

dr hab. inż. Mariusz Korkosz, prof. PRz

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Politechnika Rzeszowska

Recenzja pracy doktorskiej

Pana mgr inż. Artura Śliwińskiego

nt. „Optymalizacja konstrukcji i warunków komutacji przełączalnego generatora reluktancyjnego”

1. Podstawa formalna opracowania recenzji

Podstawą formalną opracowania niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Opolskiej RE00ST0001/D/2024 z dnia 07.02.2024r.

2. Ocena wyboru tematu i celu pracy

Zagadnienie wytwarzania energii elektrycznej jest znane. Jedną z metod jej wytwarzania jest stosowanie generatorów elektrycznych które zamieniają energię mechaniczną na energię elektryczną. Sposoby doprowadzania energii mechanicznej na wał generatora są różne. W tym celu wykorzystywane są np. źródła surowców kopalnych w procesie spalania, których wytwarzana jest niezbędna do pracy generatora energia mechaniczna. Jednocześnie od wielu już lat poszukiwane są alternatywne sposoby pozyskiwania energii mechanicznej. Niewątpliwie takie możliwości dają odnawialne źródła energii. Zaliczyć do nich można z powodzeniem energię wiatru. Jest to jednak źródło energii odnawialnej, którego parametry energetyczne są dość zmienne. To wymaga odpowiedniego podejścia w kontekście doboru generatora w celu uzyskania zakładanych parametrów na wyjściu generatora. Istnieją różne rozwiązania maszyn elektrycznych możliwych do zastosowania jako generatory w elektrowniach wiatrowych. Zaliczyć do nich można typowe np. maszyny synchroniczne, maszyny indukcyjne, bezszczotkowe maszyny z magnesami trwałymi, czy też maszyny reluktancyjne przełączalne. Wszystkie rozwiązania mają swoje mocne i słabe strony. Autor pracy zajął się problematyką pracy generatorowej maszyny reluktancyjnej przełączalnej w odniesieniu do jej aplikacji w małej elektrowni wiatrowej. Charakterystyki maszyn reluktancyjnych przełączalnych wskazują, że dość dobrze nadają się one do pracy w układach o zmiennej prędkości obrotowej. A do takich układów niewątpliwie należy zaliczyć pracę elektrowni wiatrowej. Brak typowego problemu towarzyszącego bezszczotkowym maszynom z magnesami trwałymi związanego z momentem zaczepowym jest atutem tej konstrukcji. Pozwala to obniżyć minimalną prędkość rozruchową generatora reluktancyjnego przełączalnego. Biorąc pod uwagę tendencję do budowania małych rozproszonych systemów generacji energii elektrycznej zaproponowanie generatora reluktancyjnego przełączalnego jest w pełni uzasadnione.

Autor rozprawy postawił tezę, że „Możliwe jest zaprojektowanie lub poprawa wybranych parametrów przełączalnych generatorów reluktancyjnych, poprzez jednoczesną optymalizację konstrukcji obwodu

magnetycznego, uzwojeń oraz sposobu sterowania, na podstawie funkcji celu uwzględniających wyniki symulacji pracy generatora w stanach ustalonych”.

Zagadnienie poprawnego doboru generatora do przewidywanej jego lokalizacji jest w pełni uzasadnione. Tylko indywidualne podejście projektowe jest w stanie uwzględnić lokalne warunki pracy generatora. To czyni postawioną tezę pracy w kontekście dostosowania projektowanego generatora jako w pełni uzasadnioną.

3. Redakcja i zakres rozprawy

Praca liczy 115 stron, zawiera 9 rozdziałów ze spisem ważniejszych oznaczeń, 70 rysunków, 7 tabel, 20 równań. Spis literatury zawiera 119 pozycje w tym 5 pozycje współautorskie autora rozprawy oraz 1 samodzielna.

Rozdział pierwszy pracy stanowi odniesienie tematyki związanej z generacją energii elektrycznej. Uzasadniono podjęcie analizowanej tematyki badawczej.

W rozdziale drugim pracy sformułowano tezę oraz cel pracy, zostały również określone cele szczegółowe pracy.

Rozdział trzeci pracy zawiera omówienie zagadnień dotyczących maszyn reluktancyjnych przełączalnych z uwzględnieniem jego pracy generatorowej.

W rozdziale czwartym został zamieszczony model matematyczne generatora reluktancyjnego przełączalnego. Omówiono również środowisko do obliczeń symulacyjnych.

Rozdział piąty zawiera weryfikację laboratoryjną opracowanego modelu symulacyjnego.

Zagadnienie optymalizacji generatorów reluktancyjnych przełączalnych zamieszczono w rozdziale szóstym. Został ono zrealizowane w pierwszej fazie na geometrii bazującym na komercyjnym rozwiązaniu MVR3. W następnym etapie zostały opracowane dwa generatory oznaczone odpowiednio jako „A” i „B”. W obu przypadkach zastosowano odpowiednio optymalizację dwuetapową („A”) i kompleksową „B”).

Opracowaną metodę optymalizacji w rozdziale szóstym zaimplementowano w rozdziale siódmym przy opracowywaniu generatora z uwzględnieniem jego docelowej lokalizacji.

