

zatem błędnym jest porównywanie właściwości generatora w szerokim spektrum prędkości wirowania nie sprawdzając poziomu prądu krytycznego możliwego do uzyskania.

Istotnym mankamentem badań pomiarowych jest wybór punktów pracy generatora do pomiarów. Autor przeprowadził badania tylko dla stanu jałowego i dla obciążenia  $1\Omega$ , nie uzasadniając w pracy dlaczego wybrał takie obciążenie (jedynym zauważalnym uzasadnieniem jest uzyskanie prądu wyjściowego równego napięciu). Właściwości generatora to nie tylko napięcie wyjściowe. Aby poprawnie określić właściwości, a tym samym wykazać, że który generator działa "efektywniej" należałoby wyznaczyć przynajmniej parametry schematu zastępczego generatora oraz jego charakterystykę zewnętrzną. Autor nie wspomniał w pracy o istnieniu schematu zastępczego generatora mimo, że jest to jeden z ważniejszych sposobów opisu właściwości maszyny. Posługiwanie się wyłącznie rezystancją uzwojenia prowadzi do błędnych wniosków i nie pozwala na właściwą ocenę właściwości. Przykładem tego może udział reaktancji generatora w wyznaczaniu jego mocy zwarciowej. Mówiąc o mocy zwarciowej można łatwo przejść do charakterystyki zewnętrznej. Autor przebadął generator w stanie jałowym oraz przy obciążeniu  $1\Omega$ . Nie wiadomo dlaczego nie wyznaczono prądu zwarciowego oraz innych obciążeń (przy tym zakresie napięć i prądów byłoby to bardzo łatwe i nie wymagało specjalnego osprzętu), wyznaczając charakterystykę obciążenia w pełnym zakresie.

Przedstawione powyżej uwagi mają charakter ogólny odnoszący się do sposobu prowadzenia badań, a postawione powyżej pytania mają charakter pytań retorycznych i nie wymagają w zasadzie odpowiedzi Autora. Ich celem jest wskazanie pewnych problemów, które nie zostały poruszone w pracy, a których uwzględnienie pozwoliłoby na pełniejszy opis analizowanych zjawisk. Niestety Autor, co już wcześniej wspomniano, nie zdefiniował w sposób wyraźny zakresu pracy, stąd brak jednoznacznego rozgraniczenia między tym co nie zostało wykonane na skutek niewłaściwego warsztatu badawczego Autora, a co nie zostało zrobione w sposób świadomy, bo było poza zakresem pracy.

Zaletą badań opisywanych w rozprawie jest połączenie z sobą trzech metod badawczych - analizy teoretycznej, modelowania numerycznego i badań eksperymentalnych. Autor wykazał, że jako całość stanowią one wspólne narzędzie do wykazania słuszności tez badawczych. Poszczególne obszary wymagają jednak wyjaśnienia pewnych wątpliwości, które w pracy zostały przedstawione w sposób nieprecyzyjny lub niewyczerpujący. Wątpliwości te przedstawione zostały w postaci uwag dyskusyjnych w następnym podrozdziale.

## 5.2. Uwagi dyskusyjne

Przedstawione w pracy wyniki badań dają pewien całościowy obraz procesu badawczego prowadzącego do udowodnienia postawionej w pracy tezy. Następujące zagadnienia poruszane w rozprawie są niejednoznaczne lub niepełne i wymagają wyjaśnienia lub komentarza Autora:

