

dr hab. inż. Marcin Kamiński, prof. PWR
Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych
Wydział Elektryczny
Politechnika Wrocławska
ul Smoluchowskiego 19
50-372 Wrocław

Wrocław, 2020-12-25

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Łukasza Zawarczyńskiego
pt. *Analiza układów sterowania momentem i prędkością kątową
falownikowego napędu pompy*

opracowana na zlecenie

Rektora Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach

1. Charakterystyka zagadnień analizowanych w rozprawie.

W ostatnich latach, ze względu na istotny rozwój oraz redukcję kosztów nowoczesnych układów programowalnych, a także rozwiązania topologiczne i dostępność elementów energoelektronicznych, obserwowany jest wzrost wymagań stawianych układom automatyki przemysłowej. Wskazane czynniki umożliwiają również implementację sprzętową oraz weryfikację na obiekcie rzeczywistym zaawansowanych algorytmów sterowania, które są opisywane w artykułach publikowanych w renomowanych czasopismach lub materiałach konferencji tematycznych. Przedstawione czynniki mogą prowadzić do poprawy parametrów dostępnych systemów przemysłowych lub modyfikacji wcześniej znanych układów. Recenzowana rozprawa doktorska jest odpowiedzią na obecne, przedstawione ogólnie powyżej, trendy w dziedzinie napędów elektrycznych.

Jedną z podstawowych wytycznych, w trakcie realizacji zadań pracy doktorskiej, było bazowanie na napędach elektrycznych opartych o silnik indukcyjny (*Induction Motor*), bezszczotkowy silnik prądu stałego (*Brush-Less Direct-Current Motor*) oraz silnik z magnesami trwałymi (*Permanent Magnet Synchronous Motor*). Autor rozprawy doktorskiej podjął szeroki pod względem zakresu oraz dogłębny przegląd metod sterowania stosowanych dla układów napędowych. Jednak na szczególną uwagę zasługuje zastosowanie

rozpatrywanych układów napędowych. Podjęto analizę oraz próbę wykonania elektrohydraulicznego układu sterowania objętościowego bazującego na napędzie falownikowym. W związku z tym, zadanie było realizowane ze szczególnym uwzględnieniem charakterystycznych cech, które są istotne dla tego typu systemów:

- precyzja podążania za trajektorią zadaną (przy wysokiej dynamice),
- dokładność utrzymywania wartości referencyjnej prędkości przy zakłóceniach parametrycznych (obiektu) lub zewnętrznych (zmiany obciążenia),
- właściwości konstrukcyjne (wymiary),
- przeciążalność momentem.

Analizując dostępną literaturę (krajową oraz zagraniczną), możliwe jest zaobserwowanie podstawowych kierunków badań, wymienionych poniżej, prowadzonych w odniesieniu do napędów elektrycznych stosowanych dla pomp hydraulicznych.

>Prace dotyczą algorytmów sterowania (typu regulatorów oraz metodyki projektowania). Stosowane są głównie rozwiązania z regulatorami proporcjonalno-całkującymi, jednak pojawiają się aplikacje zaawansowanych technik, przykładem może być metoda predykcyjna. Natomiast optymalizacja parametrów może zostać zrealizowana za pomocą iteracyjnych obliczeń wykorzystujących obserwacje zmian w grupach organizmów występujących w przyrodzie.

>Kolejna grupa badań dotyczy odtwarzania zmiennych stanu w układzie regulacji. Stosowane są metody bazujące na podstawowych równaniach obiektu oraz z dodatkową adaptacją (z modelem odniesienia).

>Oddzielna część publikacji opisuje rozwiązania konstrukcyjne (typy silników, budowa falownika, zasilanie z systemów fotowoltaicznych, etc.).

Niniejsza rozprawa doktorska również, w znacznym stopniu, dotyczy wymienionych zagadnień.

