

**Dr hab. inż. Tomasz Węgiel**  
Politechnika Krakowska  
Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej

Kraków, 31.07.2015

## **RECENZJA**

Rozprawy doktorskiej Pana **Alejandro Fernandez Gomeza** na temat:  
*„Modele simulinkowe dla aplikacji napędowych uszkodzonych maszyn indukcyjnych”*  
(Simulink Models of faulty induction machines for drives applications) wykonanej na  
Wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej  
pod kierunkiem promotora dr hab. inż. Konrada Weinreba

Poniższą recenzję wykonałem na podstawie uchwały Rady Wydziału z dnia 25 maja 2015r.

## 1. Ogólna charakterystyka pracy

Praca została zakończona w maju 2015r. Obejmuje ona 203 strony i zawiera na wstępie spis treści, wykaz symboli, oznaczeń matematycznych, spis rysunków, spis tabel, wykaz skrótów, następnie zasadniczą część pracy w postaci 11 rozdziałów oraz na końcu przegląd literatury.

## 2. Ocena pracy

### 2.1. Struktura pracy

W rozprawie zostały kolejno przedstawione:

- spis treści pracy oraz wykazy symboli, rysunków, tabel i wprowadzonych w tekście skrótów,
- w rozdziale 1 - wprowadzenie w rozważaną tematykę i przesłanki do jej kontynuacji,
- w rozdziale 2 - przegląd typowych uszkodzeń silników indukcyjnych oraz metod ich diagnozowania,
- w rozdziale 3 - wprowadzenie w zagadnienia tworzenia modeli matematycznych, ukierunkowanych na potrzeby diagnostyki wirnika silników indukcyjnych,
- w rozdziale 4 - aplikacje metody bilansu harmonicznych do analizy stanu ustalonego silnika indukcyjnego z ekscentrycznością wirnika,
- w rozdziale 5 - opis zbudowanego specjalistycznego stanowiska pomiarowego,
- w rozdziale 6 - implementacje modeli dynamicznych uszkodzonych silników indukcyjnych w środowisku Matlab / Simulink,
- w rozdziale 7 - sprawdzenie i potwierdzenie poprawności wyników, uzyskanych za pomocą zaaplikowanych w programie Matlab modeli stanu ustalonego silników indukcyjnych z ekscentrycznością wirnika,
- w rozdziale 8 - porównanie wyników obliczeń numerycznych z wynikami pomiarów laboratoryjnymi,
- w rozdziale 9 - możliwości aplikacji opracowanych modeli silników indukcyjnych z uszkodzeniami wirnika, dla wbudowanego systemu FPGA/CPU,
- w rozdziale 10 - zestawienie i ocenę wyników przeprowadzonych badań,
- w rozdziale 11 - końcowe uwagi i wnioski,
- spis literatury dotyczącej tematyki pracy oraz wykaz publikacji Autora.

Charakter pracy można sklasyfikować jako teoretyczno-obliczeniowy jednakże zawiera również obszerną część z weryfikacjami pomiarowymi. Struktura pracy w sposób konsekwentny obejmuje wszystkie elementy niezbędne do przedstawienia uzyskanych rezultatów. Uważam zatem, że struktura recenzowanej pracy została zbudowana właściwie.

### 2.2. Motywacja pracy

Motywy podjęcia pracy zostały przedstawione na początku w rozdziale 1. U ich podstaw leży przekonanie, że w dobie rozwoju współczesnych systemów napędowych, których jednym z istotniejszych elementów są maszyny indukcyjne, bardzo ważnym zagadnieniem jest poprawienie efektywności energetycznej przez wcześniejsze wykrycie stanu awaryjnego. Przyczynia się do tego między innymi rozwój wiarygodnych modeli matematycznych, których wykorzystanie przynosi wymierne efekty ekonomiczne. Używane w przeszłości tradycyjne metody pozyskiwania informacji na podstawie pomiarów nie należą do najtańszych, a przy tym nie są w stanie zapewnić wzorców dla dowolnych przypadków uszkodzeń. Modele matematyczne pozwalają na dowolne kreowanie uszkodzeń i poznawanie

własności eksploatacyjnych maszyny. Najważniejszym przy tym jest jednak możliwość uczenia systemów diagnostycznych, których działanie pozwala z wyprzedzeniem przewidzieć rozwijające się uszkodzenie w maszynie. Zbyt późno wykryte uszkodzenie może doprowadzić do awarii całego układu napędowego i znacznych strat materialnych. Pomimo licznych prac, których przegląd został wnikliwie przedstawiony przez Autora, temat pracy jest nadal bardzo ważny i aktualny. Istota tematu polega na tym, że opracowane modele i uzyskane przez Autora rozwiązania pozwalają na przewidzenie i ocenę z zadawalającą dokładnością symptomów rozwijającego się uszkodzenia w maszynie. Obszar tematyczny pracy i motywacja jej podjęcia zasługują zatem na uznanie.

### **2.3. Teza pracy**

Teza pracy doktorskiej Pana Alejandro Fernandez Gomeza wynika z postawionych zadań badawczych do których zalicza się opracowanie modeli matematycznych silników indukcyjnych gotowych do stosowania w aplikacjach napędowych i dających możliwości analiz w przypadkach awaryjnych. Rozwiązań takich nie jest wiele co potwierdza przeprowadzony przez Autora przegląd literatury. Najważniejszym efektem pracy, jaki sobie Autor wyznaczył jest przygotowanie bibliotek na bazie przygotowanych modeli matematycznych w środowisku Matlab/Simulink dla celów diagnostycznych. Aspektem praktycznym jest wykorzystanie wyników w celu zbadania i opracowania nowych przepisów kontrolnych poprawiających efektywność pracy napędów.

Część teoretyczną dowodu tak przedstawionej tezy Doktorant prezentuje w rozdziałach 2, 3 i 4. Jej poprawność Pan Alejandro Fernandez Gomez weryfikuje za pomocą licznych przykładów, korzystając z obliczeń przy użyciu modeli matematycznych i z porównywania amplitud charakterystycznych harmonicznych prądów uzwojeń stojana z wartościami uzyskanymi pomiarowo. Wyniki te zamieszcza w dalszych częściach swojej pracy.

### **2.4. Realizacja pracy**

Jądro pracy stanowią rozdziały 3 i 4. W rozdziale 3 Autor przedstawia szczegółowe formuły do wyznaczania parametrów takich jak indukcyjności uzwojeń i rezystancje obwodów wirnika potrzebnych do zapisu ogólnych modeli matematycznych silników indukcyjnych. Przy wyznaczaniu indukcyjności uzwojeń, Autor zdecydował się na pewne uproszczenia przez uwzględnienie jedynie podstawowej harmonicznej rozkładu pola magnetycznego w szczelinie powietrznej. Dzięki tym uproszczeniom był możliwy zapis równań modeli matematycznych w bardzo prostej i użytecznej formie, pozwalający jednocześnie prowadzić analizy w stanach dynamicznych dla maszyny w której występują ekscentryczności (statyczna, dynamiczna, mieszana) oraz pojawia się uszkodzenie klatki wirnika. Rozdział 4 jest aplikacją metody bilansu harmonicznych, w którym pokazano zapis równań modeli matematycznych umożliwiających prowadzenie analiz dla stanów ustalonych maszyny w której pojawiają się ekscentryczności. Przedstawione modele w tym rozdziale, jak poprzednio, bazują na uproszczonej analizie rozkładu pola w szczelinie i uwzględnieniu jedynie podstawowej harmonicznej. Założenia upraszczające również w tym wypadku umożliwiają łatwą aplikację modeli. Rozważania zawarte w tym rozdziale są bardzo istotne ponieważ pokazują jak na podstawie zapisu samych równań można śledzić interakcje harmonicznych przestrzennego rozkładu pola w szczelinie powietrznej maszyny z harmonicznymi prądów uzwojeń. Przedstawiony zapis równań modeli, mimo uproszczonej formy pozwala na jakościową ocenę widma prądów stojana dla poszczególnych przypadków analizowanych ekscentryczności wirnika. Zaprezentowane formuły rozszerzają dobrze znane klasyczne postaci modeli matematycznych maszyn indukcyjnych, co zasadniczo podnosi wartość recenzowanej pracy.

Oryginalny wkład Autora polega na zapisie modeli matematycznych w formie użytecznych bibliotek dla pakietu Matlab/Simulink. Warto podkreślić, że przygotowane przez Autora oprogramowanie jest efektywnym inżynierskim narzędziem obliczeniowym, służącym do analiz stanów uszkodzonych maszyn indukcyjnych pracujących w układach napędowych.

Poprawność uzyskanych zależności Autor weryfikuje na drodze obliczeń numerycznych porównując te wyniki z wynikami pomiarów doświadczalnego silnika. Za najważniejsze i oryginalne osiągnięcie Autora należy uznać przeprowadzone analizy zmian amplitud charakterystycznych harmonicznych w pobliżu podstawowej harmonicznej, pojawiających się w prądach stojana w wyniku rozwijającego się uszkodzenia: asymetrii klatki wirnika czy ekscentryczności. Należy również podkreślić, że badania wykonano w bardzo szerokim zakresie, w którym uwzględniane były również różne poziomy obciążenia maszyny oraz występowanie asymetrii napięć zasilających.

Uzyskana zbieżność jakościowa wyników jest bardzo dobra natomiast zbieżność ilościowa jest na zadawalającym poziomie. Występujące w niektórych przypadkach rozbieżności wyników są przez Autora wnikliwie przeanalizowane i wyjaśnione. Pomimo pewnych uproszczeń i związanych z tym rozbieżności ilościowych Autor pokazuje użyteczne aspekty opracowanych modeli. Na uwagę zasługuje wnikliwa analiza trendów zmian amplitud charakterystycznych harmonicznych widma prądów stojana wskutek rozwijającego się uszkodzenia.

### **3. Uwagi krytyczne**

#### **3.1. Uwagi ogólne**

Formalna strona pracy posiada pewne mankamenty, jednakże jej treść jest prezentowana systematycznie a kolejność omawianych problemów jest właściwa i logicznie uzasadniona. Niestety zdarzają się błędy redakcyjne. Można zauważyć brak staranności w zapisie wzorów oraz w oznaczeniach. Ponadto, dużo jest powtórzeń tych samych formuł i wzorów, które można by było trochę uprościć albo zapisać w bardziej zgrabnej i czytelnej formie. Pewne wrażenie można odnieść, że Autor chciał wszystko dokładnie od początku wyjaśnić, stąd pojawiają się fragmenty w pracy dobrze znane, nawet z klasycznej literatury. Pomimo stosowania elementarnych wyjaśnień zdarzają się jednak przeskoki, które dla czytelnika nie zorientowanego w opisywanych zagadnieniach mogą być niejasne.

Przedstawione przez Doktoranta rozwiązania w części teoretycznej pracy są zaaplikowane w formie opracowanych algorytmów obliczeniowych. Autor wykazuje się wiedzą teoretyczną, w szczególności w zakresie modelowania maszyn elektrycznych, jak również biegłością i znajomością formułowania algorytmów oraz pisania programów komputerowych. Na wyróżnienie zasługuje język angielski, w którym praca jest napisana, a który nie jest językiem ojczystym Doktoranta. Nie będąc w żadnym przypadku specjalistą a jedynie zwykłym użytkownikiem tego języka odniosłem jednak wrażenie, że jest on klarowny. Pracę czyta się jednak trudno, gdyż jest bardzo „zmatematyzowana”.

Pomimo, że praca dotyczy konkretnych problemów diagnostycznych maszyny indukcyjnej, to jednakże ich rozwiązanie wymagało od Doktoranta opanowania szeregu dziedzin matematyki, elektrotechniki i programowania numerycznego. Wkład pracy Pana Alejandro Fernandez Gomeza w przygotowaniu tej rozprawy jest zatem naprawdę bardzo duży. Wnioski wypływające z pracy są sformułowane poprawnie i w całej rozciągłości potwierdzają postawioną tezę.

Literatura z której korzystał Doktorant jest dobrana wnikliwie i starannie, jakkolwiek Autor nie cytuje wszystkich wymienionych pozycji.

#### **3.2. Uwagi szczegółowe**

Uwagi szczegółowe zostały podzielone na dwie grupy: redakcyjne i dyskusyjne. Uwagi redakcyjne nie są związane ze stroną merytoryczną pracy i w najmniejszym stopniu nie wpływają na moją końcową ocenę, natomiast merytoryczne zastrzeżenia przedstawione zostały w formie uwag dyskusyjnych, do których Autor powinien się ustosunkować.

### 3.2.1. Uwagi redakcyjne

- 1/. Wzór (2.3) w 3 linijce jest  $\alpha_1$ , a powinno być  $\alpha_2$ ,
- 2/. We wzorze (3.49) występuje całka po powierzchni zamkniętej, a powinna być to zwykła całka powierzchniowa,
- 3/. Wzór (3.60) należy podkreślić, że dotyczy funkcji permeancji jednostkowej i poprawniej byłoby wprowadzić do tego wzoru  $\mu_0$  zamiast do formuły (3.59),
- 4/. We wzorze (3.63) na współczynnik skrótu, kąt  $\gamma$  jest kątem rozpiętości uzwojenia, a nie kątem pomiędzy uzwojeniami,
- 5/. We wzorach (3.77) i (3.78) błędnie oznaczono pochodne po czasie jako pochodne cząstkowe,
- 6/. We wzorach o numerze (3.97) wprowadzono niepotrzebnie  $\alpha, \beta$  co nie koresponduje z wzorami (3.90)-(3.95),
- 7/. We wzorze (3.99) zamiast oznaczenia kąta  $\alpha$  powinien być kąt położenia wirnika  $\square$ ,
- 8/. Nie zdefiniowano oznaczeń  $\omega_s, \omega_r$  występujących w układzie równań (3.104),
- 9/. Opis wzoru (3.109) jest niewłaściwy, gdyż nie występuje tam  $\gamma_r$  tylko jest  $\gamma_e$ ,
- 10/. Opis wzoru (3.111) jest niewłaściwy, gdyż nie ma tam  $J_r$  tylko jest  $J_e$ ,
- 11/. Użyte oznaczenie  $\alpha$  w formule (3.113) może być mylące,
- 12/. Wzory (3.120), (3.121), (3.122), (3.128), (3.129), (3.130) można by zapisać w bardziej przejrzystej i czytelnej formie, dotyczy to również formuł (3.136), (3.137), (3.138),
- 13/. Dla formuły (4.166) nie podano definicji współczynników indukcyjności  $L_{ss}^0, L_{ss}^1, L_{ss}^2$ ,
- 14/. Często niekonsekwentnie zapisywana jest liczba par biegunów „p” prosto lub kursywą np. wzory (4.167), (4.168),
- 15/. W formule (4.190) występuje  $A_s, A_r$  a wg opisu powinno być  $A_s, A_r$ ,
- 16/. Na str. 95 linijka 4 od góry jest określenie „engine”. Właściwsze wydaje się „motor”.
- 17/. We wzorze (5.200) zamiast  $I_n$  powinno być tak jak na Rys. 5.9. oznaczenie  $I_0$ ,
- 18/. W formule (6.224) dlaczego użyto oznaczenia  $\theta$  a nie jak wcześniej  $\square$ ,
- 19/. Na rysunkach 8.24, 8.25, 8.26, 8.27, 10.4, 10.5, 10.6, 10.7, 10.8, 10.9 błędnie podano opis w Hz zamiast w dB,
- 20/. Podpisy pod rysunkami w rozdziałach 8 i 10, które przedstawiają wyniki są niejasne. Nie wyjaśniają co jest dokładnie przedstawione na rysunkach.

### 3.2.2. Uwagi dyskusyjne

- 1/. Brak istotnego komentarza odnośnie pojawienia się składowej stałej w macierzy indukcyjności wzajemnych stojan-wirnik dla przypadku ekscentryczności mieszanej – formuła (4.171). Jest to dosyć spektakularne i wymaga wyjaśnień jakie harmoniczne permeancyjne decydują o współczynnikach macierzy  $M_{sr}^0$ .
- 2/. Formuła (4.169) miała dotyczyć indukcyjności własnych stojana, a oznaczenia są pomyłone i związane z indukcyjnościami wirnika. Czy zatem struktury macierzy występujących w tej formule jak i również w formule (4.170) są prawidłowe ?

- 3/. Brak wyjaśnień, jak struktury macierzy indukcyjności po transformacji do składowych symetrycznych zmieniają się dla przypadku ekscentryczności mieszanej, w stosunku do ekscentryczności statycznej i dynamicznej. Czy są to macierze pełne, a może współczynniki układają się w pewien charakterystyczny sposób ?
- 4/. Na podstawie wzoru (4.195) podany jest przepis na liczbę równań dla modelu bilansu harmonicznych bez uzasadnienia, że taka liczba równań jest niezbędna do uzyskania zadawalających rezultatów,
- 5/. Z rysunków 6.3 i 6.10 oraz 6.16 i 6.22 jasno nie wynika, w jaki sposób są zadawane uszkodzenia w simulinkowych modelach symulacyjnych maszyn indukcyjnych. Nie podano i nie omówiono dokładnie struktur tych modeli, jedynie zamieszczono mało czytelne schematy blokowe. Ten punkt wymaga dokładnego dodatkowego wyjaśnienia zwłaszcza, że modele simulinkowe związane są bezpośrednio z tezą pracy.
- 6/. Nie pokazano jak wyglądają rozkłady Fouriera funkcji permeancji jednostkowej dla analizowanych przypadków ekscentryczności, przez co wyniki opisujące współczynniki indukcyjności używane w obliczeniach przedstawionych w rozdziale 7 są mało czytelne.
- 7/. Pomimo licznych porównań nie doszukałem się dokładnych zestawień oraz porównań widm Fouriera dla prądów stojana wyznaczonych z modeli dynamicznych w stanie ustalonym i za pomocą metody bilansu harmonicznych.
- 8/. W obliczeniach zamieszczonych w rozdziale 8 podano, że uwzględniono współczynnik nasycenia, jednakże nie doszukałem się zarówno formuł, z których ten współczynnik był wyznaczony jak też nie podano jego wartości.
- 9/. Porównania wyników uzyskanych na stanowisku pomiarowym w ABB są bardzo skąpe i dotyczą tylko wartości skutecznej prądu, wartości prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego dla stanu ustalonego. W pracy jednakże nie prezentowano formuł do wyznaczenia momentu elektromagnetycznego.

#### **4. Wniosek końcowy**

Zamieszczone liczne uwagi nie wpływają na moją ostateczną pozytywną ocenę pracy. Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska Pana Alejandro Fernandez Gomeza pt. „Modele simulinkowe dla aplikacji napędowych uszkodzonych maszyn indukcyjnych” (Simulink Models of faulty induction machines for drives applications) stanowi oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego i dowodzi Jego umiejętności prowadzenia prac naukowych. Praca ta spełnia moim zdaniem wszelkie wymagania stawiane przez Ustawę o tytule naukowym i stopniach naukowych z 12 września 1990r. (Dz.U. nr 65 z 27.09.1990r. poz. 386) i w związku z tym przedkładam Radzie Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej wniosek o przyjęcie jej jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie do publicznej obrony.