



Analiza wpływu zmian obwodu magnetycznego stojana na statyczne własności modelu elektromagnetycznego silnika liniowego

KRZYSZTOF JUST¹, PAWEŁ PISKUR²

¹ 1. Baza Lotnictwa Transportowego, ul. Żwirki i Wigury 1c,
00-909 Warszawa, justk5@op.pl

² Akademia Marynarki Wojennej, Wydział Mechaniczno-Elektryczny,
Instytut Elektrotechniki i Automatyki Okrętowej, Zakład Automatyki Okrętowej,
ul. inż. J. Śmidowicza 69, 81-127 Gdynia, p.piskur@amw.gdynia.pl

Streszczenie. W pracy dokonano analizy wpływu zmian wymiarów geometrycznych obwodu magnetycznego stojana na charakterystyki statyczne liniowego silnika krokowego z magnesami trwałymi. Stator silnika liniowego zbudowany jest z szeregu cylindrycznych cewek obudowanych ferromagnetykiem. Biegnik silnika zbudowany jest z pierścieniowych magnesów trwałych i ferromagnetycznych przekładek. Analizie poddano siły elektromagnetycznego oddziaływania pomiędzy statorem i biegnikiem dla sekwencyjnego zasilania cewek. Dla stałej podziałki biegnika wyznaczone zostały zależności siły elektromagnetycznej w funkcji geometrii cewek i ferromagnetycznej obudowy. Wyznaczono wartość maksymalną, minimalną i średnią siły elektromagnetycznej w funkcji zmiennej niezależnej geometrycznej. Jako kryteria oceny przyjęto również stosunek wartości średniej siły do maksymalnej oraz pracę mechaniczną liczoną jako całkę z siły na drodze ruchu biegnika. Dokonano porównania wartości sił maksymalnych, średnich oraz względnych w funkcji wymiarów geometrycznych stojana. **Słowa kluczowe:** modelowanie i symulacja, silnik liniowy, metoda elementów skończonych, obliczenia polowe, siła zaczepowa, siła ciągu
DOI: 10.5604/01.3001.0012.6593

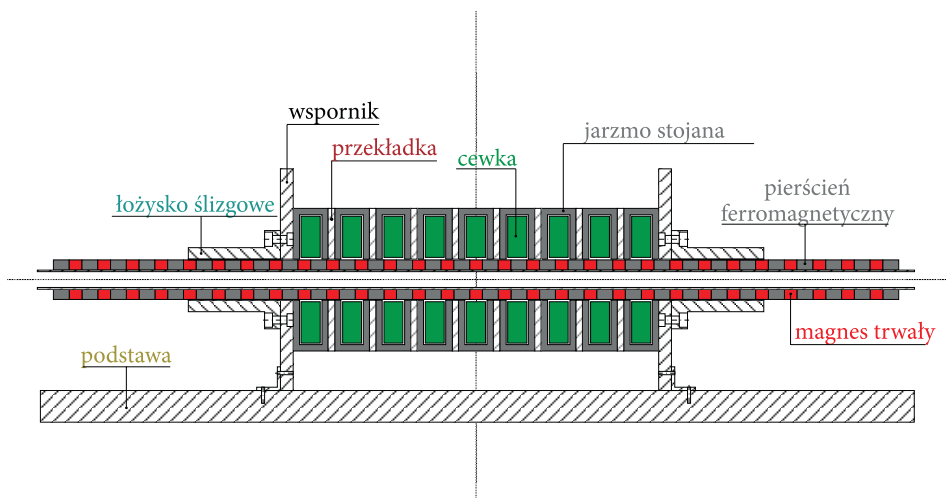
1. Wprowadzenie

Wśród wielu typów silników liniowych dużą grupę stanowią silniki o budowie cylindrycznej, które zyskują coraz większą popularność ze względu na posiadane

zalety: prostą budowę, łatwość sterowania, duże przyspieszenia, niskie koszty budowy oraz korzystny stosunek siły ciągu do masy elementów ruchomych. W projektowaniu napędów dąży się do otrzymania jak najlepszych parametrów pracy (duża siła ciągu, duża prędkość, mała masa) przy zachowaniu jak najprostszej struktury i minimalnym wykorzystaniu materiałów do ich budowy. Do tego celu najczęściej wykorzystuje się algorytmy optymalizacji. Do przeprowadzenia procesu optymalizacji potrzebny jest dokładny model symulacyjny obiektu optymalizacji. Elektromagnetyczny silnik liniowy jest obiektem nieliniowym, dlatego często stosuje się w analizie tego typu napędów metodę przeglądu w określonym zakresie zmiennych decyzyjnych. Dlatego w pracy przeprowadzono obliczenia wielowariantowe, w których zbadano wpływ zmian najważniejszych elementów układu magnetycznego oraz ich wymiarów geometrycznych na wybrane charakterystyki silnika pod kątem ich poprawy, a mianowicie zwiększenia siły ciągu (podczas zasilania uzwojeń) z jednoczesnym zmniejszeniem współczynnika zaczepowego (od magnesów trwałych). Stosunek siły ciągu do siły zaczepowej jest jednym z najważniejszych parametrów, dlatego też w artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące wpływu podstawowych wymiarów elementów stojana silnika na wartość obu składowych siły elektromagnetycznej.

