

Prof. dr hab. inż. Stefan Paszek
Katedra Elektrotechniki i Informatyki
Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej

Gliwice, 26.02.2025.

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej mgra inż. Pawła Strączyńskiego „Analiza wpływu wybranych zmian obwodu magnetycznego na parametry silnika komutatorowego z magnesami trwałymi”

Niniejszą recenzję opracowano na wniosek Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Świętokrzyskiej, która w dniu 18 grudnia 2024 roku powołała mnie na recenzenta. Promotorem jest dr hab. inż. Sebastian Różowicz, prof. PŚk a promotorem pomocniczym dr hab. inż. Zbigniew Goryca.

1. Podstawowe dane o kandydacie

W 2016 roku Paweł Strączyński obronił z wyróżnieniem swoją pracę magisterską w Politechnice Świętokrzyskiej. Od tego czasu jest związany z macierzystą uczelnią, gdzie obecnie pracuje na stanowisku asystenta w Katedrze Urządzeń Elektrycznych i Automatyki. Zakres zainteresowań badawczych Kandydata obejmuje zagadnienia związane z układami sterowania i regulacji, przetwarzania sygnałów oraz modelowania i symulacji komputerowej.

Kandydat pierwszy raz ubiega się o nadanie stopnia doktora.

2. Ocena tematu rozprawy doktorskiej

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy zagadnień związanych z produkcją (generacją) oraz racjonalnym poborem (zużyciem) energii elektrycznej, m.in. przez maszyny elektryczne. Maszyny elektryczne z magnesami trwałymi (maszyny magnetoelektryczne), którymi zajmuje się Doktorant, mają długą historię rozwoju. Pierwsze maszyny elektryczne były wzbudzane wyłącznie magnesami trwałymi. Jako magnesy stosowano stale węglowe. Niskie parametry magnetyczne tych magnesów były przyczyną tego, że moce produkowanych maszyn elektrycznych nie przekraczały kilku kW. Stagnacja w rozwoju maszyn z magnesami trwałymi trwała do lat 30. XX-wieku, kiedy to zostały opracowane nowe magnesy, później również magnesy ferrytowe. Obecnie magnesy trwałe stosowane w silnikach elektrycznych

wytwarzane są głównie na bazie pierwiastków ziem rzadkich, takich jak neodym, samar, charakteryzujących się dużą gęstością energii. Maszyny magnetoelektryczne stały się konkurencyjne w porównaniu do maszyn o wzbudzeniu elektromagnetycznym. Głównymi zaletami maszyn magnetoelektrycznych są: większa sprawność, prostsza konstrukcja i technologia, mniejsze zużycie materiałów, niższe koszty produkcji i eksploatacji, korzystniejsze charakterystyki ruchowe, przydatność do zasilania z układów przekształtnikowych.

Wśród maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi można wyróżnić m.in. maszyny komutatorowe prądu stałego. Analizą pracy tych maszyn zajmuje się w szczególności Doktorant w swojej rozprawie. Bada wpływ wybranych cech konstrukcyjnych tych maszyn na optymalną ich pracę.

Pomimo wielu zalet, jednym z głównych problemów przy konstruowaniu tego typu maszyn elektrycznych jest ograniczenie wartości momentu zaczepowego.

Moment zaczepowy powstaje na skutek współdziałania pola magnetycznego pochodzącego od magnesów trwałych umieszczonych na wirniku (lub na stojanie) ze stojanem (lub wirnikiem) o nierównomiernej szczelinie powietrznej maszyny. Jest zależny od położenia wirnika, a jego okresowość zależy od liczby biegunów magnetycznych i liczby zębów stojana. Powstawanie momentu zaczepowego to negatywne zjawisko, w wyniku którego pojawiają się niepożądane pulsacje momentu elektromagnetycznego, dodatkowe straty mocy, drgania i hałas, powodując zmniejszenie sprawności maszyny.

