

Dr hab. inż. Marcin Wolkiewicz, profesor uczelni
Politechnika Wrocławska
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
ul. Smoluchowskiego 19
50-372 Wrocław

Wrocław, 25.11.2024

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. Wacława Maciołka
pt.: **Diagnostyka wirników maszyn indukcyjnych klatkowych w oparciu o model monoharmoniczny.**

1. Podstawa opracowania recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgra inż. Wacława Maciołka z Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej, pod tytułem *Diagnostyka wirników maszyn indukcyjnych klatkowych w oparciu o model monoharmoniczny*. Promotorem rozprawy doktorskiej jest dr hab. inż. Maciej Sułowicz, prof. PK. Recenzja została opracowana na podstawie uchwały nr 37/2024 Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej z dnia 16.10.2024. Recenzja ma być wykorzystana w postępowaniu o nadanie Panu mgr. inż. Wacławowi Maciołkowi stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

2. Ocena podjętego tematu

Tematyka rozprawy doktorskiej związana jest z diagnostyką uszkodzeń napędów elektrycznych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi. Problematyka ta od wielu lat jest rozwijana przez światowe firmy produkujące, remontujące oraz modernizujące maszyny i urządzenia, a także przez wyspecjalizowane firmy ekspercko - diagnostyczne. Ciągłe aktualnym jest rozwijanie metod analizy oraz ocen istniejących zagrożeń elektrycznych, mechanicznych i termicznych w tych maszynach zmierzających do poprawy stanu technicznego i wydłużenia ich żywotności. Nowoczesne systemy diagnostyczne wpisują się w ideę oraz wyzwania wiążące się z dynamicznie rozwijającym się przemysłem 4.0, który nakierowany jest na automatyzację zarówno pracy maszyn, jak i monitorowania ich stanu. W tym kontekście duże znaczenie nabierają metody porównawcze bazujące na zaawansowanych modelach matematycznych maszyn, które w sposób nieniszczący pozwalają na generowanie nowych wzorców diagnostycznych, na potrzeby monitorowania, czy też automatyzacji procesu wnioskowania nad stanem obiektu. Zagadnienia te nie stanowią problemu wyłącznie teoretycznego, ale mają duże znaczenie praktyczne: szczególnie dla napędów o wymaganej dużej niezawodności działania.

Na tej podstawie mogę stwierdzić, że tematyka rozprawy precyzyjnie wpisuje się w aktualne trendy badawcze i należy uznać ją za interesującą i słusznie wybraną zarówno pod względem rozwiązania problemów teoretycznych jak i możliwości aplikacji w przemysłowych systemach diagnostycznych.

3. Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Praca doktorska pt.: *Diagnostyka wirników maszyn indukcyjnych klatkowych w oparciu o model monoharmoniczny* obejmuje 144 strony i składa się z 5 zasadniczych rozdziałów. Praca jest uzupełniona: wykazem ważniejszych oznaczeń i skrótów, krótkim streszczeniem, bibliografią -

zawierającą 90 pozycji, w tym 1 praca autorska i 6 współautorskich Kandydata oraz załącznikami, w których zawarto spisy rysunków i tabel. Praca napisana jest komunikatywnym językiem. Układ pracy nie budzi istotnych zastrzeżeń. Materiały graficzne w pracy są wykonane starannie i są czytelne.

W rozdziale pierwszym, będącym wprowadzeniem do rozprawy, Autor przedstawił ogólne zagadnienia związane z diagnostyką uszkodzeń maszyn indukcyjnych oraz omówił przydatność modelowania matematycznego silników z uszkodzeniem wirnika w pozyskiwaniu wzorców diagnostycznych. W rozdziale tym zawarto również główne cele i tezę pracy.

Za główny cel rozprawy Doktorant uznał *opracowanie zredukowanego modelu diagnostycznego silnika indukcyjnego klatkowego dla małych poślizgów*. Bazując na przedstawionym celu pracy przedstawiono następującą tezę:

Istnieje możliwość opracowania zredukowanego modelu matematycznego silnika klatkowego do wymiaru maszyny pierścieniowej z niesymetrią elektryczną wirnika.

Cel i teza pracy sformułowane są poprawnie i można je zweryfikować na podstawie badań i wyników analiz przedstawionych w rozprawie.