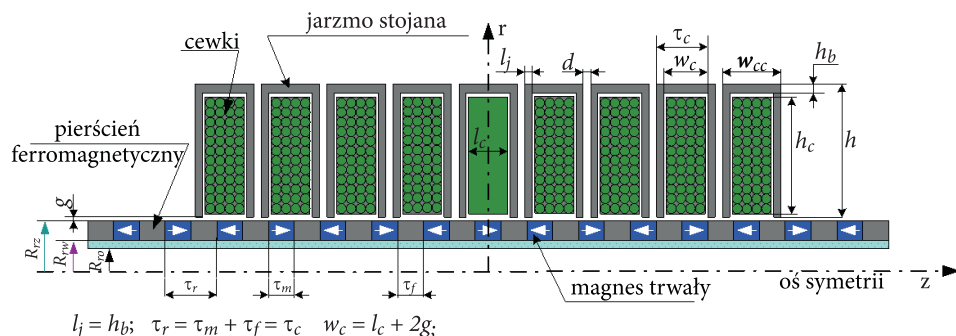
2. Opis modelu silnika liniowego z magnesami trwałymi

Zakresem badań objęto elektromagnetyczny silnik liniowy, którego przekrój osiowy przedstawiono na rysunku 1. Ruchomy biegnik (magnesy trwałe połączone z pierścieniami ferromagnetycznymi) porusza się ruchem liniowym wzdłuż osi symetrii cewek. W celu zachowania symetrii mechanicznej, magnetycznej oraz centrowania biegnika w osi symetrii stojana, jego elementy zamocowano w łożyskach liniowych.



Rys. 1. Schemat ideowy konstrukcji rozważanego silnika liniowego

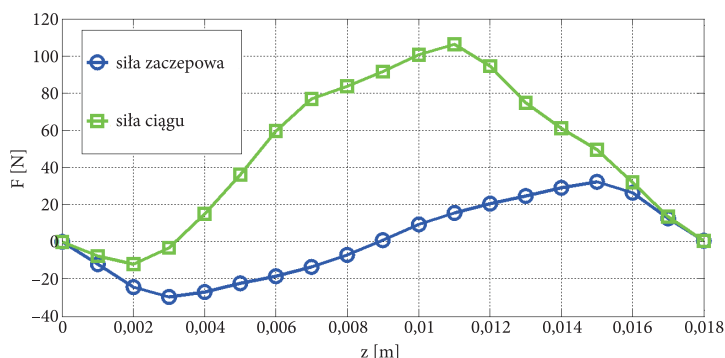
Do obliczeń i badań symulacyjnych zbudowano dwuwymiarowy, osiowo-symetryczny model silnika (rys. 2) z wykorzystaniem środowiska opartego na metodzie elementów skończonych. W zbudowanym modelu zamodelowano nieliniowości pola magnetycznego. Pominięto natomiast wpływ prądów wirowych oraz strat ciepłych w magnetowodzie. Przyjęto założenie, że pomiędzy segmentami silnika nie ma sprzężeń magnetycznych (zastosowanie przekładek diamagnetycznych) i że cały strumień zamyka się w jarzmach stojana. Przyjęto pracę krokową silnika, w której w każdej chwili zasilano tylko jedną cewkę (cewkę środkową) prądem o wartości $i_{max} = 6$ A. Wymiary geometryczne oraz siły modelu przyjętego do obliczeń przedstawiono w tabeli 1 oraz na rysunku 3.