1. W podrozdziale 4.2 opisany został model polowy magnetostaticzny, a w rozdziale 4.3 model elektromagnetyczny. Sposób opisu modelu jest jednak bardzo szcątkowy. W tym zakresie istnieje kilka kwestii do wyjaśnienia. Po pierwsze, jak można się domyślać, do opisu matematycznego modelu wykorzystane zostały równania Maxwella. Koniecznym byłoby jednak zdefiniowanie równań, które posłużyły do uzyskania rozwiązania i o których Autor wspomina na str. 50. Sposób sformułowania równań jest elementem istotnym bo determinuje stopnie swobody rozwiązania. Jaka forma równań przyjęta została do analizy w pracy (ewentualnie na jakiej bazuje oprogramowanie FEMM)? Jaka była różnica w modelu matematycznym dla zagadnienia elektromagnetycznego względem zagadnienia magnetostaticznego? Drugim aspektem jest jakość siatki elementów skończonych. Jak wiadomo w problemach elektromagnetycznych minimalna gęstość siatki determinowana jest między innymi przez zmienność wielkości polowych (np. naskórkowość, czy szerokość szczeliny powietrznej). Jaka była szacunkowa liczba elementów i liczba węzłów w modelu numerycznym generatora oraz ile elementów skończonych przypadało na szerokości szczeliny powietrznej? Czy Autor badał wpływ gęstości siatki na jakość otrzymywanych wyników? Trzecim zagadnieniem modelu jest sposób modelowania uzwojenia. Autor opisał dość szczegółowo parametry materiałowe wprowadzane do modelu, ale pominął całkowicie materiał uzwojenia. Czy



- i jakie właściwości materiału nadprzewodnikowego uwzględniane były w modelowaniu i w jaki sposób wprowadzane były do modelu?
2. W podrozdziale 4.2 w ostatnim akapicie na str. 54 Autor pisze, że na bazie „analiz numerycznych zbadano wpływ zmiany kąta skosu magnesów na rozkład indukcji magnetycznej”. Autor powinien wyjaśnić w jaki sposób w analizie magnetostatycznej 2D modelowany był skos magnesu? W modelu 2D magnes jest modelowany jest w postaci jego przekroju poprzecznego, zatem modelowanie skosu wymaga pewnego rodzaju podejścia zastępczego i niezbędne jest jego wyjaśnienie.
  3. Na Rys. 4.14 Autor wykreślił linie trendu, jako średnie ruchome. Autor twierdzi, że kształt napięcia będzie odpowiadał linii trendu. Jaki typ średniej ruchomej został wykorzystany do obliczeń, jaki czas lub liczbę próbek przyjęto do uśredniania i na jakiej podstawie Autor twierdzi, że linia trendu ma kształt taki, jak generowane napięcie.
  4. Na str. 58 Autor pisze, że minimalna indukcja dla kąta skosu magnesu  $40^\circ$  wynosi 0,3 T, a dla kątów  $0, 5$  i  $25^\circ$  tylko  $3 \cdot 10^{-5}$  T, co oznacza 4 rzędy różnicy wartości. Autor nie wyjaśnił skąd bierze się tak znaczna różnica. Czy jest to zmiana płynna i czy występuje jakiś kąt dla którego minimalna indukcja ulega gwałtownemu zmniejszeniu?
