

dr hab. inż. Mariusz Korkosz, prof. PRz

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Politechnika Rzeszowska

Recenzja pracy doktorskiej

Pana mgra inż. Pawła Prajzendanca

nt. „**Elektromechaniczny przetwornik energii o konstrukcji tarczowej wzbudzany hybrydowo**”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawą formalną opracowania niniejszej recenzji jest pismo Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie WE/4120/750/2022 z dnia 28.06.2022r.

2. Ocena wyboru tematu i celu pracy

Zagadnienie elektromechanicznych przetworników energii nie jest zagadnieniem nowym. Pomimo wielu lat prowadzonych badań ciągle pojawiają się nowe aspekty prowadzące do poprawy ich właściwości eksploatacyjnych. Gwałtowny rozwój pojazdów z napędem typowo elektrycznym wymusił poszukiwanie elektromagnetycznych przetworników energii o możliwie jak najkorzystniejszych właściwościach eksploatacyjnych. Niewątpliwie przetworniki elektromechaniczne z magnesami trwałymi z uwagi na bardzo korzystne właściwości eksploatacyjne predysponowane są do takich rozwiązań. Teoretycznie również dotyczy to różnego rodzaju elektrowni np. wiatrowych. Jednak konstrukcje z magnesami trwałymi z pierwiastków ziem rzadkich posiadają kilka mankamentów. Jednym z nich jest wysoki koszt magnesów trwałych (oraz mocno zcentralizowana ich produkcja), oraz drugi to relatywnie niewielki zakres pracy ze stałą mocą. To wymusiło poszukiwanie rozwiązań które będą ograniczały te wady. Konstrukcja przetwornika elektromechanicznego wzbudzanego hybrydowo niewątpliwie jest jedną ze ścieżek rozwoju tego trendu. Można tutaj znaleźć rozwiązania hybrydowe o budowie radialnej oraz osiowej. Tematyka rozprawy doktorskiej dotycząca konstrukcji osiowej idealnie wpisuje się w światowy nurt badań powiązanych z ograniczaniem wpływu magnesów trwałych oraz jednoczesną poprawą zakresu regulacji strumienia wzbudzenia.

Autor rozprawy postawił tezę, że **„odpowiednio dobrane parametry konstrukcyjne obwodu magnetycznego wirnika zapewniają wymagany zakres regulacji strumienia wzbudzenia w wybranej konstrukcji elektromechanicznego przetwornika energii o konstrukcji tarczowej wzbudzanego hybrydowo”**.

Z tego też powodu należy uznać, że tematyka rozprawy jest jak najbardziej uzasadniona, zarówno z naukowego oraz może nawet bardziej z praktycznego punktu widzenia.

3. Redakcja i zakres rozprawy

Praca liczy 169 stron, zawiera 7 rozdziałów, podsumowanie, dodatkowo spis ważniejszych oznaczeń, 80 rysunków, 49 tabel oraz bibliografię. Spis literatury zawiera 50 pozycji w tym 7 pozycji współautorskich.

Rozdział pierwszy pracy stanowi odniesienie do analizowanej tematyki. Uzasadniono podjęcie analizowanej tematyki badawczej. Omówiono również aktualny stan wiedzy dotyczący analizowanego problemu, sformułowano cel oraz tezę pracy, określono zakres pracy.

W rozdziale drugim pracy Autor rozprawy omówił koncepcję maszyny z biegunami aktywnymi i pasywnymi wirnika o budowie tarczowej z dodatkowym uzwojeniem wzbudzenia umieszczonym na stojanie która była obiektem badań. Zamieszczono zależności matematyczne na wytwarzany moment elektromagnetyczny, strumień magnetyczny w szczelinie powietrznej czy też napięcie indukowane.

Model analizowanej maszyny został dość szczegółowo omówiony w rozdziale trzecim pracy z uwzględnieniem istnienia dodatkowego źródła wzbudzenia.

Rozdział czwarty to badania numeryczne analizowanej konstrukcji. Jest to kluczowy rozdział pracy. Został on podzielony na dwie części. W pierwszej części analizowano wpływ rozpiętości kątowej biegunów (aktywnych i pasywnych) na wytwarzany strumień magnetyczny, indukcję magnetyczną w szczelinie powietrznej, moment elektromagnetyczny, strumień skojarzony oraz napięcie indukowane. Każdy fragment rozdziału został opracowany w sposób ułatwiający analizę otrzymanych wyników. W odniesieniu do pierwszej części rozdziału czwartego dodatkowo zamieszczono badania numeryczne konstrukcji odpowiadającej wykonanemu prototypowi. Dzięki temu podejściu recenzentowi było bardzo łatwo odnieść teoretyczne osiągi prototypu w odniesieniu do przeprowadzanej selektywnej analizy parametrycznej biegunów wirnika o wzbudzeniu hybrydowym. Każdy fragment analizy zawiera podsumowania co również ułatwia ocenę wpływu zmiany parametrów biegunów wirnika maszyny. W drugiej części rozdziału czwartego analizowano wpływ segmentacji łukowej biegunów na rozkład indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej. Ten fragment podrozdziału zawiera dwie części. W pierwszej części analizowano wpływ samej segmentacji biegunów oraz zmianę kierunku magnesowania magnesów. Z uwagi na istnienie dwóch różnych biegunów (aktywnego i pasywnego) jest to zagadnienie znacznie bardziej skomplikowane niż w przypadku istnienia tylko magnesów trwałych. Sama segmentacja w przypadku istnienia biegunów aktywnych i pasywnych konstrukcji tarczowej może powodować inne problemy. W zależności od zastosowanego rozwiązania mogą pojawiać się mostki powietrzne pomiędzy segmentami. Z tego też względu Autor rozprawy podjął całkiem słuszną decyzję o analizie tego problemu co zostało przedstawione końcowej części rozdziału czwartego. Analizowano jedną wybraną segmentację w czterech różnych wariantach w których uwzględniano wypełnianie mostków powietrznych materiałem żelaznym bądź pozostawienie ich bez wypełniania. Są to bardzo interesujące badania dodatkowo podnoszące wartość naukową recenzowanej rozprawy.

