

Politechnika Opolska
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki
Katedra Elektrotechniki i Mechatroniki

Dawid Wajnert

Załącznik 3

Autoreferat

Spis treści autoreferatu

1. Imię i nazwisko.....	3
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej	3
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.....	3
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce.....	3
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego.....	3
4.2. Wykaz dorobku stanowiącego osiągnięcie naukowe	3
4.3. Charakterystyka osiągnięcia naukowego	5
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.....	26
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.	26
6.1. Działalność dydaktyczna.....	26
6.2. Działalność organizacyjna.....	27
6.3. Działalność popularyzująca naukę	28
6.4. Nagrody i wyróżnienia	28

1. Imię i nazwisko

Dawid Wajnert

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

2012 r. doktor nauk technicznych

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki.

Dyscyplina naukowa: Elektrotechnika.

Temat rozprawy: *Charakterystyki pracy łożyska magnetycznego z uwzględnieniem jego układu regulacji.*

Promotor: prof. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk.

2008 r. magister inżynier

Politechnika Opolska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki.

Kierunek: Elektrotechnika.

Temat pracy: *Projekt i wykonanie układu sterowania aktywnym łożyskiem magnetycznym.*

Promotor: prof. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

01.10.2013 r. – nadal – Politechnika Opolska, Katedra Elektrotechniki i Mechatroniki, stanowisko: adiunkt.

01.05.2012 r. – 30.09.2013 r. – Politechnika Opolska, Katedra Elektrotechniki Przemysłowej, stanowisko: asystent.

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

**Modelowanie i weryfikacja pomiarowa charakterystyk
hybrydowych łożysk magnetycznych**

4.2. Wykaz dorobku stanowiącego osiągnięcie naukowe

Osiągnięcie naukowe, wnoszące znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej automatyka, elektronika i elektrotechnika, zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. stanowi monografia naukowa:

Wajnert D.: *Mathematical modelling of hybrid magnetic bearings*, Studia i Monografie, z. 567, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2022.

oraz cykl publikacji i dwa patenty:

1. **Wajnert D., Tomczuk B.:** *Simulation for the determination of the hybrid magnetic bearing's electromagnetic parameters*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 93, Nr 2, 2017, ss. 157–160. (IF: 0, punkty MNiSW: 14)
Mój udział procentowy: 70%. Mój udział w publikacji polegał na: wykonaniu przeglądu literatury, przeprowadzeniu badań symulacyjnych, przygotowaniu rysunków z wynikami symulacji, wykonaniu analizy uzyskanych wyników, przygotowaniu manuskryptu artykułu.
2. **Wajnert D., Tomczuk B.:** *Analysis of spatial thermal field in a magnetic bearing*, Open Physics, Vol. 16, 2018, ss. 52–56. (IF: 1,005, punkty MNiSW: 15)
Mój udział procentowy: 80%. Mój udział w publikacji polegał na: wykonaniu przeglądu literatury, przeprowadzeniu badań symulacyjnych, przygotowaniu rysunków z wynikami symulacji, wykonaniu pomiarów, wykonaniu analizy uzyskanych wyników, przygotowaniu manuskryptu artykułu.
3. **Wajnert D.:** *Analysis of the cross-coupling effect and magnetic force nonlinearity in the 6-pole radial hybrid magnetic bearing*, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 61, No. 1, 2019, ss. 43–57. (IF: 0,684, punkty MNiSW: 70)
4. **Wajnert D.:** *A field-circuit model of the hybrid magnetic bearing*, Archive of Mechanical Engineering, Vol. 66, No. 2, 2019, ss. 191–208. (IF: 0, punkty MNiSW: 20)
5. **Wajnert D., Tomczuk B.:** *Nonlinear magnetic equivalent circuit of the hybrid magnetic bearing*, COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 38 No. 4, 2019, ss. 1190–1203. (IF: 0,590, punkty MNiSW: 40)
Mój udział procentowy: 80%. Mój udział w publikacji polegał na: wykonaniu przeglądu literatury, przeprowadzeniu badań symulacyjnych, przygotowaniu rysunków z wynikami symulacji, wykonaniu pomiarów, wykonaniu analizy uzyskanych wyników, przygotowaniu manuskryptu artykułu.
6. **Wajnert D.:** *Comparison of two constructions of hybrid magnetic bearings*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 95, Nr 12, 2019, ss. 53–58. (IF: 0, punkty MNiSW: 20)
7. **Wajnert D., Sykulski J. K., Tomczuk B.:** *An Enhanced Dynamic Simulation Model of a Hybrid Magnetic Bearing Taking Account of the Sensor Noise*, Sensors, Vol. 20, No. 2, 2020, 1116. (IF: 3,576, punkty MNiSW: 100)
Mój udział procentowy: 60%. Mój udział w publikacji polegał na: wykonaniu przeglądu literatury, przeprowadzeniu badań symulacyjnych, przygotowaniu rysunków z wynikami symulacji, wykonaniu pomiarów, wykonaniu analizy uzyskanych wyników, przygotowaniu manuskryptu artykułu.

8. **Wajnert D., Tomczuk B.:** *Two Models for Time-Domain Simulation of Hybrid Magnetic Bearing's Characteristics*, Sensors, Vol. 22, No. 4, 2022, 1567 (IF: 3,576, punkty MNiSW: 100)
Mój udział procentowy: 80%. Mój udział w publikacji polegał na: wykonaniu przeglądu literatury, przeprowadzeniu badań symulacyjnych, przygotowaniu rysunków z wynikami symulacji, wykonaniu pomiarów, wykonaniu analizy uzyskanych wyników, przygotowaniu manuskryptu artykułu.
9. **Wajnert D.:** *Hybrydowe łożysko magnetyczne*, patent RP numer PL 232739. (IF: 0, punkty MNiSW: 75)
10. **Wajnert D.:** *Promieniowe łożysko magnetyczne z magnesami trwałymi*, patent RP numer PL 233992. (IF: 0, punkty MNiSW: 75)

4.3. Charakterystyka osiągnięcia naukowego

Autor wniosku od 2008 roku prowadzi badania nad aktywnymi łożyskami magnetycznymi. Jednakże unikatowe właściwości oraz energooszczędność hybrydowych łożysk magnetycznych spowodowały, że mogą one z powodzeniem zastąpić aktywne łożyska magnetyczne w wielu zastosowaniach przemysłowych, dlatego też autor wniosku od 2016 roku podjął badania nad tego typu łożyskami.

Łożyska magnetyczne wykorzystują zjawisko lewitacji magnetycznej do bezkontaktowej stabilizacji położenia wirnika maszyny wirującej. Możliwe jest to poprzez wykorzystanie sił i oddziaływań pola magnetycznego oraz elektromagnetycznego, za pomocą których można wytworzyć siłę przyciągania lub odpychania. W zależności od sposobu generowania siły magnetycznej, łożyska magnetyczne możemy podzielić na trzy kategorie: aktywne łożyska magnetyczne (AŁM), pasywne łożyska magnetyczne (PŁM) oraz hybrydowe łożyska magnetyczne (HŁM).

Aktywne łożyska magnetyczne działają na zasadzie elektromagnesu z ruchomą zwrorą, czyli na rdzeniu ferromagnetycznym nawinięte jest uzwojenie, które generuje pole magnetyczne w wyniku prądu przepływającego przez uzwojenie. Pole to przyciąga ferromagnetyczną zwrorę, generując siłę przyciągania. Zastosowanie trzech elektromagnesów w siłowniku łożyska magnetycznego pozwala na stabilizację położenia wirnika we wszystkich kierunkach, chociaż najbardziej popularne są wersje z czterema elektromagnesami. Poprawne funkcjonowanie tego typu łożysk wymaga zastosowania techniki aktywnej stabilizacji położeniem wirnika, w skład której wchodzi poza siłownikiem: czujniki położenia wału, czujniki prądu w uzwojeniach, regulatory położenia i prądu oraz wzmacniacze mocy. Obecnie tego typu łożyska najczęściej stosowane są w przemysłowych aplikacjach.

Pasywne łożyska magnetyczne wykorzystują siły przyciągania oraz odpychania występujące pomiędzy magnesami trwałymi. Odpowiednia konfiguracja rozmieszczenia geometrycznego pozwala na uzyskanie lewitacji magnetycznej. Niestety, pasywne łożyska magnetyczne nie mogą być wykorzystane do stabilizacji położenia wirnika we wszystkich osiach. Przynajmniej jedna z nich musi być stabilizowana aktywnie lub musi być zastosowane łożysko innego typu, np. mechaniczne. Zaletą tego typu łożysk magnetycznych jest brak systemu stabilizacji położeniem wirnika, co znacznie redukuje

koszty takiego rozwiązania. Niestety, istotną ich wadą jest zmiana położenia wirnika (punktu pracy) w wyniku wystąpienia zewnętrznej siły wymuszającej. Dodatkowo, pasywne łożyska magnetyczne cechują się niskim współczynnikiem tłumienia. Te dwie istotne wady pasywnych łożysk magnetycznych znacząco ograniczają możliwości zastosowań tego typu łożyska w rozwiązaniach przemysłowych.

Aktywne łożyska magnetyczne do prawidłowej pracy wymagają tzw. strumienia bazowego, który generowany jest przez prąd stały przepływający przez uzwojenia. Prąd ten odpowiedzialny jest za generowanie strat wynikających z prawa Joule'a, co zwiększa zużycie energii elektrycznej przez tego typu łożysko. Alternatywnie, strumień bazowy może zostać wytworzony poprzez magnesy trwałe co wykorzystuje się w łożyskach magnetycznych z magnesami trwałymi, nazywanymi również hybrydowymi łożyskami magnetycznymi. Zastosowanie magnesów trwałych zmniejsza zużycie energii elektrycznej pobieranej przez te łożyska, co istotnie przyczynia się do ich rozwoju.

Brak mechanicznego kontaktu pomiędzy stojanem a wirnikiem maszyny wirującej skutkuje szczególnymi właściwościami łożysk magnetycznych, do których można zaliczyć:

- pracę z bardzo dużymi prędkościami obrotowymi,
- brak mechanicznego zużycia materiału łożyska, czyli jest to układ wolny od zanieczyszczeń,
- brak systemu smarowania,
- pracę w szerokim zakresie temperatur,
- brak oporów toczenia,
- brak przenoszenia drgań wirnika na stojan maszyny.

Dodatkowo aktywne oraz hybrydowe łożyska magnetyczne ze względu na obecność układu sterowania pozwalają na:

- aktywne tłumienie drgań poprzez układ sterowania,
- aktywne przeciwdziałanie zewnętrznym wymuszeniom oraz niewyważeniu wirnika,
- zmianę parametrów pracy zawieszenia magnetycznego, w tym zmianę współczynników sztywności i tłumienia drgań,
- diagnostykę on-line systemu łożyskowania, w tym pomiar prędkości obrotowej oraz poziomu drgań.

Przedstawione zalety pozwalają na zastosowanie łożysk magnetycznych w wielu aplikacjach przemysłowych, takich jak: pompy krwi, kompresory, wysokoobrotowe wrzeciona, magazyny energii, napędy dysków twardych, turbogeneratory.

Niestety, aktywne oraz hybrydowe łożyska magnetyczne posiadają również wady, do których należy zaliczyć:

- wysoki koszt łożyskowania maszyn wirujących,
- wymóg dokładnego pomiaru położenia wału w szczelinie powietrznej (nie dotyczy łożysk tzw. samopomiarowych),
- konieczność stosowania układu sterowania, ponieważ są to obiekty strukturalnie niestabilne.

