

Dr hab. inż. Krzysztof Ludwinek, prof. PŚk

Kielce, 04.07.2020 r.

Politechnika Świętokrzyska

Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki

Al. Tysiąclecia PP. 7, 25 – 314 Kielce

k.ludwinek@tp.kielce.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pani mgr inż. Natalii Radwan-Pragłowskiej na temat:

„Modelowanie generatorów tarczowych wzbudzanych magnesami trwałymi”,

wykonanej na Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej

Promotor: dr hab. inż. Tomasz Węgiel, prof. PK

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Dariusz Borkowski, prof. PK

Recenzję wykonano na podstawie decyzji Rady Naukowej Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej z dnia 4 czerwca 2020 r., nr pisma E-0/4/174/2020



1. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska obejmuje 138 stron i składa się z wykazu oznaczeń, ośmiu rozdziałów, Dodatku i Spisu literatury zawierającego 69 pozycji, w tym dwie pozycje autorskie i dwie współautorskie.

Przedstawione w rozprawie kolejno numerowane rozdziały to:

1. **Przedmowa** krótka - półstronicowa.
2. **Wprowadzenie:**
 - zawierające przegląd obecnego stanu wiedzy o rozwiązaniach generatorów o strumieniu osiowym wzbudzanych magnesami trwałymi,
 - zawierające uzasadnienie zaproponowanej tematyki badań przedstawionych w niniejszej rozprawie,
 - oraz zawierające cel oraz tezę rozprawy.
3. **Rozwiązania konstrukcyjne generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi o strumieniu osiowym.** Rozdział zawiera przegląd istniejących typowych rozwiązań generatorów o strumieniu osiowym wzbudzanych magnesami trwałymi. Na podstawie tego przeglądu do dalszych badań zaproponowano konstrukcję generatora z bezrdzeniowym stojanem, z 21 cewkami o uzwojeniach skupionych bez oraz z ferromagnetycznymi rdzeniami umieszczonymi wewnątrz rozłożonych nienachodzących na siebie w/w cewek. W rozdziale tym przedstawiono opracowany graficznie model generatora o strumieniu osiowym wzbudzanych magnesami trwałymi (tzw. AFPMG), a następnie przeprowadzono badania symulacyjne obliczeń rozkładu pola magnetycznego w środowisku Ansys-Maxwell w 3-D dla sześciu tarcz wirnika o różnych kształtach i rozmieszczeniu magnesów, przy 21 cewkach stojana (7 na fazę). Z przeprowadzonej analizy do dalszych badań wybrano cztery trójfazowe konstrukcje AFPMG (dwie bez ferromagnetycznych rdzeni wewnątrz 21 cewek stojana przy prostym i skoszonym ustawieniu magnesów oraz dwie z rdzeniami ferromagnetycznymi umieszczonymi wewnątrz 21 cewek stojana również przy prostym i skoszonym ustawieniu magnesów).
4. **Obwodowe modele matematyczne 3-fazowych generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi o strumieniu osiowym.** Rozdział 4 zawiera analityczne modelowania wybranych czterech konstrukcji trójfazowych AFPMG poprzez zastosowanie formalizmu Lagrange'a oraz funkcji ko-energii dla przyjętego systemu elektromechanicznego. Analizę matematyczną przedstawiono dla czterech konstrukcji AFPMG tzn. dla dwóch konstrukcji generatora bez rdzeni wewnątrz 21 cewek stojana (przy prostym i skoszonym ustawieniu

magnesów) oraz dwie konstrukcje z rdzeniami ferromagnetycznymi umieszczonymi wewnątrz 21 cewek stojana (również przy prostym i skoszonym ustawieniu magnesów). W rozdziale tym przedstawiono wymagane w obliczeniach macierzy - funkcje rozkładów indukcyjności i strumieni (indukcji magnetycznej) oraz funkcje ko-energii. Podano użyteczne zależności określające rząd harmonicznych występujących w momentach zaczepowych dla konstrukcji o prostym i skoszonym ułożeniu magnesów.