Podsumowanie i wnioski końcowe zawarto w rozdziale ósmym pracy.

Podsumowując można stwierdzić, że treść i zakres rozprawy odpowiadają jej tytułowi. Redakcja pracy jest na dobrym poziomie. Wnioski z przeprowadzonych badań są wyciągnięte poprawnie. Wszystkie rysunki przygotowane przez Autora są czytelne co bardzo ułatwia interpretację wyników badań. Pewien niedosyt może budzić brak szerszej weryfikacji laboratoryjnej opracowanych z uwzględnieniem optymalizacji generatorów w rozdziale szóstym i siódmym pracy. Z doświadczenia recenzenta wynika, że z dużym prawdopodobieństwem po testach praktycznych autor rozprawy uwzględniłby pewne korekty w module optymalizacji.

4. Ocena wartości naukowej

Recenzowana rozprawa doktorska koncentruje się na zagadnieniu optymalizacji konstrukcji i warunków komutacji generatora reluktancyjnego przełączalnego. Autor rozprawy postawił za cel pracy opracowanie metody projektowania generatora reluktancyjnego przełączalnego z uwzględnieniem zagadnień optymalizacji oraz warunków pracy. Jest to podejście jak najbardziej zasadne. Można zaprojektować konstrukcję maszyny reluktancyjnej przełączalnej bazując na optymalizacji wymiarów geometrycznych. Jednak niekoniecznie opracowana konstrukcja będzie odpowiadała wymaganym warunkom pracy. Ujęcie problemu sterowania pracą maszyny jest w tym przypadku bardzo istotne. Tylko w takim przypadku na etapie projektowania można dostosować projektowaną geometrię generatora do postawionych wymagań. Jeżeli na etapie projektu zostanie uwzględniony sposób sterowania pracą maszyny to automatycznie uzyskujemy rzeczywiste parametry eksploatacyjne. Dlatego przyjęte podejście w procesie projektowania generatora przez autora rozprawy jest właściwe. W samej koncepcji nie jest to nowe podejście. Należy je w tym przypadku uznać typowe. Pomimo, że maszyny reluktancyjne przełączalne są znane od dawna to proces ich projektowania można uznać za jeden z trudniejszych. Jest to pewien paradoks ponieważ stoi to w sprzeczności z prostotą ich budowy. Niestety prostota ich budowy szczególnie wirnika (brak magnesów czy też uzwojeń) istotnie komplikuje sam proces projektowania z uwagi na pojawienie się obustronnej jawnobiegunowości maszyny. Jeżeli doliczyć do tego silną nieliniowość obwodu magnetycznego oraz wpływ parametrów sterowania to finalnie uzyskujemy bardzo skomplikowane zagadnienie projektowe. W trakcie procesu projektowego należy zwracać uwagę na szereg wzajemnych relacji pomiędzy poszczególnymi wymiarami geometrycznymi które dodatkowo są jeszcze powiązane z parametrami sterowania. Generalnie w procesie projektowania można zastosować dwa podejścia w odniesieniu do parametrów geometrycznych maszyny. W pierwszym przypadku kluczowe parametry geometryczne nie są bezpośrednio ze sobą powiązane i są dobierane z określonego zakresu. W drugim przypadku można jednak powiązać ze sobą część kluczowych wymiarów geometrycznych. To z jednej strony jest ułatwienie procesu projektowego, ale z drugiej strony może stanowić pewne ograniczenie w procesie optymalizacji ograniczając możliwość swobodnej zmiany wybranych parametrów geometrycznych. W recenzowanej pracy zastosowano pierwsze podejście. Do analizy modelu polowego zastosowano program FEMM. Jest to proste, niekomercyjne narzędzie do obliczeń z wykorzystaniem metody elementów skończonych. Z uwagi na brak wbudowanych narzędzi ułatwiających generowanie typowych rozwiązań konstrukcyjnych maszyn elektrycznych użytkownika ma do dyspozycji API który pozwala na tworzenie geometrii. Recenzent nie pracował w programie FEMM, ale podobne podejście wykorzystywał w module elektromagnetycznym programu Ansys. Zastosowanie języka skryptowego LUA do automatyzacji tworzenia geometrii jest zasadne i przydatne w procesie optymalizacji. Recenzent również do automatyzacji procesu tworzenia geometrii wykorzystywał wewnętrzny język programu Ansys. Samodzielne tworzenie geometrii z uwzględnieniem ograniczeń programu FEMM raczej wymusza stosowanie prostych rozwiązań geometrycznych. Jednocześnie prostsze konstrukcje geometryczne są znacznie łatwiejsze do optymalizacji. Wydaje się, że pokazane na rysunku 4.2.1 przykładowe modele SRG w zakresie uzwojenia można było uprościć. Osobiście bazowałbym na podziale dostępnej przestrzeni między sąsiednimi biegunami stojana na dwa symetryczne powierzchnie. Z doświadczenia recenzenta wynika, że takie podejście jest całkiem skuteczne pod warunkiem, że istnieje możliwość automatycznego obliczania teoretycznego dostępnego pola przewidzianego na umieszczenie uzwojenia bieguna. Wprowadzając współczynnik wypełnienia przestrzeni żłobkowej przez dane uzwojenie można w pełni kontrolować ile zwojów o określonym przekroju można tam umieścić. Takie podejście nie ma żadnego wpływu na uzyskiwane charakterystyki