Rozdział piąty to szczegółowa prezentacja zbudowanego prototypu maszyny oraz jej wybrane testy laboratoryjne takie jak pomiar napięcia indukowanego, momentu zaczepowego, momentu elektromagnetycznego, sprawności w zakresie pracy generatorowej czy sztywności charakterystyki napięciowej. Z uwagi na hybrydowy charakter wzbudzenia testy laboratoryjne uwzględniały zakres zmiany dodatkowego strumienia wzbudzenia poprzez regulację prądu I_{dc} w określonym zakresie.

Analizę termiczną badanej prototypowej konstrukcji zamieszczono w rozdziale szóstym. Zawiera on wprowadzenie do zagadnienia analizy termicznej, zostały podane założenia przyjęte w trakcie budowania numerycznego modelu termalnego, określono źródła strat oraz charakter ich zmian. Przy wyznaczaniu strat maszyny zostały wyznaczone np. mapy sprawności dla pracy silnikowej z wykorzystaniem algorytmu sterowania ukierunkowanego na maksymalizację momentu w odniesieniu do prądu stojana (MTPA). W badaniach został uwzględniony wpływ zmiany dodatkowego strumienia wzbudzenia. Uzyskane wyniki badań z analizy termicznej zostały odniesione do testów laboratoryjnych z zastosowaniem kamery termowizyjnej dla przypadku kiedy wirnik maszyny był nieruchomy. W rozdziale szóstym analizowano wpływ układu chłodzenia na możliwość pracy S1 maszyny. Wskazano w jakich warunkach i przy jakim układzie chłodzenia będzie możliwa praca S1 z podaniem dopuszczalnej wartości skutecznej prądów stojana maszyny. Analiza termiczna szczególnie w odniesieniu do wpływu układu chłodzenia na ograniczenia parametrów wyjściowych maszyny jest szczególnie interesująca. Ten fragment pracy również istotnie wpływa na wysoką ocenę poziomu naukowe recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Zupełnie nową koncepcja mechanicznej regulacji strumienia wzbudzenia zaprezentowano w rozdziale siódmym. Model koncepcyjny został przebadany numerycznie pod kątem zakresu możliwości regulacji strumienia wzbudzenia. Jest to bardzo nowatorskie podejście w odniesieniu możliwości regulacji strumienia wzbudzenia. Jednocześnie rozdział ten tylko potwierdza bardzo wysoki poziom naukowy recenzowanej rozprawy doktorskiej.

Podsumowanie i ocena przeprowadzonych wyników badań oraz wnioski końcowe zawarto w rozdziale ósmym pracy.

Podsumowując można stwierdzić, że treść i zakres rozprawy odpowiadają jej tytułowi z pewną wątpliwością którą zawarto w uwagach dyskusyjnych. Redakcja pracy jest na poprawnym poziomie. Wnioski z przeprowadzonych badań są wyciągnięte poprawnie. Wszystkie rysunki przygotowane przez Autora są bardzo czytelne co ułatwia interpretację wyników badań. Z uwagi na rodzaj analizowanego przetwornika trudno mieć zastrzeżenia co do zakresu przeprowadzonych badań numerycznych chociaż być może należało bardziej przemyśleć ich zakres biorąc pod uwagę ich czasochłonność. Pewnym mankamentem pracy jest przeciętny przegląd literaturowy, ale to wynika z ukierunkowania Autora rozprawy na mało rozpoznany i rozwijający się temat badawczy.

Autor rozpoczął badania które wpisują się w aktualną tematykę badawczą dotyczącą elektromechanicznych przetworników energii ze wzbudzeniem hybrydowym o budowie osiowej. Jest to bardzo aktualne zagadnienie które zdaniem recenzenta nabiera coraz to większego znaczenia z uwagi na istotny wzrost zainteresowania elektromechanicznymi przetwornikami energii np. o strumieniu osiowym.

4. Ocena wartości naukowej

Recenzowana rozprawa doktorska jest tylko wynikiem cząstkowym prowadzonych prac badawczych dotyczącej tej tematyki, a realizowanej przez zespół badawczy na ZUT. Ponieważ recenzent miał okazję zapoznać się dość szczegółowo z tematyką badawczą promotora pracy i promotora pomocniczego może stwierdzić, że realizowana rozprawa doktorska częściowo nawiązuje koncepcyjnie do wcześniejszych prac promotora i promotora pomocniczego, ale jednocześnie realizuje bardzo autorski kierunek badawczy który nie powieli wcześniejszych badań.

Ocena wartości naukowej pracy jest bardzo wysoka z uwagi na opracowaną i zrealizowaną koncepcję badań opartych o obliczenia numeryczne, ale również i przeprowadzonych badań laboratoryjnych. Sama ocena merytoryczna pracy jest relatywnie wysoka. Nie sposób nie zauważyć zaangażowania doktoranta w realizację podjętej tematyki badawczej. Jestem pod dużym wrażeniem przeprowadzonych badań numerycznych opartych o modele 3D. Niestety rodzaj analizowanego przetwornika elektromechanicznego z dodatkowym wzbudzeniem nie pozwala na znacznie szybszą (i dokładniejszą) analizę 2D. Analizując model 3D zawsze stajemy przed problemem dokładności obliczeń oraz czasu który należy poświęcić na uzyskanie pojedynczego rozwiązania. Ten problem jest widoczny w recenzowanej rozprawie ponieważ recenzent ma w tym zakresie pewne doświadczenie. Dlatego jest zrozumiałe dlaczego zakres analizy parametrycznej biegunów wirnika (aktywnych i pasywnych) rozdziału czwartego jest dość mocno ograniczony. Można mieć oczywiście zastrzeżenia czy też obiekcje dlaczego wybrano akurat taki zakres zmiany parametrycznej biegunów wirnika. Jest to dość dyskusyjne i mam do tego fragmentu pracy pewne zastrzeżenia, ale świadomość czasochłonności obliczeń powstrzymuje mnie przed bycia nadmiernie krytycznym w tym zakresie. Jednak nawet relatywnie ograniczony zakres analizy parametrycznej wykazał pewne tendencje na podstawie których można wyciągnąć pewne wnioski w odniesieniu do analizowanej konstrukcji. W rozdziale czwartym analizowano również problem segmentacji biegunów (aktywnych i pasywnych). Jest to wprawdzie segmentacja ograniczona (tylko podział po łuku, brak podziału po promieniu), ale również ona pozwala na ocenę zachowania się badanej konstrukcji przy istnieniu dodatkowego regulowanego strumienia wzbudzenia.