W ramach osiągnięcia naukowego wnoszącego wkład w rozwój dyscypliny automatyka, elektronika i elektrotechnika poddano analizie dwa rodzaje hybrydowych łożysk magnetycznych:

- 6-biegunowe łożysko magnetyczne z magnesami trwałymi umieszczonymi w nabiegunnikach, nazwane wariantem A, oraz
- 6-biegunowe łożysko magnetyczne z magnesami trwałymi umieszczonymi w jarzmie stojana, nazwane wariantem B.

Celem naukowym przeprowadzonych badań było zaproponowanie dla hybrydowych łożysk magnetycznych modeli polowych przeznaczonych do wyznaczania parametrów oraz polowo-obwodowych przeznaczonych do symulowania stanów dynamicznych. Tego typu badania pozwalają określić parametry konstrukcyjne łożysk magnetycznych do konkretnej aplikacji. W toku prowadzonych badań autor wniosku zajmował się również modyfikacją obwodu magnetycznego w celu ograniczenia nieliniowości siły magnetycznej oraz sprzężeń strumienia magnetycznego pomiędzy uzwojeniami w 6-biegunowych łożyskach magnetycznych. Prezentowane prace dotyczą:

- opracowania modeli matematycznych do analizy pola magnetycznego w reprezentowanych typach łożysk magnetycznych,
- zamodelowania i weryfikacji statycznego pola termicznego w analizowanym obiekcie,
- zamodelowania i weryfikacji pola magnetostaticznego w analizowanych obiektach,
- zamodelowania i weryfikacji przebiegów dynamicznych w oparciu o modele polowo-obwodowe,
- analizę wieloparametryczną siłowników łożysk magnetycznych.

W dalszej części autoreferatu przedstawione w pkt. 4.2 prace zostaną omówione w kolejności chronologicznej ich opublikowania.

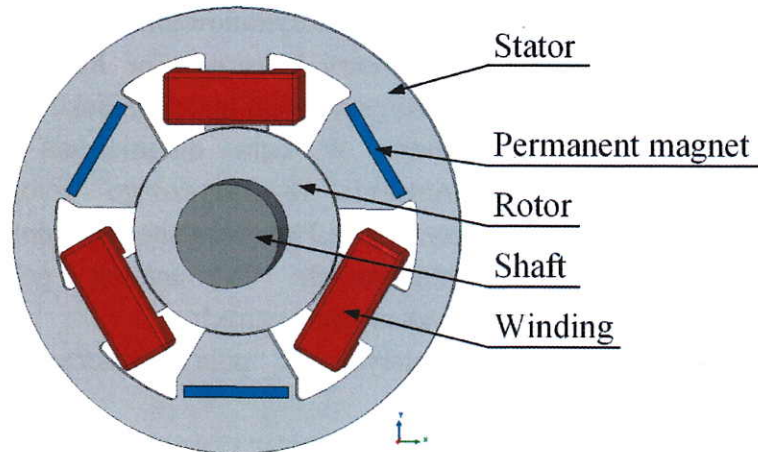
Ad. 1. Wajnert D., Tomczuk B.: *Simulation for the determination of the hybrid magnetic bearing's electromagnetic parameters*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 93, Nr 2, 2017, ss. 157–160.

Praca dotyczy: opracowania modelu matematycznego do analizy pola magnetycznego w hybrydowym łożysku magnetycznym.

W publikacji tej autor wniosku przedstawił wyniki symulacji pierwszej wersji konstrukcji 6-biegunowego łożyska magnetycznego z magnesami trwałymi umieszczonymi w nabiegunniku (wariant A). Była to jedna z pierwszych publikacji autora dotycząca hybrydowych łożysk magnetycznych. Z przeprowadzonego przeglądu literaturowego wynikało, że niewiele jest prac poświęconych 6-biegunowym łożyskom magnetycznym z magnesami trwałymi. Autor wniosku podjął badania nad tym typem łożysk magnetycznych, ponieważ do ich zasilania można wykorzystać układy mocy dedykowane do trójfazowych silników elektrycznych poprzez połączenie uzwojeń w konfigurację gwiazdy, co ogranicza koszty układu sterowania. Dodatkowo, 6-biegunowe łożyska magnetyczne mają większe pole przekroju slotu na uzwojenia w stosunku do łożysk 8-biegunowych. Na rys. 1 przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne omawianego hybrydowego łożyska magnetycznego. Składa się on ze stojana oraz wirnika wykonanych ze stali elektrotechnicznej prądnicowej. Zastosowanie pakietu blach stali o nieorientowanym ziarnie ma na celu znaczące ograniczenie prądów wirowych powstających w:

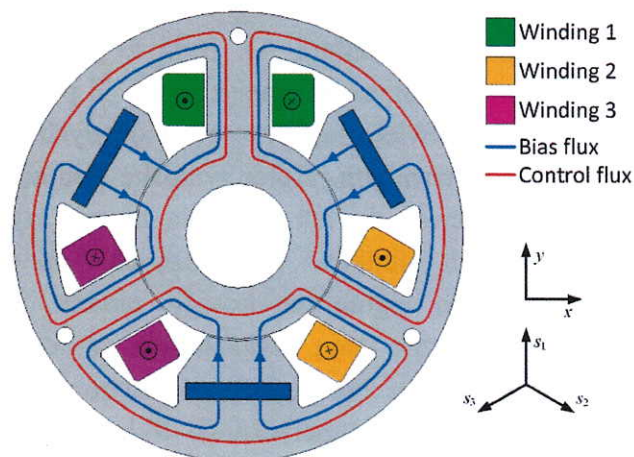
- wirnika w wyniku jego przemagnesowania podczas obrotu,
- stojanie w wyniku zmiany wartości strumienia magnetycznego od prądów sterujących.

Na trzech nabiegunnikach stojana nawinięte są uzwojenia oraz w pozostałych trzech nabiegunnikach umieszczone są magnesy trwałe N38.



Rys. 1. Konstrukcja 6-biegunowego łożyska magnetycznego z magnesami trwałymi umieszczonymi w nabiegunniku (wariant A)

Na rys. 2 przedstawiono drogi strumieni magnetycznych: bazowego oraz sterującego. Trzy nabiegunniki z magnesami trwałymi generują strumienie bazowe, które określają punkt pracy obwodu magnetycznego. Dzięki tym strumieniom, dla centralnego położenia wirnika we wszystkich szczelinach powietrznych występuje taka sama wartość indukcji magnetycznej, a na wirnik nie działa żadna siła magnetyczna. Natomiast trzy uzwojone nabiegunniki, przez które przepływa prąd sterujący, generują strumienie sterujące, które mają za zadanie zmianę wartości indukcji magnetycznej w szczelinach powietrznych, dzięki czemu możliwe jest sterowanie siłą magnetyczną działającą na wirnik. Ze względu na dużą reluktancję magnesów trwałych, strumienie sterujące zamykają się tylko przez uzwojone nabiegunniki (rys. 2 – czerwony kolor).



Rys. 2. Drogi strumieni magnetycznych w hybrydowym łożysku magnetycznym

W kolejnej części publikacji przedstawiono wyniki badań symulacyjnych, w tym obliczanie parametrów analizowanego obiektu, które zostały przeprowadzone korzystając z programu Ansys Maxwell 3D. Wszystkie modele symulacyjne, które powstały w oparciu o metodę elementów skończonych, wykonane zostały jako modele trójwymiarowe. Spowodowane to jest znaczną długością czoł uzwojeń w stosunku do długości pakietu stojana, co wprowadza znaczne błędy w dwuwymiarowych modelach symulacyjnych.

W następnym etapie prac nad hybrydowym łożyskiem magnetycznym wykonano jego prototyp. W trakcie prac uruchomieniowych okazało się, że posiada on zbyt dużą sztywność przemieszczeniową, co uniemożliwiało lewitację wirnika łożyska po dołączeniu go do układu sterowania. W następnym kroku autor wniosku zaprojektował i wykonał drugą wersję tego wariantu hybrydowego łożyska magnetycznego o mniejszej sztywności prądowej i przemieszczeniowej.

Ad. 2. Wajnert D., Tomczuk B.: *Analysis of spatial thermal field in a magnetic bearing*, Open Physics, Vol. 16, 2018, ss. 52–56.

Praca dotyczy: zamodelowania i weryfikacji statycznego pola termicznego w hybrydowym łożysku magnetycznym.

Kolejny etap badań autora nad hybrydowymi łożyskami magnetycznymi obejmował analizę statycznego pola temperaturowego w siłowniku łożyska, powstającego w wyniku strat rezystancyjnych w uzwojeniach. Zagadnienie to jest istotne, ponieważ korzystając z neodymowych magnesów trwałych nie można dopuścić do przekroczenia ich maksymalnej temperatury pracy, która dla zastosowanych magnesów N38 wynosi 353 K. Ograniczenie rozważań do strat generowanych w uzwojeniach, jednocześnie pomijając straty z prądów wirowych w stojanie i wirnika wynika z faktu, że zastosowano pakietowany obwód magnetyczny. Kolejnym powodem był sposób przeprowadzenia eksperymentu symulacyjnego, który zakładał przepływ stałej wartości prądu przez uzwojenia.

Badania symulacyjne przeprowadzono wykorzystując dwa rodzaje modeli numerycznych, tj. model dwuwymiarowy oraz trójwymiarowy. Model dwuwymiarowy stworzono w programie FEMM, natomiast model trójwymiarowy wykonano w programie Opera 3D Tempo. Obiekt badań był taki sam jak przedstawiono na rys. 1, jednak dodatkowo został umieszczony w aluminiowej obudowie.

Z przedstawionych w pracy rozkładów temperatur wynika, że uzyskane wyniki na podstawie obu modeli symulacyjnych znacząco różnią się między sobą. W celu weryfikacji ich poprawności wykonano pomiar rozkładu temperatury kamerą termowizyjną w rzeczywistym obiekcie dla czterech punktów testowych. W wyniku porównania uzyskanych rezultatów stwierdzono, że model trójwymiarowy znacznie dokładniej odzwierciedla rzeczywisty obiekt. W następnym etapie wykonano parametryczne symulacje, w których zmianie podlegała wartość prądu przepływająca przez uzwojenia w zakresie od 2 A do 8 A. Eksperyment ten miał na celu określenie maksymalnej wartości prądu, który nie spowoduje przekroczenia dopuszczalnych temperatur zastosowanych materiałów. Dla analizowanej konstrukcji największa

temperatura występuje w uzwojeniach. Ze względu na to, iż uzwojenia zostały wykonane z izolacji klasy B, maksymalna temperatura uzwojeń nie może przekroczyć 393 K. Taka temperatura osiągnięta jest przy prądzie 5,3 A (tj. gęstości prądu $7,46 \text{ A/mm}^2$). Jednocześnie maksymalna temperatura magnesu osiągnięta jest przy prądzie ok. 7,0 A.

Analizowany siłownik HLM został zaprojektowany tak, aby jego prąd w cewkach zmieniał się w zakresie $\pm 2 \text{ A}$, dlatego też nie jest możliwe podczas prawidłowej pracy łożyska przekroczenie dopuszczalnych temperatur zastosowanych materiałów.

Ad. 3. Wajnert D.: *Analysis of the cross-coupling effect and magnetic force nonlinearity in the 6-pole radial hybrid magnetic bearing*, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Vol. 61, No. 1, 2019, ss. 43–57.

Praca dotyczy: analizy wariantowej siłownika hybrydowego łożyska magnetycznego.

