

**dr hab. inż. Mariusz Stępień, prof. PŚ**

Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny  
Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki  
44-100 Gliwice, ul. B. Krzywoustego 2

Gliwice, 10.06.2020 r.

## RECENZJA

rozprawy doktorskiej **mgr. inż. Mieczysława PCIANA**  
pt. *Analiza porównawcza nadprzewodnikowego i konwencjonalnego generatora synchronicznego małej mocy*

Promotor w przewodzie doktorskim: dr hab. inż. Dariusz Czerwiński, prof. PL

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Michał Majka, prof. PL

### 1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą prawną opracowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr. inż. Mieczysława Pciała jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Lubelskiej, dr hab. inż. Wojciecha Jarzyny, prof. PL, z dnia 5 maja 2020 r. informujące o powierzeniu mi przez wspomnianą Radę Dyscypliny, uchwałą nr AEiE/7.3/2020, obowiązków recenzenta rozprawy.

### 2. Wprowadzenie

Zjawisko nadprzewodnictwa, w szczególności tak zwanego nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego (HTS) jest obszarem intensywnych badań, w szczególności w zakresie fizyki wysokich energii, elektrotechniki, elektroniki i informatyki. Interesujące właściwości tych materiałów zachęcają do prób ich stosowania w różnego rodzaju aplikacjach przemysłowych, w szczególności w elektrotechnice dużych mocy. Główne zastosowania to linie przesyłowe, transformatory, maszyny elektryczne oraz ograniczniki prądów zwarciovych. Głównym obszarem badań w elektrotechnice jest redukcja strat na rezystancji uzwojeń oraz wykorzystanie zjawiska idealnego diamagnetyzmu. Nadprzewodnictwo pozwala na istotne zwiększenie gęstości energii w urządzeniach oraz podwyższenie ich sprawności. Ograniczeniem spowalniającym wprowadzanie tych zastosowań do przemysłu jest konieczność chłodzenia (co najmniej LN<sub>2</sub>) oraz zjawisko nagłej utraty nadprzewodnictwa, tzw. quench, który niesie ryzyko nawet uszkodzenia urządzenia. Istotnym ograniczeniem jest też wciąż wysoka cena nadprzewodnika.

Recenzowana rozprawa doktorska usytuowana jest w obszarze urządzeń nadprzewodnikowych mocy. Autor podjął się próby porównania właściwości generatora synchronicznego z magnesami trwałymi z uzwojeniami klasycznymi do generatora z uzwojeniami nadprzewodnikowymi. Podejście to wpisuje się w trend naukowy poszukiwania urządzeń o wyższej sprawności i gęstości mocy. Wyrażną przesłanką, jaka przyświecała Autorowi w pracy była możliwość zastosowania takiego urządzenia w statkach powietrznych lub ogólniej mówiąc, w zastosowaniach do awioniki. Obszar ten ma bardzo duży potencjał aplikacyjny, a podwyższenie gęstości energii urządzeń może stworzyć całkiem nowe możliwości.

### 3. Ocena strony formalnej rozprawy

Przedłożona do oceny rozprawa doktorska ma formę zwartej monografii o objętości 146 stron. Praca ma prawidłową strukturę, zawierającą spis rzeczy, część zasadniczą obejmującą 123 strony, spis literatury liczący 125 pozycji oraz krótki załącznik z przykładowym listingiem programu skryptowego.



Tytuł recenzowanej rozprawy doktorskiej odpowiada w pełni jej treści, która ułożona została w typową dla rozpraw doktorskich strukturę, to znaczy część wstępną, część zasadniczą i podsumowanie. Szczegółowo struktura pracy została omówiona w dalszej części recenzji.

## 4. Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedmiotem rozprawy jest analiza porównawcza generatora synchronicznego z magnesami trwałymi w zakresie materiału, z którego są wykonane uzwojenia, czyli miedzi i nadprzewodnika HTS. Przedmiotem badań był generator jednofazowy z dwoma odrębnymi uzwojeniami, miedzianym i nadprzewodnikowym. Przedmiotem porównania były głównie generowane napięcia (co do ich kształtu i wartości). Analiza porównawcza bazowała na wynikach modelowania numerycznego oraz eksperymentu.

### 4.1. Teza, cel i zakres pracy

W pracy, w sposób wyraźny została zdefiniowana teza, która mówi, że zamiana uzwojeń miedzianych na nadprzewodnikowe umożliwia efektywniejsze działanie generatora synchronicznego z magnesami trwałymi. Na pierwszy rzut oka jest to teza dość trywialna, bo generalnie nadprzewodniki względem uzwojeń miedzianych mają korzystniejsze właściwości, w szczególności mniejsze straty mocy, wynikające ze zmniejszonej rezystancji i większe robocze gęstości prądu. Należy zauważyć, że taka zamiana uzwojeń niesie za sobą szereg złożonych problemów inżynierskich, jak choćby chłodzenie kriogeniczne, oraz szereg innych zjawisk, jak na przykład straty mocy związane z prądem przemiennym w nadprzewodniku. Udowodnienie tak postawionej tezy wymaga zatem przeprowadzenia odpowiednich badań pozwalających na jej ocenę ilościową, czyli sprawdzenie, jak mocno właściwości generatora ulegną zmianie. W tezie zawarto sformułowanie, mówiące o "efektywniejszym działaniu generatora". Autor nie zdefiniował co rozumie pod pojęciem efektywniejszego działania. W ocenie pracy generatorów mówi się zazwyczaj o sprawności i gęstości mocy, natomiast pojęcie efektywności odnosi się do stosunku energii dostarczonej do urządzenia do energii z niego odbieranej, a to zagadnienie w pracy nie było analizowane.

W pracy, w sposób bezpośredni, zdefiniowano jeden cel główny, pokrywający się z tytułem rozprawy. W celu zawarta została również definicja narzędzi które posłużyły do jego osiągnięcia. Są to modele numeryczne i ich weryfikacja eksperymentalna na zbudowanych modelach fizycznych. Cel główny jasno określa kierunek działań badawczych Autora. W pracy nie zdefiniowano wprost celów cząstkowych. Wskazano jednak działania, jakie zostaną podjęte do udowodnienia tezy. Wśród nich jest przykładowo opracowanie modeli numerycznych, czy też zbudowanie modelu rzeczywistego generatora. Autor nazywa te działania badaniami, jednak nie zawsze jest to poprawne (zbudowanie modelu jest działaniem, a nie badaniem). Wszystkie one mogą być jednak uznane, jako cele cząstkowe pracy.

W rozprawie nie zdefiniowano wprost jej zakresu. Zakres ten można określić dopiero na podstawie lektury rozprawy. Podanie zakresu w sposób jawny na początku pracy umożliwiłoby zdefiniowanie, jakie obszary badań są podejmowane w rozprawie, a jakie są poza jej zakresem. Podczas lektury, w wielu fragmentach pracy odnosi się wrażenie brakujących elementów badań. Dopiero dogłębna analiza przeprowadzonych prac pozwala stwierdzić, że te brakujące elementy rozprawy są poza jej zakresem.

### 4.2. Struktura pracy

Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów. Zawiera również streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz symboli i skrótów oraz wspomniane już wcześniej: spis literatury i załącznik. W dalszej części rozdziału omówiono szczegółowo zawartość poszczególnych rozdziałów rozprawy.

Rozdział pierwszy jest wstępem do pracy. Jest to bardzo krótki, zaledwie dwustronicowy rozdział, w którym nakreślono ogólnie problematykę zagadnienia oraz podano tezę i cel pracy. Stopień ogólności rozdziału sprawia, że trudno wywnioskować jakie przesłanki skłoniły Autora do podjęcia tego właśnie zagadnienia oraz, tak jak to już wspomniano, jaki jest zakres pracy.

Rozdział drugi poświęcono w całości zjawisku nadprzewodnictwa. Rozdział ten ma w dużej mierze charakter przeglądu historycznego odkryć i właściwości nadprzewodników, w tym zjawiska zerowej



rezystancji i zjawiska idealnego diamagnetyzmu. Omówiono również zagadnienie powierzchni parametrów krytycznych, przy czym nie było ono poruszane w dalszej części pracy.

Rozdział trzeci poświęcono omówieniu materiałów nadprzewodnikowych i zastosowań nadprzewodnictwa, czyli urządzeń nadprzewodnikowych. Pierwsza część rozdziału poświęcona jest przeglądowi materiałów nadprzewodnikowych, w tym materiałów niskotemperaturowych. W tym rozdziale przedstawiono również charakterystykę materiałów i taśm nadprzewodnikowych, które zostały wykorzystane do budowy prototypu będącego przedmiotem badań. Drugą część rozdziału poświęcono przeglądowi urządzeń nadprzewodnikowych. Jest to w zasadzie jedyna część w pracy, którą można uznać za analizę obecnego stanu wiedzy. Właściwym wydawałoby się wyodrębnienie tej części jako samodzielnego rozdziału. Niestety Autor poświęcił bardzo mało uwagi generatorom nadprzewodnikowym. Analiza rozwiązań silników i generatorów z nadprzewodnikami zajęła zaledwie trzy i pół strony. Przedstawione tam rozwiązania, omówione w bardzo dużym stopniu ogólności, dotyczyły wyłącznie maszyn synchronicznych, zawierających uzwojenie nadprzewodnikowe w wirniku, a zatem w obwodzie wzbudzenia, zasilanym prądem stałym. Autor nie odniósł się w ogóle do maszyn synchronicznych z magnesami trwałymi (określanych w literaturze skrótem PMSG - Permanent Magnet Synchronous Generator), w tym maszyn tego typu z uzwojeniem nadprzewodnikowym. Należy wspomnieć, że Autor cytuje w pracy artykuł [49], w którym omawiany jest generator nadprzewodnikowy z magnesami trwałymi, ale cytowanie to nie zostało wykorzystane w tej części rozdziału. Nie przeprowadzono zatem analizy stanu wiedzy w odniesieniu do generatorów PMSG. Nie jest wiadomym czemu Autor w swojej pracy w ogóle nie używa tego powszechnie znanego określenia dla maszyn synchronicznych z magnesami trwałymi.

Rozdział czwarty, według tytułu poświęcony jest modelowaniu generatora. W pierwszym podrozdziale określonym jako "model geometryczny generatora" Autor opisał obiekt badań, czyli generator z magnesami trwałymi. Ten istotny element pracy, jakim jest opis budowy generatora i jego geometrii mógłby stanowić oddzielny rozdział. W części tej brak jakiegokolwiek rysunku technicznego generatora. Jest jedynie tabela z wymiarami i zdjęcia. Definiują one jednak geometrię w sposób jednoznaczny, a zatem są wystarczające. Trudno doszukać się w tej części pracy informacji na temat modelu numerycznego, w szczególności jego geometrii. Drugi podrozdział poświęcono "modelowi elektromagnetycznemu statycznemu". Jak można się domyślać chodzi o model magnetostaticzny. Głównym zagadnieniem omawianym w tym fragmencie są parametry materiałowe, w szczególności blachy stojana i magnesów trwałych. Autor nie odniósł się jednak do parametrów przewodów, w szczególności kluczowych z punktu widzenia rozprawy taśm HTS. Niestety informacji na temat parametrów taśm, jakie zostały wykorzystane w modelowaniu nie ma też w żadnej innej części pracy. Dalsza część podrozdziału zawiera wyniki modelowania numerycznego magnetostaticznego w postaci rozkładów przestrzennych i konturowych indukcji. Ostatni podrozdział poświęcony jest "modelowi elektromagnetycznemu dynamicznemu". Z treści rozdziału wynika, że jest to po prostu model elektromagnetyczny. Autor analizuje pracę maszyny w stanie ustalonym, zatem nie pojawiają się tam żadne stany dynamiczne (rozruch, czy skokowa zmiana obciążenia). Podrozdział ten zawiera podobne wyniki, jak podrozdział wcześniejszy, uzupełnione o przebiegi napięcia wygenerowanego na zaciskach generatora. Omawiany rozdział czwarty, dość obszerny bo liczący 34 strony, jest rozdziałem kluczowym z punktu widzenia modelu numerycznego.

Rozdział piąty dotyczy zagadnień chłodzenia kriogenicznego generatora. Autor przedstawił główne założenia teoretyczne wymiany ciepła w generatorze (modelowanie zagadnień cieplnych nie było przedmiotem pracy) oraz przedstawił wyniki badań wpływu ciekłego azotu na parametry materiału magnetycznego stojana oraz magnesów trwałych. Badania bazowały na analizie literatury oraz pomiarach.

Rozdział szósty jest drugim zasadniczym rozdziałem w rozprawie. Trochę niefortunnym jest określenie "model rzeczywisty" jakim posługuje się Autor. Określeniem typowym dla urządzeń będących przedmiotem innowacji i budowanych na potrzeby badań laboratoryjnych jest „prototyp”. Takie określenie zapewniłoby pracy większą przejrzystość i nie nakładałoby się na pojęcie „model” w ujęciu matematycznym i numerycznym. Rozdział szósty podzielony jest na dwie części, z których pierwsza poświęcona jest konstrukcji prototypu generatora, a druga jego badaniom. W pierwszym, krótszym podrozdziale autor opisał technologię wykonania prototypu, w tym montaż magnesów trwałych na wirniku oraz przygotowanie uzwojeń. Drugi podrozdział, znacznie obszerniejszy bo liczący 31 stron, poświęcono pomia-



rom właściwości generatora. Pomiary skupiały się w zasadzie na wyznaczeniu napięcia generowanego na uzwojeniach w różnych warunkach pracy generatora (temperatura, prędkość wirowania, obciążenie). Również w tym rozdziale nie zamieszczono żadnego rysunku technicznego, montażowego, czy też schematu pomiarowego (pomijając proste schematy z Rys. 6.5 do Rys. 6.7).

Rozdział siódmy, zgodnie z tytułem, zawiera analizę porównawczą. Jest to analiza porównawcza generatora z uzwojeniem klasycznym do generatora z uzwojeniem nadprzewodnikowym. Autor deklaruje, że analiza bazuje na wynikach modelowania numerycznego oraz na wynikach eksperymentów. Wydzielenie tej części jako oddzielny rozdział nie było konieczne, ponieważ analiza porównawcza na bazie eksperymentów była przedstawiona dość szczegółowo w rozdziale poprzednim, natomiast analiza numeryczna była prowadzona bez rozróżnienia materiału uzwojeń i nie jest możliwe przeprowadzenie na jej podstawie porównania właściwości generatorów. Bardziej pożądanym w tym rozdziale byłoby szczegółowe porównanie wyników analizy numerycznej do eksperymentów, gdyż pozwoliłoby to potwierdzić wzajemną poprawność wyników. Zawarte w rozdziale rezultaty dotyczą dość wąskich zakresów pracy (np. zakresu zmian wartości prądu roboczego) i dlatego wnioskowanie na ich podstawie oraz liniowe ekstrapolowanie wyników do większych mocy może nie być poprawne. Weryfikacją tego mogłoby być wykorzystanie zweryfikowanego pomiarowo modelu numerycznego.

Ostatni, liczący dwie i pół strony, rozdział ósmy jest rozdziałem podsumowującym. Na pierwszej stronie Autor zawarł podsumowanie ogólne rozprawy odnosząc się jeszcze raz do ulokowania rozprawy w ogólnych trendach badawczych oraz omówił zakres prac. Strona druga poświęcona jest wnioskowi szczegółowemu z pracy, aczkolwiek podsumowanie ilościowe jest bardzo skromne (pojawiają się jedynie trzy odniesienia procentowe uzyskanych wartości). Ostatnie pół strony to wykaz osiągnięć jakie na podstawie rozprawy udało się uzyskać. Najważniejszym jest stwierdzenie, że przeprowadzone badania potwierdzają udowodnienie postawionej w pracy tezy.

Podsumowując, struktura pracy jest poprawna, typowa dla rozpraw doktorskich. Zawiera wszystkie istotne informacje wymagane do opisu pracy badawczej bazującej na modelowaniu numerycznym i eksperymencie laboratoryjnym, ale zawiera też sporo niedociągnięć w zakresie struktury badań, sformułowań i podziału treści. Ponieważ jednak struktura ta jest w ujęciu całościowym kompletna i wyczerpuje badane zagadnienie, rozprawa nie wymaga rozbudowy, czy też zasadniczych uzupełnień.

## 5. Ocena rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska jest efektem realizacji badań w ramach przewodu doktorskiego wszczętego w dyscyplinie "Elektrotechnika", a na skutek zmian prawnych w strukturze dyscyplin naukowych sklasyfikowanego do dyscypliny "Automatyka, elektronika i elektrotechnika". Praca zrealizowana została w obszarze elektrotechniki i w tym obszarze, będącym częścią nowej dyscypliny naukowej, została przeprowadzona jej ocena, w tym jej wkład w rozwój wspomnianego obszaru naukowego.

### 5.1. Ocena ogólna

Poszukując nowych zastosowań nadprzewodników w zakresie elektrotechniki Autor postawił tezę, że zastosowanie uzwojenia nadprzewodnikowego w generatorze synchronicznym z magnesami trwałymi pozwoli na uzyskanie lepszych właściwości, niż zastosowanie w takim generatorze uzwojenia miedzianego. Na potrzeby udowodnienia postawionej tezy autor przeprowadził wstępną analizę literatury, opracował model numeryczny i na jego podstawie przeprowadził badania symulacyjne oraz zbudował prototyp urządzenia i przebadał go eksperymentalnie. W rozprawie wykorzystał więc w sposób poprawny wszystkie narzędzia stosowane zwyczajowo w naukach inżyniersko-technicznych do pełnego scharakteryzowania właściwości urządzenia. Te trzy obszary stanowią też trzy główne filary pracy w ramach których realizowano działania. Żaden z nich nie był w pracy dominujący.

Podjęcie Autora do pracy badawczej nie we wszystkich aspektach było jednak poprawne. W zakresie analizy stanu wiedzy, nie odniósł się On w ogóle do urządzeń będących przedmiotem jego zainteresowania (o czym już wspomniano wcześniej), czyli generatorów lub silników PMSG/PMSM, w



szczegółności takich, w których stosowane są nadprzewodniki. Przeprowadzona analiza wskazałaby, że nadprzewodniki stosowane są głównie na uzwojenie wzbudzenia. Przyczyną tego stanu rzeczy są po pierwsze straty mocy wynikające z prądu przemiennego (uzwojenie wzbudzenia jest uzwojeniem prądu stałego), a po drugie względy technologiczne - nawinięcie uzwojenia stojana z taśmy nadprzewodnikowej jest znacznie trudniejsze, a dodatkowo kształt pola magnetycznego wirnika niekorzystnie wpływa na właściwości taśmy. Aby zatem analiza była pełnowartościowa należałoby się w niej odnieść, przynajmniej teoretycznie, do tych aspektów i ocenić, czy nie sprawią one, że stosowanie uzwojenia nadprzewodnikowego jest albo nieekonomiczne, albo też niemożliwe technologicznie.

W zakresie analizy numerycznej postępowanie Autora wydaje się być postępowaniem poprawnym. Niestety sposób opisu zarówno modelu numerycznego, jak i wyników modelowania w pracy jest dość szczątkowy i nie pozwala na pełną ocenę jakości modelowania. Autor korzysta z oprogramowania FEMM 4.2, które jest znanym narzędziem numerycznym stosowanym w obliczeniach elektromagnetycznych. Wskazanim byłoby jednak, aby w rozprawie doktorskiej Autor zdefiniował wszystkie elementy modelu. A są to, oprócz geometrii obiektu, również równania matematyczne opisujące środowisko, siatka elementów skończonych oraz warunki brzegowe (w tym wymuszenia). Jak można się domyślać Autor prowadził modelowanie 2D (świadczą o tym głównie rysunki rozkładów indukcji), jednak nigdzie w pracy Autor nie wyraził tego wprost. Jest tylko jedno miejsce w rozprawie, gdzie w podrozdziale 4.2 Autor pisze, że opracował "model 2D w symetrii osiowej". Niestety, przy okazji tego sformułowania Autor popełnia też istotny błąd. Przedstawiony model 2D ma symetrię planarną (jest rozciągnięty wzdłuż osi). Symetria osiowa oznaczałaby obrót narysowanej w 2D geometrii wokół osi generatora. Nie wiadomo, czy ten błąd to wynik niewiedzy Autora, czy też omyłkowa zamiana pojęć. Mówiąc o symetrii modelu, należy dodać, że istniała możliwość wykorzystania symetrii obwodowej generatora i zamodelowania tylko wycinka jego obwodu, ale z tego nie skorzystano. Takie zabiegi często stosuje się, aby uzyskać lepszą dokładność modelu numerycznego przy tej samej wydajności obliczeniowej. Wątpliwość co do jakości modelu wzbudza zamieszczony w pracy rysunek 4.25, na którym przedstawiono składową styczną indukcji magnetycznej w szczelinie. Mocno "postrzępiony" przebieg indukcji, mimo że okresowy może wskazywać na niewystarczającą gęstość siatki w szczelinie maszyny. Ponadto Autor pisze, że indukcja ta zostanie wykorzystana do wyznaczenia momentu zaczepowego, a jak wiadomo moment zaczepowy jest przebiegiem o dość regularnym kształcie i gładkim przebiegu. Autor przedstawił przebiegi momentu zaczepowego na Rys. 4.31 i Rys. 4.34. Mimo, że okres przebiegu momentu jest 8-krotnie krótszy od obiegu wirnika, Autor postanowił przedstawić moment na całej długości obiegu ( $2\pi$ ), czyniąc rysunek mocno nieczytelny. Zarówno w rozkładach przestrzennych, tak i przebiegach, do właściwej interpretacji rozkładów lub przebiegów okresowych wystarcza przedstawienie dwóch okresów. Przy większej liczbie ulega utracie czytelność wyników. Mimo, że ta uwaga wydaje się mieć charakter uwagi redakcyjnej, to odnosi się do sposobu interpretacji przez Autora rozprawy wyników modelowania numerycznego, która to umiejętność jest wymagana do prawidłowego prowadzenia tego procesu.

Badania eksperymentalne, w tym wykonanie prototypu, wykazały umiejętność skutecznego postępowania Autora w zakresie prac laboratoryjnych. Z rozprawy wynika, że część prac mechanicznych została zlecona specjalistom (jak na przykład przygotowanie wirnika do osadzenia magnesów), jednak zasadnicza część eksperymentów została przeprowadzona przez Autora. Jest to istotny atut badań opisanych w pracy. Autor nie wyjaśnił jednak w pracy, dlaczego postanowił przebadać generator jednofazowy (z tylko jedną cewką nadprzewodnikową i jedną miedzianą), ale można domyślać się, że przyczyną tego była dostępność materiału nadprzewodnikowego. Przebadanie uzwojenia generatora nadprzewodnikowego z prądem rzędu pojedynczych amperów nie daje obrazu pełnych właściwości generatora. Jeżeli ten rząd wartości prądu byłby maksymalnym możliwym do uzyskania, to konstruowanie takiego generatora nie miałoby sensu ze względu na bardzo niską gęstość mocy (urządzenie nieprzydatne praktycznie). A jeżeli jest możliwe uzyskanie generatora wytwarzającego wyższe prądu (a na pewno jest), to należałoby przeprowadzić badanie prądu krytycznego tak nawiniętego uzwojenia, pracującego z częstotliwością 50 Hz. Takie badanie pozwoliłoby określić wydajność uzwojenia, a tym samym i całego generatora. To samo odnosi się do badania generatora w zakresie różnych częstotliwości (różnych prędkości wirowania wirnika). Nadprzewodnictwo ulega silnej degradacji wraz ze wzrostem częstotliwości (nawet niewielkim),