

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Damiana Hallmanna

pt.: "ANALIZA PRACY SILNIKA INDUKCYJNEGO MAŁEJ
MOCY ZASILANEGO NAPIĘCIEM ZAWIERAJĄCYM
SUBHARMONICZNE I INTERHARMONICZNE Z
WYKORZYSTANIEM MODELU POLOWEGO"

Recenzja rozprawy mgr inż. Damiana Hallmanna została opracowana na zlecenie
Dziekana Wydziału Elektrycznego Uniwersytetu Morskiego w Gdyni,
pismo RWE/D/13/2/2020.

1. Ocena wyboru tematyki i zakresu rozprawy

Rozprawa doktorska pt.: „Analiza pracy silnika indukcyjnego małej mocy zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne i interharmoniczne z wykorzystaniem modelu polowego” zawiera 149 stron, składa się z 5 rozdziałów, 5 załączników o łącznej liczbie stron 52. Bibliografia zawiera 117 pozycji, w tym 15 pozycji współautorskich Doktoranta. Rozprawa dotyczy dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika.

Podjęta przez Doktoranta problematyka dotycząca wpływu subharmonicznych i interharmonicznych napięcia zasilającego na pracę silnika indukcyjnego jest ważna i aktualna. Przyczyn występowania różnych częstotliwości w sieci zasilającej jest wiele, m.in. falowniki, trakcje kolejowe, piece łukowe, rozruchy silników czy odnawialne źródła energii. Wahania napięcia mogą występować szczególnie w tzw. sieciach miękkich np. na statkach. Badania wpływu jakości energii elektrycznej na pracę urządzeń elektrycznych prowadzi wiele ośrodków badawczych. Szczególnie istotnym zagadnieniem jest w tym wypadku opracowanie norm dotyczących dopuszczalnych poziomów subharmonicznych i interharmonicznych w sieci zasilającej silniki. Tematyka ta jest zatem ważna i aktualna.

Praca doktorska mgr inż. Damiana Hallmanna dotyczy właśnie tematyki wpływu jakości energii elektrycznej, a konkretnie wpływu subharmonicznych i interharmonicznych napięcia zasilającego na pracę silnika indukcyjnego. Doktorant opracował model polowy silnika indukcyjnego w programie Ansys i przeprowadzając badania symulacyjne modelu dokonał analizy wpływu subharmonicznych i interharmonicznych napięcia zasilającego na pracę silnika dla różnych wariantów jego pracy, w tym: różne wartości momentu bezwładności oraz różne rodzaje momentów obciążenia na prąd i straty mocy oraz temperatury w uzwojeniach silnika.



Zakres prac przeprowadzonych w rozprawie dotyczy badań symulacyjnych i eksperymentalnych wpływu subharmonicznych i interharmonicznych napięcia zasilającego na pracę silnika. Doktorant opracował model połowy silnika asynchronicznego w programie Ansys, przeprowadził analizę porównawczą wyników symulacji wybranego silnika z wynikami badań eksperymentalnych, co pozwoliło na potwierdzenie poprawności opracowanego modelu połowego silnika. Następnie przeprowadził symulacje numeryczne, na podstawie których dokonał analizy wpływu subharmonicznych i interharmonicznych napięcia zasilającego na pracę silnika. Uważam przyjęty w opiniowanej rozprawie doktorskiej zakres badań za uzasadniony. Opiniowana rozprawa ma charakter pracy naukowo-badawczej.

2. Treść i zakres rozprawy

W rozdziale pierwszym Autor przedstawił problematykę związaną z występowaniem w sieci zasilającej subharmonicznych i interharmonicznych napięcia oraz ich wpływ na parametry pracy silnika indukcyjnego. Doktorant przedstawiając stan wiedzy w rozważanym temacie podał szereg publikacji, w których autorzy wykazali wpływ subharmonicznych i interharmonicznych napięcia na parametry pracy silnika indukcyjnego. Autor odniósł się m.in. do prac [83, 84], w których autorzy omówili wpływ subharmonicznych i interharmonicznych napięcia na pracę silnika indukcyjnego tego samego typu, który Doktorant wybrał do badań w ramach rozprawy doktorskiej. Należy zauważyć, że autorzy prac [83, 84] zastosowali model obwodowy typu T silnika. Według mnie Autor pracy rozwinął badania w rozważanej tematyce poprzez opracowanie modelu połowego silnika indukcyjnego i sprzężenie tego modelu z obwodowym modelem cieplnym silnika, przez co uzyskał interesujące i ważne wyniki badań.

Teza pracy wydaje się zbyt ogólna w kontekście wyników badań innych autorów zajmujących się tą tematyką, jednakże teza pomocnicza i zasadniczy cel pracy jednoznacznie wskazują, czego Doktorant zamierzał dokonać. Zakres prac podjętych przez Autora uważam za dobrany właściwie.

