

Aproksymacja funkcji siły elektrodynamicznej działającej w tłokowej pompie elektromagnetycznej

Streszczenie. Celem artykułu jest znalezienie opisu analitycznego siły elektrodynamicznej działającej na tłok liniowej pompy elektromagnetycznej nowego typu. Ten nowy typ pompy to pompa elektromagnetyczna zintegrowana z liniowym silnikiem synchronicznym z magnesem trwałym w biegniku, stanowiącym równocześnie tłok pompy. Rozważono aproksymację tej funkcji siły przy pomocy różnicy 2 funkcji Gauss'a i funkcji Kloss'a. Ostatecznie wykazano, że przebieg siły elektrodynamicznej najlepiej odwzorowuje zmodyfikowana funkcja Kloss'a.

Abstract. The aim of this paper is to find an analytical description of the electrodynamic force acting on the piston of a linear electromagnetic pump of a new type. This new type of pump is an electromagnetic pump integrated with a linear synchronous motor with a permanent magnet in the runner, which is also the pump piston. The approximation of this force function using a difference of 2 Gauss functions and a Kloss function was considered. Finally, it was shown that the electrodynamic force waveform is best represented by a modified Kloss function. (**Approximation of the function of electrodynamic force acting in a piston electromagnetic pump**)

Słowa kluczowe: liniowa pompa tłokowa, liniowy silnik synchroniczny, elektrodynamika, aproksymacja, metoda Hooke-Jeeves'a.

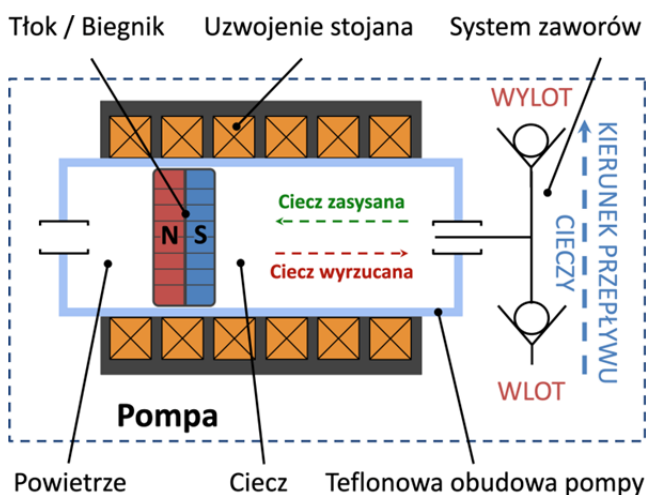
Keywords: linear piston pump, linear synchronous motor, electrodynamics, approximation, Hooke-Jeeves method.

Wstęp

Rzeczywiste technologie napędów elektrycznych powoduje, że pompy elektromagnetyczne (a więc pompy napędzane przez silniki elektryczne) stają się coraz popularniejsze w różnych zastosowaniach przemysłowych, w sprzeczności gospodarstwa domowego oraz w medycynie. Pompy te możemy podzielić na 3 główne grupy:

- pompy napędzane przez elektryczne silniki obrotowe,
- pompy z komorą odkształcaną przez elektryczne silniki różnych typów,
- pompy napędzane przez elektryczne silniki liniowe [1-5].

Obserwowany w ostatnich latach znaczący postęp w rozwoju pomp elektromagnetycznych skupia się na coraz szerszym wykorzystaniu silników z magnesami trwałymi oraz na zwiększaniu integracji elektrycznego układu napędowego z samą pompą [6,7]. Autorzy artykułu opracowali koncepcję pompy, którą można scharakteryzować terminem: elektromagnetyczna pompa zintegrowana z liniowym silnikiem synchronicznym z magnesami trwałymi w biegniku stanowiącym równocześnie tłok pompy. Schemat ideowy tej koncepcji prezentuje rysunek 1.



Rys.1. Pompa liniowa zintegrowana z liniowym silnikiem synchronicznym z magnesem trwałym — schemat ideowy.

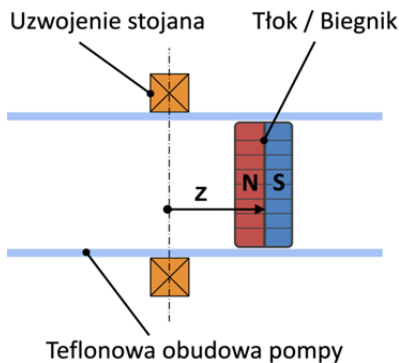
Odpowiednie aktywowanie kolejnych cewek uzwojenia stojana wymusza ruch posuwisto-zwrotny magnesu trwałego (stanowiącego równocześnie tłok pompy) w cylindrze, pełniącym równocześnie dwie funkcje: mechanicznej prowadnicy magnesu trwałego oraz komory hydraulicznej pompy, w której następuje przetwarzanie cieczy. Skuteczność i efektywność pompy w sposób zasadniczy zależy od algorytmu sterowania pompą [10,11]. Istotnym problemem naukowym jest więc wyznaczenie siły elektrodynamicznej działającej na tłok w funkcji współrzędnej przemieszczenia tłoka i wartości prądów wzbudzenia cewek. Można wzbudzać pojedynczą cewkę, ale możliwe jest też wzbudzanie 2 lub 3 kolejnych cewek. Analiza stanów niustalonych w projektowanym urządzeniu wymaga znajomości wartości siły elektrodynamicznej dla kolejnych dyskretnych położenia biegnika.