Opisywany siłownik HLM cechuje się znaczną nieliniowością generowanej siły magnetycznej oraz sprzężeniami strumienia magnetycznego między uzwojeniami. Są to niekorzystne zjawiska, które utrudniają sterowanie położeniem wirnika łożyska magnetycznego. W omawianym artykule przeanalizowano dwie modyfikacje mające wpływ na wspomniane zjawiska, tj. zmianę obwodu magnetycznego poprzez rozdzielenie elektromagnesów w stojanie oraz modyfikację wartości prądu płynącego przez górne uzwojenie. W celu oceny wpływu modyfikacji na charakterystyki siłownika, autor zaproponował dwa współczynniki określające nieliniowość generowanej siły magnetycznej oraz stopień sprzężenia między osiami.

Pierwsza modyfikacja polegała na zmianie obwodu magnetycznego siłownika w taki sposób, że usunięto połączenie pomiędzy obwodami magnetycznymi poszczególnych elektromagnesów. Wówczas strumień magnetyczny generowany przez magnes trwały zamyka się tylko w obrębie swojego elektromagnesu.

Druga modyfikacja polegała na zmianie wartości prądu i_1 wymuszanego w pierwszym uzwojeniu. Oprócz prądu sterującego dla osi y , wymuszany był dodatkowo prąd i_{add} którego wartość zależała od prądu sterującego oraz położenia wirnika w osi x . Zmiana wartości prądu i_1 wpływa na charakterystykę siły magnetycznej w osi y , ale zależną od prądu sterującego oraz położenia wirnika w osi x . Z przedstawionych wyników symulacyjnych wynika, że ta modyfikacja niweluje niekorzystny spadek wartości siły F_y dla skrajnych wartości prądu sterującego i_x oraz położenia wirnika w osi x , przy jednoczesnym niewielkim spadku maksymalnej siły w osi x .

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zaproponowana modyfikacja obwodu magnetycznego niekorzystnie zmniejsza wartości podstawowych parametrów łożyska magnetycznego, tj. sztywności prądowej oraz przemieszczeniowej. W przypadku sztywności prądowej dla obu osi zmniejszenie wartości nastąpiło prawie o połowę. Tak duża zmiana znacznie ogranicza nośność łożyska magnetycznego. Niemniej jednak, korzystnie zmniejszyły się wartości współczynników nieliniowości siły magnetycznej oraz sprzężenia między osiami – wyjątkiem jest współczynnik sprzężenia między osiami dla siły magnetycznej w osi x , którego wartość wzrosła.

Modyfikacja wartości prądu w pierwszym uzwojeniu wpłynęła pozytywnie na parametry i współczynniki nieliniowości siły oraz sprzężenia między osiami. Wartość

współczynnika nieliniowości siły magnetycznej w osi x jak również wartość współczynnika sprzężenia między osiami dla siły magnetycznej w osi y korzystnie się zmniejszyły przy jednoczesnym niewielkim spadku wartości sztywności przemieszczeniowej w osi x .

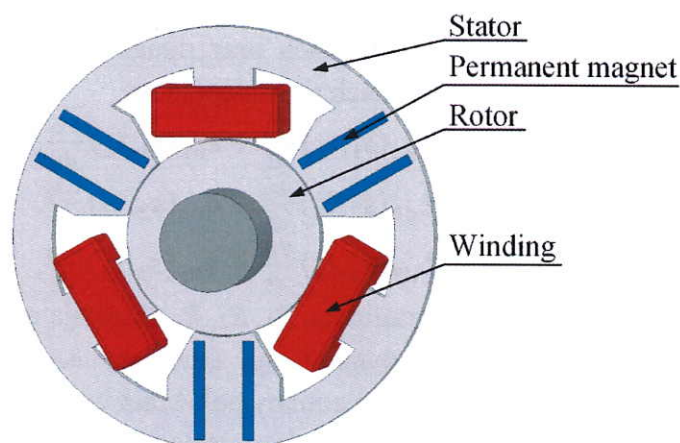
Podsumowując przeprowadzone badania, w przypadku 6-biegunowych łożysk magnetycznych z magnesami trwałymi umieszczonymi w nabiegunnikach korzystniej jest zmodyfikować wartość prądu w pierwszym uzwojeniu niż dokonywać modyfikacji obwodu magnetycznego w omówiony sposób. Znaczącym utrudnieniem realizacji stojana zgodnie z przedstawioną modyfikacją jest brak mechanicznego połączenia pomiędzy elektromagnesami, co przy szerokości szczeliny powietrznej wynoszącej 300 μm może być bardzo trudne do zrealizowania.

Ad. 9. Wajnert D.: *Hybrydowe łożysko magnetyczne*, patent RP numer PL 232739.

Ad. 10. Wajnert D.: *Promieniowe łożysko magnetyczne z magnesami trwałymi*, patent RP numer PL 233992.

Prace dotyczą: modyfikacji obwodu magnetycznego siłownika hybrydowego łożyska magnetycznego.

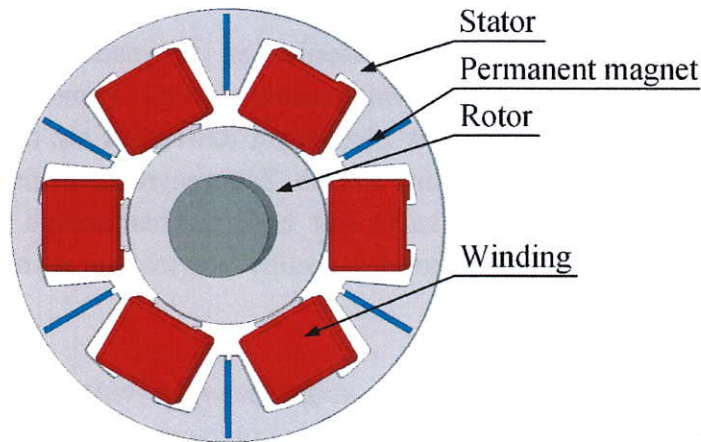
Dalsze rozważania autora nad zmniejszeniem współczynników nieliniowości siły magnetycznej oraz współczynników sprzężenia między osiami doprowadziły do opracowania dwóch nowych konstrukcji HŁM, które zostały opatentowane przez Urząd Patentowy RP. W obu tych konstrukcjach autor dążył do minimalizacji sprzężenia strumienia sterującego między sąsiednimi uzwojeniami. Na rys. 3 przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne 6-biegunowego łożyska magnetycznego z magnesami trwałymi zgodne z patentem PL 232739 pt. „*Hybrydowe łożysko magnetyczne*”. W konstrukcji tej magnesy trwałe umieszczone są w nabiegunnikach w taki sposób, że blokują możliwość sprzęgania się strumieni generowanych przez uzwojenia.



Rys. 3. Konstrukcja hybrydowego łożyska magnetycznego zgodna z patentem PL 232739

Rys. 4 przedstawia rozwiązanie konstrukcyjne 6-biegunowego łożyska magnetycznego z magnesami trwałymi zgodne z patentem PL 233992. W konstrukcji tej

magnesy trwałe umieszczone są w jarzmie stojana, natomiast na jedno uzwojenie przypadają dwie cewki, sprzężone magnetycznie zgodnie.



Rys. 4. Konstrukcja hybrydowego łożyska magnetycznego zgodna z patentem PL 233992

Konstrukcja zgodna z patentem PL 233992 (rys. 4) rozważana była w późniejszych pracach autora.

Ad. 4. Wajnert D.: *A field-circuit model of the hybrid magnetic bearing*, *Archive of Mechanical Engineering*, Vol. 66, No. 2, 2019, ss. 191–208.

Praca dotyczy: zamodelowania i weryfikacji przebiegów dynamicznych w oparciu o model polowo-obwodowy.

Następny obszar badań autora wniosku obejmuje symulację stanów dynamicznych w HŁM w oparciu o modele polowo-obwodowe. W omawianej pracy autor zaproponował model polowo-obwodowy pośrednio sprzężony z modelem bazującym na metodzie elementów skończonych. Oznacza to, że wyniki uzyskane z modelu polowego bazującego na metodzie elementów skończonych zawarte są w modelu obwodowym opisującym spadek napięcia na uzwojeniach oraz dynamikę ruchu wirnika. Równania opisujące spadek napięcia na uzwojeniach są następujące:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{d1}(s_1, i_1) \frac{di_1}{dt} + e_{v1}(s_1, i_1) \frac{ds_1}{dt}, \quad (1.a)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + L_{d2}(s_2, i_2) \frac{di_2}{dt} + e_{v2}(s_2, i_2) \frac{ds_2}{dt}, \quad (1.b)$$

$$u_3 = R_3 i_3 + L_{d3}(s_3, i_3) \frac{di_3}{dt} + e_{v3}(s_3, i_3) \frac{ds_3}{dt}, \quad (1.c)$$

gdzie u_1, u_2, u_3 oznaczają napięcie zasilania, R_1, R_2, R_3 określają rezystancję uzwojeń, L_{d1}, L_{d2}, L_{d3} oznaczają indukcyjność dynamiczną uzwojeń, e_{v1}, e_{v2}, e_{v3} określają siłę elektromotoryczną indukowaną podczas zmiany położenia wirnika.

Równania opisujące dynamikę wału zostały określone następująco:

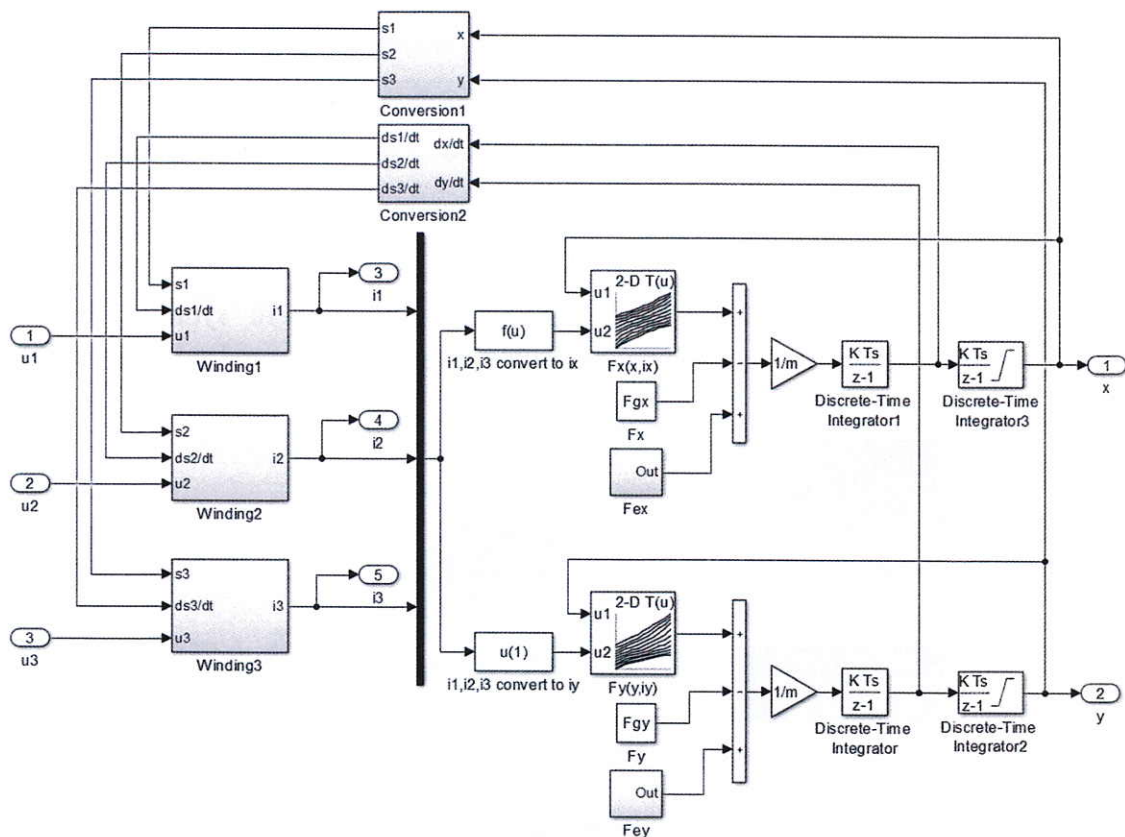
$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x(x, i_x) + m\omega^2 e_s \cos(\omega t), \quad (2.a)$$

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_y(y, i_y) - mg + m\omega^2 e_s \sin(\omega t), \quad (2.b)$$

gdzie m oznacza masę wirnika, $F_x(x, i_x)$ oraz $F_y(y, i_y)$ określają siłę magnetyczną odpowiednio dla osi x oraz y , ω oznacza prędkość kątową wirnika, e_s określa niewyważenie statyczne wirnika.