Mocnym punktem rozprawy jest prezentacja zbudowanego prototypu oraz prezentacja wyników badań laboratoryjnych. Praca została uzupełniona o analizę termiczną prototypowej konstrukcji. To bardzo istotnie wzmocnienie wartości naukowej rozprawy doktorskiej ponieważ to zagadnienie jest szczególnie istotne w konstrukcjach przeznaczonych do napędów pojazdów elektrycznych. Autor pracy wyraźnie wykazał, że uzyskanie dużej gęstości mocy z jednostki objętości przetwornika wymaga zastosowania bardzo efektywnego układu chłodzenia.

W rozprawie przedstawiono również alternatywny sposób wpływania na możliwość regulacji strumienia wzbudzenia. To jest tylko uzupełnieniem wartości naukowej tej rozprawy doktorskiej.

Rozprawa cechuje się bardzo dobrym poziomem naukowym na poziomie koncepcyjnym. Do najistotniejszych osiągnięć Autora zaliczam:

- wykazanie możliwości regulacji strumienia magnetycznego w konstrukcji tarczowej za pomocą dodatkowego uzwojenia DC,
- przeprowadzenie parametrycznych obliczeń numerycznych analizowanej konstrukcji tarczowej o wzbudzeniu hybrydowym,
- przeprowadzenie analizy termicznej prototypowej konstrukcji z uwzględnieniem wpływu układu chłodzenia na parametry wyjściowe maszyny,
- zaproponowanie i analizę nowej koncepcji mechanicznej regulacji strumienia wzbudzenia.

Recenzowana praca istotnie uzupełnia aktualną wiedzę dotyczącą analizy elektromechanicznych przetworników energii o budowie tarczowej ze wzbudzeniem hybrydowym.

5. Uwagi dyskusyjne

Pomimo bardzo pozytywnej oceny rozprawy pod względem naukowym mam jednak kilka uwag merytorycznych o charakterze dyskusyjnym:

1. Odnoszę wrażenie, że Autor pracy sam nie do końca wiedział w jakim kierunku poprowadzić badania. Nawet po przeczytaniu całej rozprawy do końca nie jestem pewien co było głównym przesłaniem w tej rozprawie pod względem jej aplikacji (praca silnikowa, generatorowa). To chyba jest największa wada recenzowanej rozprawy pomimo bardzo dobrego poziomu naukowego.
2. Praca wypada przeciętnie pod względem redakcyjnym. O ile nie mam zastrzeżeń co do samej strony stylistyczno-gramatycznej to liczba błędów w odniesieniu co do pomyłek w oznaczeniach, niewłaściwych oznaczeń, błędów jest wręcz przytłaczająca. Szczegółową listę pomyłek zamieszczono w dalszej części recenzji. To wpływa na ogólną oceny pracy.
3. Zapis równania 3.14 moim zdaniem jest błędny. Dlaczego Autor pracy zakłada, że składowa zmienna L_{s2} jest identyczna dla indukcyjności własnej i wzajemnej maszyny? Znacznie bezpieczniejszym i poprawnym zapisem byłoby uzależnienie pierwszej części macierzy od kąta położenia wirnika oraz pominięcie drugiego członu równania.
4. W rozprawie podano model o parametrach skupionych. Jakie jest przeznaczenie tego modelu ponieważ nie zauważyłem jego praktycznego zastosowania w obliczeniach numerycznych które oparto o obliczenia numeryczne 3D z wykorzystaniem MES.
5. Przegląd literatury należy uznać za względnie wystarczający. Autor pracy skoncentrował się głównie na analizowanym temacie badawczym. Brakuje jednak nieco szerszego ujęcia analizowanej tematyki w odniesieniu do innych badań podobnej tematyce realizowanej na nieco innych konstrukcjach przetworników. Być może w takim przypadku Autor zrezygnowałby z zamieszczania niektórych wniosków podsumowujących, które są oczywiste dla osób zajmujących się identyczną czy też zbliżoną tematyką badawczą. Uważam to za pewne uchybienie merytoryczne tej pracy.
6. Przyjęta metodyka badań laboratoryjnych w odniesieniu do wyznaczania momentu zaczepowego czy też elektromagnetycznego budzi moje wątpliwości. Zastosowane podejście w rozprawie nie pozwala poprawnie wyznaczyć ani momentu elektromagnetycznego ani tym bardziej momentu zaczepowego. Oczywiście zastosowane podejście pozwala oszacować zachowanie się maszyny przy zmianie wartości dodatkowego strumienia wzbudzenia i w tym zakresie jest ono poprawne. Nie daje ono jednak odpowiedzi co do ich faktycznego charakteru zmian. Dodatkowo należy mieć również na uwadze jeszcze inny problem jakim jest dokładność obliczeń numerycznych. Recenzent posiada w tym zakresie bardzo duże doświadczenie badawcze (numeryczne i laboratoryjne). Niestety w przypadku np. wyznaczania momentu zaczepowego wątpliwości mogą budzić zarówno uzyskane wyniki obliczeń numerycznych jak i testów laboratoryjnych.
7. Stosowanie właściwej terminologii to nieco słabsza strona tej rozprawy. Zwrot „szczerbina żłobkowa” jest moim zadaniem bardzo mocno autorski. W praktyce jest to po prostu nadbiegunnik. W takim przypadku należało zamiast „wysokości szczerbiny żłobkowej” zastosować określenie „wysokość nadbiegunnika”. Natomiast wyrażenie „szerokość szczerbiny żłobkowej” zastąpić „szerokością otwarcia żłobka”. Autor pracy jest niekonsekwentny w