Rys. 2. Połowa przekroju osiowego silnika z oznaczeniami wymiarowymi

TABELA 1
Wymiary geometryczne i parametry całkowite modelu przyjętego do obliczeń

model wyjściowy	l_c [mm]	h_c [mm]	$\tau_f = \tau_m$ [mm]	$R_{rz} - R_{rw}$ [mm]	g [mm]	$l_j = h_b$ [mm]
		12,0	20,0	9,0	6,0	1,0
	F_{zmax} [N]	F_{zavg} [N]	F_{zmin} [N]	F_{emax} [N]	F_{emin} [N]	F_{eavg} [N]
	32,30	1,01	-29,58	106,21	-12,01	45,98



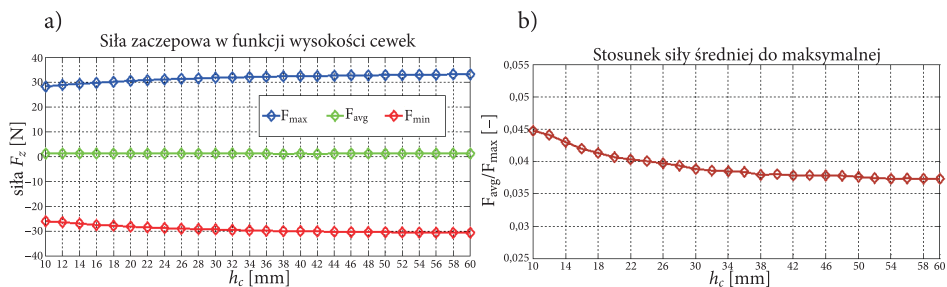
Rys. 3. Siła magnetyczna w funkcji położenia dla modelu obliczeniowego silnika

3. Obliczenia wpływu wymiarów stojana na charakterystyki statyczne silnika

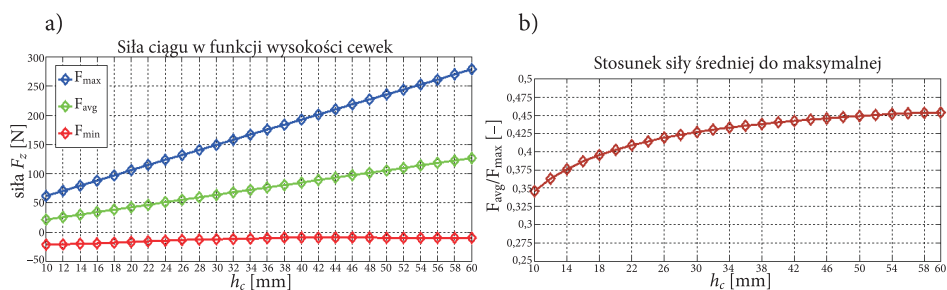
3.1. Wpływ wymiarów uzwojeń stojana na charakterystyki statyczne

Zbadano wpływ wysokości h_c oraz szerokości l_c przekroju cewek uzwojenia stojana (rys. 3) na wartość maksymalną oraz średnią siły zaczepowej i siły ciągu. Wysokość cewek zmieniano w przedziale 10÷60 mm, z krokiem co 2 mm. Zmianom wysokości towarzyszyły zmiany wymiarów jarzm stojana. Do obliczeń założono stałą gęstość prądu w zasilanym uzwojeniu stojana ($J = 6,5 \text{ A/mm}^2$).

Zmiana wysokości cewek nie wpływa praktycznie na wartość siły zaczepowej (F_z), jej wartość średnia, jak i maksymalna zmienia się o kilka procent przy sześciokrotnej zmianie wysokości (rys. 4a, 6a). Stosunek wartości średniej siły zaczepowej do maksymalnej zależy od wysokości cewek w niewielkim stopniu (rys. 4b). Siła zaczepowa zmienia się tylko w wyniku zmian wymiarów magnesów lub jarzm stojana, natomiast nie ulega zmianie pod wpływem zmiany wysokości cewek.

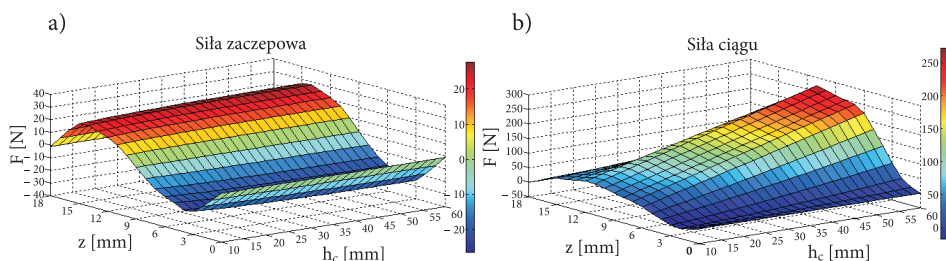


Rys. 4. Wykres maksymalnej, minimalnej i średniej wartości siły zaczepowej w funkcji wysokości cewek (a); stosunek średniej siły zaczepowej do maksymalnej (b)



Rys. 5. Wykres maksymalnej, minimalnej i średniej wartości siły ciągu w funkcji wysokości cewek (a); stosunek siły średniej do maksymalnej (b)

Na rysunkach 5a-6b przedstawiono wykresy siły ciągu (F_e) w funkcji wysokości cewek dla różnych położenia biegnika. Zarówno wartość średnia, jak i maksymalna zmieniają się wraz ze zmianą wysokości cewek (rys. 5a). Przy sześciokrotnym wzroście parametru h siła maksymalna i średnia wzrasta czterokrotnie, natomiast stosunek obu sił nieznacznie zależy od wysokości cewek (rys. 5b).



Rys. 6. Zależność siły w funkcji położenia i wysokości cewek: zaczepowej (a); ciągu (b)

W projektowaniu silników z magnesami trwałymi dąży się do maksymalizacji siły ciągu (F_e) przy jak najmniejszej wartości współczynnika zaczepowego (F_z). Do oszacowania tego warunku w obliczeniach wprowadzono wskaźnik określający miarę zawartości siły zaczepowej w sile użytecznej:

$$k = \frac{F_{z\max}}{F_{e\max}} \cdot 100\% \tag{1}$$

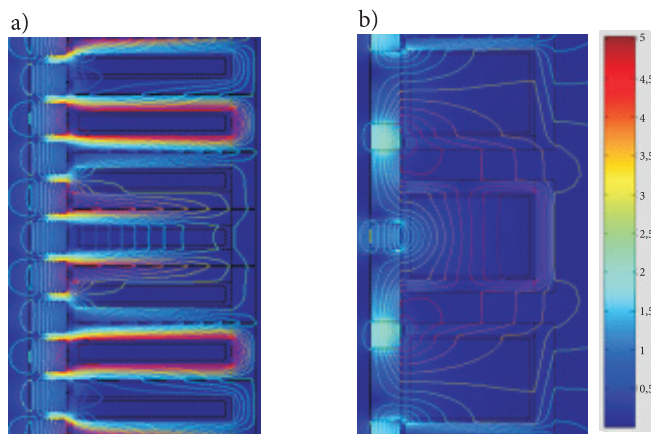
W tabeli 2 porównano wyniki obliczeń sił działających na biegnik. Symbolem A1 oznaczono model o najlepszych parametrach.

TABELA 2
Zestawienie wyników obliczeń siły dla przeprowadzonej modyfikacji magnetowodu (zmiana wysokości stojana)

	h_c [mm]	$F_{z\max}$ [N]	$F_{z\text{avg}}$ [N]	$F_{z\min}$ [N]	$F_{e\max}$ [N]	$F_{e\min}$ [N]	$F_{e\text{avg}}$ [N]	k [%]
model bazowy	20	32,31	1,01	-29,58	106,21	-12,01	45,98	30,42
model A1	30	31,94	1,23	-29,29	149,70	-12,32	63,92	21,34
zmiana [%]	+50	-1,11	+22,78	-0,50	+40,95	+2,64	+39,00	-29,84

Z punktu widzenia kryterium maksymalizacji siły, wysokość cewek powinna być jak największa, jednak zwiększenie wymiarów stojana niesie ze sobą ograniczenia objętości oraz masy. Mając powyższe na uwadze, do dalszych obliczeń przyjęto wysokości cewek $h_c = 30$ mm.

Przy założeniu stałej wartości szczeliny powietrznej (1 mm) oraz stałej wysokości (30 mm) cewek wykonano obliczenia siły w funkcji szerokości cewek, które zmieniano w przedziale od 4 do 24 mm z krokiem co 1 mm. Zmiany szerokości uzwojeń pociągały za sobą równoczesne zmiany szerokości elementów biegnika oraz odległości pomiędzy segmentami stojana. Na rysunku 7 przedstawiono rozkłady pola magnetycznego dla dwóch skrajnych szerokości.

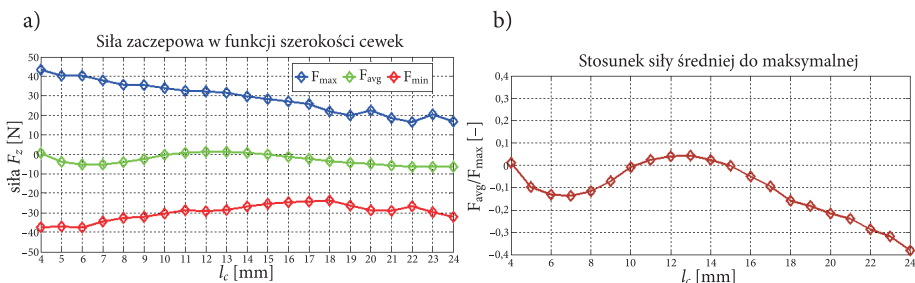


Rys. 7. Rozkład pola magnetycznego dla cewek: o szerokości 4 mm (a), o szerokości 24 mm (b)

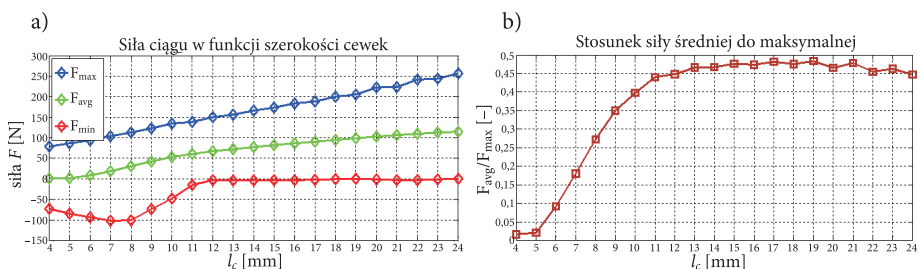
Zmiana szerokości uzwojeń wpływa na siłę zaczepową w złożony sposób (rys. 8a), związane jest to z jednoczesnymi zmianami szerokości elementów magnetowodu. Wzrost szerokości cewek powoduje stopniowy spadek wartości maksymalnej siły zaczepowej. Największa siła zaczepowa (43 N) występuje przy najmniejszej szerokości cewek, związane jest to z oddziaływaniem elementów biegnika i segmentów stojana. Analiza średniej siły zaczepowej pozwala zauważyć, że jej wartości bliskie zeru występują dla cewek o szerokości od 10 do 16 mm. Stosunek obu sił (rys. 8b) ekstremum osiąga dla szerokości z przedziału 10÷15 mm.

Siła ciągu rośnie wraz ze zwiększaniem szerokości cewek. Jest to związane z większym wzbudzeniem dla całego uzwojenia, przy zachowaniu stałej gęstości prądu. Średnia wartość siły ciągu wzrasta wraz ze zmianą szerokości od 1 do 100 N (rys. 9a), większym zmianom podlega z kolei wartość maksymalna, która przy zmianie szerokości wzrasta trzykrotnie. Charakter zmian znajduje odzwierciedlenie w stosunku obu sił (rys. 9b), który podlega zmianom dla szerokości w przedziale 4÷12 mm, powyżej szerokości 12 mm stosunek obu sił pozostaje praktycznie stały.

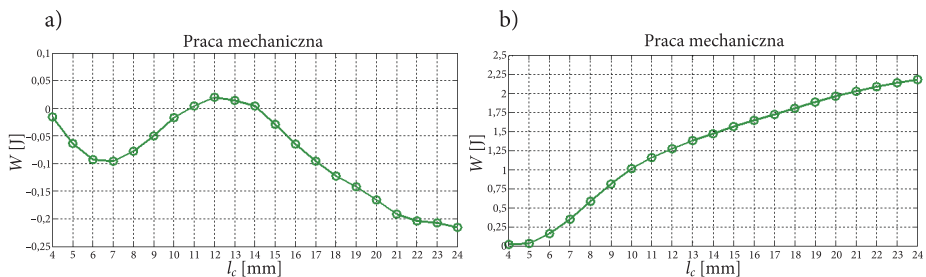
Rozpatrując kryterium energii mechanicznej (rys. 10) wytworzonej przy przemieszczeniu biegnika z położenia o maksymalnej reluktancji do położenia, przy którym reluktancja jest najmniejsza, obliczanej jako całka z zależności siły elektromagnetycznej od położenia biegnika, można zaobserwować ekstremum w zakresie szerokości 11-14 mm, do dalszych obliczeń przyjęto wymiar 12 mm.



Rys. 8. Wykres maksymalnej, średniej i minimalnej wartości siły zaczepowej w funkcji szerokości cewek (a); stosunek średniej siły zaczepowej do maksymalnej (b)



Rys. 9. Wykres maksymalnej, średniej i minimalnej wartości siły ciągu w funkcji szerokości cewek (a); stosunek średniej siły ciągu do maksymalnej (b)



Rys. 10. Wykres zależności energii mechanicznej w funkcji szerokości cewek: przy braku zasilania (a); przy zasilaniu prądem maksymalnym (b)

W tabeli 3 porównano wyniki obliczeń sił działających na biegnik dla zmiany szerokości uzwojeń. Symbolem A2 oznaczono model o najlepszych parametrach.

