

Opole, 27.06.2024 r.

Prof. dr hab. inż. Marian Lukaniszyn
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Politechnika Opolska

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Andrzeja Cyganika

**pt. "": „Analiza oddziaływań zaburzeń jakości zasilania i dynamicznych momentów obciążenia na wielkości wyjściowe silnika w maszynie produkcyjnej”
wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. inż. M. Wciślaka**

*Niniejszą recenzję wykonano na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne.
Politechniki Świętokrzyskiej
z dnia 24 kwietnia 2024 r.*

1. Ocena wyboru tematu rozprawy

Praca doktorska "": „Analiza oddziaływań zaburzeń jakości zasilania i dynamicznych momentów obciążenia na wielkości wyjściowe silnika w maszynie produkcyjnej” dotyczy aktualnej i rozwijanej w ostatnich latach dziedziny wspomaganej komputerowo analizy pracy przetworników elektromechanicznych.

W trakcie swojej pracy zawodowej Autor napotkał problemy związane z analizą pracy, funkcjonowania i oceny silników w maszynach produkcyjnych. Oprócz wykonywania pracy przez silnik napędowy, może być on źródłem zakłóceń ruchu oraz drgań. Stabilność sieci dystrybucyjnych jest niezbędnym warunkiem do zapewnienia niezakłóconej pracy maszyn. Jednym z elementów gwarantujących to, jest poznanie wpływu zmienności momentu wytwarzanego przez silnik i oraz przyczyn generacji drgań. Problemy związane z analizą pracy i poznanie wzajemnego oddziaływania silnika napędowego i maszyny w procesie technologicznym, należy zaliczyć do ważnych zagadnień badawczych związanych z budową i określeniem wymagań dla układów napędowych.

Rozwój układów napędowych spowodowany został, w ostatnich latach, znaczącym postępem technologicznym w dziedzinie materiałów, a także rozwojem metod pomiarowych i związanych z tymi metodami programów. Brakuje jednak ciągle kompleksowych opracowań dotyczących zjawisk i zaburzeń elektromagnetycznych spowodowanych zmiennymi momentami obciążającymi silniki maszyny wytwórczej oraz wpływu jakości energii elektrycznej. Wobec tego pojawia się pytanie czy korzystając z różnych metod

aproksymacyjnych oraz wykonanych już pomiarów i rejestracji można rozwiązać ten problem. Moim zdaniem rozprawa doktorska mgra Cyganika odpowiada na to pytanie.

Tematyka rozprawy ukierunkowana jest na problemy analizy pracy i wpływu jakości zasilania oraz zmiennego obciążenia układu napędowego na dokładność produkowanych elementów. Wymagania stawiane układom napędowym są określone w obowiązujących normach branżowych. Opiniowana praca doktorska dostarcza istotnych informacji, a wyniki badań mogą być cenne dla inwestorów, operatorów systemów dystrybucyjnych, a także dla naukowców i inżynierów pracujących nad rozwojem i optymalizacją takich układów.

Wśród maszyn napędowych silniki trójfazowe asynchroniczne są najczęściej stosowane i stanowią grupę dobrze zbadaną. Z uwagi na swoje zalety – proste uzwojenie i znaczny moment w stosunku do objętości – mogą one znaleźć zastosowanie nie tylko w specjalizowanych napędach elektrycznych, jak miało to miejsce w początkowym okresie ich rozwoju, ale także w sprzęcie powszechnego użytku – np. w pralkach czy wentylatorach. Olbrzymią zaletą tych silników w porównaniu z innymi silnikami elektrycznymi jest prosta konstrukcja wirnika i związana z nią pewność działania.

Rozwój napędów z silnikami asynchronicznymi zmierza w dwóch kierunkach: pierwszy z nich dotyczy tanich napędów małej mocy o masowym zastosowaniu, drugi napędów średniej mocy o zastosowaniu przemysłowym. O ile w pierwszej z tych grup podstawowym kryterium oceny napędu jest cena to w drugiej grupie niebagatelną rolę odgrywają parametry dynamiczne – szybkość reakcji na zmiany momentu obciążenia, czas zaniku stanów niustalonych i związany z parametrami dynamicznymi przebieg momentu wytwarzanego przez silnik.

Dlatego też wybór tematu rozprawy doktorskiej mgr inż. **Andrzeja Cyganika**, związany z wpływem jakości zasilania i zmiennego obciążenia na pracę maszyny indukcyjnej, uważam za ciekawy z punktu widzenia rozwiązania problemu naukowego.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska znajduje się w głównym nurcie współczesnego projektowania i analizy pracy urządzeń elektrotechnicznych. Reasumując stwierdzam, że praca badawcza mgr inż. **Andrzeja Cyganika** w zakresie stosowania metod obwodowych, w analizie zjawisk elektromechanicznych i elektromagnetycznych, doprowadziła do powstania - użytecznego i skutecznego narzędzia analizy napędów z silnikami indukcyjnymi.

Tematykę rozprawy uważam więc za aktualną. Szerokie spektrum problemów, które pojawiły się w trakcie wykonywania badań, jak również aktualność tematyki z punktu widzenia technicznego gwarantują, że badania mogą być kontynuowane w przyszłości.

2. Cel i teza naukowa rozprawy

Praca Pana mgr inż. **Andrzeja Cyganika** jest wynikiem systematycznych studiów nad zagadnieniem modelowania i analizy pracy silników trójfazowych asynchronicznych.

Przedmiotem pracy jest konstrukcja modelu matematycznego pierścieniowego silnika asynchronicznego, analiza parametrów całkowych silnika, wykonanie obliczeń porównawczych, symulacja komputerowa pracy silnika w przypadku zakłóceń układu zasilania, bądź zmienności parametrów procesu produkcyjnego.

Autor formułuje cel pracy na str. 19, który sprowadza się do opracowania efektywnego modelu matematycznego pierścieniowego silnika asynchronicznego i analizy zachowania się silnika w symulowanej maszynie produkcyjnej, gdy oddziałują na niego zewnętrzne siły zakłócające pracę.

Tak postawiony cel pracy uważam za poprawny.

Autor wyszczególnia jedną tezę naukową rozprawy (str. 20). Zagadnienie naukowe, jakie Autor postawił sobie do rozwiązania zostało określone logicznie i precyzyjnie. Prezentowane rozważania teoretyczne oraz wyniki obliczeń i pomiarów na prototypie silnika, mające na celu udowodnienie postawionej tezy, przedstawiono w sposób czytelny i przejrzysty.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Przedstawiona rozprawa została przygotowana jako praca promocyjna (doktorska) w formie monografii. Praca składa się z sześciu rozdziałów podstawowych, siedmiu dodatków i spisu literatury (97 pozycji, w tym 2 prac własnych Doktoranta). Recenzowaną rozprawę zaliczam do grupy prac eksperymentalno - teoretycznych. Uważam, że oceniana praca mgr **Andrzeja Cyganika** spełnia wymogi pracy doktorskiej, gdyż zawiera oryginalne wartości:

- poznawcze w obszarze badanych zjawisk,
- konceptyjno-konstrukcyjne w obszarze metod projektowania układów pomiarowych,
- eksperymentalne w obszarze identyfikacji parametrów modelu matematycznego pierścieniowego silnika asynchronicznego,
- teoretyczne zakresie analizy pracy i wpływu warunków zasilania i zmiennego obciążenia układu napędowego na dokładność produkowanych elementów, zweryfikowane na stanowisku badawczym.

Stanowi ona wkład w rozwój technik modelowania i analizy pracy pierścieniowego silnika asynchronicznego. Nie ulega wątpliwości, że Doktorant osiągnął wysoki stopień opanowania teorii i techniki obliczeń obwodowych oraz metod pomiarowych.

Praca jest skonstruowana poprawnie, zawiera wstęp wraz z omówieniem stanu wiedzy, wyraźnie sformułowany cel, zakres pracy oraz precyzyjnie postawioną tezę (rozdział 1).

Rozdział 2 i następane stanowią własny wkład Doktoranta. W rozdziale 2 opisano budowę stanowiska badawczego silnika asynchronicznego pierścieniowego. Obciążenie silnika stanowi maszyna BLDC oraz system pomiarowy NI CompactDAQ. Do pomiarów

wykorzystano system CTS PROFLINE 2100. Opracowane stanowisko pomiarowe zostało wyposażone w system czujników i umożliwia wykonanie pomiarów w stanie jałowym oraz dla obciążeń statycznych i dynamicznych badanego silnika. W siedmiu dodatkach opisano zasadnicze elementy stanowiska badawczego.

W rozdziale 3 Autor zaproponował metodę pośrednią wyznaczania parametrów elektrycznych silnika asynchronicznego pierścieniowego. Przedstawiono proces identyfikacji indukcyjności własnej stojana i wirnika oraz wzajemnych indukcyjności między nimi w funkcji kąta obrotu wirnika. Zależność każdej indukcyjności od kąta obrotu wirnika jest określana doświadczalnie. Następnie formułowana jest macierz indukcyjności. Parametry macierzy indukcyjności zastosowano w modelu matematycznym silnika. Interesujący jest też sposób identyfikacji parametrów mechanicznych maszyny za pomocą układu z wahadłem fizycznym.

W rozdziale 4 omówiono modelowanie silnika indukcyjnego pierścieniowego. Silniki indukcyjne są bardzo często wykorzystywane w przemyśle i potrzebny jest ich odpowiedni model, aby obniżyć koszty sterowania i eksploatacji. Biorąc pod uwagę energię magnetyczną indukcyjności i energię kinetyczną wirnika, zdefiniowano funkcję Lagrange'a. Następnie sformulowano równania ruchu silnika. Po wykonaniu kilku przekształceń algebraicznych i użyciu zmiennych bezwymiarowych, równania obwodów elektrycznych i równanie mechaniczne zapisuje się oddzielnie w formach ułatwiających ich rozwiązanie. Rozwiązanie uzyskano przy użyciu modelu z wykorzystaniem pakietu Simulink dla prądów stojana i wirnika w postaci wektorów. Symulacja była kontrolowana przez skrypt pakietu MATLAB. Wyniki symulacji prezentowane w postaci przebiegów czasowych podstawowych zmiennych można uznać za poprawne i świadczą o przydatności skonstruowanego modelu silnika.

Za najważniejsze osiągnięcia Autora uważam wyniki zawarte w rozdziale 5. Przeprowadzono badania silnika asynchronicznego przy pracy bez zakłóceń, przy zakłóceniach zasilania oraz przy dynamicznych zmianach obciążenia. Badania przeprowadzono też dla stałych i zmiennych obciążeń silnika. Szczególnie ciekawe są symulacje pracy silnika zasilanego napięciem z zakłóceniami impulsowymi. Na uwagę zasługuje zbudowane stanowisko pomiarowe z silnikiem indukcyjnym oraz pomiary prądów stojana, drgań silnika i momentu obciążenia. Wyznaczono współczynnik zawartości harmonicznych dla prądu stojana oraz moc drgań. Uzyskane wyniki pomiarów weryfikują postawioną tezę.

W rozdziale 6 zamieszczono podsumowanie.

Oceniając pracę chcę podkreślić, że została ona wykonana na dobrym poziomie i jest wartościowa z punktu widzenia pogłębienia wiedzy na temat modelowania silnika indukcyjnego i jego wpływu w przypadku zakłóceń układu zasilania, bądź zmienności procesu produkcyjnego. Wnosi ona także oryginalny wkład naukowy i potwierdza dobre kwalifikacje Autora rozprawy.

Do oryginalnych osiągnięć w pracy doktorskiej można zaliczyć:

- dokonanie przeglądu literatury;
- opracowanie metody wyznaczania parametrów elektrycznych i mechanicznych maszyny indukcyjnej;
- na podstawie przedstawionych rozważań zaproponowano procedurę formułowania równań ruchu na podstawie funkcji Lagrange'a;
- zaproponowanie metody symulacji pracy silnika indukcyjnego za pomocą pakietu Simulink i skryptu pakietu MATLAB;
- opracowanie środowiska komputerowego do analizy stanów pracy silnika w przypadku zakłóceń układu zasilania, bądź zmienności procesu produkcyjnego;
- opracowanie i wykonanie stanowiska badawczego z silnikiem indukcyjnym;
- projekt i wykonanie układu pomiarowego drgań;
- wykonanie gruntownych badań eksperymentalnych;
- zaproponowano model silnika indukcyjnego, który można uznać za element nowości. Model został opracowany na podstawie pomiarów i wyznaczenia charakterystyk indukcyjności w funkcji kąta obrotu wirnika silnika pierścieniowego.

Brak też moim zdaniem poważniejszych błędów i uchybień, które należałoby podnieść.

Jednak do wad pracy doktorskiej zaliczyłbym:

- brak szczegółowych informacji o badanym silniku indukcyjnym;
- brak opisu założeń przy konstruowaniu modelu matematycznego silnika asynchronicznego;
- dużą złożoność sposobu wyznaczania indukcyjności uzwojenia (nieunikniona cecha dokładnych modeli analitycznych);
- brak możliwości dokładnego uwzględnienia nasycenia (stosowany był model liniowy $L = L(\varphi)$);
- stosunkowo niewielką ilość wyników przeprowadzonych symulacji i weryfikacji stanów dynamicznych pracy silnika przy obciążeniu znamionowym.

W trakcie zapoznawania się z treścią pracy nasunęło mi się kilka pytań i uwag dyskusyjnych, do których prosiłbym o komentarz ze strony Doktoranta:

- Niejasne stwierdzenie na str.82: „Dla maksymalnego obciążenia prędkość obrotowa jest o około 1/3 mniejsza od prędkości znamionowej”;
- Niejasne stwierdzenie na str.87: „Należy jednak pamiętać, że nie uwzględnia onschodkowego rozkładu pola elektrycznego wzdłuż szczeliny powietrznej.”;
- Wyjaśnienia wymaga realizowane obciążenie silnika: 1.2 N·m oraz 4 N·m;
- Niewątpliwie, osiągnięciem Autora jest opracowanie uściślonego modelu analitycznego silnika, który umożliwia uwzględnienie zjawisk elektromagnetycznych w silniku. Dlaczego nie wykonano badań symulacyjnych przy przeciążeniu silnika?
- Proszę omówić zastosowania sformułowanego w pracy modelu matematycznego silnika asynchronicznego;
- Czy Autor widzi możliwości udokładnienia modelu matematycznego silnika indukcyjnego?
- Co Pan sądzi o zastosowaniu metod polowych do analizy prezentowanych w pracy zagadnień? Zachęcam Autora do uwzględnienia tych problemów w dalszych badaniach;
- Czy Autor mógłby przedstawić na podstawie literatury możliwości zastosowania metod polowych;
- Proszę o podanie kierunków dalszych badań ?

4. Uwagi szczegółowe

Podkreślam staranność Autora w poprawnym zapisywaniu wzorów matematycznych oraz dobrą stronę graficzną pracy.

W pracy znalazłem drobne błędy edytorskie (str.: 12, 23, 25, 87, 56, 59, 87, 90, 104, 116, 121, 132), dotyczące stylu (str.:18, 57, 138, 142), które nie wpływają na ostateczną pozytywną ocenę pracy.

Zwracam natomiast uwagę na pewne uchybienia:

- str.: 21, 27, 87 – nie „przy pomocy”, a „za pomocą”;
- str.: 82, 83, mało czytelne rysunki i ich opisy;
- str.81, nie „moment elektryczny, a „moment elektromagnetyczny”.

Część uwag szczegółowych, w tym przede wszystkim uwagi dotyczące stosowanych w pracy zwrotów i sformułowań, przekazałem Autorowi.

5., Konkluzja recenzji

Stwierdzam, iż rozprawa jest napisana bardzo starannie, układ pracy jest precyzyjny i logiczny, a strona graficzna jest wzorowa. Wnioski końcowe uzyskane w pracy są poprawne i interesujące.

Przedstawione powyżej uwagi ogólne i szczegółowe nie obniżają mojej pozytywnej oceny pracy. Wyniki rozważań zawarte w rozprawie upoważniają do stwierdzenia, iż została udowodniona teza oraz osiągnięto założone cele pracy.

Przedstawiona rozprawa dowodzi, że Doktorant umiejętnie korzysta z najnowszej literatury w obranej dziedzinie wiedzy, podchodzi do niej krytycznie, a ponadto potrafi twórczo rozwijać osiągnięcia innych autorów.

Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością nowoczesnej metodyki modelowania złożonych obiektów fizycznych, metod numerycznych i technik programowania. Uważam, że praca stanowi samodzielne rozwiązanie przez Autora szeregu zagadnień naukowych przy użyciu nowoczesnych metod badawczych.

Mgr **Andrzej Cyganik** jest autorem 10 wystąpień konferencyjnych, 3 prac w czasopismach wymienionych w wykazie MNiSzW (Energies, Napędy i Sterowanie, Prace Instytutu Elektrotechniki) oraz 22 publikacji w czasopismach branżowych.

Stwierdzam, iż przedstawiona rozprawa pt.: *„Analiza oddziaływań zaburzeń jakości zasilania i dynamicznych momentów obciążenia na wielkości wyjściowe silnika w maszynie produkcyjnej”* autorstwa Pana mgr inż. **Andrzeja Cyganika** stanowi samodzielne rozwiązanie zadania badawczego i spełnia kryteria stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (j.t. Dz. U. z 2023 r. poz. 742, z późn. zm.).

W związku z powyższym stawiam wniosek o przyjęcie przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej i dopuszczenie jej Autora Pana mgr inż. **Andrzeja Cyganika** do dalszych etapów przewodu doktorskiego w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.


mgr inż. Marion Lukowicz