

Gliwice, dn. 25.06.2021 r.

Dr hab. inż. Roman Krok, prof. PŚ

Politechnika Śląska

Wydział Elektryczny

Katedra Elektrotechniki i Informatyki

Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgra inż. Szymona Lipińskiego**

pt. *„Analiza stanów cieplnych w silnikach synchronicznych z rozruchem
bezpośrednim wzbudzanych magnesami trwałymi”*

Recenzję rozprawy doktorskiej wykonałem na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika prof. dra hab. inż. Andrzeja Dziedzica - pismo 49/RDN_AEE/2021 z dnia 30 kwietnia 2021 roku. Praca dostarczona do recenzji zawiera 98 stron.

1. Ocena wyboru tematu i celu rozprawy

W wielu publikacjach podejmowany jest temat opracowania modeli elektromagnetycznych i cieplnych silników elektrycznych zapewniających dużą dokładność obliczeń. Modele takie są wykorzystywane nie tylko przy projektowaniu samych silników, ale również ich zabezpieczeń oraz układów napędowych. Uzyskanie przy projektowaniu silnika odpowiednich parametrów elektromechanicznych przy jednoczesnym zachowaniu temperatur elementów na dopuszczalnym poziomie z odpowiednim bezpiecznym zapasem stanowi podstawę zapewnienia deklarowanej przez producenta żywotności oraz bezawaryjnej pracy.

Obecnie produkowane silniki elektryczne zazwyczaj charakteryzują się bardzo dużym stopniem wykorzystania obwodu elektromagnetycznego, co jest spowodowane dążeniem do zmniejszenia masy silnika, a w konsekwencji i jego ceny. Powoduje to znaczne podwyższenie temperatury elementów silnika w odniesieniu do starych konstrukcji. Uproszczone modele stosowane w przeszłości przy projektowaniu silników (w szczególności nie uwzględniające zmiany parametrów materiałowych z temperaturą) nie są w stanie zapewnić wymaganej obecnie dużej dokładności obliczeń zarówno parametrów elektromechanicznych, jak i rozkładu temperatury.

Istnieje zatem potrzeba tworzenia bardziej rozbudowanych modeli silników uwzględniających sprzężenie pola elektromagnetycznego i pola temperatury, które można rozwiązać z pomocą dostępnych komputerów o bardzo dużej mocy obliczeniowej.

Producenci silników elektrycznych często wykorzystują w analizach projektowych modele bazujące na metodzie elementów skończonych opracowywane przy zastosowaniu komercyjnych programów komputerowych. Modele takie zostały sporządzone dla silników indukcyjnych o różnej konstrukcji stosowanych w wielu układach napędowych spotykanych w przemyśle. W przypadku silników dużej mocy charakteryzujących się dużą nierównomiernością rozkładu temperatury zarówno w kierunku promieniowym, jak i poosiowym konieczne było utworzenie modeli 3D. Modele takie utworzone dla silników indukcyjnych zweryfikowane pomiarowo są przedstawione w licznych publikacjach.

Ze względu na rosnące zainteresowanie przemysłu silnikami z magnesami trwałymi podejmowane są próby opracowania dla nich sprzężonych modeli elektromagnetyczno - cieplnych dla najbardziej popularnego obecnie zasilania z przekształtników. Budowane są stanowiska laboratoryjne, na których mierzone są parametry elektromechaniczne, a czasami dodatkowo wykonywane są pomiary temperatury silnika zasilanego z przekształtnika.

W ostatnich latach w wielu układach napędowych zastosowano silniki synchroniczne z rozruchem bezpośrednim wzbudzane magnesami trwałymi. Są to często silniki bardzo dużej mocy wykorzystywane w górnictwie oraz układach potrzeb własnych elektrowni zawodowych. Silniki te w porównaniu do stosowanych dotychczas charakteryzują się znacznie większą sprawnością i to w szerokim zakresie obciążenia oraz większym współczynnikiem mocy zapewniającym mniejszą masę oraz straty przesyłowe. Dążenie do obniżenia kosztów eksploatacji będzie w przyszłości powodowało rozszerzenie obszaru zastosowań tych silników. Obecnie bardzo mało jest publikacji poświęconych zagadnieniu opracowania modeli obliczeniowych na potrzeby projektowania tego typu silników, w szczególności nie są prezentowane sprzężone modele elektromagnetyczno – cieplne zweryfikowane pomiarowo.