Celem autorów było wyznaczenie analitycznej zależności siły elektrodynamicznej w elektromagnetycznej pompie liniowej od współrzędnej przemieszczenia tłoka przy ustalonej maksymalnej wartości prądu wzbudzenia.

Wyznaczenia siły działającej na tłok w stanach dynamicznych można dokonać na bazie obliczeń połowych z wykorzystaniem profesjonalnych pakietów obliczeń pól elektromagnetycznych. Obliczenia te są jednak bardzo czasochłonne i trudne do wykorzystania w procesie sterowania w czasie rzeczywistym. Alternatywą są obliczenia w stanie statycznym dla zdyskretyzowanych wartości położenia tłoka i zdyskretyzowanych wartości prądów wzbudzenia cewek. Rezultaty takich obliczeń składają się na 2-wymiarowe tablice, pozwalające na analizowanie stanów dynamicznych przy założeniu, że stany dynamiczne są stanami quasi-stacjonarnymi. Z punktu widzenia algorytmu sterowania operowanie tablicami 2-wymiarowymi i dyskretnymi wartościami siły, prądu i przemieszczenia jest również złożone i niewygodne (ze względu na konieczność wyznaczania wartości pośrednich). Znacznym udogodnieniem w działaniu układu sterowania i znacznym ułatwieniem w opracowaniu algorytmu sterowania może być analityczny opis funkcji siły elektrodynamicznej w zależności od przesunięcia tłoka i wartości prądu w cewce uzwojenia stojana w postaci analitycznej funkcji 2 zmiennych. Na osiągnięciu tego celu skupiają się wysiłki autorów.

Badania symulacyjne rozkładu przestrzennego siły działającej pomiędzy magnese trwałym, a pojedynczą cewką uzwojenia stojana

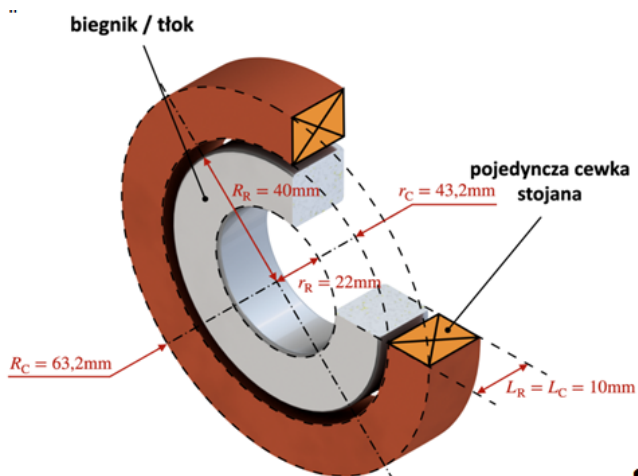
Badania rozkładu przestrzennego siły działającej pomiędzy magnese trwałym, będącym również tłokiem liniowej pompy elektromagnetycznej, a aktywowaną pojedynczą cewką uzwojenia stojana, postanowiono przeprowadzić w programie FEMM 4.2 dla układu cewka-tłok przedstawionego na rysunku 2. Położenie tłoka (magnesu trwałego) względem cewki określa współrzędna z .



Rys.2. Analizowany układ: aktywowana cewka — magnes trwały.



Rys.3. Układ: cewka — magnes trwały na stanowisku badawczym — widok z góry (pomiar siły realizowany za pomocą belki tensometrycznej i przekładni śrubowej).

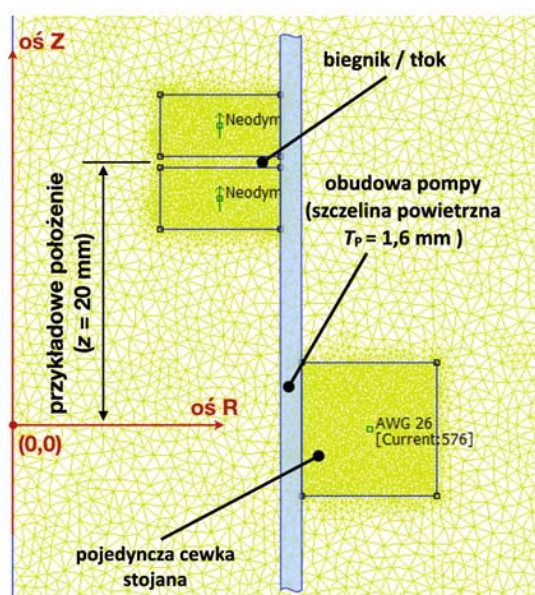


Rys.4. Wymiary geometryczne cewki i magnesu trwałego: r_R — promień wewnętrzny tłoka/biegnika; R_R — promień zewnętrzny tłoka/biegnika; r_C — promień wewnętrzny cewki; R_C — promień zewnętrzny cewki; L_R — długość tłoka/biegnika; L_C — długość cewki (położenie $z = 0$).

Dane katalogowe magnesu trwałego oraz dane nawojowe i wymiary geometryczne cewki przyjęto takie same, jak w wykonanym wstępnym prototypie przedstawionym na rysunku 3.

