

Analiza polowo-obwodowa płaskich liniowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi

Robert Rossa

1. Wstęp

W technice napędu elektrycznego stosuje się wiele odmian silników liniowych, wymienionych i opisanych szczegółowo m.in. w [1]. Jedną z najbardziej popularnych obecnie odmian silników liniowych są tzw. płaskie liniowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi i cewkami skupionymi, ang. skrót CW-FLPMSM, w których częścią ruchomą silnika, tzw. biegnikiem, jest twornik uzwojony z wykorzystaniem cewek skupionych, a częścią nieruchomą – stojanem jest bieżnia magnetyczna z magnesami trwałymi. Silniki te są wykonywane najczęściej jako tzw. silniki liniowe rdzeniowe, co oznacza, że ich biegniki posiadają rdzeń magnetyczny pakietowany z blach elektrotechnicznych. Popularność silników CW-FLPMSM wynika z prostoty ich budowy, niezawodności oraz jednocześnie dobrych parametrów użytkowych: wysokich wartości siły uciążu osiąganych z jednostki objętości i masy silnika, dobrej dynamiki napędu, wysokiej precyzji sterowania prędkością liniową i pozycjonowania silnika na bieżni magnetycznej. W artykule opisano typową konstrukcję silnika liniowego CW-FLPMSM. Następnie opisano główne założenia i sposób działania algorytmu do obliczania charakterystyk elektromechanicznych silników CW-FLPMSM, opracowanego w instytucie KOMEL dla potrzeb projektowania tego typu silników. Przykładowe wyniki obliczeń dla wybranego silnika CW-FLPMSM porównano z danymi katalogowymi producenta.

2. Konstrukcja silnika CW-FLPMSM

Konstrukcje silników liniowych CW-FLPMSM różnych producentów, z uwagi na nieskomplikowaną technicznie budowę tych silników, są do siebie mocno zbliżone pod względem kształtu biegnika i bieżni magnetycznej [1, 2]. Na rysunku 1 przedstawiono wygląd ogólny jednego z typów silnika CW-FLPMSM. U góry rysunku widać biegnik, stanowiący ruchomą część silnika liniowego, u dołu natomiast fragment bieżni magnetycznej z magnesami trwałymi. W biegniku celowo usunięto fragment powłoki żywicznej od strony szczeliny powietrznej silnika, dla uwidocznienia rozmieszczenia zębów pakietowanego rdzenia magnetycznego. Bieżnie magnetyczne silników CW-FLPMSM są wykonane z zastosowaniem magnesów z domieszkami pierwiastków ziem rzadkich, NdFeB. Z reguły stosuje się najprostsze konstrukcyjnie bieżnie, z płaskimi magnesami trwałymi naklejonymi na płaskim jarzmie

Streszczenie: Artykuł dotyczy metody obliczania charakterystyk elektromechanicznych płaskich liniowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi i cewkami skupionymi CW-FLPMSM. Metoda ta bazuje na wykorzystaniu analizy polowej 2D rozkładu pola magnetycznego w silniku, z ruchomą siatką elementów skończonych. Wpierw opisano typową konstrukcję silnika CW-FLPMSM. Następnie przedstawiono główne założenia i sposób działania algorytmu do obliczania charakterystyk elektromechanicznych silników CW-FLPMSM, opracowanego w instytucie KOMEL dla potrzeb projektowania tego typu silników. Przykładowe wyniki obliczeń dla wybranego silnika CW-FLPMSM porównano z danymi katalogowymi producenta.

Słowa kluczowe: silnik liniowy, silnik liniowy płaski, silnik synchroniczny z magnesami trwałymi

FIELD-CIRCUIT ANALYSIS OF FLAT LINEAR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Abstract: The paper deals with the method of calculating the electromechanical characteristics of flat linear permanent magnet synchronous motors with concentrated windings. The method is based on a 2D FEA of magnetic field distribution in a motor, with moving mesh of finite elements. At first a typical construction of electromagnetic circuit in CW-FLPMSM is described. Next, the main assumptions and the scheme of algorithm operation to calculate the electromechanical characteristics of CW-FLPMSM are presented. Algorithm was developed in Komel institute for a purpose of CW-FLPMSM motor designing. Examples of the calculation results for the selected CW-FLPMSM are compared with the manufacturer's catalog data.

Keywords: linear motor, flat linear motor, permanent magnet synchronous motor

stalowym, spotyka się jednak także rozwiązania bieżni z magnesami zagłębionymi [2].

Konstrukcje obwodów elektromagnetycznych silników CW-FLPMSM różnych producentów są także mocno do siebie zbliżone. Rdzenie magnetyczne biegników w silnikach



Rys. 1. Przykład silnika CW-FLPMSM, u góry widoczny biegnik z częściowo odsloniętymi zębami rdzenia, na dole bieźnia magnetyczna z magnesami trwałymi

CW-FLPMSM mają zębki otwarte, proste, tj. o stałej szerokości wzdłuż całej wysokości zębka [1, 2, 6–9], jak pokazano na rysunku 2. W zębkach tych umieszczone są boki cewek skupionych [1, 2, 6–9], które dzięki pełnemu otwarciu zębów mogą być w prosty technologicznie sposób nasunięte na zęby rdzenia biegnika. Uzwojenia biegników są wykonane jako trójfazowe. Główne różnice w konstrukcjach obwodów elektromagnetycznych silników CW-FLPMSM dotyczą doboru konfiguracji liczby zębów Q_s w rdzeniu biegnika do liczby biegunów magnetycznych $2p$ na bieźni magnetycznej oraz sposobu ułożenia magnesów trwałych na bieźni.

Dobór kombinacji $Q_s/2p$ w biegniku silnika CW-FLPMSM jest takim samym zagadnieniem technicznym, jak dobór stosunku liczby zębów i biegunów w wirujących silnikach (lub generatorach) synchronicznych z magnesami trwałymi o cewkach skupionych, CW-PMSM. Wynika to z faktu, że obwód elektromagnetyczny silnika liniowego CW-FLPMSM zasadniczo może powstać przez odpowiednie rozcięcie i rozwinięcie obwodu elektromagnetycznego silnika CW-PMSM. Uzwojony biegnik silnika CW-FLPMSM jest odpowiednikiem twornika w silniku CW-PMSM, z tą jedynie różnicą, że twornik silnika CW-PMSM jest jednocześnie stojanem tego silnika, a nie jego

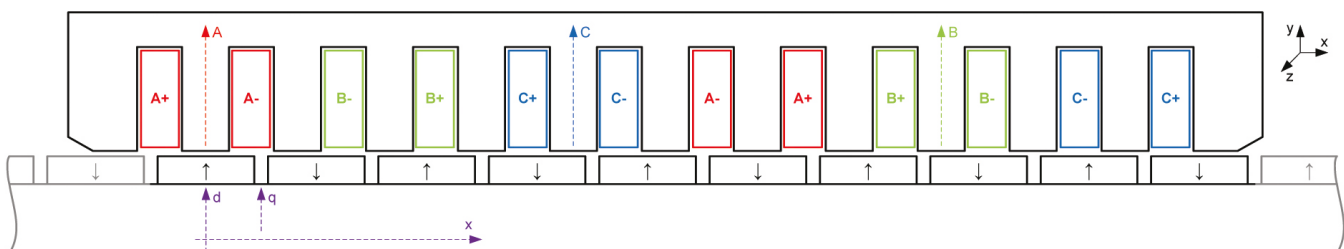
elementem ruchomym (wirnikiem). Zastosowanie wybranego stosunku $Q_s/2p$ w biegniku silnika CW-FLPMSM skutkuje koniecznością odpowiedniego doboru schematu uzwojenia biegnika, którego można dokonać z wykorzystaniem narzędzia [15], opracowanego zasadniczo dla wirujących maszyn CW-PMSM. Popularnymi kombinacjami liczby zębów do liczby biegunów stosowanymi w silnikach CW-FLPMSM są $Q_s/2p = 9/12, 6/8, 12/10$ oraz $10/9$ [1, 7–13].

Dobór kombinacji $Q_s/2p$ wpływa także na wymagania względem konstrukcji bieźni magnetycznej, a ściślej na sposób rozmieszczenia magnesów trwałych na jej powierzchni. Jest to związane z koniecznością ograniczania zjawiska tzw. siły zaczepowej [1, 2, 7–13], będącego zjawiskiem niepożądanym, skutkującym tętnieniami siły uciążu napędu liniowego, ograniczeniem precyzji pozycjonowania biegnika względem bieźni, drganiem napędu i zwiększonym hałasem. W celu ograniczenia siły zaczepowej przy wybranych kombinacjach $Q_s/2p$ konieczne jest np. stosowanie odpowiednio dobranego skosu magnesów na bieźni.

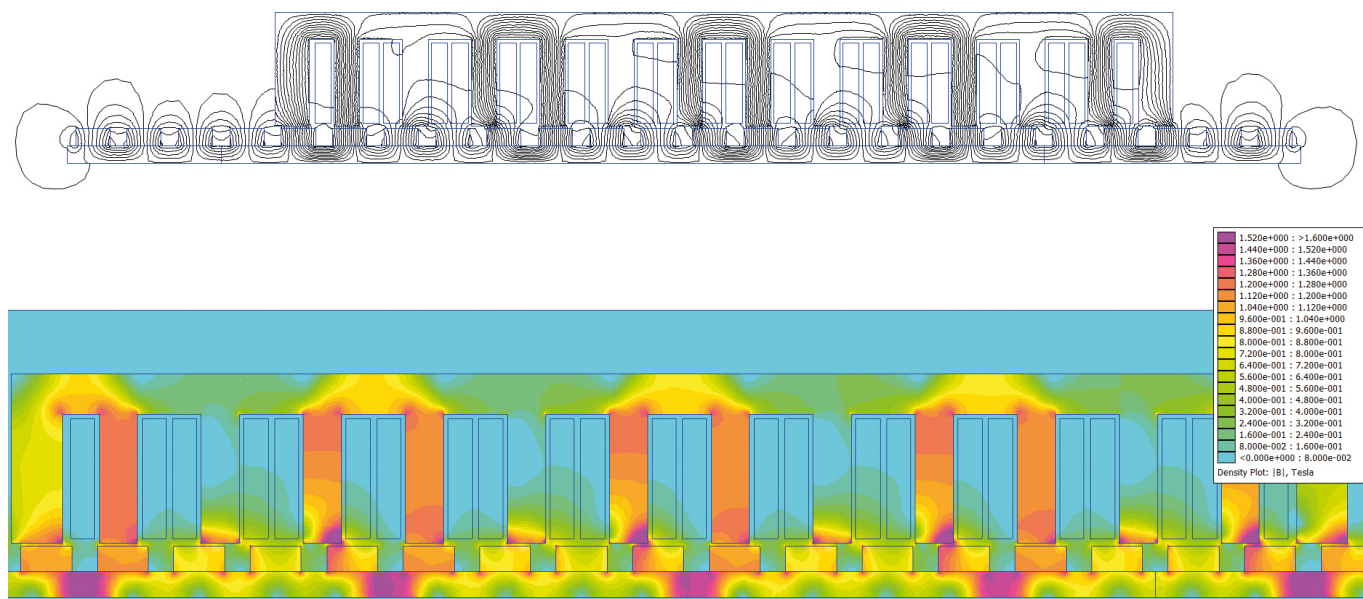
Silniki liniowe CW-FLPMSM są zbliżone do silników wirujących CW-PMSM także pod względem metod sterowania napędem elektrycznym. Siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu biegnika silnika CW-FLPMSM ma przebieg czasowy sinusoidalnie zmienny, wobec czego silniki te są zasilane prądem sinusoidalnie zmiennym z trójfazowych przekształtników energoelektronicznych. Podobnie jak w przypadku silników CW-PMSM czy ogólniej silników PMSM (klasyczne silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o uzwojeniach rozłożonych quasi-sinusoidalnie), przy sterowaniu silnikami CW-FLPMSM wykorzystywane są techniki osłabiania strumienia magnetycznego głównego w celu poszerzenia zakresu prędkości liniowej silnika, stosowane są odpowiedniki technik bezpośredniego sterowania polem magnetycznym (ang. *Field Oriented Control*, FOC) oraz bezpośredniego sterowania momentem (ang. *Direct Torque Control*, DTC) [14].

3. Metoda obliczania charakterystyk elektromechanicznych silników CW-FLPMSM

Z uwagi na coraz większe w kraju zainteresowanie napędami liniowymi z silnikami CW-FLPMSM w instytucie KOMEL opracowano metodę obliczeniową wraz z implementacją programową, umożliwiającą precyzyjne obliczanie charakterystyk elektromechanicznych tego typu silników. Metoda ta bazuje na dwuwymiarowej, magnetostatycznej, nieliniowej analizie



Rys. 2. Przykładowe rozwiązanie obwodu elektromagnetycznego silnika CW-FLPMSM o kombinacji liczby zębów biegnika do liczby biegunów na bieźni $Q_s/2p = 12/10$



Rys. 3. Przykładowe rozkłady linii ekwipotencjalnych pola magnetycznego i indukcji magnetycznej otrzymane w wyniku obliczeń elektromagnetycznych przeprowadzonych opisaną metodą dla wybranego silnika CW-PMSM, przy obciążeniu znamionowym

metodą elementów skończonych (MES) rozkładu pola magnetycznego w silniku. W dziedzinie MES metoda wykorzystuje ruchomą siatkę elementów skończonych, tzn. w toku obliczeń następuje krokowa zmiana pozycji biegnika względem bieźni magnetycznej. Z uwagi na to, iż na parametry silnika CW-FLPMSM istotny wpływ mają zjawiska elektromagnetyczne zachodzące pomiędzy skrajnymi zębami rdzenia biegnika a bieźnią magnetyczną, w opracowanej metodzie konieczne jest zamodelowanie pełnego przekroju poprzecznego (wzdłużnego) obwodu elektromagnetycznego silnika.

Założenia i sposób działania algorytmu obliczeniowego:

- w dziedzinie MES modelowany jest pełny przekrój poprzeczny silnika CW-FLPMSM w płaszczyźnie X-Y (rys. 2);
- w dziedzinie MES silnik musi być tak zamodelowany, by w pozycji wyjściowej/startowej biegnika oś elektryczna fazy A uzwojenia pokrywała się z osią magnetyczną d bieźni magnetycznej (jak na rys. 2);
- wymuszeniem w modelu obliczeniowym MES silnika są prądy w trójfazowym uzwojeniu biegnika;
- biegnik silnika jest zasilany prądami sinusoidalnie zmiennymi;
- zakłada się, że w zakresie regulacji prędkości liniowej, w którym silnik CW-FLPMSM pracuje ze stałym strumieniem magnetycznym głównym, optymalną metodą sterowania silnikiem jest metoda: $i_d = 0$, tzn. silnik jest zasilany wyłącznie tzw. prądem poprzecznym i_q [14] i przy tym zasilaniu silnik pracuje przy optymalnym ilorazie siły uciągu do prądu zasilania;
- powyżej tzw. prędkości bazowej silnik pracuje w strefie regulacji prędkości liniowej z osłabianiem strumienia magnetycznego głównego, co jest osiągnięte przez dodanie odpowiedniej składowej podłużnej i_d do prądu zasilania biegnika [14];

- w modelu MES silnika częścią nieruchomą silnika jest bieźnia z magnesami trwałymi, częścią ruchomą jest uzwojony rdzeń biegnika (model MES z ruchomą siatką elementów skończonych);
- w toku obliczeń biegnik przemieszcza się względem bieźni magnetycznej, ze stałym krokiem przemieszczenia podawanym w stopniach elektrycznych, liczba pozycji elektrycznych biegnika względem bieźni może być zadawana, stosownie do konstrukcji silnika;
- pełne przesunięcie biegnika względem bieźni obejmuje 360 stopni elektrycznych;
- dla każdej pozycji biegnika względem bieźni obliczane są strumienie magnetyczne skojarzone z poszczególnymi fazami uzwojenia, w efekcie obliczane są dyskretne przebiegi czasowe strumieni skojarzonych z fazami uzwojeń, w zakresie jednego pełnego okresu elektrycznego;
- dyskretne przebiegi czasowe strumieni skojarzonych są przeliczane na ciągłe funkcje czasowe strumieni skojarzonych;
- obliczane są ciągłe przebiegi czasowe napięć fazowych, jako pochodna ciągłych przebiegów czasowych strumieni skojarzonych;
- obliczane są przebiegi czasowe napięć międzyfazowych, jako różnica odpowiednich przebiegów czasowych napięć fazowych;
- dla każdej z pozycji biegnika względem bieźni obliczana jest metodą *Weighted Stress Tensor* siła uciągu silnika F_x , a następnie obliczana jest uśredniona siła uciągu silnika F dla wszystkich analizowanych pozycji biegnika;
- dla każdej z pozycji biegnika względem bieźni obliczana jest metodą *Weighted Stress Tensor* siła przyciągania biegnika do bieźni magnetycznej $F_{a,x}$, a następnie obliczana jest uśredniona siła przyciągania biegnika do bieźni F_a dla wszystkich analizowanych pozycji biegnika.

Przyjęte założenia dotyczące modelu obliczeniowego silnika CW-FLPMSM w zakresie sposobu sterowania silnikiem są odpowiednie dla tych konstrukcji silników, w których magnesy trwałe typu NdFeB są naklejane na powierzchni jarzma magnetycznego bieźni. W silnikach tych opór magnetyczny dla strumienia magnetycznego głównego pomiędzy rdzeniem biegnika a jarzmem bieźni jest taki sam w części podziałki biegunowej obejmującej magnesy trwałe i w części bez magnesu trwałego. Wówczas, podobnie jak w wirujących silnikach PMSM o konstrukcji z magnesami na powierzchni wirnika, optymalny iloczyn siły uciążu (momentu na wale w silnikach wirujących) do prądu uzyskuje się przy zasilaniu silnika wyłącznie prądem poprzecznym i_q .

4. Przykładowe wyniki obliczeń

Na rysunku 3 pokazano przykładowe rozkłady linii ekwipotencjalnych pola magnetycznego i indukcji magnetycznej otrzymane w trakcie obliczeń z wykorzystaniem opisanej metody charakterystyk elektromechanicznych wybranego silnika CW-FLPMSM, oferowanego na rynku przez jedną z renomowanych firm. Na rysunku 4 pokazano obliczone dla tego samego silnika przebiegi czasowe siły uciążu F_x , siły przyciągania $F_{a,x}$ oraz napięć międzyfazowych przy prędkości biegnika 1 m/s.

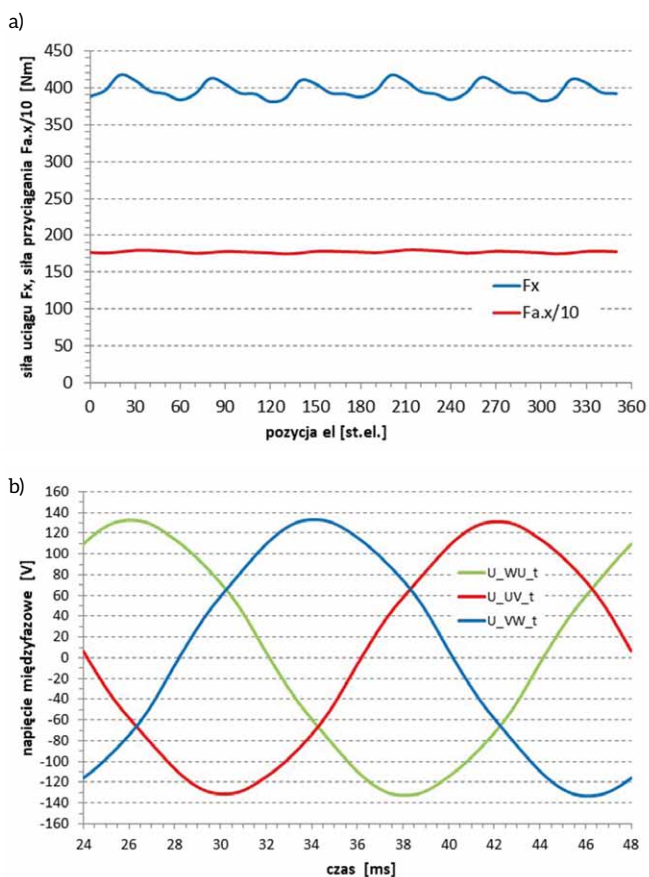
W tabeli 1 zestawiono porównanie wyników obliczeń elektromagnetycznych przeprowadzonych dla wybranego silnika CW-FLPMSM z rysunku 3 z odpowiednimi danymi katalogowymi producenta tego silnika.

5. Wnioski

Opracowana metoda obliczeniowa umożliwia przeprowadzenie obliczeń także dla silników CW-FLPMSM o konstrukcji bieźni magnetycznej innej niż z magnesami trwałymi naklejanymi na jarzmo bieźni. Można z pomocą tej metody projektować silniki z magnesami trwałymi zagłębionymi w rdzeniu magnetycznym bieźni (pakietowanym z blach prądnicowych), jednak wówczas, na etapie zadawania prądów zasilania biegnika, należy uwzględnić właściwy, tzn. optymalny kąt fazowy wskazu prądu zasilania względem osi magnetycznej podłużnej d silnika [14].

Opisana wyżej metoda obliczania charakterystyk elektromechanicznych płaskich silników liniowych może być wykorzystana także do projektowania odmian tych silników z klasycznymi uzwojeniami quasi-sinusoidalnymi.

Kolejnym etapem rozwoju opisanej metody obliczeniowej będzie uwzględnienie obliczania strat czynnych w rdzeniu magnetycznym biegnika i w magnesach trwałych, w oparciu



Rys. 4. a) Obliczone dla wybranego silnika CW-FLPMSM przebiegi czasowe siły uciągu F_x i siły przyciągania $F_{a,x}$, przy przemieszczaniu biegnika względem bieźni magnetycznej w zakresie jednej pary biegunów – obciążenie znamionowe; b) obliczone przebiegi czasowe napięć międzyfazowych przy obciążeniu znamionowym i prędkości biegnika 1 m/s

o obliczone rozkłady pola magnetycznego dla każdej pozycji biegnika względem bieźni.

Dobra zbieżność uzyskanych wyników obliczeń z odpowiednimi danymi katalogowymi producentów silników liniowych wskazuje na poprawność opisanego metody obliczeniowej i jej przydatność do projektowania obwodów elektromagnetycznych płaskich liniowych silników synchronicznych, CW-FLPMSM i ogólniej FLPMSM.