W recenzowanej rozprawie doktorskiej poruszono bardzo aktualny problem opracowania sprzężonych modeli elektromagnetyczno – cieplnych silników synchronicznych z rozruchem bezpośrednim wzbudzanych magnesami trwałymi.

Jedynie tego typu rozbudowany model silnika jest w stanie zapewnić wymaganą dużą dokładność obliczeń poprzez uwzględnienie zmiany wartości parametrów materiałowych z temperaturą oraz nierównomiernego rozkładu współczynnika wnikania ciepła z powierzchni obudowy. Doktorant podjął się nie tylko sporządzenia tego typu modelu silnika, ale również jego weryfikacji pomiarowej. Zgodność wyników obliczeń i pomiarów umożliwia wykorzystanie modelu przy projektowaniu silnika.

2. Ocena merytoryczna

Rozdział 1 stanowi wstęp do rozprawy doktorskiej. Przedstawiono w nim cel, tezę i zakres pracy. Za podstawowy cel przyjęto wykonanie numerycznej analizy silnika synchronicznego z rozruchem bezpośrednim wzbudzanego magnesami trwałymi uwzględniającej sprzężenie pola elektromagnetycznego i cieplnego spowodowane dużą zmianą wartości niektórych parametrów materiałowych z temperaturą. Model taki ma zapewnić dużą dokładność odwzorowania zarówno parametrów elektromechanicznych, jak i rozkładu temperatury wewnątrz silnika. Potrzeba sporządzenia modelu do obliczeń pola temperatury wynika z faktu ograniczenia temperatury izolacji oraz magnesów w różnych spotykanych podczas eksploatacji stanach pracy silnika. Przekroczenie temperatury dopuszczalnej prowadzi do zmniejszenia żywotności silnika, a w skrajnym przypadku nawet do jego uszkodzenia. Należy przy tym zwrócić uwagę na fakt, że awaria silnika bardzo dużej mocy skutkuje nie tylko dużymi kosztami remontu, ale często znacznie większymi kosztami związanymi z postojem. W rozpatrywanej grupie silników magnesy w sposób szczególny narażone są na demagnetyzację spowodowaną wzrostem temperatury spowodowanym dużymi stratami w klatce wirnika przy rozruchu. Konieczne jest zatem opracowanie modelu silnika nie tylko do obliczeń stanu ustalonego, ale również stanu nieustalonego, w szczególności występującego przy rozruchu silnika. We wstępie Doktorant przedstawił również aktualny stan zagadnienia, w mojej ocenie powołując się na wszystkie istotne pozycje literaturowe. W rozdziale 2 opisano opracowane modele matematyczne dla rozpatrywanej grupy silników. Przedstawiono równania Maxwella opisujące pole elektromagnetyczne, a następnie doprowadzono je do postaci wykorzystywanej w obliczeniach silnika elektrycznego, uwzględniając przy tym specyfikę jego konstrukcji. Wykonywanie obliczeń stanów nieustalonych wymagało uzupełnienia tego modelu o równanie dynamiki uwzględniające inercję układu i opory ruchu. Wymianę ciepła w silniku