Zagadnienie minimalizacji momentu zaczepowego przy jednoczesnej redukcji wymiarów i masy silnika komutatorowego prądu stałego z magnesami trwałymi Doktorant rozwiązuje w swojej rozprawie. Temat podjęty przez Autora rozprawy jest ważny i aktualny z punktu widzenia teoretycznego i praktycznego, szczególnie istotny z powodu dążenia do jak najlepszego wykorzystania energii elektrycznej w Polsce i na świecie.

3. Charakterystyka pracy, tematyka poruszanych problemów

Rozprawa doktorska składa się z wykazu ważniejszych oznaczeń, ośmiu rozdziałów (w tym wprowadzenia, sześciu rozdziałów merytorycznych i podsumowania), spisu literatury oraz dwóch dodatków. Rozprawa obejmuje łącznie 151 stron, a w części zasadniczej (bez dodatków) 143 strony tekstu.

W rozdziale pierwszym Autor odnosi się ogólnie do zastosowania maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi, w szczególności maszyn prądu stałego. Podkreśla ich zalety, czyli: wysoką sprawność, dużą gęstość mocy w odniesieniu do ich masy, dobre właściwości dynamiczne i stosunkowo niewielkie wymiary w porównaniu do innych maszyn

o tej samej mocy. Zauważa też ich pewne wady, a mianowicie: wysoką cenę, pogarszające się z czasem właściwości stosowanych magnesów trwałych (w tym ryzyko ich rozmagnesowania) oraz pojawianie się momentu zaczepowego. Podkreśla negatywne znaczenie występowania tego momentu (jako składowej momentu elektromagnetycznego), szczególnie w maszynach komutatorowych z magnesami trwałymi. Przedstawia podstawowe metody służące do redukcji momentu zaczepowego, m.in. poprzez zastosowanie magnesów neodymowych zamiast magnesów ferrytowych.

W dalszej kolejności Autor sformułował tezę pracy, dotyczącą odpowiedniego doboru cech konstrukcyjnych silnika o wzbudzeniu od magnesów neodymowych, który pozwala zwiększyć moment elektromagnetyczny przy redukcji wymiarów i masy silnika bez zwiększenia tętnień tego momentu. Tę tezę Doktorant udowadnia w dalszych rozdziałach rozprawy.

Doktorant przedstawił też cel ogólny rozprawy doktorskiej oraz cele szczegółowe dotyczące: przeglądu metod minimalizacji momentu zaczepowego, analizy możliwości wykorzystania metod polowych i polowo-obwodowych do obliczeń, opracowania modeli polowych i polowo-obwodowych dwóch maszyn komutatorowych prądu stałego, wyboru środowiska obliczeniowego i przeprowadzenia odpowiednich obliczeń MES (Metodą Elementów Skończonych), budowy stanowiska pomiarowego do wyznaczania momentu zaczepowego, weryfikacji pomiarowej opracowanych modeli, wykonania prototypów maszyn oraz analizy wpływu wybranych cech konstrukcyjnych na właściwości eksploatacyjne badanych maszyn.

W ostatniej części przedstawiono zawartość poszczególnych rozdziałów rozprawy.

W rozdziale drugim w pierwszej kolejności Doktorant odnosi się do zwiększenia zainteresowania w ostatnim czasie silnikami elektrycznymi z magnesami trwałymi (m.in. komutatorowymi silnikami prądu stałego ze wzbudzeniem magnetoelektrycznym). Wiąże to z wykorzystaniem magnesów ze spieków ziem rzadkich, szczególnie od końca XX wieku. Opisuje szczegółowo konstrukcje silników z magnesami trwałymi, m.in.: komutatorowych i bezszczotkowych prądu stałego oraz bezszczotkowych silników synchronicznych. W dalszej kolejności omawia zagadnienie powstawania momentu elektromagnetycznego w maszynach komutatorowych z jego rozbiciem na składowe: momentu związanego z siłą Lorentza, reluktancyjnego (wynikającego z asymetrii obwodu magnetycznego) i zaczepowego, spowodowanego zmiennością reluktancji w obszarze przyszczelinowym.