W rozdziale drugim Doktorant omówił modele obwodowe silnika, przedstawił model połowy 2D i 3D silnika, który opracował w programie Ansys, zaprezentował nieliniowy model cieplny silnika i dokonał programowego sprzężenia obu modeli. Autor przeprowadził szczegółową identyfikację parametrów modelu 2D silnika oraz zweryfikował model połowy silnika poprzez porównanie wyników symulacyjnych z wynikami eksperymentalnymi. Jak widać na rys.2.20, rys.2.22, rys.2.23 i rys.2.24 zbieżność wyników eksperymentalnych i symulacyjnych jest zadawalająca. Autor słusznie podkreślił, że opracowany model połowy silnika pozwala z wystarczającą dokładnością na przeprowadzenie analizy rozważanego w pracy zagadnienia w oparciu o badania symulacyjne. Uwagi dotyczące tego rozdziału opiszę w uwagach ogólnych.

W rozdziale trzecim przeprowadzono analizę prądów silnika indukcyjnego zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne i interharmoniczne o wartościach względnych 1%. Szkoda, że Doktorant nie przeprowadził analizy dla innych wartości subharmonicznych i interharmonicznych. W symulacjach komputerowych zbadano wpływ napięcia o tych częstotliwościach na prąd zasilania dla różnych wartości względnego momentu bezwładności obciążenia oraz trzech rodzajów momentu obciążenia: moment stały, prądnicowy i wentylatorowy. Autor wprost nie podał czy badania przeprowadził dla znamionowego obciążenia silnika. Według mnie brakuje w tym rozdziale wyjaśnienia zjawiska fizycznego, którego efekt widać na rys.3.1, rys.3.4, rys.3.9 i rys.3.10 (zależności subharmonicznych prądu od częstotliwości). Doktorant wspominał tylko, że „...zaobserwowane różnice mogą być spowodowane zjawiskami rezonansowymi występującymi w układzie napędowym podobnymi do opisanych w [96,112]”, ale

ostatecznie nie opisał tego zjawiska. Doktorant przyjął obliczeniach m.in. wartość zerową względnego momentu bezwładności obciążenia, co oznacza, że moment bezwładności obciążenia jest równy zero. Proszę Doktoranta o wyjaśnienie jakie to może być obciążenie. Wnioski podane w tym rozdziale można uznać za prawidłowe. Inne moje wątpliwości i uwagi dotyczące treści tego rozdziału podane zostały w uwagach ogólnych.

W rozdziale czwartym Autor przeprowadził analizę strat mocy oraz przyrost temperatury czoł uzwojeń silnika związanych z subharmonicznymi i interharmonicznymi napięcia również dla ich względnych wartości 1%. W rozdziale tym podobnie Doktorant dokonał obliczeń numerycznych dla trzech rodzajów momentu obciążenia oraz różnych wartości względnego momentu bezwładności obciążenia. Największy przyrost względnych strat mocy dla subharmonicznych wyniósł około 22%, a temperatura uzwojeń wzrosła o około 23 %. Dla interharmonicznych natomiast względny przyrost strat mocy wynosi poniżej 2%. W podsumowaniu rozdziału brakuje porównania przyrostów strat mocy otrzymanych na podstawie modelu polowego zastosowanego przez Doktoranta z wynikami innych autorów, którzy zastosowali model obwodowy typu T. Na koniec podrozdziału 4.3 Doktorant stwierdził, że „...względny moment bezwładności obciążenia j_w ma istotny wpływ na całkowity przyrost strat mocy w silniku zasilanym napięciem zawierającym interharmoniczną (rys.4.2).” Jak wynika z analizy Autora pracy wpływ tej jest pomijalny. Powinien też powołać się na rys.4.4. Proszę o ustosunkowanie się do tej kwestii. Inne uwagi dotyczące treści tego rozdziału przedstawione zostały w uwagach ogólnych.

Rozdział piąty zawiera podsumowanie, w którym Autor podał słuszne wnioski i ważniejsze osiągnięcia pracy.

Doktorant zamieścił w pracy pięć załączników, w których opisał m.in. sposób budowy modelu silnika w module RMxpert, Maxwell 2D, Maxwell 3D. Zamieszczono również wg mnie niepotrzebnie aż 17 stron programu w języku Python do obliczeń parametrów jakości energii elektrycznej.

3. Ważniejsze osiągnięcia rozprawy

W mojej ocenie opiniowana rozprawa doktorska ma osiągnięcia, do których należy zaliczyć:

- opracowanie modelu polowego 2D i 3D silnika indukcyjnego;
- opracowanie programu dla nieliniowego modelu cieplnego silnika indukcyjnego i sprzęgnięcie modelu cieplnego z modelem elektromagnetycznym;
- przeprowadzenie analizy wpływu subharmonicznych i interharmonicznych napięcia zasilającego na prąd zasilania dla różnych wartości względnego momentu bezwładności obciążenia oraz trzech rodzajów momentu obciążenia z zastosowaniem modelu polowego silnika i sprzęgniętego z nim modelem termicznym.

4. Uwagi dyskusyjne ogólne

W opiniowanej rozprawie przeprowadzono badania symulacyjne wpływu subharmonicznych i interharmonicznych napięcia zasilającego na prąd zasilania z uwzględnieniem momentu bezwładności obciążenia i dla trzech rodzajów momentu obciążenia. Sposób wykonania i interpretacja badań symulacyjnych nie budzi większych zastrzeżeń. Zastrzeżenia natury ogólnej będą następujące aspekty rozprawy dotyczące:

Rozdział 1

- 1) Na stronie 18 w ostatnim akapicie Autor przytoczył prace [37, 38, 78, 79], podając co autorzy zawarli w pracach, ale nie napisał co wynika z tych prac.
- 2) Na stronie 19 Autor porównał, wykazując jednocześnie znaczną różnicę w obliczeniach względnej, maksymalnej wartości subharmonicznej prądu dla subharmonicznej napięcia zasilania $U_{sh} = 2.5\%U_{rat}$ i względnego momentu bezwładności równego dwa z wynikiem autora pracy [83], ale w rozprawie takich obliczeń nie przedstawił.
- 3) Na stronie 22 Autor napisał, że „...omówiono obowiązujące przepisy oraz propozycje ograniczenia poziomów rozważanych zaburzeń...”. W pracy nie doszukałem się omówienia przepisów, a jedynie propozycji w podrozdziale 4.4 na str.82.

Rozdział 2

- 4) Autor wielokrotnie stosuje określenia „metody obwodowe” i „metody polowe”. Myślę, że Autor miał na myśli modele obwodowe i modele polowe.
- 5) Na str.25 Autor podaje „...zblizonej do częstotliwości naturalnej danej maszyny...”. Co to jest częstotliwość naturalna maszyny ?
- 6) Autor stosuje w pracy wielkość „moment oporowy”, której nie zdefiniował (str.33 i inne).
- 7) Na str.40 Autor podaje, że moment bezwładności silnika wynoszący $0,0082 \text{ kg m}^2$ nieznacznie różni się od wartości momentu obliczonego numerycznie, który wynosi $0,0004 \text{ kg m}^2$, a przecież jest ponad 61 razy mniejszy.
- 8) Na str.49 Doktorant podał, że 3 współczynniki stratności wyznaczone są na podstawie wzoru (2.37). W jaki sposób zostały wyznaczone z jednego równania ?
- 9) Na str.57 Autor napisał w ostatnim akapicie „dla wstępnie założonej temperatury uzwojeń”. Jaka została przyjęta początkowa wartość temperatury uzwojeń ? I dalej „...straty Joule'a były przeliczane dla rzeczywistej temperatury otoczenia.”. Co Autor miał na myśli ? Na końcu tej strony Autor podał, że obliczenia elektromagnetyczne i termiczne powtarzano w pętli iteracyjnej, a względny błąd obliczenia temperatury przyjęto mniejszy niż 0.1 %. Wg mnie przyjęto stosunkowo mały błąd. Ile iteracji wykonał program spełniając ten warunek ?
- 10) Na rys.2.20 porównano zawartość subharmonicznych w prądzie zasilania silnika z eksperymentu i z obliczeń. Dla jakich wartości częstotliwości wykonano obliczenia numeryczne ?
- 11) Na rys.2.21 podano widma prądów zasilania silnika. Dlaczego względna wartość harmonicznej 50 Hz ma wartość 50% ?
- 12) Jakie są niepewności pomiarów przedstawionych na rys.2.20,rys. 2.22, rys.2.23 i rys.2.24.

Rozdział 3

- 13) Proszę wyjaśnić zdanie „W praktyce, w warunkach występowania wahań prędkości obrotowej silnika, chwilowy moment obciążenia został odpowiednio przeliczony, przy zachowaniu jego wartości średniej równej znamionowej T_{rat} .”.

- 14) Na rys.3.3, rys.3.7 i rys.3.12 podano zależności względnej wartości skutecznej prądu zasilania silnika. Proszę podać wzór opisujący wartość skuteczną prądu zasilania silnika i sprawdzić wartości prądu podane na rysunkach dla $j_w = 0$.
- 15) Na rys.3.8 podano widmo prądu zasilania silnika. Dlaczego względna wartość harmonickej 50 Hz ma wartość 50% ?