Macierze indukcyjności dynamicznych $L_{d1}(s_1, i_1)$, $L_{d2}(s_2, i_2)$, $L_{d3}(s_3, i_3)$, sił elektromotorycznych $e_{v1}(s_1, i_1)$, $e_{v2}(s_2, i_2)$, $e_{v3}(s_3, i_3)$ oraz sił magnetycznych $F_x(x, i_x)$, $F_y(y, i_y)$ zostały wyznaczone na podstawie modelu matematycznego bazującego na metodzie elementów skończonych.

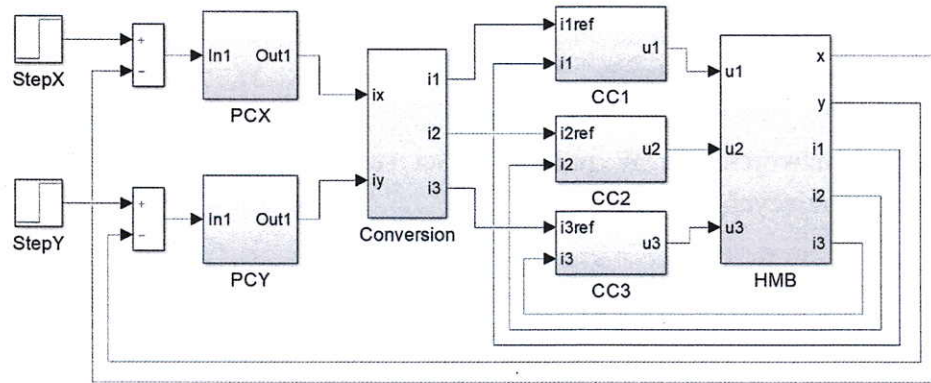
Na rys. 5 przedstawiono implementację omawianego modelu polowo-obwodowego zrealizowaną w programie MATLAB/Simulink. W komponentach o nazwach „Winding1”, „Winding2” oraz „Winding3” umieszczone są implementacje spadków napięć na uzwojeniach. W prawej części schematu umieszczona jest implementacja równań opisujących dynamikę wału.



Rys. 5. Implementacja modelu polowo-obwodowego w programie MATLAB/Simulink

Łożyska magnetyczne są obiektami strukturalnie niestabilnymi, dlatego też do poprawnej pracy wymagają układu sterowania wraz z regulatorami położenia. Regulatory położenia dla łożysk magnetycznych stanowią istotny element całego systemu łożyskowania, ponieważ decydują o jego właściwościach dynamicznych. Do tej pory wiele typów regulatorów było testowane wraz z łożyskami magnetycznymi, między innymi PD, PID, H_∞ , H_2 , LQR. Spośród wymienionych, najczęściej stosowanym typem jest regulator PID, ze względu na prostotę implementacji oraz łatwość doboru wartości parametrów. Regulatory położenia najczęściej stosowane są w połączeniu z układem sterowanym prądowo. Na rys. 6 przedstawiono implementację modelu polowo-

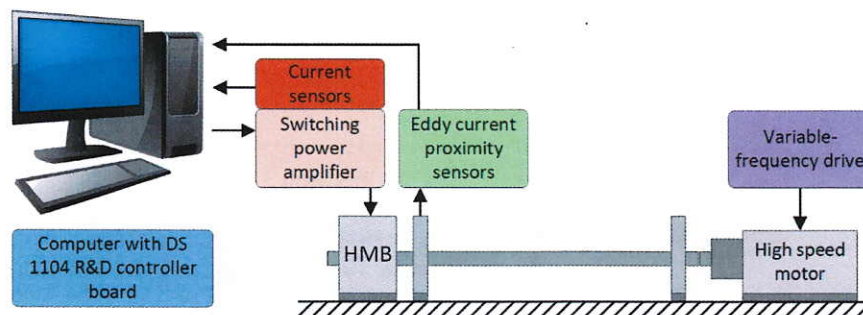
obwodowego HŁM wraz z układem sterowania. Akronimy PCX, PCY oznaczają regulatory położenia (ang. position controller) dla osi x i y , CC1, CC2, CC3 oznaczają regulatory prądu (ang. current controller) odpowiednio uzwojenia 1, 2, oraz 3. Bloczek „HMB” zawiera wcześniej przedstawioną implementację modelu dynamiki HŁM, natomiast bloczek „Conversion” implementuje konwersję prądów sterujących i_x, i_y na prądy uzwojeń i_1, i_2, i_3 .



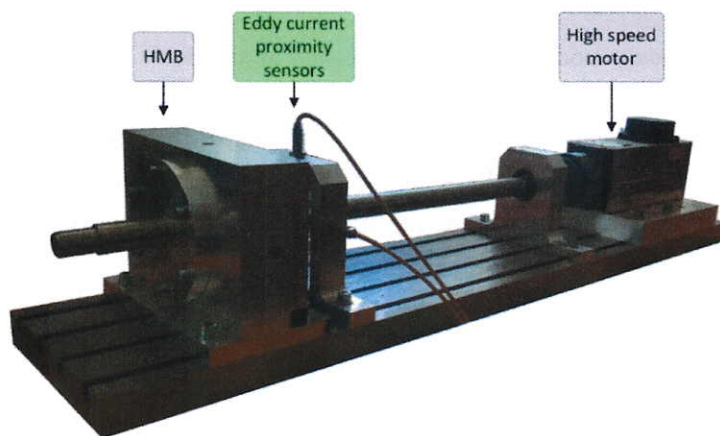
Rys. 6. Implementacja modelu polowo-obwodowego oraz układu sterowania

Na podstawie przedstawionego modelu polowego wykonano symulacje stanów dynamicznych.

W celu weryfikacji poprawności przedstawionego modelu symulacyjnego został wykonany układ pomiarowy, którego schemat blokowy został przedstawiony na rys. 7.



Rys. 7. Schemat blokowy układu pomiarowego



Rys. 8. Zdjęcie hybrydowego łożyska magnetycznego zainstalowanego w układzie pomiarowym

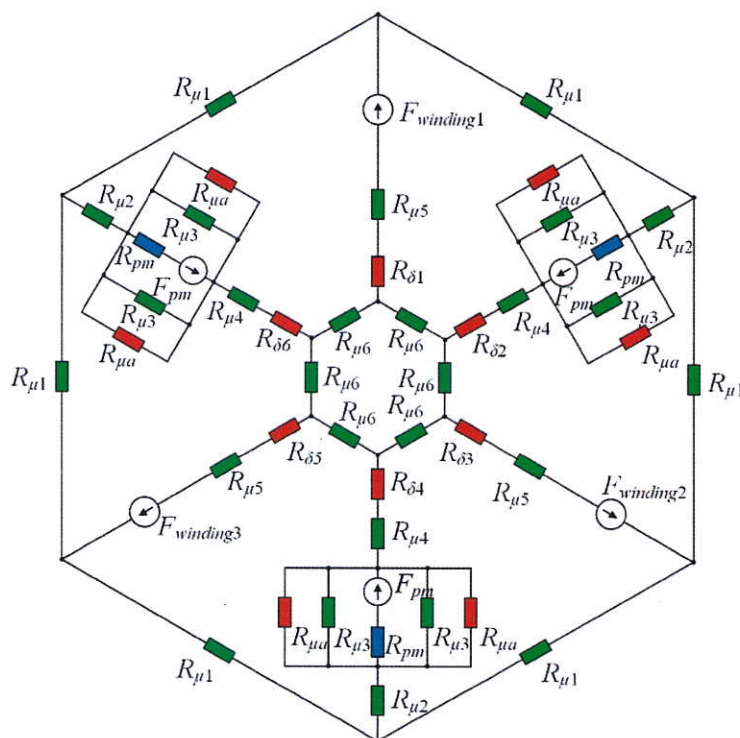
Układ pomiarowy składa się z siłownika hybrydowego łożyska magnetycznego, komputera stacjonarnego z kartą szybkiego prototypowania DS 1104 R&D, wzmacniaczy mocy zbudowanych w oparciu o mostki H, hallotronowych czujników prądu LEM LTS-6NP, wiropędowych czujników położenia MDS10/MDT10 oraz wysokoobrotowego silnika indukcyjnego zasilanego z falownika. Na rys. 8 przedstawiono zdjęcie hybrydowego łożyska magnetycznego zainstalowanego na wale sprzężonym z silnikiem wysokoobrotowym.

Przedstawione w pracy przebiegi czasowe dla prądów sterujących i_x , i_y oraz położenia wału w osi x , y wskazują na zadawalającą zgodność wyników symulacji z przebiegami uzyskanymi na podstawie modelu fizycznego. Dokładność modelu symulacyjnego została oszacowana poprzez wyznaczenie średniej kwadratowej różnicy pomiędzy przebiegami uzyskanymi z modelu symulacyjnego a pomiarem.

Ad. 5. Wajnert D., Tomczuk B.: *Nonlinear magnetic equivalent circuit of the hybrid magnetic bearing*, COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering, Vol. 38 No. 4, 2019, ss. 1190–1203.

Praca dotyczy: opracowania modelu matematycznego do analizy pola magnetycznego w hybrydowym łożysku magnetycznym.

Kolejny etap badań autora wniosku nad HŁM obejmował opracowanie zastępczego modelu reluktancyjnego, którego zadaniem było skrócenie czasu trwania symulacji rozkładu pola magnetycznego. Schemat sieci reluktancyjnej dla zastępczego obwodu magnetycznego przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Zastępczy model reluktancyjny dla hybrydowego łożyska magnetycznego

Drogi magnetyczne stojana oraz wirnika zostały podzielone na podstawowe elementy składowe i zawarte w zastępczym modelu reluktancyjnym jako reluktancje R_{μ} opisane następującym wzorem:

$$R_{\mu i}(B) = \frac{\nu(B)l_i}{A_i}, \quad (3)$$

gdzie $\nu(B)$ to nieliniowa reluktywność magnetyczna zależna od indukcji magnetycznej, l_i oznacza długość drogi magnetycznej, A_i to pole przekroju drogi magnetycznej.

Reluktancja magnesów trwałych została wyznaczona ze wzoru:

$$R_{pm} = \frac{l_{pm2}}{\mu_0 \mu_{rpm} l_{pm1} l_s}, \quad (4)$$

gdzie l_{pm2} to wysokość magnesu trwałego, μ_{rpm} to względna przenikalność magnetyczna magnesu trwałego, l_{pm1} to szerokość magnesu trwałego, l_s to długość pakietu stojana.

