, które nie występują w tabeli 5.1,
25. s.66 - brak opisów do nowych symboli użytych w tabeli 5.3,
26. s.71 - co oznacza zakres całkowania od Q_i do Q_j w zal. (5.26),
27. s.74 - w równaniu 5.37 przy ostatnim składniku brakuje indeksów górnych e,
28. ss.79 w13g - zamiast "pole" powinno być "pola",
29. s.80 w 11d - błędne sformułowanie "w po",
30. s.82 w5g - zamiast "pasmowę metoda interpolacyjna" powinno być " pasmową metodę interpolacyjną",
31. s.85 - symbol α w zal. (5.54) jest kątem obrotu, a w równaniu (3.2) był parametrem kształtu,
32. s.86 - czy na pewno wyrażenie (5.59) opisuje składową momentu w kierunku osi z,
33. s. 93 w4d - niepotrzebne na początku wiersza "a",
34. s. 95 w5g - zamiast "rożnych" powinno być "różnych",
35. s.101 - błędna numeracja rysunków do końca rozdziału,
36. s.102 w11g - zamiast "zaprojektowanego" powinno być "zaprojektowania",
37. s.104 w3d - zamiast "uzwojeniem" powinno być "uzwojeniu" oraz zamiast "po" powinno być "w",
38. s.105 - nie wyjaśniono jaka jest różnica pomiędzy warstwą przy szczelinie oraz przy wirniku,
39. s.106 - połowa strony jest pusta,
40. s.109 w5g - chodzi zapewne o materiał magnetycznie twardy,
41. s.111 - nie opisano występujących na rys.6.20 czasów t_z i t_w,
42. s.118 w1d - zamiast "współpracującej" powinno być " współpracująca",
43. s.120 w8g - zamiast "pobieranego" powinno być "pobierany",

44. s.124 w8d - niepotrzebny przyimek "w",
45. s.128 w1g - zamiast "Zmianą" powinno być "Zmianom",
46. s.128 w7g - zamiast "wektorowego" powinno być "wektorowy",
47. s.128 w4d - s.137 w pozycji [34] - zamiast "strony" lepiej użyć skrótu,
48. s.139 - powtórzone pozycje [83] i [87].

Powyższe uwagi ogólne i szczegółowe nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę pracy.

6. Wniosek końcowy

W przedłożonej rozprawie mgr inż. Marcin Antczak przedstawił oryginalny i wartościowy dorobek naukowy. Wykazał się bardzo dużym zasobem wiedzy z zakresu analizy i badania zjawisk elektromagnetycznych w silnikach o biegunach wpisywanych. Realizując cel pracy opracował kompleksowy polowo-obwodowy model i efektywne oprogramowanie do analizy pracy silników o biegunach wpisywanych, przebadał symulacyjnie i laboratoryjnie rozpatrywany silnik. Doktorant potrafi samodzielnie i poprawnie rozwiązywać trudne problemy naukowe i logicznie przedstawiać wyniki swoich badań.

Uważam, że opiniowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim przez Ustawę o Tytule Naukowym i Stopniach Naukowych oraz o Stopniach i Tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr. 65, poz. 595) oraz Rozporządzenia Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 roku.

W związku z tym wnioskuję o przyjęcie przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora Pana mgra inż. Marcina Antczaka do publicznej obrony pracy.

Wiesław Łyskawiński

dr hab. inż. Wiesław Łyskawiński
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej
Politechnika Poznańska

Poznań, dn. 2015-09-28

Recenzja pracy doktorskiej mgra inż. Marcina Antczaka pt.

„Polowo-obwodowa analiza zjawisk elektromagnetycznych w silniku elektrycznym o biegunach wpisywanych"

Wniosek dodatkowy

Biorąc pod uwagę wysoki poziom merytoryczny rozprawy, kompleksowość, nowoczesność i aktualność podjętej tematyki, interesujące wyniki badań, precyzyjnie sformułowane wnioski końcowe oraz wzorową stronę graficzną pracy, uważam, że recenzowana praca jest godna wyróżnienia. W związku z powyższym zgłaszam wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej pt. **"Polowo-obwodowa analiza zjawisk elektromagnetycznych w silniku elektrycznym o biegunach wpisywanych"** autorstwa Pana mgra inż. Marcina Antczaka. Dodatkowym argumentem jest znaczący dorobek naukowy Doktoranta obejmujący 26 publikacji, w tym aż 6 artykułów w czasopismach z bazy JCR.

Wiesław Łyskawiński