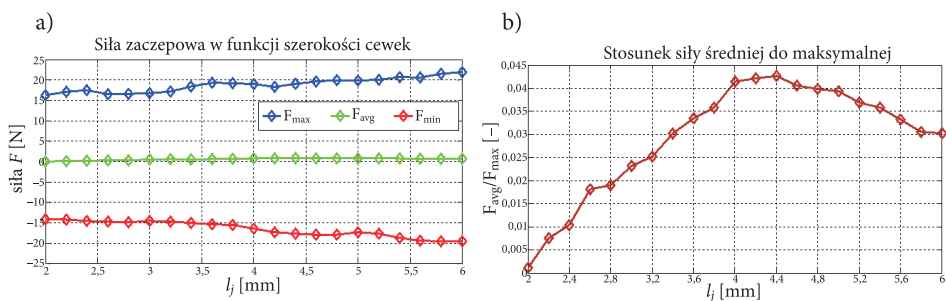
TABELA 3

Zestawienie wyników obliczeń siły dla przeprowadzonej modyfikacji magnetowodu (zmiana szerokości stojana)

	l_c [mm]	F_{zmax} [N]	F_{zavg} [N]	F_{zmin} [N]	F_{max} [N]	F_{min} [N]	F_{avg} [N]	k [%]
model bazowy	12	32,30	1,01	-29,58	106,21	-12,01	45,98	30,42
model A2	12	32,21	1,31	-29,25	150,05	-3,22	67,20	21,47
Zmiana [%]	0	-0,30	+30	-1,20	+41,27	-73,20	+46,14	-29,42

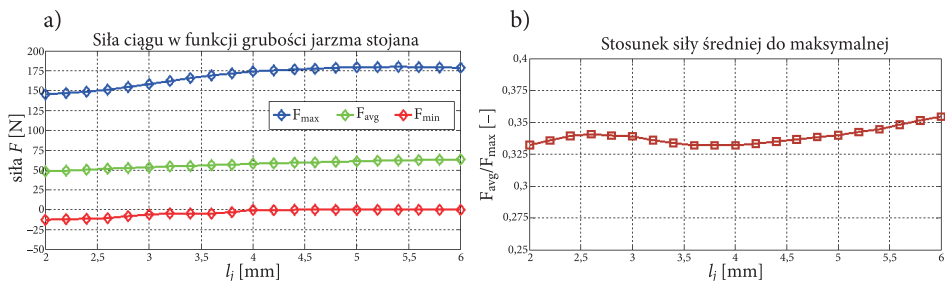
3.2. Obliczenia wpływu grubości jarzm stojana na charakterystyki statyczne

Zbadano wpływ szerokości jarzm (l_j) stojana na wartość maksymalną oraz średnią siły zaczepowej oraz siły ciągu. Grubość jarzm zmieniano w zakresie $2 \div 6$ mm z krokiem co 0,2 mm. Zmianom wymiaru jarzm towarzyszyły równoczesne zmiany odległości między cewkami (d), pozostałe wymiary obwodu magnetycznego pozostawiono bez zmian. Zwiększanie grubości jarzm stojana wpływa na siłę zaczepową (rys. 11a, 13a). Najmniejsze wartości siły występują dla grubości jarzm $2 \div 3$ mm, natomiast największe dla jarzm powyżej 5 mm. Stosunek siły średniej do maksymalnej (rys. 11b) posiada ekstremum dla wymiaru $4,0 \div 4,8$ mm, powyżej tej szerokości wyraźnie się zmniejsza. Związane to jest z dużym wzrostem maksymalnej siły zaczepowej w odniesieniu do wartości średniej.

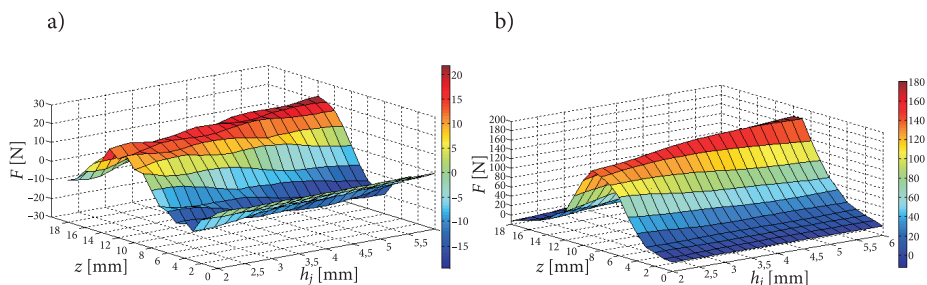


Rys. 11. Wykres siły zaczepowej w funkcji grubości jarzma (a); stosunek średniej siły zaczepowej do maksymalnej (b)

Duże zmiany zarówno wartości maksymalnej, jak i średniej siły ciągu (rys. 12a, 13b) zachodzą dla zmian grubości jarzma w zakresie $2 \div 4$ mm, powyżej tej grubości siła elektromagnetyczna praktycznie nie podlega zmianom. Stosunek obu sił (rys. 12b) najmniejsze wartości osiąga dla grubości jarzma wynoszącej 4 mm.

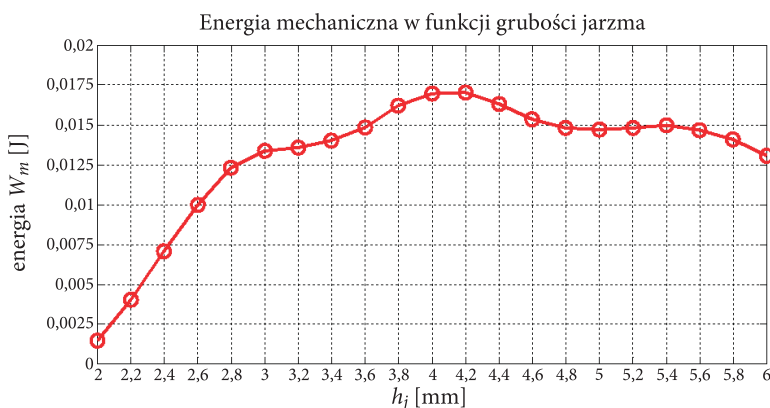


Rys. 12. Wykres siły ciągu w funkcji grubości jarzma (a); stosunek średniej siły ciągu do maksymalnej (b)



Rys. 13. Wykresy siły zaczepowej (a) i ciągu (b) w funkcji położenia dla różnych grubości jarzm

Przyjmując jako kryterium energię mechaniczną, zaobserwowano optymalną wartość grubości jarzm stojana w zakresie 3,8÷4,4 mm (rys. 14). Analiza obliczeniowa wykazała, że grubość obudowy ferromagnetycznej stojana znacząco wpływa na charakterystyki statyczne silnika. Najlepsze właściwości statyczne silnik osiąga dla grubości jarzm stojana mieszczących się w zakresie 3,8÷4,2 mm, do obliczeń przyjęto parametr $h_j = 4,2$ mm.



Rys. 14. Wykres energii mechanicznej w funkcji grubości jarzma

W tabeli 4 zestawiono wyniki obliczeń sił działających na biegnik dla zmiany grubości jarzm stojana. Symbolem A3 oznaczono model o najlepszych parametrach.

TABELA 4

Zestawienie wyników obliczeń siły dla przeprowadzonej modyfikacji

	szer. [mm]	F_{zmax} [N]	F_{zavg} [N]	F_{zmin} [N]	F_{max} [N]	F_{min} [N]	F_{avg} [N]	k [%]
model bazowy	4	32,31	1,01	-29,58	106,21	-12,01	45,98	30,42
model A3	4,2	18,35	0,75	-17,31	175,59	-0,39	58,55	10,46
zmiana [%]	+5,0	-43,20	-25,85	+41,47	+65,33	+96,74	+27,32	-65,61

4. Podsumowanie

Przeprowadzona wielowariantowa analiza wpływu wymiarów geometrycznych stojana na charakterystyki statyczne pozwoliła na zbadanie, które wymiary mają największy wpływ na składowe siły elektromagnetycznej. Zmiana szerokości cewek z jednoczesną zmianą szerokości elementów ferromagnetycznych wpływa w dużym stopniu na siłę zaczepową pochodzącą od magnesów trwałych biegnika, czego nie obserwowano w przypadku zmian wysokości uzwojeń poszczególnych segmentów stojana. Wysokość cewek nie wpływa na wartość siły zaczepowej silnika, wpływa natomiast bardzo na siłę ciągu, co wynika ze wzrostu przepływu wraz z powiększaniem wymiarów cewek. Wartości sił średnich odniesione do maksymalnych dla obu sił w nieznacznym stopniu (na poziomie kilku procent) zależą od zmienianych parametrów. Zwiększanie wysokości i szerokości cewek powoduje duży przyrost siły ciągu oraz zmniejszanie współczynnika k (tabela 3, 4), co pozytywnie wpływa na właściwości silnika. Zastosowanie dużych cewek zwiększa jednak gabaryty i masę silnika, co jest niekorzystne z punktu widzenia możliwych zastosowań. Zmiana grubości jarzm stojana wpływa na nieznaczny wzrost zarówno siły zaczepowej, jak i siły ciągu. Stosunek średniej siły zaczepowej do maksymalnej posiada wyraźne ekstremum dla jarzm o grubości 4,4 mm.

Wykonana analiza pozwoliła zauważyć, że pewne elementy konstrukcyjne silnika powinny być zmieniane jedynie w określonych granicach w korelacji z pozostałymi podzespołami. Zarówno podziałka biegunowa, jak i wymiary segmentów stojana muszą być ze sobą ściśle powiązane w celu zapewnienia poprawnych warunków pracy. Zmiana któregośkolwiek parametru wpływa na wyznaczone charakterystyki oraz działanie napędu. Uzyskano model silnika (model A) odznaczający się lepszymi parametrami w porównaniu z prototypem wyjściowym. Posiada on większą siłę ciągu przy jednoczesnym zmniejszeniu współczynnika zaczepowego, co jest korzystne z punktu widzenia poprawnego działania napędu.

Źródło finansowania pracy – środki własne autorów.

Artykuł wpłynął do redakcji 20.02.2018 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 22.06.2018 r.

LITERATURA

- [1] BOGUSZ P., KORKOSZ M., PROKOP J., *Analiza wpływu szerokości biegunów stojana i zębów wirnika na parametry eksploatacyjne silników reluktancyjnych przełączalnych na bazie obliczeń polowych*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, nr 75, 2006.
- [2] COMSOL Multiphysics: *AC/DC Module User's Guide*.
- [3] GIERAS J.F., *Linear induction drives*, Clarendon Press, Oxford, 1994.
- [4] JUST K., TARNOWSKI W., *Model polowy zjawisk elektromechanicznych napędu liniowego z magnesami trwałymi*, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, 66, 3, 2017, 125-131.

- [5] JUST K., PISKUR P., BIELAWSKI R., *Experimental verification of the one-phase linear actuator with permanent magnets for robotic system applications*, Measurement Automation Monitoring, 2018 (w trakcie publikacji).
- [6] JUST K., *Metodyka projektowania konstrukcji i sterowania mechatronicznego urządzenia wykonawczego ruchu liniowego*, rozprawa doktorska, Wydział Technologii i Edukacji Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2018.
- [7] MŁOT A., *Konstrukcyjne metody ograniczania pulsacji momentu elektromagnetycznego w bezszczotkowym silniku prądu stałego z magnesami trwałymi*, autoreferat rozprawy doktorskiej, Politechnika Opolska, Opole, 2007.
- [8] NADOLSKI R., GAWEŃCKI Z., *Analiza możliwości zmniejszenia momentu zaczepowego w silniku bezszczotkowym prądu stałego*, Maszyny Elektryczne — Zeszyty Problemowe, 108, 4, 2015.
- [9] TOMCZUK B., WAINDOK A., *Wpływ wymiarów uzwojenia stojana na siłę ciągu silnika tubowego z magnesami trwałymi*, Prace Instytutu Elektrotechniki, Warszawa, z. 231, 2007.
- [10] TOMCZUK B., WAINDOK A., *Wizualizacja wyników obliczeń polowych przyjaznych środowisku silowników elektromagnetycznych*, Chemia, Dydaktyka, Ekologia, Metrologia, 10, nr 1-2, 2015.
- [11] WAINDOK A., *Symulacja komputerowa i weryfikacja pomiarowa charakterystyk silnika liniowego tubowego z magnesami trwałymi*, autoreferat rozprawy doktorskiej, Wydział Elektrotechniki, Automatyki i Informatyki Politechniki Opolskiej, Opole, 2008.
- [12] WRÓBEL K., *Wpływ zmian konstrukcyjnych obwodu magnetycznego na parametry elektromechaniczne przelączalnego silnika reluktancyjnego (SRM)*, autoreferat rozprawy doktorskiej, Politechnika Opolska, Opole, 2006.

K. JUST, P. PISKUR

Analysis of the impact of changes in the stator magnetic circuit on static properties of the electromagnetic linear motor model

Abstract. In this paper, the static characteristics as a function of changes in geometric dimensions of the stator magnetic circuit of the linear stepper actuator with permanent magnets is presented. The stator is built from a series of cylindrical coils encapsulated with ferromagnetic case. The runner is made of permanent magnet rings connected with ferromagnetic spacers. The electromagnetic interaction between the stator and the runner for the sequential supply of coils was analyzed. The electro-magnetic force as a function of the geometry of the coils and the ferromagnetic housing for the constant graduation of the runner was determined. The maximum, minimum, and average values of the electromagnetic force as a function of the geometric independent variable were determined. The ratio of the mean force to the maximum, and mechanical work calculated as the integral of the force on the path of the runner was adopted as the evaluation criteria. A comparison between the maximum, average and relative values of forces as a function of the geometric dimensions of the stator was made.

Keywords: modelling and simulation, linear actuator, finite element method, field calculations, cogging force, magnetic force

DOI: 10.5604/01.3001.0012.6593