W następnej kolejności Autor przedstawia ogólny opis matematyczny pola elektromagnetycznego silnika prądu stałego przy wykorzystaniu równań Maxwella, prawa Faradaya, prawa Gaussa i prawa Ampera. Przedstawia też podstawy merytoryczne i

możliwości stosowania do obliczeń pola elektromagnetycznego w maszynach elektrycznych MES. Opisuje też zalety i wady stosowania obliczeń dla dwu- (2D) i trzy-wymiarowego (3D) modelu maszyny.

W ostatniej części rozdziału przedstawiono obwodowy (m.in. opracowany w środowisku programu Maxwell Circuit) i polowo-obwodowy model komutatorowej maszyny prądu stałego o wzbudzeniu od magnesów trwałych.

W rozdziale trzecim rozprawy Doktorant przedstawił rozwiązania konstrukcyjne służące do ograniczenia momentu zaczepowego w silnikach z magnesami trwałymi. Opisuje następujące metody redukcji tego momentu: zastosowanie skosu zębów stojana (ew. wirnika), magnesów skośnych lub segmentacji magnesów, redukcji szerokości otwarcia żłobków poprzez kliny magnetyczne, zastosowanie stojana o budowie mostkowej, niesymetryczne rozłożenie lub modyfikacja kształtu magnesów, dobór odpowiedniej liczby żłobków i magnesów (m.in. o niecałkowitym stosunku liczby żłobków do liczby magnesów), zmniejszenie szerokości szczeliny powietrznej, zmianę kierunku magnetyzacji magnesów trwałych.

W rozdziale czwartym P. Strączyński przedstawia modele polowe i polowo-obwodowe oraz wyniki badań symulacyjnych dotyczących dwóch silników komutatorowych prądu stałego. W pierwszej kolejności odnosi się do konkretnego silnika o wzbudzeniu od magnesów ferrytowych w kształcie wycinka pierścienia, który nazywa silnikiem A. Przedstawia opracowane przez siebie modele tego silnika: model polowy 2D w programie FEMM 4.2, polowo-obwodowy 2D w środowisku programu ANSYS Maxwell, polowo-obwodowy 3D w środowisku ANSYS Maxwell. Przedstawia też wyniki obliczeń (i ich porównanie) dla tych modeli, dotyczących rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie oraz momentu zaczepowego. Zwraca też uwagę na różną liczbę elementów siatki dyskretyzacyjnej, zagęszczenie tej siatki w szczelinie powietrznej i czas obliczeń dla różnych modeli silnika. W oparciu o przedstawione wyniki, do badań symulacyjnych przedstawionych w dalszej części pracy, wybrano oprogramowanie ANSYS Maxwell 2D. Wybrano też maksymalne wymiary elementów siatki w MES.

W dalszej kolejności Autor opisuje konkretny silnik o wzbudzeniu od magnesów neodymowych w kształcie prostopadłościanu, umieszczonych w pakietowanym stojanie, który nazywa silnikiem B. Omawia zalety i wady takiego rozwiązania. Przedstawia model polowo-obwodowy tego silnika w różnych wariantach, dotyczących sposobu rozmieszczenia magnesów w stojanie (rozmieszczenie podstawowe lub rozsunięte), liczby żłobków w wirniku i grubości szczeliny powietrznej. Przedstawia wariantowe obliczenia dotyczące: rozkładu indukcji magnetycznej, momentu zaczepowego oraz prądu twornika. Z

przeprowadzonych obliczeń wciaga wniosek, że najlepsze rozwiązanie z punktu widzenia momentu elektromagnetycznego ma maszyna o nierozsuniętych magnesach, liczbie żłobków $Q=15$ i szerokości szczeliny powietrznej $\delta=1$ mm.

W rozdziale piątym przedstawiono opis opracowanych stanowisk pomiarowych i przebiegu przeprowadzonych pomiarów laboratoryjnych. Autor przedstawia opis przyrządów (m.in. dane techniczne), służących do wyznaczania momentu zaczepowego maszyny. Opisuje też stanowisko pomiarowe do wyznaczania tego momentu oraz algorytm działania cyklu pomiarowego. Stanowisko to posłużyło też do wyznaczania momentu tarcia szczotek oraz momentu oporowego łożysk badanych maszyn. W dalszej kolejności przedstawia inne stanowisko pomiarowe służące m.in. do wyznaczania momentu obrotowego i sprawności silnika prądu stałego. W ostatnim podrozdziale opisuje metody wyznaczania: indukcyjności i rezystancji uzwojenia całego twornika oraz jego części między wycinkami komutatora. Korzysta przy tym z odpowiedniego układu z mostkiem pomiarowym. Wykorzystuje też metodę zaniku prądu twornika po odłączeniu zasilania. Znajomość tych indukcyjności i rezystancji jest konieczna do zdefiniowania polowo-obwodowego modelu maszyny.

W rozdziale szóstym Doktorant opisuje modele fizyczne badanych maszyn oraz wyniki badań eksperymentalnych. W pierwszej kolejności przedstawia klasyczną konstrukcję silnika komutatorowego z magnesami ferrytowymi w kształcie wycinka pierścienia (silnik A). Podaje jego podstawowe dane znamionowe, kształt wirnika i stojana, ich wymiary oraz rozmieszczenie magnesów, schemat uzwojenia twornika i rozmieszczenia cewek uzwojenia w żłobkach. W dalszej kolejności przedstawia wybrane wyniki pomiarów, m.in. następujące charakterystyki:

- momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika,
- prędkości obrotowej w funkcji momentu obciążenia,
- prądu twornika w funkcji momentu obciążenia

oraz maksymalne wartości: momentu zaczepowego, momentu oporowego łożysk i momentu tarcia szczotek.

W drugiej kolejności opisuje konstrukcję silnika komutatorowego z magnesami neodymowymi w kształcie prostopadłościanu (silnik B). Podaje też wyniki pomiarów uzyskanych dla kilku wariantów konstrukcji badanej maszyny. Uwzględnia dwie różne szerokości szczeliny powietrznej ($\delta=1$ mm i $\delta=0,5$ mm) oraz dwie liczby żłobków ($Q=15$ i $Q=16$). W dalszej kolejności przedstawia wybrane wyniki pomiarów w postaci charakterystyk:

- momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika,

- prędkości obrotowej w funkcji momentu obciążenia,
- prądu twornika w funkcji momentu obciążenia

oraz maksymalne wartości: momentu zaczepowego, momentu oporowego łożysk i momentu tarcia szczotek.

W rozdziale siódmym przedstawiono porównanie wyników pomiarów i symulacji badanych maszyn. W pierwszej kolejności odnosi się do silnika A i stwierdza, że moment użyteczny na wale silnika obliczony na podstawie danych znamionowych i zmierzony w laboratorium niewiele się różni (różnica około 5%). W dalszym etapie porównuje wartości maksymalne momentu elektromagnetycznego, momentu zaczepowego i prądu twornika zmierzone i obliczone przy użyciu programów ANSYS Maxwell 2D oraz FEMM 4.2. Okazuje się, że lepszą zbieżność obliczeń i pomiarów otrzymano w przypadku maksymalnej wartości momentu elektromagnetycznego stosując ANSYS Maxwell 2D, a dla momentu zaczepowego i prądu twornika stosując FEMM 4.2. Przedstawia też charakterystyki momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika uzyskane z pomiarów i obliczeń, które dosyć znacznie się różnią dla poszczególnych wartości położenia wirnika.

W dalszej kolejności odnosi się do silnika B. Porównuje charakterystyki momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika uzyskane z pomiarów i obliczeń (przy użyciu programu ANSYS Maxwell) dla szerokości szczeliny powietrznej $\delta=1$ mm i $\delta=0,5$ mm oraz liczby żłobków $Q=15$ i $Q=16$. Widać na nich dosyć znaczne różnice dla poszczególnych wartości położenia wirnika silnika. Porównuje też wartości maksymalne momentu elektromagnetycznego i prądu twornika zmierzone i obliczone dla kilku konstrukcji maszyny. Zasadniczo uzyskuje zadowalające wyniki, procentowa różnica pomiędzy pomiarem a symulacją mieści się w przedziale ($\Delta\%=6-16\%$). Tylko dla przypadku $\delta=1$ mm i $Q=16$ $\Delta\%=77,7\%$ dla maksymalnej wartości prądu twornika.

W ostatniej części rozdziału Autor porównuje silnik A z silnikiem B i przedstawia charakterystyki pomiarowe: momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika oraz sprawności w funkcji momentu obciążenia dla tych silników (dla silnika B w kilku wariantach). Porównuje też sprawność tych silników dla obciążenia znamionowego oraz straty mocy w uzwojeniach twornika, w żelazie i straty mechaniczne (w łożyskach i na szczotkach).

W rozdziale ósmym P. Strączyński przedstawił podsumowanie i wnioski ze swoich badań.

Podsumowując, można stwierdzić, że rozprawa dotyczy ciekawego podejścia do projektowania i prawidłowej pracy komutatorowych silników prądu stałego z magnesami

trwałymi o odpowiedniej konstrukcji przy wykorzystaniu nowoczesnych materiałów neodymowych (uzyskanych na bazie pierwiastków ziem rzadkich). Należy podkreślić, że określenie czy odniósł sukces komercyjny, będzie możliwe po wprowadzeniu proponowanej metodologii do praktyki inżynierskiej.

Spis literatury jest reprezentatywny i dobrze wybrany.

Tekst napisany jest w sposób zrozumiały, poprawnym językiem polskim i nie zawiera nieścisłości pojęć i treści. Zawiera stosunkowo mało pomyłek redakcyjnych. Mimo staranności Autor nie ustrzegł się drobnych błędów językowych. Układ pracy jest prawidłowy. Świadczy to o umiejętności Autora redagowania rozpraw naukowych. Rozdziały stanowią zwartą całość, a proporcje ich objętości są prawidłowe i nie wymagają przesunięć treści. Ogólnie sposób wyłożenia materiału jest przejrzysty i dosyć łatwy w odbiorze dla czytelnika. Zamieszczone w rozprawie rysunki i tabele są czytelne i przejrzyste. Autor konsekwentnie stosuje terminologię techniczną oraz jednostki układu SI.

Teza rozprawy doktorskiej, dotycząca odpowiedniego doboru cech konstrukcyjnych silnika prądu stałego o wzbudzeniu od magnesów neodymowych, w celu zwiększenia momentu elektromagnetycznego przy redukcji wymiarów i masy silnika bez zwiększenia tętnień tego momentu, jest oryginalna oraz w pełni udowodniona w pracy.

Oceniam recenzowaną rozprawę doktorską mgr inż. P. Strączyńskiego pozytywnie jako uzupełnienie wiedzy dotyczącej projektowania i optymalizacji pracy komutatorowych silników prądu stałego z magnesami trwałymi. Praca ma duże znaczenie praktyczne i teoretyczne.