  5. W podrozdziale 4.3 na str. 62 Autor pisze, że „konieczne było określenie przebiegu jak najbardziej zbliżonego do przebiegu sinusoidalnego”. Autor wprowadza pojęcie „podobieństwo” licząc nieznaną (wiadomo tylko że otrzymany metodą trapezów, ale nie określony w pracy żadną zależnością) współczynnik, którym opisuje podobieństwo przebiegów do sinusoidalnego. W jaki sposób Autor zdefiniował ten współczynnik i co oznacza dane podobieństwo wyrażone procentowo? Dlaczego autor nie skorzystał ze znanego i wykorzystywanego w analizie przebiegów odkształconych współczynnika zawartości harmonicznych THD? Dlaczego Autor uznał współczynnik podobieństwa jako jedyny istotny parametr jakościowy dla generatora? Czy przez wybór zbyt dużego współczynnika podobieństwa nie dochodziło do istotnego obniżenia mocy generatora?
  6. Na Rys. 4.31 zamieszczono przebiegi momentu zaczepowego dla różnych kątów skosu magnesów. Mimo małej czytelności rysunku można zauważyć, że na jeden obrót maszyny przypada 8 okresów przebiegu momentu. I mimo, że są to wyniki symulacji numerycznej to odpowiednie (np. szczytowe) wartości momentu w poszczególnych okresach różnią się od siebie (czasem nawet dość znacznie). Z czego wynika ta różnica? Ponadto zależność wartości momentu maksymalnego od kąta skosu zamieszczona na Rys. 4.32 wykazuje fluktuacje w zakresie odcinka o tej samej monotoniczności (np. między  $6$  a  $36^\circ$ ). Podobna sytuacja zachodzi na Rys. 4.33. Jakie zjawisko fizyczne w maszynie może odpowiadać za te fluktuacje lub jaka może być inna ich przyczyna?
  7. W podrozdziale 5.4 Autor przedstawił, zestawione w Tabeli 5.1, wyniki pomiarów indukcji magnesów trwałych dla temperatury otoczenia i ciekłego azotu. Jak informuje Autor wartości indukcji zmieniają się w zakresie  $14 \div 16\%$ . Autor nie podał jednak jaka była powtarzalność pomiaru (rozrzut wyników pomiarowych), ani jak szacuje jego dokładność. Pomiar indukcji magnetycznej przeprowadzony w ten sposób wymaga odpowiedniej obróbki metrologicznej. Inaczej można mówić jedynie o przypadkowym wyniku pomiaru.
  8. W podrozdziale 6.2 na str. 108 Autor stawia tezę, że zmniejszenie rezystancji uzwojeń generatora powoduje zwiększenie jego mocy zgodnie z zależnością (6.5). Czy jest to zależność zawsze obowiązująca dla generatora PMSG oraz czy są jakieś założenia upraszczające wymagane do jej stosowania? Na jakiej podstawie (jakim materiale źródłowym) Autor oparł swoje rozważania (ten fragment rozprawy nie zawiera żadnych cytowań)?