Literatura

- [1] BOLDEA I.: *Linear Electric Machines, Drives, and MAGLEVs Handbook*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2013.
- [2] GIERAS J.F.: *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems, Second Edition*. CRC Press, Boca Raton, FL, 2011.
- [3] Materiały informacyjne firmy Etel, <http://www.etel.ch/documentation/catalogs-flyers/>
- [4] Materiały informacyjne firmy Tecnotion, <https://www.tecnotion.com/downloads/>
- [5] Materiały informacyjne firmy Beckhoff, <https://www.beckhoff.pl/>
- [6] GOMAND J., REMY G., TOUNZI A., BARRE P.J., HAUTIER J.P.: *Impact of permanent magnet field on inductance variation of a PMLSM*, 2007 European Conference on Power Electronics and Applications, Aalborg, 2007, pp. 1–9.

Tabela 1. Zestawienie wyników obliczeń elektromagnetycznych z danymi katalogowymi dla wybranego silnika CW-FLPMSM

Parametr	Dane katalogowe	Wynik obliczeń
Back EMF [V]	76	76
F_a [N·m]	1700	1702
F_N [N·m]	400	397
F_p [N·m]	800	795
F_u [N·m]	900	929

Oznaczenia parametrów:

- Back EMF – wartość szczytowa napięcia międzyfazowego indukowanego w uzwojeniu biegnika od magnesów trwałych, przy prędkości liniowej 1 m/s;
- F_a – siła przyciągania biegnika do bieźni w stanie bezprądowym;
- F_N – znamionowa siła uciągu (długostrwała);
- F_p – siła uciągu przy przeciążeniu z przyrostem temperatury uzwojenia 6 K/s;
- F_u – siła uciągu przy przeciążeniu z przyrostem 10 K/s

- [7] REMY G., GOMAND J., TOUNZI A., BARRE P.J.: *Analysis of the force ripples of a current loaded PMLSM*, COMPEL. The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, vol. 28, issue 3, pp. 750–761, 2009.
- [8] REMY G., KREBS G., TOUNZI A., BARRE P.J.: *Detent Force Calculations of a PMLSM Using the Finite Element Method*. IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 129 (2009), issue 5, pp. 462–469.
- [9] BAATAR N., YOON H.S., PHAM M.T., SHIN P.S., KOH C.S.: *Shape Optimal Design of a 9-pole 10-slot PMLSM for Detent Force Reduction Using Adaptive Response Surface Method*, IEEE Trans. on Mag., vol. 45, no. 10, pp. 4562–4565, Oct. 2009.
- [10] MARTINEZ G., ATENCIA J., MARTINEZ-ITURRALDE M., GARCIA RICO A., FLOREZ J.: *Reduction of detent force in flat permanent magnet linear synchronous machines by means of three different methods*, Proc. IEEE Int. IEMDC, Jun. 2003, vol. 2, pp. 1105–1110.
- [11] YOSHIMURA T., KIM H.J., WATADA M., TORII S., EBIHARA D.: *Analysis of the reduction of detent force in a permanent magnet linear synchronous motor*. IEEE Trans. on Mag., vol. 31, no. 6, pp. 3728–3730, Nov. 1995.
- [12] BIANCHI N., BOLOGNANI S., CAPPELLO A.D.F.: *Back EMF improvement and force ripple reduction in PM linear motor drives*. IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551), 2004, pp. 3372–3377, vol. 5.
- [13] ZHU Y.W., JUNG K.S., CHO Y.H.: *The Reduction of Force Ripples of PMLSM Using Field Oriented Control Method*. CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference, Shanghai, 2006, pp. 1–5.
- [14] LOUIS J.P.: *Control of Non-conventional Synchronous Motors*. Wiley-ISTE, Jan 2012.
- [15] <https://www.emetor.com/windings/>

dr inż. Robert Rossa

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

artykuł recenzowany