Reluktancja szczelin powietrznych określona jest wzorem:

$$R_{\delta i} = k_c \frac{\delta_i}{\mu_0 A_{AirGap}}, \quad (5)$$

gdzie k_c to współczynnik zmiany reluktancji szczeliny powietrznej, δ_i to długość szczeliny powietrznej, A_{AirGap} to pole powierzchni szczeliny powietrznej.

W HLM źródłem siły magnetomotorycznej są magnesy trwałe oraz uzwojenia. Siła magnetomotoryczna magnesów trwałych opisana jest zależnością:

$$F_{pm} = H_c l_{pm2}, \quad (6)$$

gdzie H_c to koercja magnetyczna magnesu trwałego.

Siła magnetomotoryczna uzwojeń opisana jest następującą zależnością:

$$F_{winding} = \lambda Ni, \quad (7)$$

gdzie λ to współczynnik rozproszenia strumienia uzwojeń.

Układ równań nieliniowych, opisujący rozkład strumieni magnetycznych w siłowniku HLM, został utworzony na podstawie praw Kirchhoffa dla obwodów magnetycznych. Na podstawie pierwszego prawa ułożono 17 równań, natomiast na podstawie drugiego prawa ułożono 13 równań. Układ równań nieliniowych określony jest następująco:

$$f(\varphi) = \mathbf{A}_R \varphi - \mathbf{F} = \mathbf{0}, \quad (8)$$

gdzie \mathbf{A}_R oznacza macierz reluktancji, φ to wektor strumieni magnetycznych, \mathbf{F} oznacza wektor sił magnetomotorycznych. Wartości elementów macierzy \mathbf{A}_R są aktualizowane w każdym kroku poszukiwania rozwiązania. Układ równań nieliniowych rozwiązywany jest za pomocą iteracyjnej metody Broydena.

Siła magnetyczna generowana przez poszczególne nabiegunniki określona jest następująco:

$$F_i = k_c \frac{\phi_i^2}{2\mu_0 A_{AirGap}}, \quad (9)$$

gdzie ϕ_i to strumień magnetyczny przepływający przez dany nabiegunnik.

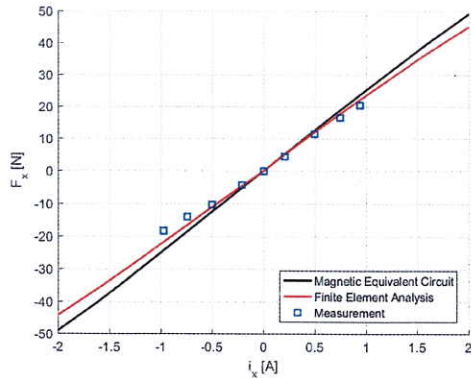
Siła magnetyczna w osi x i y generowana przez siłownik określona jest następująco:

$$F_x = \frac{\sqrt{3}}{2} F_2 + \frac{\sqrt{3}}{2} F_3 - \frac{\sqrt{3}}{2} F_5 - \frac{\sqrt{3}}{2} F_6, \quad (10.a)$$

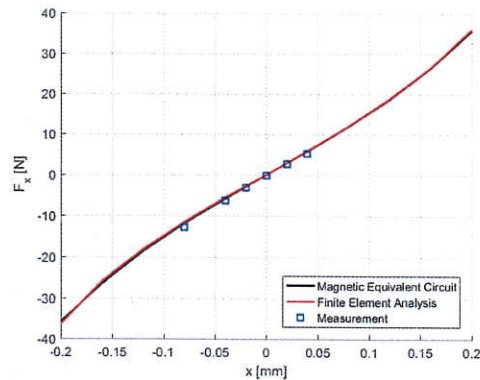
$$F_y = F_1 + \frac{1}{2} F_2 - \frac{1}{2} F_3 - F_4 - \frac{1}{2} F_5 + \frac{1}{2} F_6. \quad (10.b)$$

Na rys. 10 przedstawiono porównanie charakterystyk sił magnetycznych uzyskanych na podstawie zastępczego modelu reluktancyjnego, modelu bazującego na metodzie elementów skończonych oraz pomiarach.

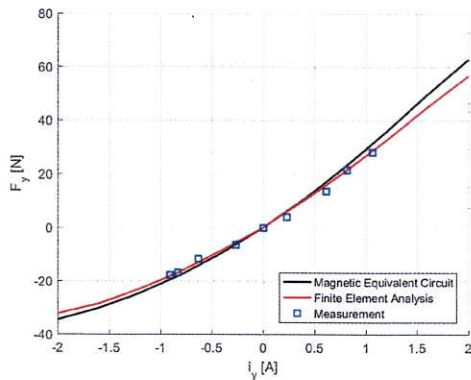
a)



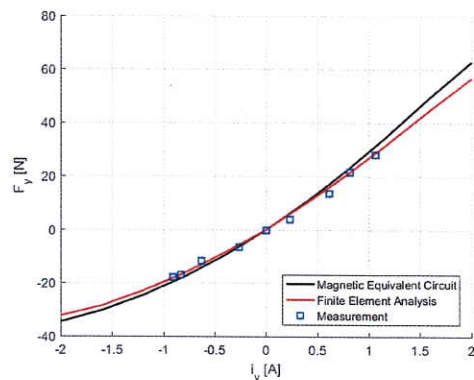
b)



c)



d)



Rys. 10. Porównanie charakterystyk sił magnetycznych: a) $F_x(i_x)$, b) $F_x(x)$, c) $F_y(i_y)$, d) $F_y(y)$ uzyskanych na podstawie zastępczego modelu reluktancyjnego, modelu bazującego na metodzie elementów skończonych oraz pomiarach

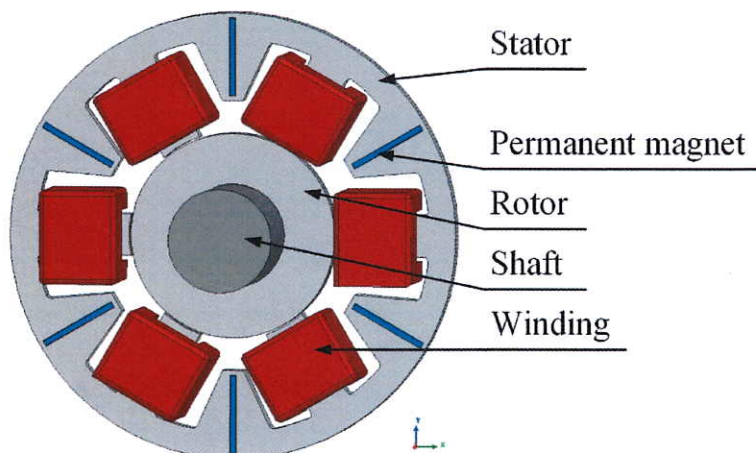
Dokładność zastępczego modelu reluktancyjnego została porównana z dokładnością modelu bazującego na metodzie elementów skończonych poprzez wyznaczenie średniego błędu bezwzględnego pomiędzy symulacjami a pomiarem. Porównanie to dowiodło, że oba modele cechują się niskimi błędami.

Ad. 6. Wajnert D.: Comparison of two constructions of hybrid magnetic bearings, Przegląd Elektrotechniczny, R. 95, Nr 12, 2019, ss. 53–58.

Praca dotyczy: porównania konstrukcji hybrydowych łożysk magnetycznych.

W publikacji tej autor porównał parametry oraz charakterystyki sił magnetycznych dwóch różnych wersji konstrukcyjnych 6-biegunowych łożysk magnetycznych z magnesami trwałymi. Pierwszą wersję stanowiła dotychczas opisywana konstrukcja łożyska magnetycznego z magnesami trwałymi umieszczonymi w nabiegownikach, którą nazwano wariantem A. Drugą wersją była konstrukcja łożyska magnetycznego z magnesami trwałymi umieszczonymi w jarzmie stojana (patent PL 233992), którą nazwano wariantem B. Średnice zewnętrzne i wewnętrzne oraz długość stojana są takie

same dla obu wariantów. Na rys. 11 przedstawiono rozwiązanie konstrukcyjne łożyska magnetycznego z magnesami trwałymi umieszczonymi w jarmie stojana.



Rys. 11. Konstrukcja łożyska magnetycznego z magnesami umieszczonymi w jarmie stojana

Parametry łożysk oraz charakterystyki sił magnetycznych zostały wyznaczone na podstawie trójwymiarowych modeli symulacyjnych bazujących na MES. W celu porównania obu wersji łożysk, autor zaproponował dodatkowe dwa współczynniki. Pierwszy współczynnik h_{non} określa nieliniowość charakterystyki siły magnetycznej, natomiast drugi współczynnik h_c wskazuje na stopień sprzężenia między osiami:

$$h_{nonx} = \frac{1}{n} \sum_x \sum_{i_x} |F_x(x, i_x) - (k_{sx}x + k_{ix}i_x)|, \quad (11.a)$$

$$h_{nony} = \frac{1}{n} \sum_y \sum_{i_y} |F_y(y, i_y) - (k_{sy}y + k_{iy}i_y)|, \quad (11.b)$$

$$h_{cx} = \frac{1}{n} \sum_y \sum_{i_y} |F_x(y, i_y)|, \quad (11.c)$$

$$h_{cy} = \frac{1}{n} \sum_x \sum_{i_x} |F_y(x, i_x)|, \quad (11.d)$$

gdzie n to liczba punktów charakterystyki.

Parametry obu wersji hybrydowych łożysk magnetycznych zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie parametrów wariantu A oraz wariantu B hybrydowego łożyska magnetycznego

Parametr	Wariant A	Wariant B
Sztywność przemieszczeniowa, k_{sx}	140 990 N/m	105 930 N/m
Sztywność przemieszczeniowa, k_{sy}	141 210 N/m	106 030 N/m
Sztywność prądowa, k_{ix}	23,22 N/A	21,97 N/A
Sztywność prądowa, k_{iy}	23,22 N/A	22,00 N/A
Siła początkowa, F_{x0}	15,24 N	21,84 N
Siła początkowa, F_{y0}	13,56 N	22,53 N
Siła maksymalna, F_{xmax}	44,95 N	41,84 N
Siła maksymalna, F_{ymax}	56,38 N	46,09 N
Współczynnik nieliniowości siły, h_{nonx}	4,05 N	2,14 N
Współczynnik nieliniowości siły, h_{nony}	7,69 N	2,42 N
Współczynnik sprzężenia, h_{cx}	0,08 N	0,03 N
Współczynnik sprzężenia, h_{cy}	7,50 N	2,95 N
Indukcyjność dynamiczna, L_d	4,90 mH	5,27 mH
Siła elektomotoryczna, e_v	15,49 Vs/m	15,56 Vs/m

Porównując parametry obu wariantów łożyska magnetycznego można stwierdzić, że wariant B posiada minimalnie mniejszą sztywność prądową, przy poprawie większości parametrów w stosunku do wariantu A. Zmniejszenie sztywności przemieszczeniowej przy nieznacznie mniejszej sztywności prądowej należy traktować jako pozytywną zmianę, ponieważ zwiększa się siła początkowa łożyska. Dla wariantu B widoczny jest również pozytywny spadek wartości współczynników nieliniowości oraz współczynników sprzężenia między osiami.

Ad. 7. Wajnert D., Sykulski J. K., Tomczuk B.: *An Enhanced Dynamic Simulation Model of a Hybrid Magnetic Bearing Taking Account of the Sensor Noise, Sensors, Vol. 20, No. 2, 2020, 1116.*

Praca dotyczy: zamodelowania i weryfikacji przebiegów dynamicznych w oparciu o modele polowo-obwodowe.

W pracy tej autor wniosku zaproponował model polowo-obwodowy bezpośrednio sprzężony z zastępczym modelem reluktancyjnym dla wariantu A hybrydowego łożyska magnetycznego. Oznacza to, że model obwodowy opisujący spadek napięcia na uzwojeniach oraz dynamikę ruchu wirnika jest bezpośrednio sprzężony z zastępczym modelem reluktancyjnym reprezentującym model polowy. Wówczas rozkład pola magnetycznego w siłowniku obliczany jest dla każdego kroku czasowego rozwiązania części obwodowej modelu. Równania opisujące spadek napięcia na uzwojeniach są następujące:

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\Psi_1(x, y, i_1, i_2, i_3)}{dt}, \quad (12.a)$$

$$u_2 = R_2 i_2 + \frac{d\Psi_2(x, y, i_1, i_2, i_3)}{dt}, \quad (12.b)$$

$$u_3 = R_3 i_3 + \frac{d\Psi_3(x, y, i_1, i_2, i_3)}{dt}, \quad (12.c)$$

gdzie $\Psi_1(x, y, i_1, i_2, i_3)$, $\Psi_2(x, y, i_1, i_2, i_3)$ oraz $\Psi_3(x, y, i_1, i_2, i_3)$ to strumienie magnetyczne sprzężone z uzwojeniami 1, 2 oraz 3.

Równania opisujące dynamikę wału zostały określone następująco:

$$m \frac{dx^2}{dt^2} = F_x(x, y, i_1, i_2, i_3) + m\omega^2 e_s \cos(\omega t), \quad (13.a)$$

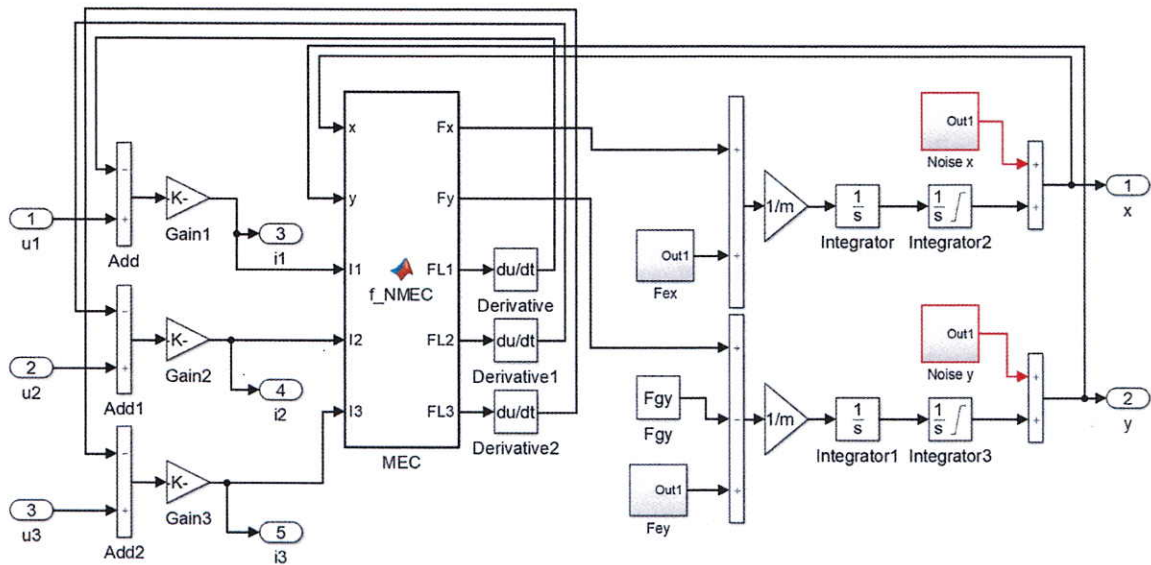
$$m \frac{dy^2}{dt^2} = F_y(x, y, i_1, i_2, i_3) - mg + m\omega^2 e_s \sin(\omega t), \quad (13.b)$$

gdzie $F_x(x, y, i_1, i_2, i_3)$ oraz $F_y(x, y, i_1, i_2, i_3)$ określają siłę magnetyczną odpowiednio dla osi x oraz y .

Sprzężone strumienie magnetyczne $\Psi_1(x, y, i_1, i_2, i_3)$, $\Psi_2(x, y, i_1, i_2, i_3)$, $\Psi_3(x, y, i_1, i_2, i_3)$ oraz siły magnetyczne $F_x(x, y, i_1, i_2, i_3)$, $F_y(x, y, i_1, i_2, i_3)$ wyznaczone są bezpośrednio z zastępczego modelu reluktancyjnego, który został omówiony w publikacji [5].

Na rys. 12 przedstawiono implementację modelu polowo-obwodowego w programie MATLAB/Simulink. W bločku „MEC” umieszczony jest skrypt obliczający rozkład pola magnetycznego na podstawie zastępczego modelu reluktancyjnego. Dodatkowo, ten model polowo-obwodowy został uzupełniony o dwa bločki „Noise x” oraz „Noise y” zaznaczone kolorem czerwonym, które uwzględniają błędy pomiaru położenia wału w osiach x oraz y . Błędy te spowodowane są nierównomiernymi właściwościami

elektrycznymi oraz magnetycznymi powierzchni pomiarowej położenia wału, pomimo wypolerowania go z dokładnością kilku mikrometrów.



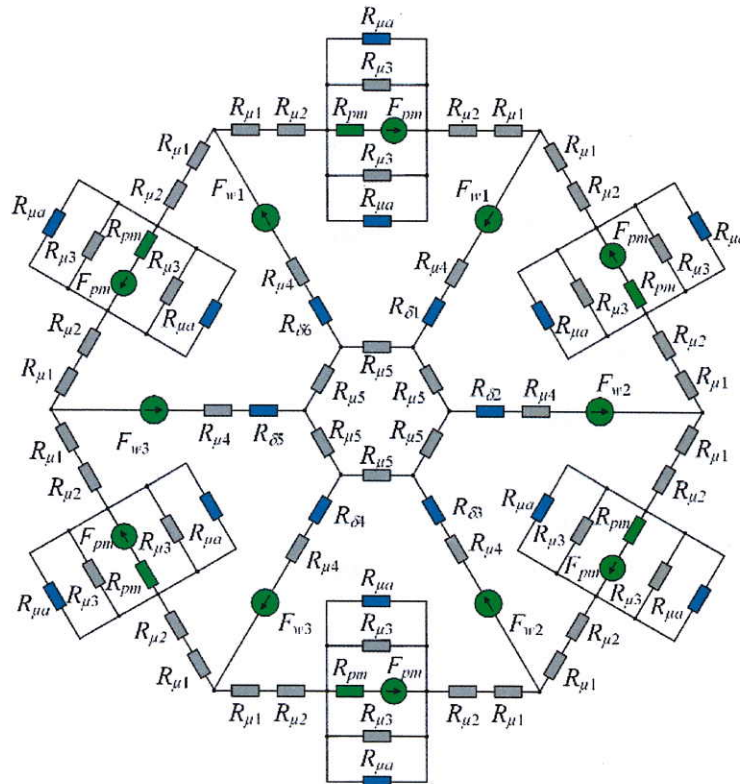
Rys. 12. Implementacja modelu polowo-obwodowego bezpośrednio sprzężonego z zastępczym modelem reluktancyjnym

Przedstawione przebiegi czasowe dla prądów sterujących i_x , i_y oraz położenia wału w osiach x , y wskazują na zadawalającą zgodność wyników symulacji z przebiegami uzyskanymi z modelu fizycznego.

Ad. 8. Wajnert D., Tomczuk B.: Two Models for Time-Domain Simulation of Hybrid Magnetic Bearing's Characteristics, Sensors, Vol. 22, No. 4, 2022, 1567.

Praca dotyczy: zamodelowania i weryfikacji przebiegów dynamicznych w oparciu o modele polowo-obwodowe.

W omawianej pracy przedstawiono porównanie dwóch modeli przeznaczonych do symulacji stanów dynamicznych dla wariantu B hybrydowego łożyska magnetycznego. Pierwszy to model polowo-obwodowy bezpośrednio sprzężony z zastępczym modelem reluktancyjnym. Model ten jest taki sam jak model przedstawiony na rys. 12, jednakże implementacja zastępczego modelu reluktancyjnego jest właściwa dla wariantu B łożyska. Na rys. 13 przedstawiono sieć reluktancyjną dla wariantu B HLM.



Rys. 13. Zastępczy model reluktancyjny dla wariantu B hybrydowego łożyska magnetycznego

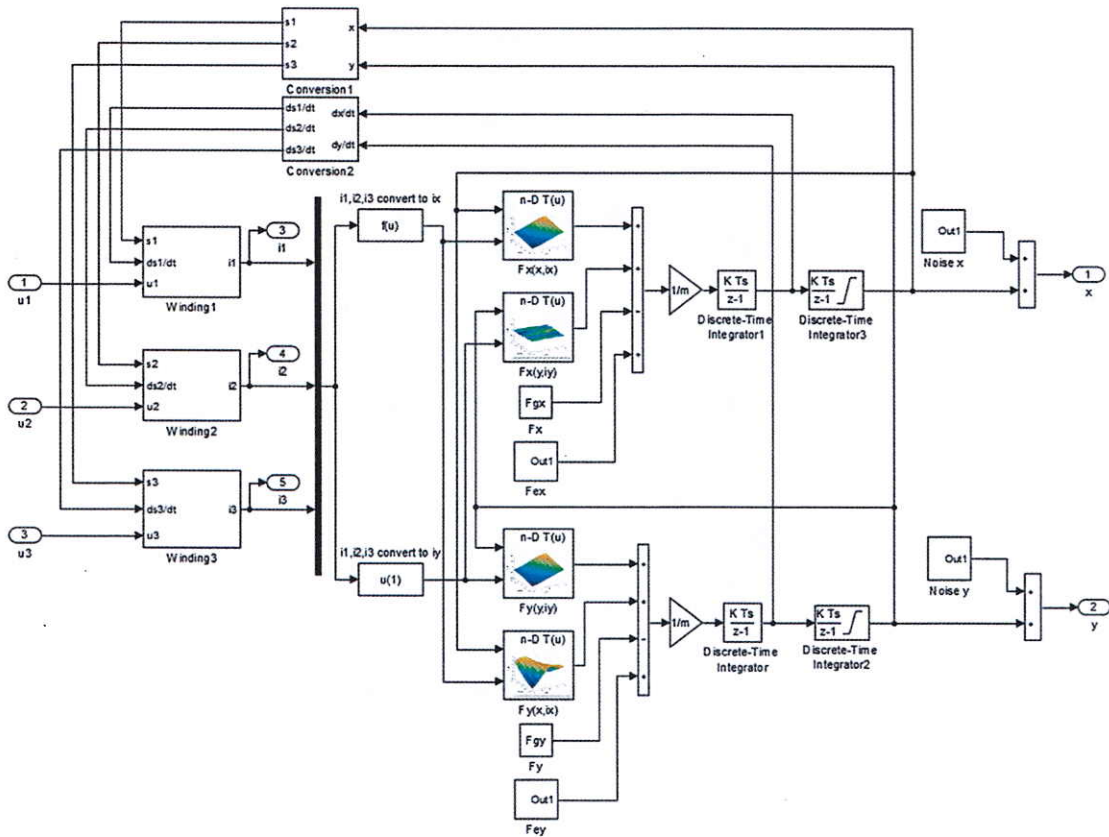
Elementy schematu zastępczego zostały wyznaczone zgodnie ze wzorami (3)–(7), jedynie zmianie uległy definicje długości dróg magnetycznych oraz ich pola przekroju. Równania opisujące rozkład strumieni magnetycznych w tym przypadku oparte są na 24 równaniach wynikających z pierwszego prawa Kirchhoffa dla obwodów magnetycznych oraz 18 równań wynikających z drugiego prawa Kirchhoffa dla obwodów magnetycznych. Układ równań nieliniowych został rozwiązany przy wykorzystaniu metody Broydena.

