

Prof. dr hab. inż. Zdzisław Gosiewski  
tel. 606-483601

Opacz Kolonia, 26.04.2023 r.

SEKRETARIAT  
Rady Dyscypliny AEEITK

## Recenzja

Wpłynęło dnia 28.04.2023

Zarejestrowano pod nr

Podpis

rozprawy doktorskiej mgra inż. Bartłomieja Sikory pt.  
"Axial Active Magnetic Suspension Systems"

"Osiove aktywne systemy zawieszenia magnetycznego"

Promotor: dr hab. inż. Adam Piłat, prof. AGH

Akademia Górniczo-Hutnicza im Stanisława Staszica w Krakowie

Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej

**Podstawa prawna:** Zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Automatyka, Elektronika, Elektrotechnika i Technologie Kosmiczne, AGH Kraków - dra hab. inż. Ryszarda Sroki, prof. AGH - z dnia 3.03.2023 r.

## Lokalizacja tematyki rozprawy w technice

Przedmiotem badań Doktoranta są łożyska magnetyczne. Pierwszym, który zbudował, ponad 50 lat temu, i opisał te łożyska pod kątem zastosowania w maszynach wirnikowych był zespół profesora Gherarda Shweitzera z ETH w Zurichu. Ale już wcześniej interesował się zawieszaniem magnetycznymi profesor Ryszard Sikora ze Szczecina oraz fizycy w wielu krajach, którzy pracowali nad fuzją termojądrową i budowali pułapkę magnetyczną dla wysokotemperaturowej plazmy. Przy projektowaniu węzła łożyskowego dla maszyn wirnikowych bierze się pod uwagę koszty jego wytworzenia i eksploatacji, nośność i gabaryty, charakterystyki dynamiczne zamkniętego układu sterowania pod kątem zakładanych prędkości obrotowych maszyny wirnikowej, a także możliwość realizacji specyficznych zadań stawianych danej maszynie. Główną przyczyną aplikacji łożysk magnetycznych jest możliwość osiągnięcia wysokich prędkości obrotowych wirników i ich bezkontaktowego zawieszenia, co eliminuje tarcie, smarowanie oraz zużywanie się łożysk. Tak więc, na przykład, przemysł kosmiczny, farmaceutyczny czy przemysł procesorów cyfrowych są i będą naturalnym użytkownikami tego typu łożyskowania bez względu na ich koszty czy nośność. Ale to nie oznacza, że wraz z rozwojem ich technologii nie musimy poprawiać tych ostatnich wskaźników. W tym kierunku, w moim mniemaniu, Doktorant podjął stosowne działania i opisał je w swojej rozprawie.

## Krytyczne omówienie zawartości pracy

Rozprawa, napisana w języku angielskim, liczy 175 stron, składa się z 14 rozdziałów, bibliografii (153 pozycje), streszczeń w języku angielskim i polskim oraz spisu skrótów. Wyraźnie brakuje spisu oznaczeń zmiennych i stałych. Ale, prawdopodobnie, nie można było tego zrealizować dla całej pracy, gdyż w poszczególnych rozdziałach czego innego te oznaczenia dotyczą.

Cały pomysł pracy doktorskiej sprowadza się do zastąpienia w siłowniku osiowym jednego centralnie działającego elektromagnesu wianuszkami sześciu symetrycznie rozłożonych identycznych elektromagnesów na obwodzie koła ze środkiem leżącym w osi obrotu podpartego elektromagnetycznie wirnika. Tak skonstruowany siłownik miał według zamiaru Autora ustalać przestrzenne położenie lewitującego obiektu, przy czym nie jest do końca sprecyzowane, ile stopni swobody chciał odebrać obiektowi. Tym obiektem według wcześniejszego opisu w rozdziale 1.3 ma być wirnik, który, jako swobodna bryła sztywna, ma sześć stopni swobody, trzy możliwe ruchy liniowe wzdłuż osi układu kartezyjskiego i trzy obroty względem tych osi. Jeden stopień swobody

