

Dr hab. inż. Wojciech Pietrowski
Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej
Wydział Automatyki, Robotyki i Elektrotechniki
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3A
60-965 Poznań
tel. 61 665 2396
email: wojciech.pietrowski@put.poznan.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra inż. Jarosława Tulickiego pt. „Modelowanie maszyn indukcyjnych dwuklatkowych na potrzeby diagnostyki”

I. Podstawa wykonania recenzji

Podstawą do opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgra inż. Jarosława Tulickiego jest pismo Pana dr hab. inż. Macieja Sułowicza prof. PK, Dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej powołujące mnie na recenzenta tej rozprawy.

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Jarosława Tulickiego pt. „Modelowanie maszyn indukcyjnych dwuklatkowych na potrzeby diagnostyki”. Promotorem rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. inż. Tadeusz Sobczyk, natomiast promotorem pomocniczym jest dr hab. inż. Maciej Sułowicz, prof. PK.

II. Charakterystyka ogólna rozprawy doktorskiej

Opiniowana rozprawa doktorska mgra inż. Jarosława Tulickiego pt. „Modelowanie maszyn indukcyjnych dwuklatkowych na potrzeby diagnostyki” wydana w 2024 roku zawiera 205 stron, składa się z 5 rozdziałów oraz wykazu wybranych oznaczeń i terminów, bibliografii, spisu tabel oraz spisu rysunków. Bibliografia zawiera 110 pozycji literaturowych, w tym 1 współautorska publikacja Doktoranta.

Doktorant w swojej rozprawie podjął tematykę związaną z modelowaniem uszkodzeń silnika indukcyjnego a zatem podstawową dyscypliną, w której można ulokować rozprawę jest automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

Przedstawiony w rozprawie cel dotyczy zastosowania modelowania matematycznego silnika indukcyjnego dwuklatkowego z uwzględnieniem niesymetrii w obwodzie elektrycznym

wirnika na potrzeby jego diagnostyki. W ramach zrealizowanych badań opracował modele matematyczne silnika dwuklatkowego. Następnie wykonał obliczenia symulacyjne z wykorzystaniem opracowanego modelu. W ostatnim etapie badań porównał wyniki obliczeń symulacyjnych z wynikami pomiarów laboratoryjnych.

Doktorant sformułował następującą tezę rozprawy: *„Istnieje możliwość wykrycia i lokalizacji niesymetrii elektrycznej wirnika w silniku indukcyjnym dwuklatkowym w stanie ustalonym z uwzględnieniem oddziaływań elektromechanicznych”*.

W celu udowodnienia wymienionych tez rozprawy Doktorant zrealizował następujące zadania naukowe:

- Szczegółowa charakterystyka silników asynchronicznych dwuklatkowych: budowa i zastosowanie silników asynchronicznych dwuklatkowych w elektrycznych układach napędowych, analiza ich roli w przemyśle oraz warunki eksploatacyjne prowadzące do uszkodzeń.
- Analiza niesymetrii klatki wirnika silnika indukcyjnego dwuklatkowego: negatywne skutki niesymetrii elektrycznej wirnika oraz metody jej identyfikacji, przedstawienie przesłanek technicznych umożliwiające szczegółową diagnostykę silników.
- Modelowanie stanów ustalonych maszyn elektrycznych na podstawie schematu zastępczego: wykorzystanie obwodowych modeli do analizy stanów ustalonych maszyn indukcyjnych, zaprezentowanie uproszczenia równań oraz określenie zakresu stosowalności opracowanego modelu.
- Formułowanie równań stanu ustalonego: opracowanie równania stanu ustalonego maszyn elektrycznych uwzględniającego harmoniczne przestrzenne, zastosowanie metody bilansu harmonicznych do rozwiązania układu równań.
- Modelowanie niesymetrii rezystancji uzwojenia wirnika: utworzenie modelu silnika dwuklatkowego umożliwiającego modelowanie zewnętrznych i wewnętrznych niesymetrii rezystancji klatki wirnika.
- Algorytm bezpośredniego wyznaczania stanu ustalonego: opracowanie algorytmu uwzględniającego oddziaływania elektromechaniczne oraz wahania prędkości, zastosowanie zmodyfikowanej metody Newtona-Raphsona do rozwiązywania równań algebraicznych.
- Testowanie opracowanego algorytmu bezpośredniego wyznaczania stanu ustalonego: przeprowadzenie testów zbieżności algorytmu z uwzględnieniem zmienności parametrów mechanicznych, porównanie algorytmów bezpośredniego wyznaczania stanu ustalonego z metodą całkowania numerycznego.
- Analiza oddziaływań niesymetrycznych: dokonanie jakościowej i ilościowej analizy oddziaływań w warunkach niesymetrii parametrycznej obwodów wirnika.
- Wpływ harmonicznych na wyniki diagnostyki silnika: zbadanie wpływu harmonicznych w sieci zasilającej na dokładność diagnostyki silników, przeanalizowanie odporności algorytmów diagnostycznych na zakłócenia harmoniczne.
- Analiza widma przebiegów prądów fazowych uzwojenia stojana i momentu elektromagnetycznego: dokonanie analizy widma amplitudowego prądów stojana i momentu elektromagnetycznego identyfikując sygnały diagnostyczne.