Dobry magnes trwały neodymowy to magnes typu N38 o gęstości energii magnetycznej $(BH)_{\max} = 286 - 302 \text{ kJ/m}^3$, zdolny do wytworzenia indukcji magnetycznej w geometrycznym środku powierzchni bieguna magnetycznego o wartości $0,446 \text{ T}$ [8,9]. Pojedyncza cewka uzwojenia stojana posiada liczbę zwojów $n = 576$ i nawinięta jest przewodem nawojowym izolowanym AWG 26 o średnicy równej $0,40386 \text{ mm}$. Wymiary geometryczne magnesu trwałego oraz cewki są przedstawione na rysunku 4. Grubość szczeliny pomiędzy cewką, a magnese trwałym wynosi $T_P = 1,6 \text{ mm}$ i odpowiada grubości ściany cylindra (komory hydraulicznej) pompy.

Przykładową siatkę dyskretyzacyjną dla obliczeń polowych w programie FEMM 4.2 dla układu cewka-tłok przy położeniu tłoka $z = 20 \text{ mm}$ przedstawia rysunek 5 (liczba węzłów siatki elementów skończonych wynosi 52773, a liczba elementów — 104738).



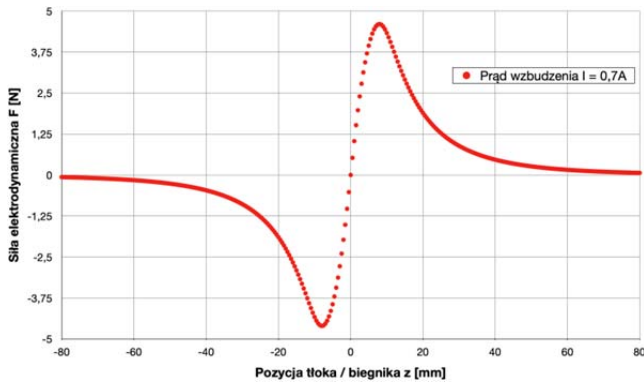
Rys.5. Przykładowo wybrana siatka dyskretyzacyjna wykonana w programie FEMM 4.2.

Przyjęto, że przesunięcie tłoka wzdłuż osi z będzie zdyskretyzowane z krokiem $\Delta z = 0,5 \text{ mm}$, a rozpatrywany zakres przesunięcia tłoka odpowiada przedziałowi $[z_{\min}, z_{\max}] = [-80, 80] \text{ mm}$. Przy tak przyjętym zakresie przesunięcia tłoka i tak przyjętym kroku dyskretyzacji liczba punktów, dla której wyznaczana jest wartość siły elektrodynamicznej wynosi 320.

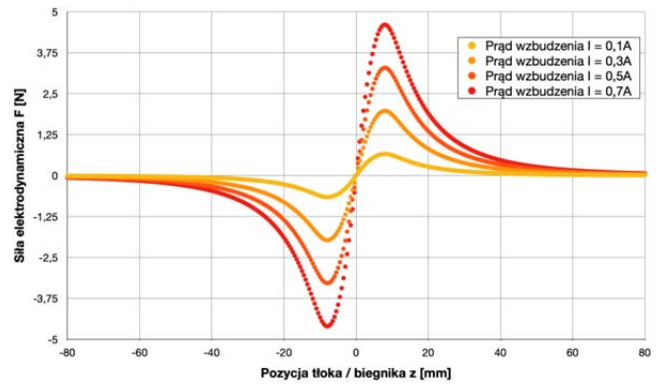
Maksymalna wartość prądu wzbudzenia cewki (przyjęta na podstawie średnicy przewodu nawojowego i warunków chłodzenia) wynosi $I_{\max} = 0,7 \text{ A}$.

Należy zwrócić uwagę na to, że na prezentowanym wykresie przy przyjętej liczbie punktów obliczeniowych 320 i przy średnicy kropki określającej wynik obliczeń (dobieranej przez edytor graficzny), część kropek nakłada się na siebie i zlewa w linię ciągłą w tych fragmentów wykresu, w których przejściu od kroku dyskretyzacji i do kroku dyskretyzacji $i+1$ towarzyszy niewielka zmiana wartości siły elektrodynamicznej.

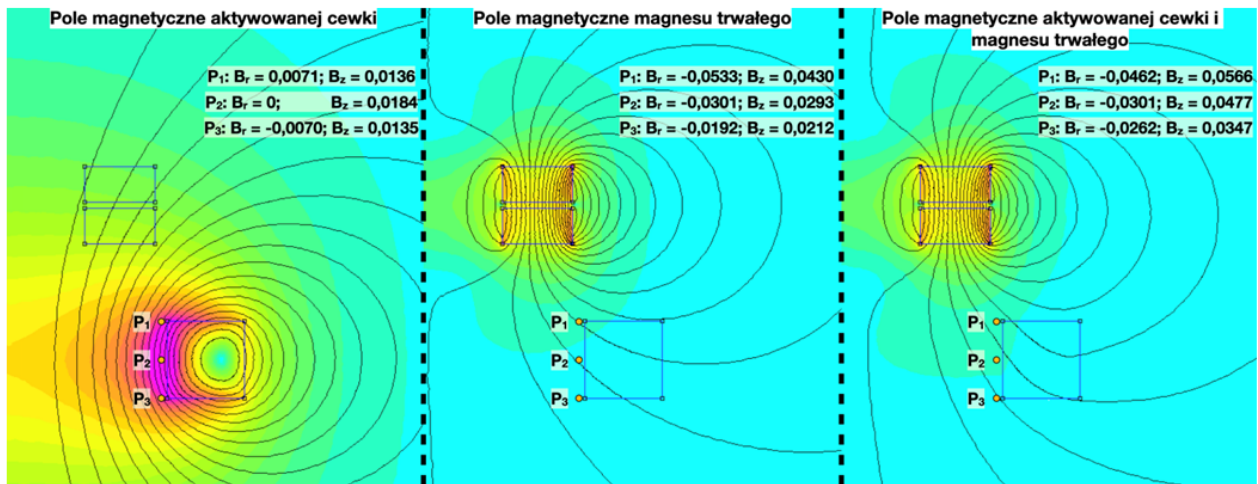
Rysunek 6 przedstawia wartości siły elektrodynamicznej dla kolejnych położenia bielnika/tłoka, oraz dla wartości prądu wzbudzenia $I = I_{\max} = 0,7 \text{ A}$: $F = f(z, I = I_{\max})$ przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Siła elektrodynamiczna dla maksymalnej wartości prądu wzbudzenia: $F = f(z, I = I_{max})$ (wyznaczona na podstawie 320 punktów symulacyjnych).



Rys.7. Siła elektrodynamiczna dla 4 różnych wartości prądu wzbudzenia.



Rys.8. Rozkład pola magnetycznego wytwarzanego przez aktywowaną cewkę wzbudzenia przy wyjętym magniesie trwałym, magnes trwały przy nieaktywowanej cewce wzbudzenia oraz przy równoczesnym działaniu aktywowanej cewki wzbudzenia i magnesu trwałego.

Następnie na rysunku 7 zestawiono wykresy siły elektrodynamicznej, powstającej przy prądzie wzbudzenia $I_{max} = 0,7 \text{ A}$ z wykresami, opisującymi wartości sił elektrodynamicznych przy prądach wzbudzenia $I = 0,1, 0,3, 0,5 \text{ A}$.

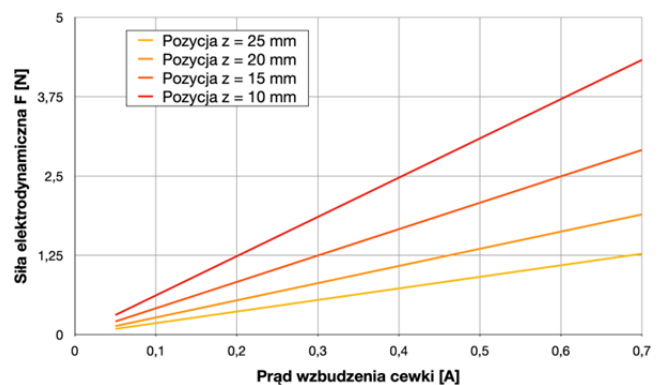
Na rysunku 8 przedstawiono rozkłady przestrzenne pól magnetycznych wytwarzanych odpowiednio przez aktywowaną cewkę wzbudzenia ($I = I_{max} = 0,7 \text{ A}$) przy wyjętym magniesie trwałym, przez magnes trwały przy wyłączonej cewce wzbudzenia oraz przy równoczesnym współdziałaniu aktywowanej cewki i magnesu trwałego umieszczonego w cylindrze. Odczytano wartości indukcji magnetycznej: składowej promieniowej B_r oraz składowej osiowej B_z w 3 przykładowo wybranych punktach: P_1, P_2, P_3 mieszczących się w środkowej części grubości cylindra (grubość cylindra jest odpowiednikiem grubości szczeliny powietrznej w typowych przetwornikach elektromechanicznych [12]) i sprawdzono dla tych punktów zasadę super-pozycji, potwierdzając liniowość środowiska i poprawność działania programu obliczeń polowych.

Sporządzono również wykresy siły elektrodynamicznej działającej na tłok w funkcji prądów wzbudzenia cewki dla 4 wybranych pozycji tłoka: $z = 10, 15, 20, 25 \text{ mm}$ — rysunek 9. Jak widać zależność siły elektrodynamicznej od wartości prądów wzbudzenia cewki jest liniowa, co wynika z liniowości środowiska.

Wyniki badań symulacyjnych, przedstawione na rysunkach 8 i 9 potwierdzające liniowy charakter środowiska dla analizowanego układu: cewka wzbudzenia—magnes trwały

oraz wykresy liniowej zależności siły elektrodynamicznej od prądu wzbudzenia pozwalają postawić hipotezę, że wartość siły elektrodynamicznej można opisać funkcją:

$$(1) \quad F = \frac{I}{I_{max}} f(z, I = I_{max}).$$



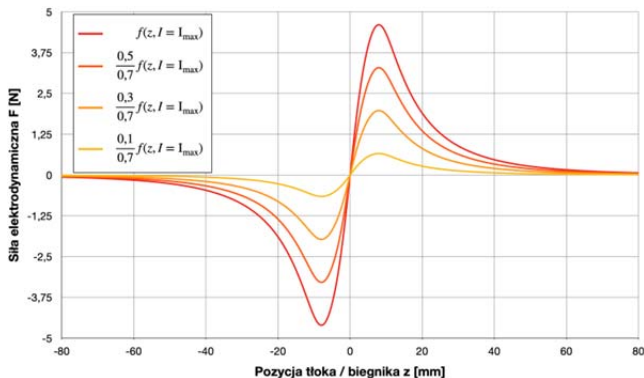
Rys.9. Siła elektrodynamiczna w funkcji prądu wzbudzenia cewki dla 4 wybranych pozycji tłoka / biegnika.

Wykresy funkcji (1) dla wartości prądów $I = 0,1, 0,3, 0,5, 0,7 \text{ A}$ przedstawia rysunek 10. Jak widać przebiegi funkcji na rysunku 10 są identyczne z przebiegami funkcji na rysunku 7, co potwierdza prawdziwość przyjętej hipotezy. W kontekście powyższych rozważań problem wyznaczenia analitycznej zależności siły elektrodynamicznej działającej

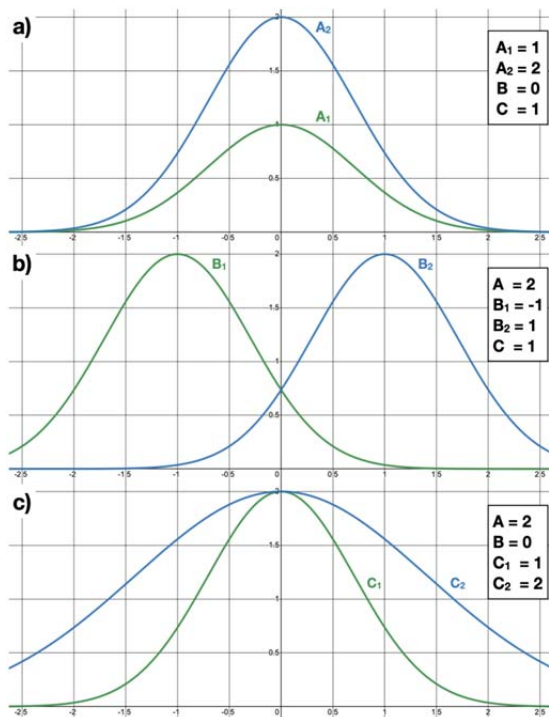
na tłok w postaci funkcji 2 zmiennych: współrzędnej przemieszczenia tłoka z i wartości prądu wzbudzenia cewki I: $F(z, I)$ sprowadza się do wyznaczenia analitycznej zależności siły działającej na tłok w funkcji tylko współrzędnej przemieszczenia tłoka przy ustalonej maksymalnej wartości prądu wzbudzenia cewki I_{max} , a więc funkcji:

$$(2) \quad f(z, I = I_{max}),$$

wchodzącej w skład wyrażenia (1).



Rys.10. Wykresy siły elektrodynamicznej dla 4 zadanych wartości prądu wzbudzenia wyznaczone na podstawie zależności (1).



Rys.11. Wpływ parametrów A, B, C na kształt bazowej funkcji Gauss'a.

Poszukiwanie opisu analitycznej zależności generowanej siły elektrodynamicznej od położenia tłoka z dla wartości prądu wzbudzenia $f(z, I = I_{max})$

Analizując przebieg funkcji siły elektrodynamicznej przedstawiony na rysunku 6 (wyznaczony na podstawie obliczeń połowych z użyciem programu FEMM 4.2), postanowiono w pierwszej kolejności zbadać możliwość aproksymacji jej przebiegu przy pomocy funkcji Gauss'a. Standardowa funkcja Gauss'a ma następującą postać:

$$(3) \quad f_{\mu, \sigma}(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{\left(\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}$$

Postanowiono przyjąć następującą bazową postać funkcji, wprowadzając 3 parametry oznaczone przez A, B, C:

$$(4) \quad f_{A,B,C}(z) = A \cdot e^{\left(\frac{-(z+B)^2}{C^2}\right)}$$

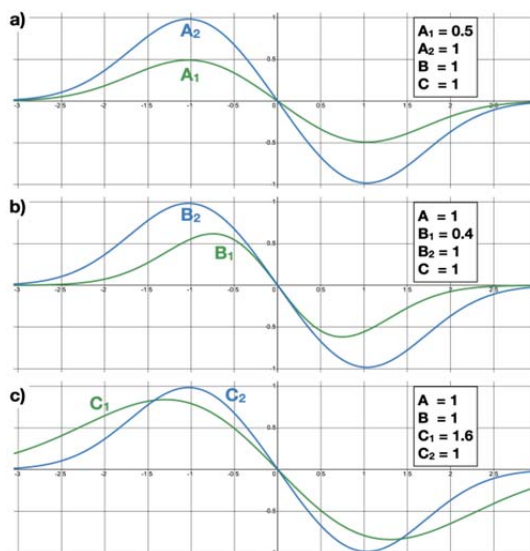
i zbadano wpływ poszczególnych parametrów na przebieg funkcji.

Jak widać na rysunku 11a, b, c, parametr A — decyduje o wartości maksymalnej funkcji, parametr B — o przesunięciu funkcji wzdłuż osi z, zaś parametr C — o nachyleniu gałęzi funkcji.

Dla umożliwienia aproksymacji siły elektrodynamicznej, przedstawionej na rysunku 6, zaproponowano wykorzystanie następującej różnicy 2 funkcji Gauss'a:

$$(5) \quad f_{A,B,C}(z) = A \cdot e^{\left(\frac{-(z+B)^2}{C^2}\right)} - A \cdot e^{\left(\frac{-(z-B)^2}{C^2}\right)}$$

Możliwości kształtowania przebiegu powyższej funkcji, będącej różnicą 2 funkcji Gauss'a, ilustruje rysunek 12.

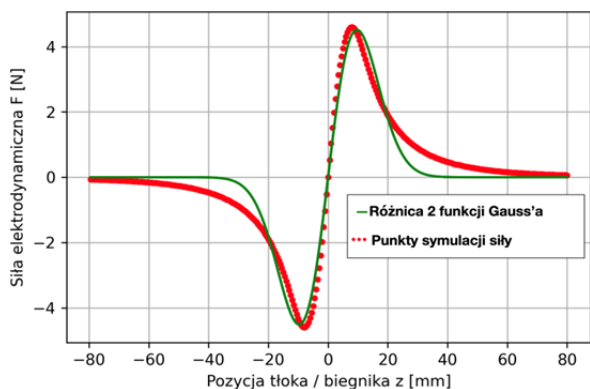


Rys.12. Wpływ parametrów A, B, C na kształt różnicy 2 funkcji bazowych Gauss'a.

Podobnie, jak w przypadku pojedynczej funkcji Gauss'a, parametr A zmienia wartość maksymalną/minimalną funkcji (funkcja (5) jest funkcją antysymetryczną), natomiast przy zmianach parametrów B, C — przesunięciu funkcji wzdłuż osi z oraz zmianom kąta nachylenia gałęzi funkcji towarzyszy równoczesna zmiana maksymalnej/minimalnej wartości funkcji.

Dla wyznaczenia parametrów A, B, C przy aproksymacji siły elektrodynamicznej z rysunku 6 wykorzystano metodę Hooke-Jeeves'a, dążąc do minimalizacji błędu średniokwadratowego związanego z 320 wartościami funkcji siły elektrodynamicznej, wyznaczonymi na drodze obliczeń symulacyjnych i odpowiadającymi 320 wartościami funkcji aproksymującej złożonej z dwóch funkcji Gauss'a.

Próbie aproksymacji funkcji siły elektrodynamicznej z rysunku 6 przy pomocy różnicy funkcji Gauss'a uznano za niezadawalającą ze względu na niemożność pozbycia się znacznego odstępstwa w przebiegach obu funkcji w przedziałach z (-60, -20) i z (20, 60). Błąd średniokwadratowy, dla całego rozpatrywanego zakresu przemieszczenia tłoka z = [-80, 80] mm wyniósł 0,15.



Rys.13. Aproxymacja siły elektrodynamicznej F w funkcji pozycji tłoka z przy pomocy różnicy 2 funkcji Gauss'a.

W kolejnym kroku postanowiono rozważyć tzw. funkcję Kloss'a, znaną z teorii maszyn elektrycznych:

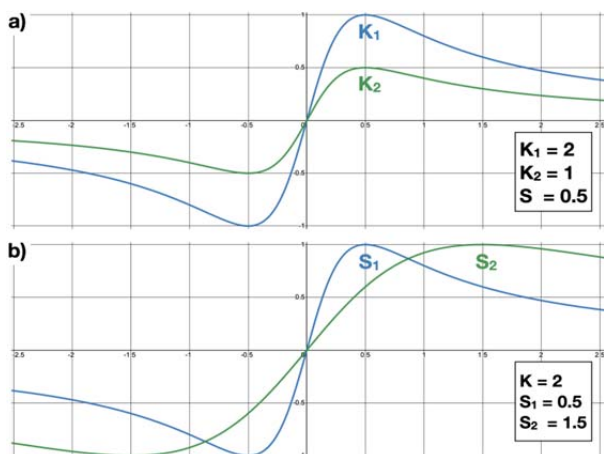
$$(6) \quad M_e = M_e(s) = \frac{2M_k}{s_k + s},$$

k która opisuje moment elektromagnetyczny rozwijany przez maszynę asynchroniczną i w swoim charakterze łudząco przypomina charakterystykę siły elektrodynamicznej z rysunku 6.

Po wprowadzeniu 2 parametrów, oznaczonych przez M i S, otrzymano funkcję bazową o następującej postaci:

$$(7) \quad f_{M,S}(z) = \frac{M}{\frac{z}{s} + z}$$

Jak widać na rysunku 14, parametr M zmienia wartość maksymalną bez zmiany jej położenia na osi odciętych. Odnosnie do parametru S, to jego zmiana wpływa na nachylenie funkcji bez zmiany wartości maksymalnej. Dobierając parametry M i S tak samo, jak w przypadku poprzednim przy pomocy metody Hooke-Jeeves'a, uzyskano przebieg funkcji aproksymacyjnej pokazany na rysunku 15.

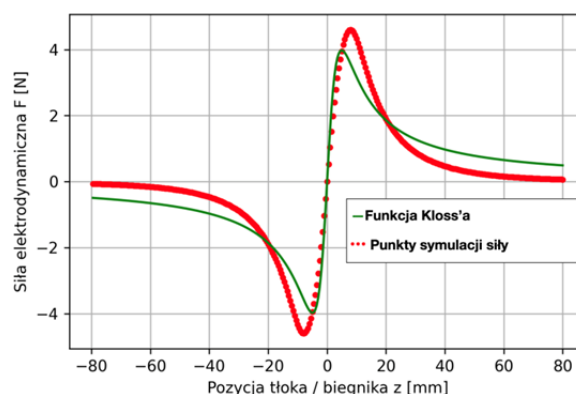


Rys.14. Wpływ parametrów K i S na kształt bazowej funkcji Kloss'a.

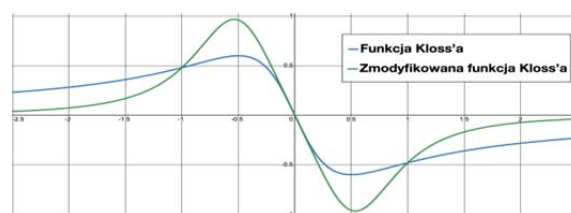
Jak widać na rysunku 15, funkcja aproksymująca dobrze aproksymuje przebieg siły elektrodynamicznej w części środkowej (mającej znaczenie zasadnicze), ale wartość maksymalna siły jest zbyt mała, a ponadto funkcja zbyt wolno zbiega się asymptotycznie do osi z przy zdążaniu współrzędnej z do $+\infty$ i $(-\infty)$.

Dla usunięcia tych niedogodności zaproponowano następującą modyfikację postaci funkcji Kloss'a:

$$(8) \quad f_{M,S}(z) = \frac{M}{\frac{z}{s} + z^2}$$

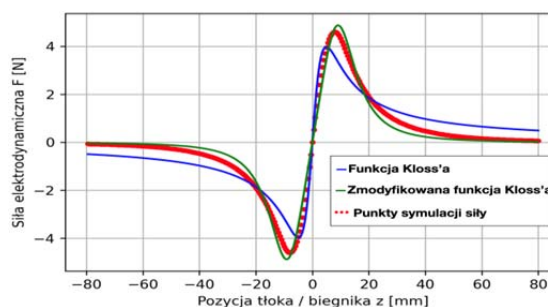


Rys.15. Aproxymacja siły elektrodynamicznej F w funkcji pozycji tłoka z przy pomocy funkcji Kloss'a.



Rys.16. Zestawienie kształtu zmodyfikowanej funkcji Kloss'a na tle bazowej funkcji Kloss'a.

Tak zmodyfikowana funkcja Kloss'a zapewnia odpowiednio szybkie, asymptotyczne zbieganie się rozpatrywanej funkcji do osi z. Faktycznie, po dobraniu parametrów M i S przy pomocy metody Hooke-Jeeves'a, otrzymano funkcję aproksymacyjną, której charakter jest w pełni zgodny z przebiegiem siły elektrodynamicznej z rysunku 6 i dla której błąd średniokwadratowy wynosi zaledwie 0,07. Porównanie aproksymacji, zrealizowanej z użyciem funkcji Kloss'a oraz zmodyfikowanej funkcji Kloss'a przedstawia rysunek 17.



Rys.17. Aproxymacja siły elektrodynamicznej F w funkcji pozycji tłoka z przy pomocy funkcji Kloss'a oraz zmodyfikowanej funkcji Kloss'a.

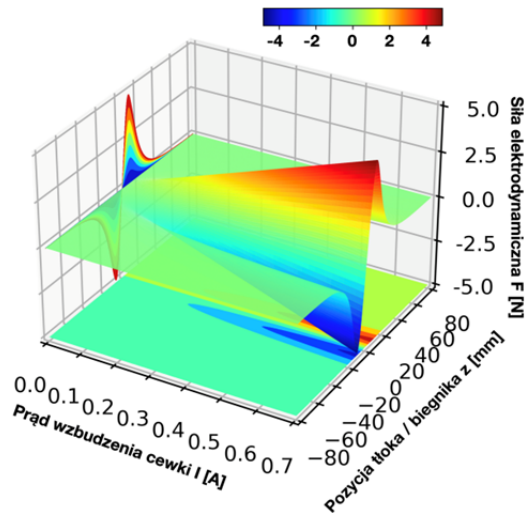
Dobre przy pomocy metody Hooke-Jeeves'a wartości parametrów wynoszą odpowiednio: $M = 7,958$ i $S = 4,959$ dla bazowej funkcji Kloss'a oraz $M = 102,577$ i $S = 143,553$ dla zmodyfikowanej funkcji Kloss'a. W przypadku funkcji Kloss'a błąd średniokwadratowy wynosi 0,28, zaś w przypadku zmodyfikowanej funkcji Kloss'a spada do wartości 0,07.

Siła elektrodynamiczna działająca pomiędzy aktywowaną cewką wzbudzenia i magnesem trwałym tłoka (biegnika) w liniowej pompie elektromagnetycznej o

wymiarach geometrycznych i danych nawojowych, podanych na rysunku 4, może więc być opisana następującą funkcją 2 zmiennych:

$$(9) \quad F(z, I) = \frac{I}{0,7} \frac{\frac{102,577}{z}}{z^2 + \frac{143,553}{z^2}}$$

Przebieg tej funkcji w postaci wykresu trójwymiarowego przedstawiono na rysunku 18.



Rys.18. Siła elektrodynamiczna 2-zmiennych: przemieszczenia tłoka z i prądu wzbudzenia cewki I (działająca pomiędzy aktywowaną cewką wzbudzenia i magnesem trwałym tłoka/biegnika) opisana w sposób analityczny w przestrzeni trójwymiarowej

Znajomość analitycznej postaci funkcji siły elektrodynamicznej w zasadniczy sposób ułatwia opracowanie algorytmu sterowania i w zdecydowany sposób przyspiesza jego działanie.

Wnioski

Dla liniowej pompy elektromagnetycznej jest możliwe znalezienie analitycznego opisu siły elektrodynamicznej działającej na tłok, będącej funkcją 2 zmiennych: współrzędnej przemieszczenia tłoka z oraz prądu wzbudzenia cewki I .

Wykazano liniową zależność siły elektrodynamicznej od prądu wzbudzenia I , co pozwoliło sprowadzić matematyczny problem aproksymacji funkcji 2 zmiennych do problemu aproksymacji funkcji jednej zmiennej (współrzędnej przestrzennej z).

Rozważono możliwość aproksymacji siły działającej na tłok w funkcji współrzędnej przestrzennej z przy pomocy różnicy 2 funkcji Gauss'a, funkcji Kloss'a oraz zmodyfikowanej funkcji Kloss'a. Błędy średniokwadratowe dla wszystkich 3 wyżej wymienionych aproksymacji zestawiono razem w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie funkcji aproksymacyjnych

Funkcja aproksymacyjna	Błąd średniokwadratowy	Liczba współczynników
Gauss'a	0,15	3
Kloss'a	0,28	2
Zmodyfikowana funkcja Kloss'a	0,07	2

Wykazano, że najlepsze rezultaty w zakresie aproksymacji funkcji siły elektrodynamicznej wykazuje zmodyfikowana funkcja Kloss'a, związana z najmniejszym błędem średniokwadratowym (tabela 1), jak też charakteryzująca się dobrą zgodnością w całym rozpatrywanym zakresie przemieszczenia się tłoka.

Znajomość analitycznej postaci zależności siły elektrodynamicznej w liniowej pompie elektromagnetycznej od współrzędnej przestrzennej z i prądu wzbudzenia I w sposób istotny ułatwi opracowanie algorytmu sterowania i przyspieszy jego działanie, pozwalając uniknąć problemu wyznaczania wartości pośrednich pomiędzy wartościami wyznaczonymi na drodze symulacyjnej przy pomocy komputerowych programów polowych.

Autorzy: mgr inż. Sebastian Bartel, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Katedra Inżynierii Elektrycznej, Warszawska 24, 31-155 Kraków, E-mail: sebastian.bartel@doktorant.pk.edu.pl; prof. dr hab. inż. Krzysztof Kluszczyński, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Katedra Inżynierii Elektrycznej, Warszawska 24, 31-155 Kraków, E-mail: krzysztof.kluszczyński@pk.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Bartel S., Kluszczyński K., Pilch Z., Concept of electromagnetic periodical duty pump with programmable liquid flow, *WZEE 2019: 15th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics*, Zakopane, Polska, 8-10 Grudzień 2019
- [2] Khamitov A., Swanson J., Severson E. L., Van de Ven J., Linear Electric Machine Design for an Off-Highway Vehicle Hydraulic Charge Pump, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2019
- [3] Sarr Lo D., Lawali Ali H., Amara Y., Barakat G., Chabour F., 3d finite element analysis of eccentricity in a tubular linear permanent magnet machine, *XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2018, s. 1996–2001
- [4] Yang L., Yingmin J., Xu S., Zongxia J., Design, analysis and testing of a novel linear collaborative pump, *12th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2017, s. 630–635
- [5] Cao Y., Zhang T., Zhang H., Zhang Z., Yang J., Liu B., Study of the Self-Locking Characteristics of the Swing Scraper of an Elliptical Rotor Scraper Pump, *Machines*, 10 (2022), nr 5 (370)
- [6] Sochocki R., Mikromaszyny elektryczne, *Warszawa 1996: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*
- [7] Kosmol J., Napędy mechatroniczne, *Gliwice 2013: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*
- [8] Kaszuwara W., Magnesy Nd-Fe-B 30 lat doskonalenia materiału, *Warszawa 2015: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*
- [9] Ciszewski B., Materiały magnetycznie twarde, ich rozwój w wieku XX, *Materiały elektroniczne, Warszawa 1994: Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych*, T.22 nr. 1, s. 9-35
- [10] Stadnicki J., Teoria i praktyka rozwiązywania zadań optymalizacji, *Warszawa 2017: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne*
- [11] Wawrzyński P., Uczące się systemy decyzyjne, *Warszawa 2021: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej*
- [12] Sobczyk T., Węgiel T., Wykłady z elektromechanicznych przemian energii, *Kraków 2014: Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki*