

Prof. dr hab. inż. Czesław T. Kowalski  
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych  
Politechniki Wrocławskiej  
ul. Smoluchowskiego 19  
50-372 Wrocław

Wrocław, 27.11.2018r.

**RECENZJA**  
**rozprawy doktorskiej mgr inż. Arkadiusza DUDY**  
**pt. „Diagnozowanie silników indukcyjnych klatkowych przy wykorzystaniu wpływu**  
**nieliniowości obwodu magnetycznego”**

*Niniejsza recenzja została opracowana na zlecenie  
Dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej  
Politechniki Krakowskiej, z dnia 29.09.2018 r.*

**1. Tematyka rozprawy.**

Opiniowana rozprawa doktorska dotyczy problematyki wykrywania uszkodzeń w silnikach indukcyjnych klatkowych. Jest to tematyka bardzo aktualna i rozwijana w wielu ośrodkach badawczych w Polsce i na świecie. Większość aktualnie realizowanych prac badawczych dotyczących diagnostyki silników indukcyjnych opiera się na pomiarze i analizie sygnałów diagnostycznych mierzonych bezpośrednio na obiekcie (np. napięcia, prądy fazowe, strumień poosiowy, chwilowa moc czynna i bierna, moment elektromagnetyczny, drgania mechaniczne) lub obliczanych pośrednio (np. estymatory strumienia stojana i wirnika, estymatory momentu elektromagnetycznego, składowe symetryczne prądów i napięć fazowych, wielkości wirtualne w strukturach sterowania). W przypadku wykorzystywania składowych symetrycznych w diagnostyce uszkodzeń silników indukcyjnych, najczęściej stosowano analizę składowej kolejności zgodnej i przeciwnej napięcia i prądu stojana oraz impedancji. W rozprawie Autor podjął się sprawdzenia wpływu wybranych uszkodzeń na odkształcenia w przebiegach składowych kolejności zerowej napięcia i prądu i wykazania przydatności praktycznej tak pozyskiwanej informacji diagnostycznej. Jest to podejście oryginalne, wykorzystujące fakt, że w trójfazowych silnikach indukcyjnych nieliniowość obwodu magnetycznego wywołuje duże zmiany w składowej zerowej napięcia i prądu, w zależności od sposobu połączenia uzwojeń stojana. Przeprowadzone badania są kontynuacją i pewnym rozwinięciem zagadnień naukowych realizowanych z powodzeniem od wielu lat w Politechnice Krakowskiej i dotyczących modelowania matematycznego maszyn elektrycznych w warunkach niesymetrii elektrycznych oraz diagnostyki silników indukcyjnych. Dotychczas ukazało się sto-

sunkowo niewiele prac naukowych dotyczących zastosowania składowych symetrycznych zerowych napięcia i prądu do diagnostyki uszkodzeń silnika indukcyjnego.

Obecnie rozbudowane modele matematyczne obwodowe lub połowo-obwodowe, uwzględniające topologię obwodów elektrycznych i magnetycznych oraz ich nieliniowe właściwości umożliwiają badanie zjawisk zachodzących w uszkodzonej maszynie i poszukiwanie zależności przyczynowo – skutkowych, wyjaśniających mechanizm powstawania uszkodzeń i ich symptomów oraz tworzenie diagnostycznych wzorców uszkodzeń. Opiniowana praca dotyczy powyższych zagadnień i w pełni wykorzystuje taką metodologię badawczą.

Dlatego uważam, że tematyka badawcza rozprawy jest bardzo aktualna i ważna dla rozwoju nowoczesnych metod wykrywania uszkodzeń oraz skutecznego monitorowania i diagnozowania współczesnych napędów elektrycznych z silnikami indukcyjnymi.

## **2. Charakterystyka zawartości rozprawy**

Recenzowana rozprawa obejmuje 149 stron i jest podzielona na 5 rozdziałów. Ponadto zawiera spis literatury obejmujący 75 pozycji oraz spis tabel i rysunków. W rozdziale 1 Doktorant, po krótkim wprowadzeniu w problematykę, przedstawił cel naukowy rozprawy doktorskiej oraz tezę naukową. Głównym celem badań było sprawdzenie przydatności analizy składowych kolejności zerowej prądu i napięcia w wykrywaniu uszkodzeń związanych z niesymetrią elektryczną i magnetyczną silników indukcyjnych. Teza naukowa rozprawy zawiera się w stwierdzeniu, że nieliniowość obwodu magnetycznego silnika indukcyjnego generuje charakterystyczne częstotliwości w widmie składowych symetrycznych kolejności zerowej napięcia i prądu stojana, które mogą być wykorzystane w diagnostyce uszkodzeń.

Po określeniu celu i tezy rozprawy Doktorant bardzo pobieżnie omówił dotychczas stosowane metody diagnozowania uszkodzeń maszyn indukcyjnych. Brak pogłębionego przeglądu najnowszej literatury przedmiotu i przedstawienia na tym tle proponowanych w rozprawie rozwiązań badawczych jest pewnym mankamentem pracy. Doktorant omawia prace powstałe w ośrodku badawczym Politechniki Krakowskiej, co jest zrozumiałe, ale pomija milczeniem prace powstałe w innych ośrodkach zagranicznych i krajowych. Kilkanaście pozycji wyszczególnionych w spisie literatury nie znalazło swoich odwołań w tekście rozprawy, co rodzi pytanie, po co zostały umieszczone w spisie literatury.

W kolejnym podrozdziale wstępu Doktorant przejrzyście przedstawił metodykę i program badań. Swoje badania ograniczył do przypadków niesymetrii elektrycznej i magnetycznej (uszkodzeń wirnika i różnych rodzajów ekscentryczności wirnika względem stojana). Założył wykonanie badań symulacyjnych na modelach obwodowym i połowo-obwodowym

z liniowym i nieliniowym obwodem magnetycznym oraz laboratoryjnych dla połączeń uzwojeń w gwiazdę, gwiazdę z przewodem neutralnym oraz w trójkąt.

Podstawowe znaczenie w rozprawie ma rozdział 2, w którym Doktorant w uporządkowany sposób przedstawił podstawy matematyczne budowania generatora wzorców diagnostycznych dla wybranych uszkodzeń, przy uwzględnieniu nieliniowości obwodu magnetycznego. Doktorant zakładając, że przebiegi składowej symetrycznej kolejności zerowej napięcia i prądu stojana są mierzalnymi sygnałami w silniku indukcyjnym, w których występuje silny wpływ nieliniowości obwodu magnetycznego, postanowił wykazać, że wystąpią w nich dodatkowe składniki o częstotliwościach wywołanych przez uszkodzenia. Aby zrealizować ten cel wyprowadził ogólne wzory matematyczne na częstotliwości występujące w składowej zerowej napięcia stojana, wychodząc z uproszczonego obwodowego modelu matematycznego silnika z nieliniowym obwodem magnetycznym. Autor, wykorzystując doświadczenia i metody rozwijane od wielu lat w zespołach badawczych w Politechnice Krakowskiej, sformułował kolejno ogólne wyrażenia na przepływy stojana i wirnika w zapisie za pomocą składowych symetrycznych, funkcję permeancji szczeliny powietrznej, uzależnioną dodatkowo od stopnia nasycenia obwodu magnetycznego (dla trzech wariantów ekscentryczności) oraz indukcyjności uzwojeń przy uwzględnieniu nierównomierności szczeliny powietrznej. Wyprowadzone zależności mają ogólną postać matematyczną, uzależnioną od parametrów konstrukcyjnych. W kolejnym kroku sformułował obwodowy model matematyczny we współrzędnych naturalnych, przekształcony następnie do składowych symetrycznych. Transformacja z układu współrzędnych naturalnych do składowych symetrycznych umożliwiła Doktorantowi przyporządkowanie indukcyjności do pozycji w macierzach w zależności od numerów harmonicznycy i wyprowadzenie równania na składową zerową napięcia stojana w stanie nieustalonym. Kolejnym ważnym działaniem było określenie częstotliwości charakteryzujących wybrane uszkodzenia oraz ocena ich amplitud. Na podstawie analizy wyrażen na składową zerową napięcia w stanie ustalonym sformułował ogólne wzory na pulsacje i częstotliwości poszczególnych członów składowej zerowej napięcia stojana. Ponieważ wyprowadzone wzory na częstotliwości w składowej zerowej napięcia są w ogólnym przypadku kombinacją liniową częstotliwości napięcia zasilania i częstotliwości obrotowej wirnika, Doktorant rozpatrzył każdy rodzaj niesymetrii indywidualnie (uszkodzona klatka wirnika czy ekscentryczność) i przyporządkował je do danego typu uszkodzenia, poprzez odpowiednie określenie zakresu zmian rzędów harmonicznycy, zgodnie z wcześniejszymi założeniami w modelu silnika. Efektem tego działania było opracowanie tabel 2.9-2 i 2.9-3 umożliwiających selekcję częstotliwości charakterystycznych w zależności od stanu maszyny i opracowanie algorytmu (pro-

gramu) do generowania charakterystycznych częstotliwości. W zamieszczonym przykładzie pokazał, że uwzględnienie nasycenia rdzenia magnetycznego powiększa zbiór częstotliwości charakterystycznych o nowe, które nie występują w modelu liniowym. Podsumowaniem rozważań zawartych w rozdziale 2 są badania symulacyjne modelu obwodowego.

Badania symulacyjne obwodowego modelu silnika indukcyjnego Doktorant przeprowadził w środowisku MATLAB dla dwóch zasadniczych przypadków: z liniowym i nieliniowym obwodem magnetycznym, przy połączeniu uzwojeń w gwiazdę i w gwiazdę z przewodem zerowym. Na podstawie analizy widmowej składowej zerowej napięcia zostały zidentyfikowane i wybrane harmoniczne wskazujące konkretne uszkodzenie. Uwzględnienie nieliniowego obwodu magnetycznego powiększyło zbiór charakterystycznych częstotliwości przyporządkowanych do danego typu uszkodzenia o nowe dodatkowe prążki nie występujące w modelu liniowym. Badania symulacyjne przypadku połączenia uzwojeń w gwiazdę z przewodem zerowym wykazały, że składowa zerowa prądu ma widmo o większej zawartości harmonicznych niż widmo składowej zerowej napięcia.

Na podstawie rozważań przeprowadzonych w rozdziale 2, Autor słusznie stwierdził, że do rozważań diagnostycznych należy wykorzystywać widmo składowej zerowej napięcia i prądu otrzymywane z modelu nieliniowego. Drugim ważnym wnioskiem jest stwierdzenie, że do identyfikacji częstotliwości charakterystycznych w widmie składowej zerowej prądu stojana można zastosować wyprowadzone wzory na częstotliwości charakterystyczne dla składowej zerowej napięcia.

Do zweryfikowania dokładności modelu obwodowego w wersji liniowej i nieliniowej, Doktorant wykorzystał model połowo – obwodowy, przedstawiony w rozdziale 3 rozprawy. W badaniach zostało wykorzystane środowisko komputerowe ANSYS Maxwell. Wyniki badań symulacyjnych w pełni potwierdziły słuszność wzorów na częstotliwości charakterystyczne, wyprowadzonych w rozdziale 2.9. Dlatego należy uznać za w pełni uzasadnione stwierdzenie Doktoranta, że obwodowy model matematyczny silnika z nieliniowym magnetyzmem jest wiarygodny w badaniach diagnostycznych. Ponadto analiza widm składowej zerowej prądu stojana (dla rozpatrywanych uszkodzeń przy połączeniu uzwojeń w trójkąt) wykazała, że uzasadnione jest stosowanie wzorów na częstotliwości charakterystyczne wyprowadzone dla składowej zerowej napięcia. Dodatkowo, na podstawie wyników symulacji połowo-obwodowej, Autor w rozdziale 3.4 przeprowadził ciekawą dyskusję na temat nierozróżnialności spektralnej niektórych uszkodzeń. Niektóre uszkodzenia (ekscentryczność statyczna, niesymetria wewnętrzna uzwojeń stojana, niesymetria napięć zasilania) wywołują podobną zmianę spektrum składowej zerowej napięcia i prądu stojana. Autor zaproponował

postępowanie umożliwiające odróżnienie niesymetrii zewnętrznej, pochodzącej od zasilania, od niesymetrii wewnętrznej maszyny.

Wyniki badań symulacyjnych zostały skonfrontowane z wynikami pomiarów na obiekcie rzeczywistym (rozdział 4). Pomiarzy zostały zrealizowane dla maszyny symetrycznej oraz z uszkodzonym wirnikiem i ekscentrycznością mieszaną dla trzech sposobów skojarzenia uzwojeń. Doktorant przeprowadził dogłębną analizę otrzymanych wyników i sformułował szereg ciekawych wniosków. Otrzymane pomiarowo widma są porównywalne z widmami otrzymanymi na drodze modelowania połowo-obwodowego i oddają charakter niesymetrii silnika w podobny sposób. Zamieszczone w podrozdziale 4.5 porównanie widma napięcia neutralnego z widmem prądu fazowego stojana, zdaniem Doktoranta, wykazały większą wrażliwość napięcia neutralnego na uszkodzenia klatki wirnika i ekscentryczność wirnika.

W podsumowaniu rozprawy Autor przedstawił wnioski wynikające z analizy modelu obwodowego oraz połowo-obwodowego silnika indukcyjnego z uwzględnieniem efektów nasycenia obwodu magnetycznego oraz sformułował szereg uwag i praktycznych sugestii dotyczących przydatności analizy składowej zerowej napięcia do diagnostyki uszkodzeń.

### **3. Ocena merytoryczna rozprawy**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Arkadiusza Dudy jest kontynuacją prac naukowych obejmujących modelowanie matematyczne i diagnostykę maszyn elektrycznych, realizowanych od wielu lat w Instytucie Elektromechanicznych Przemian Energii Politechniki Krakowskiej. Jako główny cel naukowy rozprawy Doktorant przyjął sprawdzenie czy w przebiegach składowych zerowych napięcia i prądu występują silne symptomy uszkodzeń silnika uzasadniające ich wykorzystanie w diagnostyce uszkodzeń. Wymagało to wykazania, że nieliniowość obwodu magnetycznego silnika indukcyjnego w warunkach niesymetrii elektrycznej i magnetycznej generuje dodatkowe symptomy uszkodzeń w postaci charakterystycznych częstotliwości w widmie składowej zerowej napięcia i prądu.

Przyjęta przez Doktoranta metodyka badań jest poprawna i typowa dla nowoczesnych technicznych prac naukowo-badawczych. Obejmuje pełny cykl badawczy, od rozważań teoretycznych, poprzez opracowanie modeli matematycznych i badania symulacyjne do realizacji badań laboratoryjnych. Realizacja celu badawczego rozprawy wiązała się z rozwiązaniem szeregu problemów badawczych, z których część jest słabo lub w sposób niezadawalający opisana w literaturze. Szczególnie dotyczy to wykorzystania składowych zerowych napięcia w diagnostyce i tworzenia wzorców diagnostycznych w oparciu o modelowanie połowo-obwodowe z nieliniowym obwodem magnetycznym.

Do głównych osiągnięć Autora zaliczam:

1. Sformułowanie obwodowego modelu matematycznego, uwzględniającego nasycenie obwodu magnetycznego, poprzedzone przyjęciem określonego modelu permeancji (uwzględniającego rodzaj szczeliny powietrznej), transformacją do składowych symetrycznych i uporządkowaniem struktury macierzy indukcyjności.
2. Przeprowadzenie szczegółowej analizy wpływu nieliniowości obwodu magnetycznego na składową zerową napięcia i prądu, w zależności od sposobu połączenia uzwojeń stojana, wyjaśniającej mechanizm powstawania symptomów charakterystycznych dla różnych uszkodzeń.
3. Wyprowadzenie równania na składową zerową napięcia oraz sformułowanie wzorów na częstotliwości charakterystyczne, występujące w widmie składowej zerowej w zależności od stanu maszyny.
4. Opracowanie algorytmu poszukiwania częstotliwości charakterystycznych.
5. Przeprowadzenie dokładnych badań symulacyjnych na modelach obwodowych i polowo-obwodowych, wykazujących konieczność uwzględniania nieliniowości obwodu magnetycznego i weryfikujących wyprowadzone zależności na zawartość widma składowej zerowej napięcia.
6. Weryfikację pomiarową rozważań teoretycznych i wyników symulacyjnych.

Przeprowadzone analizy teoretyczne, badania symulacyjne i weryfikacja na stanowisku laboratoryjnym umożliwiły Doktorantowi sformułowanie szeregu praktycznych zaleceń w zakresie identyfikacji symptomów uszkodzeń silników indukcyjnych.

Mgr inż. Arkadiusz Duda wykazał się dobrą znajomością teorii i konstrukcji maszyn elektrycznych oraz zagadnień z modelowania matematycznego obwodowego i polowo-obwodowego maszyn elektrycznych. Przedstawione w rozprawie rozważania teoretyczne i zaproponowane rozwiązania charakteryzują się dużym uporządkowaniem rozważań i wnikliwością badawczą.

Podsumowując ocenę merytoryczną rozprawy można stwierdzić, że Autor rozwiązał trudne zagadnienie naukowe i techniczne, odpowiednio sformułował założenia, wykazał i zastosował właściwe metody teoretyczne i doświadczalne oraz udokumentował to przekonującymi wynikami zamieszczonymi w rozprawie. Udowodnił na drodze doświadczalnej przydatność opracowanej metody w praktyce. Zdaniem Recenzenta cel rozprawy został w pełni zrealizowany, a postawiona na wstępie teza naukowej rozprawy udowodniona.

#### 4. Uwagi dyskusyjne

Recenzent nie zauważył w pracy żadnych istotnych uchybień merytorycznych. Jednakże w trakcie czytania rozprawy nasunęły się pewne pytania dyskusyjne i uwagi krytyczne, sformułowane poniżej:

1. Recenzent, wysoko oceniając wartość naukową rozprawy, nie podziela optymistycznych wniosków Doktoranta w zakresie przydatności analizy składowej zerowej napięcia i prądu w diagnostyce uszkodzeń silników indukcyjnych w warunkach przemysłowych, a w szczególności w napędach przekształtnikowych. Oczekuję od Doktoranta głębszego rozwinięcia i uzasadnienia tego problemu podczas obrony rozprawy.
2. Wyniki badań na modelu połowo-obwodowym Doktorant traktuje jako wzorzec przy poszukiwaniu częstotliwości charakterystycznych dla konkretnych uszkodzeń. Czy była podjęta próba porównania widm z symulacji i pomiarów na obiekcie rzeczywistym pod kątem ilościowym (wartości amplitud dla charakterystycznych częstotliwości), co pozwoliłoby zweryfikować i ocenić dokładność modelu.
3. Czy badano wpływ wartości obciążenia na wyniki analizy częstotliwościowej napięcia neutralnego w rozpatrywanych rodzajach uszkodzeń?

Pod względem formalnym rozprawa została napisana poprawnym językiem, zawiera dobrze dobrany materiał ilustrujący rozważania teoretyczne oraz dokumentujący wyniki symulacyjne i pomiarowe. Recenzentowi nasunęły się pewne drobne uwagi odnośnie użytych sformułowań oraz pewnych niedociągnięć redakcyjnych, nie mających wpływu na jakość strony formalnej rozprawy, które warto wyeliminować w dalszych pracach naukowych:

- stosowanie sformułowania "model matematyczny silnika we współrzędnych maszynowych" jest, zdaniem Recenzenta, niepoprawne w odniesieniu do maszyn elektrycznych. Używa się go w obrabiarkach CNC;
- sformułowanie „składowe kolejności zerowej napięcia i prądu są mierzalnymi sygnałami zewnętrznymi” jest nieprecyzyjne, gdyż można je otrzymać tylko na drodze obliczeniowej; czyli są to sygnały diagnostyczne otrzymywane pośrednio;
- sformułowanie "uszkodzony silnik emituje podczas swojej pracy sygnały, które w normalnych warunkach nie występują" jest nieprawdziwe, gdyż istnieje konkretna dokładność wykonania maszyny elektrycznej (nie ma idealnych obiektów technicznych). W związku z tym w normalnych warunkach pracy maszyny elektrycznej efekty niesymetrii też występują, ale mają inny charakter ilościowy i jakościowy

- (np. wielkość amplitud charakterystycznych częstotliwości, inne wartości częstotliwości);
- widma obrazujące ekscentryczność są trudne do odczytania ze względu na zastosowane zbliżone kolory;
  - Autor zastosował specyficzny sposób numerowania rysunków i wzorów, odbiegający od standardów stosowanych w książkach i czasopismach naukowych. Utrudnia to czytanie pracy oraz śledzenie i porównywanie wyników badań.
  - występują drobne błędy w numeracji podrozdziałów.

Powyższe uwagi, o charakterze dyskusyjnym lub redakcyjnym, nie umniejszają wartości pracy, która jest interesująca i zawiera omówienie zagadnień aktualnych w dziedzinie diagnostyki uszkodzeń silników indukcyjnych.

## **5. Wniosek końcowy**

Opiniowana rozprawa doktorska mgr. inż. Arkadiusza Dudy zawiera samodzielne i oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, stanowiąc tym samym wkład naukowy Autora do dyscypliny Elektrotechnika, w zakresie diagnostyki maszyn elektrycznych. Przedstawiona rozprawa potwierdza umiejętności Doktoranta w rozwiązywaniu trudnych problemów naukowych. Zakres i poziom ocenianej rozprawy upoważniają mnie do stwierdzenia, że spełnia ona w pełni wymagania stawiane przez obowiązującą *Ustawę o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym*. Wnioskuje o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

*Czesław Kowalski*