Drugi model to model polowo-obwodowy pośrednio sprzężony z modelem opartym na metodzie elementów skończonych. Równania opisujące spadek napięcia na uzwojeniach są takie same jak wcześniej przedstawione równania (1), natomiast równania opisujące dynamikę wału zostały uzupełnione o dwa dodatkowe komponenty:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_x(x, i_x) + F_x(y, i_y) + m\omega^2 e_s \cos(\omega t), \quad (14.a)$$

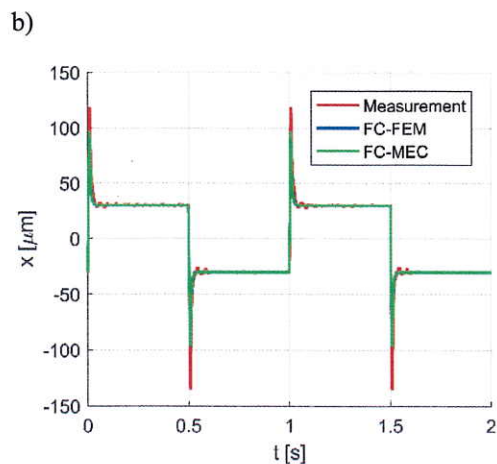
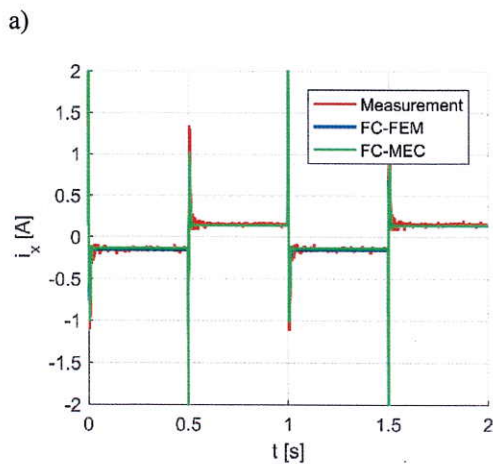
$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_y(x, i_x) + F_y(y, i_y) - mg + m\omega^2 e_s \sin(\omega t), \quad (14.b)$$

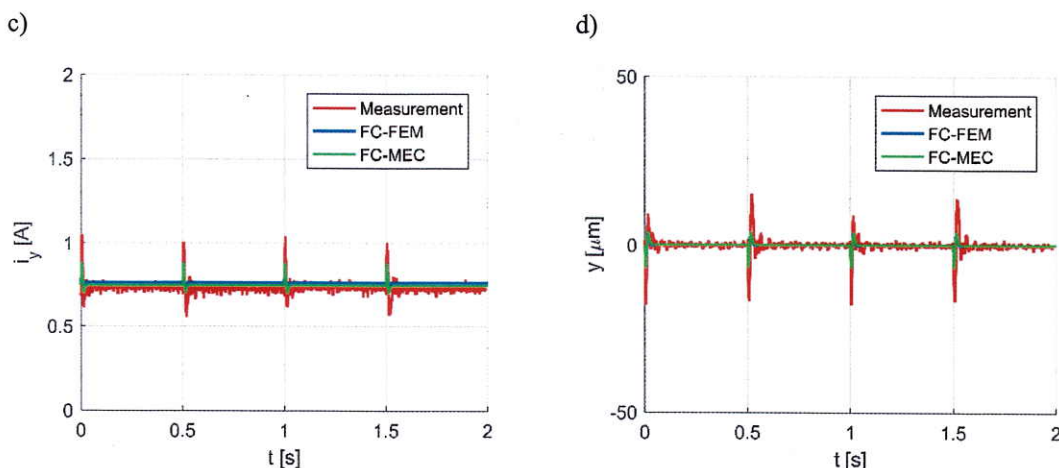
gdzie $F_x(y, i_y)$ to siła magnetyczna generowana w osi x przy zmianie prądu sterującego oraz położenia wału w osi y , natomiast $F_y(x, i_x)$ to siła magnetyczna generowana w osi y przy zmianie prądu sterującego oraz położenia wału w osi x . Wielkości te uwzględniają sprzężenie strumienia magnetycznego między uzwojeniami. Na rys. 14 przedstawiono implementację modelu polowo-obwodowego pośrednio sprzężonego z modelem bazującym na metodzie elementów skończonych.



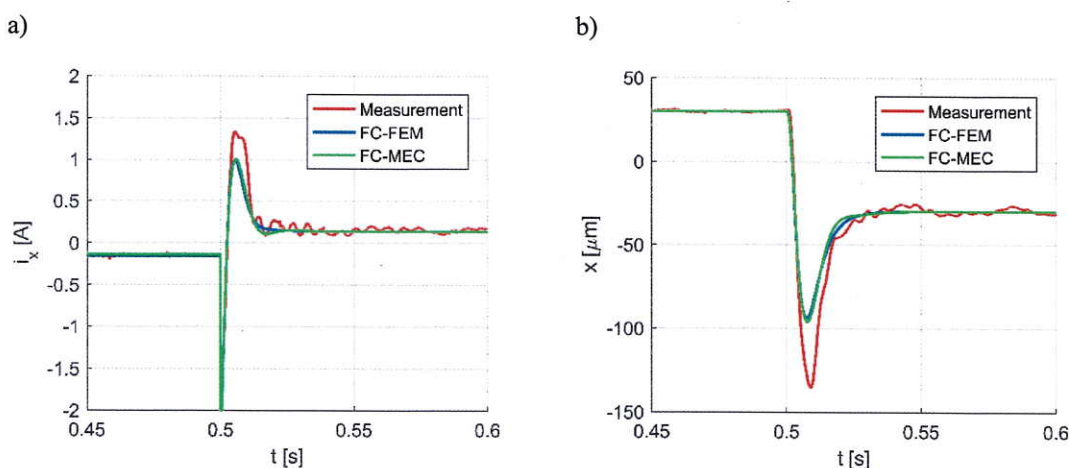
Rys. 14. Implementacja w programie MATLAB/Simulink modelu polowo-obwodowego pośrednio sprzężonego z modelem bazującym na metodzie elementów skończonych

Przedstawione na rysunkach 15 oraz 16 przebiegi wskazują, że odpowiedzi uzyskane na podstawie obu modeli są bardzo podobne i nieznacznie różnią się od wyników uzyskanych z pomiarów.





Rys. 15. Przebiegi czasowe: a) prądu sterującego i_x , b) położenia wału w osi x , c) prądu sterującego i_y oraz d) położenia wału w osi y



Rys. 16. Powiększenie przebiegów czasowych: a) prądu sterującego i_x oraz b) położenia wału w osi x

Wajnert D.: *Mathematical modelling of hybrid magnetic bearings*, Studia i Monografie, z. 567, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole, 2022.

Monografia autorska stanowi zwarte opracowanie obejmujące dotychczasową działalność naukową autora dotyczącą hybrydowych łożysk magnetycznych. W pracy przedstawiono rozważania nad dwoma konstrukcjami 6-biegunowych łożysk magnetycznych z magnesami trwałymi. Recenzentami monografii byli: dr hab. inż. Arkadiusz Mystkowski (prof. Politechniki Białostockiej) oraz dr hab. inż. Marcin Wardach (prof. Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie). Monografia składa się ze 124 stron podzielonych na 7 rozdziałów.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie do tematyki łożysk magnetycznych oraz omówienie aktualnego stanu wiedzy na ich temat. Na początku przedstawiono zalety i wady łożysk magnetycznych oraz ich zastosowanie w aplikacjach przemysłowych. Następnie przedstawiono klasyfikację łożysk magnetycznych oraz omówiono konstrukcje aktywnych, pasywnych oraz hybrydowych łożysk magnetycznych. Przedstawiono tutaj również wybór sygnałów sterujących położeniem wirnika dla układu automatycznej

regulacji. W dalszej części rozdziału przedstawiono aktualny stan wiedzy dotyczący wieloaspektowości prowadzonych na całym świecie badań, które dotyczą:

- rozwoju nowych konstrukcji łożysk magnetycznych, w tym z magnesami trwałymi,
- opracowania modeli numerycznych do symulowania rozkładu pola magnetycznego, wyznaczania parametrów w łożyskach magnetycznych oraz wykonywania analizy wieloparametrycznej,
- opracowania odpowiednich modeli numerycznych do wyznaczania przebiegów dynamicznych.

Należy zaznaczyć, iż zdecydowana większość opublikowanych prac dotyczy aktywnych łożysk magnetycznych, natomiast niewiele prac powstało na temat 6-biegunowych łożysk magnetycznych z magnesami trwałymi (poza pracami autora).

W rozdziale drugim omówiono parametry łożysk magnetycznych. Poza powszechnie stosowanymi parametrami, tj. sztywnością przemieszczeniową, sztywnością prądową, indukcyjnością uzwojenia oraz siłą elektromotoryczną powstającą w wyniku zmiany położenia wirnika, autor pracy zaproponował dodatkowe parametry do opisu łożysk magnetycznych. Są to: siła początkowa F_0 powstająca przy minimalnym położeniu wirnika oraz maksymalnym prądzie sterującym, maksymalna siła F_{max} powstająca przy centralnym położeniu wirnika oraz maksymalnym prądzie sterującym, współczynnik nieliniowości siły magnetycznej h_{non} oraz współczynnik sprzężenia siły między osiami h_c opisane wzorami (11). Wszystkie te parametry wyznacza się dla obu osi x oraz y . W dalszych częściach rozdziału opisano analizowane konstrukcje hybrydowych łożysk magnetycznych: wariant A z magnesami trwałymi umieszczonymi w nabiegunnikach oraz wariant B z magnesami trwałymi umieszczonymi w jarzmie stojana. Opisano ich budowę, rozptyw strumieni magnetycznych, sposób działania oraz przedstawiono ich charakterystyki.

Rozdział trzeci monografii omawia równania dla metody elementów skończonych oraz równania parametrów całkowych.

W czwartym rozdziale opisano modele matematyczne przeznaczone do wyznaczania rozkładu pól magnetycznych oraz parametrów dla obu wariantów HŁM. Pierwszy model bazuje na trójwymiarowej metodzie elementów skończonych i został zrealizowany w programie Ansys Maxwell 3D. Drugi model oparty jest na zastępczym modelu reluktancyjnym. Modele te częściowo zostały już opisane we wcześniej przedstawionych publikacjach. Charakterystyki sił uzyskane na podstawie obu modeli matematycznych zostały porównane oraz zweryfikowane poprzez pomiar generowanych sił magnetycznych zgodnie z procedurą opisaną w załączniku B monografii.

Piąty rozdział monografii poświęcono analizie wieloparametrycznej obu wariantów łożysk magnetycznych. Analizy te miały na celu ocenę wpływu istotnych parametrów konstrukcyjnych na wartości parametrów hybrydowych łożysk magnetycznych. Analizie podlegała zmiana następujących parametrów konstrukcyjnych:

- szerokości magnesu trwałego,
- wysokości magnesu trwałego,
- grubości mostka w nabiegunniku z magnesem trwałym (dla wariantu A) oraz grubości mostka w jarzmie z magnesem trwałym (dla wariantu B),
- szerokości nabiegunników.

Analizy wieloparametryczne wykonano w oparciu o trójwymiarowe modele matematyczne bazujące na MES dla dużej zmienności wartości parametrów konstrukcyjnych. W wyniku przeprowadzonych badań symulacyjnych ustalono, że wszystkie zmiany parametrów konstrukcyjnych znacząco wpływały na parametry hybrydowych łożysk magnetycznych. Wybór najkorzystniejszej wartości zmienianego parametru konstrukcyjnego polegał na znalezieniu miejsca przecięcia charakterystyk sił początkowych F_0 w osi x oraz y . Na podstawie przyjętego kryterium, autor pracy dla każdej analizy wieloparametrycznej zaproponował najkorzystniejszą wartość modyfikowanego parametru.

W rozdziale szóstym przedstawiono modele matematyczne przeznaczone do symulacji stanów dynamicznych dla obu wersji hybrydowych łożysk magnetycznych. Na początku rozdziału opisano system sterowania dla hybrydowych łożysk magnetycznych oparty na regulatorach PID położenia oraz przedstawiono sposób doboru parametrów tych regulatorów. Następnie opisano model polowo-obwodowy pośrednio sprzężony z modelem bazującym na MES. Przedstawiono równania opisujące spadek napięcia na uzwojeniach oraz równania ruchu wirnika uwzględniające siłę niewyważenia statycznego wirnika. Jako drugi został przedstawiony model polowo-obwodowy bezpośrednio sprzężony z zastępczym modelem reluktancyjnym, dla którego również przedstawiano równania opisujące spadek napięcia na uzwojeniach oraz równania ruchu wirnika. Oba modele symulacyjne zostały zaimplementowane w środowisku MATLAB/Simulink oraz uzupełnione o błędy pomiaru położenia wirnika spowodowane niejednorodnością elektryczną i magnetyczną powierzchni pomiarowych położenia wirnika. Wyniki uzyskane na podstawie modeli symulacyjnych zostały zweryfikowane poprzez pomiar na dedykowanym stanowisku pomiarowym, które zostało zaprojektowane i wykonane przez autora wniosku. W dodatku A opisano to stanowisko oraz zestawiono w tabeli parametry podstawowych elementów stanowiska.

W rozdziale siódmym przedstawiono podsumowanie uzyskanych wyników prac.

Podsumowanie

Prace autora wniosku związane były z analizą i badaniem 6-biegunowych łożysk magnetycznych z magnesami trwałymi. Do głównych osiągnięć autora można zaliczyć:

- zaproponowanie dwóch nowych rozwiązań konstrukcyjnych 6-biegunowych łożysk magnetycznych z magnesami trwałymi, które zostały opatentowane na terytorium RP,
- zaproponowanie i opracowanie trójwymiarowych modeli polowych bazujących na metodzie elementów skończonych, a następnie wykonanie badań symulacyjnych dla hybrydowego łożyska magnetycznego z magnesami trwałymi umieszczonymi w nabiegunnikach oraz hybrydowego łożyska magnetycznego z magnesami trwałymi umieszczonymi w jarzmie stojana,
- zaproponowanie i opracowanie modeli polowych bazujących na zastępczym modelu reluktancyjnym, a następnie wykonanie badań symulacyjnych dla obu wariantów hybrydowych łożysk magnetycznych,

- wykonanie badań wpływu wybranych parametrów konstrukcyjnych na parametry hybrydowych łożysk magnetycznych,
- projekt konstrukcji, budowę prototypów oraz przeprowadzenie badań obu wariantów hybrydowych łożysk magnetycznych,
- zbudowanie stanowiska pomiarowego umożliwiającego wyznaczenie charakterystyk generowanej siły magnetycznej oraz pomiar stanów dynamicznych hybrydowych łożysk magnetycznych.

W następnym etapie badań autor wniosku zamierza opracować modele matematyczne hybrydowych łożysk magnetycznych, które uwzględniają prądy wirowe w stojanie oraz wirniku. Działanie to ma na celu określenie prędkości obrotowej dla której prądy wirowe generują znaczną część strat i powinny być uwzględnione w modelach symulacyjnych.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

1. Współpraca z profesorem Stefanem Kuligiem z Uniwersytetu Technicznego w Dortmundzie w zakresie budowy i wdrożenia siłownika elektromagnetycznego z układem zasilania i sterowania. Siłownik stanowi napęd dla stanowiska do badań zmęczeniowych materiałów w Katedrze Napędów Elektrycznych i Mechatroniki Uniwersytetu Technicznego w Dortmundzie (Lehrstuhl für Elektrische Antriebe und Mechatronik, Technische Universität Dortmund).
W załączniku D przedstawiona jest kopia potwierdzenia wdrożenia.
2. Współpraca z profesorem Janem Sykulskim z Uniwersytetu z Southhampton w zakresie modelowania hybrydowego łożyska magnetycznego. W wyniku tej współpracy opublikowano artykuł: Wajnert D., Sykulski J. K., Tomczuk B.: An Enhanced Dynamic Simulation Model of a Hybrid Magnetic Bearing Taking Account of the Sensor Noise, Sensors, Vol. 20, No. 2, 2020, 1116.
W załączniku B przedstawiona jest kopia publikacji.
3. Współpraca z Katedrą Automatyki i Robotyki Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej w zakresie konstrukcji siłowników promieniowych łożysk magnetycznych.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

6.1. Działalność dydaktyczna

1. Prowadzenie zajęć dydaktycznych, w tym wykładów, ćwiczeń, zajęć laboratoryjnych, seminariów oraz zajęć projektowych dla studentów kierunku Informatyka (studia I-stopnia), Automatyka i Robotyka (studia I-stopnia), Computer Engineering (studia I-stopnia), Elektronika i Telekomunikacja (studia I-stopnia), Mechatronika (studia I-stopnia), Energetyka (studia I-stopnia) z przedmiotów:

- Elektrotechnika (ćwiczenia), Elektrotechnika I (wykład, ćwiczenia, laboratoria), Elektrotechnika II (ćwiczenia), Elektrotechnika dla informatyków (wykład, ćwiczenia), Electrical Engineering (ćwiczenia), Electrical Engineering for IT students (ćwiczenia), Programowanie I (laboratoria), Programowanie II (wykład, projekt), Programming I (wykład), Programming II (wykład), Informatyka II (laboratoria), Propagacja fal (projekt), Elektromechaniczne elementy mechatroniki (projekt), Aktuatory w systemach mechatronicznych (laboratorium), Elementy elektroniczne (laboratorium), Miernictwo anten (wykład, seminarium).
2. Prowadzenie zajęć dydaktycznych dla studentów zagranicznych w ramach programu Erasmus z przedmiotów: Antennas and Wave Propagation, Transmitters and Receivers Transmission Physical Support oraz Programming I.
 3. Promotor łącznie 22 prac dyplomowych, w tym: 18 prac inżynierskich oraz 4 prac magisterskich obronionych na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki oraz Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej.
 4. Promotor inżynierskiej pracy dyplomowej pana Patryka Szywalskiego pt. „Projekt i wykonanie bezzałogowego systemu latającego” nagrodzonej I miejscem w konkursie Prac Dyplomowych studentów Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej w roku 2016.
 5. Promotor magisterskiej pracy dyplomowej pana Patryka Szywalskiego pt. „Opracowanie algorytmu autonomicznego lotu dla bezzałogowego systemu latającego” nagrodzonej II miejscem w konkursie Prac Dyplomowych studentów Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej w roku 2017.
 6. Promotor inżynierskiej pracy dyplomowej pana Przemysława Garguli pt. „Tester kart pomiarowych na bazie NI Virtual Bench i oprogramowania LabView” zrealizowanej we współpracy z firmą Diehl Controls Polska Sp. z o.o., ul. Pułaskiego 6, 46-100 Namysłów.
 7. Recenzent 10 prac inżynierskich oraz 12 prac magisterskich prowadzonych na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki oraz Wydziale Mechanicznym Politechniki Opolskiej.
 8. Członek Wydziałowej Komisji ds. Programów Kształcenia na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej, od listopada 2017 r. do września 2019 r.
 9. Członek Rady Dydaktycznej dla kierunku Elektronika Przemysłowa (obecnie Elektronika i Systemy Komputerowe) prowadzonym na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej, od października 2019 r. (nadal).
 10. Promotor pomocniczy od 2020 r. w przewodzie doktorskim mgr. inż. Dawida Webera, tytuł przewodu doktorskiego: „Obliczanie pola i regulacja prądu w transformatorze pomocniczym”. Praca doktorska prowadzona na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej pod przewodnictwem prof. dr. hab. inż. Bronisława Tomczuka.

6.2. Działalność organizacyjna

1. Opiekun Laboratorium badawczego transformatorów i aktuatorów o ruchu liniowym oraz Laboratorium fal i anten na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej.
2. Wykonawca w projekcie „Przebudowa budynków 1 i 3 Wydziału Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki w II Kampusie Politechniki Opolskiej”, realizowanym w okresie od stycznia 2015 r. do grudnia 2015 r. Charakter udziału: wykonawca odpowiedzialny za zakup wyposażenia sal laboratoryjnych oraz pomieszczeń pracowniczych należących do Katedry Elektrotechniki Przemysłowej (obecnie Katedry Elektrotechniki i Mechatroniki) Politechniki Opolskiej.
3. Udział w Komitecie organizacyjnym konferencji International Symposium on Electrodynamics and Mechatronic Systems (SELM 2013).

6.3. Działalność popularyzująca naukę

1. Uczestnictwo w przygotowaniu stanowiska popularno-naukowego prezentowanego przez Koło Naukowe Eledyn z Politechniki Opolskiej na X Opolskim Festiwalu Nauki (24 czerwca 2012 r.).
2. Uczestnictwo w przygotowaniu stanowiska popularno-naukowego prezentowanego przez Koło Naukowe Eledyn na XII Opolskim Festiwalu Nauki (31 maja 2015 r.).
3. Uczestnictwo w konkursie „Eureka! DGP – odkrywamy polskie wynalazki” w edycji z 2015 r. organizowanym przez Dziennik Gazeta Prawna. Do konkursu zgłoszono patent pt. „Elektrodynamiczne łożysko magnetyczne”.
4. Uczestnictwo w przygotowaniu stanowiska popularno-naukowego prezentowanego przez Koło Naukowe Eledyn na II Festiwalu Kół Naukowych (21 marca 2022 r.).
5. Promowanie kierunku Elektronika i Systemy Komputerowe wśród uczniów szkół średnich (prezentacja na zaproszenie szkoły 7 kwietnia 2022 r.).

6.4. Nagrody i wyróżnienia

1. Nagroda projakościowa przyznawana przez JM Rektora Politechniki Opolskiej dla najlepiej publikujących pracowników naukowych w roku 2019.
2. Nagroda projakościowa przyznawana przez JM Rektora Politechniki Opolskiej dla najlepiej publikujących pracowników naukowych w latach 2019 – 2020.

Wykaz pozostałych osiągnięć znajduje się w Załączniku 4.

.....
Dawid Wejnert.....

(podpis wnioskodawcy)