
RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgra inż. **Krzysztofa Justa** nt.

Metodyka projektowania konstrukcji i sterowania mechatronicznego urządzenia wykonawczego ruchu liniowego

Promotor: prof. dr hab. inż. Wojciech Tarnowski,
Wydział Technologii i Edukacji, Politechnika Koszalińska

Lokalizacja tematyki rozprawy w technice

Rozwój materiałów elektrotechnicznych, elementów automatyki, metod obliczeniowych pozwala na zmianę technik napędowych wykorzystywanych we współczesnych maszynach i urządzeniach. W lotnictwie od lat wdraża się ideę „*more electric aircraft*”; obecnie powtarza się tę drogę w innych rodzajach transportu pod hasłem *e-mobilność*. Ale również w innych urządzeniach i maszynach zastępuje się klasyczne napędy (silnik-sprzęgło-przekładnia-element wykonawczy) łatwiejszymi do sterowania i tańszymi napędami elektrycznymi. Szczególnie duże zmiany dotyczą napędów liniowych. Ze względu na dużą liczbę zmiennych decyzyjnych projektowanie tych napędów nie jest zajęciem trywialnym. W rozprawie doktorskiej mgr inż. Krzysztof Just podjął się opracowania metodyki projektowania tego typu napędu, a więc tytuł rozprawy dobrze oddaje zakres pracy.

Krytyczne omówienie pracy

Rozprawa doktorska ma 180 stron i zawiera 9 rozdziałów. We wstępie zawarto cel i tezę pracy, a na końcu podsumowanie i wnioski oraz 3 załączniki. W rozprawie zamieszczono wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów, odniesiono się do przytoczonych w spisie 113 pozycji literaturowych, w tym ośmiu których Doktorant jest współautorem (7) lub autorem (1). Literatura jest aktualna i w większości złożona z prac opublikowanych w pierwszych dwóch dekadach XXI wieku. Należałoby unikać cytowania źródła internetowego w postaci „Wikipedii”. Załącznik A zawiera podręcznikowe informacje związane z obliczeniami obwodów magnetycznych. Załącznik B dotyczy bardziej zaawansowanej wiedzy o obliczeniach analitycznych rozkładu pola magnetycznego w szczeliny powietrznej przy różnych konfiguracjach magnesów trwałych. Podpunkty związane z magnesowaniem

promieniowym, osiowym i w układzie Halbacha poparte są informacjami z pozycji literaturowych. Podział i opracowanie załączników A i B należy uznać za poprawne. W załączniku C zamieszczono dokumentację techniczną projektu elementów konstrukcyjnych silnika liniowego z magnesami trwałymi. Są to jedynie poglądowe rysunki z zaznaczonymi głównymi wymiarami. Brak opisu w tabelach, oznaczeń materiałów, technologii wykonania i innych detali. Jakość opracowań zamieszczonych w załączniku C znacznie odbiega jakościowo od graficznych opracowań zamieszczonych w głównej części pracy.

We wstępie rozprawy Doktorant dobrze wprowadził czytelnika w tematykę badawczą. Podkreślił cele rozprawy, jej użyteczny i innowacyjny charakter. Zwięźle i rzeczowo przedstawił motywację pracy. Przedstawił znaną klasyfikację aktualnie stosowanych napędów liniowych. Precyzyjnie zdefiniował zakres pracy. We wstępie przeprowadził również satysfakcjonujący przegląd literatury związanej z tematem.

W drugim rozdziale pracy zaproponował procedurę projektowania i modelowania napędu liniowego. Bazuje ona na znanej klasyfikacji napędów liniowych i metodach numerycznych powszechnie wykorzystywanych do analiz tego typu systemów elektromechanicznych. Zdefiniował wymagania stawiane projektowanemu urządzeniu. Ponadto, z wykorzystaniem przejrzystych rysunków i grafik, precyzyjnie przedstawił parametry analizowanego napędu wraz z ważniejszymi równaniami.

W rozdziale trzecim Doktorant przedstawił fizyczny i matematyczny model analizowanego napędu. Sporządził zestawienie zjawisk fizycznych zachodzących w urządzeniu i opisał zależności między nimi występujące. Autor słusznie przyjął, że rozpatrywany problem jest problemem mechatroniki, gdyż wymaga zastosowania wiedzy z mechaniki, elektromagnetyzmu, elektrotechniki, elektroniki, itp. W założeniach konstrukcyjnych uwzględnił planowane sterowanie urządzeniem, co jeszcze bardziej podkreśliło multidyscyplinarny charakter rozprawy.

W opisie modelu matematycznego przedstawione są dwa dobrze znane podejścia obliczeniowe. W opisie obwodowym Autor, bazując na znanej literaturze, dość dokładnie przedstawił podstawowe równania opisujące zjawiska elektromechaniczne zachodzące w obwodzie analizowanego napędu. Drobnym zastrzeżeniem może być forma opisu zależności matematycznych. Zgodnie z przyjętymi normami, w zapisie równania należy wyszczególnić, które wielkości są wektorami/macierzami (np. przez pogrubienie lub stosowny zapis nad parametrem), a które skalarami. Ponadto, zmienne powinny być zapisane kursywą (co jest w pracy zrobione poprawnie), ale już nie operatory - np. różniczkowania. Zamiast:

$$\dots L_{abc} \cdot \frac{di_{abc}}{dt} + \frac{dz}{dt} \cdot \frac{d\Psi_{mabc}}{dz}$$

powinno być: $\dots \mathbf{L}_{abc} \cdot \frac{d\vec{i}_{abc}}{dt} + \frac{dz}{dt} \cdot \frac{d\vec{\Psi}_{mabc}}{dz}$ lub $\dots \mathbf{L}_{abc} \cdot \frac{d\vec{i}_{abc}}{dt} + \frac{dz}{dt} \cdot \frac{d\vec{\Psi}_{mabc}}{dz}$

Przedstawiona uwaga ma swoje źródło w publikacji „*Jak pisać teksty techniczne poprawnie*”, Wiadomości Elektrotechniczne, Wydawnictwo SIGMA-NOT, R. LXIX, nr 12, s. 513-515, 2001

autorstwa prof. dr hab. inż. Krystyna Pawluka – przewodniczącego Polskiego Komitetu Terminologii Elektrycznej.

W ostatniej części trzeciego rozdziału Autor przedstawił równania teorii pola w zakresie potrzebnym do analiz numerycznych swojego problemu. W proponowanej przez siebie metodyce zaleca połączenie obu podejść i stosowanie modeli polowo-obwodowych.

W czwartym rozdziale recenzowanej pracy Doktorant zaprezentował numeryczne modele komputerowe rozważanego silnika liniowego z magnesami trwałymi. Dość dobrze przedstawił definicje modeli, a wyniki obliczeń wygenerował w przejrzystej formie. W pracy przedstawiony jest algorytm obliczeń numerycznych wykorzystujący połączenie oprogramowania Matlab i Comsol Multiphysics. Podejście, w którym Matlab korzysta z danych obliczeniowych MES z Comsolą jest aktualnie przestarzałe. Nowe wersje oprogramowania Comsol umożliwiają prowadzenie różnego rodzaju obliczeń parametrycznych i dynamicznych całkowicie niezależniąc się od potrzeby zewnętrznych komend. Rozumiem, że przedstawione rozwiązanie wynikało z braku dostępu do nowszych wersji oprogramowania do analiz MES. W tym rozdziale Autor także opisał i porównał dobrze znane metody obliczania sił magnetycznych z wykorzystaniem MES (metoda prac wirtualnych i metoda tensora naprężeń powierzchniowych Maxwella). Uzyskane wyniki są zgodne z przewidywaniami i rezultatami opisywanymi w literaturze i innych pracach, np. w rozprawie doktorskiej pt.: *„Projektowanie i badanie cewkowej wyrzutni elektromagnetycznej ze sterowanym przyspieszeniem obiektu wyrzucanego”*, Politechnika Białostocka, 2012 - autorstwa Mirosława Kondratiuka.

