

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Artura Adama Pakosza

pt. „*Wpływ wybranych metod redukcji na moment zaczepowy maszyn wielobiegunowych z magnesami trwałymi.*”

promotor: dr hab. inż. Zbigniew Goryca prof. PŚk

1. Podstawa wykonania recenzji

Recenzję opracowano na podstawie pisma Dziekana Wydziału Elektrotechniki Automatyki i Informatyki Politechniki Świętokrzyskiej dr hab. inż. Antoniego Różowicza z dnia 01.02.2019 r. (otrzymanego dnia 12.02.2019 r.), dotyczącego sporządzenia przeze mnie recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Adama Pakosza.

2. Uzasadnienie przedmiotu rozprawy

Problematyka rozprawy mgr inż. Artura Adama Pakosza mieści się w obszarze nauk technicznych w dziedzinie nauk technicznych, w dyscyplinie elektrotechnika. Dyscyplina ta powinna łączyć ze sobą część teoretyczną i część praktyczną, co w pracy zostało dokonane. W pracy podjęto zagadnienie minimalizacji momentu zaczepowego, szeroko omawianego w literaturze. Moment ten powstaje w wyniku współdziałania pola magnesów trwałych umieszczonych na wirniku i stojana o kątowno zmiennej przewodności magnetycznej. Ma on charakter pulsujący i występuje w silniku przez cały czas. Moment ten wywiera niekorzystny wpływ nie tylko na pracę maszyny, ale także na współpracujące z nią urządzenia. Powoduje powstawanie: wibracji, hałasu, momentu hamującego, strat mocy. Wibracje i hałas są szczególnie uciążliwe w przypadku przydomowych elektrowni wiatrowych. Moment zaczepowy utrudnia rozruch elektrowni wiatrowej, powodując start elektrowni przy wiatrach o znacznych prędkościach. Przy dużych wartościach momentu zaczepowego występują także problemy z regulacją prędkości obrotowej. Minimalizacja momentu zaczepowego w maszynach z magnesami trwałymi jest tematem aktualnym, a poszukiwanie nowych metod jego minimalizacji wysoce pożądane, należy więc zaakceptować główny cel dysertacji, którym jest *Określenie wpływu kolejności stosowania kilku metod redukcji momentu zaczepowego na wartość końcową tego momentu.*

Najprostszym i najczęstszym sposobem minimalizacji tego momentu jest stosowanie skosu żłobków stojana. Wadami tego typu rozwiązania są bardziej skomplikowana budowa maszyny i trudności z umieszczeniem uzwojenia. Innym popularnym sposobem minimalizacji momentu zaczepowego jest stosowanie skosu lub pseudoskosu (kilka magnesów na długości wirnika przesuniętych względem siebie o określony kąt) magnesów. Rozwiązanie to wymaga użycia drogich przyrządów do klejenia magnesów i nie daje tak dobrych efektów, jak skos zębów stojana. Spotyka się również zastosowanie uzwojenia ułamkowego w stojanie, wykonanie klinów w żłobkach stojana materiału magnetycznego, zmianę szerokości szczeliny powietrznej, wykonanie wcięć w zębach stojana.

3. Charakterystyka struktury recenzowanej pracy

Praca mgr inż. Artura Adama Pakosza złożona jest z sześciu rozdziałów. Na treść pracy składają się: wykaz oznaczeń i skrótów, wstęp, część teoretyczna, część badawcza, wnioski, literatura i załącznik. Praca obejmuje 128 stron, z czego 13 stron stanowi bibliografia zawierająca 121 publikacji, gdzie około 60 procent to literatura zagraniczna. W pracy znajduje się wykaz 14 publikacji współautorskich oraz 2 patenty i 1 zgłoszenia patentowe.

W rozdziale pierwszym Autor zaprezentował swoją motywację do podjęcia tematu rozprawy. Literaturę podzielił na 4 grupy tematyczne: zjawisko i opis matematyczny momentu zaczepowego, metody jego redukcji, wyniki symulacji i badań laboratoryjnych momentu zaczepowego oraz artykuły dotyczące przydatności programów komputerowych do obliczeń momentu zaczepowego. Na podstawie przedstawionej literatury sformułował tezę pracy: *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.* Autor zaznacza także, że „wyjątkiem od tej zasady są maszyny, w których najmniejsza wspólna wielokrotność liczby żłobków stojana i liczby par biegunów wirnika jest równa iloczynowi tych wielkości”. W rozdziale tym zawarte zostały także zakres pracy, cele pośrednie do potwierdzenia lub ewentualnego podważenia postawionej tezy oraz założenia badawcze.