stosowaniu określić stosując zamiennie np. uzwojenia fazowe, uzwojenia pasmowe. Termin przebieg jest stosowany w odniesieniu do przebiegów czasowych. Autor wszystkie zależności przedstawia w funkcji położenia kąтового wirnika. Są to zatem zależności w funkcji położenia a nie przebiegi ponieważ nie występuje w nich czas. Bardzo często Autor używa słowa „cewka”. Bardziej zasadne byłoby stosowanie słowa „uzwojenie”. Wykorzystywanie słowa „prądnicą” nie jest błędne, ale w znaczeniu historycznym jest ono kojarzone z klasycznymi prądnicami prądu stałego. Autor pracy oznaczył wysokość/grubość magnesu jako długość. Nie jest to moim zdaniem właściwe oznaczenie.

8. Dlaczego Autor rozprawy używa w badaniach laboratoryjnych w odniesieniu do dodatkowego strumienia wartości prądu I_{DC} (jednostka A) natomiast w badaniach numerycznych przepływu SMM_{DC} (jednostka kAT)?
9. Wskaźnik parametryczny k_{FC} został zastosowany w odniesieniu do strumienia w szczelinie powietrznej oraz do strumienia sprzężonego. Analiza porównawcza analogicznych przypadków wskazuje różnice w wartościach wskaźnika k_{FC} . Co jest powodem tych różnic?
10. Współczynnik k_{VC} obliczony na podstawie wartości skutecznych napięcia indukowanego różni się od wskaźnika k_{FC} (jest mniejszy). Co jest tego powodem?
11. W moim odczuciu przyjęcie wskaźników parametrycznych do oceny zakresu potencjalnego zakresu regulacji strumienia wzbudzenia jest podejściem właściwym. Jednak uzyskanie konkretnej wartości wskaźników parametrycznych samo w sobie w tej postaci jest relatywnie mało przydatne. Należało raczej wprowadzić wskaźniki parametryczne które odnosiły by się do zakresu regulacji do góry i do dołu np. k_{+FC} , k_{-FC} . W takim przypadku byłoby wiadomo o ile możemy zwiększyć moment elektromagnetyczny silnika w pierwszej strefie regulacji (wskaźnik k_{+FC}) czy też o ile zwiększy zakres pracy ze stałą mocą (k_{-FC}).
12. Zastosowane podejście w odniesieniu do segmentacji i zmiany polaryzacji przy pominięciu użłobkowania obwodu magnetycznego stojana można ocenić jako nie do końca uzasadnione merytorycznie. Dodatkowo analizowana segmentacja opiera się o inny kształt biegunów aktywnych i pasywnych. Moim zdaniem to niezbyt właściwe podejście do analizowanego zagadnienia. Uzyskane wyniki niekoniecznie muszą być takie same przy zastosowaniu np. biegunów o kształcie łukowym. Dodatkowo uzyskanych wyników badań w żaden sposób nie można odnosić do obliczeń numerycznych z pierwszej części rozdziału czwartego.
13. Zdanie „Koncepcja budowy wirnika z biegunami z magnesem trwałym dzielonym na segmenty o tej samej biegunowości lub o zmiennym kierunku wektora magnetyzacji jest stosowana w maszynach, m.in. w celu redukcji momentu zaczepowego lub dla wytworzenia indukcji w szczelinie powietrznej o rozkładzie sinusoidalnym lub trapezoidalnym” niestety nie jest w tej postaci prawdziwe w szczególności odniesieniu do redukcji momentu zaczepowego dla maszyn o budowie klasycznej. Segmentację magnesów trwałych bez zmiany kierunku wektora magnetyzacji stosujemy z uwagi na ograniczenie strat w magnesach trwałych i nie ma ona praktycznie żadnego wpływu na redukcję momentu zaczepowego (minimalną wynikającą ze zmniejszenia efektywnej objętości magnesów trwałych). Taki sam efekt wystąpi przy magnesach o budowie łukowej w maszynie tarczowej.
14. Autor rozprawy moim zdaniem nie doszacował wpływu momentu reluktancyjnego. Na stronie 106 rozprawy Autor pisze „W maszynie z magnesami trwałymi powierzchniowo mocowanymi

na wirniku, gdzie różnica indukcyjności w osi d i indukcyjności w osi q maszyny jest niewielka, moment reluktancyjny jest pomijalnie mały." To prawda, ale w analizowanej konstrukcji istnieją bieguny aktywne (duży opór magnetyczny) oraz pasywne (mały opór magnetyczny). Dodatkowo mamy jeszcze wpływ dodatkowego uzwojenia wzbudzenia. Trudno w takiej sytuacji pomijać składową momentu elektromagnetycznego pochodzącą od momentu reluktancyjnego. Moim zdaniem wpływ tej składowej momentu elektromagnetycznego ujawnia się w badaniach numerycznych (Tabela 4.23-4.26). Zmianę kąta mocy maszyny Autor uzasadnia wpływem momentu zaczepowego. Zapomina jednak o składowej reluktancyjnej momentu elektromagnetycznego.