- obrotowy - w przypadku wirnika jest związany z jego zadaniem technologicznym oraz ograniczony, bo sterowany napędem, a pozostałe stopnie swobody są odbierane przez system łożyskowy. Klasyczny układ łożyskowania wirnika sztywnego składa się z łożyska osiowego, czyli łożyska ograniczającego lub sterującego ruchem wzdłuż osi wirowania wirnika oraz dwóch łożysk promieniowych, które odbierają lub sterują ruchami zgodnymi z pozostałymi czterema stopniami swobody - dwoma translacyjnymi i dwoma obrotowymi. W przypadku wirnika podatnego sytuacja jest bardziej skomplikowana, ale Autor w ostatecznym rozwiązaniu konstrukcyjnym nie rozpatrywał takiego przypadku.

Na początku pracy brakuje jasno postawionych założeń projektowych dotyczących na przykład ilości stopni swobody odbieranych przez projektowane łożysko, rodzaju wirnika, jego położenia względem pola grawitacyjnego, dopuszczalnych gabarytów czy obciążeń, które musi przenosić. Również koncepcja rozwiązania postawionego problemu pojawia się dopiero w rozdziale 6. Tak więc czytelnik pracy jest skazany na przypuszczenia i nie ma punktu odniesienia, według którego mógłby oceniać realizację zamierzenia projektowego. Merytoryczną ocenę pracy zacznę więc od rozdziału 6, gdyż treści zawarte w poprzednich rozdziałach powtarzane są w dalszych rozdziałach, ale już w odniesieniu do proponowanej koncepcji rozwiązania konstrukcyjnego. Natomiast w kolejnym punkcie recenzji podaję uwagi szczegółowe dotyczące również rozdziałów 2-5.

W krótkim **rozdziale 6** prezentowana jest konstrukcja, parametry i geometria 6-biegunowego łożyska osiowego dla wirników o osi pionowej; w skrócie nazwany 6pAAMB. Wspomniany wyżej wianuszek elektromagnesów został zaproponowany w dwóch wersjach z rdzeniami o kształcie kołowym i o kształcie trapezowym. Co ważne, elektromagnesy mogą działać indywidualnie lub mogą być łączone elektrycznie w różne konfiguracje.

W **rozdziale 7** prezentowane są wyniki symulacji sił elektromagnetycznych proponowanej konstrukcji zrealizowane metodą elementów skończonych w pakiecie programów COMSOL Multiphysics. Konsekwentnie ruch pionowy zgodny z kierunkiem osi obrotu wirnika oznaczany jest literą z, a dwie pozostałe osie układu prostokątnego osiami x, y. Tak stworzony układ współrzędnych związany jest ze stojanem, w którym zainstalowane są elektromagnesy. Gdy płaszczyzna biegunów elektromagnesów traci równoległość do płaszczyzny dysku wirnika, to generowane są siły radialne. Choć są one niewielkie w porównaniu z siłą osiową podnoszącą cały wirnik, to niewątpliwie będą wymuszały ruch boczny wirnika. Zachodzi pytanie, czy w przypadku, gdyby bieguny elektromagnesów wystawały poza średnicę dysku wirnika, to wystąpiłby ten sam efekt czy raczej efekt przeciwny? Autor natomiast, wykorzystując możliwości COMSOLa, policzył tu wiele innych elementów (np. badał rozwiązanie z dwoma 6pAAMB) wpływających na siły elektromagnetyczne, których nie wykorzystał później w ostatecznym rozwiązaniu. Dla czytającego rozprawę wprowadzają one jedynie szum informacyjny. Opis tych dodatkowych badań, uwypuklających zaangażowanie i umiejętności Doktoranta, mógłby być zawarty w dodatkach do rozprawy. Te uwagi dotyczą również następnych rozdziałów.