W rozdziale drugim Autor wyjaśnił pojęcie momentu zaczepowego oraz metody jego wyznaczania, scharakteryzował w skrócie metodę elementów skończonych użytą w badaniach symulacyjnych, podał wady i zalety tej metody, przedstawił również laboratoryjny sposób wyznaczania momentu zaczepowego na specjalnie do tego celu zbudowanym stanowisku pomiarowym. Autor słusznie bada moment zaczepowy w stanie statycznym, gdyż wówczas uniezależnia się od momentów hamujących wywołanych prądami wirowymi, przemagnesowywaniem i stratami wentylacyjnymi.

Rozdział trzeci został poświęcony prezentacji metod redukcji momentu zaczepowego. Znane metody zostały podzielone na te, które są powszechnie stosowane i te, które są używane rzadziej z różnych względów. Każda wymieniona metoda opatrzona została krótkim opisem, rysunkiem oraz charakterystykami przedstawiającymi skutki jej użycia.

Rozdział czwarty Autor dysertacji rozpoczął od porównania wyników symulacji i pomiarów laboratoryjnych momentu zaczepowego przykładowego silnika. W programie FEMM został zbudowany model komputerowy rzeczywistego silnika. Model rzeczywisty przebadano w laboratorium na stanowisku pomiarowym. Wyniki okazały się być zbliżone. Do dalszych badań wybrano dwie maszyny różniące się budową stojana. Wirniki obu maszyn miały 4 pary magnesów. Rozpatrywaną jako pierwszą maszynę o 9 zębach stojana nazwano umownie niesymetryczną, druga o 12 zębach stojana nazwana została symetryczną. Przed przystąpieniem do badań przeprowadzono symulacje próbne celem określenia zakresu zmian geometrii obwodu magnetycznego oraz wyznaczenia minimalnej liczby elementów siatki dyskretyzacyjnej, która według autora zapewniała zadowalającą dokładność przy akceptowalnym czasie obliczeń. Zbadano także wpływ wielkości siatki, jej lokalnego zagęszczenia oraz pola całkowania na wyniki obliczeń.

W programie komputerowym przeprowadzono szereg symulacji dla każdego modelu. Wyznaczano moment zaczepowy w stanie statycznym bezprądowym i moment użyteczny przy dodaniu prądów w uzwojeniach stojana. Z uwagi na to, że wartość średnia momentu zaczepowego wynosi zero, w pracy liczone sumę dodatnich wartości momentów dla pełnego obrotu wirnika. Dla każdej kombinacji wyznaczono stosunek momentu zaczepowego do momentu użytecznego. Przeprowadzone symulacje pozwoliły na sporządzenie stosownych wykresów.

Treść rozdziału piątego stanowi zebranie i prezentacja wyników pracy badawczej.

Rozdział szósty prezentuje spis literatury w tym prace współautorskie i autorskie.

W załączniku niniejszej pracy znajduje się przykładowy skrypt w języku LUA wykorzystany w pracy do automatyzacji procesu obliczeniowego.

Do oryginalnych osiągnięć w pracy zaliczyć należy: wykazanie, że zastosowanie dwóch metod redukcji momentu zaczepowego daje lepsze wyniki niż jednej metody oraz wykazanie, że kolejność stosowania tych metod nie ma praktycznego znaczenia, napisanie skryptu koniecznego do automatyzacji tym samym przyspieszenia obliczeń, zbudowanie prototypu silnika i przebadanie go w laboratorium pod kątem występującego momentu zaczepowego, wykonanie modelu komputerowego badanego silnika i przeprowadzenie dużej liczby symulacji, porównanie wyników pomiarów laboratoryjnych z wynikami symulacji, sprawdzenie wpływu kolejności zastosowanych metod redukcji momentu zaczepowego na wartość końcową tego momentu.

4. Uwagi dyskusyjne

Rozprawa została napisana w języku polskim, w stylu właściwym dla dysertacji. Pozytywnie należy ocenić liczbę pozycji bibliografii zaczerpniętej z zagranicznych źródeł. Bibliografia w większości przypadków zawiera publikacje, których wiek nie przekracza piętnastu lat, ale występują także pozycje sprzed 1990 roku, co w swej istocie nie jest złe, jednakże korzystanie z wiekowych już źródeł wymaga ostrożnego i krytycznego podejścia. Formułując uwagi do pracy należy podkreślić zamierzenia badawcze Doktoranta, do których dostosował konstrukcję swojej pracy. Pracę można podzielić na dwie części, z których pierwszą należy określić jako objaśniającą, drugą jako badawczą.

Autor mimo staranności nie ustrzegł się w swojej pracy szeregu niedociągnięć. Przedstawiono je poniżej, zauważając co następuje:

- w moim przekonaniu Autor w rozdziale czwartym, dowodząc słuszności postawionej tezy, przedstawił wyniki badań zbyt szczegółowo dołączając wiele wykresów i tabel. W moim przekonaniu więcej uwagi należało poświęcić wykresom trójwymiarowym załączonym pod koniec każdego podrozdziału, jak np.: 4.2.1.18 i 19, str.86, a niektóre elementy przenieść do załączników wtedy praca zyskałaby na przejrzystości.
- w celu dowiedzenia słuszności tezy pracy, Autor zdecydował się sumować wartości dodatnie momentów zaczepowych i użytecznych dla pełnego obrotu wirnika. Próbkowanie dla badanych maszyn odbywało się ze stałą częstotliwością równą 0.5 stopnia. Najistotniejsze wydają się być wykresy trójwymiarowe ilustrujące wartość stosunku momentu zaczepowego do momentu użytecznego i choć należałoby liczyć pole powierzchni pod wykresem momentu zaczepowego czy też użytecznego w funkcji kąta położenia wirnika, postępowanie to należy uznać za właściwe, gdyż odbywa się ono ze stałym krokiem.
- w rozdziale 4.1 Autor dokonał porównania pomiarów laboratoryjnych wybranej maszyny i wyników symulacji modelu komputerowego wykonanego w skali 1:1. Wyniki okazały się zbliżone, jednakże pomiar momentu zaczepowego proponowaną metodą może być obarczony pewną niedokładnością z uwagi na brak pomiaru momentu tarcia w łożyskach.
- str. 106 „... *wyniki symulacji przy odpowiednio dobranej wielkości siatki dyskretyzacyjnej należy uznać za poprawne, co potwierdzają badania laboratoryjne*” Moim zdaniem przebadanie tylko jednego modelu silnika na stanowisku laboratoryjnym i porównanie go z wynikami symulacji komputerowych to za mało. Czy Autor badał i porównywał również inne konfiguracje silników?
- w pracy prowadzone są badania symulacyjne na modelu dwuwymiarowym. W dobie szybkich komputerów nasuwa się pytanie dlaczego Autor nie skorzystał z programów trójwymiarowych?
- występuje brak spójności w oznaczeniach momentu zaczepowego i użytecznego. W wykazie skrótów moment oznaczony jest literą T, zaś na końcu każdego podrozdziału rozdziału czwartego Autor posługuje się literą M. Przykładem mogą być rysunki ze stron 81 i 83.
- dwa rysunki są nienajlepszej jakości: 4.2.1.1. i 4.2.1.2. str. 70. Do odczytania opisu przydatne będzie szkło powiększające. Dla rysunku 4.1.10. na str. 66 zalecanym byłoby umieszczenie

fragmentów w dużym powiększeniu niż rysunku całego silnika. Na tę chwilę trudno gołym okiem dostrzec różnicę pomiędzy rysunkiem z lewej i prawej strony.

- rysunki ze stron 71 i 72 posiadają identyczne oznaczenie.
- w opisie tabeli 4.1. została użyta czcionka o innej wielkości niż w opisach pozostałych tabel.
- zdarzają się przypadki braku znaków interpunkcyjnych np. str. 13, 14, 15, 104, 105.

Uwagi do rozważenia:

1. Jak rozróżniano (oddzielano) moment użyteczny od zaczepowego dla badanego silnika - rys. 4.2.1
2. Uzasadnić małą wartość stosunku momentu użytkowego do zaczepowego występujące na rys. 4.2.1.17 czy w tabeli 4.6
3. Dlaczego do symulacji wybrano niezbyt znany język LUA
4. Dlaczego sumowano dodatnie wartości momentu użytkowego.
5. Jak duży wpływ na minimalizację momentu zaczepowego miałyby zamodelowanie i analiza 3D wybranych maszyn do badań.

5. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę, że:

- Mgr inż. Artur Adam Pakosz wykazał słuszność postawionej tezy, którą potwierdził wynikami symulacji i badań laboratoryjnych.
- Opracował szereg modeli do obliczeń polowych.
- Potwierdził przydatność tych modeli badaniami eksperymentalnymi.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Artura Adama Pakosza pt. „**Wpływ wybranych metod redukcji na moment zaczepowy maszyn wielobiegunowych z magnesami trwałymi**” spełnia wymagania Ustawy z dnia 14 marca 2003 roku wraz z późniejszymi zmianami w lipcu 2007 roku i październiku 2011 roku.

Rozprawa doktorska mgr Artura Pakosza spełnia wymagania określone w Ustawie o stopniach i tytułach naukowych. Wobec powyższego **wnoszę o dopuszczenie pracy do publicznej obrony.**

Uwagi krytyczne, mające charakter dyskusyjny, zawarte w punkcie 4, nie przekreślają mojego przekonania o ogólnie pozytywnej ocenie tej dysertacji.

Damian Kozur