

# Uticaj programirane promene faznog stava struje na specifičnu silu cilindričnih linearnih motora sa stalnim magnetima

## Influence of a Programmed Change of the Current Phase Angle on Specific Force of Tubular Permanent Magnet Linear Motors

Žarko Koprivica, Dragan Mihić

Energetski pretvarači i pogoni, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

**Rezime** - Cilindrični linearni motori sa stalnim magnetima su zbog svojih istaknutih osobina sve više zastupljeni u oblastima gde se tradicionalno koriste hidraulični i pneumatski aktuatori. U ovom radu je predložen metod koji se bazira na programiranoj promeni faznog stava struje u cilju ostvarenja veće specifične sile. Predloženi metod uzima u obzir uticaj zasićenja na elektromagnetsku interakciju i oblik struja. Simulacioni rezultati su dobijeni korišćenjem metode konačnih elemenata. Ovakav način određivanja faznog stava se može primeniti na sve mašine sa stalnim magnetima kod kojih je izraženo zasićenje magnetskog kola.

**Ključne reči** - Cilindrični linearni motori sa stalnim magnetima, specifična sila, metod konačnih elemenata, zasićenje magnetskog kola

**Abstract** - Due to their prominent properties, tubular permanent magnet linear motors are increasingly being employed in areas in which hydraulic and pneumatic actuators are traditionally used. In order to achieve the highest possible specific force, a method based on a programmed change of the phase angle is proposed. The proposed method takes the influence of the magnetic circuit saturation on the electromagnetic interaction and current form. Simulation results are obtained using the finite element method. This method of determining the phase angle can be applied to all machines with permanent magnets in which the saturation of the magnetic circuit is pronounced.

**Index Terms** - tubular permanent magnet linear motors, specific force, finite element method, saturation of magnetic circuit

### I UVOD

Hidraulični i pneumatski aktuatori su veoma zastupljeni u robotici, avio i auto industriji. Oni imaju svoje nedostatke kao što su ograničena radna temperatura fluida, kontaminacija fluida i opasnost od curenja i gubitka pritiska u sistemu. Zbog toga postoji sve veća potreba da se oni zamene elektromehaničkim aktuatorima [1]-[3]. U tu svrhu se koriste cilindrični linearni motori sa stalnim magnetima (CLMSM). Prednosti CLMSM u odnosu na hidraulične i pneumatske

aktuatora su veća efikasnost, jednostavnija kontrola pogonske sile, preciznije pozicioniranje i veća pouzdanost [4].

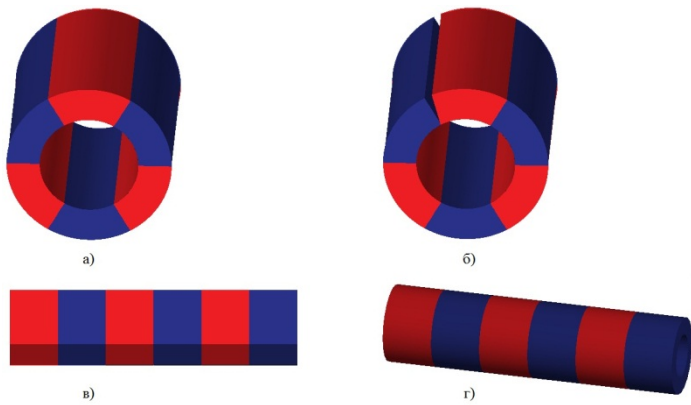
U cilju postizanja što veće specifične sile, predložene su razne metode uglavnom bazirane na modifikaciji geometrije motora kao što su optimizacija odnosa unutrašnjeg i spoljašnjeg prečnika statora [4], optimizacija jarma [5], optimizacija zupca [6], optimizacija oblika magneta [7] i optimizacija montaže stalnih magneta na translatoru [8]-[9]. Navedene metode uglavnom usložnjavaju geometriju i poskupljuju proces proizvodnje.

U ovom radu je prikazan način uvećanja specifične sile koji se bazira na programiranoj promeni faznog stava struje. Proračun sile se vrši korišćenjem softverskog paketa FEMM (Finite Element Method Magnetics) [10] koji se bazira na metodi konačnih elemenata. Konstrukcija i princip rada CLMSM-a su prikazani u drugom poglavlju. U trećem poglavlju je izvršeno modelovanje CLMSM-a i analiza magnetskog polja. U četvrtom poglavlju je predložen način uvećanja specifične sile. Zaključci su izvedeni u petom poglavlju.

### II KONSTRUKCIJA I PRINCIP RADA CLMSM-A

CLMSM su električni motori čija konstrukcija proizilazi iz konvencionalnih sinhronih motora sa stalnim magnetima. Postupak dobijanja CLMSM-a od obrtne mašine se može objasniti misaonim eksperimentom. Rotor sinhronog motora se zaseče po uzdužnoj osi, zatim se ispruži, i na kraju zavije po poprečnoj osi u cilindar kao što je prikazano na slici 1. Na taj način, stalni magneti formiraju naslagane prstenove naizmeničnog polariteta [11]. Stator CLMSM-a se sastoji iz cirkularnih (kružnih) namotaja smeštenih u žlebove magnetskog kola koji su poluzatvorenog oblika. Ovakva konstrukcija je izabrana jer umanjuje komponentu valovitosti sile koja je posledica interakcije između stalnih magneta na translatoru i zubaca magnetskog kola statora [12].

Na stator CLMSM-a dovodi se simetričan trofazni sistem napajanja. On stvara raspodelu magnetskog polja koja se translatorno pomera. Međusobnim delovanjem ovog polja i polja stalnih magneta generiše se linijska pogonska sila koja deluje na translator.



**Slika 1.** (a) Rotor sinhronog motora sa stalnim magnetima (b) rotor sinhronog motora sa stalnim magnetima sa malim zasekom (v) razvijeni rotor sinhronog motora – translator planarnog linearnog motora sa stalnim magnetima (g) translator cilindrični linearnog motora sa stalnim magnetima.

### III MODELOVANJE CLMSM-A METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Pošto je CLMSM osnosimetričan, njegov 2D model u programu FEMM je predstavljen polovinom poprečnog preseka motora, slika 2. Dimenzije motora izražene u milimetrima su date na slici 3. Stator sadrži dvanaest žlebova. Translator je tri puta duži od statora kako bi se eliminisale privlačne sile između krajeva translatora i krajeva magnetskog kola statora. Svaki fazni namotaj motora se sastoji od 30 provodnika, pri čemu je pozitivan smer motanja “u papir”, a negativan “van papira”. Pored toga, za svaki deo mašine su dodeljeni odgovarajući materijali, definisani su granični uslovi kao i mreža konačnih elemenata koja je prikazana na slici 4.

Električni period translatora jednak je dužini jednog para polova  $2\tau = 39.6\text{mm}$ . U slučaju kada se fazni stav struje menja linearno, tada pomeraju translatora od  $2\tau$  odgovara promena faznog stava struje statora za  $360^\circ$ . Saglasno slici 3, površina poprečnog preseka namotaja je  $S = 27.6\text{mm} \times 5.8925\text{mm} = 162.633\text{mm}^2$ . Imajući u vidu da je tipična vršna vrednost gustine struje kod sinhronih mašina sa stalnim magnetima  $J_{\max} = 10\text{A}/\text{mm}^2$  [13],

nominalna struja motora je  $I_{\text{nom}} = J_{\max} \cdot S / (30\sqrt{2}) = 38.33\text{A}$ .

Struje statora su date izrazima:

$$\underline{I}_a = I_{\text{nom}} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{i\varphi}, \underline{I}_b = I_{\text{nom}} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{i(\varphi-120^\circ)}, \quad (1)$$

$$\underline{I}_c = I_{\text{nom}} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{i(\varphi-240^\circ)},$$

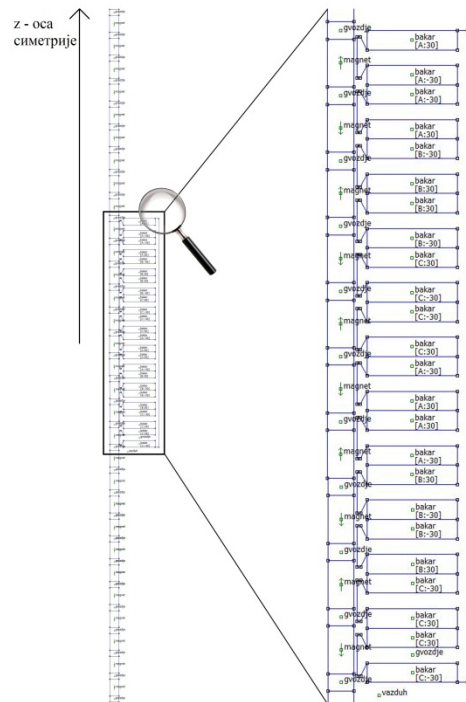
dok se fazni stav koji se menja linearno definiše kao

$$\varphi = \frac{-z}{39.6\text{mm}} + \varphi_0, \quad (2)$$

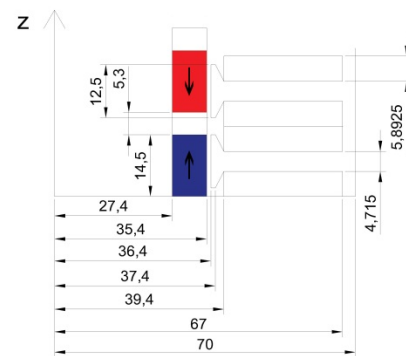
gde je  $\varphi_0$  početna faza. Predznak minus je posledica toga što se za pozitivnu učestanost napajanja translator kreće u negativnom smeru z ose. Početna faza je određena tako da se ostvari maksimalna pogonska sila za položaj  $z = 0$ .

Slike 5 i 6 prikazuju raspodelu linija magnetskog fluksa i magnetske indukcije, respektivno. Na osnovu raspodele magnetske indukcije može se uočiti da delovi magnetskog kola mašine ulaze u zasićenje, što je prvenstveno izraženo u zupcima.

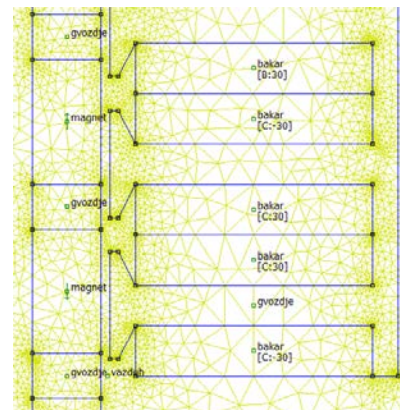
Ova pojava ima direktan uticaj na oblik sile, njenu vrednost i valovitost.



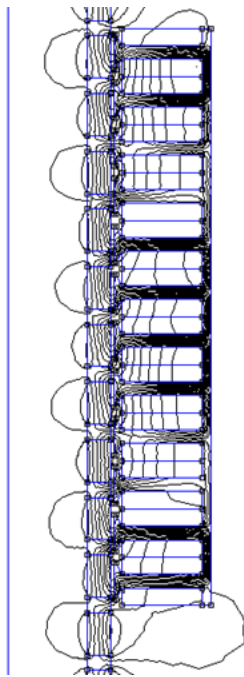
**Slika 2.** Model motora u programu FEMM



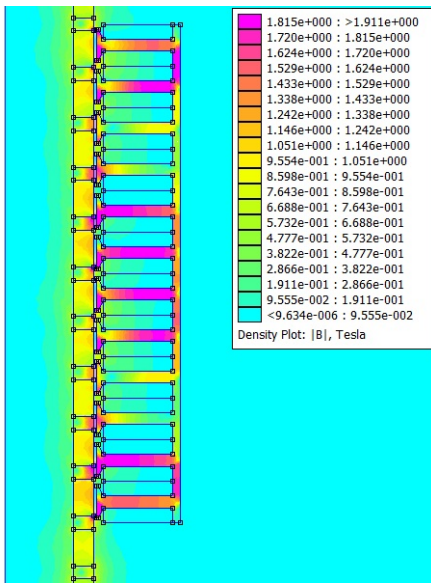
**Slika 3.** Dimenzije motora



**Slika 4.** Podela domena na konačne elemente



Slika 5. Raspodela linija fluksa



Slika 6. Raspodela inteziteta magnetske indukcije

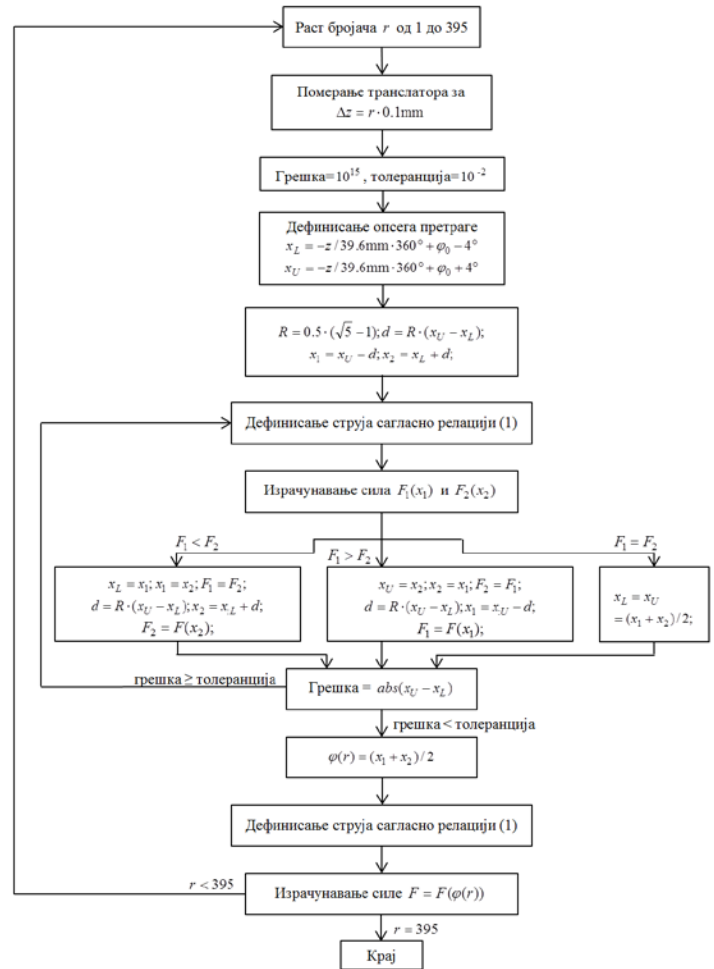
#### IV PREDLOŽENI NAČIN UVEĆANJA SPECIFIČNE SILE

Kao što je već rečeno, linearna promena faznog stava struje podrazumeva da se on menja saglasno relaciji (2). U cilju uvećanja specifične sile predlaže se programirana promena faznog stava struje. Ovaj pristup se zasniva na određivanju faznog stava struje tako da se za svaki položaj translatora postigne maksimalna pogonska sila. U primenjenom algoritmu određivanje faznog stava se vrši podelom opsega pretrage zlatnim presekom. Za određeni položaj translatora, opseg pretrage je:

$$\text{Opseg} = [-z/39.6\text{mm} \cdot 360^\circ + \varphi_0 - 4^\circ, -z/39.6\text{mm} \cdot 360^\circ + \varphi_0 + 4^\circ]. \quad (3)$$

Usvojeni opseg je rezultat pretpostavke da maksimalna apsolutna razlika faznih stavova kod predloženog metoda i linearnog pristupa ne prelazi  $4^\circ$ . Izborom šireg opsega se ne utiče na rezultat, dok se vreme simulacije uvećava.

Na slici 7 je prikazan algoritam na kojem se bazira predloženi način uvećanja specifične sile. U svakom koraku simulacije se vrši pomeraj translatora za  $\Delta z = 0.1\text{mm}$ . Pošto je period translatora  $39.6\text{mm}$  potrebno je izračunati silu u 396 tačaka. U početnom položaju vrednost sile je ista kao kod linearne promene faznog stava i zato brojač raste do 395.

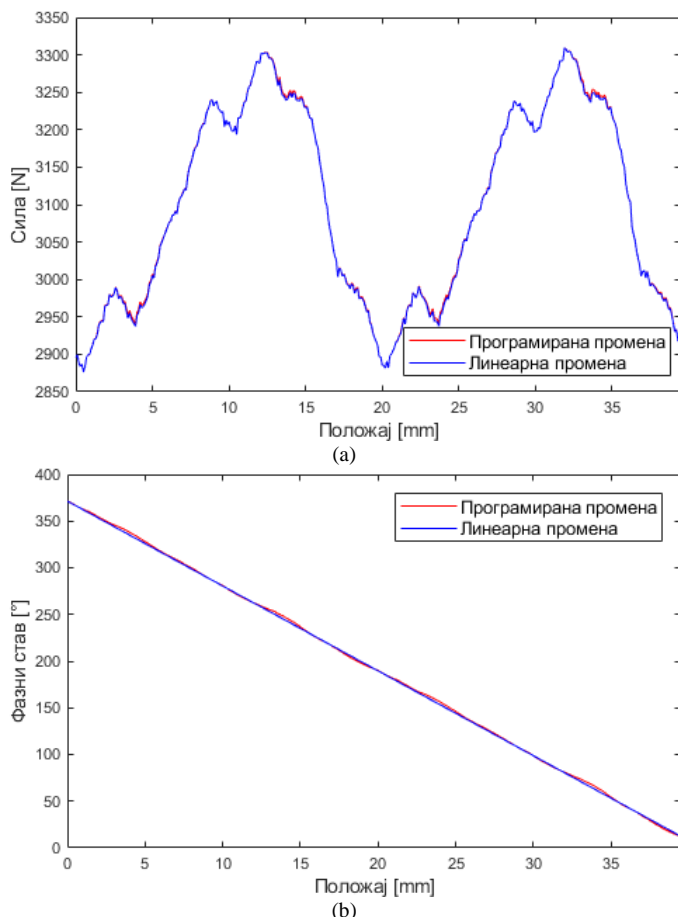


Slika 7. Algoritam na kojem se bazira predloženi način uvećanja specifične sile

Nakon definisanja greške i tolerancije, definiše se opseg pretrage saglasno relaciji (3). Pravilom zlatnog preseka, unutar opsega se određuju dve tačke  $x_1$  i  $x_2$ . U tim tačkama se izračunavaju sile i te vrednosti se porede. Nove granice pretrage se određuju u zavisnosti od odnosa dobijenih sila. Greška se izračunava kao apsolutna razlika granica opsega. Ukoliko je nova greška manja od tolerancije, fazni stav se računa kao aritmetička sredina  $x_1$  i  $x_2$ , a ako nije manja postupak se ponavlja. Zatim se izračunava vrednost sile za optimalnu vrednost faznog stava. Postupak se ponavlja dok brojač ne dostigne krajnju vrednost.

Poređenje simulacionih rezultata programiranog i linearnog određivanja faznog stava je prikazano na slici 8. Kao što se može

videti na slici 8(a) postoji velika bliskost ostvarenih sila. Međutim, generisana sila je veća u slučaju predloženog pristupa za svaki položaj translatora. Odgovarajuća srednja vrednost sile je 3098.6N, dok je u slučaju linearne promene ostvarena vrednost 3097.57N. Slično kao za pogonsku silu, između faznih stavova postoji velika sličnost, što se uočava na slici 8(b). Maksimalna razlika faznih stavova za isti položaj translatora je  $3.3^\circ$ , čime se potvrđuje opravdanost izbora opsega pretrage.



**Slika 8.** (a) Zavisnost sile od položaja sa linearnom i programiranom promenom faznog stava struje (b) zavisnost faznog stava od položaja sa linearnom i programiranom promenom faznog stava struje

Posmatrajući sliku 8(a) može se uočiti izražena valovitost sile. Ona je uglavnom posledica privlačne sile između magneta na translatoru i zubaca magnetskog kola statora. Kada se translator pomera duž z ose, raspodela linija polja se menja, pa se magnetsko kolo statora drugačije zasićuje. Zbog te nelinearnosti se fazni stav ne menja linearno sa promenom položaja ukoliko se želi ostvariti maksimalna pogonska sila u svakom položaju. Predloženi metod to uzima u obzir i na taj način se postiže veća specifična sila. Kao što se može videti ne postoji značajno uvećanje srednje vrednosti sile, ali predloženi metod pokazuje unapređenje u odnosu na klasičan način promene faznog stava.

## V ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazan način uvećanja specifične sile CLMSM-a metodom koji se bazira na programiranoj promeni faznog stava struje. Pokazano je da zasićenje magnetskog kola ima direktan uticaj na optimalni fazni stav struje. Predloženi metod se može primeniti u slučajevima kada nije bitno brzinu održavati konstantnom, već je bitno ostvariti što veću pogonsku silu.

## LITERATURA

- [1] Wu, Y.C., Cirolini, M., Hayashi, T.C., Ziemniczak, A., Perondi, E.A., Eckert, P.R. Multiphysics analysis of tubular linear permanent magnet synchronous motor operating in crude oil, in Proc. *12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, Neuchatel, Switzerland, 1-3 July 2019. <https://doi.org/10.1109/ldia.2019.8770982>
- [2] Lee S., Kim, W.J. Active suspension control with direct-drive tubular linear brushless permanent-magnet motor, *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, Vol. 18, No. 4, pp. 859–870, 2010. <https://doi.org/10.1109/tcst.2009.2030413>
- [3] Bol, E.D. Investigation of linear motors as electric actuators for aircraft, *Boeing Technical Journal*, 2018.
- [4] Bianchi N., Bolognani, S., Corte, D., Tonel, F. Tubular linear permanent magnet motors: An overall comparison, *IEEE Transaction Industri Application*, Vol. 39, No. 2, pp. 466–475, 2003. <https://doi.org/10.1109/tia.2003.809444>
- [5] Basak A., Flores Filho A.F. Design optimisation of a novel slotless linear stepping motor, in Proc. *7th International Conference on Electrical Machines and Drives, ICEMD*, Durham, UK, pp. 368-372, 11-13. September 1995.
- [6] Commins, P., Moscrop, J., Cook, C. Novel tooth design for a tubular linear motor for machine tool axis, in Proc. *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, Istanbul, Turkey, pp. 660–665, 13-15. April 2011. <https://doi.org/10.1109/icmech.2011.5971198>
- [7] Wang, Q., Chen, Y., Guo, Y., Zhang, J., Li, Y. Performance modeling and analysis of a doubly yokeless permanent magnet linear motor with improved thrust force quality, *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 160586-160594, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2950951>
- [8] Wang, J., Howe, D., Lin, Z. Comparative studies on linear motor topologies for reciprocating vapour compressors, in Proc. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Antalya, Turkey, pp. 364–369, 3-5. May 2007. <https://doi.org/10.1109/iemdc.2007.382694>
- [9] Tavani N.R., Dinavahi, V. Design of slotted permanent magnet linear synchronous motor for improved thrust density, in Proc. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Chicago, pp. 1225-1228, 12-15. May 2013. <https://doi.org/10.1109/iemdc.2013.6556289>
- [10] Meeker, D.C. *Finite Element Method Magnetics, Version 4.2*, 2018.
- [11] 4020 and 5020 High Performance Linear Servomotor Technical Data Sheet, Moog Inc., Elma, NY, 2017. <https://www.moog.com/literature/MCG/LinearServoMotorDtS.pdf> [pristupljeno 15.01.2021]
- [12] Zhu, Y.W., Koo, D.H., Cho, Y.H. Detent force minimization of permanent magnet linear synchronous motor by means of two different methods, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 11, pp. 4345-4348, 2008. <https://doi.org/10.1109/tmag.2008.2001320>
- [13] Hendershot, J.R., Miller, T.J.E. *Design of brushless permanent-magnet machines*, Motor Design Books LLC., USA, 2010.

## AUTORI

**Žarko Koprivica**, mast. inž. el. i rač., Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, kopri@etf.rs  
**doc. dr Dragan Milić**, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, dragan84m@etf.bg.ac.rs