Jak Doktorant zauważył w **rozdziale 8**, w wyniku nieprecyzyjnego wykonania cewek i montażu elektromagnesów w stojanie, ich działanie siłowe na wirnik będzie się różniło mimo identycznego zasilania elektrycznego. Dlatego w tym rozdziale zaproponował metodę identyfikacji ich parametrów i oceny wpływu ich oddziaływania na dysk wirnika. Do eksperymentalnego wyznaczenia przechyłów dysku wirnika względem płaszczyzny biegunów elektromagnesów, czyli obrotów względem osi x, y, wykorzystał 4 czujniki zbliżeniowe zamocowane w stojanie. Tu pojawiły się interesujące, dla celu postawionego w rozprawie, wzory (8.5), (8.6), ale nie znalazłem objaśnień *explicitie*, w jaki sposób wyniki tych obliczeń powiązane są z pomiarami z 4 czujników. Co więcej, do wyznaczenia równania płaszczyzny wystarczą dane tylko 3 jej punktów nie leżących na wspólnej prostej. Tak też Autor zrobił w ostatecznym rozwiązaniu. Ale wprowadzenie czterech punktów pomiarowych pozwoliłoby na redundancję systemu pomiarowego.

W **rozdziale 9** rozpatrywana jest dynamika wirnika podatnego łożyskowanego magnetycznie. Do jej analizy Doktorant ponownie wykorzystał pakiet programów COMSOL. Nie wiem, czy obliczenia zostały przeprowadzone poprawnie, gdyż nie zostały podane warunki

brzegowe, które zależą między innymi od zastosowanego sprzęgła. Sądząc po kształcie postaci drgań jest to prawdopodobnie sztywne sprzęgło typu przegub Cardana, a wirnik nie obraca się. Tymczasem w ostatecznym rozwiązaniu zastosował bezkontaktowe sprzęgło elektromagnetyczne. W tym przypadku w widmie drgań wirnika pojawiają się postacie wirnika sztywnego, rotacyjna i translacyjna, które przesuwają postacie giętne w kierunku wyższych częstości. W tym rozdziale przebadane zostały sprzężenia pomiędzy poszczególnymi 6 biegunami łożyska, zabrakło natomiast sprzężeń siłowych pomiędzy łożyskiem a wirnikiem, które pojawiają się podczas wirowania. Tu również Autor zauważył, że zaproponowane wstępne rozwiązanie węzła łożyskowego nie wystarczy do stabilizacji ruchu wirnika. Uzupełnił więc system łożyskowania wymiennie przez aktywne promieniowe łożysko magnetyczne lub promieniowe łożysko pasywne wykorzystujące magnesy trwałe. Zauważył, że brak wystarczającej precyzji w realizacji łożysk pasywnych powoduje ich oddziaływanie nie tylko promieniowe, ale również osiowe.

Zastosowane modele symulacyjne, wykonane metodą trójwymiarowych (3D) elementów skończonych, są tak rozbudowane, że niezbyt się nadają do symulacji zjawisk dynamicznych. Dlatego elektrotechnicy poszukują analitycznych modeli, pomniejszych, ale podobnie dokładnych jak modele numeryczne i uwzględniających nieliniowości geometryczne i magnetyczne. Autor w **rozdziale 10** przystosował metodę, która wykorzystuje potencjał wektora magnetycznego w projektowaniu silników elektrycznych z wnękami slotowymi, do modelowania 6-biegunowego łożyska osiowego. Jest ona stosowna dla proponowanego rozwiązania, w którym bieguny tworzą wieniec o określonej średnicy. Po rozwinięciu wienca, wykorzystaniu przekształcenia Fouriera i transformacji Schwarza-Christoffela uzyskał nieliniową funkcję względnej przenikalności. Stąd, po dalszych przekształceniach, otrzymał rozkład pola magnetycznego w szczelinie powietrznej nad biegunami. Następnie porównał rozkład otrzymany z modelu analitycznego z rozkładami otrzymanym eksperymentalnie i metodą elementów skończonych (rys. 10.10). Ponieważ istnieje pomiędzy tymi wynikami duże podobieństwo, to model analityczny można wykorzystać do symulacji dynamiki zamkniętego układu sterowania ruchem wirnika z wykorzystaniem łożysk magnetycznych jako elementu wykonawczego. W tym rozdziale Doktorant wykazał się obszerną wiedzą i umiejętnościami w zakresie analizy, modelowania oraz badania eksperymentalnego i symulacyjnego obwodów magnetycznych w konstrukcjach o skomplikowanej geometrii.

