

Določitev karakteristik linearnega aktuatorja

Gorazd Štumberger

Univerza v Mariboru, Fakulteta za elektrotehniko, računalništvo in informatiko

Smetanova 17, 2000 Maribor

gorazd.stumberger@uni-mb.si

Determining characteristics of a linear actuator

Abstract: *This paper deals with the experimental methods used for determining magnetically nonlinear characteristics of a linear synchronous reluctance motor (LSRM). Current and position dependant characteristics of flux linkages, thrust and friction force of the tested LSRM are determined experimentally using a controlled voltage source inverter, closed loop current control and stepwise changing supply voltages.*

1 Uvod

Sestavni del avtomatiziranih industrijskih pogonov so tudi pogoni z linearnimi motorji. Zadovoljivo obnašanje pozicijsko vodenega pogona z linearnim motorjem je mogoče doseči le, če zelo dobro poznamo model motorja in njegove parametre.

V tem delu obravnavamo linearni aktuator – linearni sinhronski reluktančni motor (LSRM), ki je bil skonstruiran za glavni pogon v orodnih strojih [1]. Bistveni sestavni del omenjenega motorja je tudi železno jedro, ki povzroča magnetno nelinearno in anizotropno obnašanje celotnega motorja. Če omenjene magnetno nelinearne in anizotropne narave motorja ne upoštevamo pri snovanju in izvedbi vodenja, je zahtevane statične in dinamične lastnosti pozicijsko vodenega pogona s takšnim motorjem le težko doseči.

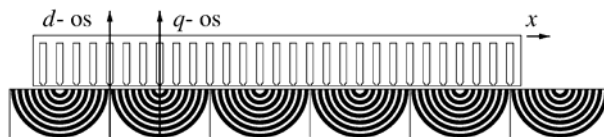
Magnetno nelinearno in anizotropno obnašanje železnega jedra LSRM se navzven kaže v obliki od toka in položaja odvisnih karakteristik magnetnih sklepov, potisne sile in sile trenja. Pri tem je karakteristike magnetnih sklepov in potisne sile mogoče določiti

eksperimentalno ali numerično s pomočjo izračunov z metodo končnih elementov [2][3], medtem ko je karakteristike sile trenja mogoče določiti le eksperimentalno.

V tem delu je najprej predstavljen splošni dvoosni dinamični model LSRM, v katerega je mogoče vključiti že omenjene karakteristike magnetnih sklepov, potisne sile in sile trenja. V nadaljevanju so podani opisi eksperimentalnih metod, s katerimi je omenjene karakteristike mogoče določiti. Predstavljene eksperimentalne metode temeljijo na uporabi dvoosnega modela LSRM, trifazno-dvofazne transformacije, nape- tostno vodenega pretvornika, regulacije toka ter meritev napetosti, toka in potisne sile LSRM. V eksperimentalno določenih karakteristikah LSRM so na ta način zajeti vsi vplivi, ki nastopajo tudi pri izvedbi vodenja pogona. Z opisanimi metodami določene karakteristike magnetnih sklepov, potisne sile in sile trenja testnega LSRM so predstavljene na koncu članka.

2 Zgradba LSRM in dinamični model

Zgradba testnega LSRM je shematično predstavljena na sliki 1.



Slika 1: Shematska predstavitev zgradbe LSRM

Testni motor [1] ima kratek in prečni primar na katerem je nameščeno trifazno navitje vezano v zvezdo. Dolgi in mirujoči sekundar je sestavljen iz elementarnih segmentov, katerih dolžina je enaka polovi delitvi. Vsak elementarni segment sekundarja je sestavljen iz polkrožnih izsekov iz magnetno dobro prevodne

pločevine, ki so zaliti z magnetno slabo prevodnim aluminijem. Glede na to je za vsak segment mogoče določiti os največje magnetne prevodnosti (d -os) in os najmanjše magnetne prevodnosti (q -os).

Zaradi vezave navitij v zvezdo so toki LSRM linearno odvisni, in jih ne moremo izbrati kot linearno neodvisne spremenljivke potrebne pri sintezi vodenja. Pri sintezi vodenja pa lahko uporabimo dvoosni dinamični model LSRM, ki je zapisan v koordinatnem sistemu d - q . Slednji je orientiran s smerema največje in najmanjše magnetne prevodnosti. V nadaljevanju je podan zapis enačb dvoosnega dinamičnega modela LSRM, v katerih so upoštevani tudi vplivi magnetne nelinearnosti železnega jedra. Postopek izpeljave omenjenega modela je nakazan v [4]. Model je podan z enačbo (1), ki opisuje napetostna ravnotežja in z enačbo (2), ki opisuje gibanje.

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \frac{\pi}{\tau_p} \frac{dx}{dt} \begin{bmatrix} -\psi_q \\ \psi_d \end{bmatrix} \quad (1)$$

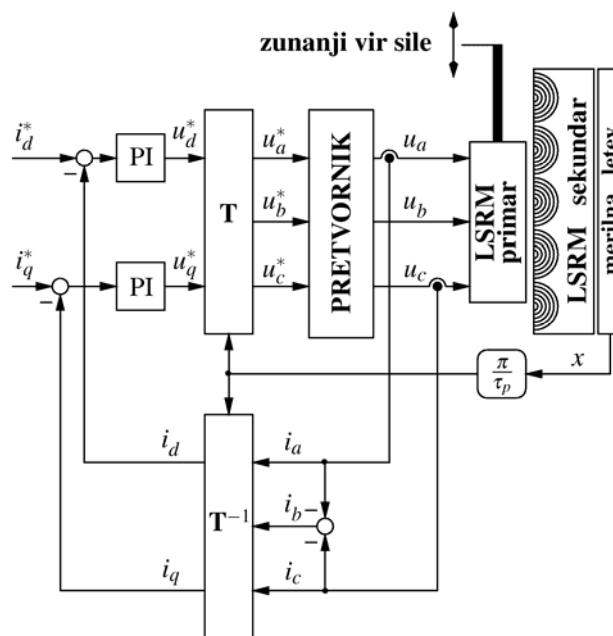
$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F - F_T - F_B \quad (2)$$

Pri tem so z u_d , u_q , i_d , i_q , ψ_d , ψ_q označeni napetosti, toka in magnetna sklepa LSRM zapisani v koordinatnem sistemu d - q . Potisna sila je označena z F , sila trenja z F_T , sila bremena pa z F_B . Masa in položaj primarja sta označena z m in x , R je ohmska upornost primarnega navitja τ_p pa polova delitev.

Če želimo v dinamičnem modelu LSRM, ki je podan z (1) in (2), upoštevati tudi vplive železnega jedra, je treba določiti od tokov in položaja odvisne karakteristike magnetnih sklepov $\psi_d(i_d, i_q, x)$, $\psi_q(i_d, i_q, x)$, potisne sile $F(i_d, i_q, x)$ in sile trenja $F_T(i_d, i_q, x)$. Eksperimentalne metode s katerimi so bile določene omenjene karakteristike so opisane v nadaljevanju.

3 Eksperimentalni sistem

Eksperimentalni sistem, s katerim so bile določene od tokov in položaja odvisne karakteristike magnetnih sklepov, potisne sile in sile trenja, je shematično prikazan na sliki 2.



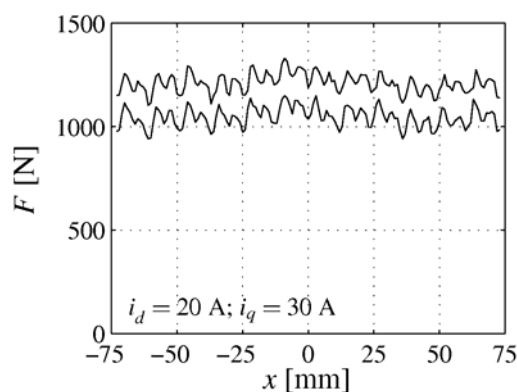
Slika 2: Eksperimentalni sistem – shematska predstavitev

Elementi eksperimentalnega sistema so: testni LSRM, zunanji vir sile, napetostni pretvornik voden s signalnim procesorjem v katerem se izvaja tokovna regulacija in transformacije, dve merilni verigi za meritev toka, merilna veriga za meritev položaja in merilna veriga za meritev sile. Toka i_d in i_q sta regulirana s PI regulatorjema. Referenčne vrednosti so označene z *. Napetosti in toki originalnega trifaznega sistema so označeni z u_a , u_b , u_c in i_a , i_b , i_c . S toki modela LSRM, ki je podan z (1) in (2), jih povezujeta ortogonalna transformacijska matrika \mathbf{T} in njen inverz $\mathbf{T}^{-1} = \mathbf{T}^T$. Transformacijska matrika \mathbf{T} je definirana s (3). Ničelna komponenta napetosti in ničelna komponenta toka sta zaradi vezave v zvezdo enaki nič in izpuščeni iz sheme.

$$\mathbf{T} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x + \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x + \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos\left(\frac{\pi}{\tau_p} x + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{\tau_p} x + \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \quad (3)$$

4 Določitev karakteristik potisne sile in sile trenja

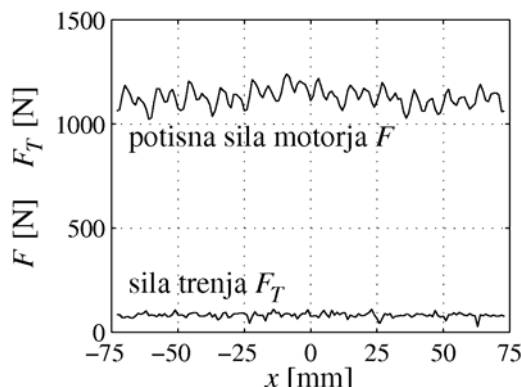
Karakteristiko potisne sile $F(i_d, i_q, x)$ in karakteristiko sile trenja $F_T(i_d, i_q, x)$ določimo z eksperimentalnim sistemom s slike 2. Z regulacijo zagotovimo konstantni vrednosti tokov i_d in i_q . Z zunanjim virom sile premikamo primar LSRM pri zelo nizki hitrosti (0.02 m/s) čez dve polovi delitvi v levo in potem še čez dve polovi delitvi v desno. Pri tem merimo silo med premikajočim se primarjem in zunanjim virom sile. Sila, izmerjena pri premikanju v levo in v desno, je prikazana na sliki 3.



Slika 3: Sila, izmerjena pri premikanju v levo in v desno

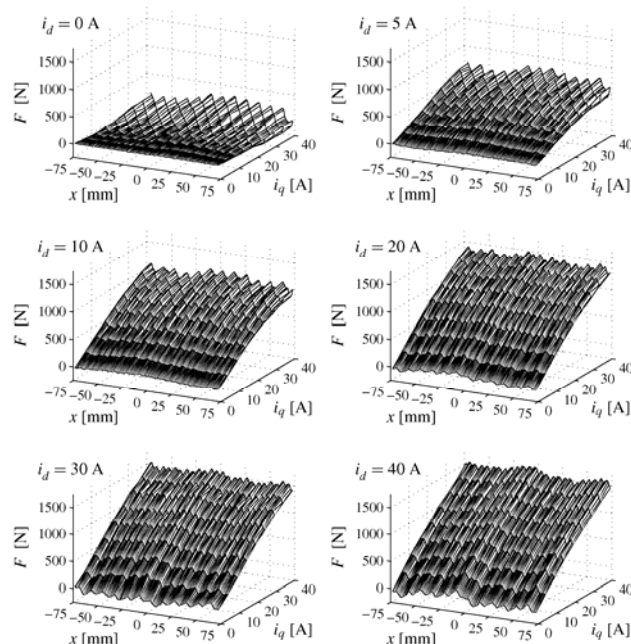
Ker sta med premikanjem v levo in v desno toka i_d in i_q konstantna, je v posameznih položajih konstantna tudi potisna sila. Razlika med izmerjenima silama pri premikanju v levo in desno je posledica sile trenja, ki nasprotuje smeri gibanja. Potisna sila je tako enaka polovici vsote obeh izmerjenih sil, sila trenja pa je enaka polovici razlike izmerjenih sil. Na

opisan način določeni karakteristiki potisne sile in sile trenja sta podani na sliki 4.



Slika 4: Potisna sila in sila trenja.

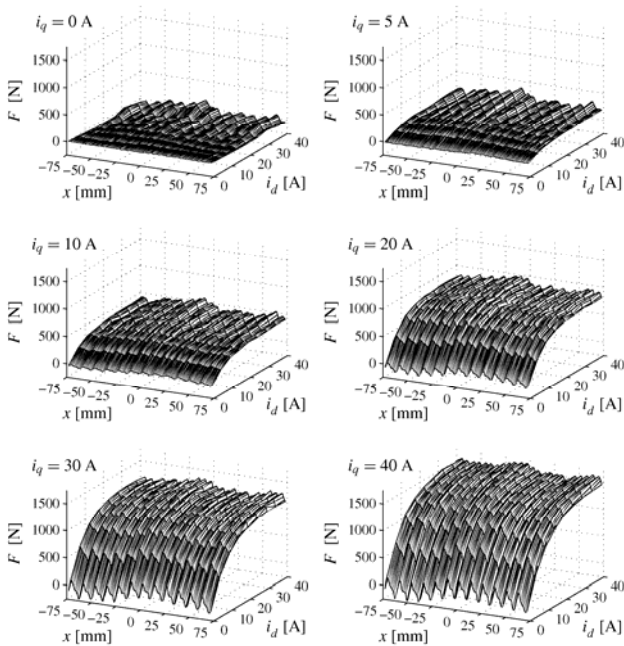
S ponavljanjem opisanega postopka za različne konstantne vrednosti tokov i_d in i_q so bile določene karakteristike potisnih sil, ki so podane na slikah 5 in 6.



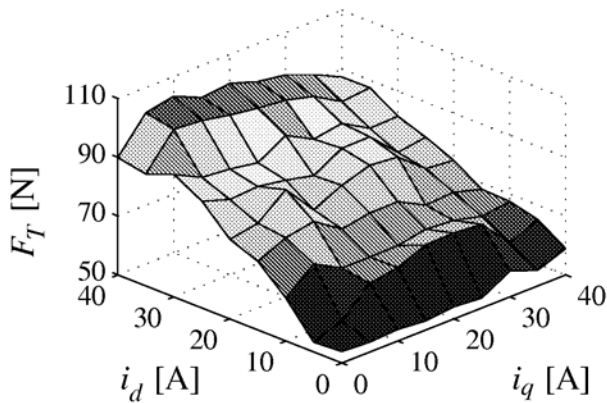
Slika 5: Karakteristike potisne sile

Sile trenja se s položajem spreminjajo bistveno manj kot potisne sile. Zaradi tega so sile trenja povprečene čez dve polovi delitvi. Karakteristika trenja, povprečena čez dve polovi delitvi je podana na sliki 7 kot funkcija tokov i_d in i_q . Ker so sile posnete pri zelo nizkih hitrostih, je na sliki 7 podana karakteristika trenja dejansko karakteristika Coulomb-ovega

trenja, ki je odvisna le od smeri gibanja in velikosti obeh tokov.



Slika 6: Karakteristike potisne sile



Slika 7: Karakteristika sile trenja povprečena čez dve polovi delitvi.

5 Določitev karakteristik magnetnih sklepov

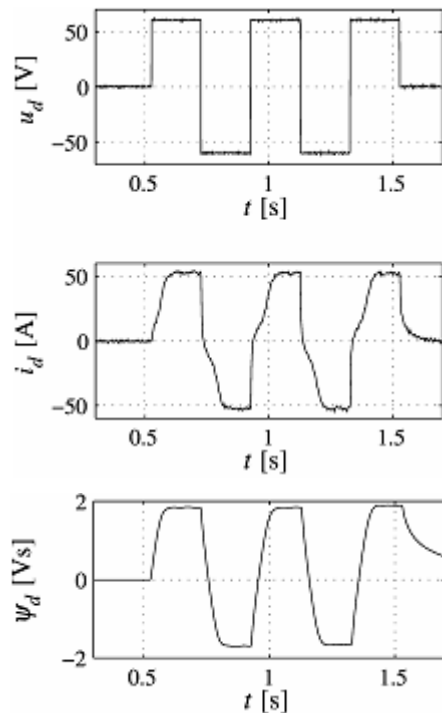
Tudi karakteristike magnetnih sklepov, določimo z eksperimentalnim sistemom, ki je prikazan na sliki 2. Ker se železno jedro LSRM obnaša magnetno nelinearno in anizotropno, magnetna prevodnost pa se spreminja vzdolž primarja in sekundarja zaradi utorov in izmenjajočih se segmentov iz železa in aluminija, sta oba magnetna sklepa odvisna od

obeh tokov in položaja (relativne lege med utori primarja in segmenti sekundarja).

Magnetni sklep v eni osi določimo tako, da primar blokiramo v izbranem položaju. S tokovno regulacijo poskrbimo, da je tok v izbrani osi konstanten. V ortogonalni osi stopnično spreminjamo napetost. Iz posnetih časovnih potekov napetosti in toka lahko z numerično integracijo (4) določimo časovni potek magnetnega sklepa.

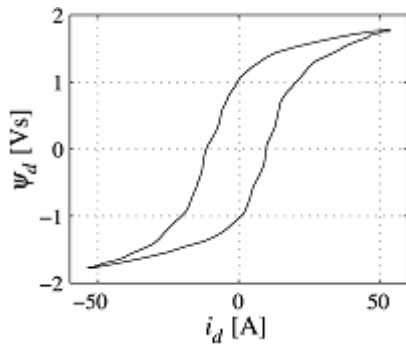
$$\psi_d(t) = \int_0^t (u_d(\tau) - R i_d(\tau)) d\tau. \quad (4)$$

Na sliki 8 sta podana posneta časovna poteka napetosti in toka v osi d ter s (4) izračunan pripadajoči časovni potek magnetnega sklepa v isti osi. Med testom je tokovna regulacija skrbela za konstantno vrednost toka v osi q.



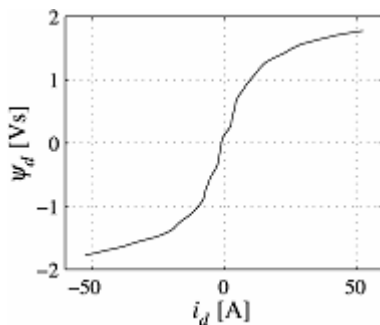
Slika 8: Posneta časovna poteka napetosti in toka ter izračunani časovni potek magnetnega sklepa v osi d pri konstantni vrednosti toka v osi q

Izračunano karakteristiko magnetnega sklepa lahko predstavimo tudi kot funkcijo toka. Na ta način dobimo karakteristiko železnega jedra v obliki histerezne zanke, ki je podana na sliki 9.



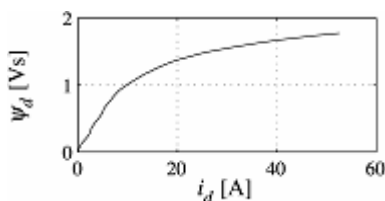
Slika 9: Karakteristika magnetnega sklepa podana v obliki histerezne zanke

Karakteristika podana na sliki 9 ni enolična. Zaradi tega jo težje vključimo v dinamični model LSRM. Karakteristiko s slike 9 zato preoblikujemo v enolično karakteristiko tako, da za vsako vrednost magnetnega sklepa izračunamo srednjo vrednost toka. Dobljena enolična karakteristika, ki jo je mogoče enostavno vključiti v dinamični model LSRM, je podana na sliki 10.

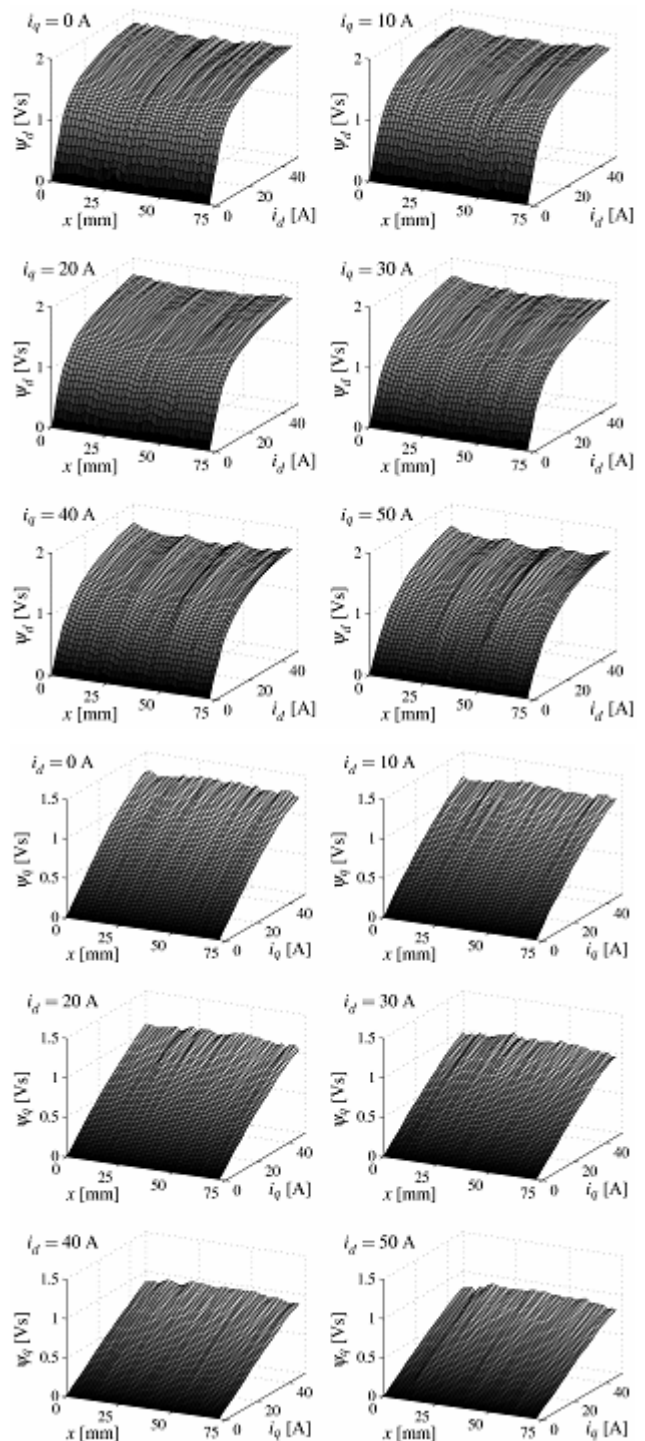


Slika 10: Enolična karakteristika magnetnega sklepa v osi d

Ker v LSRM ni trajnih magnetov, je karakteristika magnetnega sklepa simetrična glede na koordinatno izhodišče. Karakteristiko s slike 10 zato preslikamo v prvi kvadrant. S ponovnim povprečenjem toka za vsako vrednost magnetnega sklepa dobimo karakteristiko magnetnega sklepa, ki je podana na sliki 11.



Slika 11: Karakteristika magnetnega sklepa v prvem kvadrantu



Slika 12: Karakteristike magnetnih sklepov $\psi_d(i_d, i_q, x)$ in $\psi_q(i_d, i_q, x)$

Opisan postopek ponavljamo v obeh oseh pri različnih položajih in različnih vrednostih reguliranega toka. Tako določimo karakteristike magnetnih sklepov LSRM v celotnem delovnem področju. Podane so na sliki 12.

6 Sklep

V tem delu so predstavljene eksperimentalne metode za določitev magnetno nelinearnih karakteristik potisne sile, sile trenja in magnetnih sklepov testnega LSRM. S tako določenimi karakteristikami je mogoče dopolniti dinamični model LSRM. V modelu je karakteristike mogoče vnesti v obliki tabel in interpolacijskih funkcij ali pa jih najprej aproksimiramo in v model vnesemo aproksimacijske funkcije. Obnašanje tako dobljenega modela je zelo blizu obnašanja dejanskega LSRM. Magnetno nelinearni model LSRM je mogoče uporabiti pri načrtovanju nelinearnega vodenja in pri načrtovanju nelinearnih opazovalnikov.

7 Literatura

- [1] A. Hamler, M. Trlep, B. Hribnik, "Optimal secondary segment shape of linear reluctance motor using stochastic searching," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 34, no. 5, str. 3519--3521, 1998.
- [2] G. Štumberger, B. Štumberger, D. Dolinar, A. Hamler, Cross magnetization effect on inductances of linear synchronous reluctance motor under load conditions, IEEE Transactions on Magnetics., Sept. 2001, vol. 37, no. 5, str. 3658-3662.
- [3] G. Štumberger, B. Štumberger, D. Dolinar, O. Težak, Nonlinear model of linear synchronous reluctance motor for real time applications, Compel, 2004, vol. 23, no 1, str. 316-327.
- [4] G. Štumberger, B. Štumberger, D. Dolinar, Identification of linear synchronous reluctance motor parameters. IEEE Transactions on Industry. Applicationl, Sep./Oct. 2004, vol. 40, no. 5, str. 1317-1324.