W piątym rozdziale Autor opisał próby poprawienia parametrów elektromechanicznych analizowanego napędu. Sprytnym posunięciem ze strony Doktoranta jest uniknięcie nomenklatury związanej z optymalizacją, co niesie ze sobą brak konieczności definiowania funkcji celu i zmiennych decyzyjnych. Z uwagi na tematykę i zakres pracy nie można tego uznać za rażąco błąd. Z drugiej strony, wprowadzenie ścisłych, inżynierskich ram do modelu oraz ilościowej oceny parametrów świadczących o poprawie własności elektromechanicznych w miejsce subiektywnego opisu analizy polowej mogłoby znacząco wzbogacić pracę. Mimo to Autor osiągnął swoje cele poprzez porównanie wyników różnych charakterystyk dynamicznych i statycznych przy trybach pracy: krokowym i synchronicznym. Ewidentnie, ta część rozprawy wymagała od Autora dużego nakładu pracy i należy ją uznać za bardzo wartościową.

W rozdziale szóstym przedstawione zostały wyniki obliczeń numerycznych strat energii w napędzie wywołane tarciem i przemagnesowaniem materiałów ferromagnetycznych. Porównane zostały obliczone numerycznie straty cieplne z otrzymanymi eksperymentalnie - uzyskano bardzo dużą zgodność. Straty energii na przemagnesowanie, zgodnie z oczekiwaniami okazały się być proporcjonalne do częstotliwości prądu je wywołującego. W rozdziale opisano także rozważania związane z wzajemnym indukowaniem SEM w uzwojeniach sąsiadujących cewek. Przeprowadzono odpowiednie obliczenia i zaprezentowano ich wyniki. Akurat ta część rozdziału mogłaby zostać uzupełniona o obliczenia wzajemnych indukcyjności uzwojeń.

Rozdział siódmy zawiera opis badań symulacyjnych dynamiki badanego napędu liniowego. Autor wykorzystuje znane podejście wykorzystujące charakterystyki statyczne obliczone za pomocą modelu polowego (MES) w modelu polowo-obwodowym. Obliczenia przeprowadzono dla wielu wariantów konfiguracji napędu (tarcie, masa biegnika, obciążenie, itp.). Porównano wyniki pracy modelu polowo-obwodowego zaimplementowanego w Matlabie z rezultatami uzyskanymi za pomocą modelu MES (Comsol). Przeprowadzono jedynie ubogą dyskusję na temat różnic w uzyskanych wynikach (uproszczenia, sprzężenia, itp.). W niniejszym rozdziale przebadano kilka konfiguracji silnika liniowego (1, 3 i 9-segmentowy) oraz zasilania napędu w sposób impulsowy (krokowy) i synchroniczny (wielofazowy). W rezultacie, określono przydatność zaproponowanych modeli do obliczania własności dynamicznych analizowanego napędu liniowego.

Praktyczna i eksperymentalna część pracy zostały opisane w rozdziale 9. Doktorant opisał sprzęt wykorzystywany w badaniach podając jego zgrubne parametry. Zabrakło szczegółowej specyfikacji, która mogła by zostać dodana w formie załączników. Nie zamieszczono również dokumentacji badań laboratoryjnych w formie fotografii napędu podłączonego do aparatury pomiarowej. W rozdziale porównano charakterystyki statyczne i dynamiczne wyznaczone za pomocą opracowanych modeli oraz zmierzone eksperymentalnie. Otrzymano dobrą zbieżność rezultatów.

Ostatnia część rozprawy stanowi podsumowanie prac, w którym Autor podkreślił własne osiągnięcia i wkład oraz pokazał kierunki dalszych prac.

Uwagi szczegółowe

W pracy zauważyłem pewne niedociągnięcia i błędy edytorskie, które poniżej częściowo wyszczególnię.

Str.37, poniżej wzoru (3.3) – lepiej byłoby „położenie biegnika z”.

Str.38, poniżej wzoru (3.8) – ze wzoru wynika, że K_s jest siłą a nie współczynnikiem.

Str.40 (środek strony) – niezrozumiały fragment tekstu „w pracy w modelu”.