W **rozdziale 11** Doktorant opisał przeprowadzone badania 6-biegunowego aktywnego łożyska wspomaganego pasywnym łożyskiem magnetycznym. Zaproponowana konstrukcja pasywnego łożyska zapewnia generowanie osiowej siły wspomagającej aktywne osiowe łożysko jak i sił promieniowych stabilizujących ruch boczny wirnika. Opisał szereg badań eksperymentalnych pozwalających ocenić poziom tłumienia drgań bocznych wirnika przez łożysko pasywne, związków pomiędzy ruchem osiowym a ruchami bocznymi, a przede wszystkim dynamikę wirnika obracającego się z prędkością sięgającą 4000 obr/min, a zawieszono jedynie z wykorzystaniem dwóch wspomnianych łożysk. Napęd był przekazywany bez kontaktu do wirnika, a rozwiązanie konstrukcyjne tego sprzęgła jest niewątpliwie interesującą nowością. Podczas badań eksperymentalnych z wirującym wirnikiem zarejestrowano ruch osiowy sięgający 30% wartości szczeliny powietrznej i małe mikrometrowe ruchy boczne. Według Autora ruchy te generowane są przez pasywne łożyska magnetyczne.

W **rozdziale 12** w końcu dotarliśmy do ostatecznego rozwiązania konstrukcyjnego, gdzie wirnik zawieszony jest na 3 elektromagnesach z wykorzystaniem systemu pomiarowego składającego się z trzech czujników mierzących przemieszczenie tarczy wirnikowej pod elektromagnesami i dwóch czujników mierzących ruchy boczne w kierunkach  $x$ ,  $y$ . Dotychczasowe działania przypominały wysiłki postawienia stołu na jednej nodze, obecnie stół ma trzy nogi. Szkoda, że nie zostało dodane łożysko radialne, zapobiegające ruchom bocznym. Tu Doktorant zbadał wzrost temperatury elektromagnesów przy różnych obciążeniach i różnych sterownikach, budując jednocześnie modele matematyczne dynamiki tych zmian. Następnie podaje wzory na siły tych elektromagnesów w funkcji prądu sterującego i położenia dysku wirnika jako zwory, a wyniki otrzymane z modeli analitycznych konfrontuje z wynikami otrzymanymi

eksperymentalnie..W ważnym wzorze (12.10) nie podał jednostek fizycznych dla stałych i zmiennych, co wzbudziło moje zaniepokojenie, co do zasadności tego modelu. Również sposób sterowania jest zadziwiający. Przecież steruje się położeniem dysku tak, aby był on wypoziomowany. Każdy z elektromagnesów ma swój czujnik, a więc układ sterowania powinien składać się z trzech niezależnych pętli, z których każda dąży do osiągnięcia punktu na tej samej zadanej płaszczyźnie poziomej, prostopadłej do kierunku działania sił grawitacji. Jednym słowem powinniśmy tak wydłużyć nogi wspomnianego stołu, aby jego blat osiągnął poziom na określonej wysokości. Przyznam, że nie zrozumiałem jaki był cel przeprowadzonych badań drgań wymuszonych sinusoidalnym wzbudnikiem.