Zrealizowane przez Doktoranta badania naukowe opisane w rozprawie znajdują się pośród badań realizowanych w wielu ośrodkach naukowych na całym świecie. Na uwagę zasługuje bardzo szczegółowe opisanie procesu opracowywania modeli wieloharmonicznych silnika indukcyjnego dwuklatkowego. Moim zdaniem przyjęty cel rozprawy oraz przedstawione zadania naukowe są aktualne i wszystkie oceniam pozytywnie.

III. Charakterystyka i ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Jarosława Tulickiego została przygotowana w formie monografii składającej się z pięciu rozdziałów.

Wprowadzenie do tematyki podjętej w rozprawie przedstawiono w rozdziale pierwszym. Omówiono zastosowania silników indukcyjnych dwuklatkowych, charakterystyczne uszkodzenia i źródła ich powstawania. Szczegółowo wyjaśniono procesy eksploatacyjne i warunki, w których dochodzi do uszkodzeń w uzwojeniu klatkowym. Przenalizowano negatywne konsekwencje niesymetrii elektrycznej wirnika oraz przedstawiono typowe metody identyfikacji tych zaburzeń podczas normalnej pracy silnika. Wskazano także istotne uwarunkowania techniczne, które determinują wykorzystanie dostępnych narzędzi do pozyskiwania szczegółowych wzorców diagnostycznych. Następnie opisano problemy badawcze poruszone w pracy, wskazując korzyści wynikające z modelowania obwodowego stanów ustalonych maszyn elektrycznych. Rozdział kończy się sformułowaniem głównej tezy rozprawy oraz przedstawieniem zawartości kolejnych rozdziałów.

We wstępie do drugiego rozdziału omówiono zasady formułowania równań stanu ustalonego dla maszyn elektrycznych, uwzględniające teoretycznie nieskończone spektrum harmonicznym przestrzennym, poprzez zastosowanie liniowych równań różniczkowych z okresowo zmiennymi współczynnikami. W kolejnym punkcie przedstawiono metodę bilansu harmonicznym w dziedzinie częstotliwości jako sposób rozwiązania tego układu równań. Następny podrozdział opisuje opracowany model silnika dwuklatkowego, który pozwala na modelowanie dowolnej niesymetrii rezystancyjnej stojana oraz wirnika. W tym kontekście przedstawiono także uproszczenia wprowadzone do równań oraz określono zakres stosowalności modelu. Przedostatnia część rozdziału opisuje strukturę układu równań uzyskaną w wyniku transformacji do przestrzeni składowych symetrycznych, wyrażonych w postaci szeregu Fouriera dla funkcji prawie-okresowych. Rozdział drugi kończy się omówieniem przeprowadzonych badań numerycznych dotyczących wybranych przypadków uszkodzeń elektrycznych w obwodach wirnika. Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń dokonano analizy widma amplitudowego prądu fazowego stojana oraz momentu elektromagnetycznego, koncentrując się na generowanych sygnałach diagnostycznych. W celu określenia miejsca powstania uszkodzenia, poddano analizie pracę silnika pod obciążeniem mechanicznym, zasilanego symetrycznym napięciem, a także przypadki wymuszeń dwufazowych bez momentu zewnętrznego. W ostatniej części rozdziału przeanalizowano szczególne przypadki, które mogą wpływać na dokładność procesu diagnostycznego, takie jak

odkształcenia napięć zasilających, obecność przewodu zerowego oraz przybliżona niesymetria biegunowa klatek wirnika.

W rozdziale trzecim zaprezentowano algorytm bezpośredniego wyznaczania stanu ustalonego, który uwzględnia oddziaływania elektromechaniczne. W tym ujęciu, równania stanu ustalonego opisano jako układ nieliniowych równań algebraicznych, odnoszących się do poszukiwanych wartości prądów oraz zmian prędkości w wybranych momentach czasowych, zdefiniowanych za pomocą dwuokresowych szeregów Fouriera. Równania bilansu harmonicznego w dziedzinie czasu rozwiązano przy użyciu zmodyfikowanego schematu iteracyjnego Newtona-Raphsona. Równania różniczkowe dla silnika dwuklatkowego, przedstawione we wcześniejszym rozdziale, zostały przekształcone do tzw. postaci bazowej. W tej postaci zredukowano liczbę uwzględnianych harmonicznym przestrzennych, co pozwoliło wyrazić równania silnika poprzez transformacje współrzędnych przy użyciu układu zwyczajnych równań różniczkowych o stałych współczynnikach. Opracowana procedura rozwiązywania nieliniowych równań algebraicznych polega na poszukiwaniu widm prądów i momentu elektromagnetycznego, uwzględniając konieczność istnienia równania elektromechanicznego. W kolejnych podrozdziałach zilustrowano wyniki testów zbieżności algorytmu, uwzględniając m.in. zmienność parametrów opisujących zjawiska mechaniczne. Następnie porównano algorytm bezpośredniego wyznaczania stanu ustalonego z metodą całkowania numerycznego. Ostatnia część rozdziału trzeciego zawiera analizę jakościową i ilościową oddziaływań w warunkach zadanej niesymetrii parametrycznej obwodów wirnika. W celu przeprowadzenia tej analizy, dokonano transformacji odwrotnej układu równań z dziedziny czasu do częstotliwości, traktując oddzielnie równania elektromagnetyczne i mechaniczne.

W rozdziale czwartym omówiono wpływ zaburzeń harmonicznym w sieci zasilającej na dokładność diagnostyki silników indukcyjnych dwuklatkowych. Na początku przedstawiono model matematyczny silnika, który uwzględnia wpływ wyższych harmonicznym napięcia zasilającego na przebiegi prądów stojana i wirnika. Opisano metody wykrywania zmian w widmach prądów fazowych związanych z obecnością niesymetrii elektrycznych i mechanicznych. W dalszej części rozdziału zaprezentowano wyniki symulacji komputerowej, które ilustrują wpływ wyższych harmonicznym na generowane przebiegi sygnałów diagnostycznych. Szczególną uwagę poświęcono przypadkom, w których obecność harmonicznym wyższego rzędu maskuje sygnały diagnostyczne świadczące o uszkodzeniach wirnika lub niesymetrii w uzwojeniu stojana lub wirnika. Przeprowadzono także analizę odporności algorytmu diagnostycznego na zakłócenia harmoniczne oraz wskazano możliwe metody filtracji sygnałów w celu poprawy skuteczności diagnostyki. W końcowych podrozdziałach przeanalizowano wpływ parametrów mechanicznych takich jak zmienność momentu obciążenia na widma prądów stojana. Przedstawiono wnioski dotyczące roli harmonicznym sygnałów w procesie diagnostyki oraz zaproponowano kierunki dalszych badań zmierzających do zwiększenia dokładności wykrywania uszkodzeń przy zakłóconym napięciu zasilania.

Rozdział piąty zawiera podsumowanie oraz wnioski końcowe wynikające z realizacji kluczowych etapów pracy. Przedstawiono główne osiągnięcia badawcze, podkreślając znaczenie uzyskanych wyników w kontekście diagnostyki silników indukcyjnych dwuklatkowych. Omówiono również potencjalne zastosowania zaproponowanych metod i algorytmów w praktyce przemysłowej. W zakończeniu rozdziału wskazano kierunki przyszłych badań, które mogą prowadzić do dalszego rozwoju prezentowanych metod. Zwrócono uwagę na możliwości udoskonalenia algorytmów diagnostycznych oraz na perspektywy związane z ich implementacją w zaawansowanych systemach monitorowania stanu maszyn elektrycznych.

IV. Uwagi do treści rozprawy doktorskiej

Struktura pracy jest spójna i właściwa. Redakcja i formatowanie tekstu jest bardzo dobre. Tekst rozprawy jest napisany w sposób zrozumiały. Błędów redakcyjnych i językowych jest niewiele i nie wpływają one na końcową pozytywną ocenę rozprawy.