Dominująca część rezultatów, przedstawionych w rozprawie, jest wynikiem prac laboratoryjnych. Warto podkreślić, że w tym celu wykonano stanowiska laboratoryjne do testów kolejnych zestawów z różnymi typami silników. W odniesieniu do wskazanej części prac, należy zauważyć zastosowany sposób implementacji algorytmów w układzie programowalnym. Aplikację założeń wykonano poprzez język programowania wysokiego poziomu – graficzną reprezentację sposobu przetwarzania danych, która odpowiadała zapisowi matematycznemu. Wprowadzając powyższy sposób programowania oraz wykorzystując odpowiednie oprogramowanie, Autor uzyskał istotne uproszczenia w aplikacji programu, w efekcie przyspieszenie testów sprzętowych (konfiguracja procesora

sygnałowego, realizacja wirtualnego panelu operatorskiego, kompilacja programu bezpośrednio z programu Matlab/Simulink).

Problematyka rozprawy doktorskiej została dobrana bardzo dobrze. Moim zdaniem, treść opracowania przedstawia precyzyjną analizę przekształtnikowych układów napędowych zastosowanych w systemach elektrohydraulicznych. Zatem, wykonane prace oraz opis wyników można rozpatrywać jako istotny wkład w rozwiązanie ważnego zadania praktycznego. Zgodnie z moją opinią, przedstawione rozwiązania są ściśle związane z aktualnymi zagadnieniami z zakresu Elektrotechniki (zgodnie z nową ustawą - w dyscyplinie Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika).

2. Koncepcja rozprawy.

Niniejsza rozprawa doktorska jest bardzo obszerna, treść przedstawiono na 258 stronach. Zawartość uwzględnia 8 rozdziałów. W ostatnich częściach opracowania przedstawiono bibliografię oraz załączniki (w których opisano stanowisko laboratoryjne, szczegóły dotyczące pomiarów parametrów oraz zmiennych stanu silnika, a także wybrane elementy aplikacji). Autor, poza wydrukowaną wersją rozprawy, udostępnił również wersję elektroniczną w postaci pliku *.pdf. Doktorant rozplanował bardzo dobrze układ opisu, który jest typowy dla tego typu opracowań. Następujące po sobie rozdziały stanowią logiczną całość. Język opisu został odpowiednio dobrany, przedmiot rozprawy jest zaprezentowany w sposób ciekawy oraz zrozumiały.

Rozpoczynający rozdział zawiera przegląd literatury, który obrazuje stan badań prowadzonych w krajowych oraz zewnętrznych ośrodkach naukowych. We wspomnianej części Doktorant wyjaśnia istotne problemy dotyczące napędów elektrycznych oraz uzasadnia podjęcie prac związanych z tematyką pracy doktorskiej. Jednym z najistotniejszych elementów rozdziału wprowadzającego jest teza pracy doktorskiej, która została podzielona na pięć składowych, zdefiniowana w sposób poniżej przedstawiony.

- „1. Identyfikowane parametry modeli matematycznych analizowanych silników elektrycznych zasilanych z falownika, w sposób istotny zależą od warunków zasilania i obciążenia, a także od zastosowanego planu eksperymentu i sygnału pobudzającego.*
- 2. Poprawę wskaźników jakości sterowania uzyska się uwzględniając wpływ warunków zasilania i obciążenia silników na wartości parametrów jego modeli matematycznych, np. poprzez zastosowanie sterowania z otwartą pętlą adaptacji.*

3. *Możliwe jest zrealizowanie układu sterowania objętościowego z pompą o stałej objętości geometrycznej o własnościach dynamicznych i statycznych porównywalnych z układem sterowania dławieniowego.*

4. *Możliwe jest podwyższenie sprawności napędu hydraulicznego z pompą o stałej wydajności geometrycznej poprzez odpowiedni wybór silnika elektrycznego oraz metody sterowania prędkością lub momentem.*

5. *Najlepsze wskaźniki sterowania objętościowego uzyska się stosując do napędu pompy hydraulicznej silniki synchroniczne BLDC lub PMSM.”*