5. **Modele matematyczne 3-fazowych generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi dla stanu ustalonego.** Rozdział 5 zawiera zapis modelowania AFPMG poprzez zastosowanie formalizmu Lagrange'a przy użyciu składowych symetrycznych.
6. **Wyniki analiz polowych (FEM 3-D) i obliczeń analitycznych.** Rozdział 6 przedstawia porównania parametrów elektromechanicznych dla w/w modeli generatorów AFPM. Przy czym, obliczenia parametrów elektromechanicznych wykonano w programie Ansys-Maxwell (w wersji 3-D) oraz na podstawie modeli analitycznych opisanych równaniami różniczkowymi w rozdz. 4 i 5. Porównano parametry elektromechaniczne dla stanu biegu jałowego oraz dla stanu obciążenia.
7. **Badania laboratoryjne i weryfikacja modeli.** Rozdział 7 zawiera wyniki z badań eksperymentalnych, analitycznych i z tzw. obliczeń polowych wykonanych w programie Ansys-Maxwell w wersji 3-D. Badania przeprowadzono dla w/w 4 modeli generatorów AFPMG o założonych konstrukcjach stojana oraz wirnika. Rozdział 7 zawiera również widok stanowiska laboratoryjnego i widok poszczególnych elementów omawianych w/w generatorów AFPM.
8. **Podsumowanie i wnioski.** W rozdziale 8 Doktorantka omówiła najważniejsze osiągnięcia przedstawione w niniejszej rozprawie.

Na końcu rozprawy znajduje się **Dodatek** zawierający analizę i porównanie współczynnika korygującego k_e , który odwzorowuje osłabienie strumieni na krawędziach wewnętrznych i zewnętrznych magnesów.

Podsumowując przedstawione rozdziały w recenzowanej rozprawie, mogę stwierdzić, że praca ma charakter teoretyczno-praktyczny i przedstawia wystarczające rezultaty badań do udowodnienia postawionej tezy. Stwierdzam, że recenzowana rozprawa pod względem struktury rozdziałów została przedstawiona właściwie. Rozprawę czyta się dobrze i według recenzenta napisana jest zgodnie z zasadami podanymi przez prof. dr hab. inż. Krystyna Pawluka w artykule pt. „Jak pisać teksty techniczne poprawnie”.

2. Ocena rozprawy doktorskiej

2.1. Motywy podjęcia niniejszej rozprawy doktorskiej

Motywy podjęcia rozprawy przez Doktorantkę zostały przedstawione w rozdziale 2. W rozdziale tym postawiono trzy cele:

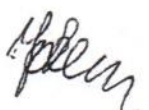
- „Zaproponowanie wielowariantowych obwodowych modeli generatorów, wzbudzanych magnesami trwałymi o strumieniu osiowym, umożliwiających śledzenie interakcji harmonicznych przestrzennych rozkładu pola magnetycznego z prądami uzwojeń”,
- „Doświadczalną weryfikację tych modeli poprzez zbudowanie prototypów i badania laboratoryjne”,
- „Opracowanie metodyki tworzenia modeli matematycznych i ich weryfikacji celem udoskonalenia procesu projektowania AFPMG”.

Poszukiwanie nowych konstrukcji zarówno silników, jak i generatorów o osiowym strumieniu pochodzącym od magnesów trwałych umieszczonych na tarczy wirnika znajduje wielu zwolenników i ciągle dynamicznie się rozwija. Pod koniec 2019 r. widziałem nową konstrukcję silnika tarczowego (zbudowanego w Polsce przez firmę prywatną) o mocy 30 kW do napędu pojazdu. A jak bardzo się zdziwiłem, gdy wg. moich wstępnych obliczeń sprawność tego silnika wynosiła ok. 99% (silniki tarczowe o podobnej konstrukcji, które można zakupić w Europie, mają sprawność ok. 94%). Tak wysoka sprawność była możliwa dzięki zastosowanym prostym rozwiązaniom (o których nie mogę pisać, ze względu na obietnice i zgłoszenia wynalazku, które były dopiero w fazie opracowywania przez producenta w/w silnika).

Zatem podjęty temat rozprawy dotyczący badań nowych konstrukcji generatorów o osiowym strumieniu należy uznać za ważny i aktualny. Należy dodać, że Doktorantka w rozprawie przedstawia szczegółowy sposób modelowania analitycznego. Te szczegółowe zapisy modelowania mogą być przydatne dla wielu prowadzonych badań maszyn elektrycznych z wykorzystaniem magnesów trwałych i strumienia osiowego. Dopełnieniem prowadzonych rozważań analitycznych jest tzw. modelowanie polowe oraz weryfikacja eksperymentalna. Moim zdaniem przedstawione przez Doktorantkę rozwiązania analityczne i aplikacyjne pozwolą na pokazywanie pozytywnych i negatywnych właściwości konstrukcji generatorów o osiowym strumieniu.