**Rozdział 13** poświęcony jest w dużej mierze analizie sił i momentów sił działających na na wirnik w stanie ustalonym, czyli został ustalony model statyczny. Model ten został podany wzorem (13.13). Z tego modelu jasno wynika, że ruch w kierunkach  $x, y$  nie jest sterowany, ale w pewnym zakresie sił promieniowych może być ograniczany przez oddziaływanie na dysk wirnika trzech elektromagnesów sterujących ruchem osiowym, co potwierdzają przebiegi odpowiedzi skokowej prezentowane na rys. 13.10-13.17. Tu zabrakło ustalenia dla jakich sił promieniowych układ pozostanie dalej stabilny.

### Uwagi szczegółowe

Rys. 2.1 i wiele dalszych rysunków. Brakuje wymiarów gabarytowych i wymiarów detali. Układy współrzędnych lewitują niczym ludzie i anioły nad domami Witebska w obrazach Chagalla. Należy zawsze pokazać punkt zaczepienia układu współrzędnych.

Wzór (2.1). Co oznacza  $x$  z indeksem  $t$ ?

Rys. 2.2 . Jak odmierza się zmienną  $z$ ?

Rys.2.3b. Czy można dopasować charakterystyki i modele analityczne do charakterystyk eksperymentalnych współczynnikiem Cartera?

Str. 21. Co oznacza wielkość  $w$  pod wzorem (2.5)?

Rys. 2.5. Brakuje informacji jak zmieniają się wartości siły wymuszającej statykę i dynamikę układu.

Roz. 3. Nie do końca wyjaśnione są warunki przeprowadzenia badań termodynamicznych. Czy był to kalorymetr czy w warunkach otoczenia. Jaka była na przykład temperatura otoczenia?. Krótko rzecz ujmując, jakie były warunki brzegowe?

Roz. 4. Producent proszku z żelaza do drukarki 3D powinien podać również jego parametry magnetyczne. Nie warto było je badać, zastępując niesolidnego producenta.

Początek roz. 5. Nie ma informacji o masie wirnika i wymiarach badanego urządzenia. Nie ma informacji o trwałych magnesach i ich rozmieszczeniu. Co dają takie badania?

Tab. 6.1. Dlaczego brakuje informacji o masowych momentach bezwładności, gdy na str. 43 jest zapowiedź badania ruchów wirnika o 5 stopniach swobody.

Koniec str.49. Brakuje numeru opisywanego rysunku.

Roz.7.2.2. Drugie zdanie nie ma związku ze wskazanym rysunkiem 7.3a.

Roz.7. Czy wszystkie elektromagnesy zasilane są tym samym prądem?

Roz.7.3. Kolejna konstrukcja, której Autor nie opisał dokładnie. Wymiary gabarytowe i detali, lokalizacja układu współrzędnych, itd.

Rys. 7.8. Brak opisu rysunku w tekście pracy.

Rys.8.2. W jaki sposób przemieszczenia dysku przekraczają wymiary szczeliny powietrznej?

Tab.8.5. Nie opisano zmiennych zawartych w tabeli.

Str. 75. Tu przydałaby się informacja o innych modelach upraszczających opis obwodów magnetycznych, np. o modelu polowo-obwodowym.

Str. 82-83. Dopiero teraz, na podstawie rysunków, zorientowałem się jak kształtowane są połączenia biegunów w elektromagnesach.

Str 84. Nie można pisać o ruchu chaotycznym, ale o braku więzów ograniczających ruch w kierunku  $x, y$ .

Rys. 10.7. Brak jednostek fizycznych.

Str. 103. Do czego w technice zastosujemy zawieszony magnetycznie dysk o 6 stopniach swobody?

Str.109. Jeśli regulator PID został dobrany eksperymentalnie, to po co buduje się modele zawieszenia obiektu?

Str.112. O jakich postaciach drgań tu się wspomina, mając na uwadze zmianę sposobu sprzęgania napędu z wirnikiem?

Rys.11.8. Skale na rysunku prezentowane są w różnych jednostkach, a przecież Matlab umożliwia przeskalowanie.

Str.173. Niepełny opis pozycji literatury 123, 134.