opisuje równanie Fouriera. Zamodelowanie pola temperatury wymagało wprowadzenia odpowiednich oporów ciepła na styku pomiędzy elementami silnika. Doktorant przedstawia również sposób zamodelowania uzwojenia stojana stanowiącego kompozycję przewodów miedzianych oraz izolacji. W rozdziale 2.2.2 przedstawiono model do obliczeń współczynnika wnikania ciepła z powierzchni zewnętrznej obudowy silnika. Dokładne wyznaczenie wartości tego współczynnika ma istotny wpływ na dokładność odwzorowania temperatury wewnątrz silnika. Przygotowany do tego celu model umożliwi obliczenie nie tylko średniego współczynnika wnikania ciepła z powierzchni obudowy silnika (wykorzystywanego obecnie w wielu programach projektowych), ale również jego rozkładu związanego z niejednorodnym polem prędkości powietrza chłodzącego przy powierzchni obudowy silnika. Doktorant opracowując tak złożony model wykazał się bardzo dobrą znajomością skomplikowanych zagadnień z zakresu elektromagnetyzmu, termodynamiki oraz materiałoznawstwa.

W rozdziale 3 Doktorant opisał stanowisko laboratoryjne znajdujące się w Katedrze Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej, na którym wykonał pomiary badanego silnika wykorzystane następnie do weryfikacji modelu matematycznego. Umożliwia ono pomiar wszystkich istotnych parametrów elektrycznych oraz momentu i prędkości obrotowej przy zmianach obciążenia silnika. Na stanowisku można również mierzyć średnią temperaturę uzwojeń silnika poprzez pomiar rezystancji. Dodatkowo w badanym silniku zabudowano termopary do pomiaru temperatury w wielu punktach stojana oraz pirometry do pomiaru temperatury powierzchni wirnika. Pomiary wentylacyjne przeprowadzono przy wykorzystaniu termoanemometru. Na stanowisku badawczym można wykonać wszystkie pomiary potrzebne do pełnej weryfikacji sprzężonego modelu elektromagnetyczno – cieplnego silnika. Klasyczne pomiary parametrów elektromechanicznych silnika zostały poszerzone o pomiary temperatury oraz przepływu powietrza chłodzącego. Doktorant wykazał się dużą wiedzą i umiejętnościami, w szczególności w zakresie pomiaru temperatury i prędkości powietrza chłodzącego w maszynach elektrycznych. Poprawne wyniki pomiaru zapewniło właściwe zabudowanie dodatkowych czujników w silniku elektrycznym. Przy zamocowaniu termopar zadbano o uzyskanie bardzo małego oporu cieplnego styku z elementem silnika oraz uwzględniono fakt, że pomiar wykonywany jest w środowisku, w którym występuje pole magnetyczne o dużej indukcji.

Za oryginalne rozwiązanie problemu naukowego należy przede wszystkim uznać autorski model matematyczny silnika synchronicznego z rozruchem bezpośrednim wzbudzanego magnesami trwałymi opisany w rozdziale 4. Model ten został utworzony dla silnika o mocy 1,9 kW, który zbadano na stanowisku laboratoryjnym. Uzyskane wyniki obliczeń można było zatem porównać z wynikami pomiarów elektromechanicznych, cieplnych i wentylacyjnych. Model matematyczny silnika opracowano na bazie metody elementów skończonych wykorzystując komercyjny pakiet ANSYS. W pierwszym etapie sporządzono model elektromagnetyczny silnika - rozdział 4.1. W modelu tym zaimplementowano charakterystyki magnesowania blach oraz odmagnesowania magnesów, biorąc pod uwagę materiały zastosowane do budowy badanego silnika. Uwzględniono również zależności niektórych parametrów materiałowych (np. rezystywności miedzi i aluminium) od temperatury. W prezentowanych w literaturze modelach tego typu silników zazwyczaj przyjmuje się, że parametry materiałowe nie zależą od temperatury. W ten sposób Doktorant opracował model elektromagnetyczny silnika przygotowany do sprzężenia z modelem cieplnym. Sposób wyznaczenia współczynnika wnikania ciepła z powierzchni obudowy silnika przedstawiony w rozdziale 4.2 znacznie poszerza podejście prezentowane dotychczas w publikacjach polegające na przyjęciu średniej wartości tego współczynnika jednakowej na całej powierzchni oddawania ciepła, oszacowanej przy bardzo dużym uproszczeniu geometrii układu. Doktorant sporządził trójwymiarowy model matematyczny opisujący pole prędkości powietrza chłodzącego wokół silnika umożliwiające obliczenie rozkładu współczynnika wnikania ciepła na powierzchni obudowy silnika. W modelu tym uwzględniono typową budowę systemu chłodzenia stosowanego w rozpatrywanej grupie silników, gdzie na obudowie znajdują się poosiowe radiatory, zaś przepływ powietrza wymusza wentylator osadzony na wale silnika. Następnie Doktorant opracował dwu-, a potem trójwymiarowy model silnika bazując na metodzie elementów skończonych. W przypadku badanego silnika małej mocy model dwuwymiarowy zapewnia zadowalającą dokładność obliczeń, zaś obliczenia wykonywane są bardzo szybko. Doktorant słusznie jednak zauważa, że w przyszłości przeniesienie modelu na silniki dużej mocy będzie wymagało zastosowania modelu trójwymiarowego, ponieważ nierównomierności rozkładu temperatury w kierunku poosiowym będą wtedy bardzo duże. Opracowany model trójwymiarowy ma więc znaczenie praktycznie i będzie stanowił narzędzie do dalszych badań silników bardzo dużej mocy. Nowym

