

Kraków dnia 20 stycznia 2022

Prof. dr hab. Inż. Krzysztof Kluszczyński, dr h.c.

Politechnika Krakowska

Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej

Katedra Inżynierii Elektrycznej

**Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgr inż. Pawła Góralskiego pt.: „Silnik reluktancyjny o ruchu złożonym ze  
wspólnym obwodem magnetycznym”**

**opracowana dla Rady Naukowej Dyscypliny Automatyka, Elektronika i  
Elektrotechnika Politechniki Warszawskiej**

**1. Tematyka pracy doktorskiej na tle aktualnego stanu wiedzy.**

Narodziny elektromagnetyzmu i elektromechaniki jako nowych działów fizyki i techniki przypadły na wiek XIX w., na przestrzeni którego odkryto wszystkie podstawowe prawa rządzące przemianami elektromechanicznymi – i od tego to czasu mamy do czynienia z nieustającym i dynamicznym rozwojem przetworników elektromechanicznych (maszyn elektrycznych), wpraw prądu stałego, a od końca XIX w. – wraz z odkryciami G. Ferrarisa, T. A. Edisona, M. Doliwo-Dobrowolskiego i N. Tesli – prądu przemiennego. Do połowy XX wieku regulacja momentu, mocy, czy też prędkości obrotowej wymagało umiejętnego i pomysłowego łączenia rozwiązań elektrycznych z rozwiązaniami mechanicznymi (np. komutatory, pierścienie ślizgowe, różne typy przekładni itp.), a sytuację tą diametralnie odmieniły narodziny energoelektroniki i elektroniki przemysłowej, które stworzyły możliwości bezpośredniego kształtowania przebiegów czasowych prądów i napięć, a zwłaszcza płynnej regulacji częstotliwości przebiegów charakteryzujących się okresowością, bez udziału elementów mechanicznych.

W wieku XX olbrzymie zapotrzebowanie przemysłu na maszyny elektryczne doprowadziło do gwałtownego rozwoju przemysłu elektromaszynowego, ukierunkowanego na wielkoseryjną produkcję szerokiej gamy znormalizowanych

szeregów i typów silników, zaspakajających w zakresie właściwości eksploatacyjnych zróżnicowane oczekiwania odbiorców. Budowa układu napędowego polegała na doborze właściwego silnika spośród maszyn oferowanych przez przemysł elektromechaniczny, a następnie - na dostosowaniu go do realizacji zadanych funkcji poprzez odpowiedni dobór elementów przenoszenia sił i momentów oraz kształtowania trajektorii ruchu (np. sprzęgła, przekładnie, dźwignie, mechanizmy śrubowe, mechanizmy krzywkowe itp.).

Na przełomie XX i XXI wieku - za sprawą dynamicznego rozwoju obrabiarek sterowanych numerycznie, technologii wytwarzania CAD/CAM, elastycznych linii produkcyjnych, automatyzacji i robotyzacji produkcji, szybkiego prototypowania i druku 3D - pojawiają się zupełnie nowe trendy, ukierunkowane na wytwarzanie krótkich serii, a nawet pojedynczych egzemplarzy przetworników elektromechanicznych, ściśle dopasowanych do wymogów użytkowników. Są to przetworniki o złożonej konstrukcji, częstokroć zintegrowane konstrukcyjnie i technologicznie z elementami przenoszenia sił, momentów oraz kształtowania trajektorii ruchu, ukierunkowane ściśle - zarówno pod względem wymogów eksploatacyjnych, jak też i wymogów użytkowych (np. masa, objętość, wymiary gabarytowe, proporcje długości i szerokości) na zastosowania w konkretnych systemach i urządzeniach. Odbiorcami takich złożonych, dedykowanych przetworników, określanym terminem serwo-systemów, stał się przemysł motoryzacyjny, lotniczy, okrętowy, obrabiarkowy, kosmiczny, farmakologiczny, przetwórstwa spożywczego itp.

W nurcie właśnie takich trendów i poszukiwań, bardzo aktualnych w Polsce i na świecie, lokuje się praca doktorska mgr inż. Pawła Góralskiego, ukierunkowana na analizę i syntezę złożonego, kompaktowego przetwornika elektromechanicznego o 2 stopniach swobody: jest to silnik liniowo-obrotowy o cylindrycznej przestrzeni roboczej. W tym nowatorskim rozwiązaniu, zaproponowanym przez Promotora i Doktoranta, pobrzmiewają echa działań konstruktorów maszyn elektrycznych z XIX w. i pierwszej połowy XX w., którzy dla uzyskania pożądanych właściwości eksploatacyjnych i warunków pracy, musieli często sięgać po zaawansowaną wiedzę z zakresu mechaniki i teorii mechanizmów.

Rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Góralskiego mieści się w dawnej dyscyplinie Elektrotechnika, w szczególności dotyczy dwóch specjalności: Maszyn Elektrycznych (jeszcze ściślej, niekonwencjonalnych przetworników elektromechanicznych) oraz tzw.

elektromagnetyzmu obliczeniowego (ang. computational electromagnetism). Zawiera również elementy, łączące ją z elektroniką i automatyką. Realizacja układu sterowania pasmami fazowymi uzwojenia stojana lokuje się po stronie układów elektronicznych ze sterownikami, zaś niekonwencjonalny liniowo-obrotowy reluktancyjny przetwornik może znaleźć zastosowanie w otwartym lub zamkniętym układzie regulacji jako element wykonawczy automatyki (aktuator).

Konstrukcja opracowanego silnika wymaga również dobrej znajomości zagadnień mechanicznych, co pozwala scharakteryzować zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne jako system mechatroniczny.

Na podstawie powyższych uwag można stwierdzić, że praca doktorska jest w pełni zgodna z aktualnymi trendami rozwojowymi maszyn elektrycznych i aktuatorów, jak też i to, że mieści się w nowej dyscyplinie Automatyka Elektronika i Elektrotechnika.

## **2. Charakterystyka obiektu badań i udział Doktoranta w jego powstaniu.**

Obiekt badań i analiz został opisany w sposób słowny na stronie 18-21 oraz przedstawiony w sposób graficzny na rys. 5. Jest to reluktancyjny przetwornik elektromechaniczny liniowo-obrotowy, 2-wirnikowy (pierwszy wewnętrzny wirnik z przekładnią śrubową z gwintem trapezowym, zapewniającym samohamowność, odpowiada za ruch liniowy; zaś drugi zewnętrzny wirnik kubkowy z suwliwym połączeniem wieloklinowym odpowiada za ruch obrotowy), ze stojanem cylindrycznym dwustronnym z wewnętrzną i zewnętrzną strefą zębowo-żłobkową (z jednokierunkową propagacją pola magnetycznego), który posiada dwa obwody elektromagnetyczne i wspólne jarzmo.

W rozdziale 1.1-1.3 Doktorant przedstawił w sposób obrazowy, poprzez kolejne przekształcenia konstrukcji, jak doszło do powstania prezentowanej w pracy koncepcji niekonwencjonalnego silnika, która jest rezultatem technicznie uzasadnionej, dalszej transformacji wcześniej znanych i opisanych w literaturze rozwiązań konstrukcyjnych. Miejsce nowego zaproponowanego rozwiązania w systemie klasyfikacji przetworników elektromechanicznych o ruchu złożonym (przedstawionym w sposób graficzny w formie schematu blokowego na rys. 1), wskazuje blok wyróżniony kolorem zielonym. W rozdziale 1.4 rozprawy podkreślono, że proponowane rozwiązanie nie jest li tylko intrygującą ciekawostką konstrukcyjną o wysokich walorach poznawczych

i edukacyjnych, ale jest rozwiązaniem praktycznym, które może znaleźć swoje miejsce w zastosowaniach przemysłowych tam wszędzie, gdzie występuje zapotrzebowanie na układy napędowe liniowo-obrotowe o wymiarach gabarytowych, charakteryzujących się małą długością w stosunku do średnicy zewnętrznej. Na taki obszar możliwych zastosowań proponowanego rozwiązania wskazują wykresy, przedstawione na rys. 9a, b.

Należy podkreślić, że rozpatrywane w pracy doktorskiej rozwiązanie silnika liniowo-obrotowego ze wspólnym jarzmem było przedmiotem zgłoszenia patentowego w 2012 roku. Zostało ono uwieńczyte przyznaniem patentu krajowego PAT.221768 w 2015 roku, co potwierdza w sposób dobitny oryginalność rozwiązania, będącego przedmiotem analizy Doktoranta.

Istotne znaczenie ma fakt, że zbudowany został prototyp maszyny, potwierdzający wykonalność tak złożonej konstrukcji z technologicznego punktu widzenia, a wyniki badań laboratoryjnych zostały zaprezentowane na Międzynarodowym Sympozjum Maszyn Elektrycznych (SME) w 2016 roku. Doktorant jest współautorem patentu oraz współautorem prototypu maszyny i stanowiska badawczego (strona 142, 143 rys. 123, 124).