15. W typowej technologii wytwarzania pakietów obwodów magnetycznych realne współczynniki wypełnienia pakietu dla blachy magnetycznej o grubości 0.5 mm to 94%-96% (w zależności od technologii wykonywania). Jaka była technologia wykonywania obwodu magnetycznego o kształcie toroidalnym i jaki uzyskano współczynnik wypełnienia pakietu?
16. W maszynach w których częstotliwości pracy są znacznie większe niż 50 Hz (taki mamy tutaj przypadek) należy się liczyć ze stratami AC (efekty zbliżeniowe) w uzwojeniach stojana oraz stratami wiropądowymi w magnesach trwałych szczególnie montowanymi powierzchniowo (jak w recenzowanej pracy). Czy uwzględniono ten efekt przy obliczeniu strat i samej sprawności? Ich pominięcie może powodować przeszacowanie parametrów wyjściowych maszyny szczególnie pracującej w trybie stałej mocy. Ma to też istotne znaczenie na aspekty termiczne maszyny pracującej szczególnie w zakresie stałej mocy np. ograniczając istotnie czas pracy z danym obciążeniem.
17. Czy mapę strat całkowitych stojana (Rys. 6.2) wyznaczono z uwzględnieniem zmiany temperatury maszyny w poszczególnych punktach pracy czy też przyjęto stałe wartości rezystancji uzwojenia stojana czy też dodatkowego uzwojenia DC?
18. Dlaczego w numerycznej analizie termicznej nie wyznaczano maksymalnej temperatury magnesów trwałych? Ograniczeniem termicznym wpływającym na możliwość pracy maszyny jest nie tylko temperatura maksymalna np. uzwojenia stojana. W zakresie pracy ze stałą mocą najczęściej to właśnie maksymalna temperatura magnesów trwałych redukuje moc wyjściową. Dotyczy to szczególnie sytuacji kiedy mamy magnesy montowane powierzchniowo tak jak w recenzowanej rozprawie. Pominięcie tego aspektu to błąd merytoryczny.
19. Polemizowałbym ze stwierdzeniem Autora rozprawy, że test statyczny jest wystarczający do oceny poprawności opracowanego termicznego modelu numerycznego. Moim zdaniem pozwala on na zgrubne porównanie szczególnie w przypadku braku możliwości weryfikacji temperatur wewnętrznych maszyny. Moje obiekcje dotyczą tego, że w teście statycznym przeprowadzonym przy nieruchomym wirniku, zasileniu uzwojeń prądem stałym pomija się straty w rdzeniu maszyny, straty dodatkowe AC w uzwojeniach stojana czy też wiropądowe w magnesach trwałych. Sugeruję w dalszej pracy badawczej na etapie wykonawczym prototypów montować czujniki do pomiaru temperatury wewnątrz maszyny (szczególnie uzwojeniach).
20. Zamieszczona w rozdziale siódmym koncepcja mechanicznej zmiany strumienia wzbudzenia jest niewątpliwie nowatorska o czym świadczą zgłoszenia patentowe. Jednak należy zadać pytanie czy w tym przypadku ten sposób regulacji strumienia wzbudzenia można zakwalifikować jako hybrydowy sposób wytwarzania strumienia wzbudzenia. Pojęcie hybrydowy w tym kontekście odnosi się do istnienia co najmniej dwóch różnych źródeł co do

sposobu wytwarzania strumienia wzbudzenia. Tak jest w przypadku istnienia dodatkowego źródła strumienia wytwarzanego poprzez dodatkowe uzwojenie. Wydaje się, że w przypadku tej nowatorskiej metody regulacji strumienia wzbudzenia mówimy o podwójnym sposobie wytwarzania strumienia wzbudzenia za pośrednictwem magnesów trwałych tj. stałym i częściowo regulowanym. Z tego punktu widzenia być może temat rozprawy powinien być nieco inny np. „Elektromechaniczny przetwornik energii o konstrukcji tarczowej o regulowanej wartości strumienia wzbudzenia”.

21. Zaprezentowane nowatorskie rozwiązanie mechanicznej regulacji dodatkowego strumienia wzbudzenia jest bardzo interesujące z punktu widzenia naukowego. Mam jednak poważne wątpliwości co do jego praktycznego zastosowania. Niewątpliwie będzie miało ono istotny wpływ na koszty wykonania maszyny które wzrosną. Trochę trudno mi sobie wyobrazić możliwość regulacji położenia magnesów trwałych w trakcie pracy maszyny (statyczne zmiany na postoju ok, w trakcie pracy chyba raczej nie lub będą wymagały opracowania dodatkowego systemu regulacji położenia magnesów). Analizowana konstrukcja ze wzbudzeniem hybrydowym tego mankamentu nie posiada i jest prawdopodobnie mniej kosztowna w wykonaniu.

6. Inne uwagi

Poniżej przedstawiono komentarze, mniej istotne uwagi merytoryczne, uwagi redakcyjne itd.. Zostały one podane w kolejności występowania kolejnych rozdziałów rozprawy doktorskiej:

Wstęp:

1. W elektrowniach wiatrowych czy też wodnych znacznie chętniej są stosowane pierścieniowe maszyny indukcyjne.
2. Brak poparcia literaturowego dla stwierdzenia „ W wielu ośrodkach na świecie, intensywnie rozwija się wysokosprawne silniki wzbudzone hybrydowo o dobrych właściwościach regulacyjnych”. Zostały przytoczone prace tylko autorów z jednego polskiego ośrodka (ZUT). Bardziej zasadne w tym miejscu byłoby zacytowanie jeszcze np. dodatkowych pozycji tj. [6]-[8]
3. Czemu w spisie literatury nie umieszczono pozycji powiązanej z patentem US 562073 o którym wspomniano w teście rozprawy?
4. Autor wymieniając główne wady wzbudzenia hybrydowego nie wspominał od dwóch dodatkowych problemach: momencie zaczepowym oraz względnie dużej zawartości wyższych harmonicznych napięcia indukowanego.
5. Należy uzupełnić stwierdzenie Autora, że „Z punktu widzenia zachowania ciągłości produkcji, ogromnej w tych czasach liczby silników a także ze względu na stale rosnące ceny magnesów i ich niepewną dostępność na rynkach światowych, wiele firm światowych z branży elektromobilności coraz częściej inwestuje w rozwój synchronicznych maszyn wzbudzanych elektrycznie, pomimo ich wad”. To oczywiście jest prawda, ale nie bez znaczenia jest tzw. sprawność w cyklu pracy układu napędowego. Musi ona uwzględniać pracę w zakresie $P=\text{const}$ czyli przy odwzbudzaniu. Okazuje się, że klasyczne maszyny synchroniczne posiadając możliwość regulacji prądu wzbudzenia z powodzeniem kompensują brak stałego strumienia magnetycznego który przy pracy ze stałą mocą jest wadą a nie zaletą (konieczność odwzbudzania generuje dodatkowe straty wpływające na obniżenie sprawności). Konstrukcje ze wzbudzeniem hybrydowym w zależności od rozwiązania mogą być tej wady pozbawione lub częściowo pozbawione.

Rozdział 2

1. Z czego wynikały takie a nie inne wymiary geometryczne budowanego stojana?
2. W równaniu 2.1 liczba par biegunów wynosi 3, natomiast w wyrażeniu 2.9 wynosi już 6.
3. Wzór 2.3 nie jest poprawny.
4. Dlaczego przyjęto liczbę przewodów w żłobku równą 300? Z czego to wynika?
5. Zależności na współczynnik uzwojenia, grupy i skrótu podano dla pierwszej harmonicznej. Indeks 1 w wyrażeniach również to sugeruje przy czym autor pracy o tym nie wspomina w tym miejscu. Informacja o pierwszej harmonicznej pojawia się dopiero w podrozdziale 2.6. W przypadku tej konstrukcji należy liczyć się z obecnością wyższych harmonicznych.
6. Dlaczego przyjęto liczbę zwojów dodatkowego uzwojenia DC wynoszącą 500 zwojów? W pracy podobnie jak w przypadku liczby zwojów przypadających na jeden żłobek nie zostało to wyjaśnione.
7. Wyrażenie na okład prądowy zazwyczaj podaje się w odniesieniu do wartości skutecznej prądu a nie jego wartości maksymalnej. Sam zapis wyrażenia 2.18 jest jednak poprawny.
8. Założenie stałości indukcji maksymalnej pod biegunem aktywnym i pasywnym jako niezależnej od promienia jest pewnym uproszczeniem biorąc pod uwagę analizowany kształt stojana i wirnika.

Rozdział 3

1. Opisy rysunku 3.1 dotyczące sieci reluktancyjnej są mało czytelne.
2. Założenie przenikalności magnetycznej rdzeni stojana i jarzma wirnika jako nieskończonej upraszcza analizę zagadnienia, ale jest mocno oderwane od rzeczywistości szczególnie w obecności magnesów trwałych.
3. Oznaczenie magnesów trwałych obu wirników jako jednoimienne np. typu N jest nieco mylące. Jest to prawda, ale w rzeczywistości jest to para magnesów N/S wymuszająca przepływ strumienia poprzez obwód magnetyczny stojana z uwzględnieniem bocznikowania strumienia poprzez bieguny pasywne. Tego nie zaznaczono na idealizowanym rysunku 3.3.
4. We wzorze 3.7 powinna być macierz rezystancji R_s .
5. Można się domyślać, że macierz M_{FDC} zawiera indukcyjności wzajemne pomiędzy uzwojeniami fazowymi a uzwojeniem DC. Niestety w pracy brak tej informacji.
6. Straty mechaniczne to nie tylko straty tarcia na łożyskach. W przypadku większych prędkości obrotowych należy również uwzględnić straty tarcia o powietrze. Powierzchnia wirnika analizowanej konstrukcji jest dość duża co będzie generowało straty tarcia o powietrze. W przypadku istnienia dławicy należy jeszcze uwzględnić straty wentylacyjne.

Rozdział 4

1. Z czego wynikał przyjęty zakres regulacji prądu uzwojenia DC (± 1 kAT)?
2. Zakres zamiany wskaźników parametrycznych z rozdziału czwartego dotyczy tylko stanu bezprądowego uzwojeń fazowych stojana? Czy analizowano jak stan obciążenia uzwojeń fazowych wpływa na zakres zmiany wskaźników parametrycznych?
3. W objaśnieniu oznaczenia strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej bieguna pasywnego błędnie podano powierzchnię całkowania. Podobnie błędnie podano powierzchnię dla strumienia rozproszenia bieguna z magnesem do bieguna pasywnego czy też strumienia w jarzmie stojana.
4. Wariant szczególnie IINd15/12_Prototyp posiada grubszy magnes niż wynika to z Tabeli 4.2 w którym analizowano grubość magnesu wynoszącą 10 mm. Spełnia on warunek $l_{IP} > l_{PM}$. Jednak jest to raczej kolejny wariant ponieważ różnica w grubości bieguna aktywnego i pasywnego jest tutaj istotnie mniejsza.