Rozdział 4

- 16) W podrozdziale 4.2 Doktorant podał zależności procentowego przyrostu całkowitych strat mocy i temperatury w funkcji częstotliwości subharmonicznych i interharmonicznych prądu. Nie podał jednak o ile zmieniła się wartość rezystancji uzwojeń. O ile wzrosła wartość rezystancji uzwojeń zakładając maksymalny przyrost temperatury? Na koniec drugiego akapitu podrozdziału 4.4 podano „...Przyjmuje się, że długotrwałe zwiększanie temperatury uzwojeń od 8 do 11 K powoduje przynajmniej dwukrotne zmniejszenie czasu życia silnika [115]...”. Czy to oznacza, że temperatura otoczenia ma aż tak istotny wpływ na czas życia silnika ?.

Rozdział 5

- 17) Na str.87 Doktorant pomylił się podając w podrozdziale 5.3 pkt.5, że straty mocy i temperatura uzwojeń dla subharmonicznej o częstotliwości „rezonansowej” i pomijalnego względnego momentu bezwładności jest 4 razy większa niż dla $j_w = 15$. Zapewne chodziło o procentowy przyrost tych wielkości w odniesieniu do małego względnego momentu bezwładności silnika.

5. Uwagi szczegółowe

W symbolu str. X^n_m , X-oznacza numer strony, n-numer wiersza od góry strony, m-numer wiersza z dołu strony. Tekst napisany czcionką *italic* jest tekstem z rozprawy.

str.17¹² brak opisu wielkości h

str.17¹³ moc silnika podano w KM

str.24 brakuje opisu wielkości podanych na rys.2.1

str.29⁶ Autor napisał „...obliczeń magnetycznych...”, co nie jest właściwym określeniem ?

str.30² napisano „Maxwell oferuje ...”. Powinno być „Moduł Maxwell oferuje” ?

str.37 źle opisano wzór (2.25)

str.38₁ konduktywność podano w [MS/s]

str.41⁴ „...z wynikami w wyniku pomiarów...”, powinno być „z wynikami pomiarów”

str.41₈ konduktywność podano w [MS/s]

str.52¹ „...pozwoliły na znalezienie...”, powinno być „pozwoliły na dobór”

str.65 we wzorach (3.1) i (3.2) brakuje przy $u(t)$ zmiennej k

str.68₅ Zdanie nielogiczne

6. Ocena poziomu wydawniczego i redakcyjnego rozprawy

Układ treści rozprawy można uznać za właściwy. Doktorant wprowadził w pracy szereg wielkości, których nie ma w spisie oznaczeń. Praca zawiera nieliczne błędy językowe. Na uwagę zasługuje staranne opracowanie wykresów i rysunków.

7. Ocena rozprawy doktorskiej

Wybór tematyki rozprawy i jej zakres są właściwe i nie budzą zastrzeżeń. Tematyka rozprawy jest aktualna na tle obecnego stanu wiedzy. Autor rozprawy wykazał wiedzę teoretyczną i praktyczną w zakresie dyscypliny naukowej, której dotyczy rozprawa. Cele postawione w rozprawie zostały osiągnięte.

Nie ulega wątpliwości, że wykonano bardzo pracochłonne i wartościowe badania symulacyjne. Na uwagę zasługuje opracowanie przez Doktoranta modelu polowego silnika i powiązanie go z modelem cieplnym. Model ten pozwoli niewątpliwie Doktorantowi na prowadzenie dalszych badań zjawisk występujących przy zasilaniu silnika indukcyjnego napięciem zawierającym subharmoniczne i interharmoniczne w zależności od wielu innych parametrów układu, co uważam za cenny wkład Autora pracy w tej tematyce. Opiniujący oczekuje od Doktoranta ustosunkowania się do podanych uwag w czasie publicznej dyskusji nad rozprawą. Stwierdzam, że Doktorant posiada wiedzę ogólną i predyspozycje niezbędne do prowadzenia pracy naukowej.

8. Wniosek końcowy

Mając na uwadze pozytywną ocenę rozprawy doktorskiej mgr inż. Damiana Hallmanna pt.: „Analiza pracy silnika indukcyjnego małej mocy zasilanego napięciem zawierającym subharmoniczne i interharmoniczne z wykorzystaniem modelu polowego”, stwierdzam, że rozprawa ta spełnia wymagania Ustawy z 14 marca 2003 roku „O stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. Nr 65, poz. 595 z późn. zm.) ” oraz Rozporządzenia MNISzW z dnia 26.09.2016 (Dz. U. z 30.09.2016, poz. 1586).

Uwzględniając powyższe stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr. inż. Damiana Hallmanna do publicznej obrony.



Mirosław Wołoszyn