W tym miejscu nasuwają mi się już pierwsze pytania do Doktoranta. Proszę o wyjaśnienie, na czym polega „synchroniczna propagacja pola magnetycznego wytwarzanego przez wewnętrzne i zewnętrzne uzwojenia stojana” (strona 19 wiersz 1, 2 d).

Odnosnie do budowy silnika, ciekaw jestem, co zadecydowało o wyborze brązu jako materiału na nakrętkę w mechanizmie śrubowym. Chciałbym też, aby Doktorant przedstawił konkretny przykład możliwego zastosowania silnika.

### **3. Cele i zakres pracy doktorskiej.**

Cele główne i pośrednie pracy doktorskiej zostały przedstawione przez Doktoranta w sposób szczegółowy w rozdziale 2 (str. 23-24). Jawią się one jako konsekwentna kontynuacja wieloletniego zaangażowania się mgr inż. Pawła Góralskiego w prace projektowe, konstrukcyjne i badawcze dotyczące, silnika liniowo-obrotowego nowej konstrukcji.

Autor podejmuje w rozprawie doktorskiej zakrojone na szeroką skalę prace teoretyczne dotyczące modelowania polowo-obwodowego maszyny w stanach statycznych

i dynamicznych, ukierunkowane przede wszystkim na sformułowanie wytycznych dla projektantów i konstruktorów takich silników. Sformułowane przez Niego i samodzielnie rozwiązane zagadnienia i problemy, wypunktowane na stronie 24, są logicznym dopełnieniem i uzupełnieniem wcześniejszych prac projektowo-konstrukcyjnych, prowadzonych wspólnie z prof. Grzegorzem Kamińskim.

Ze względu na specyficzny charakter pracy Doktorant nie sformułował tezy, lecz zastąpił ją zbiorem celów, co - w moim mniemaniu - jest wystarczające. Proszę jednak Doktoranta o podjęcie próby sformułowania tezy przedstawionej rozprawy.

#### **4. Merytoryczna charakterystyka zawartości rozprawy – główne osiągnięcia Doktoranta oraz uwagi o charakterze krytycznym i dyskusyjnym.**

Model matematyczny silnika jako układu elektromechanicznego o 2 stopniach swobody tworzą równania (16) (17) równowagi mechanicznej dla ruchu liniowego i obrotowego (uwaga: zamiast „tarcie laminarne”, ma być „tarcie linearne”) oraz równania (32) (33) równowagi elektrycznej dla  $(m_1 + m_2)$  pasm fazowych dwustronnego stojana cylindrycznego, uzupełnione wzorami (29) (30), opisującymi momenty elektromagnetyczne, działające na pierwszy i drugi wirnik oraz wzorem (31) umożliwiającym wyznaczenie koenergii elektromagnetycznej (rozdział 3.1., 3.2.)

W rozdziale 3.3. Autor wyróżnia na rysunku 20, 16 niezależnych parametrów konstrukcyjnych, a następnie redukuje ich liczbę do 5 poprzez wprowadzenie a priori sztywnych relacji pomiędzy wysokościami jarzm, szerokościami zębów stojana i wirników (ostateczną strukturę wektora parametrów konstrukcyjnych przedstawia relacja (57)). Jako niezmiennie w badaniach symulacyjnych przyjmuje też dwa podstawowe wymiary: średnicę wewnętrzną wirnika wewnętrznego i zewnętrzną wirnika zewnętrznego (odstępstwem od tego założenia są tylko badania, przedstawione w rozdziale 4.1.1.). Za niefortunne z punktu widzenia terminologicznego uważam nazywanie parametrów konstrukcyjnych „parametrami sterującymi konstrukcją / geometrią silnika”.

W rozdziale 3.4. Autor scharakteryzował metodę wyznaczania rozkładu przestrzennego 2D pola magnetycznego na 2-wymiarowym przekroju poprzecznym silnika. Korzysta z programu FEMM 4.2 (uwaga: 4.2, a nie 42) oraz Generatora Triangle. Na stronie 42 stwierdza, że: „stosowany był najmniejszy możliwy wycinek modelu”, bądź też, że „wykorzystywano model pełny”. Rodzi się pytanie, jak określany był najmniejszy

możliwy wycinek modelu w kontekście różnej liczby zębów stojana i wirników, różnej liczbie biegunów oraz różnej liczbie pasm fazowych oraz jakie wycinki były używane do wyznaczania koenergii magnetycznej i momentów elektromagnetycznych w modelu matematycznym silnika.

Kąty obrotów obu wirników były dyskretyzowane, na co wskazuje tabela 2 (s. 44). Czy wskazane liczby położenia wirnika nie są zbyt rzadkie dla wyznaczenia charakterystyk kątowych momentu elektromagnetycznego? (należy zwrócić uwagę, że momenty elektromagnetyczne są wyznaczane przy założeniu stałej powierzchniowej gęstości prądów, uwaga: ma być  $5\text{ A/mm}^2$ , a nie  $5\text{ A/m}^2$ , jak widnieje na s. 50).

Sposób rozwiązywania modelu dynamicznego silnika reluktancyjnego ze wspólnym obwodem magnetycznym Doktorant omówił w rozdziale 3.6. Ograniczył się tylko do stanów nieustalonych elektromagnetycznych, zakładając stałość obrotów obu wirników oraz przyjął szereg założeń upraszczających dotyczących przebiegów czasowych prądów. Trudno ocenić skuteczność tej metody odnośnie do prądów płynących w pasmach fazowych (wyznaczaniu tych prądów poświęca rozdziały 5.7.1., 5.7.2.), albowiem w rozdziale 6, poświęconym badaniom pomiarowym, nie zestawia przebiegów prądów wyznaczonych na drodze symulacyjnej z prądami pomierzonymi, tak jak to czyni dla charakterystyk kątowych momentów elektromagnetycznych.

W rozdziale 7.1.5. Doktorant szeroko komentuje przebiegi czasowe prądów (w szczególności odnosi się do czasów ich narastania i wygaszania). Czy jest możliwe zilustrowanie przy pomocy przebiegów uzyskanych na drodze symulacji zjawiska, opisanego na stronie 157, jako „samoistne zwiększanie natężenia prądu podczas regulacji histerezowej”?

W rozdziale 3.7. Doktorant opisuje metodę wyznaczania strat w żelazie w silnikach ze wspólnym jarzmem. Szczególną uwagę poświęca przypadkom równoczesnej pracy obu wirników.

Istotne znaczenie dla osiągnięć naukowych Doktoranta ma rozdział 4, w którym badał On wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych (promienia zewnętrznego rdzenia, długości pakietu blach, współczynnika średnic, szerokości zębów stojana wewnętrznego i zewnętrznego, liczby zębów wirnika zewnętrznego, liczby pasm fazowych i liczby par biegunów) na momenty obrotowe silnika oraz – wpływ liczby zębów stojana na rozpraszanie strumieni magnetycznych. Rozdział 4.6. poświęca konstrukcjom z krótkimi drogami strumienia magnetycznego.

Należy podkreślić, że pozytywną i wartościową cechą rozdziału 4 jest zwięzłe podsumowywanie wyników symulacyjnych i nadawaniu tym podsumowaniom formy wytycznych i zaleceń dla projektantów i konstruktorów.

W obszernym i bogato zilustrowanym rozdziale 5 Doktorant dużo uwagi poświęca badaniom wpływu wspólnego obwodu magnetycznego na procesy komutacji prądów, rozptył strumieni magnetycznych i straty w żelazie wspólnego jarzma, co należy zaliczyć do szczególnie istotnych Jego osiągnięć.

W rozdziale 6. weryfikuje wybrane wyniki obliczeń symulacyjnych, zestawiając je z wynikami badań pomiarowych.

Odnosząc się całościowo do zaproponowanej przez Doktoranta metodyki symulacyjnych badań wpływu różnych parametrów konstrukcyjnych, konfiguracji i wariantów na pracę silnika, doceniam olbrzymią czasochłonność przedstawionego podejścia, wielki wysiłek wniesiony przez mgr inż. P. Góralskiego w opracowanie efektywnego oprogramowania oraz w zautomatyzowanie obliczeń komputerowych. Jestem też przekonany, że otrzymane rezultaty mają duże znaczenie poznawcze. Na uznanie zasługuje sposób graficznej prezentacji wyników obliczeń, realizowanych w pętlach iteracyjnych i odnoszących się nieraz do setek i tysięcy różnych przypadków, związanych z tzw. badaniami parametrycznymi (wartość parametru zmienia wraz z zadany krokiem od zadanej wartości minimalnej do zadanej wartości maksymalnej). Ciekawym pomysłem autora jest zaproponowanie metody „odfiltrowywania wyników obliczeń” ukierunkowanej na poszukiwaniu rozwiązań, spełniających zadane wymagania (rozdział 4.1.9. s. 155).

Pomimo uznania dla olbrzymiego nakładu pracy Doktoranta odczuwam lekki niedosyt, któremu daje też wyraz sam Autor, charakteryzując na stronie 155 proponowaną metodę słowami „nie należy ona do wyrafinowanych”. Myślę tutaj o szerokich i niewykorzystanych możliwościach zastosowania metod optymalizacyjnych, bazujących na pojęciach: zmiennych konstrukcyjnych, zbiorach rozwiązań dopuszczalnych, funkcjach celu, ekstremach lokalnych i globalnych, funkcjach kar itd. oraz – o bogatej niewykorzystanej bibliotece programów optymalizacyjnych. Proste przeszukiwanie założonego obszaru rozwiązań jest bowiem bardzo czasochłonne i prowadzi częstokroć do tego, że „przeliczone” są przypadki, które nie mają sensu technicznego (np. ze względu na nadmierne nasycenie się pewnych fragmentów obwodu magnetycznego) lub też takie, które są niemożliwe do wykonania

z konstrukcyjnego punktu widzenia (znajdują się poza zbiorem rozwiązań dopuszczalnych np. z powodu przepełnienia żłobka).

Chciałbym też zwrócić uwagę Doktoranta na to, że w pełni wiarygodne i użyteczne kryteria porównawcze powinny zakładać jednakowe wykorzystanie materiałów czynnych (żelaza oraz miedzi) oraz brać pod uwagę nie tylko właściwości eksploatacyjne, ale również wartości charakterystycznych współczynników takich jak: moment elektromagnetyczny / masa, czy też moment elektromagnetyczny / objętość.

## 5. Układ pracy doktorskiej i jej redakcja.

Układ pracy jest czytelny i przejrzysty, a następstwo rozdziałów logiczne i uzasadnione. Specyficzny charakter pracy: badanie dużej liczby parametrów konstrukcyjnych, wariantów i konfiguracji na właściwości maszyny powoduje, że po pewnym czasie jej lektura staje się nadmiernie nużąca, co jednak było trudne do uniknięcia przy założonych celach.

Język techniczny jest w ogólności poprawny. Wątpliwości budzą niektóre terminy, wprowadzone przez Autora, które nie mają swojego odpowiednika w powszechnie stosowanej terminologii technicznej np.: „parametry sterujące konstrukcją / geometrią silnika”, „osiągi silnika”.

W tekście występuje dość duża liczba błędów typu „literówek”, których Autor w przyszłości musi unikać (wskazano je bezpośrednio Doktorantowi). Czasami występują niezgodności oznaczeń w tekście i we wzorach, związane z innym typem czcionki. Zdarza się niewłaściwe użycie słowa „ilość”, zamiast „liczba” np. w tytule podrozdziału 4.3 (powinno być liczba par biegunów, liczba pasm fazowych itd.).

Dobór literatury jest poprawny i wyczerpujący z punktu widzenia postawionych celów.

## 6. Wniosek końcowy.

Przedstawiona praca doktorska potwierdza to, że mgr inż. Paweł Góralski **dysonuje bardzo dobrym warsztatem badawczym**, zarówno w zakresie teorii przetworników elektromechanicznych (modelowanie, analiza porównawcza, metody polowe analizy rozkładów pól magnetycznych), jak i w zakresie projektowo – konstrukcyjno –



pomiarowym. Doktorant podjął się realizacji pracy doktorskiej, dotyczącej bardzo słabo rozpoznanej tematyki i zmierzył się z powodzeniem z problemami, które dotychczas w literaturze technicznej nie były podejmowane. Należy stwierdzić, że zrealizowany zakres pracy doktorskiej był dużym wyzwaniem teoretyczno – obliczeniowym, jak też i to, że realizacja przyjętego programu badań symulacyjnych była bardzo czasochłonna. Praca doktorska mgr inż. P. Góralskiego jest kolejnym reprezentatywnym osiągnięciem, charakteryzującym unikalną szkołę naukową prof. Grzegorza Kamińskiego, ukierunkowaną na niekonwencjonalne przetworniki oraz systemy elektromechaniczne i mechatroniczne o ruchu złożonym, która cieszy się wysokim uznaniem wśród „maszynowców” w Polsce.

**W moim przekonaniu rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Góralskiego spełnia w pełni wymagania stawiane pracom doktorskim z zakresu dawnej dyscypliny Elektrotechnika, zawarte w obowiązujących przepisach prawnych i zawiera elementy, pozwalające uznać ją za pracę, spełniającą wymagania w zakresie nowej dyscypliny Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika.**

A handwritten signature in black ink, consisting of several vertical, wavy lines of varying heights and thicknesses, typical of a cursive or stylized signature.