rozwiązaniem wprowadzonym przez Doktoranta w analizie rozpatrywanego typu silnika jest połączenie opracowanego niezależnie modelu elektromagnetycznego z modelem cieplnym silnika (rozszerzonym o model strugi powietrza chłodzącego obudowę) – rozdział 4.4. Opracowanie tak złożonego modelu matematycznego silnika świadczy o dużym poziomie wiedzy i umiejętnościach Doktoranta w zakresie budowy modeli sprzężonych przeznaczonych zarówno do analizy stanów ustalonych, jak i nieustalonych. Obliczanie stanów nieustalonych przez model zostało w pracy doktorskiej wykorzystane w analizie rozruchu silnika, co dotychczas nie było prezentowane w literaturze. Dodatkowo Doktorant wykorzystując opracowany model przeprowadził analizę wpływu odkształcenia napięcia zasilającego na stan cieplny silnika. Takie analizy są prezentowane w wielu artykułach w odniesieniu do silników indukcyjnych, ale nie były dotychczas wykonywane dla rozpatrywanej grupy silników. Z wykonanych badań silnika małej mocy wynika, że nagrzewanie magnesów podczas rozruchu jest niewielkie i nie będzie skutkowało ich zniszczeniem. W silnikach dużej mocy przy trudnych warunkach rozruchu temperatury magnesów będą zbliżały się do wartości dopuszczalnych, a zatem konieczne jest ich obliczenie zarówno przy projektowaniu silnika, jak i całego układu napędowego.

Doktorant wykonał pomiary badanego silnika (rozdział 5), a następnie porównał wyniki z wynikami obliczeń przeprowadzonych przy wykorzystaniu opracowanego modelu matematycznego. Uzyskano bardzo dużą zbieżność wyników pomiarów i obliczeń. Należy podkreślić duże umiejętności Doktoranta w zakresie wykonywania pomiarów. Oprócz standardowych pomiarów elektromechanicznych silnika wykonane zostały pomiary cieplne i wentylacyjne. W literaturze dla rozpatrywanej grupy silników nie są prezentowane pomiary rozkładu temperatury w elementach silnika (w tym również wirnika) oraz rozkładu prędkości strug powietrza w otoczeniu obudowy silnika. Wyniki te stanowią istotny wkład Doktoranta w analizę rozpatrywanych silników.

W podsumowaniu pracy przedstawiono praktyczne znaczenie modeli silników opracowanych w ramach doktoratu. Zastosowanie ich przy projektowaniu przyczyni się do ograniczenia uszkodzeń powstających podczas eksploatacji. Stosowany obecnie dobór silnika uwzględniający jedynie moc pobieraną przez maszynę roboczą nie jest zadowalający. Obliczenie pola temperatury w silniku z uwzględnieniem warunków rozruchu występujących w konkretnym układzie napędowym umożliwi

pełną ocenę jego stanu cieplnego, a w konsekwencji przyczyni się do zapobiegania uszkodzeniom.