Opiniowana rozprawa doktorska wyczerpuje temat zawarty w tytule. W rozprawie zaprezentowano metody diagnozowania i lokalizowania niesymetrii rezystancyjnej wirnika w silniku dwuklatkowym w ustalonym stanie pracy. Opracowano w tym celu wieloharmoniczny model obwodowy, oparty na metodzie bilansu harmonicznym, zakładając dwuokresowe zmiany prądów i momentu elektromagnetycznego. Analizowano zarówno klasyczny, liniowy model, pomijając interakcje elektromechaniczne, jak i zadanie bezpośredniego wyznaczania stanu ustalonego w układzie nieliniowym, wymagające iteracyjnego algorytmu. Rozwiązania te pozwoliły na uzyskanie analitycznych równań, które umożliwiły identyfikację cech charakterystycznych uszkodzeń wirnika. Zaproponowano także metodę badania zmienności sygnałów diagnostycznych w zależności od parametrów napędu, co umożliwiłoby bardziej precyzyjną diagnozę, niż tradycyjne podejścia oparte wyłącznie na obserwacji prądów podstawowych. W wyniku algebraizacji układu uzyskano związki między prądami, momentem elektromagnetycznym a miejscem powstania niesymetrii. Wyniki obliczeń symulacyjnych dla modelu maszyny średniej mocy zostały porównane z wynikami pomiarów laboratoryjnych, które potwierdziły poprawność teoretyczną modelu. Pominięto jednak porównanie z nowoczesnymi metodami obliczeń polowych. Przekształcenie wyników przebiegów sygnałów do dziedziny częstotliwości napotyka na podobne trudności jak w numerycznych metodach całkowania. Różnica między opracowanym algorytmem a metodami numerycznymi polega na tym, że w pierwszym przypadku nie jest wymagane określenie stanu przejściowego ani warunków początkowych, co skraca czas obliczeń. Ulepszeniem metody iteracyjnej jest zastosowanie operatora różniczkowego, co upraszcza układ równań w przypadku jednostronnej niesymetrii wirnika. Istnieje możliwość rozszerzenia metody o zaburzenia wynikające z nierównomiernej szczeliny powietrznej. Nadal jednak wyzwaniem pozostaje uzyskanie rozwiązań dla nieznanego prędkości kątowej oraz minimalizacja liczby operacji algebraicznych. Dotychczas najlepsze wyniki osiągnięto poprzez modyfikację klasycznego algorytmu ANR, jednak problemem pozostaje duża liczba iteracji niezbędnych do osiągnięcia



zbieżności numerycznej. Alternatywą jest zastosowanie operatora całkowego, co przyspiesza obliczenia. Te trudności są przedmiotem dalszych badań nad rozwojem nowych algorytmów oraz rozwiązaniem innych problemów, takich jak samowzbudzenie rezystancyjne lub pojemnościowe maszyny indukcyjnej, związane z nieliniowością układu.

W trakcie czytania opiniowanej rozprawy nasunęły mi się następujące pytania i proszę Doktoranta o ustosunkowanie się do nich:

1. Jakie kryteria techniczne i matematyczne uzasadniają zastosowanie algorytmu dekompozycji LU w procesie rozwiązywania układów równań związanych z bilansem harmonicznym w analizie sygnałów prądowych i napięciowych? W jakim stopniu algorytm ten jest bardziej efektywny niż inne metody, takie jak eliminacja Gaussa czy dekompozycja Choleskiego? Jak algorytm LU wpływa na stabilność obliczeń i czas ich realizacji w kontekście diagnostyki silników indukcyjnych?
2. W jaki sposób można odróżnić wpływ obciążenia silnika od wpływu uszkodzenia w przebiegach prądów fazowych? Jakie metody pozwalają na separację wpływu obciążenia od symptomów wynikających z awarii silnika w analizie prądów fazowych. Jakie techniki filtracji sygnałów, takie jak analiza harmonicznym, czy zaawansowane metody statystyczne, mogą być zastosowane w celu wyeliminowania wpływu zmienności obciążenia? W jaki sposób porównanie charakterystyk czasowo-częstotliwościowych może pomóc w odróżnieniu zmian obciążenia od tych wynikających z uszkodzeń mechanicznych lub elektrycznych.
3. Jakie aspekty pracy silnika (tj. tryb silnikowy, prądnicowy czy hamulcowy) zostały uwzględnione w opracowanym modelu diagnostycznym? Jak zmieniają się warunki pracy silnika w różnych trybach i jakie to ma konsekwencje dla identyfikacji uszkodzeń? Jakie zmienne operacyjne i wskaźniki diagnostyczne są najbardziej wrażliwe na zmiany trybu pracy i w jaki sposób model uwzględnia te różnice w celu zwiększenia dokładności diagnozy.
4. W jakim stopniu model uwzględnia lokalizację uszkodzeń w wirniku, takie jak pęknięcia prętów klatkowych, asymetrie lub deformacje, oraz ich wpływ na charakterystyki sygnałów diagnostycznych? Jakie metody numeryczne i analityczne zastosowane w modelu pozwalają na identyfikację i lokalizację uszkodzonych elementów, a także wpływ położenia uszkodzeń na zmiany w prądzie oraz innych mierzonych sygnałach diagnostycznych.
5. W jaki sposób przeprowadzono analizę błędów pomiarowych w warunkach laboratoryjnych? Jakie typy błędów – systematyczne, losowe lub związane z aparaturą pomiarową – zostały uwzględnione, a jakie techniki kalibracji i estymacji niepewności zostały zastosowane w celu zminimalizowania ich wpływu na wyniki badań? Jakie są ograniczenia związane z dokładnością i powtarzalnością pomiarów w kontekście diagnozowania stanu technicznego silników indukcyjnych.?



V. Ważniejsze osiągnięcia rozprawy

Opiniowana rozprawa stanowi udowodnienie postawionych tez oraz rozwiązania wymienionych zadań naukowych. Do ważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta można zaliczyć:

1. Opracowanie wieloharmonicznego modelu obwodowego, który bazuje na metodzie bilansu harmonicznego, z uwzględnieniem dwuokresowego przebiegu prądów i momentu elektromagnetycznego.
2. Opracowanie metody rozwiązania zagadnień liniowych i nieliniowych. Przeanalizowanie klasycznych zagadnień liniowych oraz problemu bezpośredniego wyznaczania stanu ustalonego w układzie strukturalnie nieliniowym. W drugim przypadku konieczne było opracowanie algorytmu iteracyjnego, który łączył równania elektromagnetyczne z równaniem mechanicznym, co umożliwiło wyznaczanie nieznanymi wektorów prądów i wahań kąta obrotu.
3. Zastosowanie algebraizacji układu równań w postaci analitycznej, co umożliwiło identyfikację charakterystycznych cech uszkodzeń w klatce wirnika.
4. Zaproponowanie ogólnej metody diagnozowania, wykorzystującą zmienność sygnałów diagnostycznych w funkcji parametrów opisujących układ napędowy.
5. Porównanie wyników obliczeń symulacyjnych z wynikami pomiarów laboratoryjnych. Opracowany model został zweryfikowany poprzez porównanie wyników obliczeniowych wzorcowej maszyny średniej mocy z wynikami pomiarów laboratoryjnych, co potwierdziło jego jakościową poprawność.
6. Opracowanie iteracyjnej metody z macierzowym operatorem różniczkowania Fouriera, która umożliwia uproszczenie układu równań i zredukowanie wymiaru modelu.
7. Wskazano na możliwość stosowania operatora całkowego, co przyspiesza obliczenia i eliminuje potrzebę odwracania macierzy, co jest korzystne w kontekście algorytmu numerycznego.
8. Wskazanie przyszłych kierunków badań. Podkreślono potrzebę dalszych badań nad nieliniowością strukturalną oraz parametryczną, w tym procesem samowzbudzenia rezystancyjnego i pojemnościowego maszyny indukcyjnej.

Wymienione osiągnięcia wskazują na znaczący postęp w dziedzinie diagnozowania niesymetrii w silnikach indukcyjnych dwukłatkowych, z potencjalnym wpływem na poprawę niezawodności i efektywności urządzeń wykorzystujących ten rodzaj napędu elektrycznego.

VI. Opinia końcowa

Podsumowując, uważam, że Pan mgr inż. Jarosław Tulicki udowodnił postawione tezy rozprawy doktorskiej, rozwiązał wymienione zadania naukowe, opisał w sposób wystarczający uzyskane wyniki badań naukowych oraz wykazał się wiedzą i umiejętnościami wymaganymi do uzyskania stopnia naukowego doktora.



Moim zdaniem rozprawa doktorska Pana mgra inż. Jarosława Tulickiego „Modelowanie maszyn indukcyjnych dwuklatkowych na potrzeby diagnostyki” spełnia obowiązujące wymagania ustawowe w zakresie dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne w dziedzinie nauk technicznych określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. (Dz. U. 2023 poz. 742 - tekst ujednoczony z dnia 08.03.2023 r.) jak również przez ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. (Dz. U. Nr. 65, poz. 595), Rozporządzenia Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 roku, Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 3 października 2014 roku oraz Rozporządzenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz. U. z 2018 r., poz. 261).

W związku z tym wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgra inż. Jarosława Tulickiego oraz o dopuszczenie jej do publicznej obrony.



Dr hab. inż. Wojciech Pietrowski