statyczne SRG. Przyjęte założenia odnośnie parametryzacji modelu są słuszne. Miałbym tylko uwagę co do przyjętego kąta obrotu wirnika. W pracy przyjęto wartość tego kąta jako 1° mechaniczny. Dla konstrukcji 8/6 osobiście zastosowałbym krok na poziomie 0.5° . Należy zwrócić uwagę, że dopasowanie gęstości siatki w obszarze szczeliny powietrznej do założonego kąta obrotu wirnika jest najlepsze z możliwych. Dzięki temu ograniczono błędy numeryczne powstające podczas realizacji obliczeń. Organizacja procesu obliczeń została przygotowana i przeprowadzona prawidłowo. Należy zaznaczyć, że autor rozprawy musiał sam napisać wszystkie procedury i jest to samo w sobie autorskie podejście chociaż nie oryginalne. W celu doboru uzwojeń oraz doboru kątów sterowania wykorzystano minimalizujący algorytm genetyczny zaimplementowany w programie Matlab. W procesie optymalizacji została określona funkcja celu uwzględniająca: moc pobieraną ze źródła zasilającego, moc oddawaną do źródła zasilania, straty w uzwojeniach maszyny oraz straty w układzie energoelektronicznym, moment elektromagnetyczny na wale oraz wartość maksymalną prądu fazowego. Istotnym ograniczeniem dla funkcji celu jest wartość maksymalna prądu fazowego ograniczona do 40 A. Przy przekraczaniu tej wartości w procesie optymalizacji wprowadzono funkcję kary. Wartość funkcji kary została uzależniona od wartości przekroczenia w zakresie od 40A do 50 A. Po przekroczeniu 50 A funkcja kary przyjmowała stałą wartość wynoszącą 0.1 co dość skutecznie redukowało znaczenie uzyskanego dla tej wartości prądu rozwiązania. Przy optymalizacji kształtu obwodu magnetycznego SRG uwzględniano grubość jarzma stojana, średnicę szczeliny powietrznej, szerokość bieguna stojana i wirnika oraz możliwość zmiany średnicy zewnętrznej. Proces optymalizacji przeprowadzono w dwóch wariantach. W pierwszym przyjęto stałą wartość średnicy zewnętrznej natomiast w drugim przypadku średnica zewnętrzna mogła ulegać zmianie. Dla drugiego przypadku zostały opracowane inne funkcje celu odpowiednio dla pierwszego i drugiego etapu optymalizacji pokazanego na rysunku 4.3.5. Słusznie autor rozprawy w funkcji celu uwzględnił przekrój projektowanego SRG. Proces optymalizacji zawsze wiąże się określonym czasem który należy przewidzieć na uzyskanie rozwiązania problemu. Ten czas jest stosunkowo długi. Autor rozprawy opracował środowisko obliczeniowe wykorzystujące możliwość prowadzenia obliczeń równoległych. Główny serwer został zaimplementowany w chmurze obliczeniowej AZURE (o dużej dostępności). Jednocześnie czas obliczeń może zostać istotnie zredukowany poprzez podłączenie większej liczby komputerów. Jedynym wymogiem dla podłączanych komputerów jest dostęp do internetu. Opracowane środowisko obliczeniowe zostało graficznie pokazane na rysunku 4.3.6. Całe środowisko obliczeniowe zostało zaprojektowane i zaimplementowane przez autora rozprawy. To bardzo duży atut tej pracy. Realizowany algorytm działania opracowanego programu do obliczeń symulacyjnych pokazano na rysunku 4.4.1. Dla sprawdzenia poprawności działania opracowanego programu symulacyjnego dokonano weryfikacji laboratoryjnej. To bardzo słuszne podejście bo weryfikuje poprawność działania modelu symulacyjnego. Na podstawie opracowanego autorskiego modelu symulacyjnego zostały zaprojektowane finalnie cztery różne prototypowe SRG. Pierwszy prototyp SRG bazował na komercyjnym rozwiązaniu MVR3 zastosowanym w procesie weryfikacji modelu symulacyjnego. Dwa następne prototypy oznaczone jako „A” i „B” zostały zaprojektowane na identyczną moc wyjściową i prędkość obrotową. Jednak zostały zastosowane dwa różniące się podejścia projektowe tj. z zastosowaniem optymalizacji dwuetapowej „prototyp A” i kompleksowej „prototyp B”. Wykazano pewną przewagę projektowania z zastosowaniem optymalizacji kompleksowej z uwagi na uzyskanie większej mocy wyjściowej oraz sprawności przy tej samej średnicy zewnętrznej i długości czynnej generatora. Prototyp „B” został ponownie przeliczony po aktywacji w modelu symulacyjnym wzajemnych sprzężeń magnetycznych. Wykazano, że uwzględnienie wzajemnych sprzężeń magnetycznych wpłynęło korzystnie na parametry prototypowego generatora.