Str.47 – niezrozumiały fragment tekstu dotyczący węzłów ruchomych i nieruchomych

Str.47 (koniec strony) – powinno być „Laplace’a”.

Rys. 5.26 i dalej – szerokość magnesów trwałych to I_{pm} czy τ_{pm} ?

Rys. 5.28 i dalej – siła ciągu czy siła znamionowa? Parametr grubości jarzma to l_j czy h_j ?

W tekście rozprawy brakuje komentarzy do wielu rysunków (np. Rys.8.35, 8.38,8.41).

Ponadto w tekście pracy występują inne drobne błędy edytorski i interpunkcyjne.

Ocena pracy

Generalnie, rozprawa została przygotowana w bardzo estetyczny sposób, na wysokim poziomie graficznym (może z wyjątkiem kilku rysunków niskiej jakości i niemal całego załącznika C).

Tematyka pracy jest ciekawa i aktualna oraz ma charakter wdrożeniowy. Autor bazuje na znanych rozwiązaniach i dostosowuje je do warunków określonych przez badany rodzaj silnika. Postawiony problem badawczy został rozwiązany na dobrym i równym poziomie.

Godna pochwały jest bogata zawartość pracy, liczne analizy numeryczne, różnorodność badanych zagadnień i aspektów oraz bardzo dobre opracowanie redakcyjne. Doktorant bezdyskusyjnie poświęcił bardzo dużo pracy na realizację rozprawy i opisując uzyskane wyniki wykazał się dużą wiedzą oraz doświadczeniem obejmującym napędy liniowe i ich badanie. Generalny odbiór pracy należy uznać za więcej niż dobry. Chciałbym tu uwypuklić i przedstawić podstawowe zalety rozprawy ze względu na wybór opracowanego materiału oraz badawczy wkład Autora. Są to:

- Obszerna analiza najnowszych rozwiązań oraz prezentacja dużej wiedzy w zakresie elektromagnetycznych napędów liniowych.
- Opracowanie koncepcji metodyki badań napędów liniowych. Zastosowanie tej metodyki do projektowania urządzenia o zadanej funkcjonalności.
- Opracowanie metod symulacyjnych, w których wykorzystywane są rozbudowane pakiety programów: Matlab i Comsol Multiphysics. Opracowanie procedur komputerowych zapewniających automatyzację obliczeń.
- Przeprowadzenie wielodecyzyjnej analizy proponowanej konstrukcji, w której ważnymi kryteriami były: siła ciągu i zakres ruchu przy zadanych ograniczeniach konstrukcyjnych i eksploatacyjnych.
- Zaprojektowanie i wykonanie pełnego prototypu napędu.
- Przeprowadzenie obszernych badań laboratoryjnych i ich konfrontacja z wynikami symulacji komputerowej.
- Potwierdzenie badaniami tez pracy.

Rozwiązania powyższych problemów oraz zastosowane do rozwiązania narzędzia i metody świadczą o dobrym przygotowaniu Doktoranta do prowadzenia badań naukowych i o odpowiedniej wiedzy w zakresie obejmującym tematykę rozprawy doktorskiej. Zawarte w dodatkach programy oraz służące do automatyzacji badań świadczą o dużej pracowitości pracy. Poczynione przeze mnie krytyczne uwagi nie umniejszają wagi uzyskanych wyników. Powinny być natomiast uwzględnione w dalszych badaniach i publikacjach wyników badań.

Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska jest wartościowym opracowaniem naukowym, a jednocześnie ma bardzo duże znaczenie praktyczne. Biorąc pod uwagę zakres i poziom opracowania rozprawy doktorskiej, rzetelność przeprowadzonych badań i wnioskowań oraz ich praktyczne znaczenie dla techniki napędowej w przemyśle maszynowym stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji praca pt. „*Metodyka projektowania konstrukcji i sterowania mechatronicznego urządzenia wykonawczego ruchu liniowego*” odpowiada warunkom stawianym rozprawom doktorskim w myśl stosownej Ustawy. Dlatego też wnoszę o dopuszczenie jej Autora, mgra inż. **Krzysztofa Justa** do publicznej obrony.