Niektóre mniej istotne uwagi dyskusyjne, które nie wymagają wyjaśnień Autora, zamieszczono poniżej w celach informacyjnych, dając Autorowi możliwość ich uwzględnienia (lub unikania w przypadku błędnego rozumowania) w dalszej pracy badawczej.

- W podrozdziale 3.4 Autor zadeklarował, że „kable nadprzewodnikowe produkowane są w trzech konfiguracjach”. Należy dodać, że przedstawione przykłady dotyczą tylko kabli trójfazowych i nie wyczerpują wszystkich rozwiązań, w tym kabli jednofazowych i kabli DC.



- W podrozdziale 4.2 Autor napisał, że „model numeryczny pozwolił na rozwiązanie pola sprzężonego łączącego pole elektromagnetyczne i obwód elektryczny”. Należy zauważyć, że pojęcie „pola sprzężone” używane jest do analizy interdyscyplinarnej z różnych obszarów fizyki, na przykład pola magnetycznego i pola temperatur. Połączenie o którym pisze Autor jest raczej modelowaniem obwodowo-polowym, a nie sprzężonym.
- W podrozdziale 4.2, na stronie 51 Autor pisze, że warunki brzegowe zostały zdefiniowane „wzdłuż konturu zewnętrznej średnicy obudowy”. Zaznaczony warunek brzegowy biegnie wzdłuż konturu obwodu zewnętrznego stojana, a nie jego średnicy. I podobnie z wewnętrzną częścią - jest to obwód wału wirnika, a nie jego średnica.
- W tym samym fragmencie Autor pisze, że „uzyskane wartości indukcji magnetycznej pozwolą na generowanie napięcia przez generatory”. Jest to tautologia. Każda indukcja magnetyczna zmienna w czasie będzie generować jakieś napięcie.
- Na stronie 61 pod Rys. 4.18 Autor pisze, że przebiegi są okresowe a ich okres wynoszący 0,02 s oznacza, że generator w stanie jałowym wytwarza napięcie o częstotliwości 50 Hz. Częstotliwość napięcia nie zależy od punktu pracy, tylko od prędkości wirowania, a tę Autor zadawał jako parametr wejściowy do symulacji, zatem „odkrycie” wydaje się być bardzo trywialne.
- W ostatnim akapicie na str. 64 Autor pisze, że „na rysunku 4.23 zostało przedstawione podobieństwo (...) przebiegu”. Na wspomnianym rysunku przedstawione zostały przebiegi napięcia, a podobieństwo może być z nich jedynie wnioskowane.
- W przedostatnim akapicie na str. 66 Autor pisze, że „wygenerowanie mapy rozkładu wektorów (...) umożliwiło przeprowadzenie dokładnej analizy zjawisk”. Stawianie takich tez jest bardzo dyskusyjne. Nie jest jasnym jakie zjawiska autor analizuje na podstawie mapy rozkładu wektorów oraz jak dokładna jest to analiza i z czego ta dokładność wynika.
- Na str. 81 Autor pisze, że w celu potwierdzenia wyników dotyczących właściwości magnetycznych stali (...) uwzględnił wyniki opublikowane w innych artykułach (Rys. 5.3). Autor nie podaje niktety jakie to były artykuły, a w podpisie pod Rys. 5.3 umieścił tylko jedno cytowanie do poz. [11] literatury. Użycie liczby mnogiej w cytowanym zdaniu świadczy jednak wyraźnie, że artykułów było więcej. Należy zauważyć, że autor odnosi się tylko do krzywej pierwotnej magnesowania. W przypadku pracy magnetyków w ciekłym azocie zmiana ulega również kształt pętli histerezy, a tym samym wynikające z niego straty mocy. Nie można tego zjawiska pomijać. Natomiast w odniesieniu do recenzowanej rozprawy, w której prowadzona jest analiza porównawcza różnych uzwojeń generatora, badanie właściwości magnetycznych rdzenia można uznać za działanie dodatkowe nie wpływające na udowodnienie tezy pracy.
- W podrozdziale 6.1, na str. 85 Autor informuje, że magnesy zostaną umieszczone w kanałach przygotowanych w wirniku i będzie je utrzymywać siła przyciągania. Jest to założenie poprawne w przypadku zatrzymanego wirnika. Wprawienie wirnika w ruch spowoduje powstanie znacznych sił odśrodkowych, które mogą powodować przesunięcie lub nawet oderwanie magnesów. Należy domniemać, że Autor ustalił, że siły odśrodkowe nie wpłyną na przemieszczenie magnesów.
- Na str. 88 Autor prowadzi dywagacje na temat różnicy napięcia generowanego przez taśmę HTS i uzwojenie miedziane, doszukując się przyczyny w rozłożeniu zwojów w żłobku. Podobne rozważania można znaleźć na stronie 101. Rozwiązaniem byłoby wyznaczenie napięć na bazie modelowania numerycznego dla uzwojenia miedzianego rozłożonego tak, jak to miało miejsce w praktyce. Inaczej wyniki modelowania i eksperymentu będą się różnić.
- W podrozdziale 6.2 na str. 102 zdanie w 1 i 2 linii od góry jest niepoprawne logicznie. Wirnik nie może obracać się z częstotliwością  $f$ . Ten proces określa prędkość wirowania wyrażona w obrotach na minutę (jak można przypuszczać częstotliwość obrotów byłaby w obrotach na sekundę). Autorowi prawdopodobnie chodziło o częstotliwość zmian (prędkość wirowania) pola elektromagnetycznego w generatorze.



- W Tabeli 6.3 zasadnym byłoby porównanie przekrojów dla gęstości prądu uzyskiwanego w tych samych warunkach (czyli w tym wypadku w temperaturze LN2) oraz uwzględniając ograniczenie prądu krytycznego wynikające ze strat mocy AC.

### 5.3. Dobór i wykorzystanie źródeł

Rozprawa doktorska zawiera spis literatury liczący 125 pozycji. Są to zarówno pozycje książkowe (ponad 10 pozycji), materiały katalogowe (20 pozycji) oraz artykuły naukowe. Ponad połowa spośród artykułów naukowych to pozycje anglojęzyczne. Wszystkie pozycje ze spisu literatury są cytowane w treści pracy. Autor nie przeprowadził co prawda typowego przeglądu stanu aktualnego tematu (jest to jeden z istotnych mankamentów pracy), ale cytowana literatura jest prawidłowo dobrana i związana z pracą doktorską. Pewną niepoprawną praktyką stosowaną przez Autora względem literatury jest wykorzystywanie źródeł wtórnych (publikacji o charakterze przeglądu literatury). Taki charakter mają na przykład pozycje [86] i [112], do których Autor odwołuje się wielokrotnie. Poza tymi drobnymi uwagami wykorzystanie źródeł w pracy jest poprawne.

### 5.4. Ocena strony redakcyjnej

Strona redakcyjna pracy nie budzi większych zastrzeżeń. Tekst jest spójny, rzeczowy i łatwy w lekturze. Jak na pozycję literatury technicznej zawiera dość obszerną część opisową oraz bardzo ubogi aparat matematyczny (tylko kilka bardzo podstawowych wzorów). Największą niespójnością językową w tekście jest stosowanie słów „nadprzewodnikowy” i „nadprzewodzący”. Można odnieść wrażenie, że pierwsze z nich miało się odnosić do materiałów i urządzeń w ujęciu ogólnym (np. przewód nadprzewodnikowy), a drugie do ich stanu pracy (np. przewód w stanie nadprzewodzącym). Autor jednak bardzo często stosował te pojęcia zamiennie. Zamieszczony materiał graficzny jest w większości dobrze dobrany i czytelny, a w dotyczącym go tekście zamieszczono prawidłowe odwołania. Daje to dobry ogólny obraz rozprawy pod względem redakcyjnym.

Autor nie ustrzegł się drobnych błędów edytorskich i językowych, które przedstawiono poniżej (skrót „R.” oznacza odpowiednio rozdział, podrozdział lub sekcję):

- R. 2.3, w drugim zdaniu, str. 17, zamiast „które polega” powinno być „i polega”
- R. 2.7, w trzeciej linii od dołu na str. 22, zamiast „właściwości” powinno być „właściwościami”
- R. 3.3.2, w trzecim zdaniu, str. 29, zamiast „się” powinno być „są”
- R. 3.4, w 4 linii od góry na str. 35 wyraz „jest” powinien być usunięty
- R. 3.4, na str. 36 w 5 linii pod Rys. 3.11 zamiast „impedancję” powinno być „impedancją”
- R. 3.4, na str. 42, w 7 linii od dołu zamiast „pozwolą” powinno być „pozwalają”
- R. 4.2, na str. 47, w 5 linii od dołu zamiast „pracy” powinno być „pracę” lub „warunki pracy”
- R. 4.2, na str. 47, w 4 linii od dołu zamiast „konicznych” powinno być „koniecznych”
- R. 4.2, na str. 50, w 6 linii od góry zamiast „głębokość” powinno być „głębokości”
- R. 4.3 na str. 61 w 4 linii pod Rys. 4.18 zamiast „otrzymany” powinno być „otrzymanych”
- R. 4.3 na str. 63 drugie zdanie ostatniego akapitu jest niepoprawne stylistycznie. Przykładowe poprawne brzmienie: „Zwiększając wartość kąta skosu magnesów  $\alpha$  zwiększa się wartość procentowa (współczynnika) podobieństwa przebiegów otrzymanych w wyniku symulacji”.
- R. 4.3 na str. 64 w pierwszej linii drugiego akapitu zamiast „najlepsza” powinno być „najwyższa”
- R. 4.3 na str. 68 w 4 linii pod Rys. 4.27 zamiast „Zmiana nawinięcia cewki” powinno być „Zmiana sposobu nawinięcia cewki”
- R. 4.3 na str. 73 w 2 linii od góry zamiast „składowe” powinno być „składowej”



- R. 4.3 na str. 73 w 1 linii czwartego akapitu zamiast „*precyzyjne wykonanie*” powinno być „*precyzja wykonania*”
- R. 4.3 na str. 73 w 2 linii od końca zamiast „*będzie działał*” powinno być „*działa*”
- R. 4.3 na str. 74 w 2 linii 2-go akapitu zamiast „*że uzwojeniach*” powinno być „*że w uzwojeniach*”
- R. 5.1 na str. 78 w 3 linii 1-go akapitu zamiast „*konwencji*” powinno być „*konwekcji*”
- R. 5.3 na str. 80 w 6 linii od dołu zamiast „*niż temperaturze*” powinno być „*niż w temperaturze*”
- R. 5.3 na str. 80 w 5 linii od dołu zamiast „*pola magnetycznego*” powinno być „*natężenia pola magnetycznego*”
- R. 5.4 na str. 84 w 8 linii od dołu zamiast „*waha 14*” powinno być „*waha się w zakresie 14*”
- R. 6.2 na str. 101 ostatnie zdanie przed zależnością (6.2) nie ma czasownika, nie jest zatem w rozumieniu języka polskiego zdaniem. Być może zdanie to powinno brzmieć: „Siła elektromotoryczna wyrażana jest zależnością (6.2)”.
- R. 6.2 na str. 103 w 5 linii drugiego akapitu zamiast „*specyfikację*” powinno być „*specyfikacje*”
- R. 6.2 na str. 105 w 5 linii od góry zamiast „*zgodnie (6.1)*” powinno być „*zgodnie z (6.1)*”
- R. 6.2 na str. 105 w 3 linii trzeciego akapitu zamiast „*licznie*” powinno być „*liczbie*”
- R. 6.2, na str. 114 i 115 Autor przy zakresach procentowych połączonych ze słowami „*wyższe*” i „*niższe*” powinien być spójnik „*o*”, np. ostatnia linia na str. 114 zamiast „*jest wyższe 25 ÷ 28%*” powinno być „*jest wyższe o 25 ÷ 28%*”
- R. 7 na str. 132 w 5 linii od góry zamiast „*jąłowy*” powinno być „*jąłowym*”
- R. 8 na str. 135 w drugim i czwartym punkcie (myślniku) zamiast „*analiza*” powinno być „*analizę*”

## 6. Podsumowanie i konkluzja końcowa

Założone cele pracy zostały osiągnięte. Autor wykazał się wiedzą i umiejętnościami prowadzenia badań analitycznych, numerycznych i eksperymentalnych, wykazując tym samym zdolność do prowadzenia pracy naukowej w zakresie nauk technicznych. Recenzowana rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Autora w dyscyplinie naukowej **automatyka, elektronika i elektrotechnika**. Uznaję również, że teza rozprawy została w pełni uzasadniona. Pozwala mi to na sformułowanie następującej konkluzji końcowej:

### KONKLUZJA KOŃCOWA

Na podstawie lektury przedłożonej mi do recenzji rozprawy i po analizie jej treści stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska pt. *Analiza porównawcza nadprzewodnikowego i konwencjonalnego generatora synchronicznego małej mocy* autorstwa Pana mgr. inż. **Mieczysława PCIAŁA** spełnia wymagania dotyczące rozpraw doktorskich określone w art. 13 Ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm.) i w związku z tym **wnioskuję** do Rady Dyscypliny Naukowej Automatyka, Elektronika i Elektrotechnika Politechniki Lubelskiej **o jej dopuszczenie do publicznej obrony**.



.....