5. Dlaczego objętość bieguna pasywnego wariantów $I_{Nd5/5_3}$ oraz $I_{Nd5/5_4}$ podana w tabeli 4.3 się różni? Powinna być ona identyczna. Ta sama uwaga dotyczy tabel 4.4-4.10.
6. W tabelach 4.9-4.10 nie został określony wskaźnik k_{FC} .
7. Wniosek nr 1 z przeprowadzonych badań jest raczej dość oczywisty. Mniejsza objętość magnesów to mniejszy strumień co w porównaniu z określonym dodatkowym strumieniem pochodzącym od uzwojenia DC. Same badania są jednak potrzebne ponieważ tylko na ich podstawie można określić potencjalny zakres regulacji strumienia w szczelinie powietrznej. To samo dotyczy wniosku nr 3.
8. Wydaje się, że wniosek nr 2 z przeprowadzonych nie jest jednak do końca prawdziwy. Jednak zakres regulacji strumienia w szczelinie powietrznej przy zastosowaniu magnesów neodymowych jest ograniczony. Sam autor pracy potwierdza to np. wnioskiem nr 8.
9. Zwiększanie różnicy w wysokości bieguna aktywnego i pasywnego wpływa korzystnie na poprawę zakresu regulacji strumienia kosztem jego istotnej redukcji.
10. Na rysunku 4.11 błędnie opisano osi rzędnych.
11. W jakich warunkach wyznaczano moment elektromagnetyczny T_e (rozdział 4.2.3)? Czy są to warunki podane stronie 83 rozprawy?
12. Parametr t_r powinien odnosić się do wartości średniej momentu elektromagnetycznego a nie do jego wartości maksymalnej. Rzeczywisty wpływ momentu zaczepowego na wartość współczynnika będzie większy.
13. W pracy nie podano w jaki sposób obliczano wartość średnią momentu elektromagnetycznego T_{eav} dla danego wymuszenia prądowego poszczególnych uzwojeń maszyny. Jednak analiza wyników wskazuje, że jest to po prostu wartość średnia z zależności T_e w funkcji kąta położenia wirnika α . Może to być mylące bo w warunkach rzeczywistych wartość średnią momentu elektromagnetycznego określa się nieco inaczej i jest ona zdecydowanie większa.
14. Część wniosków podsumowujące analizę momentu elektromagnetycznego czy też zaczepowego jest oczywista dla każdego badacza zajmującego się problematyką maszyn z magnesami trwałymi.
15. Szkoda, że autor pracy nie pokusił się o bardziej wnikliwą analizę tego zagadnienia ponieważ wpływ dodatkowego strumienia jest zagadnieniem bardzo interesującym pod względem potencjalnych zastosowań konstrukcji w zakresie pracy silnikowej.
16. Stałej napięciowej k_e nie podaje się w woltach.
17. W tabeli 4.33- 4.34 nie podano wartości parametrów k_{FC} , k_{VC} .
18. Uzyskane zależności napięcia indukowanego pokazane w tabelach 4.35-4.38 zawierają znaczne fluktuacje. Autor pracy w żaden sposób nie odnosi się do tego problemu. Można się tylko domyślać co jest tego powodem.
19. W tabelach 4.35-4.38 w wielu przypadkach wartości liczbowe nie są tożsame pokazanymi zależnościami napięcia indukowanego w odniesieniu do wartości maksymalnej (np. tabela 3.37 wariant $II_{Nd10/5_2}$, $II_{Nd10/5_3}$ itd.)
20. Część wniosków podsumowująca jest rozdział 4.2.4 jest oczywista dla osób zajmujących się tą tematyką.
21. Należy zwrócić uwagę, że zakres regulacji napięcia indukowanego (jego zmniejszanie) w przypadku magnesów neodymowych w analizowanych wariantach badanej konstrukcji jest bardzo ograniczony. Uzyskanie relatywnie wysokiego wskaźnika k_{FC} , czy też k_{VC} nie jest tożsame z uzyskaniem szerszego zakresu pracy silnika ze stałą mocą. Jednak w zakresie pracy generatorowej dowzbudzenie pozwoli uzyskać bardzo sztywne charakterystyki wyjściowe.
22. Mam wątpliwości czy pokazany podział na segmenty podział biegunów aktywnych i pasywnych jest poprawny (rys.4.15). Dla mnie nie jest on do końca jednoznaczny.

Rozdział 5

1. Rozumiem, że pozyskanie magnesu trwałego o kształcie prostokąta jest znacznie prostsze i tańsze. Być może należało wykonać dwa wirniki do prototypów tj. prezentowany bardziej dostosowany do tańszego i prostszego wykonania oraz drugi będący wynikiem obliczeń numerycznych.
2. W tabeli 5.1 podano średnice zewnętrzną i wewnętrzną stojana. Podano jednak błędnie oznaczenia w postaci promienia.
3. Jaki cel miało badanie I w podrozdziale 5.3.1? W jakim celu pokazano sygnał napięciowy z momentomierza na rys.5.4?
4. Dlaczego badania laboratoryjne II w podrozdziale 5.3.1 przeprowadzono przy $n=600$ obr/min?
5. Dlaczego autor pracy używa w badaniach w odniesieniu do dodatkowego strumienia wartości prądu natomiast w badaniach numerycznych przepływu?
6. Na rysunku 5.5a jest błąd w opisie. Wzrost napięcia indukowanego uzyskano przy odzwbudzeniu. Ta sama uwaga dotyczy zamieszczonych danych w Tabeli 5.2.
7. Jak uzyskano moment maksymalny wynoszący 60 N·m przy obciążeniu silnika PMSM o momencie wynoszącym 40 N·m (dane silnika PMSM podane na stronie 125 pracy)?
8. Autor stosuje w odniesieniu do momentu różne oznaczenia.
9. Autor myli dowzbudzenie z odzwbudzeniem (np. wyniki zamieszczone w tabeli 5.3) czy też podsumowując rozdział 5.3.1. Podobnie jest w rozdziale 5.3.2 dotyczącym stanu obciążenia gdzie tych pomyłek jest bardzo dużo.
10. Nie pokazano sprawności generatora przy dowzbudzeniu chociaż Autor w podsumowaniu się do tego odnosi.

