

dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski
em. prof. Politechniki Gdańskiej
Politechnika Gdańska
Wydz. Elektrotechniki Automatyki
Katedra Energoelektroniki i Maszyn Elektrycznych
e-mail: mieczyslaw.ronkowski@pg.edu.pl
tel. kom. 604 69 69 15

Gdańsk, dnia 8 grudnia 2023 r.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Sebastiana Bartela, pt. „Elektromagnetyczna pompa o programowalnej charakterystyce wydajności z synchronicznym silnikiem liniowym o magnesach trwałych”

Recenzja opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej Politechniki Karkowskiej (pismo z dnia 21.09.2023 r.).

Podstawa powołania na recenzenta: Uchwała nr 30/2023 Rady Naukowej dyscypliny Automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne, Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej PK, z dnia 20.09.2023 r.

1. Uwagi dotyczące wyboru tematyki rozprawy

W ostatnich latach można zaobserwować rosnący wzrost zainteresowania nowoczesnymi pompami elektromagnetycznymi - pompami napędzanymi silnikami elektrycznymi. Stają się one coraz powszechniejsze w różnych zastosowaniach: w przemyśle, sprzęcie gospodarstwa domowego i medycynie.

Obserwowany w ostatnich latach znaczący postęp w rozwoju pomp elektromagnetycznych skupia się na coraz szerszym wykorzystaniu silników z magnesami trwałymi oraz na zwiększaniu integracji elektrycznego układu napędowego z samą pompą i zastosowania zaawansowanych algorytmów sterowania.

Jednym z przykładów zaawansowanych technologicznie pomp elektromagnetycznych są pompy stosowane w medycynie. Pompy te charakteryzują się dużym stopniem miniaturyzacji i integracji pompy, układu napędowego i układu sterowania z zastosowaniem do ich produkcji technologii druku 3D. Wymagany jest także wysoki poziom precyzji dawkowania płynu i ich niezawodności w eksploatacji. Stało się to możliwe dzięki wykorzystaniu współczesnych osiągnięć w dziedzinie konstrukcji maszyn elektrycznych, elektroniki, techniki mikroprocesorowej i metod sterowania.

Doktorant w rozprawie podejmuje zadanie opracowania koncepcji, budowy prototypu, badań analitycznych, symulacyjnych i doświadczalnych liniowej pompy elektromagnetycznej, integrującej elektryczny napęd pompy (elektryczny silnik liniowy o magnesach trwałych) z częścią hydrauliczną pompy (cylicylniczną pompą tłokową).

W powyższym kontekście opiniowana rozprawa doktorska nawiązuje tematycznie do najbardziej aktualnych i nowoczesnych zagadnień pomp elektromagnetycznych, w szczególności na polu inżynierii medycznej, zgodnych z aktualnymi tendencjami nauki i techniki światowej.

2. Zakres i ogólna charakterystyka rozprawy

Praca składa się ze spisu treści, wykazu oznaczeń, dziewięciu rozdziałów, wykazu literatury (81 pozycji) i załącznika. Liczba stron 210.

Rozdział 1 "Wstęp" Autor poświęcił wnikliwemu przeglądowi oraz klasyfikacji pomp o napędzie elektrycznym, jak też rysowi historycznemu rozwojowi silników skokowych. Na tym tle w podrozdziale 1.4 sformułował koncepcję liniowej pompy elektromagnetycznej, integrującej elektryczny napęd pompy (elektryczny silnik liniowy) z częścią hydrauliczną pompy (cylindryczną pompą tłokową).

W rozdziale 2 "Cel pracy i tezy pracy" Kandydat, w odniesieniu do istniejącego stanu rozważanego zagadnienia, podał główny cel i zakres rozprawy oraz sformułował tezy rozprawy. W postawionych tezach rozprawy Autor stwierdza:

TEZA I

"Jest możliwe opracowanie nowej metody rozwiązywania modelu matematycznego bezrdzeniowego elektrycznego silnika liniowego z magnesem trwałym oraz modelu matematycznego N-cewkowego napędu pompy elektromagnetycznej, która wykorzystuje do opisu rozkładu siły elektromagnetycznej działającej na tłok/biegnik funkcje aproksymującą (przybliżającą)"

Wykazaniu Tezy I poświęcone są: podrozdział 4.4, rozdział 5 i rozdział 6.

Tezę I Kandydat zweryfikował metodą eksperymentalną dla stanów statycznych i dynamicznych, na odpowiednio zaprojektowanych i zbudowanych stanowiskach badawczych.

TEZA II

Jest możliwe kształtowanie charakterystyki objętości przepompowanej cieczy oraz charakterystyki wydajności pompy elektromagnetycznej poprzez odpowiednią zmianę napięć zasilających cewki wzbudzenia?"

Wykazaniu Tezy II są poświęcone: rozdział 7 i rozdział 8.

Tezę II Kandydat zweryfikował na podstawie wyników badań symulacyjnych, bazujących na zweryfikowanym doświadczalnie modelu matematycznym napędu pompy elektromagnetycznej.

Powyższe tezy, brane dosłownie, sprawiają wrażenie nieco trywialnych. Jeśli jednak wagę też mierzyć stopniem trudności ich udowodnienia/wykazania w aktualnym/rozważanym kontekście technologicznym, to przedmiotowe tezy nabierają istotności, zaś ich pełny dowód przekracza możliwości jednej pracy doktorskiej.

W rozdziale 3 "Opis budowy oraz zasady działania elektromagnetycznej pompy liniowej z magnesem trwałym jako tłokiem/biegnikiem", Kandydat przedstawił budowę i zasadę działania prototypu zintegrowanej liniowej pompy elektromagnetycznej (w prototypie przyjęto liczbę cewek wzbudzenia równą 9). Autor rozważył przypadek pracy pompy z pierścieniowym magnesem trwałym zasklepionym (rozwiązanie klasyczne) oraz z wewnętrznym zaworem zwrotnym, umiejscowionym w środku pierścieniowego magnesu trwałego.

Autor przeprowadził parametryzację wielkości geometrycznych przestrzennego modelu pompy, które zestawiał w tab. 3.1.

Należy podkreślić, że przeprowadzone rozważania Kandydat zilustrował szeregiem bardzo szczegółowych i profesjonalnie wykonanych rysunków przestrzennych (3D) kompletnej pompy jak i jej poszczególnych podzespołów.

Rozdział 4 "Badania symulacyjne i laboratoryjne pompy elektromagnetycznej z pojedynczą aktywowaną cewką przy zadanym położeniu tłoka" jest zasadniczy dla udowodnienia I Tezy rozprawy. Rozdział ten zawiera 4 podrozdziały, w których Kandydat przeprowadził analizę połową rozkładu przestrzennego pola magnetycznego oraz siły działającej na tłok w pompie elektromagnetycznej z pojedynczą aktywowaną cewką wzbudzenia. Symulacje przeprowadził z zastosowaniem oprogramowania FEMM 4.2 (podrozdział 4.1). Założony obszar symulacyjny dla rozważanego modelu połowego przedstawia rys. 4.3. Przyjętą siatkę dyskretyzacji przedstawia rys.4.4. Wyniki symulacji: rozkład przestrzenny pola magnetycznego przedstawia rys.4.5; rozkład linii sił pola magnetycznego w pompie elektromagnetycznej z pojedynczą aktywowaną cewką wzbudzenia przedstawia rys.4.6.

W przeprowadzonych badaniach, Kandydat słusznie skupił uwagę na doborze optymalnych wymiarów geometrycznych cewek wzbudzenia z punktu widzenia siły działającej na tłok/biegnik. W rozważaniach założył wariant stosunku wysokości cewki T_c do jej długości L_c jako 1 x 1. Przy czym, procedurę optymalizacji zredukował do obliczeń wariantowych, obejmujących 5 przypadków (podroz. 4.2).

Wyznaczone metodą połową rozkłady przestrzenne pola magnetycznego i siły elektromagnetycznej (działającej na tłok pompy), Kandydat zweryfikował metodą eksperymentalną budując odpowiednio zaprojektowane stanowisko laboratoryjne (podroz. 4.3).

Kluczowe znaczenie dla udowodnienia I Tezy rozprawy ma podrozdział 4.4, w którym Kandydat przedstawił opracowaną autorską metodę analitycznego ujęcia siły elektromagnetycznej działającej na biegnik pompy w zależności od zadanego położenia biegnika i wartości prądu w aktywowanej cewce.

Formułując metodę analityczną, Kandydat dokonał doboru funkcji aproksymującej rozkład przestrzenny siły elektromagnetycznej. Kolejno rozważył, jako możliwe do zastosowania, funkcje aproksymujące: funkcję Gauss'a oraz różne zmodyfikowane postacie funkcji Kloss'a. Postać funkcji Kloss'a-modyfikacja 2 (wzór (4.22)) przyjął jako ostateczną i wykorzystał w rozważaniach dalszej części rozprawy. Z zastosowaniem całki nieoznaczonej tej funkcji Autor dokonał także aproksymacji rozkładu strumienia sprzężonego z cewką wzbudzenia (podroz. 4.4.4) w funkcji położenia biegnika.

Kandydat, wykorzystując aproksymację rozkładu strumienia sprzężonego z cewką wzbudzenia, wyznaczył metodą analityczną siłę elektromotoryczną rotacji indukowaną w cewce wzbudzenia (podroz. 4.4.5) i jej przebieg zweryfikował eksperymentalnie (podroz. 4.4.6.). Schemat stanowiska badawczego przedstawił na rys. 4.52.

Do pomiaru położenia biegnika rozważanej pompy elektromagnetycznej, Kandydat zastosował stanowisko badawcze z wykorzystaniem szybkiej kamery, przedstawione na rys. 4.55 i 4.56. rozprawy. Wyniki pomiarów przedstawił na rys. 4.57 - 4.59. W analizie wyników pomiarów Autor wprowadził pojęcia: stałej czasowej wygasania oscylacji oraz linii trendu wygasania ruchu oscylacyjnego biegnika, które wykorzystał w dalszej części rozprawy do oceny zgodności wyników pomiarowych z wynikami symulacyjnymi.

W podsumowaniu wyników pomiarów Autor słusznie stwierdza, że zaproponowana metoda pomiarowa z użyciem szybkiej kamery dobrze się sprawdziła. Jej zaletą jest stosunkowo niski koszt stanowiska laboratoryjnego, łatwa obsługa i możliwości wielokrotnego łatwego powtarzania pomiarów w krótkim przedziale czasu. Metodę tą można uznać za najbardziej adekwatną na obecnym etapie realizacji układu zasilania i badania własności dynamicznych napędu rozważanej pompy.

Autor słusznie stwierdza, że w przyszłości, przy badaniu różnych strategii sterowania pompą (w eksperymentach przeprowadzanych z cieczą roboczą) konieczne będzie rozbudowanie stanowiska pomiarowego, umożliwiające jeszcze większą dokładność pomiaru położenia tłoka/biegnika. Rozważyć należy możliwość wykorzystania optycznych metod pomiarowych (dalmierza laserowego o częstotliwości próbkowania wyższej, niż częstotliwość próbkowania szybkiej kamery). Na etapie konstrukcji prototypu, zabudowanie odpowiedniego zespołu cewek

pomiarowych.

Autor słusznie stwierdza, że powyższe propozycje należy uwzględnić w przyszłości jako kierunki dalszych prac badawczych.

W rozdziale 5 "Proponowana metoda rozwiązywania modelu matematycznego bezrdzeniowego liniowego silnika z magnesem trwałym dla stanów dynamicznych, bazująca na aproksymacji rozkładu siły elektromagnetycznej przy pomocy zmodyfikowanej funkcji Kloss'a", Kandydat przedstawił nową metodę rozwiązywania modelu matematycznego bezrdzeniowego liniowego silnika z magnesem trwałym, stanowiąca istotę Tezy I (szczegółowo omówiona w rozdziale 5 rozprawy). W ramach tego rozdziału Kandydat zrealizował szeroki program badań symulacyjnych (podroz. 5.1) oraz dokonał weryfikacji pomiarowej modelu na stanowisku badawczym z szybką kamerą (podroz. 5.2).

Interesujące wyniki zawiera podroz. 5.3, w którym Autor dokonał analizy wpływu kolejnych uproszczeń modelu matematycznego napędu pompy elektromagnetycznej z pojedynczą cewką wzbudzenia na przebiegi stanów dynamicznych (pełny model matematyczny A porównano z uproszczonymi modelami B i C pod względem charakteru otrzymywanych przebiegów oraz czasu obliczeń).

W podsumowaniu wyników badań Autor słusznie stwierdza, że w algorytmach sterowania napędem pompy elektromagnetycznej uzasadnione jest posługiwanie się jej pełnym modelem A.

W rozdziale 6 "Iteracyjny model matematyczny N-cewkowego napędu pompy elektromagnetycznej i jego badania symulacyjne", Kandydat opracował i zweryfikował pomiarowo model układu: "cewka wzbudzenia - tłok/biegnik", który wykorzystał do sformułowania iteracyjnego modelu matematycznego N-cewkowego napędu pompy elektromagnetycznej (podroz. 6.1). Przeprowadził szerokie badania symulacyjne bazujące na tym modelu dla przykładowego, prototypowego 9-cewkowego napędu pompy elektromagnetycznej (podroz. 6.2). Wyniki badań zilustrował szeregiem starannie wykonanych wykresów.

Kandydat słusznie stwierdza, że przedstawione na rysunkach (od rys. 6.5 do rys. 6.16) wyniki badań symulacyjnych potwierdzają, że opracowany iteracyjny model matematyczny napędu pompy elektromagnetycznej umożliwia komputerową analizę wpływu napięć, przykładanych na cewki wzbudzenia pompy, na ruch tłoka/biegnika i jego właściwości dynamiczne. Zatem opracowany iteracyjny model może być wykorzystywany przy badaniu różnych algorytmów sterowania ukierunkowanych na badanie jej bardzo ważnego parametru w eksploatacji - wydajności pompy.

Rozdział 7 "Badania symulacyjne możliwości kształtowania charakterystyki objętości przepompowanej cieczy i wydajności pompy poprzez odpowiednie zmiany napięć cewek wzbudzenia przy pracy ciągłej pompy" i rozdział 8 "Badania symulacyjne możliwości kształtowania charakterystyki objętości przepompowanej cieczy i wydajności pompy poprzez odpowiednią zmianę czasów przełączania cewek wzbudzenia przy pracy skokowej pompy" są zasadnicze dla udowodnienia II Tezy rozprawy.

W rozdziale 7 Kandydat pokazał możliwości kształtowania charakterystyki objętości przepompowanej cieczy i wydajności pompy poprzez odpowiednie zmiany napięć cewek wzbudzenia przy pracy ciągłej pompy, według różnych strategii sterowania. Obszerne Wyniki badań symulacyjnych Kandydat przedstawił na rysunkach od 8.1 do 8.17.

W konkluzji przeprowadzonych rozważań Autor słusznie stwierdza: zmiana czasu przełączania T_{delay} umożliwia zmianę sposobu dawkowania/dozowania cieczy (rys. 8.18 (str. 201)).

W rozdziale 8 Kandydat wskazał dodatkowo na możliwości kształtowania charakterystyki objętości przepompowanej (dawkowanej/dozowanej) cieczy i wydajności pompy poprzez odpowiednią zmianę czasów przełączania cewek wzbudzenia, przy pracy

skokowej pompy. Wyniki wnikliwych i obszernych rozważań Kandydat przedstawił na rysunkach od 8.1 do 8.18.

W rozdziale 9 "**Podsumowanie pracy doktorskiej w kontekście przyjętego celu oraz postawionych tez I i II**", Kandydat - mgr inż. Sebastian Bartel przedstawił podsumowanie przeprowadzanych wnikliwych i obszernych badań w ramach swojej rozprawy.

Rozprawa jest zredagowana w sposób bardzo staranny. Napisana poprawną polszczyzną. W rozprawie praktycznie nie ma błędów gramatycznych, ortograficznych bądź typograficznych. Rozprawa jest wolna od niezręczności stylistycznych.

Redakcja rozprawy w aspekcie graficznym (prezentacja wykresów, charakterystyk, schematów, wyników pomiarów i stanowiska do badań doświadczalnych) jest wzorowa - profesjonalna. Ogólnie redakcję rozprawy oceniam jako wyróżniającą.

Podkreślam, że Kandydat zrealizował bardzo bogaty i rzetelny program badań doświadczalnych, zapewniający weryfikację rozważań teoretycznych przedstawionych w rozdziałach rozprawy.

3. Uwagi merytoryczne

W rozdziale 4 "**Badania symulacyjne i laboratoryjne pompy elektromagnetycznej z pojedynczą aktywowaną cewką przy zadanym położeniu tłoka**"

Kandydat przeprowadził parametryzację wielkości geometrycznych przestrzennego modelu rozważanej pompy, które zestawił w tab. 3.1. Odczuwa się brak dyskusji doboru wartości parametrów geometrycznych w aspekcie wydajności pompy, zakresu ciśnienia, rodzaju płynów, mocy, napięcia zasilania, sprawności, itd.

Na przykład dla pompy infuzyjnej, bierze się pod uwagę parametry kluczowe:

- rodzaj płynów infuzyjnych,
- tryby infuzji: czasowy, objętościowy, wagowy,
- szybkość podawania płynu,
- rodzaj zasilania pompy infuzyjnej,
- poziom natężenia hałasu podczas pracy,
- tryby pracy: ciągły, pulsacyjny,
- łatwość obsługi.

Kandydat na rys. 4.24 (s. 72) dokonał zestawienia rozkładów siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia dla 6 rozpatrywanych wariantów cewek. Odczuwa się brak komentarza.

Kandydat przyjął, że przedstawione w rozprawie w rozdziałach 6, 7 i 8 wyniki badań symulacyjnych będą się odnosiły do pompy bez zaworu zwrotnego w środku tłoka/biegnika. Wskazany byłby komentarz przyjęcia takiego założenia.

4. Uwagi szczegółowe i redakcyjne

Kandydat używa:

- dla wykresów w funkcji czasu nazw "przebieg czasowy" - wskazane jest używanie nazwy "przebieg",
- dla wykresów funkcji, które nie są funkcją czasu nazw "przebieg" - wskazane jest używanie nazwy "kształt".

Uwaga dotyczy wspólnych publikacji (wg. **Spisu literatury rozprawy**) Kandydata z promotorem rozprawy i promotorem pomocniczym. Uważam, że kandydat powinien już teraz w zał. do rozprawy podać własny wkład merytoryczny w opracowanie wspólnych publikacji. Informacja ta przyda się przy przyszłych pracach/wnioskach promocyjnych.

5. Ocena rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa jest świadectwem bardzo dużej dojrzałości badawczej Kandydata, Jego znacznych umiejętności analitycznych, samodzielności intelektualnej oraz bardzo dobrego rzemiosła inżynierskiego.

Doktorant w rozprawie podejmuje zadanie opracowania koncepcji, budowy prototypu, budowy stanowiska pomiarowego, badań analitycznych, symulacyjnych i doświadczalnych liniowej pompy elektromagnetycznej, integrującej elektryczny napęd pompy (elektryczny silnik liniowy o magnesach trwałych) z częścią hydrauliczną pompy (cylindryczną pompą tłokową).

Opiniowana rozprawa doktorska nawiązuje tematycznie do najbardziej aktualnych i nowoczesnych zagadnień pomp elektromagnetycznych, w szczególności na polu inżynierii medycznej, zgodnych z aktualnymi tendencjami nauki i techniki światowej.

Opiniowana rozprawa jest wynikiem ogromnego, wielokierunkowego wysiłku badawczego, obejmującego gruntowne studia literaturowe, analizę symboliczną i numeryczną, badania symulacyjne, projektowanie i programowanie układu eksperymentalnego oraz badania laboratoryjne.

Rozprawa wnosi istotny wkład do rozwoju wiedzy w problematyce aktualnych i nowoczesnych zagadnień pomp elektromagnetycznych, w szczególności na polu inżynierii medycznej, zgodnych z aktualnymi tendencjami nauki i techniki światowej.

6. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie przez Autora istotnego i niebanalnego zagadnienia naukowego i technicznego. Wykazuje Jego ogólną wiedzę w dziedzinie elektrotechniki, dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej i posługiwania się podstawowymi metodami pracy badawczej - analizą teoretyczną, symulacją i eksperymentem laboratoryjnym. Uzyskane rezultaty będą bardzo przydatne w dalszych pracach badawczych w obszarze zagadnień pomp elektromagnetycznych, w szczególności na polu inżynierii medycznej.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska spełnia wymagania określone przez obowiązującą ustawę o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki.

Wobec powyższego stawiam wniosek o wyróżnienie i dopuszczenie recenzowanej rozprawy do publicznej obrony.