Niedociągnięć zauważyłem więcej, ale w większości powtarzane są błędy, które opisuję powyżej.

## Ocena pracy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgra inż. Bartłomieja Sikory jest obszerna zarówno tekstowo jak i merytorycznie. Niestety jej zawartość miejscami nie jest spójna i nieco chaotyczna. Wynika to zapewne z faktu, że jej konstrukcja, jak to Autor nazwał, jest "modułowa", a tak naprawdę poszczególne rozdziały oparte zostały na artykułach i referatach, których Doktorant był współautorem. W związku z tym pojawiają się wątki, które odbiegają od głównego nurtu pracy i utrudniają czytelnikowi śledzenie zamiarów i wywodów Autora. A przecież jest to praca o charakterze konstrukcyjnym, w której Autor opisał wykorzystanie najnowszych narzędzi inżynierskich do projektowania i badania prototypu zaproponowanego przez siebie systemu łożyskowania magnetycznego wirnika. Tego typu prace zaczynamy najczęściej od przyjęcia założeń technicznych i technologicznych, prezentacji koncepcji rozwiązania problemu, oceny poszczególnych koncepcji pod kątem przyjętych wskaźników jakości. Po wyborze koncepcji badamy ją analitycznie, symulacyjnie i eksperymentalnie pod kątem przewidywanych obciążeń oraz zagrożeń eksploatacyjnych. Zadania te Autor zrealizował, ale w nieco chaotyczny sposób je opisał.

Duże fragmenty pracy poświęcone są badaniom określającym nierównomierną geometrię i parametry sześciu równoległych biegunów elektromagnesów oraz poświęcone są badaniom różnic w ich oddziaływaniu na wiszącą pod nimi stalową tarczę wirnika. Poszukiwany jest sposób na ujednorodnienie lub uśrednienie geometryczne i magnetyczne tych elektromagnesów jako generatorów siły. Tymczasem tymi siłami można sterować, a więc cały wysiłek poświęcony ich uśrednianiu można realizować na drodze konstruowania odpowiednich systemów sterowania. To co w rozprawie Doktorant zaproponował, to realizacja generatorów siły o działaniu równoległym służącym do zawieszenia i poziomowania tarczy sztywno związanej z całym wirnikiem. Takie równoległe rozwiązania coraz częściej stosowane są w robotyce, na przykład w platformach Stewarda, czy w śmigłowcach wielowirnikowych, ale również w dużych konstrukcjach budowlanych i górniczych. Szkoda, że Doktorant nie odniósł się do pozycji literatury z tej tematyki.

Szczególnie interesujące dla dalszej pracy Doktoranta, byłoby przyjrzenie się rozwiązaniom układu sterowania stosowanym w śmigłowcach wielowirnikowych, zwanych powszechnie dronami. Przecież trzy napędy aerodynamiczne zakończone śmigłami, rozmieszczone symetrycznie wokół środka śmigłowca, dokładnie w ten sam sposób działają jak elektromagnesy w ostatecznym rozwiązaniu zaproponowanym w rozprawie doktorskiej. Różnica polega jedynie na tym, że napędy w śmigłowcu wykorzystują sterowane siły aerodynamiczne, a napędy w proponowanym rozwiązaniu - siły generowane przez sterowane pole magnetyczne. Na niekorzyść systemu sterowania śmigłowca wpływa fakt, że więzy ograniczające jego ruch są nieholonomiczne, a więc bardziej rozbudowany musi on mieć system pomiarowy, składający się z akcelerometrów, giroskopów, wspomaganych magnetometrami i sygnałami przekazywanymi przez GPS lub system radiolokacyjny. W przypadku układu łożyskowania wystarczą, jak to zaproponował Doktorant, czujniki mierzące przemieszczenia wirnika. Co więcej, zwiększanie liczby czujników i liczby generatorów siły może prowadzić, w obu przypadkach, do rozwiązań redundancyjnych

powiększających bezpieczeństwo ruchu.

