

DOI: 10.5604/20830157.1130209

# WIELOWARIANTOWA ANALIZA POLA MAGNETYCZNEGO I OBLICZENIE SIŁ LEWITACJI AKTYWNEGO OSIOWEGO ŁOŻYSKA MAGNETYCZNEGO (AAMB)

**Piotr Graca, Bronisław Tomczuk**

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

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wielowariantowe obliczenia pola i siły magnetycznej siłownika aktywnego osiowego łożyska magnetycznego (AAMB). Wykonano model polowy oparty na Metodzie Elementów Skończonych (MES), który pozwolił na analizę konstrukcji AAMB. W wyniku wielowariantowych obliczeń określono najkorzystniejsze wymiary tarczy łożyska dla założonych wymiarów elektromagnesu.

**Słowa kluczowe:** aktywne osiowe łożysko magnetyczne, analiza pola magnetycznego, metoda elementów skończonych, siła magnetyczna

## MULTIVARIATE MAGNETIC FIELD ANALYSIS AND LEVITATION FORCE CALCULATION OF THE ACTIVE AXIAL MAGNETIC BEARING (AAMB)

**Abstract.** The paper presents multivariate calculations of magnetic field and magnetic force in the active axial magnetic bearing actuator (AAMB). The field model has been developed using Finite Element Method (FEM) and has been used for AAMB construction analysis. As a result of multivariate calculations the beneficial dimensions of a bearing disk were determined, where the electromagnet dimensions were used as a reference.

**Keywords:** active axial magnetic bearing, magnetic field analysis, finite-element method, magnetic force

### Wstęp

Aktywne Łożyska Magnetyczne (*ang. Active Magnetic Bearings – AMB*), dzięki stałemu ich rozwojowi i rosnącej popularności, są coraz częściej wykorzystywane do łożyskowania wirników wysokoobrotowych maszyn elektrycznych. Dzięki takim zaletom jak brak tarcia, brak smarowania, duża prędkość obrotowa (do 500 000 obr/min) oraz możliwość pracy w agresywnym środowisku, AMB stanowią znakomitą alternatywę dla konwencjonalnych łożysk kulkowych i ślizgowych [3, 5].

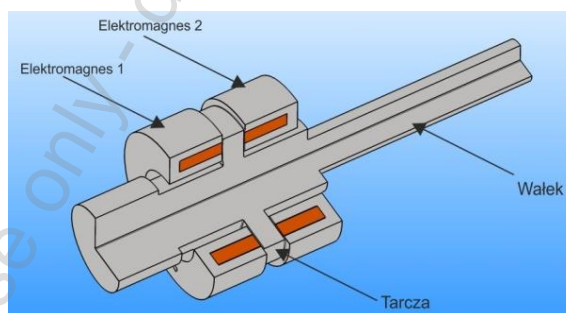
Jednym z przykładów zastosowania AMB są elektrowrzeciona, przeznaczone do pracy w nowoczesnych obrabiarkach CNC (*ang. Computerized Numerical Control*). Zazwyczaj, tego typu konstrukcja składa się z dwóch łożysk radialnych oraz z jednego łożyska osiowego. Łożyska radialne odpowiedzialne są za utrzymywanie wirnika w osi symetrii stojana. Z kolei magnetyczne łożysko osiowe utrzymuje stałe wysunięcie wału.

Aktualnie, w Katedrze Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Opolskiej, rozwijana jest konstrukcja wysokoobrotowego wrzeciona (rys. 1). Jednakże, ze względu na obszerny materiał, niniejsza praca skupia się jedynie na konstrukcji siłownika aktywnego osiowego łożyska magnetycznego (*ang. Active Axial Magnetic Bearing – AAMB*).

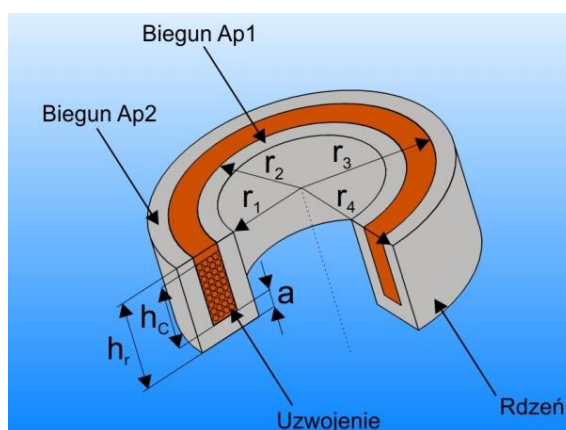
### 1. Konstrukcja mechaniczna siłownika AAMB

Siłownik AAMB składa się z dwóch jednakowych elektromagnesów oraz tarczy na sztywno umieszczonej na wale maszyny elektrycznej (rys. 2). Elektromagnesy, które działają w układzie różnicowym, są sterowane za pomocą regulatora położenia tak, aby szczelina powietrzna pomiędzy tarczą a poszczególnym elektromagnesem była jednakowa. Nominalna szerokość szczelin dla badanego prototypu wynosi 0.2 mm dla każdej ze stron.

Elektromagnesy składają się z okrągłego rdzenia oraz uzwojeń umieszczonych w wyfrezowanym rowku, zabezpieczonych żywicą epoksydową (rys. 3). Dane konstrukcyjne zestawiono w tabeli 1.



Rys. 2. Przekrój siłownika aktywnego osiowego łożyska magnetycznego



Rys. 3. Budowa elektromagnesu



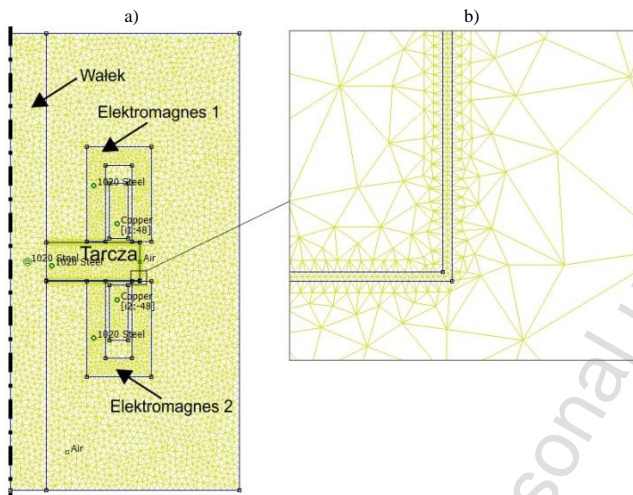
Rys. 1. Stanowisko badawcze wysokoobrotowego elektrowrzeciona

Tabela 1. Dane konstrukcyjne elektromagnesu

parametr	symbol	wartość
Promień [mm]	$r_1$	20
	$r_2$	25
	$r_3$	32
	$r_4$	37
Szerokość bieguna [mm]	$AP_1$	5
	$AP_2$	5
Powierzchnia bieguna [mm <sup>2</sup> ]	$AP_1$	706.5
	$AP_2$	1083.3
Grubość podstawy rdzenia [mm]	$a$	5
Wysokość rdzenia [mm]	$hr$	25
Wysokość cewki [mm]	$hc$	24
Liczba zwojów	-	48
Średnica drutu [mm]	-	1

## 2. Model polowy

Do obliczeń rozkładu indukcji magnetycznej oraz siły magnetycznej w siłowniku łożyska, w przestrzeni 2D, zastosowano oprogramowanie FEMM [4] wykorzystujące Metodę Elementów Skończonych (MES). Obszar obliczeniowy, przedstawiony na rys. 4, został pokryty nieregularną siatką trójkątną. Siatka ta została dodatkowo zagęszczona w szczelinie powietrznej, w celu uzyskania dokładnych obliczeń siły magnetycznej [1]. Ze względu na osiowo-symetryczną budowę siłownika zadeklarowano do obliczeń jedynie połowę przekroju aktuatora. Dla regionów wykonanych z ferromagnetyka zadano nieliniową charakterystykę magnesowania. Z kolei na brzegach obszaru obliczeniowego zadano zerowy warunek Dirichleta [6, 7].



Rys. 4. Dyskretyzacja obszaru obliczeniowego: a) widok ogólny; b) powiększenie szczeliny powietrznej

W obszarze obliczeniowym rozwiązano równanie różniczkowe cząstkowe typu eliptycznego [9]:

$$\nabla \times \left( \frac{1}{\mu(B)} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (1)$$

gdzie:  $\vec{A}$  - potencjał wektorowy,  $\mu(B)$  - przenikalność magnetyczna,  $\vec{J}$  - gęstość prądu w uzwojeniach wzbudzających.

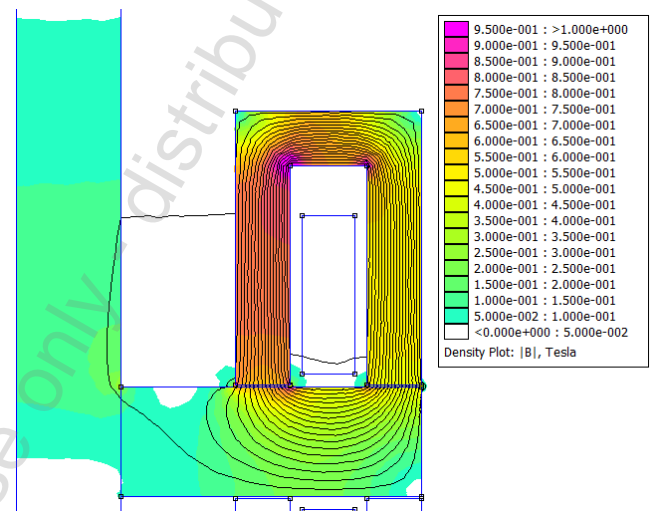
Do obliczenia siły magnetycznej wykorzystano wyrażenie określające tensor naprężeń Maxwella, dane wzorem:

$$\vec{F} = \oint_{\Gamma} \vec{T} \cdot d\vec{\Gamma} \quad (2)$$

gdzie  $\Gamma$  jest brzegiem obszaru bezpośrednio otaczającego element na który działa siła magnetyczna [2, 8].

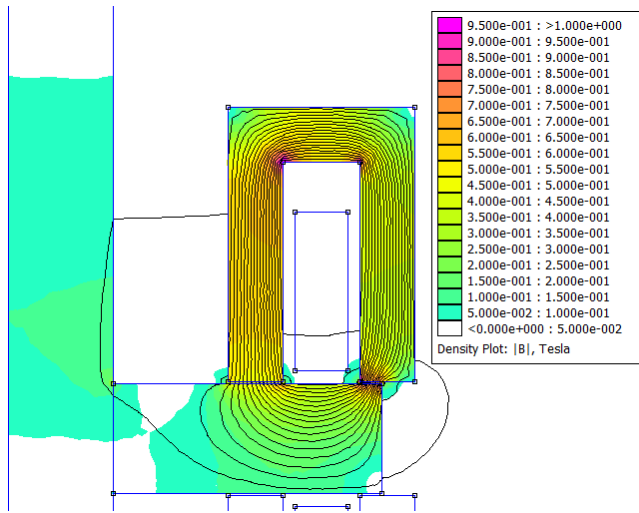
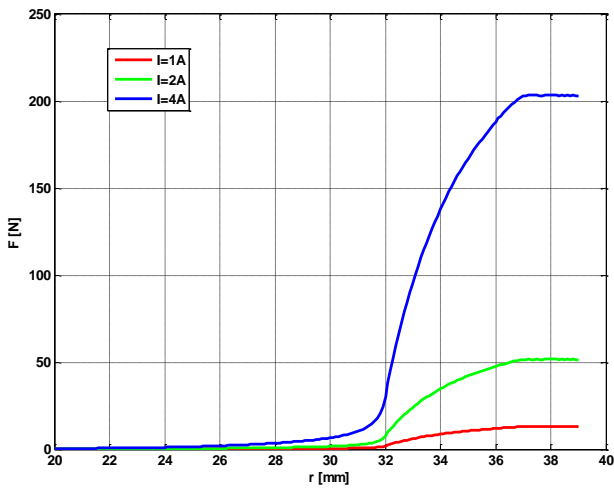
## 3. Wyznaczanie siły magnetycznej

Jednym z rozpatrywanych przypadków, w ramach wielowariantowych obliczeń polowych, było sprawdzenie wpływu wymiarów tarczy na siłę magnetyczną generowaną w siłowniku łożyska. W pierwszym etapie zbadano jaka jest zależność pomiędzy promieniem  $r$  obracającej się tarczy a maksymalną siłą generowaną w aktuatorze. Na rysunku 5 i 6 przedstawiono górną połowę obszaru obliczeniowego, który zdyskretyzowano jak pokazano na rysunku 4a. Jest to spowodowane symetrią pola względem płaszczyzny przechodzącej w połowie tarczy. Ponadto, z uwagi na symetrię pola względem osi wału analizowano jeden przekrój wzdłużny. W wyniku obliczeń dowiedziono, że najlepsze warunki (największą siłę magnetyczną) otrzymuje się dla promienia tarczy  $r \geq r_4$ , czyli w przypadku gdy wykorzystuje się do pracy pełne pole powierzchni bieguna  $AP_2$  (rys. 3, rys. 5). Warto również zauważyć, że w przypadku gdy bieguny  $AP_1$  i  $AP_2$  mają taką samą szerokość oraz spełniony jest warunek  $r \geq r_4$  to otrzymuje się większą indukcję magnetyczną w wewnętrznym biegunie  $AP_1$ .

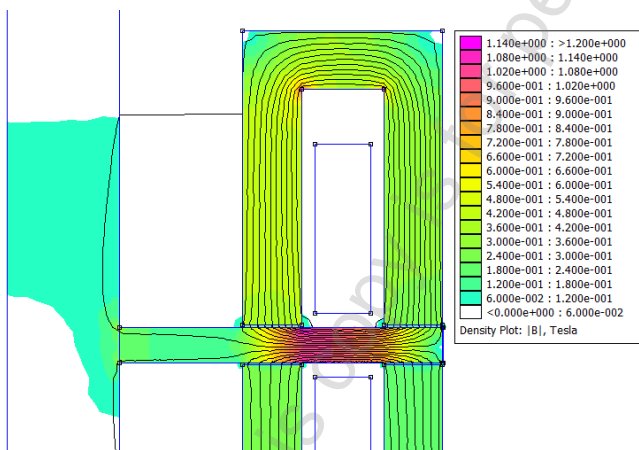
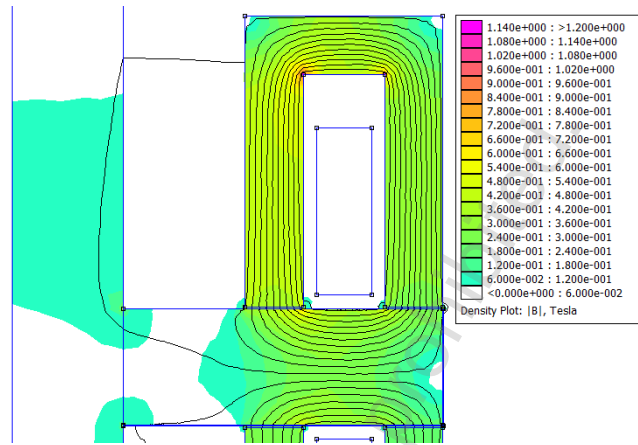
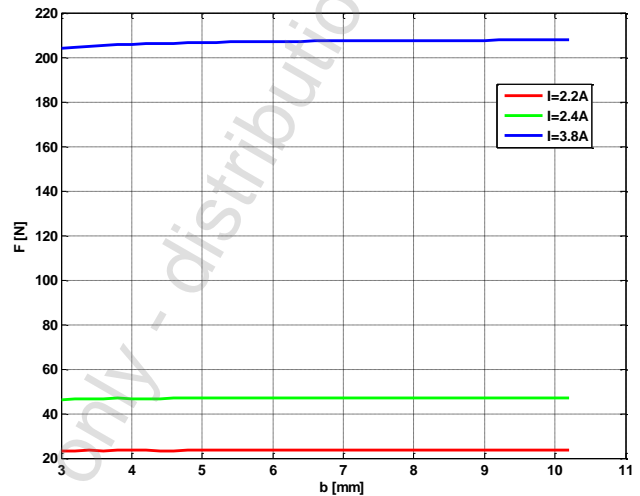
Rys. 5. Rozkład indukcji magnetycznej w siłowniku AAMB dla  $r = 37$  mm

W przypadku gdy promień  $r < r_4$  otrzymuje się dużo mniejszą wartość siły  $F$ . Zależność siły  $F$  w funkcji promienia  $r$  wirującej tarczy łożyska charakteryzuje się dużą nieliniowością. Co więcej, dla  $r = r_3$  gdy powierzchnia  $AP_2$  bieguna nie jest powierzchnią czynną siła magnetyczna jest ponad dziesięciokrotnie mniejsza niż w przypadku pełnego wykorzystania w/w powierzchni (rys. 7). W zbudowanym prototypie łożyska ustalono promień tarczy  $r = 34$  mm. Przemawiały za tym względy konstrukcyjne oraz wyniki obliczeń indukcji magnetycznej, które przyjmowały zbliżone wartości w obydwóch biegunach dla wybranego promienia  $r$  (rys. 6).

W pracy przebadano również wpływ grubości  $b$  tarczy na siłę magnetyczną generowaną w łożysku. Jak pokazano na rysunku 10 wpływ ten jest niewielki i uwidatnia się szczególnie dla dużych prądów. Jednakże grubość tarczy, ze względów konstrukcyjnych nie może być za mała chociaż powinna przyjmować jak najmniejsze wartości. Przede wszystkim należy uwzględnić wpływ grubości  $b$  na nasycenie magnetyczne tarczy w przypadku zasilania elektromagnesów prądem bazowym i prądem sterującym. Jak widać na rysunku 8 indukcja magnetyczna we fragmencie tarczy znajdującym się między biegunami elektromagnesu jest 10 krotnie większa od indukcji w pozostałym obszarze tarczy, co wpływa niekorzystnie na pracę łożyska.

Rys. 6. Rozkład indukcji magnetycznej w silowniku AAMB dla  $r = 34$  mmRys. 7. Wpływ rozmiaru promienia tarczy  $r$  na siłę magnetyczną

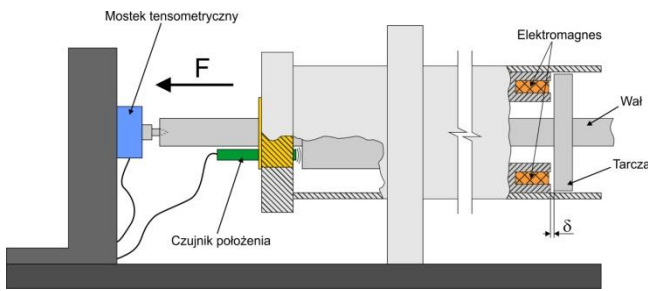
Wykonane obliczenia wielowariantowe, ze zmienną grubością  $b$  pozwoliły na określenie zależności grubości w stosunku do szerokości biegunów. Ustalono, że najbliższej optymalnej jest grubość tarczy równa podwójnej grubości biegunów. Na podstawie dodatkowych obliczeń, obejmujących rozkład pola magnetycznego w tarczy, przyjęto wymiar  $b = 10$  mm (rys. 9).

Rys. 8. Rozkład indukcji magnetycznej w silowniku AAMB dla  $b = 3$  mmRys. 9. Rozkład indukcji magnetycznej w silowniku AAMB dla  $b = 10$  mmRys. 10. Wpływ grubości tarczy  $b$  na siłę magnetyczną

#### 4. Weryfikacja pomiarowa siły magnetycznej

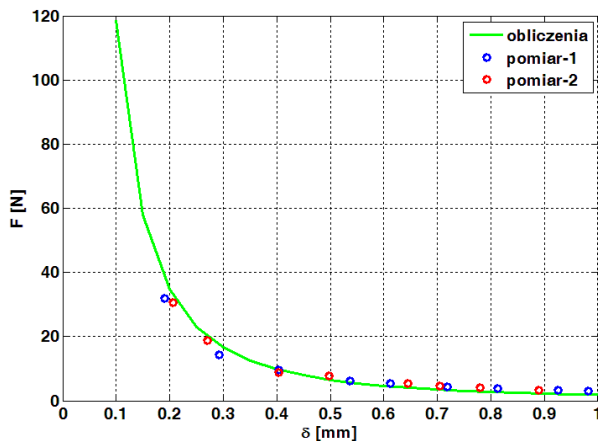
Wykonany w ramach niniejszej pracy układ pomiarowy (rys. 11) służył głównie do eksperymentalnego wyznaczenia magnetycznej siły lewitacji. Głównym elementem systemu pomiarowego był mostek tensometryczny EMS30 o maksymalnym obciążeniu 500 N, klasie dokładności 0.5 i współczynniku nieliniowości 0.25%. EMS30 został podłączony do dedykowanego modułu z wyświetlaczem cyfrowym, który podawał wartość siły z dokładnością 0,001%. Kolejnym ważnym elementem układu pomiarowego był indukcyjny czujnik położenia M08EI-UAD15B-BP03. Służył on do ustawiania odpowiedniej szczeliny powietrznej  $\delta$  między tarczą a elektromagnesem oraz był wykorzystany do kompensacji odkształcenia obudowy mostka tensometrycznego. Czujnik posiadał zakres pomiarowy równy 1 mm. Do ustalenia długości szczeliny powietrznej  $\delta$  wykorzystano śrubę regulacyjną, łączącą mostek tensometryczny z wałem łożyska. W celu eliminacji siły tarcia, pomiary zostały wykonane po uprzednim zawieszeniu wałka w dwóch radialnych aktywnych łożyskach magnetycznych maszyny. Aby uniknąć wpływu temperatury na przebieg eksperymentu, elektromagnes został zasilony ze stabilizowanego źródła prądu.





Rys. 11. Układ pomiarowy do wyznaczenia siły magnetycznej

Oprócz wymiarów geometrycznych duży wpływ na siłę magnetyczną ma długość szczeliny powietrznej  $\delta$  między tarczą a biegunami elektromagnesu. Dlatego też wykonano pomiar siły w funkcji długości tej szczeliny (rys. 12). Znaczące zmiany siły występują w zakresie  $\delta = 0.1 - 0.3$  mm. W pozostałym zakresie siła zmienia się o małą wartość. Warto przypomnieć, że dla przedstawionych w niniejszej pracy obliczeń pola i siły magnetycznej przyjęto długość szczeliny  $\delta = 0.2$  mm. Analizując rysunek 12 można zauważyć dużą zbieżność wyników obliczeń i pomiarów, gdzie różnica jest niezbyt znacząca i zawiera się od 1% do 9%.



Rys. 12. Siła magnetyczna dla różnych długości szczelin powietrznych ( $I = 2A$ )

## 5. Wnioski

Zastosowana metoda połowa obliczeń daje możliwość uwzględnienia nie tylko szerokiego zakresu wymiarów geometrycznych lecz również własności materiałowych, a w szczególności nasycenia pewnych elementów obwodu magnetycznego. W związku z powyższym, bez budowania kosztownych prototypów, można ulepszyć i unowocześnić konstrukcję AAMB. W wyniku obliczeń parametrów całkowitych pola magnetycznego można z wystarczającą dokładnością, dla celów technicznych, wyznaczyć siłę magnetyczną powodującą lewitację części ruchomej łożyska. Po porównaniu wartości zmierzonych i obliczonych można stwierdzić, że występuje zgodność w zakresie do 10%.

## Podziękowania



Projekt współfinansowany przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego

## Literatura

- [1] Graca P.: Calculation and Verification of Magnetic Field Parameters in Axial Active Magnetic Bearing. *Solid State Phenomena*, vol. 214/2014, 143-150.
- [2] Graca P., Mrozek K.: Influence of Magnetization Curve on the Force Generated in Axial Active Magnetic Bearing. *Electrodynamic and Mechatronic Systems*, Zawiercie 2013, 89-90.
- [3] Kimman M.H., Langen H.H., Munning Schmidt R.H.: A miniature milling spindle with Active Magnetic Bearings. *Mechatronics* 20/2010, 224-235.
- [4] Meeker D.: *Finite Element Method Magnetics Version 4.2, User's Manual*. University of Virginia, USA, 2009.
- [5] Schweitzer G., Maslen E.H.: *Magnetic Bearings. Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Springer – Verlag Berlin, Heidelberg, 2009.
- [6] Tomczuk B., Zimon J.: Field Determination and Calculation of Stiffness Parameters in an Active Magnetic Bearing. 4th International Conference Mechatronic Systems and Materials MSM 2008, Białystok, Poland, 14-17 July 2008, 52-53.
- [7] Tomczuk B., Zimon J., Waindok A.: Field-Circuit Method for the Non-Steady State Analysis in the Active Magnetic Bearings. *Proceedings of the 17th Conference on the Computation of Electromagnetic Fields*, Florianopolis, Brazil, 22-26.11.2009, 183-184.
- [8] Waindok A.: Modeling and Measurement of Transients for a 5-phase Permanent Magnet Tubular Linear Actuator Including Control and Supply System. *Solid State Phenomena*, vol. 214/2014, 121-129.
- [9] Wajnert D.: Comparison of Magnetic Field Parameters Obtained from 2D and 3D Finite Element Analysis for an Active Magnetic Bearing. *Solid State Phenomena*, vol. 214/2014, 130-137.

### Mgr inż. Piotr Graca

e-mail: p.graca@doktorant.po.edu.pl

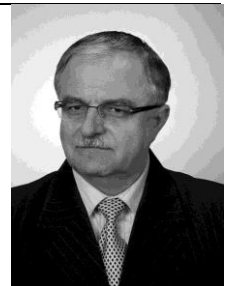
Ukończył studia magisterskie w roku 2011 na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej. Obecnie jest słuchaczem studiów doktoranckich. Jego praca naukowa-badawcza wiąże się z modelowaniem numerycznym aktywnych łożysk magnetycznych oraz projektowaniem układów sterowania dla tego typu obiektów. Jest stypendystą projektu Stypendia doktoranckie – inwestycja w kadrę naukową Województwa Opolskiego.



### Prof. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk

e-mail: b.tomczuk@po.opole.pl

Kierownik Katedry Elektrotechniki Przemysłowej Politechniki Opolskiej. Jest autorem lub współautorem 6 książek, ponad 200 publikacji w renomowanych czasopiśmie zagranicznych i krajowych oraz autorem i współwłaścicielem 13 patentów. Od trzydziestu lat prowadzi badania naukowe dotyczące komputerowej analizy i weryfikacji pomiarowej trójwymiarowych pól elektromagnetycznych. Przedmiotem badań są transformatory i dławiki oraz aktuatory elektromagnetyczne o ruchu liniowym.



otrzymano/received: 2014.09.14

przyjęto do druku/accepted: 2014.09.25