

Katowice, dn. 21.03.2019

dr hab. inż. Jakub Bernatt, prof. KOMEL
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL
Al. Roździeńskiego 188
40-203 Katowice

OCENA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR INŻ. ARTURA PAKOSZA
PT. „**WPLYW WYBRANYCH METEOD REDUKCJI NA MOMENT ZACZEPOWY MASZYN
ELEKTRYCZNYCH WIELOBIEGUNOWYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI**” WYKONANEJ POD
KIERUNKIEM DR HAB. INŻ. ZBIEGNIWA GORYCY PROF. PŚK

Recenzję opracowałem na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej dr hab. inż. Antoniego Różowicza prof. PŚk, umowa z dnia 07.03.2019 r.

Tematyka rozprawy

Tematyka rozprawy dotyczy możliwości redukcji momentu zaczepowego w maszynach z magnesami trwałymi za pomocą różnych metod jego ograniczania. Moment ten powstaje na skutek współdziałania pola magnetycznego pochodzącego od magnesów trwałych umieszczonych w wirniku i stojana o zmiennej przewodności magnetycznej. Ma on charakter pulsujący i występuje podczas pracy maszyny, powodując powstawanie drgań i hałasu. Jest on również niepożądany w czasie rozruchu maszyny, zwłaszcza pracującej jako generator w siłowni wiatrowej, gdyż powoduje opóźnianie chwili włączania jej do ruchu, czyli rozpoczynanie pracy przy większej prędkości wiatru.

Temat jest jak najbardziej aktualny, w dobie stale zwiększającego się upowszechniania maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi. Maszyny te (zarówno silniki jak i prądnice) charakteryzują się lepszymi parametrami (gęstość energii, sprawność) niż pozostałe rodzaje im odpowiadających maszyn, czyli zarówno prądu stałego jak i indukcyjne, mają jednak jedną istotną wadę, jaką jest występowanie momentu zaczepowego, który jest zjawiskiem niepożądanym.

Autor w pracy analizuje nie tyle metody eliminacji bądź ograniczenia wartości momentu zaczepowego, ale dowodzi, że stosowanie dwóch metod daje lepsze rezultaty niż tylko jednej z nich (co też jest znane z praktyki inżynierskiej), jak również udowadnia, że kolejność ich stosowania nie ma praktycznie znaczenia dla uzyskiwanego rezultatu.



Charakterystyka rozprawy

Rozprawa wraz z załącznikami liczy 128 stron formatu A5 podzielonych na 6 ponumerowanych rozdziałów. Do rozprawy dołączony jest załącznik zawierający przykładowy skrypt LUA służący do automatyzacji procesu obliczeniowego, a także spis literatury zawierający 121 pozycji, w tym liczący 14 pozycji dorobek współautorskich publikacji własnych autora.

W początkowej części rozprawy zamieszczono szczegółowy wykaz oznaczeń.

Rozdział pierwszy

W rozdziale pierwszym autor uzasadnia swoje zainteresowanie tematyką ograniczania momentu zaczepowego, a także przytacza znane z literatury metody jego ograniczania wraz ze wskazaniem źródeł literaturowych przypisanych do każdej z nich. W rozdziale tym zdefiniowano cele i tezę pracy. Tezę zawarto w słowach: „**Zastosowanie w jednej maszynie dwóch wybranych metod powodujących redukcję momentu zaczepowego wpływa na jego zmniejszenie, przy czym ich kolejność ma nieznaczny wpływ na końcową wartość tego momentu**”.

Rozdział drugi

Rozdział drugi zawiera wyjaśnienie pojęcia momentu zaczepowego, źródła jego powstawania, a także przedstawia metody jego wyznaczania (zarówno numeryczne za pomocą metody elementów skończonych MES jak i doświadczalną na specjalnie przygotowanym stanowisku laboratoryjnym).

Rozdział trzeci

W rozdziale trzecim doktorant opisuje znane z literatury metody ograniczania momentu zaczepowego, podając 5 podstawowych, czy też najczęściej stosowanych metod (dobór skosu magnesów trwałych, dobór skosu żłobków stojana, dobór rozpiętości kątowej magnesów czy też dobór niecałkowitej liczby żłobków i par biegunów), a także 10 pozostałych metod, które szczegółowo są wymienione na stronie 33 rozprawy. Autor stwierdza, że żadna z tych metod nie jest w stanie całkowicie wyeliminować momentu zaczepowego.

W dalszej części rozdziału 3 omówionych zostaje (wraz z przykładami rysunkowymi) 15 wcześniej wymienionych metod, co dla osób niebędących specjalistami z zakresu maszyn z magnesami trwałymi umożliwia zrozumienie przytaczanych metod.

Rozdział czwarty

W czwartym rozdziale zawarto porównanie wyników obliczeń oraz pomiarów na stanowisku laboratoryjnym momentu zaczepowego maszyny z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika. W tej części rozprawy autor „wykalibrował” używany przez siebie program do obliczeń metodą elementów skończonych (na podstawie kilku prób dobrał wielkość siatki), a także przedstawił kombinacje metod użytych do ograniczania momentu zaczepowego (nierównomierne rozmieszczenie magnesów oraz szerokość otwarcia żłobka stojana).



Rozdział piąty

Rozdział piąty zawiera wnioski i podsumowanie pracy.

Rozdział szósty to spis literatury

Główne osiągnięcia rozprawy

Opracowanie i wykonanie laboratoryjnego stanowiska badawczego.

Opracowanie algorytmu i programu obliczeń symulacyjnych, w tym skryptu LUA, który można wykorzystać w poszukiwaniu rozwiązań ograniczania momentów zaczepowych uwzględniając także skos magnesów i skos żłobków.

Doktorant podjął się wykazania, że kolejność stosowania jednej z dwóch przykładowych metod redukcji momentu zaczepowego nie ma znaczenia dla uzyskiwanych wyników, czyli że metody te można stosować w dowolnej kolejności.

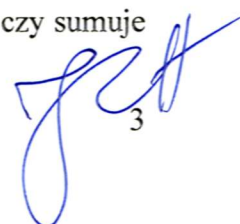
Uwagi

Doktorant w swoich badaniach połączył dwie metody: rozłożenie niesymetryczne magnesów trwałych ($2p = 8$) na obwodzie wirnika oraz rozwarcie i różną liczbę żłobków (9 i 12). W przeprowadzonych badaniach symulacyjnych zamierzał wykazać (teza pracy - str. 14), że „Zastosowanie w jednej maszynie dwóch wybranych metod powodujących redukcję momentu zaczepowego wpływa na jego zmniejszenie”. Niestety wyniki symulacji przedstawione w rozdziale 4.2 nie potwierdzają tej tezy w sposób zrozumiały dla czytającego.

Ponadto, błędne jest założenie (str. 16) jakby moment reluktancyjny w silniku z magnesami trwałymi o przenikalności magnetycznej magnesu zbliżonej do przenikalności magnetycznej próżni był pomijalny. Wręcz przeciwnie, w silnikach typu IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous Motor), czyli w silnikach z magnesami zagłębionymi pod powierzchnia wirnika wykorzystuje się współdziałanie momentu reluktancyjnego (powstałego na skutek niesymetrii wirnika w osiach d i q , czyli różnicy pomiędzy reaktancjami X_d i X_q) oraz synchronicznego (pochodzącego od magnesów), dzięki czemu wypadkowy moment użyteczny rozwijany przez silnik osiąga wyższe wartości niż miałyby to miejsce przy korzystaniu tylko z momentu pochodzącego od magnesów trwałych. Kwestia ta jest wytłumaczona choćby w rozdziale 5.2 mojej publikacji [8], którą autor przytacza w spisie literatury.

Oprócz niepożądanego momentu zaczepowego będącego tematem rozprawy, w maszynie z magnesami trwałymi występuje również moment oporowy, który jest wynikiem strat w rdzeniu ferromagnetycznym powstających na skutek jego przemagnesowania. Znane są przypadki gdy wartość momentu oporowego jest równa lub wyższa od momentu zaczepowego. Szkoda, że autor nie wspomniał o tym momencie, który jest szczególnie niepożądany w przypadku stosowania generatorów z magnesami trwałymi w siłowniach wiatrowych o pionowej osi obrotu (takie turbiny mają niską wartość momentu rozruchowego).

Niezrozumiałe jest wyznaczanie przez autora sum momentów – str. 74- (czy to użytecznego, czy zaczepowego) przy obracaniu wirnika o kąt 360 stopni. Po pierwsze, jak widać np. z Rys. 4.2.1.5 suma momentów użytecznych (wartość średnia) wyniesie zero, a nie około 600 Nm jak widać z tabel (np. 4.4 czy Rys 4.2.1.7). Jeżeli autor sumuje wszystkie wartości dodatnie momentu to należy to wyraźnie zaznaczyć, tak aby nie trzeba się domyślać czy sumuje



3

wartości bezwzględne (str. 74) „dla każdego modelu silnika wartości bezwzględne sum momentów dodatnich i ujemnych były praktycznie takie same”, czy wyznacza sumę dodatnią momentów posiadających znak dodatni albo ujemny „ przedstawiono wartości dodatnie sum momentów”. Ponadto wartość sumy momentów (założmy, że sumowane są tylko wartości dodatnie za okres) zależy od ilości punktów sumowania (kroku), więc można generować dowolnie wysokie wartości. Moim zdaniem zamiast sumować wartości momentów wyniki należało całkować.

Moment zaczepowy, który jest tematyką rozprawy, a także oporowy (pominięty w rozprawie) jest bardzo istotnym zagadnieniem w siłowniach wiatrowych. W aplikacjach takich w moim przekonaniu nie suma momentów zaczepowych jest ważna z punktu widzenia możliwości wykonania rozruchu przez siłownię wiatrową, a wartość maksymalna tego momentu, gdyż właśnie ta wartość determinuje warunki rozruchu (konieczność przyłożenia zewnętrznego momentu mechanicznego o wysokiej wartości), czyli prędkość wiatru przy której siłownia zaczyna się obracać. Wystarczy jeden punkt na 1 obrót wirnika, w którym wartość momentu zaczepowego będzie wysoka, a w pozostałych kombinacjach wzajemnego położenia wirnika względem stojana będzie niska, co w efekcie, mimo niskiej wartości „sum momentów dodatnich” spowoduje trudności w rozruchu siłowni. Dlatego badanie możliwości obniżania momentu zaczepowego nie powinno ograniczać się jedynie do niewyjaśnionej przez autora metody obniżania „sum momentów” za 1 obrót wirnika względem stojana. Proszę o wytłumaczenie dlaczego autor sumuje dodatnie wartości momentu obliczone dla kilkuset położenia wirnika względem stojana (dla każdego z wariantów), a nie wyznacza wartość maksymalną (przypadającą na 1 obrót lub 1 okres) czy też minimalną momentu zaczepowego, ewentualnie stosunek momentu użytecznego do zaczepowego.

Na stronie 68 autor podaje, że analizę prowadził dla dwóch modeli, tj. stojana umownie nazwanego jako niesymetryczny -9 zębów- (co nie całkiem jest prawdą, gdyż taki stojan też posiada jedną oś symetrii przechodzącą przez „znacznik” na blasze – Rys. 4.2.1) oraz symetryczny -12 zębów). Domyślam się, że w obu przypadkach autor wykorzystywał ten sam wirnik (8 magnesów), w którym wprowadzał niesymetrię rozłożenia magnesów. Ponadto autor zmieniał szerokość otwarcia żłobka stojana. Zatem istnieją dwa modele różniące się stojanami. Mimo, że tezą rozprawy jest wykazanie, że kolejność stosowania metod (najpierw zmiana rozłożenia magnesów potem zmiana szerokości otwarcia żłobka, bądź odwrotnie) nie ma większego znaczenia dla uzyskanych wyników, to o ile faktycznie autor wykazał, że stosowanie dwóch metod daje lepsze rezultaty niż jednej, jednak w mojej opinii nie wykazał w sposób łatwy do zrozumienia, iż kolejność stosowania metod nie ma znaczenia, gdyż prowadzi do takich samych wartości momentu zaczepowego i takich samych rozwiązań konstrukcyjnych maszyny. Ta część, tzn. rozdział 4.2 stanowiący wkład własny autora, powinna zostać przeredagowana, tak aby w sposób jasny i czytelny prezentować uzyskane wyniki i wnioski.

W rozdziale 5 Doktorant podaje, że wykonał 121 symulacji przy stojanie „niesymetrycznym” i 99 „symulacji” przy stojanie symetrycznym. Wyników tych nie doliczyłem się na rysunkach i w tabelach podanych w rozdziale 4.2.



4

Proszę o wykazanie, że niezależnie od kolejności stosowania metod ograniczenia momentu dla każdej z maszyn uzyskuje się takie samo rozwiązanie maszyny (te same, bądź zbliżone wymiary) i taką samą wartość obliczonego momentu zaczepowego.

Pozostałe uwagi, a także uwagi drobne i językowe:

- streszczenie – moment zaczepowy podczas projektowania minimalizuje się nie tylko za pomocą metod numerycznych,
- str. 11 – „energia odnawialna” nie istnieje, należy mówić o odnawialnych źródłach energii,
- str. 12 – jeżeli korzyści ekonomiczne ze stosowania maszyn o zredukowanym momencie zaczepowym są „łatwe do oszacowania”, to należy podać choć jeden przykład takiego rachunku ekonomicznego,
- str. 13 – stosowanie kilku metod redukcji momentu zaczepowego w tej samej maszynie jest powszechnie stosowane w praktyce inżynierskiej, więc wniosek autora umieszczony nad początkiem rozdziału 1.3 należałoby przereklamować, że „nie prowadzono prac wykazujących iż kolejność stosowania dwóch lub więcej metod nie ma wpływu na uzyskiwane wyniki”,
- str. 74 – autor pisząc o obliczaniu sumy momentów zaczepowych miał chyba na myśli obliczenia sumy momentów użytecznych – na to to wskazują kolejne zdania oraz opisy tabeli 4.4 i Rys 4.2.1.7,
- str. 80 - „Wartość średnia momentu zaczepowego dla silnika z wirnikiem symetrycznym stanowi 82% najmniejszej wartości momentu jaki uzyskano dla maszyny z wirnikiem niesymetrycznym.” rysunek 4.2.1.12 nie wyjaśnia tego, podobnie Rys. 4.2.1.13,
- str. 106 – na jakiej podstawie autor twierdzi, że przedstawiona metodyka redukcji momentu zaczepowego może być stosowana do maszyn dużej mocy, skoro badania prowadził tylko na dwóch maszynach małej mocy? Ponadto nie metoda jest nowa, ale według autora kolejność stosowania metod może być dowolna.
- Przedstawianie wyników w wartościach względnych jako stosunku M_u/M_z (str.: 83, 84, 85, 86, 98, 99, 100, 102, 103) nie jest dobrą metodą ich interpretacji. Moment użyteczny M_u jest praktycznie wartością stałą równą 3 N·m, zatem wykres M_u/M_z „przy M_z zmienianej liniowo, jest hiperbolą.

Korzystnie jest aby na wykresach rzędna była wyskalowana, w jednostkach względnych bądź w procentach jako M_z/M_u , jak to się powszechnie stosuje.

Błędy językowe lub w pisowni:

- autor nie ustrzegł się wielu błędów interpunkcyjnych, np. przy wyliczaniu (brak znaków przestankowych) – strona 14, 15, i dalsze oraz na końcach zdania,
- użyte zostały sformułowania nie odmienione przez przypadki np. str. 26 „siła elektromotoryczna”, zamiast „siłę elektromotoryczną”,

- Moment oznaczano literą T we wzorze (str.: 27, 32, 37) i na rysunkach (str.: 35, 37, 39, 41, 42, 43, 44, 46, 48, 50, 52, 53, 55, 57, 60, 61, 62, 64, 65, 67, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 80, 81, 90, 92, 93, 94, 95, 96, 97), a literą M na innych rysunkach (str.: 83, 84, 85, 86, 98, 99, 100, 102, 103).

Konkluzja

MGR IŻ ARTUR PAKOSZ W PRACY PT. WPLYW WYBRANYCH METEOD REDUKCJI NA MOMENT ZACZEPOWY MASZYN ELEKTRYCZNYCH WIELOBIEGUNOWYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI” WYKONANEJ POD KIERUNKIEM DR HAB. INŻ. ZBIEGNIWA GORYCY PROF. PŚK, podjął się wykazania, że kolejność stosowania jednej z dwóch wybranych metod redukcji momentu zaczepowego nie ma znaczenia dla uzyskiwanych wyników.

Niestety rozdział 4.2 będący efektem badań własnych Doktoranta jest napisany w sposób mało czytelny i wymaga kilkukrotnego czytania, a także samodzielnego porównywania wyników i wyciągania wniosków przez czytelnika. Ta część rozprawy, mimo że najciekawsza, powinna zostać przeredagowana, tak aby czytelnik nie miał wątpliwości co do uzyskiwanych wyników. Ponadto autor powinien doprowadzić do wykazania, że dla każdej z maszyn (czyli zarówno symetrycznej jak i niesymetrycznej) stosując metody w różnych kolejnościach otrzymuje takie same wartości momentu zaczepowego dla konkretnych rozwiązań konstrukcji układu stojan-wirnik. Takiego porównania brakuje w mojej ocenie.

Rozprawa doktorska mgr inż. Artura Pakosza pt. **WPLYW WYBRANYCH METEOD REDUKCJI NA MOMENT ZACZEPOWY MASZYN ELEKTRYCZNYCH WIELOBIEGUNOWYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI**” ma jasno sprecyzowany cel i tezę pracy. Niestety teza została udowodniona w sposób mało czytelny. O ile zadanie zostało zrealizowane na drodze badań symulacyjnych to analiza wyników przedstawiona przez autora powinna zostać przeredagowana. Niemniej według mojej oceny w stopniu dostatecznym spełnione są wymagania art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym. Wnioskuje o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony recenzowanej rozprawy doktorskiej w dyscyplinie elektrotechnika. Uważam, że Autor posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a przedstawiony w rozprawie problem naukowy ma znamiona oryginalności. Liczę jednak, że na publicznej obronie Doktorant przedstawi w sposób poprawny wyniki swojej pracy.