Teraz chciałbym uwypuklić ważne zalety pracy, która ma charakter interdyscyplinarny, ale jej rdzeń mieści się w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne. Interdyscyplinarność polega na tym, że mamy w niej elementy inżynierii mechanicznej, inżynierii materiałowej i informatyki stosowanej. Do głównych osiągnięć Autora należy zaliczyć.

- Opracowanie nowej konstrukcji systemu łożyskowania osiowego, który odbiera ruchowi wirnika co najmniej trzy stopnie swobody.
- Zaprojektowanie i wykonanie ciekawego rozwiązania bezkontaktowego sprzęgła łączącego silnik napędowy z wirnikiem.
- Zaproponowanie metody budowy uproszczonego modelu magnetycznego obwodów magnetycznych łożyska osiowego, wzorowanej na metodzie modelowania obwodów magnetycznych silników elektrycznych z wnękami slotowymi. Autor, jak oświadczył, był pierwszy, który w modelowaniu łożyska wykorzystał opis wektorowy potencjału magnetycznego i mapowanie Schwarza-Christoffela. Zaletą tego modelu jest znacznie krótszy czas obliczeń w symulacjach dynamiki wirnika łożyskowanego magnetycznie niż w przypadku modelu otrzymanego metodą elementów skończonych.
- Wykonanie wielu symulacji komputerowych, pozwalających na precyzyjne wyznaczenie wielu parametrów systemu łożyskowego w funkcji różnych stanów jego pracy, takich jak: wzajemne położenie wirnika i elektromagnesów w przestrzeni 3D, wartości prądów sterujących, temperatury obwodów czy braku perfekcji w wykonaniu węzła łożyskowego.
- Zaprojektowanie rozwiązań konstrukcyjnych i zbudowanie wielu stanowisk badawczych.
- Przeprowadzenie szeregu badań eksperymentalnych służących do potwierdzenia wyników osiągniętych metodą symulacji komputerowych.

Przy rozwiązywaniu powyższych zadań Doktorant wykazał się dużą wiedzą z zakresu elektrotechniki, teorii pola, metod projektowania obwodów magnetycznych i elektrycznych, mechaniki, termodynamiki, grafiki inżynierskiej, metod modelowania fizycznego i matematycznego złożonych technicznie obiektów i układów, analizy i syntezy statyki i dynamiki tych obiektów i układów, metod identyfikacji. Potwierdził swoje umiejętności posługiwania się takimi pakietami programów jak COMSOL Multiphysics, Matlab/Simulink, które wykorzystał do prowadzenia zaawansowanych procesów modelowania, obliczeń numerycznych i badań symulacyjnych. Szczególnie wykazał duże umiejętności w badaniach eksperymentalnych, na potrzeby których przygotował wiele szereg stanowisk laboratoryjnych. Zaplanował i przeprowadził rozległe badania stanowiskowe samodzielnie lub we współpracy z innymi badaczami, wykorzystując wiele nowoczesnych narzędzi pomiarowych, urządzeń przekształcających sygnały oraz generujących w czasie rzeczywistym informację dla elementów wykonawczych i rejestratorów. Tym samym potwierdził, że jest dojrzałym badaczem i naukowcem w zakresie dyscypliny automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.

## Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa doktorska jest dobrym opracowaniem naukowym, a przede wszystkim ma duże znaczenie praktyczne. Biorąc pod uwagę zakres i poziom opracowania rozprawy doktorskiej, rzetelność przeprowadzonych badań i wnioskowań oraz ich praktyczne znaczenie dla projektowania łożyskowania magnetycznego wirników w wielu maszynach wirnikowych stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji praca "Axial Active Suspension Systems" odpowiada warunkom stawianym rozprawom doktorskim w myśl stosownej Ustawy. Dlatego też wnoszę o dopuszczenie Autora, **mgra inż. Bartłomieja Sikorę** do jej publicznej obrony w dyscyplinie automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne.