

Bronisław Tomczuk, Andrzej Waindok
Politechnika Opolska, Opole

WPLYW LICZBY FAZ NA TĘTNIENIA SIŁY MAGNETYCZNEJ W AKTUATORZE LINIOWYM

PHASE NUMBER INFLUENCE ON THE MAGNETIC FORCE RIPPLES IN A LINEAR ACTUATOR

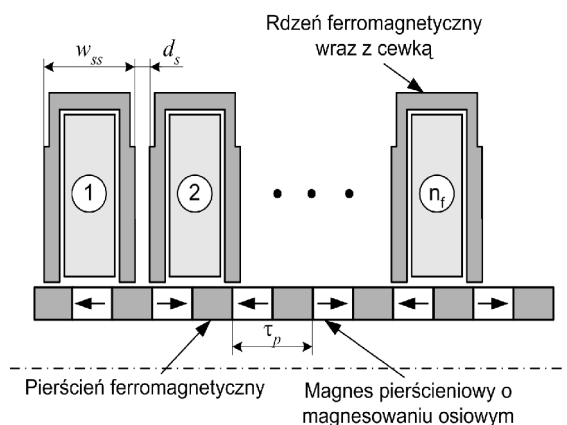
Abstract: The magnetic force ripples in a permanent magnet tubular linear motor (PMTLM) have been considered in the paper. A field modeling has been carried out for the linear motors with different phase numbers. The presented calculations have been carried out using the finite element method including real characteristics of the magnetic materials. The motor construction differs from the others by magnetic separation of the stator winding segments. Because of the modular design, it is simple for manufacturing. Moreover, the actuators with different phase numbers can be made using the standard components. The obtained results yields, that increasing phase number cause a lower force ripples, which is very favorable to precision machines e.g. CNC. Because the power electronic components get cheaper, the cost problem is not decisive. In the most applications, where the high precision is demand, the multiphase linear motors can be used.

1. Wstęp

Wielofazowe maszyny elektryczne są znane od kilkudziesięciu lat [4, 7]. Większość z nich to maszyny 3-fazowe. Najczęściej stosowane są indukcyjne silniki obrotowe [6, 7]. Rzadziej spotyka się inne konstrukcje wielofazowe. Dotyczy to również silników liniowych. Praktycznie nieliczne publikacje dotyczą wielofazowych silników liniowych [10, 11]. Najczęściej analizowane standardowe konstrukcje silników liniowych posiadają trójfazowe zasilanie [2, 3, 5]. Wielofazowe silniki liniowe mają zalety, które wynikają z ich konstrukcji. Z tego też względu autorzy podjęli się badań związanych z tego typu maszynami. Zaproponowano rozwiązanie oparte o silniki tubowe z magnesami trwałymi [8, 9, 12, 13]. Impulsem do podjęcia tego typu analizy jest także rozwój energoelektroniki i układów sterowania [1]. Szybki rozwój tych dziedzin pozwala na stosunkowo łatwe konstruowanie silników, a szczególnie ich zasilania dla dowolnej liczby faz. Najłatwiejsze do wykonania są silniki liniowe o liczbie faz nie przekraczającej sześciu [1, 6].

W niniejszej pracy zaprezentowano modułową konstrukcję silnika liniowego tubowego z magnesami trwałymi (permanent magnet tubular linear motor – PMTLM) [9, 13]. Modułowość dotyczy w szczególności stojana silnika, którego poszczególne segmenty odseparowano magnetycznie od siebie. Tak więc, mogą one być ustawiane w różnej konfiguracji. Dzięki takiej budowie istnieje możliwość składania silników

o dowolnej liczbie faz z uprzednio przygotowanych elementów – modułów (rys. 1).



Rys. 1. Przekrój silnika n_f -fazowego wraz z naniesionymi wybranymi oznaczeniami

Obliczenia przeprowadzono pod kątem minimalizacji pulsacji siły magnetycznej. Drgania – pulsacje tej siły są niekorzystne z punktu widzenia napędu, w którym pracuje silnik. Szczególnie dotyczy to silnika synchronicznego, dla którego ważna jest płynność zmian siły, a właściwie jej stabilność w całym zakresie ruchu biegnika silnika liniowego. Dlatego też wszystkie obliczenia wykonano dla jego pracy synchronicznej. Kąt obciążenia tego silnika określono w stopniach. Jest to stosunek przemieszczenia biegnika i podziałki biegunowej pomnożony przez kąt półpełny. Poziom pulsacji określa tzw. współczynnik pulsacji w_{pul} , który zdefiniowano jako

$$W_{\text{pul}} = \frac{F_{N_{\text{max}}} - F_{N_{\text{min}}}}{F_{\text{NAV}}} \quad (1)$$

gdzie $F_{N_{\text{max}}}$, $F_{N_{\text{min}}}$ i F_{NAV} to kolejno wartość maksymalna, minimalna i średnia siły znamionowej ciągu przy przemieszczeniu biegnika w zakresie jednej podziałki biegunowej τ_p (rys. 1).

Najczęściej stosowanymi technikami minimalizacji pulsacji siły są zmiana konstrukcji silnika [8, 13] lub jego zasilania [5]. W pierwszym przypadku najczęściej zmieniane są wymiary geometryczne wybranych elementów konstrukcyjnych maszyny. W drugim przypadku poszukuje się takiego kształtu prądu zasilającego, który kompensowałby pulsacje siły mające swoje źródło w budowie silnika. Oprócz wymienionych metod istnieje także możliwość minimalizacji pulsacji siły poprzez zwiększenie liczby faz maszyny. Autorzy proponują w ramach niniejszej pracy wykazanie takiej możliwości oraz jej efektywności.

Na rysunku 1 zamieszczono niezbędne w obliczeniach oznaczenia. Liczbę faz oznaczono jako n_f . Szerokość pojedynczego segmentu stojana, odległość między segmentami oraz podziałkę biegunową oznaczono kolejno jako w_{ss} , d_s oraz τ_p . W każdym z analizowanych przypadków liczba cewek odpowiadała liczbie faz. Należy zaznaczyć, że pierwotnie tego typu silniki wykonywano jedynie jako dwufazowe [14]. Wadą takiego rozwiązania są duże pulsacje siły znamionowej.

2. Model matematyczny

Model matematyczny silnika jest oparty na metodzie elementów skończonych (MES). W algorytmie obliczeniowym uwzględniono nieliniową charakterystykę magnesowania obwodu magnetycznego (stal ST3) oraz charakterystykę od magnesowania magnesów trwałych (NdFeB35). Ze względu na symetrię osiową, problem 3-wymiarowy można było sprowadzić do 2-wymiarowego, gdzie niewiadomą jest wartość składowej biegunowej A_ϕ potencjału wektorowego:

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A_\phi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r \cdot \mu(B)} \frac{\partial A_\phi}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu(B)} \frac{\partial A_\phi}{\partial z} \right) - \frac{1}{\mu(B)} \frac{A_\phi}{r^2} = J_\phi \quad (2)$$

Wyznaczenie rozkładu potencjału umożliwia obliczenie indukcji magnetycznej ($\nabla \times \vec{A} = \vec{B}$). Ponadto można wyznaczyć siłę ciągu, która jest parametrem całkowym pola. Jej wartość otrzymuje się z tensora naprężeń powierzchniowych Maxwella [12, 13]

$$\vec{F}_e = \int_{\Omega} f \, d\Omega = \oint_{\Gamma} \vec{T} \cdot d\vec{\Gamma} \quad (3)$$

gdzie:

$$\vec{T} = \begin{bmatrix} \mu(B) \left(H_r^2 - \frac{1}{2} H^2 \right) & \mu(B) H_r H_z \\ \mu(B) H_r H_z & \mu(B) \left(H_z^2 - \frac{1}{2} H^2 \right) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Należy dodać, że indeks „r” dotyczy składowej promieniowej danego wektora. Np. H_r dotyczy składowej promieniowej wektora natężenia pola magnetycznego.

3. Wyniki obliczeń

Obliczenia wykonano przy założeniu sinusoidalnego wymuszenia prądowego. Wartość natężenia prądu wynosiła $I_m = 8$ A. Liczba zwojów cewki pojedynczego segmentu wynosiła $N = 280$. Przyjęto odpowiednie przesunięcie fazowe pomiędzy prądami zasilającymi poszczególne fazy. We wszystkich przypadkach przyjęto te same wymiary magnesów i pierścieni ferromagnetycznych w biegniku. Tak więc, zachowano stałą podziałkę biegunową $\tau_p = 15$ mm (rys. 1). Zmiana liczby faz wiąże się więc jedynie ze zmianą wymiarów geometrycznych stojana.

Tabela 1. Odległości między segmentami stojana dla silników o różnej liczbie faz

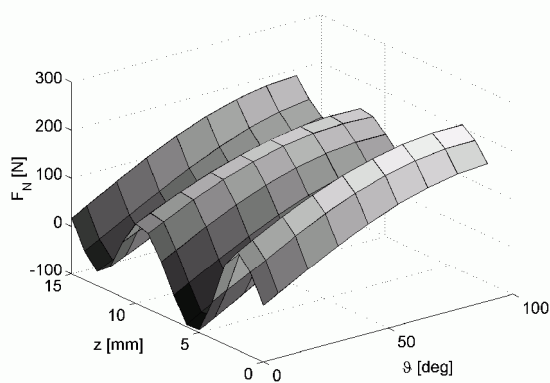
Liczba faz (n_f)	d_s
	mm
2	4,5
3	2
3	7
4	0,75
5	3
6	14,5

Dla każdej liczby faz, w tabeli 1 zamieszczono odległości d_s między segmentami stojana. Szerokość pojedynczego segmentu stojana wynosiła $w_{ss} = 18$ mm (rys. 1). W przypadku silnika trójfazowego wykonano obliczenia dla dwóch różnych odległości $d_s = 2$ mm i $d_s = 7$ mm między segmentami stojana. Obliczenia te miały na celu sprawdzenie, w jakim stopniu odległość między segmentami stojana wpływa na wartość siły cią-

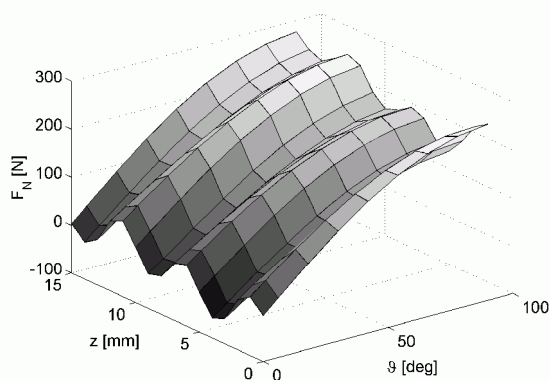
gu, a także na jej pulsacje w czasie pełnego cyklu.

Na rysunkach 2-7 zamieszczono charakterystyki siły ciągu w funkcji położenia biegnika i kąta obciążenia dla tubowego silnika synchronicznego. Kąt obciążenia, podobnie jak w silnikach synchronicznych obrotowych, rośnie wraz ze zwiększaniem obciążenia i dla obciążenia znamionowego przyjmuje wartość $\vartheta = 90^\circ$. Powyżej tej wartości silnik liniowy zatrzymuje się.

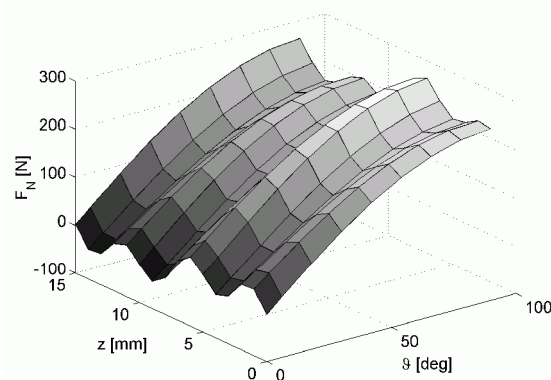
Ze względu na większy przepływ uzwojenia stojana, wzrost liczby faz skutkuje wzrostem wartości siły ciągu. Nie jest to jednak wzrost liniowy. Dla silników z liczbą faz większą niż 4 siła ta rośnie wolniej (rys. 8) niż w zakresie liczby faz od 2 do 4. Szczególnie dotyczy to wartości siły maksymalnej. Siła średnia F_{AV} i minimalna F_{min} w większym stopniu zależą od liczby faz (rys. 8, tabela 2).



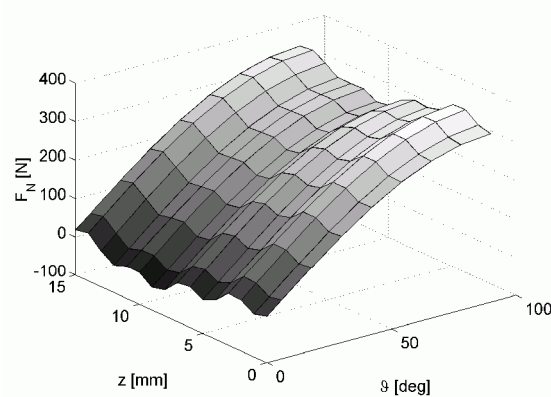
Rys. 2. Zależność siły ciągu od kąta obciążenia i położenia biegnika dla silnika dwufazowego ($d_s = 4,5$ mm)



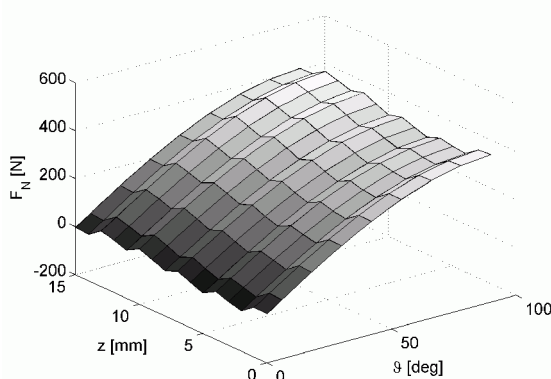
Rys. 3. Zależność siły ciągu w funkcji kąta obciążenia i położenia biegnika dla silnika trójfazowego ($d_s = 2$ mm)



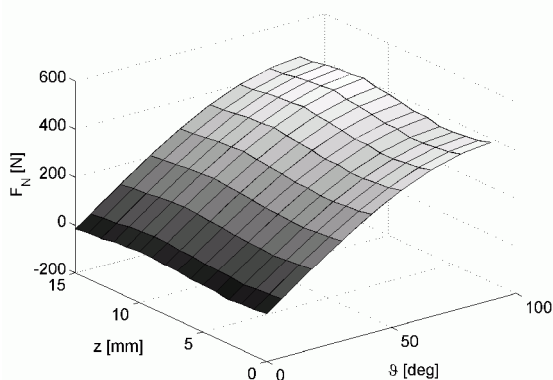
Rys. 4. Charakterystyka mechaniczna silnika liniowego trójfazowego synchronicznego ($d_s = 7$ mm)



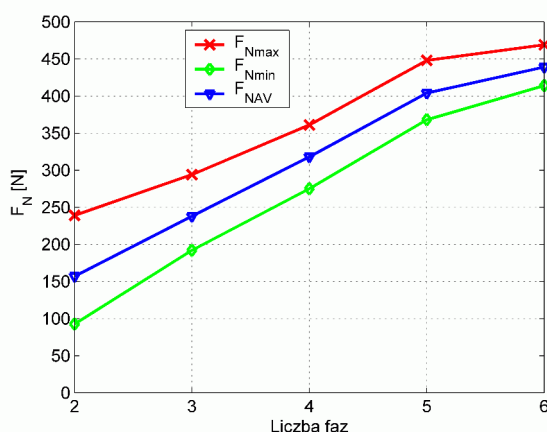
Rys. 5. Zależność siły ciągu w funkcji kąta obciążenia i położenia biegnika dla silnika czterofazowego ($d_s = 0,75$ mm)



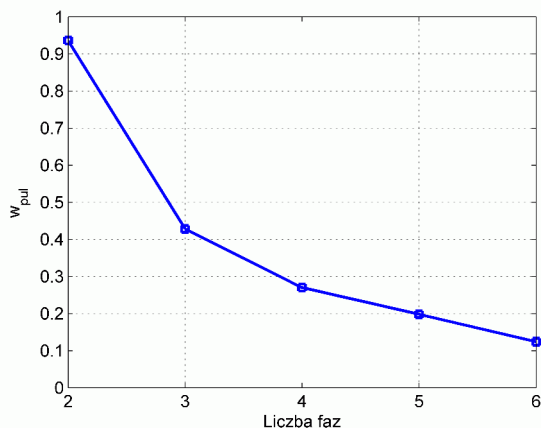
Rys. 6. Charakterystyka mechaniczna dla silnika pięcioletowego ($d_s = 3$ mm)



Rys. 7. Wyniki obliczeń siły w funkcji położenia biegnika i kąta obciążenia dla silnika sześciofazowego ($d_s = 14,5$ mm)



Rys. 8. Wpływ liczby faz na wartość siły ciągu



Rys. 9. Zależność współczynnika pulsacji siły od liczby faz silnika

Ze wzrostem liczby faz współczynnik pulsacji siły ciągu maleje, co jest wyraźnie widoczne z porównania rysunków 2 i 7. Jego wartość zmniejsza się od 0,936 (dla silnika dwufazowego) do 0,124 dla silnika sześciofazowego (rys. 9, tabela 2). Zmiana ta jest szczególnie widoczna dla wzrostu liczby faz od 2 do 4. Dla liczby

faz większej od 4 zmiany te są nieco mniejsze. Można domniemywać, że dla liczby faz większej od 6 jest to bardzo mała zmiana.

Tabela 2. Wartości sił dla różnej liczby faz (kąt $\vartheta = 90^\circ$, $I_m = 8$ A)

n_f	F_{Nmax}	F_{Nmin}	F_{NAV}	w_{pul}
2	239	92,5	157	0,936
3 ($d_s=2$ mm)	294	192	238	0,428
3 ($d_s=7$ mm)	271	169	226	0,454
4	361	275	318	0,270
5	448	368	404	0,198
6	469	414	439	0,124

Stosowanie różnych możliwych odległości między segmentami, nieznacznie wpływa na charakterystykę statyczną siły silnika. Kształt charakterystyki mechanicznej w przypadku silnika 3-fazowego dla $d_s = 2$ mm oraz $d_s = 7$ mm jest praktycznie identyczny (rys. 3 i 4). Różnice między wartościami sił nie przekraczają 11% na korzyść silnika o mniejszej odległości między segmentami stojana (tabela 2). Również współczynnik pulsacji siły nieznacznie zależy od tej odległości. Wyniki otrzymane dla większych wartości d_s powinny być praktycznie identyczne, jak dla przypadku $d_s = 7$ mm. W związku z powyższym stosowanie odległości między segmentami większych niż minimalna wydaje się niecelowe, gdyż zwiększa całkowitą długość silnika, nie poprawiając jego parametrów ruchowych.

4. Uwagi i wnioski

W pracy przedstawiono wpływ liczby faz silnika liniowego tubowego z magnesami trwałymi (z ang. permanent magnet tubular linear motor – PMTLM) na wielkość pulsacji siły. Zgodnie z oczekiwaniami zwiększenie liczby faz prowadzi do zmniejszenia współczynnika pulsacji, co jest niewątpliwie korzystne dla napędu, w którym pracuje silnik.

Dobór odpowiedniej liczby faz zależy od wymagań stawianych silnikowi. Jeżeli ma być on prosty w konstrukcji i nie musi być precyzyjny, to wskazane jest wykorzystanie silników o liczbie faz równej 2 lub 3. Wzrost wymagań, co do precyzji pozycjonowania, wymaga zastosowania większej liczby faz. Należy jednakże zaznaczyć, że stosowanie silników o liczbie faz większej od 6 jest dosyć kosztowne i kłopotliwe ze względu na budowę układu zasilającego.

Spośród zaprezentowanych silników, najbardziej korzystnymi parametrami charakteryzują się silniki 5- i 6-fazowe. Należy jednakże zauważyć, że w przypadku 6-fazowych silników w sposób znaczący ulega zwiększeniu długość silnika. Jest to związane ze znaczną odległością między segmentami stojana (14,5 mm w porównaniu z 3 mm dla silnika 5-fazowego). W związku z tym, bardziej korzystne w tym przypadku wydaje się zastosowanie silnika 5-fazowego.

7. Literatura

- [1] Dahono P. A.: *Analysis and minimization of output current ripple of five-phase PWM inverters*, ICEM, Ghania, Crete Island, Greece, September 2-5, 2006, paper no. 670
- [2] Demenko A., Mendrela E., Szeląg W.: *FE analysis of saturation effects in tubular linear permanent magnet machine*, EPNC, XVIII Symposium, June 28-30, Poznan, 2004, paper 82.1_Paper
- [3] Gordon S., Hillery M.T.: *Development of a high-speed CNC cutting machine using linear motors*, Journal of Materials Processing Technology, No. 166, 2005, pp. 321-329
- [4] Khan K.S., Arshad W.M., Kanerva S.: *On performance figures of multiphase machines*, XVIII International Conference on Electrical Machines (ICEM), Vilamoura, Portugal, September 6-9, 2008, paper ID 831
- [5] Remy G., Gomand J., Tounzi A., Barre P.-J.: *Impact of currents on the detent force of a PMSLM*, XX Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits (EPNC), July 2-4, Lille, France, 2008, pp. 65-66
- [6] Rogalski A., Bieńkowski K.: *Układ zasilania wielofazowego silnika indukcyjnego*, SME, Jarnołtówek, Poland, June 14-17, 2005, pp. 668-670
- [7] Singh G. K.: *Multi-phase induction machine drive research – a survey*, Electric Power Systems Research, Vol. 61, 2002, pp. 139-147
- [8] Tomczuk B., Schröder G., Waindok A.: *Finite element analysis of the magnetic field and electro-mechanical parameters calculation for a slotted permanent magnet tubular linear motor*, IEEE Trans. on Magnetics, New York, USA, Vol. 43, No. 7, July 2007, pp. 3229-3236
- [9] Tomczuk B., Waindok A.: *Integral parameters of the magnetic field in the permanent magnet linear motor*, Monograph entitled *Intelligent Computer Techniques in Applied Electromagnetics* (in series *Studies in Computational Intelligence*), Springer Verlag, Heidelberg, Germany, Vol. 119, 2008, pp. 277-281
- [10] Tomczuk B., Waindok A.: *Obliczenia parametrów statycznych silnika liniowego tubowego z magnesami trwałymi (PMTLM)*, XLI Sympozjum

Maszyn Elektrycznych, Jarnołtówek, 14-17 czerwiec 2005, ss. 316-320

[11] Tomczuk B., Waindok A.: *Tubular linear actuator as a part of mechatronic system*, Solid State Phenomena, Trans Tech Publications, Switzerland, Vols. 147-149, 2009, pp. 173-178

[12] Tomczuk B., Zimon J., Waindok A.: *Obliczanie sił elektromagnetycznych w aktuatorach o ruchu liniowym z wykorzystaniem Metody Elementów Skończonych (MES)*, Pomiary Automatyka Kontrola (PAK), 10/2006, ss. 57-58

[13] Waindok A.: *Symulacja komputerowa i weryfikacja pomiarowa charakterystyk silnika liniowego tubowego z magnesami trwałymi*, praca doktorska pod kierunkiem prof. B. Tomczuka, Politechnika Opolska, Opole, czerwiec 2008

[14] Zhu Z.Q., Hor P.J., Howe D., Rees-Jones J.: *Calculation of cogging force in a novel slotted linear tubular brushless permanent magnet motor*, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-33, No. 5, 1997, pp. 4098-4100

Praca współfinansowana przez Unię Europejską w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego oraz przez NCBiR (Narodowe Centrum Badań i Rozwoju) w ramach grantu Nr N R01 0026 04.

Autorzy

Prof. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk,
e-mail: b.tomczuk@po.opole.pl.

W roku 2007 uzyskał tytuł profesora. Od roku 1996 jest zatrudniony na stanowisku profesora w Politechnice Opolskiej, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki. Prace w dziedzinie komputerowego modelowania i weryfikacji pomiarowej pola elektromagnetycznego w celu optymalizacji układów transformatorowych publikuje od 1977 roku. Od roku 2001 zajmuje się obliczeniami i weryfikacją pomiarową wyników w odniesieniu do układów elektromagnetycznych o ruchu liniowym. Należy tu wymienić aktulatory i łożyska magnetyczne. Doktorat i habilitacja na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki Politechniki Łódzkiej. Biografia zamieszczona w „Who’s Who in the World”. Ponad 140 publikacji w renomowanych czasopismach zagranicznych i krajowych jak: IEEE Trans. On Magnetics (USA), Compel (Londyn), Electrical Engineering (Berlin), Archiwum Elektrotechniki, Przegląd Elektrotechniczny, Energetyka. Członek SEP, PTETiS, Compomag Society (Londyn).

Dr inż. Andrzej Waindok,
e-mail: a.waindok@po.opole.pl

Stopień dr inż. uzyskał na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej w 2008 roku. Jego zainteresowania obejmują modelowanie pól elektromagnetycznych w zastosowaniu do projektowania wspomaganego komputerem. Obecnie zajmuje się analizą pola magnetycznego aktuatorów liniowych i transformatorów. Około 30

publikacji, w tym w renomowanych czasopismach zagranicznych i krajowych. Członek SEP, PTETiS i Polskiej Sekcji IEEE Magnetics Society (Institute of Electrical and Electronic Engineers, New York).

Politechnika Opolska,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki,
Katedra Elektrotechniki Przemysłowej
ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole