

ca

Gliwice, dn. 25.03.2020 r.

**Dr hab. inż. Roman Krok, prof. PŚ**  
Politechnika Śląska  
Wydział Elektryczny  
Katedra Elektrotechniki i Informatyki

### Recenzja

rozprawy doktorskiej **mgra inż. Damiana Hallmanna**  
pt. *„Analiza pracy silnika indukcyjnego małej mocy zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne i interharmoniczne z wykorzystaniem modelu polowego”*

Recenzję rozprawy doktorskiej wykonałem na zlecenie Dziekana Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni prof. dra hab. inż. Krzysztofa Góreckiego - pismo RUE/D/12/02/2020 z dnia 13.02.2020 roku. Praca dostarczona do recenzji zawiera 149 stron.

#### **1. Ocena wyboru tematu i celu rozprawy**

W wielu publikacjach podejmowany jest problem różnego typu zaburzeń napięcia w systemach elektroenergetycznych. Jednym z nich jest występowanie subharmonicznych i interharmonicznych napięcia wywołanych najczęściej pracą odbiorników nieliniowych oraz niektórych odnawialnych źródeł energii. Nieustanny wzrost liczby tych odbiorników oraz źródeł energii prowadzi do ciągłego zwiększania poziomu tych zaburzeń.

Subharmoniczne i interharmoniczne występujące w napięciu sieci mają negatywny wpływ na pracę wielu urządzeń elektrycznych. Zapewnienie właściwych warunków pracy urządzeń wymaga zatem określenia dopuszczalnego poziomu tych zaburzeń. Konieczne jest więc opracowanie modeli symulacyjnych dla różnych urządzeń elektrycznych do badań wpływu subharmonicznych i interharmonicznych napięcia na ich pracę oraz prowadzenie badań eksperymentalnych.

W publikacjach zwraca się uwagę na fakt, że subharmoniczne i interharmoniczne napięcia mają szczególnie szkodliwy wpływ na silniki indukcyjne, powodując między innymi wzrost prądu, zwiększenie strat mocy, podwyższenie temperatury uzwojeń oraz nadmierne wibracje i skrócenie żywotności.

**Biorąc pod uwagę przedstawione fakty, uważam wybór tematu rozprawy doktorskiej za w pełni uzasadniony.**

Prezentowane w literaturze uproszczone modele silnika indukcyjnego do badań wpływu subharmonicznych i interharmonicznych napięcia na jego pracę pomijają wiele istotnych zjawisk, a w konsekwencji prowadzą do znacznych błędów. Doktorant opracował nowy polowo - obwodowy model silnika indukcyjnego, który dodatkowo (w porównaniu do opisanych w literaturze) uwzględnia jednocześnie wpływ wahań prędkości obrotowej, nieliniowości obwodu magnetycznego oraz zależności rezystancji uzwojeń od temperatury na pracę silnika zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne i interharmoniczne. W celu potwierdzenia poprawy dokładności odwzorowania takich wielkości charakteryzujących stan pracy silnika, jak prąd, straty mocy i temperatura elementów, Doktorant przeprowadził weryfikację pomiarową utworzonego modelu silnika. Następnie przy wykorzystaniu wykonanego modelu symulacyjnego zbadał wpływ momentu bezwładności i kształtu charakterystyki elektromechanicznej maszyny roboczej na pracę silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczną lub interharmoniczną. W literaturze brak jest tego typu badań. Wynika to z tego, że stosowane zazwyczaj uproszczone modele zakładają stałą prędkość obrotową, a w konsekwencji nie ma możliwości zamodelowania wpływu zmiany parametrów maszyny roboczej (momentu bezwładności wirnika oraz kształtu charakterystyki elektromechanicznej) na pracę silnika.

## **2. Ocena merytoryczna**

W rozdziale 1. recenzowanej rozprawy doktorskiej przedstawiono obecny stan wiedzy dotyczącej badania wpływu subharmonicznych i interharmonicznych napięcia na pracę silnika indukcyjnego. Dokonano obszernego przeglądu literatury. Na jego podstawie scharakteryzowano aktualny stan wiedzy, a następnie określono konieczne kierunki dalszych badań. W tezie pracy doktorskiej stwierdzono, że zarówno moment bezwładności, jak i charakterystyka mechaniczna obciążenia mają istotny wpływ na parametry elektryczne i termiczne charakteryzujące stan pracy silnika indukcyjnego. Polowo - obwodowy model silnika utworzony przez Doktoranta umożliwia wykonanie badań potwierdzających tezę pracy, a następnie może być stosowany przy opracowaniu norm dotyczących dopuszczalnego poziomu rozważanych zaburzeń. Uważam, że w wykonanym przeglądzie literatury

uwzględniono wszystkie istotne pozycje, zaś wskazane potrzeby wymagały prowadzenia dalszych prac w zakresie przewidzianym w rozprawie doktorskiej.

W rozdziale 2. Doktorant scharakteryzował przedstawione w literaturze modele silnika indukcyjnego, a następnie na ich tle zaprezentował nowy polowo - obwodowy model silnika utworzony w ramach pracy doktorskiej.

W wielu pracach wykorzystywany jest model silnika indukcyjnego w postaci schematu zastępczego typu T. Model ten nie uwzględnia wahań prędkości obrotowej, co zapewnia zadowalającą dokładności obliczeń jedynie wówczas, gdy moment bezwładności wirnika maszyny roboczej jest znacznie większy od momentu bezwładności wirnika silnika. W celu uwzględnienia wahań prędkości obrotowej stosowany jest model silnika bazujący na transformacji dq. Jak wynika z literatury, wyniki obliczeń przy jego wykorzystaniu często znacznie odbiegają od wyników pomiarów, co jest konsekwencją przyjęcia wielu założeń upraszczających, w szczególności liniowej charakterystyki magnesowania obwodu magnetycznego oraz sinusoidalnego rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie stojan - wirnik.

Doktorant opracował model polowy przykładowego silnika indukcyjnego o mocy 3 kW bazujący na metodzie elementów skończonych w środowisku ANSYS Maxwell. W modelu tym zaimplementowano zmierzoną charakterystykę magnesowania rdzenia magnetycznego silnika. Zidentyfikowano pomiarowo współczynnik strat dodatkowych występujący we wzorze na straty w rdzeniu magnetycznym zależny od wielu czynników konstrukcyjno - technologicznych. Weryfikacja pomiarowa charakterystyk i parametrów obwodu elektromagnetycznego ma istotny wpływ na poprawę dokładności modelu silnika. Należy w tym miejscu zwrócić uwagę na fakt, że produkowane obecnie silniki indukcyjne cechują się dużym stopniem wykorzystania obwodu elektromagnetycznego, a w konsekwencji jedynie modele uwzględniające nasycenie obwodu magnetycznego są w stanie zapewnić dużą dokładność obliczeń. Oryginalnym rozwiązaniem wprowadzonym przez Doktoranta jest sprzężenie elektromagnetycznego modelu polowego z obwodowym modelem cieplnym silnika (rys. 2.18). W ten sposób uwzględniono wzajemną interakcję zjawisk elektromagnetycznych i cieplnych w silniku. W nowoczesnych silnikach indukcyjnych często dąży się do zmniejszenia masy, co prowadzi do podwyższenia temperatury możliwego dzięki zastosowaniu izolacji o wysokiej klasie ciepłoodporności. Prezentowane w wielu publikacjach modele do obliczeń pola elektromagnetycznego zakładające stałą konduktywność miedzi i aluminium prowadzą wtedy do znacznych

błędów zarówno przy obliczaniu strat mocy, jak i temperatury uzwojeń. Pomysł Doktoranta ma więc kluczowe znaczenie dla zapewnienia dużej dokładności modelowania produkowanych współcześnie silników indukcyjnych.

Poprawność rozwiązań zastosowanych przez Doktoranta w utworzonym modelu polowo - obwodowym silnika indukcyjnego została potwierdzona pomiarami przeprowadzonymi na stanowisku laboratoryjnym (rozdział 2.7). Model zapewnił zadowalającą dokładność odwzorowania zarówno prądu, jak i temperatury uzwojenia stojana. Dodatkowo wyniki wykonanych obliczeń oraz badań laboratoryjnych potwierdziły znaczne zwiększenie wartości subharmonicznych i interharmonicznych prądu po przejściu silnika od obciążenia znamionowego do biegu jałowego, spowodowane dużym wzrostem wahań prędkości obrotowej.

Doktorant przeprowadził badania wpływu subharmonicznych i interharmonicznych napięcia zasilającego na pracę wybranego silnika indukcyjnego z wykorzystaniem utworzonego modelu polowo - obwodowego. Porównano wyniki obliczeń przy różnych częstotliwościach subharmonicznej lub interharmonicznej napięcia, różnych wartościach momentu bezwładności wirnika maszyny roboczej oraz różnym kształcie charakterystyki obciążenia. Uzyskane wyniki badań w pełni potwierdziły tezę pracy. Duże wahania prędkości obrotowej występujące przy małym momencie obciążenia mają znaczny wpływ na wartość subharmonicznej lub interharmonicznej prądu. Istnieją takie częstotliwości subharmonicznych lub interharmonicznych napięcia przy których występuje szczególnie duży wzrost prądu na skutek zjawisk rezonansowych. Przy określaniu dopuszczalnych zawartości rozpatrywanych zakłóceń napięcia zasilającego z punktu widzenia zagrożeń występujących w silniku indukcyjnym konieczne jest stosowanie modeli uwzględniających wpływ parametrów maszyny roboczej, zaś stosowane dotychczas modele silnika zakładające stałość prędkości obrotowej nie zapewniają wystarczającej dokładności obliczeń. Zweryfikowano pomiarowo model silnika indukcyjnego opracowany przez Doktoranta może być pożytecznym narzędziem do wykonywania takich badań.

Bardzo duże znaczenie praktyczne mają wyniki badań zaprezentowane w rozdziale 4. Wynika z nich, że występowanie subharmonicznej w napięciu zasilania nawet o stosunkowo niewielkiej wartości znacznie zwiększa temperaturę uzwojenia stojana silnika. Występujące zjawiska rezonansowe mogą prowadzić do podwyższenia temperatury skutkującego nawet kilkukrotnym zmniejszeniem żywotności izolacji uzwojenia stojana, a w skrajnym przypadku nawet do jej

uszkodzenia. Stosowane dotychczas uproszczone modele silnika indukcyjnego przy wyznaczaniu dopuszczalnych wartości rozpatrywanych zaburzeń w napięciu zasilającym nie zapewniają zadowalającej dokładności odwzorowania parametrów elektromagnetycznych i cieplnych. Pominięte w nich wahania prędkości obrotowej przy stosunkowo małym momencie bezwładności wirnika maszyny roboczej połączone ze zjawiskami rezonansowymi przy niektórych częstotliwościach subharmonicznych napięcia prowadzą do bardzo dużych błędów.

Wyniki prac badawczych zrealizowanych w ramach doktoratu podsumowano w rozdziale 5. Uzyskane wyniki w pełni potwierdziły tezę pracy doktorskiej. Utworzony nowy model polowo - obwodowy silnika indukcyjnego może być wykorzystany w dalszych pracach mających na celu określenie dopuszczalnych zaburzeń w napięciu zasilającym ze względu na szkodliwy wpływ na pracę silnika.

### **3. Pytania i uwagi do rozprawy doktorskiej**

- 1) Opracowany w pracy model silnika stanowi połączenie modelu polowego do obliczeń elektromagnetycznych bazujący na MES oraz modelu obwodowego do obliczeń rozkładu temperatury. Czy zdaniem Doktoranta używana w pracy nazwa model polowy silnika nie powinna zostać zastąpiona nazwą model polowo-obwodowy?
- 2) W opisie wielkości występujących w relacji 2.15 powinno być wyraźnie zaznaczone, że przewodność elektryczna zależy od temperatury, co jest konsekwencją połączenia modelu polowego z obwodowym modelem cieplnym silnika.
- 3) Dostępne obecnie programy bazujące na metodzie elementów skończonych umożliwiają rozwiązywanie sprzężonych pól elektromagnetycznych i temperatury. Czy Doktorant przewiduje w przyszłości wykorzystanie takich możliwości do tworzenia modeli polowych silników indukcyjnych na potrzeby badania wpływu zakłóceń w napięciu zasilającym na ich pracę?
- 4) Czy w zbudowanym stanowisku laboratoryjnym istnieje możliwość pomiaru temperatury elementów wirnika silnika indukcyjnego? Jeżeli były mierzone temperatury w wirniku, to z jaką dokładnością odwzorowuje je opracowany model polowo - obwodowy silnika?
- 5) Jakie problemy dostrzega Doktorant przy wykorzystaniu utworzonego modelu polowo - obwodowego w badaniach silników indukcyjnych średniej i dużej mocy?

6) Czy prowadzone były prace dotyczące wpływu rozpatrywanych zaburzeń w napięciu zasilającym na pracę silnika indukcyjnego, jeżeli występuje w nim wiele subharmonicznych i interharmonicznych?

7) Badania przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej wykazały duży wzrost temperatury uzwojenia stojana silnika nawet przy niewielkiej zawartości subharmonicznej napięcia zasilającego, skutkujący uszkodzeniem izolacji, a w najlepszym przypadku znacznym skróceniem jej żywotności. Czy Doktorant nie rozważa wykorzystania wyników prac do opracowania zabezpieczeń chroniących silniki przed skutkami przekroczenia bezpiecznych poziomów subharmonicznych i interharmonicznych w napięciu sieci?

Przedstawione drobne uwagi nie mają wpływu na wysoką ocenę rozprawy doktorskiej, zaś zadane pytania mają na celu wskazanie możliwych kierunków dalszych badań.

#### **4. Ocena strony edytorskiej rozprawy**

Praca stanowi zamkniętą całość, nie wnoszę więc o jej uzupełnienie. Jest ona zredagowana zwięźle i przejrzysto. Zauważone drobne usterki edytorskie nie utrudniają jej studiowania. Rysunki wykonane są bardzo starannie. Wprowadzony dodatkowo spis oznaczeń i rysunków oraz przeniesienie szczegółowych informacji dotyczących tworzenia modelu silnika do załącznika znacznie ułatwia studiowanie pracy.

#### **5. Konkluzja**

Wykonując recenzowaną pracę Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia prac naukowych, organizacji warsztatu pracy naukowej oraz systematyczności w realizacji badań.

Uważam, że rozprawa stanowi samodzielne rozwiązanie zagadnienia naukowego i wnosi do nauki i techniki nowe wartości w zakresie tworzenia modeli silnika indukcyjnego do badań wpływu subharmonicznych i interharmonicznych w napięciu zasilającym na jego pracę. W porównaniu do prezentowanych w literaturze, utworzony model silnika indukcyjnego uwzględnia dodatkowo jednocześnie wahania prędkości obrotowej, nieliniowość charakterystyki magnesowania obwodu magnetycznego, wpływ technologii produkcji na straty w rdzeniu oraz zależność

rezystancji, a w konsekwencji również strat mocy w uzwojeniach od temperatury. Tego typu rozbudowa modelu pozwoliła między innymi badać wpływ zjawisk rezonansowych występujących przy niektórych subharmonicznych i interharmonicznych napięcia zasilającego na wzrost temperatury uzwojenia stojana silnika. Wykonane badania wybranego silnika indukcyjnego w szerokim zakresie zmiany zarówno częstotliwości subharmonicznych i interharmonicznych napięcia zasilającego, jak i parametrów maszyny roboczej (momentu bezwładności wirnika oraz kształtu charakterystyki mechanicznej) mają duże znaczenie praktyczne. Wykazany znaczny wzrost temperatury izolacji uzwojenia stojana nawet przy bardzo małych zaburzeniach napięcia zasilającego dowodzi konieczności prowadzenia prac mających na celu znormalizowanie dopuszczalnych zawartości subharmonicznych i interharmonicznych w lądowych i morskich systemach elektronenergetycznych, zaś utworzony przez Doktoranta model silnika indukcyjnego zweryfikowany pomiarowo stanowi bardzo dobre narzędzie do wykonywania takich badań. Moim zdaniem, sporządzony model można również wykorzystać przy opracowaniu nowych zabezpieczeń chroniących silniki przed uszkodzeniami lub znacznym skróceniem żywotności spowodowanym rozpatrywanymi zaburzeniami napięcia zasilającego. W świetle powyższych rozważań stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Damiana Hallmanna pt. *„Analiza pracy silnika indukcyjnego małej mocy zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne i interharmoniczne z wykorzystaniem modelu polowego”* spełnia wymogi ustawy o stopniach i tytułach naukowych i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Roman Krok