

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 2015 r. Obejmuje ona 203 strony i zawiera na początku spis treści, wykazy symboli matematycznych, rysunków, tabel oraz skrótów, 11 rozdziałów oraz na końcu przegląd literatury.

2. Ocena pracy

2.1. Struktura pracy

Praca składa się z następujących części:

- Spisy treści, symboli, rysunków, tabel i skrótów,
- Rozdział 1, w którym przedstawiono wprowadzenie do tematu oraz motywację,
- Rozdział 2, zawierający przegląd uszkodzeń oraz technik diagnostycznych maszyn indukcyjnych,
- Rozdział 3, wprowadzający w zagadnienia modelowania matematycznego dla potrzeb diagnostyki wirnika maszyn indukcyjnych,

- Rozdział 4, przedstawiający aplikacje metody bilansu harmonicznego do analiz stanu ustalonego maszyny indukcyjnej w przypadkach ekscentryczności wirnika,
- Rozdział 5, opisujący stanowisko pomiarowe,
- Rozdział 6, pokazujący implementacje modeli dynamicznych uszkodzonych maszyn indukcyjnych w środowisku Matlab/Simulink,
- Rozdział 7, sprawdzający i potwierdzający prawidłowości jakościowe wyników uzyskanych za pomocą zaaplikowanych w programie Matlab modeli stanu ustalonego maszyn indukcyjnych z ekscentrycznością wirnika,
- Rozdział 8, weryfikujący wyniki obliczeń numerycznych z pomiarami laboratoryjnymi,
- Rozdział 9, przedstawiający możliwości aplikacyjne opracowanych modeli uszkodzonych maszyn indukcyjnych dla wbudowanego systemu FPGA/CPU,
- Rozdział 10, będący zestawieniem i podsumowaniem uzyskanych rezultatów badań,
- Rozdział 11, w którym zawarto najistotniejsze uwagi i wnioski,
- Spisy literatury dotyczącej pracy oraz publikacji Autora.

Praca ma charakter teoretyczno-obliczeniowy z weryfikacjami pomiarowymi, a jej struktura w sposób konsekwentny obejmuje wszystkie elementy niezbędne do przedstawienia uzyskanych rezultatów. Uważam zatem, że recenzowana praca pod względem struktury została przedstawiona w sposób poprawny.

2.2. Motywacja pracy

Wraz z rozwojem nowych technologii wytwarzania różnego rodzaju materiałów i urządzeń, technik cyfrowego sterowania obiektami technicznymi, akwizycji danych pomiarowych, analizy i przetwarzania sygnałów rośnie złożoność i odpowiedzialność współczesnych układów napędowych, w których silniki indukcyjne klatkowe są głównym elementem dla zautomatyzowanych procesów produkcyjnych i technologicznych. Z reguły układy napędowe z silnikami indukcyjnymi klatkowymi posiadają systemy zabezpieczeń i sygnalizacji, które ostrzegają przed niewłaściwymi stanami pracy napędu oraz powodują jego wyłączenie w przypadkach wystąpienia awarii lub krytycznych warunków pracy. Z łatwością można stwierdzić, że taki sposób kontroli stanu napędu jest niewystarczający. Należy znacznie większą uwagę poświęcić samej maszynie, która jest głównym elementem napędzającym system, zapewniającym ciągłość procesu produkcyjnego czy technologicznego. Zalecane jest objęcie badaniami profilaktyczno-diagnostycznymi maszyny napędowej na bieżąco w czasie rzeczywistym (on-line), w trakcie normalnej pracy. Czynności te powinny dostarczać

operatorowi napędu informacji o stanie technicznym maszyny. W przypadku uszkodzenia, poprzez działania diagnostyczne, łatwo można będzie określić jego rodzaj, miejsce i zakres. Dzięki ciągłemu monitorowaniu stanu technicznego maszyny elektrycznej możliwe jest wykrycie uszkodzeń we wczesnym stadium ich powstawania.

Obecnie stosuje się do produkcji maszyn i elementów napędowych coraz lepsze materiały pod względem jakości, wytrzymałości i niezawodności. Pomimo tego, nadal każda maszyna elektryczna, łącznie z napędzanym obiektem oraz układami zasilania i sterowania jest narażona na liczne awarie. Aktualnie, tylko dla nielicznych obiektów o priorytetowym znaczeniu ekonomicznym w procesie produkcyjnym zakładu przemysłowego, wykonuje się okresowo dodatkowe badania profilaktyczno-diagnostyczne. Mają one za zadanie stwierdzenie ewentualnych niekorzystnych zmian, które zaszły lub zachodzą w badanym obiekcie. Wynikiem tych badań jest wskazanie zaleceń dla dalszej eksploatacji lub stwierdzenie konieczności wykonania remontu.

Wyposażenie napędów, nie tylko tych odpowiedzialnych, w systemy diagnostyczne stanu elementów układu, w tym silnika, prowadzić może do istotnej redukcji kosztów obsługi technicznej oraz umożliwi znalezienie optymalnych metod i programów remontów. Poprzez okresową ocenę stanu technicznego, będzie można wykrywać powstawanie różnego rodzaju uszkodzeń i śledzić ich rozwój. Wczesne wykrycie niekorzystnych zjawisk zachodzących w silniku pozwoli uniknąć długotrwałych zakłóceń procesu technologicznego, wywołanych przez awarię maszyny oraz pozwoli z wyprzedzeniem właściwie zaplanować działania remontowo-eksploatacyjne.

Na potrzeby diagnostyki maszyn elektrycznych poszukuje się coraz to nowszych i bardziej skutecznych metod oceny ich stanu. Naukowcy i inżynierowie zajmujący się tym problemem proponują do oceny stanu maszyn indukcyjnych klatkowych wiele sposobów i metod diagnostycznych.

Na szczególną uwagę zasługują bezinwazyjne metody oceny stanu. Metody te, na podstawie dostępnych pomiarów prądów zasilających uzwojenia maszyny, napięć zasilających, drgań w różnych częściach obudowy i wału, momentów czy temperatury, w czasie normalnej eksploatacji, pozwalają z dużym prawdopodobieństwem określić aktualny stan maszyny.

Ze względu na rodzaj technik wnioskowania, aktualnie stosowane metody oceny stanu w bezinwazyjnych systemach diagnostycznych, można podzielić na trzy zasadnicze grupy:

- metody statystyczne i analizy sygnałów pomiarowo dostępnych,

- metody oparte o modele matematyczne maszyn,
- metody sztucznej inteligencji i systemy ekspertowe.

Ważnym zagadnieniem jest poprawienie efektywności energetycznej przez wcześniejsze wykrycie stanu awaryjnego maszyn elektrycznych, rozwój wiarygodnych modeli matematycznych, których wykorzystanie przynosi wymierne efekty ekonomiczne. Modele matematyczne pozwalają na dowolną analizę uszkodzeń i poznawanie zachowań, wad oraz właściwości maszyny. Możliwość uczenia systemów diagnostycznych, których działanie pozwala z wyprzedzeniem przewidzieć rozwijające się uszkodzenie w maszynie (w tym zbyt późno wykryte uszkodzenie może doprowadzić do awarii całego układu napędowego). Przedstawiony przez Autora, temat pracy jest nadal bardzo ważny i aktualny. Opracowane modele i uzyskane przez Autora rozwiązania pozwalają na właściwą ocenę aktualnego stanu maszyny jak również określenie symptomów rozwijającego się uszkodzenia w maszynie.

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 Autor 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 porównywania amplitud charakterystycznych harmonicznych prądów uzwojeń stojana z wartościami uzyskanymi pomiarowo. Wyniki te zamieszcza w dalszych częściach swojej pracy.

Należy zauważyć, że Autor oparł swoją pracę o osiągnięcia naukowe Prof. dr hab. inż. Tadeusza Sobczyka oraz kierowanego przez Niego Zespołu Naukowego.

2.4. Realizacja pracy

W rozdziale 1 Autor przedstawił motywację, która skłoniła Go do podjęcia tematu badań uszkodzonych maszyn indukcyjnych przy pomocy modeli w Simulinku. Ideą było możliwe uproszczenie równań uszkodzonej maszyny indukcyjnej, najlepiej do 4 równań. W ten sposób czas sprawdzania maszyny przy pomocy symulacji był stosunkowo szybki. Ma to duże znaczenie przy podejmowaniu decyzji o zakwalifikowaniu maszyny indukcyjnej jako uszkodzonej. Niezwykle ważnym przy tym było, aby tworzony model maszyny zachowywał istotne cechy maszyny uszkodzonej. Podjęte przez Doktoranta badania zawierały się w planie działań Unii Europejskiej o nazwie „Energy 2007-2012”, którego treścią było 20%-owe obniżenie zużycia energii elektrycznej.

Doktorant określił cel pracy jako „opracowanie modeli matematycznych silników elektrycznych i ich uproszczenie do układu 4 równań elektrycznych i 2 równań mechanicznych”. Przyjętym uproszczeniem było zastąpienie rzeczywistej klatki wirnika przez przyjęcie trójfazowego uzwojenia wirnika. W oparciu o literaturę założył, że wpływ właściwości wirnika oraz zjawisk fizycznych zachodzących w jego wnętrzu na prądy fazowe stojana jest taki sam dla rzeczywistej klatki wirnika, jak przy zastępczym uzwojeniu trójfazowym wirnika.

W rozdziale drugim Doktorant przedstawił klasyfikację uszkodzeń zachodzących w maszynie elektrycznej. Szczególnie opisał zjawiska zachodzące w maszynie indukcyjnej, takie jak przerwany pręt czy pierścień, statyczną, dynamiczną i mieszaną ekscentryczność. Opisał metody badania prądu fazy stojana ze względu na wykrywanie uszkodzeń.

Rozdział trzeci poświęcony jest metodom modelowania elektrycznych maszyn w celu uwzględnienia wymienionych uszkodzeń. Do wyprowadzenia wzorów stosował funkcję Lagrange’a przy wykorzystaniu funkcji uzwojeń (Winding Function Approach). Przedstawił różne układy odniesienia (reference frames) oraz transformacje współrzędnych, które do nich prowadziły. Przy pomocy tej metodyki otrzymał równania maszyny uwzględniające jej uszkodzenia typu pęknięty pręt czy odcinek pierścienia oraz różne typy ekscentryczności, w tym statyczną, dynamiczną oraz mieszaną.

W rozdziale czwartym przedstawił metodę bilansu harmonicznego do otrzymywania stanów ustalonych maszyny. Otrzymywał przy tym równania liniowe. Przy pomocy twierdzenia Floqueta otrzymał wzór na postać prądów stojana (4.149) w postaci rozwinięcia w szereg. Współczynniki indukcyjności maszyny też rozwijał w szereg Fouriera. Korzystając z metody bilansu harmonicznego doprowadzał równania maszyny indukcyjnej do postaci układu równań liniowych typu (4.159). Przy zastosowaniu tej metody do badania wspomnianych wcześniej uszkodzeń maszyny, należy równania maszyny sprowadzić do składowych

symetrycznych przy pomocy macierzy T_s (4.164) oraz T_r (4.165). Dodatkowym uproszczeniem jest uwzględnienie tylko podstawowej harmonicznej indukcji magnetycznej w szczelinie maszyny. Dlatego równania dla przypadku ekscentryczności statycznej dają się sprowadzić do układu czterech równań (4.183). Podobnie, dla ekscentryczności dynamicznej układ czterech równań ma postać (4.194).

Następne rozdziały są poświęcone rozwiązywaniu otrzymanych równań oraz udowodnieniu, że otrzymane rozwiązania są zgodne z pomiarami i pozwalają na identyfikację uszkodzenia maszyny.

Rozdział piąty poświęcony jest opisowi stanowiska badawczego. Składa się na nie silnik indukcyjny z możliwością wprowadzenia uszkodzenia typu pęknięty pręt czy odcinek pierścienia wirnika, jak też ekscentryczności statycznej, dynamicznej lub mieszanej. Obciążeniem jest prądnicą prądu stałego. Doktorant opisuje zastosowanie metody estymacji parametrów tego układu, potrzebne dla jego symulacji komputerowej. Po przeprowadzeniu symulacji w warunkach uszkodzenia maszyny indukcyjnej przebiegi prądów stojana są przedstawiane w postaci ich spektrów. Służą one do identyfikacji symulowanego uszkodzenia maszyny.

W rozdziale siódmym przeprowadzane są podobne symulacje, jednak przy wykorzystaniu metody bilansu harmonicznego (Harmonic Balance Method). Obliczane są stany ustalone. Porównanie otrzymanych spektrów (widm) prądów stojana z otrzymanymi spektrami w poprzednim rozdziale służy sprawdzeniu poprawności stosowanych metod, przy założonych uproszczeniach modeli. Dla ekscentryczności dynamicznej i mieszanej stwierdzono dużą zależność spektrów prądu stojana od liczby par biegunów maszyny.

W rozdziale 8 przeprowadzono sprawdzenie wyników symulacji z przebiegami otrzymanymi z testów laboratoryjnych modelu maszyny indukcyjnej. Przy uszkodzenia pręta stwierdzono zgodność częstotliwości występujących w widmie prądu stojana, lecz amplitudy harmonicznego były różne. Porównania były prowadzone przy różnej prędkości wirnika. Przedstawiono ewentualne powody tych różnic. Podobne badania wykonano dla każdego wyróżnionego typu ekscentryczności. Stwierdzono, że ewentualne różnice w amplitudach harmonicznego są spowodowane błędami w estymacji indukcyjności maszyny. Doktorant zauważył też, że dodatkowe częstotliwości widma prądu stojana powstają podczas pomiarów na skutek drgań mechanicznych. Wskazał na możliwości osiągnięcia większej zgodności pomiarów z obliczeniami.

W rozdziale 9 Doktorant przedstawił zastosowane oprzyrządowanie stosowane przy badaniu uszkodzonych maszyn indukcyjnych.

W rozdziale 10 przedstawiono dodatkowe informacje o parametrach modelu oraz o możliwościach rozszerzenia zakresu badań.

Należy stwierdzić, że założone przez Doktoranta cele badawcze w postaci:

- a) stworzenie biblioteki modeli dynamicznych uszkodzonych silników indukcyjnych
- b) stworzenie stanowiska badawczo-pomiarowego do badania tych maszyn
- c) sprawdzenie wyników symulacji i pomiarów i wyciągnięcie wniosków o poprawności zastosowanych metod

zostały przez Doktoranta w pełni dokonane. Autor stwierdził, że pomimo dokonanych uproszczeń, opracowany przez Niego model nadaje się do celów diagnostyki maszyn indukcyjnych. Posłużył się przy tym zbiorczym zestawieniem oczekiwanych podczas awarii pulsacji. Zostały one zebrane w postaci tabeli III.

3. Uwagi krytyczne

3.1. Uwagi ogólne

Praca zawiera bardzo duże uproszczenia, nie uwzględniono w proponowanych modelach efektu nasycenia czy histerezy, efektu wypierania prądów, prądów wirowych i ich wpływu na identyfikację częstotliwości, jak również wpływu zmiany prędkości obrotowej spowodowanej ekscentrycznością statyczną, dynamiczną czy najczęściej mieszaną. Metody stosowane w pracy przede wszystkim nadają się do identyfikacji częstotliwości przy stałej prędkości.

3.2. Uwagi szczegółowe

1. Objaśnienia do wzoru (2.1) są niewystarczające.
2. Wzór (3.106), (3.110), czy jest uwzględniona tylko podstawowa harmoniczna ?
3. Co wniosłyby wyższe harmoniczne (również żłobkowe) do analizy przebiegów ?
4. Proszę wyprowadzić (uzasadnić) wzór (3.112) określający współczynnik asymetrii k_{as} i symetrii k_s .
5. Co oznacza $r(x)$ we wzorze (3.119) oraz $s(\varphi)$ we wzorze (3.135) ?
6. Wzory (3.120, 3.121, 3.122) – czym uzasadnione jest występowanie dwukrotne w każdym wzorze tych samych macierzy ?

7. Czy można w łatwy sposób uzasadnić fakt, że dla SE (ekscentryczności statycznej) pulsacja zależna od kąta obrotu φ dla indukcyjności wirnika równa się $2p \cdot \varphi$, natomiast dla indukcyjności wzajemnej równa się $p \cdot \varphi$?
8. Dlaczego we wzorach (3.123) na $H(\varphi)$ jest zależność od kąta φ a nie od $p \cdot \varphi$? W związku z tym, czy i które człony są opuszczone przy przekształceniu do wzoru (3.124)?
9. Co oznacza kąt φ' we wzorach (3.136) i (3.137) dla ME (ekscentryczności mieszanej)?
10. Wyjaśnić błędy występujące w zapisie wzorów (4.143), (4.144), (4.147), (4.148).
11. Co oznacza Ω_n oraz Ω we wzorze (4.147) – czy nie powinno to być Ω_s oraz Ω_m ? Podobne uwagi do wzoru (4.149).
12. Wyjaśnić rolę φ' we wzorach (4.161 do 4.163). Dlaczego te wzory są napisane tak, że powtarzają się w nich dwukrotnie te same macierze? Dlaczego dla ME we wzorach na indukcyjność własną (3.136) i (4.161) nie ma zależności od $2p \cdot \varphi$, która jest uwzględniona we wzorze (3.128) dla DE (ekscentryczności dynamicznej)? Przecież ME zawiera w sobie elementy DE.
13. Skąd biorą się zapisy z sumami ze współczynnikami m we wzorach (4.161 do 4.163)? Dlaczego nie odpowiadają im człony zależne od (mp) w występujących w tych wzorach macierzach?
14. Błędne oznaczenia we wzorze (4.169). Które harmoniczne przestrzenne są wykorzystywane we wzorze (4.168), a które w (4.169)?
15. Wzory (3.120) oraz (4.173) są te same, następne wzory też się powtarzają.
16. Wzory (4.176) i (4.179) są napisane „for generic pole pair number p ”. Po co je powtarzać? Brak jest jednak określenia $L_{\sigma_s^0}$, $L_{\sigma_s^1}$, $L_{\sigma_s^2}$.
17. Wzór (4.195) podaje liczbę równań n_{eq} przy uwzględnieniu harmonicznych żłobkowych. Istotą pracy jest nieuwzględnianie harmonicznych żłobkowych, to dlaczego uwzględniane są one przy określeniu n_{eq} ?

18. Rysunki 6.3 i 6.10 oraz 6.16 i 6.22 nie wyjaśniają sposobu uwzględniania zakładanych uszkodzeń w modelach symulacyjnych maszyn indukcyjnych. Nie znamy równań, nie wiemy ile i jakie harmoniczne są uwzględniane w przebiegach indukcyjności maszyny. Pokazany jest tylko schemat blokowy. Domyślam się, że poczyniono te same uproszczenia, które były zrobione we wcześniejszych wyprowadzonych wzorach. Czy przy określeniu ME uwzględniono większą ilość harmonicznych przestrzennych? Czy przyjęcie tylko podstawowej harmonicznej okładu uzwojeń stojana skutecznie eliminuje (nie przepuszcza) wszelkie inne (również żłobkowe) harmoniczne?
19. Proszę wyjaśnić, dlaczego modele SE i DE, przedstawione wzorami (4.182) i (4.193) dają się uprościć odpowiednio do (4.183) i (4.194). Czy wzory (4.172) też dadzą się tak uprościć i dlaczego ?
20. Jeśli nie uwzględnia się harmonicznych żłobkowych, dlaczego ilość równań (7.235) dla ME uzależnia się od ilości żłobków w stojanie? Nie jest to wyjaśnione w pracy.
21. Odczuwa się brak wyprowadzeń (czy uzasadnienia) wzorów (10.242) i (10.243) na współczynniki k_{as} . Wyjaśniłoby to wiele wątpliwości, które są związane z zastąpieniem uszkodzonej klatki wirnika przez uszkodzone uzwojenie trójfazowe wirnika. Jak były obliczane przebiegi na rys. 10.2 i 10.3 ?

4. Wniosek końcowy

Zamieszczone uwagi nie wpływają na moją 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.