Wykazano wzrost mocy wyjściowej, zmniejszenie tętnień prądu źródła czy też niewielki wzrost sprawności. W tym miejscu należy jednak zaznaczyć, że w pracy nie wyjaśniono w sposób czytelny w jaki sposób uwzględniono wzajemne sprzężenia magnetyczne. Z dostępnych informacji można wyciągnąć wniosek, że uwzględniano tylko sprzężenia tylko pomiędzy komutującymi fazami. Potwierdzają to uzyskane wyniki obliczeń symulacyjnych. W rzeczywistości dla rozwiązania czterofazowego 8/6 przy większych kątach wysterowania praktycznie sprzęgają się wszystkie fazy ze sobą. Dodatkowo jedno wzajemne sprzężenie magnetyczne ma znak przeciwny niż trzy pozostałe. Ma to jednak charakterystyczny wpływ na prądy fazowe w warunkach idealnej symetrii wewnętrznej generatora. W zakresie sterowania jednopulsowego zawsze trzy prądy generatora będą miały większe amplitudy w odniesieniu do czwartej fazy (lub odwrotnie jedna amplituda większa a trzy mniejsze). W układzie rzeczywistym wpływ sprzężeń magnetycznych jest znacznie bardziej widoczny, przynajmniej takie doświadczenie ma piszący tą recenzję. Dlatego wyciągnięte w tym zakresie wnioski należy traktować bardzo ostrożnie. Ostatnim opracowanym prototypem generatora było opracowanie konstrukcji dostosowanej do możliwości środowiskowych. Na podstawie dostępnych danych środowiskowych wybrano zakres docelowej pracy projektowanego generatora. Takie podejście pozwala dopasować parametry generatora do panujących warunków w taki sposób, aby mógł on pracować przez znaczną część roku w zakresie prędkości pozwalających mu uzyskiwać praktycznie moc znamionową. Należy zwrócić uwagę na zagadnienie ograniczania dopuszczalnej wartości prędkości obrotowej generatora. W tym zakresie SRG mają bardzo duże możliwości. Autor rozprawy zasygnalizował te możliwości. Zdaniem recenzenta te możliwości są znacznie większe niż pokazano to w recenzowanej pracy. Nie należy tego traktować jako uwagi negatywnej dotyczącej tej pracy.

Rozprawę cechuje się dobrym poziomem naukowym. Autor rozprawy podjął się realizacji zagadnienia dość skomplikowanego w postaci opracowania procedury projektowania generatorów reluktancyjnych przełączalnych (SRG) z uwzględnieniem optymalizacji zarówno geometrii i samych parametrów sterowania. Opracowana procedura jest poprawna a uzyskiwane w niej wyniki spełniają generalnie postawione wymagania wejściowe. O ile samo opracowanie dotyczące procedury obliczeń w programie FEMM nie jest oryginalne (choć autorskie) to już całość opracowanego modelu symulacyjnego jest niewątpliwie oryginalnym osiągnięciem autora rozprawy. Wartością dodaną jest sposób osiągnięcia rezultatu końcowego w postaci zastosowania obliczeń równoległych z wykorzystaniem dowolnej liczby jednostek obliczeniowych znajdujących się w dowolnym lokalizacji. Opracowane narzędzie zaimplementowano do zaprojektowania kilku rozwiązań prototypowych.

Recenzowana praca istotnie uzupełnia aktualną wiedzę dotyczącą projektowania i optymalizacji generatorów reluktancyjnych przełączalnych. Zadaniem recenzenta możliwości opracowanego modelu symulacyjnego są znacznie większe niż to pokazano w pracy. Po wprowadzeniu niewielkich modyfikacji funkcji celu możemy z powodzeniem zastosować model do projektowania maszyn reluktancyjnych przełączalnych w zakresie pracy silnikowej.

5. Uwagi dyskusyjne

Pomimo pozytywnej oceny rozprawy doktorskiej pod względem naukowym mam szereg spostrzeżeń, pytań czy też uwag merytorycznych o charakterze dyskusyjnym:

1. W moim odczuciu moduł optymalizacyjny powinien być bardziej rozbudowany. Przy zbyt prostym uproszczeniu funkcji celu czy też pominięciu ograniczeń mechanicznych (braku wprowadzenia dodatkowej funkcji kary związanej z ograniczeniem mechanicznym), pominięciu wymiarów

- geometrycznych wirnika (np. grubość jarzma) może prowadzić do uzyskania mało realistycznych wyników. Mając pewne doświadczenie projektowe, ale i laboratoryjne w postaci weryfikacji własnych projektów SRM sugerowałbym daleko idącą ostrożność.
2. Zdaniem recenzenta współczynnik ε (równanie 4.10) nie uwzględnia zmianę znaku sprzężenia magnetycznego. To jest jednak pewien błąd bo nie w każdym rozwiązaniu można uzyskać identyczny znak sprzężenia magnetycznego. Na pewno nie zalicza się do nich analizowana w pracy geometria SRG 8/6.
 3. Czy w układzie rzeczywistym tranzystory nie posiadały diod odwrotnie równoległych tak jak to pokazano na rysunku 4.1.1? Wydaje się również, że pominięcie trybu ZEV (pętli zerowego napięcia) w modelu matematycznym jest jednak błędem. To ogranicza możliwości autorskiego modelu.
 4. Str. 27. Zadanie „Stan generowania następuje po wyłączeniu obu tranzystorów zasilających uzwojenia k-tego pasma oraz osiągnięcia położenia kąta załączania (4.15), z zastrzeżeniem, że przepływ prądu może zakończyć się wcześniej.” jest trudne do interpretacji. Zdaniem recenzenta jest ono nieprecyzyjne. Jeżeli nastąpiło już wyłączenie obu tranzystorów to oznacza, że kąt położenia wirnika θ względem danego pasma jest większy niż kąt wyłączenia θ_{off} . Zgodnie z przyjętym oznaczeniem według rysunku 4.1 czy też 4.1.2 kąt załączenia θ_{on} nie może być większy niż θ_{off} . Rozumiem, że intencją autora było przyjęcie założenia, że przepływ prądu w trakcie procesu generacji całkowicie ustnie przed rozpoczęciem nowego cyklu elektrycznego. Należy jeszcze zwrócić uwagę na jeszcze jeden aspekt w kontekście tego zdania. Zamieszczony zwrot „stan generacji” oznacza dodatni bilans energetyczny (więcej oddajemy niż pobieramy). Nie zawsze jest to prawda, ponieważ przy pracy w zakresie stałego momentu maszyna wchodzi w stan typowej pracy hamulcowej i wówczas nie ma stanu generacji.
 5. Czy Autor zdaje sobie sprawę, że przyjęty sposób ułożenia zwojów pokazany na rysunku 4.2.2 w większości przypadków jest raczej dość trudny do realizacji praktycznej. Dodatkowo zdaniem recenzenta w praktyce inżynierskiej możliwe jest zwiększenie współczynnika wypełnienia żłobka w trakcie montażu. Przyjęty sposób umieszczenia uzwojenia jest bezpieczny bo ułatwia proces optymalizacji, ale paradoksalnie nie jest do końca rzeczywisty. Jak wykazano w ocenie naukowej można było zastosować bardziej uproszczony sposób szacowania zajętości przestrzeni żłobkowej bez negatywnego wpływu na jakość obliczeń przy założeniu pomijania efektów zbliżeniowych.
 6. Przyjęcie określonej powierzchni dostępnej dla umieszczenia zwojów ma swoje skutki. W praktyce sprowadza się do parametru zwanego współczynnikiem wypełnienia żłobka. W tym przypadku dotyczyło to powierzchni prostokąta. W takim przypadku bardzo łatwo określić ile zwojów o zmieści się o określonym przekroju. To nie pozostawia praktycznie żadnego pola do manewru i jednocześnie wprowadza ograniczenie projektowe.
 7. Proszę o wyjaśnienie jakie znaczenie praktyczne ma maksymalna gęstość prądu w trakcie procesu projektowania czy też optymalizacji?
 8. Zdefiniowane funkcje celu (4.29) i kary (4.30) nie są do końca jednoznaczne. Wymaga to wyjaśnienia np. dlaczego jak można zakładać uzyskanie mniejszej wartości T_0 przy spełnieniu innych oczekiwań jest karane.
 9. W geometrii wyodrębniono powierzchnie zajęte przez wał generatora. Wyniki obliczeń wyraźnie wskazują, że założono parametry magnetyczne wału tożsame są z obwodem magnetycznym wirnika. Jaki był zatem cel tego wyodrębnienia?

10. Wydaje się, że jest pewien bałagan i niekonsekwencja w oznaczeniach i zawartości pracy. Prąd zasilania i napięcie zasilania sugeruje pracę silnikową. Ujemna wartość momentu elektromagnetycznego sugeruje przejściowy stan pracy generatorowej. Tutaj mamy pracę tylko generatorową i wykorzystując wykres np. Sankey'a moment elektromagnetyczny powinien mieć znak dodatni.
11. Tabela 4.5.1 zawiera sprzeczne wyniki obliczeń.
12. Nie wyjaśniono jak dokonywano testów praktycznych. Z doświadczenia recenzenta wynika, że w układzie rzeczywistym poszczególne prądy fazowe jednak się różnią (różnice technologiczne, asymetrie elektryczne i magnetyczne, wzajemne sprzężenia magnetyczne). Jakie wartości zatem zawarto w odniesieniu do wartości skutecznej i średniej prądu fazowego uzyskane w warunkach laboratoryjnych?
13. Porównywanie obliczeń numerycznych i laboratoryjnych indukcyjności własnej jednego z pasm SRG wykonanych metodą techniczną czy też nawet mostkową zawsze może budzić pewne zastrzeżenia. Recenzent z własnego doświadczenia zna przyczynę rozbieżności, ale pozostawienie uzyskanych wyników bez komentarza może sugerować, że opracowany model jednak generuje nieprawidłowe wyniki.
14. W pracy nie zauważyłem w jaki sposób doktorant uwzględnił wszystkie aspekty pracy generatorowej, aby traktować zamieszczony w tabeli 5.2.1 moment elektromagnetyczny jako moment obrotowy na wale maszyny.
15. Bardzo dyskusyjne jest stwierdzenie „przekrój zgodny z MRV3”. Przekrój MRV3 jakoś nie odbiega istotnie o typowego przekroju maszyny czteropasmowej. Jest to konstrukcja zapewniająca symetrię elektryczną i magnetyczną każdego pasma. Zewnętrzne ścięcia w niewielkim stopniu mają wpływ na parametry maszyny (przy zachowaniu minimalnej grubości jarzma).
16. Generalnie pewnym mankamentem rozprawy jest brak informacji w jaki sposób określono wybrane parametry geometryczne SRG np. średnica zewnętrzna, długość czynną pakietu, szerokość szczeliny powietrznej.
17. Zadaniem recenzenta ten fragment pracy zawiera błąd „W celu sprawdzenia jakości uzyskanej konstrukcji przeprowadzono optymalizację kątów komutacji w zakresie prędkości obrotowych od 5 do 50 obr./s dla wybranego uzwojenia oraz dla uzwojeń nawiniętych drutami znajdującymi się na sąsiednich pozycjach w liście dostępnych przekrojów drutu nawojowego. Na rys. 6.1.1 przedstawiono zależności mocy generowanej od prędkości obrotowej generatora dla trzech uzwojeń o polach przekroju: 3,14 mm² (48 zwojów w paśmie, wartość funkcji celu: -2,59), 4,37 mm² (42 zwojów w paśmie, wartość funkcji celu: -2,61) oraz 4,91 mm² (24 zwojów w paśmie, wartość funkcji celu: -1,61).” Dla przekroju: 3,14 mm² uzyskano 48 zwojów, przy 4,37 mm² uzyskano 42 zwojów a dla 4,91 mm² zastosowano 24 zwoje. Ostatniego wariantu nie można uznać za prawidłowy w kontekście następnego dostępnego przekroju. Przypadek trzeci określa ona zupełnie inny punkt pracy generatora. To wymaga wyjaśnienia.
18. Można zauważyć, że zakres zamiany kątów sterowania został tak ograniczony, aby uniemożliwić pracę ciągłą. Wyniki optymalizacji pokazują, że dla tego ograniczenia osiągnięto graniczne warunki pracy. Dalszy wzrost prędkości obrotowej będzie już skutkował powolną redukcją mocy wyjściowej i sprawności. Czy rozważano możliwość redukcji ograniczenia dotyczącego zakresu dopuszczalnego kąta przewodzenia?
19. Należy zauważyć, że uwzględnienie strat w żelazie i mechanicznych istotnie zmieni zawartość Tabeli 6.1.1.

20. W tabeli 6.2.1 zawarto założenia do optymalizacji konstrukcji generatora wolnoobrotowego. Wydaje się, że jest dostępnych nieco więcej przekrojów drutu nawojowego niż podano to w tabeli. Można też zadać inne pytanie. Czy zasadne było analizowanie tak szerokiej gamy przekrojów drutu nawojowego?
21. W rozdziale 6.2.1 zawarto informację „W pierwszym etapie optymalizowany był kształt obwodu magnetycznego przy użyciu algorytmu genetycznego oraz programu FEMM do obliczeń magnetostatycznych. Zastosowano funkcje celu maksymalizującą średnią wartość momentu elektromagnetycznego. Zadano przy tym stałą wartość prądu pasma na poziomie 45A.” Zdaniem recenzenta jest to sprzeczne z dążeniem do maksymalizacji sprawności generatora. Proszę o wyjaśnienie.
22. Wynik optymalizacji konstrukcji „B” jest faktycznie wątpliwy jak zauważa sam autor pracy. Stosunek grubości jarzma stojan do szerokości bieguna stojana osiągnął praktycznie wartość minimalną (~ 0.5). Nie jest ona zalecana. Według prac badawczych recenzenta wskazane jest zwiększenie tej wartości do około 0.8. Zastosowanie zewnętrznej obudowy nie wpłynie w sposób istotny na powstałe przemieszczenia aktywnych biegunów stojana w kierunku zębów wirnika.
23. Analiza tabeli 6.2.2 i 6.2.3 wyraźnie pokazuje, że istotnie wzrosła średnica zewnętrzna generatorów „A” i „B” przy tej samej długości czynnej pakietu. Nie jest jasne dlaczego przyjęto akurat takie wartości w procesie optymalizacji. Ma to istotne znaczenie bo te wartości nie miały żadnego wpływu na funkcję celu (pozostawały stałe w procesie optymalizacji wprowadzając jednak dość istotne ograniczenie).
24. W przypadku generatora z rozdziału 7 przeprowadzony proces optymalizacji przewidywał uzyskiwanie mocy około 1 kW przy prędkości znamionowej tj. 25 m/s. Wyniki zamieszczone na rys.7.2 pokazują jednak, że uzyskano mniejszą moc niż zakładano. Różnicę około 20 % trudno uznać niewielkie odstępstwo. Dopiero od prędkości około 35 m/s rzeczywiście uzyskano moc zbliżoną do 1 kW.
25. Zdanie „Porównując charakterystyki przedstawione na rys. 7.5 zauważyć można, że moment maksymalny jest większy od momentu znamionowego w całym zakresie prędkości” jest truizmem.

6. Inne uwagi

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

Redakcyjne uwagi ogólne:

1. Parametry piszemy kursywą. W pracy jest z tym różnie.
2. Indeksy w zależności od znaczenia najczęściej italiikiem lub kursywą.
3. Jednostką momentu jest N·m a nie Nm.
4. Nie należy używać słowa silnik w projektach dotyczących generatora (np. Tabela 6.2.2).
5. Informacja o materiale M800 jest mało precyzyjna. Takich materiałów jest kilka.
6. Używanie słowa stal w odniesieniu do materiału magnetycznego nie jest poprawne.

Wstęp:

1. Str.7 jest popowe a powinno być pompowe.
2. Str.8. Autor pisze „W wolnoobrotowych, wielobiegunowych generatorach z magnesami trwałymi najczęstszym problemem jest duży moment zaczepowy, który wynika z dużej liczby

biegunów. W celu ograniczenia tego niepożądanego efektu można stosować generatory o zmniejszonej liczbie zębów wirnika, dzięki czemu moment zaczepowy zostaje znacznie zredukowany [34, 35].” To stwierdzenie niekoniecznie jest prawdziwe. Zazwyczaj jednak w przypadku dużej liczby par biegunów wirnika uzyskuje się efekt wręcz przeciwny. Oczywiście pod warunkiem odpowiedniego dobrania liczby slotów stojana.

3. Str.8. Autor pisze „ Najczęściej w SRM uzwojenia nawinięte na przeciwległych biegunach tworzą pasmo fazowe. W niesymetrycznym wariacie tych maszyn pasmem jest uzwojenie nawinięte na jednym biegunie.”. Drugie zdanie jest tylko częściowo prawdziwe. W przypadku większej liczby biegunów stojana i wirnika wariantu przeznaczonego do pracy np. czterokanałowej wariant symetryczny najczęściej nie wykorzystuje biegunów naprzeciwległych. Są wykorzystywane bieguny zapewniające najkrótszą drogę magnetyczną.
4. Należy ograniczyć stosowanie zwrotu „pasma fazowe”. Trzeba się zdecydować i konsekwentnie używać słowa „pasmo” lub „faza”.
5. Wykorzystywanie zwrotu maszyna SRM, silnik SRM, generator SRG nie jest do końca poprawne ponieważ ogólnie znane skróty już w sobie zawierają słowo „maszyna”, „silnik” i „generator”. Bardziej poprawnie jest używanie zwrotów typu maszyna, silnik czy też generator SR.

Rozdział 2 - Wprowadzenie:

1. Można mieć pewne zastrzeżenia do celu szczegółowego „Opracowanie środowiska obliczeniowego wykorzystującego programy FEMM i Matlab oraz program symulacyjny, umożliwiający wykonanie optymalizacji konstrukcji przełączalnych generatorów reluktancyjnych z uwzględnieniem parametrów sterowania, na podstawie funkcji celu uwzględniającej charakterystyki statyczne generatora lub jego parametry pracy obliczane w stanach ustalonych” w odniesieniu do celu pracy. Jest o jego istotne ograniczenie.

Rozdział 3 - Przełączalne maszyny reluktancyjne

1. Str. 18. Literówka jest „zaprojektowali przełączalny rozrusznik/generator relutancyjny w celu zastąpienia dotychczas” a powinno być „zaprojektowali przełączalny rozrusznik/generator reluktancyjny w celu zastąpienia dotychczas”.
2. Przegląd literatury należy ocenić dość przeciętnie. Panuje w nim pewien chaos. Można odnieść wrażenie, że nie do końca wiadomo czego on dotyczy z wyjątkiem tego, że maszyn reluktancyjnych przełączalnych.
3. Str. 19. Co autor miał na myśli formułując stwierdzenie „Efektem zastosowania układu była minimalizacja drgań momentu.”?

Rozdział 4 - Model matematyczny generatora reluktancyjnego przełączalnego

1. Pokazany na rysunku 4.1 zakres zmiany kąta załączenia i wyłączenia jest mylący. W rzeczywistości przy dalszej analizie pracy okazuje się, że zakresy zmiany są inne.
2. Brak wyjaśnienia wprowadzonych oznaczeń w rozdziale 4.1.
3. Zastosowane zwroty techniczne w rozdziale 4 mogą budzić pewne zastrzeżenia. W odniesieniu do stojana przyjęto określenie „zęby stojna” a lepiej jest użyć zwrotu „bieguny stojna”. Standardowo określeniem zewnętrznego parametru obwodu magnetycznego jest jego średnica a nie grubość jak to wprowadził autor.
4. W jaki sposób zadawano gęstość prądu w uzwojeniach? Nie zostało to wyjaśnione.
5. Jeżeli pokazana na rys. 4.2.6 charakterystyka momentu elektromagnetycznego została zaimplementowana w dalszej części pracy to mam pewne wątpliwości czy nie miało to

pewnego wpływu na uzyskane wyniki w dalszej części pracy. Ta uwaga nie ocenia dalszego postępowania. To samo dotyczy charakterystyki strumieniowej.

6. Str. 40. Jest T_{ek} a powinno być T_{ek} .
1. Podejście bazujące na możliwości przeliczania raz obliczonych wartości strumienia magnetycznego, momentu elektromagnetycznego dla danej geometrii dla innych danych nawojowych akceptowalne pod warunkiem pominięcia aspektu termicznego.
2. Str. 53. – W programie sterującym dla generatora został wymieniony moment obrotowy. Sugeruje to pracę silnikową a tak nie jest.
3. Nie zamieszczono równania 4.35.
4. Tabela 4.5.1 zawiera sprzeczne wyniki obliczeń.

Rozdział 5 - Weryfikacja pomiarowa wyników obliczeń

1. Oznaczenia w Tabeli 5.2.1. to przeniesienie na inny poziom. Nie mają one za wiele wspólnego z wcześniejszymi oznaczeniami.
2. Sposób prezentacji wyników w Tabeli 5.2.1 jest trochę mało czytelny. Bardzo trudno interpretować zawartość tabeli.
3. Jak określono błąd średni bezwzględny dla charakterystyki momentowej?

Rozdział 6 - Optymalizacja generatorów reluktancyjnych przełączalnych

1. Zadanie „Na podstawie otrzymanej konstrukcji wykonano prototyp generatora.” nie jest zdefiniowane prawidłowo. Raczej autorowi chodziło, że na podstawie uzyskanych wyników optymalizacji zostały wyznaczone parametry do zbudowania nowego prototypu generatora.
2. Str. 69 - W tym samym miejscu zamieszczono informację o zmianie materiału magnetycznego „W konstrukcji tej zastosowano blachę o innej charakterystyce magnesowania.”. Niestety nie podano jaki materiał magnetyczny został zastosowany w procesie optymalizacji.
3. Uzyskane wyniki mocy wyjściowej, sprawności bez znajomości parametrów sterowania trudno ocenić. Można się tylko domyślać, że uzwojenie o przekroju 4.37 mm^2 posiada mniejsze straty w miedzi i dlatego charakteryzuje się większą sprawnością.
4. W tabeli 6.2.3 pomyłono pole przekroju drutu nawojowego z polem przekroju uzwojenia.
5. Pokazane na rysunku 6.2.13 przebiegi pokazują, że możliwe jest kontrolowanie pracy generatora/silnika wprowadzając ją w kontrolowany stan przewodzenia ciągłego.
6. Zawarte wyniki badań w rozdziale 6.2.5 dla recenzenta są oczywiste. Jest to naturalna konsekwencja wprowadzanych zmian w zakresie doboru uzwojenia przy tej samej dostępnej przestrzeni na umieszczenie uzwojenia.
7. Test porównawczy analizujący wpływ sprzężeń magnetycznych przeprowadzono przy innych kątach załączenia. Powinno się raczej przeprowadzić testy przy tych samych warunkach zasilania. Tylko wówczas można dokonywać porównań poszczególnych parametrów.

Rozdział 7 - Wykorzystanie opracowanego środowiska do optymalizacji generatora dla małej elektrowni wiatrowej:

1. W tym rozdziale pojawiają się liczne powtórzenia. Należało się nieco bardziej postarać omawiając uzyskane wyniki badań.
2. Wymiary geometryczne dotyczące zaprojektowanego generatora nie mogą być poprawne.

3. Opis rysunku 7.5 jest błędny. Moment znamionowy i moment maksymalny są wartościami w określonych punktach pracy. Zależności pokazane na rys.7.2 są prawdopodobnie uzyskane przy określonych strategiach sterowania (z ograniczeniem i bez ograniczenia).

Rozdział 8:

1. W krótkim 5-cio stronicowym rozdziale ósmym pracy jest sporo błędów gramatycznych i stylistycznych np. akapit str. 85, linia 1 czy też akapit str. 86, linia 1.

7. Ostateczna ocena rozprawy

Mgr inż. Artur Śliwiński przeprowadził opracował autorski model symulacyjny do projektowania generatorów reluktancyjnych przełączalnych (SRG). Celem pracy było opracowanie modelu numerycznego do projektowania SRG głównie przeznaczonych do małych elektrowni wiatrowych. Na etapie projektowania możliwe jest takie dobranie konstrukcji SRG i parametrów sterujących, aby maksymalnie wykorzystywały lokalne warunki środowiskowe. Zawarte liczne uwagi merytoryczne o charakterze dyskusyjnym nie wpływają na bardzo pozytywną ocenę merytoryczną recenzowanej pracy doktorskiej Pana Artura Śliwińskiego. Pomimo pewnych uwag redakcyjnych praca jest napisana jasnym i czytelnym językiem technicznym i generalnie nie zawiera błędów gramatyczno-stylistycznych.

Sama tematyka rozprawy doktorska czy też zaproponowane autorskie opracowanie modelu symulacyjnego SRG bardzo dobrze wpisują się w dyscyplinę **automatyki, elektroniki, elektrotechniki i technologii kosmicznych**.

Recenzowana rozprawa spełnia wymagania ustawowe określone w ustawie.

Wniosek końcowy

Stawiam wniosek o przyjęcie przedstawionej pracy Pana mgra inż. Artura Śliwińskiego zatytułowanej „Optymalizacja konstrukcji i warunków komutacji przełączalnego generatora reluktancyjnego” jako rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie jej autora Pana mgra inż. Artura Śliwińskiego do publicznej obrony.

Maciej Kozłowski