Rozdział 6

1. Dlaczego pokazane straty całkowite stojana (Rys.6.2) relatywnie niewiele się różnią między sobą tj. straty z dodatkowym strumieniem wzbudzenia ($I_{dc}=\pm 5A$) powinny być minimum 120 W większe niż przy prądzie $I_{dc}=0$ A?
2. To samo pytanie dotyczy wyznaczonych map sprawności. Dodatkowo czy w trakcie wyznaczania map sprawności uwzględniono straty mechaniczne maszyny?
3. Trochę zastanawiający jest brak wpływ dodatkowego strumienia wzbudzenia na sprawność maksymalną maszyny.
4. Wniosek numer 1 podsumowujący rozdział 6.3 jest oczywisty.
5. Czy termiczny model numeryczny uwzględniał mocowanie maszyny?
6. Czy rozważano możliwość pomiaru temperatury poszczególnych elementów silnika (uzwojenia stojana, uzwojenie DC, rdzeń stojana) za pomocą czujników (np. termopar).
7. Strona 148, 154 literówka ponieważ jest „pacy” zamiast „pracy”.
8. Czy testowano praktycznie pod względem termicznym stan obciążenia uzwojeń stojana prądem 12 A pod kątem weryfikacji wyników termicznej analizy przejściowej?
9. W moim odczuciu na bazie swoich doświadczeń tak duże przeciążenie (48 A) powoli na maksymalnie kilkudziesięciu sekundową pracę maszyny. Zazwyczaj zapotrzebowanie na większą moc pojawia się wówczas kiedy maszyna np. pracuje z mocą znamionową. A to oznacza, że jest ona już zupełnie innym stanem termicznym niż analizowano to w rozprawie. Dla określenia dopuszczalnego czasu pracy jako warunki początkowe należy przyjąć ustalony stan termiczny wynikający z obciążenia mocą znamionową.
10. Wnioski z badań termicznych mogą być obarczone wieloma niepewnymi chociaż ogólnie są poprawne z wyjątkiem punktu 1 który jest oczywisty.

7. Ostateczna ocena rozprawy

Mgr inż. Paweł Prajzencanc realizuje bardzo złożony problem badawczy powiązany z bezszczotkową konstrukcją tarczową z magnesami trwałymi o dwóch sposobach regulacji strumienia wzbudzenia. Jest to tematyka niezwykle interesująca z naukowego punktu widzenia, jednocześnie ma duże uzasadnienie pod kątem potencjalnego zastosowania praktycznego w nowoczesnych pojazdach z napędem elektrycznym czy też w systemach generacji energii elektrycznej OZE. Wartością dodaną recenzowanej pracy jest 50% redukcja objętości magnesów trwałych które są zastąpione biegunami pasywnymi wykonanymi z materiału ferromagnetycznego. Należy nadmienić, że z punktu widzenia analizy numerycznej zastosowanie podejścia redukującego koszty zastosowania magnesów trwałych spowodowało, że Autor musiał poświęcić znacznie więcej wysiłku i czasu, aby uzyskać rozwiązania.

Zrealizowany zakres prac w zakresie recenzowanej rozprawy doktorskiej obejmuje pełny cykl badawczy tj. badania symulacyjne oraz weryfikację laboratoryjną maszyny tarczowej o wzbudzeniu hybrydowym. Autor rozprawy wykazał, że przy określonych wymiarach geometrycznych maszyny dokonując odpowiedniej modyfikacji parametrów (geometrycznych i materiałowych) biegunów aktywnych i pasywnych wirnika możliwa jest zarówno regulacja wartości strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej maszyny, ale również wpływanie na jego kształt. W rezultacie zastosowanie wzbudzenia o regulowanej wartości pozwala nie tylko regulować wartość napięcia indukowanego, ale również wpływać na jego kształt co w niektórych aplikacjach jest szczególnie pożądane. Dużą zaletą pracy jest ujęcie problemu termicznego analizowanej konstrukcji. Autor pracy wykazał, że praca ciągła jest możliwa tylko w określonych warunkach w przypadku braku chłodzenia wymuszonego. Zastosowanie chłodzenia wymuszonego istotnie zwiększa gęstość mocy przy pracy ciągłej, chociaż jak wykazano w pracy tutaj również pojawiają się ograniczenia. Stosowanie bardziej rozbudowanych kanałów układu chłodzenia stojana maszyny (a zarazem istotny wzrost stopnia skomplikowania technologicznego) nie idzie w parze ze wzrostem jego efektywności. Zaprezentowana w pracy tematyka badawcza nie wyczerpuje analizowanego problemu badawczego. Jestem przekonany, że autor będzie kontynuował prace powiązane z tą tematyką które pozwolą na uzyskanie dalszych interesujących efektów badawczych.

Pomimo wysokiego poziomu naukowego pracy w uwagach dyskusyjnych zwrócono uwagę na pewne niedociągnięcia rozprawy mgra inż. Pawła Prajzencanca. Jednak większość zawartych uwag dyskusyjnych nie ma wpływu na ocenę merytoryczną rozprawy. Celem części z nich jest zwrócenie uwagi Autorowi rozprawy, że być może do pewnych zagadnień badawczych należało podejść inaczej. Uwagi zawarte w punkcie 6 recenzji powinny natomiast zainspirować Autora w dalszej pracy naukowej do znacznie większej kontroli nad prezentowaną treścią. Niestety bardzo dobra koncepcja realizowanego zagadnienia badawczego, wysoki poziom naukowy recenzowanej pracy nie koresponduje z licznymi błędami czy też pomyłkami które nie powinny pojawiać się w tak dużym zagęszczeniu. Bardzo negatywnym bohaterem niedociągnięć i pomyłek jest rozdział piąty pracy.

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy stwierdzam, że Autor udowodnił postawioną tezę, a cel rozprawy został osiągnięty. Po uwzględnieniu wkładu pracy Autora, oryginalności założeń, sposobu realizacji analizowanego problemu oraz uwzględnieniu wszystkich uwag dyskusyjnych oceniam pracę pozytywnie. Stwierdzam również, że opiniowana rozprawa spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003r. (Dz. U. z 2017r., poz. 1789) oraz zgodnie z Ustawą z 3 lipca 2018r. – Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz.U. z

2018r. poz. 1669 z póź., zm.) w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie automatyka, elektronika i elektrotechnika.

8. Wniosek końcowy

Stawiam wniosek o przyjęcie przedstawionej pracy Pana mgra inż. Pawła Prajzandanca zatytułowanej „Elektromechaniczny przetwornik energii o konstrukcji tarczowej wzbudzany hybrydowo” jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie jej Autora Pana mgra inż. Pawła Prajzandanca do publicznej obrony.

Monika Kokoń