3. Główne pytania i uwagi dyskusyjne

- a) Tytuł pracy sugeruje, że Autor przeprowadził szereg badań dla różnych konstrukcji badanych silników i na tej podstawie wyciągnął ogólne wnioski stanowiące podstawę dalszych prac konstrukcyjnych. W rzeczywistości w pracy zawarto porównanie dwóch rozwiązań konstrukcyjnych, klasycznego silnika komutatorowego i silnika o zmodyfikowanym wzbudzeniu z zastosowaniem nowych rodzajów magnesów. Należy zatem uznać, że tytuł nie w pełni odpowiada treści rozprawy. Proszę o komentarz.
- b) Omawiane problemy są ciekawe z punktu widzenia praktyki inżynierskiej. Odczuwa się jednak pewien brak rozpoznania aktualnego stanu rynku silników prądu stałego. W szczególności, odpowiedzi na pytanie czy omawiane w pracy konstrukcje ktoś już zastosował praktycznie (powszechnie lub incydentalnie). Takie rozpoznanie w

połączeniu z analizą ekonomiczną byłoby miarą możliwości komercjalizacji uzyskanych wyników i określenia możliwości dalszych badań aplikacyjnych.

- c) W podrozdziale 7.1 Autor porównuje wartości maksymalne momentu elektromagnetycznego, momentu zaczepowego i prądu twornika zmierzone i obliczone przy użyciu programów ANSYS Maxwell 2D oraz FEMM 4.2. Okazuje się, że lepszą zbieżność obliczeń i pomiarów w przypadku maksymalnej wartości momentu elektromagnetycznego uzyskano stosując ANSYS Maxwell 2D, a dla momentu zaczepowego i prądu twornika stosując FEMM 4.2. Interesujące byłoby też wyliczenie i zmierzenie innych wielkości związanych z momentem zaczepowym, np. wartości minimalnych, wartości średnich, wartości skutecznych [M. Łukaniszyn, R. Wróbel, M. Jagieła: Moment elektromagnetyczny silników prądu stałego wzbudzanych magnesami trwałymi, Zeszyty Naukowe Pol. Śl., ELEKTRYKA, z. 177, 2001]. Przedstawia też charakterystyki momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika silnika A uzyskane z pomiarów i obliczeń (rys. 7.1), które dość znacznie się różnią dla poszczególnych wartości położenia wirnika. Proszę o komentarz do powyższych uwag.
- d) W podrozdziale 7.2 Autor przedstawia charakterystyki momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu wirnika silnika B uzyskane z pomiarów i obliczeń (rys. 7.2-7.4), które dość znacznie się różnią dla poszczególnych wartości położenia wirnika. Dodatkowo na rys. 7.4 widać wyraźne przesunięcie pomiarów i symulacji w zależności od kąta obrotu wirnika. Porównuje też wartości maksymalne momentu elektromagnetycznego i prądu twornika zmierzone i obliczone dla kilku konstrukcji maszyny (brakuje informacji o wartościach minimalnych, średnich i skutecznych). Zasadniczo uzyskuje zadowalające wyniki, procentowa różnica pomiędzy pomiarem a symulacją mieści się w przedziale ($\Delta\% = 6-16\%$). Tylko dla przypadku $\delta = 1 \text{ mm}$ i $Q = 16$ $\Delta\% = 77,7\%$ dla maksymalnej wartości prądu twornika. Proszę o komentarz do powyższych uwag.
- e) Proszę o wyraźne porównanie właściwości badanych silników A i B (w różnych wariantach) z punktu widzenia momentu zaczepowego (rys. 7.5), sprawności (tabela 7.3) i strat mocy (tabela 7.4 i rys. 7.7). A więc określenie które konstrukcje są lepsze biorąc pod uwagę różne ich cechy. Proszę o rozważenie zastosowania optymalizacji wielokryterialnej w swoich badaniach w przyszłości.
- f) Jakie są potencjalne błędy związane z założeniami przyjętymi w modelach numerycznych dla magnesów trwałych, zwłaszcza w kontekście nieliniowości ich charakterystyk?

- g) Jakie mogą być praktyczne implikacje wyników badań pod kątem nowych technologii napędów elektrycznych (np. w elektromobilności)? Czy proponowane rozwiązania mogą być zastosowane do innych typów maszyn elektrycznych?

4. Dodatkowe uwagi

- a). Wydaje mi się, że Doktorant niezbyt trafnie posługuje się określeniem "parametry", m.in. w tytule i w celu pracy, w kontekście cech konstrukcyjnych silnika. Parametry to raczej elementy modelu matematycznego silnika.
- b). W rozdziale 1.3 Autor wymienia cele operacyjne, które zostały realizowane w recenzowanej rozprawie. Mimo tego, że trochę wcześniej w tekście Autor wspomina o kwestiach ekonomicznych, to te zagadnienia nie zostały rozpoznane. Oczywistym jest, że praca ma charakter techniczny, ale warto byłoby względy ekonomiczne rozważyć, chociażby w sposób uproszczony. Brak analizy ekonomicznej nie należy traktować, jako znaczącego mankamentu pracy, jest to raczej problem do dyskusji.
- c). Szkoda, że Autor w podsumowaniu pracy nie zawarł praktycznych wytycznych, które mogłyby być podstawą komercjalizacji. Praca ma potencjał wdrożeniowy i ten fakt w mojej ocenie jest zbyt mało podkreślany przez Autora.
- d). Jakie są potencjalne wyzwania związane z komercjalizacją wyników pracy, szczególnie pod kątem produkcji maszyn elektrycznych o dużej gęstości energii?

5. Drobne uwagi redakcyjne

- a) Kilka rysunków w pracy zostało umieszczonych w taki sposób, że rozdzielają treść akapitu, a nawet pojedynczy wyraz. Przykładowo na str. 51 słowo „Stojan” jest dzielone między wierszami a w jego środku został umieszczony rysunek 3.6. Z kolei rysunek 4.26 rozdziela akapit pozostawiając na dole strony jedną linię tekstu. Taki sposób umieszczenia rysunków wpływa pozytywnie na ogólny wygląd tekstu, ale niekorzystnie na czytanie treści, co jest w mojej ocenie znacznie ważniejsze. W podobny sposób Autor umieszcza również tabele. W kolejnych pracach zalecałbym unikanie takiego działania.
- b) Rysunki w pracy są bardzo czytelne i doskonale ilustrują przedstawianą treść. Odnosi się jednak wrażenie, że część z nich jest zbędna z uwagi na trywialność przedstawianych treści (np. rysunki 3.11 i 3.13) lub są zbyt duże i niepotrzebnie „rozdrobnione”, ponieważ przedstawiają ta samą treść (np. rysunki 3.6 i 3.7). Praca naukowa w tekście głównym nie powinna również zawierać takich schematów jak

przedstawiony na rysunku 5.6 (w ostateczności można je zamieszczać w załącznikach o ile wnoszą coś w rozważany temat). Ponadto nie do wszystkich rysunków występują odwołania, np. do rys. 3.11-3.13.

- c) Autor podając wyniki używa czasami jednostek, które nie są popularne w technice. Przykładem może być prędkość wirowania wyrażona w stopniach na sekundę (np. str. 86). Nie jest to błąd, ale mając na uwadze wygodę czytelnika warto używać powszechniej stosowanych jednostek, które inżynier „dobrze rozpoznaje”, w odniesieniu do prędkości obrotowej np.: obroty na minutę lub radiany na sekundę.
- d) W całej rozprawie występuje wiele błędów związanych ze złą interpunkcją. Brakuje m.in. bardzo dużo przecinków, m.in. na str. 15, 20, 24, 27, 28 i dalej.
- e) Jednostki poszczególnych wielkości powinny być pisane czcionką prostą a nie pochyło jak jest w różnych miejscach pracy.
- f) Przebiegi różnych wielkości są określane tylko w funkcji czasu i nie trzeba, a nawet nie wolno, używać określenia „przebiegi czasowe” jak na str. 43. Natomiast całkowicie niedopuszczalne jest określenie "przebieg momentu zaczepowego w funkcji kąta obrotu" jak na str. 58. Podobnie na str. 69, 70, 73, 83, 93, 120, 122, rys. 4.12, 4.13, 7.5.
- g) Dziwny tytuł podrozdziału 3.3.4 "Dobór niecałkowitej liczby żłobków do liczby magnesów". Niecałkowity może być stosunek wymienionych wielkości.
- h) Rzeczy (a więc również cewki) mają a nie posiadają pewne cechy - str. 63.
- i) Pod tabelą 7.1 jest " T_a - prąd twornika" powinno być " I_a - prąd twornika".
- j) W tytule tabeli 7.2 brakuje informacji, że przedstawiono wartość maksymalną momentu elektromagnetycznego.

6. Podsumowanie i ocena końcowa pracy

Pomimo powyższych uwag dyskusyjnych, uważam że przedstawiona rozprawa stanowi istotny wkład Autora w szeroko rozumianą dziedzinę naukową: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Z przeprowadzonych przez Autora rozprawy badań wynika, że można dokładnie przeanalizować pracę komutatorowych silników prądu stałego wzbudzanych magnesami trwałymi i dobrać ich odpowiednie cechy konstrukcyjne, które pozwalają zwiększyć moment elektromagnetyczny przy redukcji wymiarów i masy silnika bez zwiększenia tętnień tego momentu. Autor uzyskał zadawalające wyniki badań, które są interesujące z punktu widzenia teoretycznego i praktycznego.

Jako oryginalny dorobek naukowy Autora rozprawy uważam:

- Opracowanie modeli polowych i polowo-obwodowych dwóch maszyn komutatorowych prądu stałego.
- Wybór środowiska obliczeniowego (programy: FEMM 4.2, ANSYS Maxwell 2D i 3D) i przeprowadzenie odpowiednich obliczeń MES.
- Analiza wpływu złożoności obliczeniowej modelu na dokładność obliczeń.
- Budowa odpowiednich stanowisk pomiarowych do wyznaczania momentu zaczepowego i innych wielkości silników prądu stałego z magnesami trwałymi.
- Budowa prototypów badanych maszyn.
- Analiza wpływu wybranych cech konstrukcyjnych na eksploatację badanych maszyn elektrycznych.
- Weryfikacja pomiarowa opracowanych modeli.
- Analiza porównawcza maszyn: maszyny klasycznej z magnesami ferrytowymi oraz maszyny wzbudzanej magnesami neodymowymi w kształcie prostopadłościanu (w kilku wariantach konstrukcji).
- Porównanie sprawności oraz szacunkowa analiza strat mocy badanych maszyn.

Na podkreślenie zasługuje fakt, że przeprowadzone badania są obszerne. Doktorant po przeprowadzeniu odpowiednich obliczeń komputerowych przeprowadza ich weryfikację pomiarową. Jest to naturalnym działaniem przedstawianych w rozprawach doktorskich, jednakże obecnie w dobie rozpowszechnionych technik komputerowych coraz rzadszym.

Biorąc pod uwagę, że mgr inż. Paweł Strączyński:

- wywiązał się z postawionych w rozprawie zadań,
- wykazał się umiejętnością formułowania i rozwiązywania trudnych problemów naukowych,
- zaprezentował dostatecznie wysoki poziom wiedzy z elektrotechniki, maszyn elektrycznych,

uważam, że praca doktorska „Analiza wpływu wybranych zmian obwodu magnetycznego na parametry silnika komutatorowego z magnesami trwałymi” w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, określone przez obowiązującą ustawę o stopniach i tytułach naukowych. W związku z powyższym, stawiam Radzie Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne Politechniki Świętokrzyskiej wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Stefan Paszek