Dalsza część rozdziału zawiera przegląd literatury, w której Autor przedstawił i omówił pozycje odnoszące się do wybranej tematyki badawczej, w szczególności modelowania maszyn indukcyjnych z niesymetrią wirnika. Przedstawione pozycje literaturowe są poprawnie dobrane do tematyki pracy, niemniej jednak znacząca ilość pozycji literaturowych nie jest cytowana w tekście rozprawy (np. pozycje [2], [7-8], [39-43], [45-49]). Dodatkowo przegląd nie odnosi się do aktualnego stanu literatury, w większości są to pozycje z lat 2000-2010.

W rozdziale drugim Kandydat szeroko omówił modele obwodowe silnika indukcyjnego. Jest to niewątpliwie najbardziej złożony rozdział rozprawy, w którym zostały przedstawione w szczególności modele matematyczne wraz z proponowanymi redukcjami i uproszczeniami. Doktorant zawarł opisy:

1. Wieloharmonicznego modelu matematycznego silnika klatkowego o symetrycznym 3-fazowym uzwojeniu stojana oraz wirnika z symetrycznie rozłożonymi żłobkami.
2. Modelu silnika asynchronicznego z niesymetrią rezystancyjną klatki wirnika, uwzględniającego wyższe harmoniczne.
3. Monoharmonicznego modelu silnika asynchronicznego z niesymetrią rezystancyjną klatki wirnika.

Dla opracowanych modeli Doktorant przeprowadził w szerokim zakresie porównawcze badania symulacyjne, uwzględniając przy tym parametry rzeczywistego silnika indukcyjnego oraz wpływ momentu obciążenia i momentu bezwładności wirnika na symptomy diagnostyczne. Wyniki symulacji poparte są przejrzystymi wykresami. Brakuje jednak, w niektórych przypadkach dokładniejszej analizy i interpretacji wykresów w celu podkreślenia ich istotności w diagnostyce niesymetrii wirnika.

Rozdział trzeci to w szczególności opis opracowanego przez Doktoranta modelu połowo-obwodowego silnika indukcyjnego klatkowego. W tym punkcie do badań symulacyjnych został wykorzystany pakiet numeryczny MagNet. Zakres badań numerycznych został ograniczony do trzech uszkodzeń prętów klatki wirnika oraz czterech zmian momentu bezwładności przy stałym momencie obciążenia. Pomimo ograniczonych badań symulacyjnych można zauważyć zbieżność wyników z przedstawionym w rozdziale drugim modelem monoharmonicznym.

Podsumowując rozdziały 2-3 można stwierdzić, że Doktorant posiada solidną wiedzę teoretyczną niezbędną do osiągnięcia głównego celu rozprawy i orientuje się w zagadnieniach modelowania układów napędowych. Dowodzi to jednoznacznie umiejętności Doktoranta w budowie oraz skutecznym łączeniu złożonych układów symulacyjnych i poprawnej interpretacji otrzymanych wyników.

Kolejny rozdział dotyczy już prowadzonych przez Doktoranta badań eksperymentalnych na stanowisku laboratoryjnym. Doktorant szczegółowo przedstawił poszczególne elementy składowe

stanowiska laboratoryjnego, zastosowane w badaniach maszyny elektryczne wraz z ich modyfikacją na potrzeby fizycznego modelowania uszkodzeń wirnika oraz etapy założonych badań. Głównym celem tych badań było porównanie otrzymanych wyników pomiarów z obliczeniami dla modelu z pełnym odwzorowaniem klatki wirnika przy zadanym różnym stopniu uszkodzenia klatki wirnika. Podobnie jak w przypadku analiz symulacyjnych zbadano dodatkowo wpływ zmian momentu obciążenia oraz momentu bezwładności wirnika na określone symptomy uszkodzeń. Ogólnie można ocenić, że przedstawione wyniki badań eksperymentalnych są wartościowe pod względem naukowym i wypełniają założony cel pracy. Aczkolwiek, w mojej ocenie analiza i interpretacja wyników mogłaby być bardziej szczegółowa.

Rozprawę zamyka Rozdział 5 zawierający podsumowanie, w którym Autor przedstawił ocenę przydatności i możliwość zastosowania opracowanych modeli w systemach diagnostycznych. Zawarto również redukcję schematów modelu, który moim zdaniem znajdować się w załącznikach do pracy. Na końcu rozdziału Doktorant formułował najważniejsze wnioski z prowadzonych badań.

Dokonując merytorycznej oceny całej rozprawy stwierdzam, że jest ona napisana na dobrym poziomie. Zawiera właściwie sformułowany i ważny problem naukowy oraz prezentuje prawidłowe rozwiązanie tego problemu, które zostało wykonane przez Doktoranta samodzielnie i z zastosowaniem odpowiedniej metodologii naukowej. Na podstawie przedstawionego omówienia treści całej rozprawy doktorskiej należy odnotować, że jej Autor wykazał się umiejętnościami formułowania problemów naukowo-badawczych oraz ich rozwiązywania wykorzystując przy tym wiedzę z zakresu napędów elektrycznych, modelowania oraz badań symulacyjnych i eksperymentalnych.

4. Główne wątpliwości i uwagi dyskusyjne

Uwagi o charakterze ogólnym, na które oczekuję odpowiedzi od Doktoranta:

1. Jak wygląda aktualny stan literatury związany z modelowaniem silników indukcyjnych z uszkodzonym wirnikiem?
2. Jakie środowisko programistyczne wykorzystano przy badaniach symulacyjnych modeli obwodowych?
3. Przytoczone wskaźniki diagnostyczne k_s oraz k_{as} na stronie 33 nie są opisane w tekście rozprawy. Proszę o ich zdefiniowanie oraz określenie czy są one identycznie wyznaczone w prowadzonych badaniach.
4. Analizując zmiany wartości składowej $I_{1,-2p}^{s,2}$ prądu stojana od liczby uszkodzonych prętów z rysunku 2.8 nasuwa się wniosek, że dla pewnej liczby uszkodzonych prętów składowe uszkodzeniowe przyjmują wartość zerową. Czy Autor może zinterpretować z czego wynika taka zależność?
5. Przedstawione w tabelach 2.1 i 2.3 zestawienia wskaźników uzyskanych z dwóch różnych modeli przyjmują takie same wartości. Czy można wnioskować, że uzyskano 100% zbieżność modeli?
6. Na stronie 41 Autor definiuje trzy współczynniki, które mają za zadanie obrazować stan asymetrii wirnika. Przedstawiona zależność (2.64) definiuje tylko dwa z nich. Proszę o jasne sprecyzowanie wskaźników diagnostycznych.
7. Czy nie zostały mylnie zapisane wyniki zmian wartości wskaźników k_s i k_{as} w tabeli 2.4 i rysunkach 2.15 i 2.16. Porównanie zmian ich wartości z modelem z podrozdziału 2.3 nasuwa taki wniosek.
8. Jaką interpretację ma zmienna δ opisana zależnością 2.133 i przedstawiona na wykresie 2.17? Czy można ją również uznać za dodatkowy wskaźnik diagnostyczny?
9. Co oznacza słowo „dystrubcja” w opisie rysunków 2.24-2.30. Czy jest to literówka od słowa dystrybucja? Jeżeli tak, to jak należy interpretować uzyskane wyniki?
10. W jaki sposób dobierano krok w obliczeniach symulacyjnych?

11. Przebieg momentu na rysunku 3.15 jest błędnie wyskalowany. Dodatkowo obrazuje w początkowym czasie duże zmiany wartości. Z czego one wynikają? Czy jest to stan rozruchu silnika?
12. Przebieg momentu przedstawiony na rysunku 4.9 posiada duże oscylacje. Czy wynika to z układu pomiarowego? Czy w czasie badań była mierzona prędkość obrotowa i można ją zestawić z przykładowymi przebiegami dla silnika nieuszkodzonego i z uszkodzeniem wirnika?
13. W celu przedstawienia zbieżności opracowanych modeli z eksperymentem proszę o porównanie przebiegów oraz widm prądu stojan dla uproszczonego modelu obwodowego, modelu polowo - obwodowego oraz silnika rzeczywistego, przy tych samych lub zbliżonych warunkach obciążenia.
14. Czy można zdefiniować ujednoczone wskaźniki diagnostyczne na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych i eksperymentalnych, które mogą pozwolić np. na pozyskanie danych wejściowych sieci neuronowej na potrzeby automatyzacji wnioskowania o stanie wirnika.
15. Jakie kierunki badań w dalszej perspektywie zamierza podjąć Doktorant? Czy będą one w dalszym ciągu związane z diagnostyką uszkodzeń w układach napędowych?

5. Dodatkowe uwagi o charakterze redakcyjnym

Redakcja pracy jest staranna, tym niemniej Doktorant nie uniknął błędów edytorskich i stylistycznych, które nie mają wpływu na ocenę całościową przedstawionej pracy naukowej oraz nie wymagają wprowadzenia zmian i uzupełnień w tekście rozprawy.

Poniżej przedstawiam tylko kilka z nich, które zwróciły moją większą uwagę:

- Pojedyncze błędy stylistyczne i tzw. literówki zauważone na stronach: 14, 15, 24, 25, 44, 51, 53, 72, 73, 83, 84, 85, 87, 95, 122
- W rozdziale 1 na stronie 13, powtórzony został akapit tekstu: „Zagadnienia związane z modelowaniem niesymetrii ... o odmiennych parametrach konstrukcyjnych” w wierszu 30 tej samej strony.
- Podrozdział 3.2 ze strony 87 został w całości powtórzony jako 4.2.1 na stronie 99.
- Sposób przeliczenia jednostek w określaniu widma względnego przedstawione na stronie 34 powinno umieszczone wcześniej, tj. przy prezentacji wykresów 2.3.
- Na stronie 62 błędna numeracja zależności przy wyznaczeniu wskaźników diagnostycznych k_{sym} , k_{asym} oraz δ określonych wzorami (2.134) do (2.136) .
- Zamienne stosowanie nazwy modelu polowego z modelem polowo-obwodowym w rozdziale 3.

6. Ocena pracy i wniosek końcowy

Uzyskane w rozprawie wyniki, oparte w dominującej części na badaniach własnych Autora, są wartościowe zarówno z punktu widzenia naukowego i praktycznego. Autor zaprezentował w swojej rozprawie doktorskiej oryginalne rozwiązanie problemu naukowego.

Jako jego wkład w dyscyplinę naukową automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne zaliczam przede wszystkim:

- przygotowanie modeli obwodowych silnika asynchronicznego z niesymetrią rezystancyjną wirnika,
- przygotowanie modelu polowo-obwodowego silnika asynchronicznego uszkodzonymi prętami klatki wirnika,
- zrealizowanie analizy porównawczej wyników obliczeń symulacyjnych wykorzystujących opracowane modele matematyczne dla różnych momentów obciążenia i momentów bezwładności wirnika.

- opracowanie projektu stanowiska pomiarowego z uwzględnieniem uszkodzeń klatki wirnika silnika indukcyjnego,
- przeprowadzenie szeregu badań laboratoryjnych, weryfikujących analizy teoretyczne dla różnych momentów obciążenia i momentów bezwładności wirnika,

Sposób prowadzenia badań oraz uzyskane rezultaty możliwe do wykorzystania jako wzorce diagnostyczne w zastosowaniach praktycznych, potwierdzają znaczną wiedzę Doktoranta w jego dyscyplinie naukowej, a także możliwość samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i przedstawiania jej wyników.

Mając na uwadze wymienione oryginalne osiągnięcia naukowe uważam, że Pan mgr inż. Wacław Maciołek zrealizował założony cel badawczy oraz uzasadnił słuszność sformułowanej tezy.

Uwzględniając wyżej wymienione uwagi i komentarze oraz całość rozprawy doktorskiej wraz z oryginalnymi osiągnięciami naukowo-badawczymi stwierdzam, iż w **mojej ocenie** recenzowana rozprawa doktorska - mgr inż. Wacława Maciołka pt. „*Diagnostyka wirników maszyn indukcyjnych klatkowych w oparciu o model monoharmoniczny*” **spełnia warunki i wymagania** stawianym rozprawom doktorskim 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, z późn. zm.) w zakresie dyscypliny naukowej automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

W związku z tym, przedkładam Radzie Naukowej dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej wniosek o przyjęcie i dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.

Marcin Wolkiewicz