2.2. Teza rozprawy doktorskiej

Tezą rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Natalii Radwan – Pragłowskiej jest:



„Istnieje możliwość utworzenia obwodowych modeli generatorów wzbudzanych magnesami trwałymi o strumieniu osiowym, umożliwiających śledzenie interakcji harmonicznych przestrzennych rozkładu pola magnetycznego z prądami uzwojeń”. Teza ta wynika bezpośrednio z przeprowadzonych badań, do których można zaliczyć:

- opracowanie metodyki wyznaczania rozkładu pola w obwodzie magnetycznym 3-fazowego generatora tarczowego z osiowym strumieniem od magnesów trwałych umieszczonych na wirniku (AFPMG) w stanach ustalonych,
- sformułowanie analitycznych zależności określających wyższe harmoniczne w funkcjach indukcyjności oraz strumieni skojarzonych uzwojeń, wykorzystując w tym celu teorię równań różniczkowych o okresowo zmiennych współczynnikach,
- sformułowanie ogólnych zapisów równań modeli matematycznych dla czterech konstrukcji badanych generatorów AFPM.

Część, teoretyczną (analityczną) rozprawy, która dowodzi tak przedstawioną tezę Doktorantka przedstawia w rozdziałach 4 i 5. Część badań symulacyjnych dotyczącą modelowania rozkładu pola magnetycznego i związane z tym wyznaczanie charakterystyk elektromechanicznych dla w/w opracowanych modeli generatorów przy użyciu programu Ansys-Maxwell (w 3-D) przedstawiono w rozdziale 6. Kwintesencją dowodzenia tezy przez Doktorantkę są wyniki z badań eksperymentalnych, analitycznych i z tzw. obliczeń polowych, które przedstawiono w rozdziałach 6 i 7.

2.3. Realizacja rozprawy doktorskiej

Zasadniczą część naukową rozprawy stanowią rozdziały 3 – 6, które zostały uzupełnione rozdziałem 7 związanym z badaniami eksperymentalnymi i porównaniem analizowanych 4 modeli AFPMG. Przedstawiony w rozdziale 3 początkowy kierunek prowadzonych badań jest w mojej ocenie jak najbardziej słuszny, gdyż w maszynach elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi bardzo ważnym jest dobór odpowiedniego ustawienia magnesów, szczególnie jeśli analiza prowadzona jest pod kątem zawartości wyższych harmonicznych oraz jak najlepszych parametrów eksploatacyjnych. Przy czym, aby zrealizować ten rozdział Doktorantka najpierw musiała zapoznać się z modelowaniem w programie Ansys-Maxwell, a następnie ze sztuką opracowywania modeli i prowadzenia obliczeń w 3-D. Ponieważ wszystkie badania w rozprawie dotyczą generatorów tarczowych, dlatego modelowanie w 2-D nie mogło mieć miejsca. W rozdziale 3. na podstawie przeprowadzonej wstępnej analizy trójfazowych konstrukcji generatorów AFMP, słusznie do dalszych badań w niniejszej rozprawie wybrano 4 konstrukcje trójfazowych generatorów z bezrdzeniowym stojanem. (dwie bez rdzeni wewnątrz

cewek stojana przy prostym i skoszonym ustawieniu magnesów oraz dwie z rdzeniami wewnątrz cewek stojana również przy prostym i skoszonym ustawieniu magnesów).

Oryginalnym wkładem Doktorantki w rozdziale 4 niniejszej rozprawy jest:

- przedstawienie sposobu modelowania rozkładu pola magnetycznego pochodzącego od magnesów trwałych dla generatora o cewkach powietrznych oraz o cewkach z rdzeniami ferromagnetycznymi,
- określenie funkcji rozkładów indukcyjności i strumieni (indukcji magnetycznej) oraz funkcje ko-energii dla przyjętego systemu elektromechanicznego dla równań różniczkowych opisujących rozpatrywane modele matematyczne wybranych czterech konstrukcji trójfazowych AFPMG,
- określenie rzędu harmonicznych występujących w momentach zaczepowych dla konstrukcji o prostym i skoszonym ułożeniu magnesów.

Oryginalnym wkładem Doktorantki w rozdziale 5 niniejszej rozprawy jest dla stanu ustalonego opracowanie liniowych modeli AFPMG oraz zastosowanie formalizmu Lagrange'a przy użyciu składowych symetrycznych. Dzięki temu podejściu dla liniowych modeli, Doktorantka przedstawiła model interakcji harmonicznych z wykorzystaniem metody bilansu harmonicznego. Ponadto, Doktorantka opracowała uproszczony model generatora AFPMG nie zawierającego całego spektrum interakcji harmonicznych, a tylko składową podstawową.

Zwieńczeniem dużego nakładu prac nad opracowaniem modeli analitycznych, przeprowadzeniem badań symulacyjnych w oparciu o opracowane modele zarówno te analityczne (opisanymi równaniami różniczkowymi w rozdz. 4 i 5), jak i te oparte na obliczeniach z wykorzystaniem programu Ansys-Maxwell (w 3-D), jest dokonana w rozdziale 6 weryfikacja eksperymentalna. W tym celu Doktorantka zbudowała rzeczywiste modele generatorów poprzez zestawienie dwóch tarcz wirnika o średnicy 650 mm z 28. magnesami ($p = 14$) i 21 nie nachodzących na siebie cewek na stojanie o średnicy 780 mm. Weryfikację eksperymentalną przeprowadziła dla stanu biegu jałowego oraz dla stanu obciążenia, porównując najważniejsze parametry elektromechaniczne. Pragnę podkreślić, że przedstawiony w niniejszej rozprawie szeroki program badań symulacyjnych (opartych na równaniach różniczkowych i bilansie harmonicznych oraz z wykorzystaniem programu Ansys-Maxwell (w 3-D) oraz badań eksperymentalnych, pozwolił na wypracowanie istotnych wniosków, które mogą być przydatne dla projektantów nie tylko generatorów tarczowych wzbudzanych magnesami trwałymi.

3. Uwagi krytyczne

3.1. Uwagi ogólne

Stronę formalną recenzowanej rozprawy oceniam jako bardzo dobrą. Kolejność ułożenia rozdziałów jest prawidłowa, tzn. że następny rozdział jest wynikiem wcześniejszego. Przegląd literatury wydaje się być wystarczający, chociaż w kilku miejscach odwołania do literatury wydają się być przesunięte o jedną pozycję (prawdopodobnie Autorka porządkując literaturę nie zmieniła poprawnie odwołania do tych pozycji w pracy) np. na str. 2, 17 i 31.

Dobrze, że w pracy można znaleźć dużo charakterystyk oraz obliczonych czy zarejestrowanych przebiegów. Jednak recenzent ma tutaj dwie sugestie. Pierwsza, aby położenie wielkości i odpowiadających im jednostek były podane pod osią x oraz z lewej strony osi y. Druga sugestia dotyczy prezentacji zawartości wyższych harmonicznych. Nie wiem dlaczego Autorka zdecydowała się na prezentację w dB. Jest to skala nieliniowa i bez kalkulatora, czy komputera trudno jest odczytać rzeczywistą wartość czy procentowy udział wyższych harmonicznych. Wystarczyło wszystkie harmoniczne odnieść do odpowiadających im składowych podstawowych przyjmując je jako 100%, które dla lepszej czytelności rysunków można nawet pominąć, a jedynie podać np. w tabeli ich wartości liczbowe.

Na wyróżnienie zasługuje język pisania niniejszej rozprawy. Pracy napisana jest poprawnym językiem technicznym, systematycznie wprowadzając czytelnika w kolejne rozdziały. Podczas czytania recenzent zauważył pewne błędy stylistyczne związane z brakiem liter w słowach (spowodowanych najprawdopodobniej przypadkowym wyłączeniem korekty błędów gramatycznych w edytorze), brakiem wyrazów łączących słowa, łącznego pisania wartości i jednostek oraz poprawnego odwołania do numerów rysunków. Zauważonych w/w błędów jest bardzo niewiele w całej pracy i występują jedynie pojedynczo na str. 2, 7, 21,32, 38, 42, 56, 58, 72, 79, 128.

Bardzo dobrze, że Doktorantka prezentuje widok modeli symulacyjnych do tzw. obliczeń polowych, jak i rzeczywiste modele zbudowane do badań eksperymentalnych. Daje to czytelnikowi pełny wgląd do informacji przedstawionych w rozprawie.

Autorka niniejszej rozprawy wykazuje się również bardzo dobrą znajomością modelowania analitycznego przy użyciu równań różniczkowych, funkcji rozkładów indukcyjności i strumieni (indukcji magnetycznych) oraz funkcjami ko-energii. Dla konstruktorów maszyn elektrycznych tarczowych o strumieniu osiowym użytecznymi są wyprowadzone zależności określające rząd harmonicznych występujących w momentach zaczepowych dla konstrukcji o prostym i skoszonym ułożeniu magnesów.

Należy podkreślić, że Doktorantka wykazuje się również bardzo dobrą znajomością obsługi programu Ansys-Maxwell, którego w badanych generatorach AFPM użyła do obliczeń rozkładu pola magnetycznego i charakterystyk elektromechanicznych. Należy tutaj podkreślić, że są to obliczenia dla badanych modeli żmudne i czasochłonne, wymagające umiejętności tworzenia modeli, szczególnie, że obliczenia prowadzone były w wersji 3-D.

Podsumowując swoje uwagi ogólne uważam, że nakład czasowy pracy jaki poświęciła Pani mgr inż. Natalia Radwan-Pragłowska w przygotowanie niniejszej rozprawy jest bardzo duży. Na podstawie przeprowadzonych w niniejszej rozprawie rozważań, w rozdziale 8 Doktorantka sformułowała poprawnie wnioski, które potwierdzają postawioną tezę w rozdziale 2.

3.2. Uwagi szczegółowe (uwagi dyskusyjne, dotyczące merytorycznej strony pracy)

Uwaga 1.

W rozdziale 6 dokonano szczegółowego porównania przebiegów indukowanych napięć fazowych dla czterech modeli trójfazowych konstrukcji AFPMG (dwie konstrukcje generatorów bez rdzeni wewnątrz cewek stojana przy prostym i skoszonym ustawieniu magnesów na wirniku oraz dwie z rdzeniami wewnątrz cewek stojana również przy prostym i skoszonym ustawieniu magnesów). Najczęściej podstawowe konstrukcje maszyn elektrycznych (bez modyfikacji np. bez skosu) wprawdzie posiadają bardziej odkształcone indukowane napięcia, a więc i większą zawartość wyższych harmonicznnych liczoną np. poprzez współczynnik THD, ale też posiadają większe wartości indukowanych napięć. Jak w takim razie Doktorantka wytłumaczy fakt prawie dwukrotnie większych indukowanych napięć dla modeli przy skoszonym ustawieniu magnesów na wirniku?

Uwaga 2.

W całej pracy dokonano szczegółowego porównania zawartości wyższych harmonicznnych w przebiegach indukowanych napięć fazowych dla czterech modeli trójfazowej konstrukcji AFPMG. Najczęściej zawartość wyższych harmonicznnych (napięć czy prądów) porównuje się w odniesieniu do składowej podstawowej, którą przyjmuje się jako bazę czyli 100%. Doktorantka wyższe harmoniczne w całej pracy przedstawia w przeliczeniu na dB. Jakie zalety takich prezentacji wyższych harmonicznnych na rysunkach widzi Doktorantka w niniejszej rozprawie?

4. Wniosek końcowy

Zamieszczone uwagi w niniejszej recenzji nie mają żadnego wpływu na moją ostateczną pozytywną ocenę. Zatem stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Natalii Radwan –

Pragłowskiej pt. „Modelowanie generatorów tarczowych wzbudzanych magnesami trwałymi”, stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego, a spójnie przedstawiony sposób rozwiązania problemów dowodzi umiejętności prowadzenia prac naukowych. Moim zdaniem niniejsza rozprawa w znaczący sposób przekracza wymagany zakres dla rozpraw doktorskich, zatem spełnia wszelkie wymagania stawiane przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 poz. 595, z późn. zm.) i w związku z tym, przedkładam Radzie Naukowej Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej wniosek o przyjęcie i dopuszczenie recenzowanej pracy do publicznej obrony.

Biorąc pod uwagę znaczny nakład czasu, jaki poświęciła Pani mgr inż. Natalia Radwan-Pragłowska w przygotowanie niniejszej rozprawy, a mianowicie czasu wymagającego do zrozumienia i prowadzenia obliczeń symulacyjnych (zarówno analitycznych, jak i w programie Ansys-Maxwell), zaprojektowania i zbudowania rzeczywistych modeli, sposobu prowadzonych obliczeń oraz szeroki program prezentowanych badań wnioskuję do Rady Naukowej Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej o wyróżnienie niniejszej rozprawy.

