

dr hab. inż. Damian Mazur, prof. PRz

Rzeszów, dnia: 25.11.2018 r.

Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki

Wydział Elektrotechniki i Informatyki

Politechnika Rzeszowska

tel. (17) 743 2469, mazur@prz.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Arkadiusz Duda

pt. „Diagnozowanie silników indukcyjnych klatkowych przy wykorzystaniu wpływu nieliniowości obwodu magnetycznego”

dla Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki w Krakowie, na zamówienie E-0/4/366/2018 Dziekana, prof. dr hab. inż. Adama Jagiełło, z dnia 28.09.2018 r.

1. Przedmiot rozprawy

Wybór tematyki rozprawy należy uznać za zasadny oraz wymagający wiedzy z zakresu elektrotechniki i maszyn elektrycznych, a w szczególności metod diagnozowania uszkodzeń maszyn indukcyjnych. Rozprawa zawiera wynik prac badawczych i eksperymentalnych, prowadzonych przez mgr inż. Arkadiusza Dudę, koncentrujących się na wpływie rozpoznania na ile skuteczne diagnostycznie mogą być odkształcenia w przebiegach składowych zerowych napięcia i prądu, w stosunku do dotychczas wykorzystywanych sygnałów, którym głównie było spektrum prądu stojana, a także w jakim stopniu dodatkowe sygnały powiększają informacyjną bazę diagnostyczną dla silników indukcyjnych.

Obecnie w eksploatacji napędów elektrycznych dominują metody monitorowania i badania oparte na analizie sygnałów diagnostycznych w dziedzinie czasu i częstotliwości. W układach napędowych z silnikami indukcyjnymi podstawowymi sygnałami diagnostycznymi są prąd fazowy stojana oraz drgania mechaniczne, w których widoczne są symptomy uszkodzeń elektrycznych i mechanicznych. Najczęściej stosowaną metodą monitorowania i diagnostyki maszyn elektrycznych jest analiza widmowa prądu stojana MCSA (ang. Motor Current Signature Analysis) oraz analiza widmowa drgań mechanicznych. W odróżnieniu od innych uszkodzeń silników indukcyjnych (np. uszkodzenia łożysk, uszkodzenia uzwojeń wirnika czy stojana) ekscentryczność maszyn wirujących

jest trudno precyzyjnie zamodelować (w odniesieniu do wskazania rodzaju ekscentryczności oraz jego stopnia zaawansowania). W zależności od ułożenia osi wirnika i osi symetrii otworu stojana rozróżnia się – ekscentryczność statyczną: o stałym położeniu minimalnej szczeliny w przestrzeni; dynamiczną – położenie minimalnej szczeliny przemieszcza się wzdłuż obwodu stojana – oraz mieszaną, gdy jednocześnie występuje ekscentryczność statyczna i dynamiczna. W silniku indukcyjnym z ekscentrycznością występują niekorzystne zjawiska, do których można zaliczyć: nadmierne obciążenie łożysk i ich nagrzewanie; przyspieszone zużycie smaru; wzmożone efekty wibroakustyczne (hałas, drgania); zacieranie wirnika o stojan (w skrajnych przypadkach); możliwy wzrost wartości potencjalnych prądów łożyskowych; z powodu zwarć metalicznych w łożyskach przy dużym skośnym ustawieniu wirnika. Tego typu awarie zwykle nie pojawiają się nagle i dlatego możliwa jest obserwacja trendu zjawiska, co jest jedną z podstaw diagnozowania i wypracowywania – na drodze badań eksperymentalnych i technik symulacyjnych – określonych metod diagnostycznych.

Z powodzeniem można w tym celu zastosować modele matematyczne maszyn, w szczególności modele połowo-obwodowe, pozwalające z dużą precyzją odwzorować pracę maszyny z uszkodzeniem. Detekcja i ocena ekscentryczności jest bardzo ważnym, ale i kłopotliwym elementem monitorowania stanu technicznego silników indukcyjnych. Wynika to z faktu, że tolerancje szczeliny powietrznej pomiędzy stojanem a wirnikiem są bardzo małe. Niewielkie przekroczenie granic tolerancji może spowodować poważne uszkodzenie maszyny (tarcie stojana o wirnik, a w konsekwencji uszkodzenie stojana lub wirnika).

Modele matematyczne silników indukcyjnych klatkowych sformułowane dla stanów ustalonych, uwzględniające wpływ nasycenia magnetowodu na widmo prądu stojana, gdzie widma prądów stojana wyznacza się numerycznie metodą bilansu harmonicznych a nasycenie uwzględnia się za pomocą funkcji permeancji, pozwalają na diagnozowanie ekscentrycznego położenia wirnika poprzez analizę spektralną prądów stojana.

Obecnie podczas procesu projektowania maszyny, stosuje się zaawansowane programy komputerowe, bazujące na Metodzie Elementów Skończonych w celach ulepszenia parametrów ruchowych maszyny. Jedną z skutecznych metod diagnozowania stanu maszyn indukcyjnych klatkowych jest metoda pomiaru i analizy strumienia unipolarnego. Metodę tą można użyć do wykrywania zwarć zwojowych, ekscentryczności wirnika i oceny stanu klatki.

Wykorzystanie składowej zerowej napięcia w wykrywaniu niesymetrii uzwojeń wirnika silnika pierścieniowego, wpływ uszkodzenia uzwojeń wirnika silnika indukcyjnego pierścieniowego na napięcie kolejności zerowej i jego widmo, analizy metod wykrywania pękniętych prętów wirnika i wpływu niesymetrii zasilania silników klatkowych z uzwojeniami stojana skojarzonymi w gwiazdę przy

wykorzystaniu napięcia neutralnego jako sygnału zawierającego informacje o stanie maszyny, sposób diagnozowania stanu silnika klatkowego w oparciu o składową zerową prądu, przy skojarzeniu uzwojeń stojana w trójkąt zostały omówione we wprowadzeniu do pracy doktorskiej.

Doktorant sformułował następującą tezę pracy: *"Jaki wpływ ma nieliniowości obwodu magnetycznego silnika indukcyjnego klatkowego, która objawia się, podczas jego pracy, generowaniem częstotliwości charakteryzujących spektra takich wielkości pomiarowych, jak składowe symetryczne kolejności zerowej napięcia i prądu stojana, które można wykorzystać do diagnozowania uszkodzeń tych silników."*

Przeprowadził badania polowo-obwodowe uszkodzeń silników indukcyjnych w środowisku Maxwell-Ansys, badania porównawcze uszkodzeń silnika z liniowym i nieliniowym obwodem magnetycznym, badania eksperymentalne (a) pomiar napięcia neutralnego silnika indukcyjnego z uzwojeniami stojana połączonymi w gwiazdę, b) Pomiar prądu neutralnego silnika z uzwojeniami stojana połączonymi w gwiazdę z przewodem neutralnym, c) Pomiar składowej zerowej prądu silnika połączonego w trójkąt zaproponowanych i opracowanych metod diagnozowania uszkodzeń maszyn indukcyjnych, w których wykazał możliwość weryfikacji wpływu tych modeli, w zależności od ich konfiguracji, na efektywność diagnostyczną.

Momenty pasożytnicze wpływają na właściwości maszyny indukcyjnej. Mogą one zakłócić prawidłową pracę maszyny, zwłaszcza w okolicach swoich prędkości synchronicznych. Uzależnione to jest od kąta początkowego między wirnikiem a stojanem. W najbardziej niekorzystnej sytuacji jest możliwość synchronizacji przez moment pasożytniczy, który dla swej prędkości synchronicznej staje się momentem synchronicznym. podatne na to zjawisko są silniki mające nieprawidłowy skos lub proste pręty wirnika. Okazuje się również, że nasycenie obwodu magnetycznego maszyny może wywołać momenty pasożytnicze. Zjawiska te uwidaczniają się nie tylko w przebiegach momentu, lecz również w prądach stojana i są silnie ze sobą powiązane.

W normalnych warunkach pracy konstrukcja maszyny zapewnia stabilne współdziałanie sił elektromagnetycznych i mechanicznych ograniczając poziom drgań oraz zakłóceń. Pojawienie się uszkodzenia zakłóca równowagę między tymi siłami przyspieszając rozwój uszkodzenia. Około 80% uszkodzeń mechanicznych prowadzi do powstania ekscentryczności w silniku. Ponadto, ekscentryczność może powstać również w czasie produkcji maszyny lub w procesie montażu. Występowanie ekscentryczności często nie wyklucza maszyny z dalszej pracy. W przypadku wykrycia ekscentryczności jej poziom powinien być kontrolowany, ponieważ z reguły ma tendencję do pogłębiania się i w konsekwencji prowadzi do uszkodzenia maszyny. Należy zwrócić uwagę na to, że równoczesne wystąpienie kilku awarii może powodować takie same skutki co w konsekwencji utrudnia ocenę ich ilościowego wpływu na stan maszyny. Na przykład równoczesne wystąpienie

ekscentryczności statycznej i niesymetrii zasilania lub ekscentryczności dynamicznej i przerwy w obwodzie wirnika dają takie same objawy.

Do realizacji wspomnianych zadań, opracowano i rozwija się nowe standardy diagnostyki maszyn. Jednak ciągle wyzwaniem dla naukowców i przemysłu jest taka organizacja systemów monitorowania, aby działały one skutecznie i efektywnie.

2. Cel, zakres i układ pracy

Rozprawa doktorska liczy 149 stron, łącznie ze spisem treści, indeksem oznaczeń, skrótów i terminów obcojęzycznych, bibliografią oraz spisami tabel i rysunków. Praca składa się z 5 rozdziałów wraz z podsumowaniem, a bibliografia zawiera 75 pozycji, w tym 9 prac współautorskich.

Celem rozprawy doktorskiej było znalezienie nowych i skutecznych metod diagnozowania silników indukcyjnych klatkowych z wykorzystaniem wpływu nieliniowości obwodu magnetycznego.

Doktorant w rozprawie zawarł wyniki analiz uwzględnienia wpływu nieliniowości obwodu magnetycznego do poszukiwania nowych charakterystycznych cech do oceny diagnostycznej uszkodzeń silników indukcyjnych klatkowych,

Zmiany charakterystycznych cech diagnostycznych dla silników indukcyjnych klatkowych wywołane wpływem nieliniowości obwodu magnetycznego, w zależności od skojarzenia uzwojeń, są dobrze widoczne w składowych zerowych prądu i napięcia.

Doktorant poprzez liczne eksperymenty numeryczne i pomiarowe dla różnych uszkodzeń silnika zauważył występowanie charakterystycznych częstotliwości właściwych tylko danemu typowi uszkodzenia.

Do sklasyfikowania tych cech doktorant opracował model matematyczny silnika z uwzględnieniem nieliniowości obwodu magnetycznego. Rozważał wpływ efektów nasycania się magnetowodu od sformułowania modelu permeancji, wyznaczonego na podstawie rozkładu indukcji pola magnetycznego w szczelinie metodą ciągłej sieci reluktancyjnej.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeniach rozkładu pola magnetycznego maszyny metodą sieci reluktancyjnej przyjęto jednostkową funkcję modelującą wpływ nasycenia. Funkcja permeancji zmieniała swoją postać w zależności od rodzaju szczeliny powietrznej. Równania napięciowo-prądowe maszyny, które zostały oparte na przedstawionym modelu permeancji, zostały transformowane z naturalnego układu odniesienia do układu składowych symetrycznych. Transformacja uporządkowała strukturę macierzy indukcyjności, co zostało później wykorzystane do sformułowania równania składowej zerowej napięcia. Dzięki analizie wyrażenia na składową zerową napięcia w stanie ustalonym wyprowadzono wzory na częstotliwości charakterystyczne dla

poszczególnych przypadków: symetrii, uszkodzonej klatki wirnika, ekscentryczności: dynamicznej, statycznej i mieszanej, niesymetrii napięć zasilania i niesymetrii wewnętrznej stojana. Przeprowadzona analiza matematyczna modelu silnika umożliwiła identyfikację symptomów uszkodzenia. Zaproponowano algorytm wyznaczania częstotliwości charakterystycznych, który w prosty sposób może wyselekcjonować częstotliwości harmonicznych, powstałych wskutek uwzględnienia nieliniowości obwodu magnetycznego. Podczas analizy zagadnienia skupiono się również na następstwach skojarzenia uzwojeń stojana na składową zerową napięcia i prądu. Każdy sposób połączenia uzwojeń posiada swoje właściwości, a jego wpływ na składową zerową prądu i napięcia został wytłumaczony i zilustrowany na rys. 2.10-2.

Kolejną częścią były badania symulacyjne, które zostały przeprowadzone na uproszczonym modelu obwodowym silnika w środowisku obliczeniowym *Matlab*. Wykonano symulacje uwzględniające charakter obwodu magnetycznego i rodzaju uszkodzenia. Poddano analizie FFT składową zerową napięcia oraz składową zerową prądu. Na rysunkach przedstawiających widma zaznaczono częstotliwości charakterystyczne wyznaczone na podstawie wcześniej wyprowadzonych wzorów, zidentyfikowane dla każdego rodzaju uszkodzenia. Harmoniczne o częstotliwościach charakterystycznych, które zostały wyznaczone na podstawie składowej zerowej napięcia, wystąpiły również w składowej zerowej prądu, co z kolei uzasadniało użycie w analizie częstotliwościowej tych samych wzorców częstotliwości.

W celu badania metody diagnozowana silników indukcyjnych opartej na wykorzystaniu nieliniowości magnetowodu wykonano symulacje w środowisku obliczeniowym *Maxwell 2D* na modelu połowo-obwodowym. Badania te pozwoliły na wygenerowanie wzorców dla każdego z rodzajów uszkodzeń, co w warunkach laboratoryjnych nie jest możliwe. Wykonano serie symulacji dla liniowego i nieliniowego obwodu magnetycznego z podziałem na rodzaj uszkodzenia i sposób połączenia uzwojeń stojana. Dzięki zastosowaniu rdzeni magnetycznych o liniowej i nieliniowej charakterystyce wyselekcjonowano i przedstawiono harmoniczne powstałe wskutek nasycenia się magnetowodu dla każdego przypadku stanu maszyny. Wygenerowane wzory na częstotliwości charakterystyczne zostały zastosowane do analizy widmowej składowej zerowej prądu w silnikach skojarzonych w gwiazdę z przewodem neutralnym, jak i w trójkąt. Przeprowadzona analiza porównawcza amplitud potwierdziła poprawność identyfikacji uszkodzeń przeprowadzonych w rozdziale 2.9.

Badania laboratoryjne przeprowadzono dla trzech rodzajów wirnika (symetrycznego, z uszkodzonymi prętami, z ekscentrycznością) oraz dla trzech sposobów połączenia uzwojenia stojana. Do analizy częstotliwościowej zmierzonych sygnałów wykorzystano częstotliwości charakterystyczne wygenerowane na podstawie tabeli 2.9-3. Amplitudy wyznaczonych harmonicznych porównano z

amplitudami odpowiadających im harmonicznym w warunkach symetrii. Analiza porównawcza wykazała, że niezależnie od sposobu skojarzenia uzwojenia w każdym z przypadków uszkodzenia zaproponowana metoda diagnozowania jest skuteczna. W przeprowadzonych badaniach: polowo-obwodowych i laboratoryjnych zauważono, że częstotliwości charakterystyczne dla niektórych uszkodzeń pokrywają się. W rozdziale 3.4 przedstawiono sposób odróżnienia tych przypadków dzięki dodatkowym badaniom.

Autor rozprawy poprzez liczne badania symulacyjne i weryfikację pomiarową dowiódł postawioną tezę, że wpływ nieliniowości obwodu magnetycznego można wykorzystać do skutecznego diagnozowania uszkodzeń silników indukcyjnych klatkowych.

3. Merytoryczna ocena pracy

Cel pracy zrealizowano poprzez:

- Przeprowadzenie identyfikacji źródeł ekscentryczności w analizowanych maszynach. Określenie widma składowych symetrycznych kolejności zero napięcia i prądu stojana z wyróżnieniem częstotliwości charakteryzujących poszczególne uszkodzenia.
- Przeprowadzenie symulacji komputerowej, za pomocą modelowania polowo-obwodowego, pracy silnika indukcyjnego w warunkach symetrii i niesymetrii spowodowanej uszkodzeniami. Wyniki obliczeń potraktowano jako wzorcowe, oddające ściśle poszczególne przypadki uszkodzeń. Wynika to z faktu, że za pomocą metody elementów skończonych oraz związanego z nią modelu obwodu elektrycznego można jednoznacznie modelować poszczególne uszkodzenia bez interakcji innych czynników.
- Przeprowadzono pomiary silników nieuszkodzonych i uszkodzonych na obiektach laboratoryjnych, które zostały zaprojektowane i wykonane najlepiej jak to było możliwe w warunkach technicznych i finansowych, które były do dyspozycji. Wyniki pomiarów skonfrontowano z wynikami obliczeń polowo-obwodowych poprzez porównanie widm, z których wyróżniono częstotliwości charakterystyczne dla uszkodzeń.

Wykonano badania silnika indukcyjnego klatkowego dla dwóch kategorii niesymetrii wewnętrznej maszyny:

- niesymetrii elektrycznej spowodowanej pogorszeniem połączeń w klatce wirnika wskutek pęknięć prętów lub pierścieni zwierających,
- niesymetrii magnetycznej spowodowanej ekscentrycznym ułożeniem wirnika względem stojana.

- Przeprowadzono badaniami wpływu niesymetrii zewnętrznej i wewnętrznej obwodu stojana na rozpatrywane sygnały oraz wyróżniono klasyfikację ekscentryczności na tzw. statyczną, dynamiczną i mieszaną. W celu pokazania tego, że nieliniowość obwodu magnetycznego generuje dodatkowe sygnały diagnostyczne, analizowane przypadki w badaniach połowo-obwodowych i obwodowych podzielono na dwie główne grupy:
 - I. Obliczenia maszyny z liniowym obwodem magnetycznym.
 - II. Obliczenia z obwodem nieliniowym.
 W każdej grupie dokonano badania silnika z uzwojeniami połączonymi:
 - A. W gwiazdę.
 - B. W gwiazdę z przewodem neutralnym.
 - C. W trójkąt.
 Rozpatrzono pracę silnika:
 1. Symetrycznego.
 2. Z niesymetrią elektryczną obwodu klatki.
 3. Z ekscentrycznością statyczną wirnika.
 4. Z ekscentrycznością dynamiczną wirnika.
 5. Z ekscentrycznością mieszaną wirnika.
- Zidentyfikowanie metod i sygnałów diagnostycznych, charakteryzujących się potencjałem w zakresie poprawy monitorowania stanu maszyny. Sygnał składowej zerowej napięcia zawiera dodatkowe składniki, o częstotliwościach będących skutkiem niesymetrii wirnika, zinterpretowane w oparciu o obwodowy model silnika
- Przeprowadzenie badań, pokazujących że metoda diagnozowania uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem efektów nasycenia obwodu magnetycznego jest niezwykle skuteczna w oparciu o analizę składowej zerowej napięcia i prądu, gdzie wpływ nasycenia jest najbardziej widoczny. Metoda z powodzeniem może być wykorzystywana na stacjach prób w zakładach produkujących trójfazowe silniki indukcyjne w celu sprawdzenia symetrii maszyny i jakości wykonania.

- z badań porównawczych wynika, że składowa zerowa napięcia jest sygnałem bardziej wrażliwym na niesymetrię wewnętrzną, niż prąd fazowy stojana, a więc może być stosowana w systemie permanentnego zabezpieczenia silnika
- Przeprowadzenie analizy możliwości i dokonanie oceny przydatności i znaczenia określonych funkcji systemów diagnostyki maszyn w procesie poprawy efektywności energetycznej. Dobre opisanie modelu, uporządkowanie formuł opisujących charakterystyczne częstotliwości. zilustrowanie na przykładach i zestawieniach tabelarycznych
- Podanie przepisów na poszukiwanie nowych charakterystycznych cech, wyjaśnienie do tej pory mało znanych i używanych częstotliwości do oceny,
- Opisanie modelu obwodowego i przedstawienie wyników, weryfikacja modelem polowym oraz przez eksperyment pomiarowy

Poprzez zrealizowanie celu pracy, udowodniono tezę, że „Jaki wpływ ma nieliniowości obwodu magnetycznego silnika indukcyjnego klatkowego, która objawia się, podczas jego pracy, generowaniem częstotliwości charakteryzujących spektra takich wielkości pomiarowych, jak składowe symetryczne kolejności zerowej napięcia i prądu stojana, które można wykorzystać do diagnozowania uszkodzeń tych silników.” Wyniki badań poddano szerokiej analizie i w sposób przejrzysty przedstawiono na wykresach oraz w formie tabelarycznej.

Rezultaty przeprowadzonych badań mają zastosowanie praktyczne i mogą zostać wykorzystane przez projektantów, serwisantów maszyn elektrycznych.

4. Szczegółowe uwagi formalne i merytoryczne

Układ redakcyjny pracy jest przejrzysty i logiczny, co znakomicie ułatwia jej lekturę. Wątpliwości nie budzi również strona językowa. W pracy występują pojedyncze błędy głównie edytorskie, które nie mają istotnego wpływu na jakość pracy.

Uwagi krytyczne i pytania

Wnikliwa analiza pracy nasuwa kilka krytycznych uwag i pytań. Uwagi te jednak raczej wskazują kierunki dalszych badań, związanych bezpośrednio z tematyką poruszanej w pracy doktorskiej. Nie są argumentami dyskredytującymi osiągnięcia Doktoranta.

1. MCSA – analiza prowadzona w oparciu o widmo prądu a nie widmo składowych symetrycznych (strona 7).

2. Brak płynnego przejścia pomiędzy rozdziałami i podrozdziałami.
3. Jaki wpływ będzie miało asymetryczne obciążenie, asymetryczne zasilania na pulsację momentu?
4. Czy uwzględnił Pan stopień i rodzaj niewyważenia maszyny?
5. Jakie zna Pan metody identyfikacji źródeł drgań, które występują przy różnych ekscentrycznościach oraz uszkodzeniach wirnika?
6. Czy Pana metoda sprawdziłaby się również w diagnostyce maszyn z magnesami trwałymi?
7. Jakie zna Pan metody sztucznej inteligencji wykorzystywane w diagnostyce i monitorowaniu ekscentryczności czy uszkodzeń maszyn?

Należy podkreślić, że powyższe uwagi nie mają wpływu moją wysoką merytoryczną ocenę pracy.

Tematy do rozważenia

1. Jak określa się zależność przepływu w żelazie (spadku napięcia magnetycznego) Θ_{Fe} i od czego uzależnia jego wartość.
2. Jak uwzględnia się nasycenia żelaza w obliczeniach połowo-obwodowych Maxwell 2D.
3. Czy czasami nie jest lepiej przeprowadzić badania diagnostyczne przy mniejszym napięciu aby uwolnić się od rozprożeń harmonicznym wywołanych nasyceniem żelaza.
4. Proszę pokazać jak rozwiązany został problem z nakładającymi się harmonicznymi, które mogą być wywołane przez różny typ uszkodzeń.
5. Proszę ustosunkować się do metody ciągłego monitorowania drgań mechanicznych i stosowania do ich analizy np. sieci neuronowych.
6. Autor skoncentrował się na składowych zerowych napięć i prądów.
Proszę przedstawić przewagę analizy tych zmiennych w porównaniu do analizy innych składowych przebiegów.

Ogólna ocena rozprawy i wniosek końcowy

Za główne osiągnięcia pracy uważam:

Doktorant wykazał wpływ w jakim stopniu dodatkowe sygnały powiększają informacyjną bazę diagnostyczną dla silników indukcyjnych.

- wykazał celowość stosowania przedstawionych i opracowanych metod diagnostycznych,
- opracował wytyczne dotyczące monitorowania i diagnostyki maszyn,
- sformułował wnioski, które przyjmują formę dobrej praktyki podczas planowania i realizacji systemów oceny stanu maszyny elektrycznej.

Doktorant wykazał się umiejętnością poprawnego wyboru i sformułowania naukowego celu pracy. Następnie logicznie i konsekwentnie, z dobrą znajomością zagadnienia, cel ten zrealizował.

Stwierdzam, że rozprawa mgr inż. Arkadiusza Dudy spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim zawarte w Ustawie o tytule i stopniach naukowych. W związku z tym wnoszę o wyróżnienie rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony. Wniosek o wyróżnienie motywuję wysoką jakością oraz charakterem przeprowadzonych badań naukowych.

Damian Metz