3. Pytania i uwagi do rozprawy doktorskiej

1) Na str. 18 Autor stwierdza: „straty mocy obliczane są jako iloczyn rezystancji uzwojeń i ich rezystancji”. Przypuszczam, że jest to przejęzyczenie. Proszę o komentarz.

2) Strumień ciepła przenikający przez powierzchnię elementu maszyny jest proporcjonalny do pochodnej temperatury w kierunku normalnym (wzór 2.2.40), ale nie jest równy tej pochodnej.

3) W rozdziale 4.1 (str. 40) napisano, że „parametry materiałowe wszystkich elementów zostały zdefiniowane, jako zależne od temperatury”. Proszę wymienić te parametry.

4) Przypuszczam, że w tabeli 4.2 podano przewodności wybranych materiałów, a nie ich rezystancje. Umieszczenie w jednej kolumnie wartości nazywanych jednocześnie rezystancją i przewodnością nie jest poprawne. Rezystancja zależy od rodzaju materiału, ale również wymiarów elementu, a w konsekwencji nie jest parametrem materiałowym. Oczywista jest interpretacja fizykalna takiego parametru, jak przewodność miedzi lub aluminium. Jak jest jednak interpretowany taki parametr, jak przewodność pakietu blach stanowiącego kompozycję ferromagnetyka i izolacji? Czy modelując straty w magnesach wykorzystywano podaną w tabeli przewodność i temperaturowy współczynnik zmiany rezystancji?

5) Jak na wykresie 4.4 należy interpretować dwa opisy tej samej osi powiązane z temperaturą i indukcją?

6) Na rys. 4.5 nie opisano charakterystyk odpowiadającymi im temperaturami magnesu.

7) Na rys. 4.6 zamieszczono poprawny opis pod rysunkiem, zaś źle opisano osie (P - indukcja).

8) Rys. 4.7 przedstawia zależność natężenia pola koercji, a nie pola koercji od temperatury.

9) W rozdziale 4.4.2 (str. 65) tekst odnosi się do rysunku 7 – powinien odnosić się do rys. 4.34. Co Autor miał na myśli pisząc „Na rys. 7 przedstawiono względny przyrost strat w klatce wirnika i magnesach dla kolejnych harmonicznych z uwzględnieniem ich maksymalnych dopuszczalnych udziałów w sieciach przemysłowych”?

10) Na rys. 4.40, 4.41 i 4.42 brak precyzyjnego opisu parametrów. Przypuszczam, że moment bezwładności I podano w „kg·m²”, zaś moment obciążenia w jednostkach względnych.

11) Na rys. 4.42 przedstawiono całkowitą energię rozproszoną w klatce wirnika silnika, a nie straty w klatce, jak sugeruje opis zamieszczony pod rysunkiem.

12) Co Doktorant rozumie pod pojęciem wprowadzonym na str. 74 :„ocena skuteczności wyznaczania temperatur w stanie ustalonym”?

13) Proszę podać, co dokładnie oznaczają temperatury na rys. 5.3–5.5.

14) Występujące w tabeli 5.1 wielkości, takie jak: napięcie, częstotliwość i moc znamionowa należy, moim zdaniem, traktować jako wielkości wejściowe zadane w modelu matematycznym, a nie wyniki obliczeń.

15) W podsumowaniu na str. 83 stwierdzono, że na dokładność modelu ma duży wpływ wartość przyjętych rezystancji stykowych. Uważam, że w opracowanym przez Doktoranta modelu wpływ ten ma znaczenie zasadnicze. Wartości rezystancji stykowych trudno określić, ponieważ nie są podawane w literaturze i są często utajniane łącznie z technologią budowy przez producentów maszyn elektrycznych.

Przedstawione drobne uwagi nie mają wpływu na wysoką ocenę rozprawy doktorskiej.

4. Ocena strony edytorskiej rozprawy

Praca stanowi zamkniętą całość, nie wnoszę więc o jej uzupełnienie. Jest ona zredagowana zwięźle i przejrzysto. Zauważone drobne usterki edytorskie nie utrudniają jej studiowania. Rysunki wykonane są starannie. Wprowadzony dodatkowo wykaz symboli, oznaczeń i skrótów ułatwia jej studiowanie.

5. Konkluzja

Wykonując recenzowaną pracę Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia prac naukowych, organizacji warsztatu pracy naukowej oraz systematyczności w realizacji badań.

Uważam, że rozprawa stanowi samodzielne rozwiązanie zagadnienia naukowego i wnosi do nauki i techniki nowe wartości w zakresie modelowania sprzężonego pola elektromagnetycznego i cieplnego oraz pola prędkości powietrza chłodzącego silnik synchroniczny z rozruchem bezpośrednim wzbudzany magnesami trwałymi.

Docelowy model przeznaczony do analizy stanu pracy dużych silników jest trójwymiarowy i umożliwia uwzględnienie rzeczywistych charakterystyk blach rdzenia i magnesów. Model ten stanowi autorskie rozwiązanie Doktoranta i zapewnia dużą dokładność odwzorowania parametrów elektromechanicznych, rozkładu temperatury i prędkości powietrza chłodzącego. W literaturze nie są prezentowane tak rozbudowane modele w odniesieniu do rozpatrywanej grupy silników. W publikacjach brakuje również wyników tak szerokich badań eksperymentalnych tej klasy silników obejmujących pomiary parametrów elektromechanicznych, temperatury i parametrów wentylacyjnych. Uzyskane wyniki pomiarów potwierdziły dużą dokładność sporządzonego modelu symulacyjnego silnika. Model będzie bardzo istotnym narzędziem wspomagającym projektowanie silników i w mojej ocenie przyczyni się do znacznego zmniejszenia ich awaryjności. Osiągnięcia naukowe Doktoranta w pełni wpisują się zarówno w zakres dyscypliny elektrotechnika, dziedziny nauk technicznych będącej przedmiotem jego dotychczasowej działalności, jak i obecnej dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika w dziedzinie nauk inżyniersko – technicznych, w której prowadzone jest postępowanie związane z nadaniem stopnia doktora.

W świetle powyższych rozważań stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Szymona Lipińskiego pt. *„Analiza stanów cieplnych w silnikach synchronicznych z rozruchem bezpośrednim wzbudzanych magnesami trwałymi”* spełnia wymogi ustawy o stopniach i tytułach naukowych i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Dodatkowo stawiam wniosek o wyróżnienie recenzowanej rozprawy doktorskiej. Doktorant rozwiązał bardzo skomplikowany problem o charakterze interdyscyplinarnym. Opracowanie modelu matematycznego silnika synchronicznego z rozruchem bezpośrednim wzbudzanego magnesami trwałymi w postaci przedstawionej w pracy wymagało dużej wiedzy i umiejętności nie tylko z dziedziny elektrotechniki, ale również termodynamiki, materiałoznawstwa i informatyki. Zabudowanie w silniku czujników do pomiaru temperatury i prędkości powietrza, a następnie przeprowadzenie badań wymagało rozwiązania złożonych problemów z zakresu metrologii. Należy zwrócić uwagę na fakt, że czujniki umieszczone są w obszarze, w którym występuje pole magnetyczne o dużej indukcji oraz dodatkowo

ruch elementów. Uzyskana duża zbieżność wyników obliczeń i pomiarów świadczy o poprawności wykonania zarówno modelu matematycznego, jak i pomiarów badanego silnika. Zastosowanie opracowanego modelu matematycznego przy projektowaniu silników przyniesie oszczędności poprzez zmniejszenie liczby uszkodzeń.

Roman Krok