W kolejnym rozdziale załączono oraz opisano wyniki badań maszyn elektrycznych rozpatrywanych w kontekście zastosowania w falownikowym napędzie pompy hydraulicznej. Testy dotyczyły właściwości dynamicznych maszyn przy działaniu w otwartej strukturze sterowania, uwzględniono również załączanie obciążenia w trakcie pracy układu. Rozdział podsumowano ciekawym porównaniem kolejnych silników. W następnej części rozprawy zaprezentowano identyfikację parametrów napędów: z silnikiem indukcyjnym, BLDC oraz PMSM. Należy podkreślić, że badania przeprowadzono w różnych stanach pracy poszczególnych maszyn. Poza znanymi z teorii maszyn elektrycznych metod wyznaczania parametrów (np. identyfikacja wartości modelu matematycznego silnika na podstawie metody biegu jałowego i prądu zwarcia silnika indukcyjnego) przeprowadzono również testy związane ze specyficznym zastosowaniem napędu (przy obciążeniu maszyn pompą). W kolejnych dwóch rozdziałach opisana jest problematyka typowa dla automatyki napędu elektrycznego. W ogólnej postaci struktury sterowania układami napędowymi możliwe jest wyodrębnienie dwóch pętli kontroli zmiennych stanu. Wewnętrzna część jest związana z momentem elektromagnetycznym, natomiast zewnętrzna dotyczy prędkości. Zgodnie z tym podziałem, Autor rozważa odpowiednie rozwiązania dla badanego obiektu. W rozdziale 6 oraz rozdziale 7 rozpatrywany jest całościowo system elektrohydrauliczny. Badaniom poddano układy regulacji przepływu oraz ciśnienia.

Po przeczytaniu rozprawy doktorskiej oraz interpretacji wyników można przedstawić konkluzję, zgodnie z którą, mgr inż. Łukasz Zawarczyński, bardzo dobrze odnajduje się w tematyce dotyczącej napędów elektrycznych, precyzyjnie dostrzega problemy naukowo-badawcze, potrafi przedstawić oraz zastosować metodykę badań napędów elektrycznych, przy wykorzystaniu skutecznie dobranych narzędzi.

3. Ocena pracy.

3.1. Oryginalne osiągnięcia.

Na wstępie niniejszego punktu recenzji należy podkreślić bardzo szeroki zakres przeprowadzonych prac. Wiele elementów rozprawy doktorskiej zostało opisane w sposób nowatorski. Jednak najistotniejsze oraz oryginalne osiągnięcia, moim zdaniem, obejmują poniżej zapisane punkty prac.

>Projekt oraz realizacja rzeczywistych układów napędowych z silnikami: IM, BLDC oraz PMSM, które umożliwiły wykonanie badań eksperymentalnych.

>Przedstawienie porównań napędów przekształtnikowych z różnymi typami maszyn elektrycznych.

>Opracowanie kodów oraz implementacja algorytmów sterowania (poszczególnymi silnikami) w układzie programowalnym.

>Realizacja licznych badań symulacyjnych, które prezentowały właściwości układów regulacji prędkości oraz momentu, a także prace dotyczące identyfikacji parametrów silników.

>Interesujący sposób optymalizacji wzmocnień regulatora prędkości w układach napędowych.

>Zastosowanie napędu przekształtnikowego, zgodnie z głównym celem pracy doktorskiej, w systemie z pompą hydrauliczną.

3.2. Uwagi redakcyjne.

Opis prac badawczych został wykonany wyjątkowo starannie. Nie przedstawiam znaczących zastrzeżeń również w odniesieniu do jakości przedstawianych rysunków oraz przebiegów zmiennych stanu. Doktorant popełnił jedynie drobne błędy dotyczące edycji rozprawy oraz językowe, które zostały poniżej wymienione.

>Strona tytułowa, błędnie zapisano: „Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki”.

>Co oznacza symbol AC (na rysunku A.9)?

>Brak siatki na wykresach (utrudniona analiza przebiegów zmiennych stanu).

>Pojawia się problem dotyczący formatowania podpisów pod rysunkami (przykładami są rysunki: 4.59, 4.65, 5.1, 5.2, 7.3).

>Strona 207, zawarto błąd we fragmencie: „Opracowanie sposobu regulacji prądu rozruchowego silnika BLDC, który polegającego na ograniczaniu napięcia podczas rozruchu przy pomocy regulatora histerezy [162*].”.

Precyzja niniejszej recenzji wymaga podkreślenia, że wynotowane usterki opisu nie wpływają na czytelność przekazu zawartości merytorycznej. Należy również podkreślić, że przedstawione uwagi nie stanowią znaczenia dla ostatecznej oceny pracy doktorskiej.

3.3. Komentarze oraz pytania merytoryczne.

Bazując na szczegółowej analizie przedłożonego opisu, poniżej zamieszczone zostały uwagi, które dotyczą prac teoretycznych oraz praktycznych związanych z doktoratem Pana mgr inż. Łukasza Zawarczyńskiego.

1. Wyniki badań, zamieszczone w rozdziale 2, przedstawiają zestawienie oraz porównanie właściwości analizowanych, w kontekście aplikacji dla pompy hydraulicznej, silników elektrycznych. Przeprowadzone badania eksperymentalne są wartościowym potwierdzeniem znanych właściwości rozważanych maszyn. Interesujące wydają się testy dla innych trajektorii zadanych, które zaprezentują nawroty silników oraz działanie w zakresie niewielkich (nawet w odniesieniu do rezultatów zaprezentowanych na rysunku 2.14) wartości prędkości.
2. Rozdział 2.8 powinien zostać zakończony zestawieniem właściwości testowanych silników (w tym zagadnienia ekonomiczne związane z układem sterowania) oraz jednoznacznymi konkluzjami dotyczącymi wyboru elementu wykonawczego w układzie sterowania pompą.
3. W rozprawie, w wielu miejscach opisu, pojawia się odwołanie do metody analizy statycznej Box'a. Uważam, że w tym zakresie należy wprowadzić dodatkowe wyjaśnienia.
4. Jaki jest wpływ współczynnika w , zastosowanego w równaniu 3.4, na uzyskiwane wyniki (dla wybranego przykładu)?
5. Jakie wartości początkowe parametrów w procesie identyfikacji były przyjmowane do obliczeń?
6. Czy różne wartości ograniczeń prądu mogą zakłócać uzyskiwane wyniki (równanie 3.4)?
7. Implementacja analizowanych algorytmów sterowania, w procesorze sygnałowym, realizowana była bezpośrednio z programu Matlab/Simulink. W ten sposób skrócony został czas kodowania algorytmu. Czy zaobserwowano problem związany z redukcją częstotliwości obliczeń (zwiększenie kroku obliczeniowego)? Czy podjęto próbę aplikacji opartej o język C/C++?

8. Czy przeprowadzona została analiza położenia biegunów układów regulacji? W ten sposób możliwe jest porównanie właściwości dynamicznych oraz udowodnienie stabilności struktury sterowania.
9. W układach sterowania, które zostały zaprezentowane w rozdziale 4, stosowane są regulatory PI. W treści rozprawy wspomniano o wyznaczaniu wartości wzmocnień „na podstawie iteracyjnej minimalizacji wskaźnika jakości regulacji”. W związku z analizą porównawczą oraz procesem projektowania, zagadnienie stanowi istotny element rozprawy doktorskiej. Zatem, dodatkowe szczegóły powinny zostać przedstawione (wartości początkowe, liczba iteracji, algorytm obliczeń, sygnały zadane napędu, etc.).
10. Czy w opisywanym zastosowaniu napędu elektrycznego, istotne jest uwzględnianie, w procesie projektowania, zakłóceń związanych z konstrukcją części mechanicznej (sprężystość wału łączącego elementy lub niedokładność połączenia)?
11. Konstrukcja stanowiska laboratoryjnego jest jednym z głównych osiągnięć Doktoranta. Czy rozważano zastosowanie tanich układów programowalnych (np. z rdzeniem ARM)?

4. Ostateczna konkluzja.

Ocena prac badawczych wykonanych przez Doktoranta jest jednoznacznie bardzo wysoka. Oryginalność przedstawianych koncepcji zaświadcza również publikacje naukowe oraz uzyskane patenty.

Wyniki oraz zakres prowadzonych badań mogą także dowodzić o wysokim poziomie wiedzy z zakresu elektrotechniki. Uważam także, że na podstawie przedstawionej rozprawy można wnioskować o samodzielności w prowadzeniu działalności naukowo-inżynierskiej. Poniżej zdefiniowano konkluzje, które stanowią najistotniejsze elementy przedstawionej recenzji.

- Rozpatrywana praca, Pana mgr inż. Łukasz Zawarczyńskiego, spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim, zgodnie z obowiązującą ustawą o tytule i stopniach naukowych.
- W związku z powyższym przedstawiam prośbę oraz wnioski o przyjęcie, a także dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony na Politechnice Świętokrzyskiej w Kielcach.

Marcin Kamiński