

Stanowisko badawcze do wyznaczania rozkładu siły elektromagnetycznej działającej w liniowym cylindrycznym silniku synchronicznym z magnesem trwałym

Streszczenie. Przedstawiono stanowisko badawcze do wyznaczania rozkładu siły elektromagnetycznej działającej w liniowym cylindrycznym silniku synchronicznym z magnesem trwałym. Pomiar siły dokonywany jest za pomocą belki tensometrycznej, zaś mikroprocesorowo sterowany układ pozycjonowania biegnika składa się z obrotowego silnika skokowego oraz śruby liniowej transformującej ruch obrotowy na ruch liniowy, wykonanej ze stali lub nylonu. Najważniejszym celem artykułu jest porównanie wyników pomiarowych, uzyskanych dla śruby stalowej i nylonowej.

Abstract. A testing stand for determining the distribution of the electrodynamic force acting in a linear cylindrical permanent magnet synchronous motor is presented. The force is measured using a tensometric beam while the microprocessor-controlled pole positioning system consists of a rotary stepping motor and a linear screw transforming rotary motion into linear motion, made of steel or nylon. The most important objective of the article is to compare the measurement results obtained for the steel and nylon screw. (Test stand for determining the distribution of electromagnetic force acting in a linear cylindrical synchronous motor with a permanent magnet)

Słowa kluczowe: liniowy silnik synchroniczny z magnesem trwałym, tensometryczna metoda pomiaru siły, obliczenia polowe siły elektromagnetycznej.

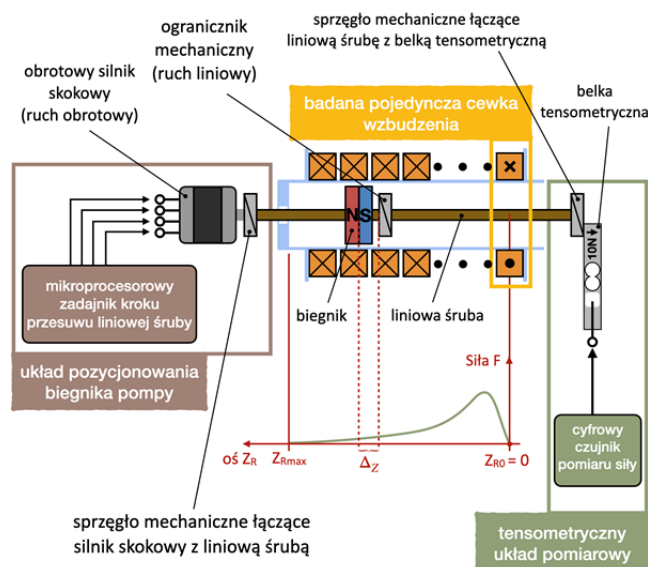
Keywords: PM linear synchronous motor, tensometric method of force measurement, electrodynamic force field calculations.

Wstęp

Znane są różne rozwiązania tensometrycznych układów pomiarowych do wyznaczania rozkładu siły elektromagnetycznej w funkcji położenia biegnika w liniowych silnikach synchronicznych z magnesami trwałymi [2][3]. Istotne znaczenie ma w takich układach zapewnienie: dokładności pozycjonowania biegnika, stałej wartości kroku przesuwu biegnika oraz sztywności mechanicznej układu pomiarowego. Do pozycjonowania biegnika są zwykle używane skokowe silniki obrotowe z liniową śrubą trapezową, która dokonuje transformacji ruchu obrotowego na dyskretny ruch liniowy [1][4][5]. W artykule zawarto opis takiego stanowiska badawczego, charakteryzującego się wysokim stopniem automatyzacji i dogodną obsługą, jak też możliwością realizacji różnych programów pomiarowych. Ważnym dodatkowym celem artykułu jest porównanie wyników pomiarowych, uzyskanych przy użyciu śruby liniowej stalowej oraz śruby liniowej, wykonanej z nylonu. Według wiedzy autorów wyniki takich pomiarów nie były dotychczas w literaturze porównywane, a rodzaj materiału, z którego wykonana jest śruba, ma istotne znaczenie dla dokładności wyników pomiaru. Od śruby liniowej, transformującej ruch obrotowy na ruch liniowy, wymaga się dużej sztywności, co zapewnia śruba stalowa, najczęściej wykorzystywana w pomiarach. Należy jednak pamiętać o tym, że śruba stalowa jest materiałem ferromagnetycznym, którego wprowadzenie do układu pomiarowego zakłóca rozkład przestrzenny pola magnetycznego, wytwarzanego przez magnes trwały i cewki wzbudzenia, a konsekwencją tego jest błąd w pomiarze siły elektromagnetycznej. Wady tej jest pozbawiona śruba liniowa, wykonana z polimeru np. nylonu, jednakże śruba ta charakteryzuje się znacznie mniejszą sztywnością, wskutek czego po wsunięciu się biegnika do wnętrza cewki wzbudzenia, w obecności dużych sił elektromagnetycznych, posiadających (prócz użytecznej składowej osiowej, czyli wzdłużnej) również niepożądaną składową promieniową, śruba ugina się, a niecentryczność ułożenia biegnika wewnątrz cylindra skutkuje zakłóceniem pomiaru siły w tym przedziale, który dla użytkownika napędu silnika, opracowującego algorytm jego sterowania, ma znaczenie największe.

Opis stanowiska badawczego do pomiaru rozkładu pola magnetycznego oraz siły działającej na biegnik silnika synchronicznego z pojedynczą cewką wzbudzenia

Konceptję stanowiska laboratoryjnego do badania siły elektromagnetycznej, działającej na biegnik silnika w funkcji jego położenia, przedstawiono w sposób schematyczny na rysunku 1.



Rys.1. Konceptcja stanowiska laboratoryjnego do badania siły elektromagnetycznej działającej na biegnik silnika w funkcji jego położenia.

Na podstawie tego rysunku poglądowego wykonano wizualizację przestrzenną, przedstawioną na rysunku 2.

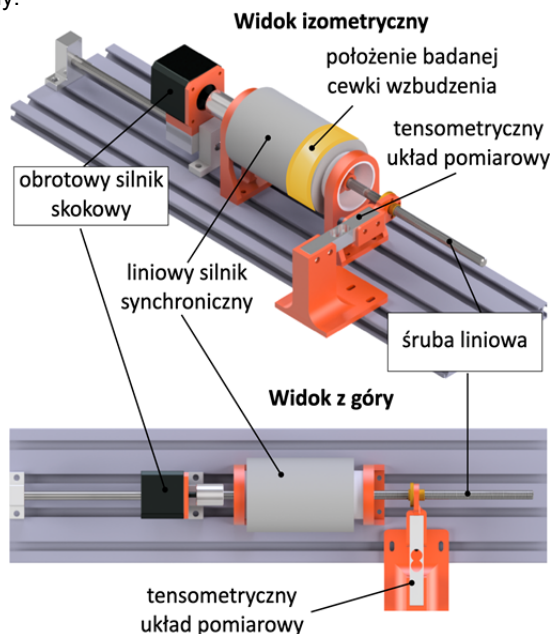
Wizualizację przestrzenną stanowiska laboratoryjnego, obejmującą widok izometryczny oraz widok z góry, prezentuje rysunek 2. Wizualizację wnętrza silnika uwidoczniono na rysunku 3.

Jak widać na rysunku 2, w skład stanowiska wchodzi:

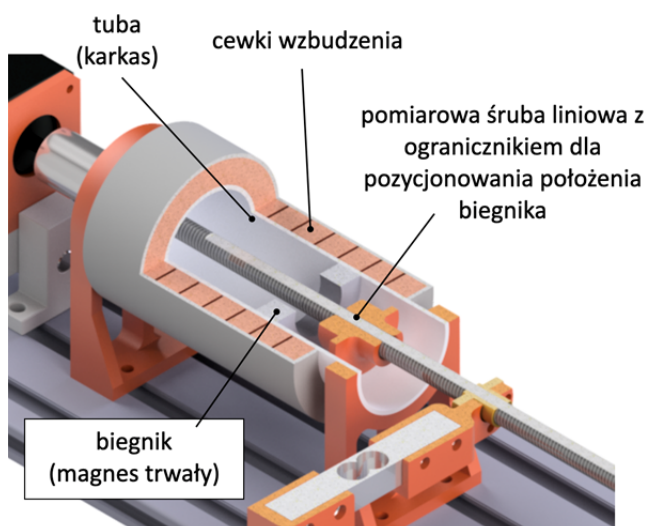
- liniowy silnik synchroniczny, obejmujący: pojedynczą badaną cewkę wzbudzenia (zaznaczoną na rysunku żółtym konturem), biegnik będący magnesem

neodymowym oraz cylindryczną komorę wykonaną z teflonu;

- **układ pozycjonowania biegnika**, złożony z: mikroprocesorowego zadajnika kroku obrotowego silnika skokowego, liniowej śruby M8 (o średnicy 8mm) wykonanej ze stali (wersja 1) oraz z nylonu (wersja 2), sprzęgła mechanicznego łączącego skokowy silnik obrotowy ze śrubą trapezową oraz ogranicznika mechanicznego (ograniczającego możliwość przemieszczenia się biegnika o więcej, niż zadany krok Δz_R);
- **tensometryczny układ pomiarowy**, złożony z: belki tensometrycznej typu NA27 o maksymalnej wartości siły równej 10 N oraz cyfrowego czujnika pomiarowego siły.



Rys.2. Wizualizacja przestrzenna projektowanego stanowiska laboratoryjnego do badania rozkładu siły elektromagnetycznej działającej na biegnik silnika w funkcji jego położenia: widok izometryczny oraz widok z góry.

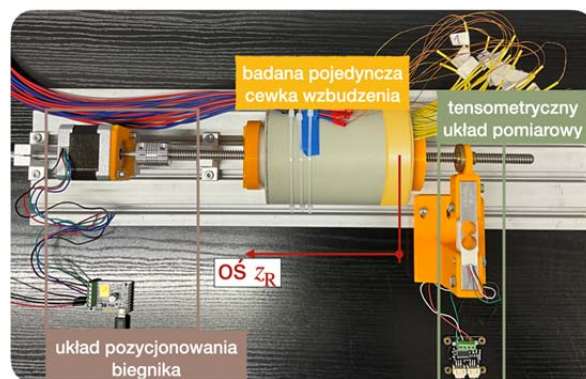


Rys.3. Wizualizacja przestrzenna wnętrza liniowego silnika synchronicznego.

Zastosowany na stanowisku badawczym obrotowy silnik skokowy przeznaczony do pozycjonowania biegnika to silnik skokowy typu 42HM40-1684 o 400 krokach na pełny obrót (400 krokach obrotowych), rozwijający moment na wale równy 0,32Nm przy znamionowym napięciu

zasilania 2,8V oraz prądzie zasilania 1,68A. Jako sterownik silnika skokowego dobrano sterownik typu Tic T834 z modulem sterowania TI DRV8834. Kontroler obsługuje interfejsy komunikacyjne: USB, TTL oraz I2C. Jako układ pomiarowy siły zastosowano belkę tensometryczną typu NA27 o maksymalnej wartości siły mierzonej równej 10 N, a wzmacniaczem sygnału analogowego i przetwornikiem sygnału analogowego na sygnał cyfrowy jest cyfrowy czujnik pomiarowy typu DFRobot Gravity. Cyfrowy czujnik pomiarowy siły, bazujący na układzie HX711, posiada 24-bitowy konwerter analogowo-cyfrowy i jest zasilany napięciem z przedziału: 2,6 V — 5,5 V.

Zdjęcie stanowiska laboratoryjnego (zbudowanego według poglądowego rysunku 1, zgodnie z wizualizacją przestrzenną przedstawioną na rysunek 2), zamieszczono na rysunku 3a (widok stanowiska z góry).



(a)



(b)



(c)

Rys.4. Stanowisko badawcze do pomiaru rozkładu siły elektromagnetycznej działającej na biegnik silnika w funkcji jego położenia (zdjęcie) oraz jego elementy konstrukcyjne (a) widok stanowiska badawczego z góry (b) liniowa śruba M8 wykonana ze stali (c) liniowa śruba M8 wykonana z nylonu (zdjęcia).

Na zdjęciu tym są widoczne:

- liniowy silnik synchroniczny posiadający N cewek wzbudzenia: $N = 9$;
- układ pozycjonowania biegnika liniowego silnika synchronicznego;
- tensometryczny układ pomiarowy.

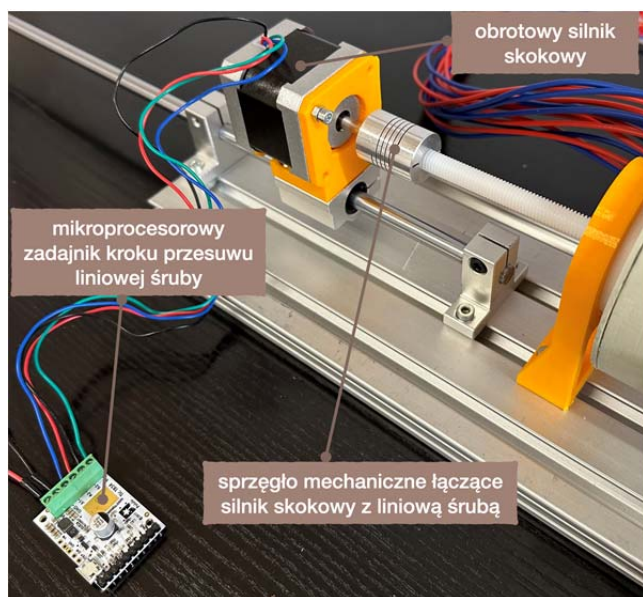
Cewka wzbudzenia, która będzie aktywowana przy wyznaczaniu rozkładu siły elektromagnetycznej w funkcji położenia biegnika, to cewka skrajna wyróżniona na rysunku 3a żółtym kolorem.

Jak wspomniano, ważnym celem artykułu jest zbadanie działania stanowiska pomiarowego przy zastosowaniu śruby stalowej (materiał magnetyczny) oraz śruby nylonowej (materiał niemagnetyczny). Trapezową śrubę M8

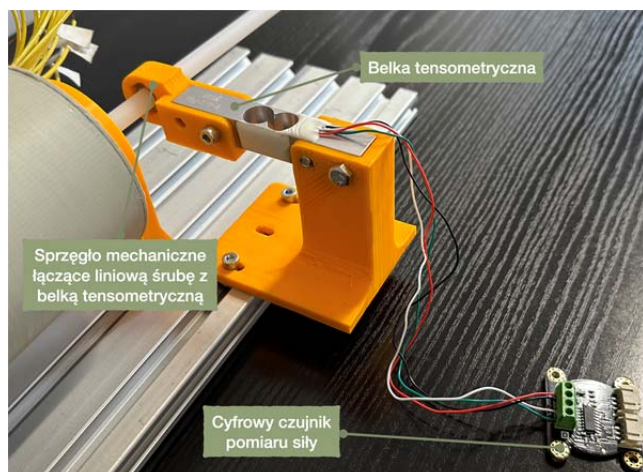
ze skokiem gwintu 2mm, wykonaną z magnetycznej stali, przedstawiono na rysunku 4b, zaś liniową śrubę M8 ze skokiem 1,25 mm, wykonaną z niemagnetycznego nylonu — na rysunku 4c.

Na kolejnym rysunku 5 przedstawiono zdjęcie fragmentu opracowanego stanowiska laboratoryjnego, pokazującego w bardziej szczegółowy sposób budowę układu pozycjonowania biegnika silnika. Układ ten (jak wskazano już wcześniej) składa się z: mikroprocesorowego zadajnika kroku przesuwu śruby liniowej typu Tic T834, obrotowego silnika skokowego typu 42HM40-1684 (ruch obrotowy) oraz sprzęgła mechanicznego, łączącego silnik skokowy z śrubą trapezową (ruch liniowy).

Rysunek 6 prezentuje zdjęcie fragmentu stanowiska laboratoryjnego, złożonego z: sprzęgła mechanicznego łączącego śrubę liniową z belką tensometryczną, belki tensometrycznej typu NA27 oraz cyfrowego czujnika pomiaru siły typu DFRobot Gravity.



Rys.5. Fragment stanowiska badawczego odpowiedzialnego za pozycjonowanie biegnika liniowego silnika synchronicznego (zdjęcie).



Rys.6. Fragment stanowiska badawczego z tensometrycznym układem pomiarowym siły elektromagnetycznej działającej na biegnik silnika (zdjęcie).

Program badań i wyniki pomiarowe

Na stanowisku laboratoryjnym, omówionym w poprzednim rozdziale, zrealizowano program badań ukierunkowany na pomiar rozkładu siły

elektromagnetycznej działającej na biegnik silnika w funkcji jego położenia.

Procedura pomiarowa obejmuje następujące kroki:

Krok 1 Kalibrację układu pozycjonowania biegnika liniowego silnika synchronicznego. Kalibracja układu pozycjonowania biegnika silnika polega na ustawieniu ogranicznika mechanicznego (ogranicznika przemieszczenia biegnika silnika) w połowie długości aktywowanej cewki $z_R = 0$ (rysunek 1).

Krok 2 Dobór i nastawę liczby kroków obrotowego silnika krokowego. Aby móc pozycjonować biegnik z liniowym posuwem (krokiem posuwu) $\Delta z_R = 2\text{mm}$ należy dobrać odpowiednią liczbę kroków obrotowego silnika krokowego. Dla obu zastosowanych śrub (stalowej i nylonowej) z metrycznym gwintem M8 przy wybranym typie silnika skokowego (42HM40-1684) liczba kroków obrotowych, zapewniająca krok posuwu liniowego 2mm biegnika wynosi 640.

Krok 3 Bazowanie. Polega na pozycjonowaniu biegnika w odległości 38mm ($z_{Rmax} = 38\text{mm}$) od środka wzbudzonej cewki silnika.

Krok 4 Tarowanie tensometrycznego układu pomiarowego. Polega ono na odczytaniu wartości siły referencyjnej działającej na pomiarową belkę tensometryczną w momencie, gdy badana cewka wzbudzenia nie jest zasilana. Wartość siły referencyjnej jest wartością, od której mierzona będzie aktualna siła elektromagnetyczna działająca na biegnik silnika.

Krok 5 Wzbudzenie (aktywacja) cewki oraz pomiar wartości siły elektromagnetycznej. Badana cewka wzbudzenia silnika jest zasilana skokowo prądem stałym o wartości $I_{max} = 0,7\text{A}$ (właściwy kierunek prądu to ten, który wywołuje ruch biegnika w stronę środka badanej cewki — ruch wciągający). Następnie odczytujemy i zapisujemy aktualną pozycję biegnika oraz wartość siły elektromagnetycznej działającej na biegnik.

Krok 6 Zmiana położenia biegnika o zadany krok Δz_R . Dla zmiany pozycji biegnika należy dezaktywować (wyłączyć) badaną cewkę wzbudzenia. Następnie należy wysterować 640 kroków obrotowych na obrotowym silniku skokowym, co odpowiada krokowi posuwu liniowego równego 2mm ($\Delta z_R = 2\text{mm}$).

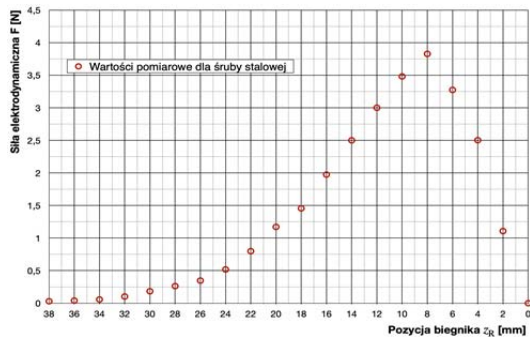
Badania pomiarowe rozkładu siły elektromagnetycznej w funkcji pozycji biegnika były realizowane według powyższej procedury kolejno od kroku 1 do kroku 3, a następnie cyklicznie (w pętli) od kroku 4 do kroku 6.

Pomiary wartości siły elektromagnetycznej były rejestrowane w zakresie przemieszczenia biegnika $z_R \in \langle 0; z_{Rmax} \rangle \text{mm}$ z krokiem posuwu biegnika $\Delta z_R = 2\text{mm}$.

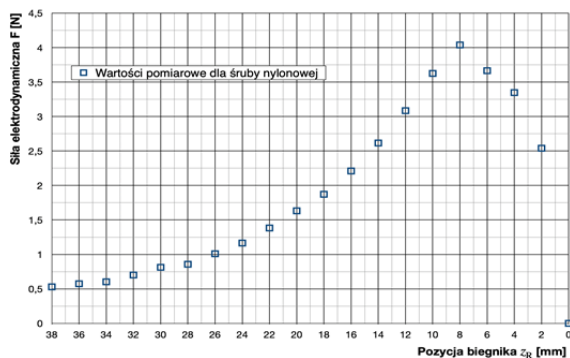
Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono wyniki przeprowadzonych badań pomiarowych w postaci rozkładu siły elektromagnetycznej działającej na biegnik silnika w funkcji jego położenia przy zastosowaniu śruby stalowej (rysunku 7) oraz zastosowaniu śruby nylonowej (rysunku 8). **Wyznaczenie siły elektromagnetycznej działającej na biegnik liniowego silnika synchronicznego metodą połową**

Dla liniowego silnika synchronicznego przedstawionego na rysunku 2a i poddanego badaniom na stanowisku laboratoryjnym, omówionym w poprzednim rozdziale, postanowiono wyznaczyć rozkład siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji położenia metodą połową. Obliczenia przeprowadzono w programie FEMM 4.2. Siatkę dyskretyzacyjną dla połowego modelu liniowego silnika

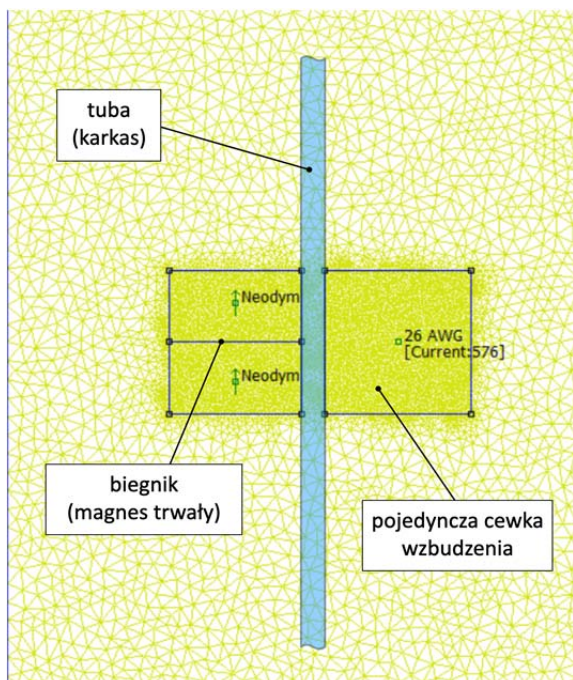
synchronicznego z pojedynczą zasiloną cewką wzbudzenia przedstawia rysunek 9. Badania symulacyjne rozkładu siły elektromagnetycznej w funkcji położenia biegnika przeprowadzono dla zakresu pozycji biegnika $z_R \in \langle 0; 38 \rangle \text{ mm}$ oraz kroku dyskretyzacji położenia biegnika $\Delta z_R = 2 \text{ mm}$. Rezultaty tych badań symulacyjnych są przedstawione na rysunku 10.



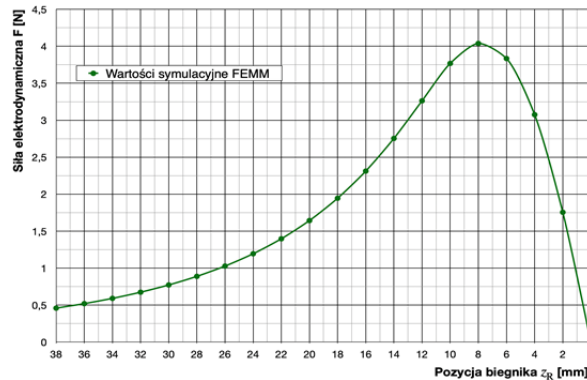
Rys.7. Zmierzone wartości rozkładu siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia dla śruby stalowej.



Rys.8. Zmierzone wartości rozkładu siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia dla śruby nylonowej.

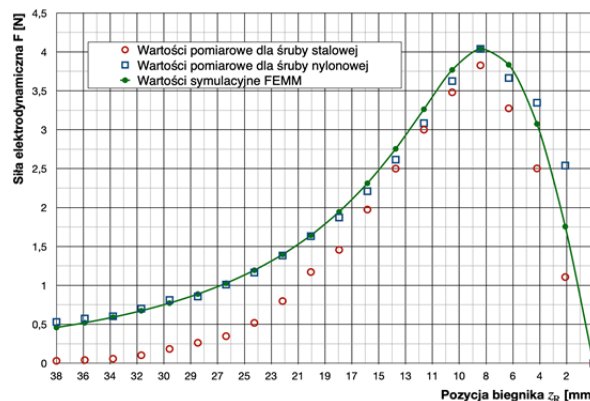


Rys.9. Siatka dyskretyzacyjna dla polowego modelu liniowego silnika synchronicznego z pojedynczą zasiloną cewką wzbudzenia.



Rys.10. Rozkład siły elektromagnetycznej działającej na biegnik w funkcji jego położenia, uzyskany na drodze badań symulacyjnych, na podstawie opracowanego modelu polowego liniowego silnika synchronicznego (liczba punktów obliczeniowych wynosi 100).

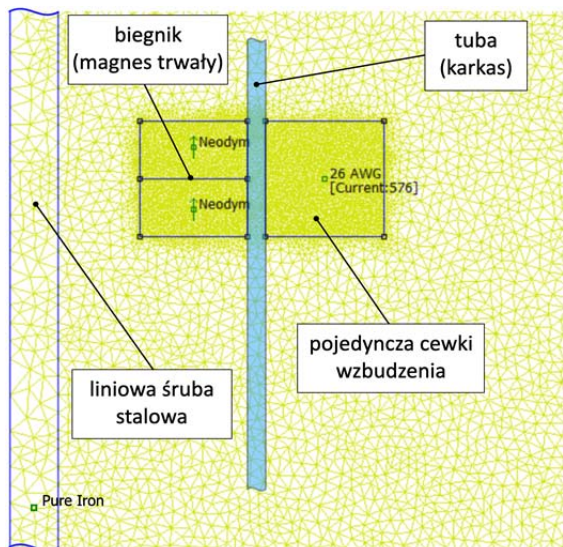
W celu oceny poprawności opracowanego modelu polowego liniowego silnika synchronicznego z jedną zasilaną cewką wzbudzenia zestawiono razem na rysunku 11 rozkłady siły elektromagnetycznej uzyskane metodą pomiarową dla śruby stalowej (rysunek 7) i dla śruby nylonowej (rysunek 8) z rozkładem siły elektromagnetycznej uzyskanej na drodze symulacyjnej (rysunek 10).



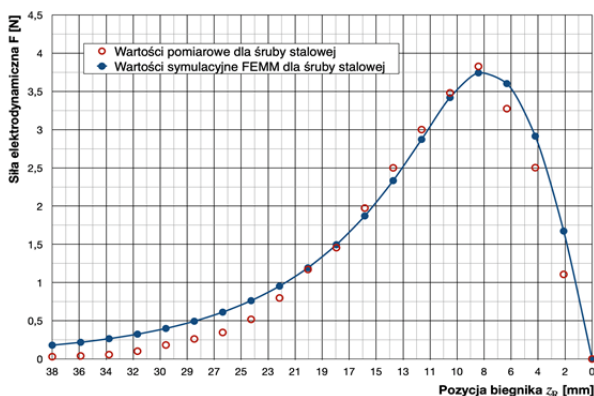
Rys.11. Zestawienie rozkładów siły elektromagnetycznej działającej na biegnik silnika w funkcji jego położenia, uzyskanych na drodze badań pomiarowych ze śrubą stalową i nylonową oraz na drodze badań symulacyjnych.

Jak widać na rysunku 11 dla obu wersji śrub (stalowej i nylonowej) występuje stosunkowo dobra zgodność wyników pomiarowych i symulacyjnych w zakresie $z_R \in \langle 0; 15 \rangle \text{ mm}$, co pozwala stwierdzić, że model polowy silnika liniowego jest poprawny. Rzuca się w oczy wrastająca rozbieżność wyników badań pomiarowych dla śruby stalowej i obliczeń symulacyjnych przeprowadzonych według modelu polowego przedstawionego na rysunku 9. Autorzy postawili hipotezę, że przyczyną tego jest zmiana rozkładu przestrzennego pola magnetycznego, spowodowana obecnością śruby stalowej w układzie pomiarowym. Z tego powodu postanowiono na modelu polowym silnika synchronicznego uwzględnić obecność śruby stalowej (nową siatkę dyskretyzacyjną przedstawia rysunek 12) i jeszcze raz powtórzyć obliczenia polowe według zmodyfikowanego modelu.

Wyniki obliczeń symulacyjnych, uwzględniające obecność śruby stalowej, dobrze zgadzają się z wynikami badań pomiarowych, przeprowadzonych z wykorzystaniem śruby stalowej, co widać na rysunku 13, prezentującym zestawienie obu rodzajów wyników.



Rys.12. Siatka dyskretyzacyjna dla polowego modelu liniowego silnika synchronicznego z pojedynczą zasiloną cewką wzbudzenia przy uwzględnieniu obecności śruby stalowej będącej częścią układu pomiarowego (zmodyfikowany model połowy).



Rys.13. Zestawienie rozkładów siły elektromagnetycznej działającej na biegnik silnika w funkcji jego położenia, uzyskanych na drodze badań pomiarowych z użyciem śruby stalowej (rysunek 7) oraz na drodze badań symulacyjnych przy uwzględnieniu obecności śruby stalowej (rysunek 12).

Rysunek 13 potwierdza hipotezę autorów, że obecność liniowej śruby wykonanej ze stali zmienia rozkład przestrzenny pola magnetycznego i jest przyczyną rozbieżności pomiędzy wynikami pomiarowymi zrealizowanymi z użyciem śruby stalowej oraz wynikami symulacyjnymi.

Ze względu na to, że obecność śruby stalowej w układzie pomiarowym tak znacząco zniekształca rozkład przestrzenny pola magnetycznego, a w konsekwencji — rozkład siły elektromagnetycznej, autorzy rekomendują użycie w układzie pomiarowym śruby nylonowej niemagnetycznej. Jak widać na rysunku 11, badania pomiarowe przeprowadzone z użyciem śruby nylonowej dobrze zgadzają się z wynikami badań symulacyjnych w całym badanym zakresie: $z_R \in \langle 0; 38 \rangle \text{ mm}$.

Błąd średniokwadratowy $RMSE$ określony wzorem:

$$(1) \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (y_i - y_i^P)^2} \quad \text{dla } i = 1, 2, 3, \dots, k,$$

gdzie: y_i — punkty uzyskane na drodze badań symulacyjnych wg modelu polowego przedstawionego na rysunku 9, y_i^P — punkty uzyskane na drodze badań pomiarowych z użyciem śruby nylonowej (rys. 8), k — liczba punktów pomiarowych i obliczeniowych,

wynosi: $RMSE = 0,319$ (przy liczbie punktów: $k = 19$). Na podstawie znajomości błędu średniokwadratowego (1) oraz wartości średniej siły elektromagnetycznej \bar{y}^P , wyznaczonej dla 19 punktów pomiarowych wg wzoru:

$$(2) \quad \bar{y}^P = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k y_i^P = 1,89$$

można wyznaczyć błąd procentowy ϵ równy:

$$(3) \quad \epsilon = \frac{RMSE}{\bar{y}^P} \cdot 100\% = 16,9\%.$$

Powyższa wartość błędu procentowego pozwala na stwierdzenie, że wyniki badań symulacyjnych i badań pomiarowych zrealizowanych przy użyciu śruby nylonowej, charakteryzują się dobrą zbieżnością z błędem procentowym na poziomie kilkunastu procentów.

Wnioski

Zasadniczym wnioskiem, płynącym z badań eksperymentalnych i symulacyjnych, jest to, że wykorzystywana w układzie pomiarowym śruba powinna być wykonana z materiału niemagnetycznego. Znaczenie ma również zapewnienie odpowiedniej sztywności śruby liniowej. Warunek ten spełnia śruba wykonana z nylonu. Celowe wydaje się jednak przeprowadzenie dalszych prób ze śrubą metalową niemagnetyczną, wykonaną z mosiądzu, brązu lub stali niemagnetycznej (charakteryzującą się znacznie większą sztywnością). Przeprowadzenie takich badań planuje się na kolejnym etapie doskonalenia układu pomiarowego do wyznaczania rozkładu siły elektromagnetycznej w liniowych silnikach synchronicznych.

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; dr inż. Zbigniew Pilch, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Katedra Inżynierii Elektrycznej, Warszawska 24, 31-155 Kraków, E-mail: zbigniew.pilch@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] Roliński Z., *Tensometria oporowa*, WNT, Warszawa 1981
- [3] Beluch W., Burczyński T., Fedeliński P., John A., Kokot G., Kuś W.: *Laboratorium z wytrzymałości materiałów*. Wyd. Politechniki Śląskiej, Skrypt nr 2285, Gliwice, 2002
- [4] T. Glinka, *Mikromaszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*, Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 1995
- [5] M. Forbes, W. Robertson, A. Zander, J. Paulides. (2019). Analytic magnetic field modelling approach for iron-less tubular permanent magnet linear synchronous motors. 3038-3045. 10.1109/ECCE.2019.8912925.