

# Valovitost momenta vrtnje direktnog pogona

**Milan KOSTELAC, Zvonko HEROLD and Mario HRGETIĆ**

Fakultet strojarstva i brodogradnje,  
(Faculty of Mechanical and Naval Architecture,  
University of Zagreb),  
Ivana Lučića 5  
HR - 10000 Zagreb  
**Republic of Croatia**

milan.kostelac@fsb.hr

## Keywords

*Direct drive  
Drive mechanism  
High motor torque  
Motor*

## Ključne riječi

*Direktni pogon  
Motor  
Pogonski mehanizam  
Visoki moment vrtnje*

**Received (primljeno):** 2008-02-10

**Accepted (prihvaćeno):** 2008-08-25

## 1. Direktni pogon

Jedna od bitnih zadaća u oblikovanju pogonskih mehanizama tehničkih sustava koji su namijenjeni obavljanju određenog tehnološkog procesa jest iznalaženje za njih najprikladnijeg pogonskog sustava. Izvedba pogona iziskuje prilagođavanje radne točke pogonskog mehanizma, definirane nazivnim momentom i brzinom vrtnje, s radnom točkom procesa [1]. Općenito u najvećem broju rješenja prilagodba na radnu točku procesa obavlja se pomoću mehaničkog prijenosnika (slika 1), tako da se moment i brzina vrtnje na odgovarajući način promijene.

Za procese koji zahtijevaju veliki moment vrtnje pri malim brzinama, danas se najčešće koriste brzohodni pogoni u kombinaciji s nadograđenim mehaničkim

Izvornoznanstveni članak

Pogonski mehanizmi s direktnim pogonima postaju sve interesantniji svojom rasprostranjenosti i zauzimaju sve značajniju primjenu u tehničkim sustavima. Šuplja izvedba pogonskog člana, kratke aksijalne duljine predstavlja pogodnu strukturu koja se može integrirati u male prostore ugradnje. Kratka vremena pri pokretanju i zaustavljanju uz preopterećenost momentom vrtnje daju ovakvim pogonima mogućnost vrlo brzih odziva u radu. Točnost kutnog pozicioniranja je svakako značajka koja proizlazi iz davača pozicije, dok ponovljivost isključivo ovisi o točnosti cjelokupne izrade elemenata direktnog pogona. Pored navedenih nedostataka (visoka cijena, prisilno hlađenje vodom) valovitost razvijenog momenta vrtnje može pogoršati performanse u zahtjevnim pogonima. Pri radu u praznom hodu glavnog pogona, amplitude valovitosti momenta vrtnje uslijed debalansa rotora su zanemarive, dok su amplitude valovitosti momenta zbog promjenjive magnetske reluktancije momenta vrtnje motora unutar očekivanih vrijednosti.

## The Analysis of Torque Ripple in Direct Rotary Drive

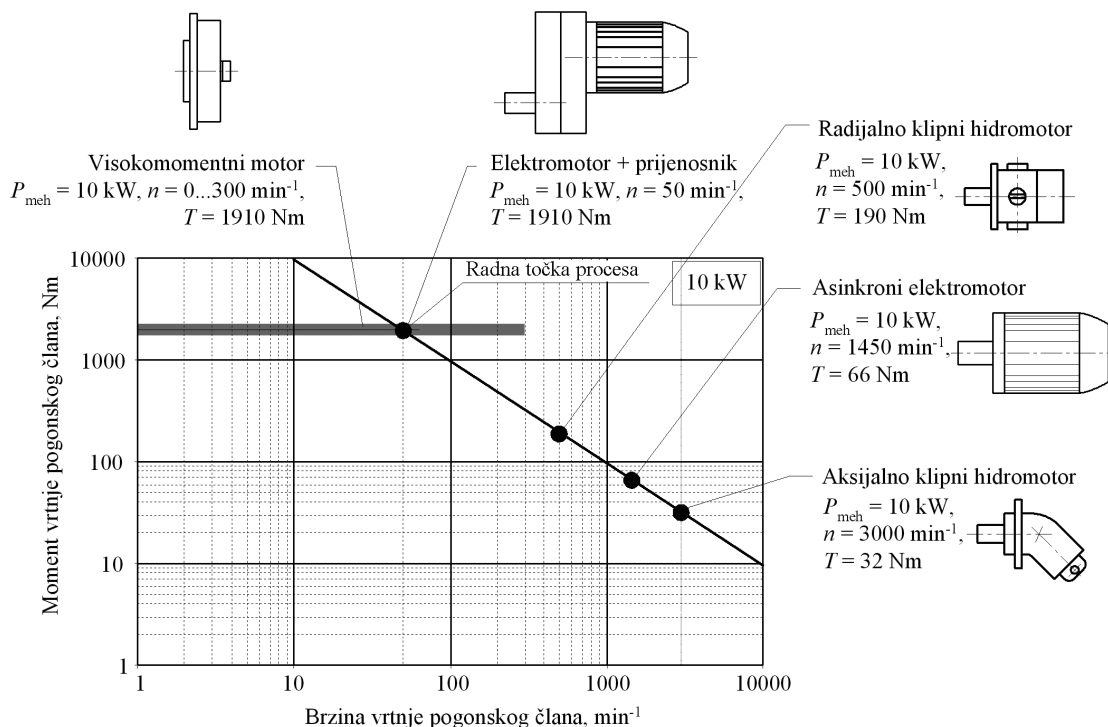
Original scientific paper

Modern direct drives, such as high-precision permanent magnet motors, are being increasingly used in the high-performance positioning systems and machine tool spindle drives. Provided with a hollow shaft and a small overall radial length they can be easily installed in confined spaces. The direct drives enable highly accurate positioning with favorable repeatability which depends on the manufacturing constraints. Commonly, the direct drives have a rapid dynamic response provided by a high torque-to-inertia ratio and are, therefore, characterized as fast and compact mechanical actuators. The main shortcomings of direct drives are relatively high cost, requirement for water cooling of the motor stator, and applied torque ripple. This torque ripple is a result of rotor unbalance, cogging torque, and the electromagnetic ripple torque. This paper includes experimentally supported work on the analysis of the torque ripple for the particular case of a motor working in the idle mode. The data have been collected by using the developed experimental electric vehicle with a direct drive built in the vehicle's front wheel.

prijenosnikom, tvoreći pogon s prigonom. Alternativu takvom konvencionalnom pogonu predstavlja pogon koji stvara dovoljno visoki moment vrtnje pri niskoj brzini, odakle mu i česti naziv sporohodni pogon.

Ako se radna točka procesa poklopi s pogonskom točkom, moguće je izbaciti mehanički prijenosnik, a pogonski uređaj tada postaje direktni pogon (njem. Direktantrieb, engl. Direct Rotary Drive). Međutim, uz pojam direktni pogon potrebno je nužno povezati i nisku brzinu vrtnje ( $n \leq 300 \text{ min}^{-1}$ , [2]), koja je karakteristična za sve sporohodne pogone. Izravni pogon kao jezično prihvatljivija terminologija, podrazumijeva najčešće brzohodni pogon tj. pogon visokim brzinama vrtnje pri relativno niskim momentima kao neposredni pogon ventilatora, crpke, kompresora, i dr.





Slika 1. Prilagodba pogona radnoj točki procesa  
 Figure 1. Drive adaptation with respect to operating point

broj ugradbenih komponenata smanjuje prostor ugradnje uz povećanje pogonske pouzdanosti i sigurnosti, a održavanje postaje jednostavnije i jeftinije. Iako u literaturi nema procjene pouzdanosti pogona s visokomomentnim motorima, kritični dio sustava odnosi se na pouzdanost izolacije namotaja [4]. Dodatne su značajke direktnih pogona s visokomomentnim motorom su brzi dinamički odziv s velikim ubrzanjima i usporenjima, promjenjiva brzina vrtnje u traženim granicama, pogon bez zračnosti, točnost pozicioniranja s visokom ponovljivosti, pogon vrlo velike torzijske i fleksijske krutosti, niski intenzitet buke, visok stupanj korisnosti, i dr., a pri koncipiranju zadatka, razvoja, pa do konstrukcijske razrade daje veći broj varijanti rješenja i moguće primjene.

Pored značajki koje idu u prilog primjeni visokomomentnih motora u direktnim pogonima, ovi pogoni imaju i nedostatke kao, još uvijek nisu cjenovno konkurentni konvencionalnim pogonima prvenstveno zbog pojedinačne i maloserijske proizvodnje u koju su ugrađeni visoki troškovi razvoja, troška frekvencijskog pretvarača s regulatorom, traže dodatni agregat za (vodeno) hlađenje statora (ili se struja kroz statorske namote mora držati u granicama dopuštenog zagrijavanja), neujednačenost razvijenog momenta vrtnje (iako malog iznosa) koja pogoršava performanse u zahtjevnim pogonima.

### 2.1. Primjena direktnih pogona s visokomomentnim motorom

Iz marketinških natpisa “Susrećete li se kao konstruktor u strojogradnji s problemom gdje s konvencionalnim pogonskim rješenjima, a vezano uz preciznost izvršenja određene radnje, dinamiku gibanja, održavanje ili komforost pogona, dolazite do granice mogućeg? Ili ste došli do nekog rješenja koje je ekonomski neodrživo? U oba slučaja isplati se pogledat što nudi...” [5], dobiva se spoznaja o sve većoj prisutnosti visokomomentnih motora na tržištu, a istovremeno otvara mogućnost šire primjene u tehničkim sustavima. Primjena translacijskih direktnih pogona je ograničena većinom na alatne strojeve i dijagnostičke uređaje za linearno pozicioniranje.

Iako su potekli iz namjenske industrije za pogone radarskih sustava, direktni pogoni postali su neizostavni konstrukcijski segment u razvoju tehnološke opreme i uređaja novije generacije. Vjerojatno najbolji način za ilustriranje značaja primjene visokomomentnog motora kao direktnog pogona je prikaz stvarnih primjera iz industrijske prakse, a najveću primjenu našli su u pogonu dizala, tehnološkoj opremi i alatnim strojevima.

### 3. Valovitost momenta vrtnje

Kod uobičajene izvedbe direktnog pogona s visokomomentnim motorom, visoka gustoća momenta vrtnje popraćena je njegovom povećanom valovitošću. Ako se pritom radi samo o visokom momentu vrtnje, to više nije važno. Međutim, ako se traži ravnomjeran hod pogonskog mehanizma u zahtjevnim pogonima, tada treba ili izmijeniti oblikovanje motora ili treba u frekvencijskom regulatoru unijeti posebne algoritme koji omogućavaju smanjenje valovitosti momenta vrtnje, što je troškovno povoljnija varijanta, pa se k tome teži u praksi.

Razloge valovitosti momenta vrtnje nije potrebno dodatno objašnjavati, ali konstruktor i korisnik, mora voditi računa o veličini valovitosti koja općenito iznosi 4...5% nazivnog momenta vrtnje, dok kod zahtjevnih pogona treba iznositi do 1%.

#### 3.1. Identifikacija i kompenzacija valovitosti momenta vrtnje

Trajni nedostatak sinkronih motora s trajnim magnetima je neujednačenost razvijenog momenta vrtnje, koji se periodički mijenja s promjenom kutne pozicije rotora tijekom vrtnje. Problemu neravnomjernosti momenta vrtnje treba posvetiti dodatnu pažnju [5-8], jer se posljedica očituje u kolebanju brzine vrtnje, koja, iako malog iznosa, pogoršava performanse pogona u zahtjevnim primjenama.

Efekti valovitosti momenta vrtnje su posebno nepoželjni kod preciznih mehaničkih sustava poput CNC alatnih strojeva. Pored toga, neravnomjernost momenta vrtnje može izazvati rezonanciju u mehaničkom dijelu pogonskog sustava, proizvesti dodatnu buku, a kod primjene u alatnim strojevima ostaviti vidljive tragove obrade na fino obrađenim površinama.

Rezultirajuća valovitost momenta vrtnje prouzročena je promjenama raspodjele magnetske indukcije u zračnom rasporu, greškama u izvedbi namota statora, te promjenjivom otporu magnetskog toka zračnog raspore nastalih uslijed statorskih utora.

Frekvencijski pretvarač, čiji je zadatak transformacija trofaznog ulaznog izmjeničnog napona u napon napajanja motora uz podešavanje napona unutar određenih granica po visini i frekvenciji, također pridonosi valovitosti momenta vrtnje, prvenstveno zbog vremenskih harmonika u strujnom signalu i vremenski promjenjivom slijeđenju između upravljačkog i stvarnog toka. Prema [9] "*ne postoji način koji u potpunosti može eliminirati prisutnost ovih brzih prijelaza momenta vrtnje u svim radnim uvjetima*".

Sinkroni motori s permanentnim magnetima grupiraju se u dvije osnovne skupine u ovisnosti o valnom obliku inducirane elektromotorne sile, koji može biti trapezoidnog ili sinusoidnog oblika.

#### 3.1.1. Motori s trapezoidnim oblikom magnetske indukcije

Trajni magneti u obliku magnetskih traka, učvršćeni i aksijalno paralelno poravnati na površini rotora formiraju individualne polove motora. Magnetska indukcija u zračnom rasporu ispod polova je konstantna, dok prolazi kroz nulu kako bi se postigao suprotni smjer polja između dva susjedna pola. Idealno magnetska indukcija treba biti raspoređen trapezoidno u namotu statora s okomitim pravokutnim signalom fazne struje kako bi stvorio konstantni i neovisni moment vrtnje o kutnom položaju rotora s trajnim magnetima.

U realnim izvedbama rubni dijelovi elektromagnetskog polja na krajevima polova uzrokuju odstupanje od idealnog trapezoidnog oblika magnetske indukcije koje se upotpunjuju strujama kroz stator koje nisu idealno okomite na magnetsko polje. Komutacija između faza statorskih namota zahtijeva konačne vremenske intervale tijekom kojih se značajno mijenja veličina momenta vrtnje. Pad veličine momenta vrtnje može dostići do 25 % nazivnog momenta [10]. Promjene momenta vrtnje događaju se periodički u sinkronizaciji s brzinom vrtnje rotora.

#### 3.1.2. Motori s sinusoidnim oblikom magnetske indukcije

Sinusni oblik distribucije magnetske indukcije oko zračnog raspore je teško postići kod motora s trajnim magnetima. Pritom je važno naglasiti da rezultirajuća magnetska indukcija ovisi i o izvedbi statorskog namota. Prostorna raspodjela magnetske indukcije može se podesti odgovarajućom geometrijom namota statora tako da se postigne sinusoidni oblik vala inducirane napona sa zadovoljavajućom točnošću. Za razliku od motora s trapezoidnim oblikom magnetske indukcije, ovi motori s trajnim magnetima rade na principu okretnog magnetskog polja, te stoga zahtijevaju sinusoidni valni oblik faznog napona i struje u statorskom namotu. Odstupanja magnetnog polja rotora izazivaju kolebanje momenta vrtnje malog intenziteta. Dodatno postoje i harmonijske komponente momenta vrtnje koje su rezultat viših harmonika i distorzije aktualnog oblika vala. Sveukupna valovitost momenta vrtnje ovih pogonskih motora je znatno manja nego kod motora s trapezoidnim oblikom magnetske indukcije, te im stoga daje prednost u pogonima kod kojih se zahtijevaju vrhunske performanse. Valovitost momenta vrtnje (harmonici magnetske indukcije) mogu dostići vrijednost 3...4% nazivnog momenta vrtnje.

#### 3.1.3. Harmonici zbog statorskih utora

Drugi uzrok nastajanja valovitosti momenta vrtnje je promjenjiva magnetska reluktancija u zračnom rasporu, koja se periodički mijenja kada pored utora statora prolaze rubovi magneti rotora. Skošenjem statorskih utora može se efikasno smanjiti valovitost momenta vrtnje. Va-



lovitost momenta vrtnje pri nižim frekvencijama rezultat su interakcije neizbalansirane magnetizacije individualnih polova rotora s ekscentricitetom rotora. Prema [11] ekscentricitet rotora je povezan s greškama koaksijalnosti uslijed tehnologije izrade odnosno s radijalnom zračnošću sustava uležištenja rotora. Valovitosti momenta vrtnje zbog statorskih utora (reluktantni harmonici) mogu dostići do 3 % nazivnog momenta i mijenjaju se s temperaturom ili nakon preopterećenja strujom. Raspored valovitosti momenta vrtnje može se znatno razlikovati i pri usporedbi s identičnim strojevima iz iste proizvodne serije.

Kolebanje brzine vrtnje kod niske frekvencije valovitosti momenta vrtnje automatski se kompenzira djelovanjem regulacijskog sustava, a kod viših frekvencija povoljno se poništava momentom tromosti rotora.

### 3.1.4. Vremenski harmonici

Vremenski uvjetovane valovitosti momenta vrtnje su uzrokovane distorzijama oblika vala struje u frekvencijskom pretvaraču. Za smanjenje njihovog efekta sklopna frekvencija pretvarača mora biti visoka, a u modulaciji se trebaju izbjegavati podharmonijske struje [12].

## 4. Analiza valovitosti momenta vrtnje

Analiza valovitosti momenta vrtnje provedena je na pogonskom mehanizmu koji je potpuno razvijen s koncepcijskom strukturalom i tehnološkom razradom baziranoj na principu pojedinačne proizvodnje (slika 3) i izrađen od strane domaćih proizvođača, izuzev kupovnog motora u "kit" izvedbi oznake: 1FW6130-0PA10 proizvođača Siemens LMS GmbH & CO (slika 2). Izabrani motor je višefazni sinkroni motor s uzbuđom trajnim magnetima s 33 para statorskih polova. Zadatak u procesu oblikovanja, jest konstrukcijsko integriranje statora i rotora u funkcionalnu cjelinu s podsustavima i njihovim komponentama (slika 3), kao što su uležištenje, mjerni sustav i hlađenje. Nezgodna strana pri montaži, odnosno u slučaju kvara bilo koje komponente pogonskog mehanizma, dosta je složena i komplicirana procedura ugradnje/izmjene samog rotora, odnosno statora zbog vrlo velike magnetske indukcije koja iznosi 2T.

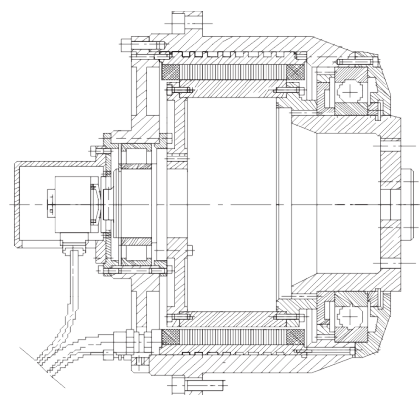
Karakteristike motora:

- nazivni moment vrtnje:  $T_0 = 510 \text{ Nm}$ ;
- maksimalni moment vrtnje:  $T_{\max} = 880 \text{ Nm}$ ;
- maksimalni broj okretaja (kod nazivne struje):  $n_{\max} = 280 \text{ min}^{-1}$ ;
- vanjski promjer statora (kanala za hlađenje):  $\Phi 310 \text{ mm}$ ;
- unutrašnji promjer rotora:  $\Phi 220 \text{ mm}$ ;
- duljina paketa: 140 mm;
- karakteristike vodenog hlađenja:  $q \approx 7 \text{ l/min}$ ,  $\Delta p = 1 \text{ bar}$ ,  $\Delta t = 10 \text{ K}$ .



Slika 2. "Kit" izvedba visokomomentnog motora

Figure 2. Photograph of built-in torque motor



Slika 3. Konstrukcija pogona s visokomomentnim motorom

Figure 3. Torque motor section view



Slika 4. Pogonski kotač eksperimentalnog vozila

Figure 4. experimental vehicle drive wheel

Jedna od primjeni pogonskog mehanizma, slika 4., je direktni pogon kotača eksperimentalnog vozi [13], [14].

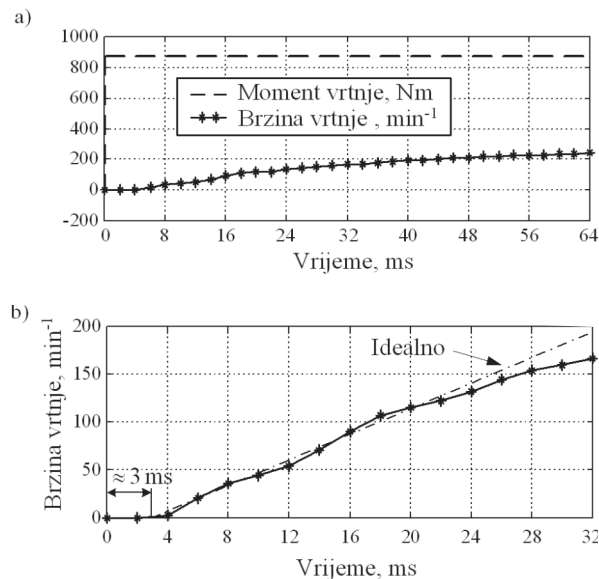
Eksperimenti identifikacije pogona provedeni su u praznom hodu motora, tako da je vanjsko opterećenje momentom vrtnje jednako 0.

#### 4.1. Odziv momenta vrtnje

Kako je dinamičko “ponašanje” pogona u radu nakon poremećaja, vezano za vrijeme uspostave nazivnog momenta vrtnje [15], eksperimentima na pogonu se utvrđuje unutar kojeg vremenskog perioda se može očekivati vrijeme odziva povećanog momenta vrtnje. Generalno, vremenska električna konstanta frekvencijskog pretvornika, kojim napajamo visokomomentni motor, daje red veličine vremena odziva momenta vrtnje unutar tehničkog sustava pogonskog mehanizma.

U nedostatku senzora momenta vrtnje, dinamički odziv momenta vrtnje pogona, je rekonstruiran iz mjerenog signala brzine vrtnje i mjerenog signala fazne struje motora.

Slika 5a prikazuje odziv brzine vrtnje pogonskog motora na skokovitu promjenu reference momenta vrtnje s vrijednosti 0 na maksimalni moment vrtnje od 880 Nm. Nakon određenog početnog mrtvog vremena, odziv brzine vrtnje je približno linearan sve do brzine od 120 min<sup>-1</sup>. Razlog tomu je što je moment vrtnje motora u tom području konstantan (nema zasićenja napona motora) i isto tako veći od momenta trenja motora  $T_{tr}$ . Slika 5.b prikazuje početno mrtvo vrijeme odziva brzine vrtnje pogonskog motora uključujući linearnu aproksimaciju (crta-točka linija). Ova slika pokazuje da početno, odnosno čisto mrtvo vrijeme odziva je približno jednako 3 ms. Budući da je ekvivalentno mrtvo vrijeme mjerenja brzi-



Slika 5. a) Odziv brzine vrtnje motora za skokovitu promjenu momenta vrtnje,

b) karakteristični detalj istog odziva

Figure 5. a) Servomotor speed response with respect to torque reference step change (maximum motor torque),

b) initial detail of speed response

ne vrtnje (bazirano na vremenskoj derivaciji mjerenog signala pozicije) jednako  $t_s/2=1$  ms ( $t_s=2$  ms – vrijeme uzorkovanja mjernog signala) [16], mrtvo vrijeme odziva momenta vrtnje je približno jednako 2 ms.

#### 4.2. Moment tromosti

Moment tromosti masa i moment trenja su procijenjeni prema proceduri koja se bazira na eksperimentima pokretanja i zaustavljanja motora, kako je pokazano u [17], korištenjem jednadžbe pokretanja

$$K_t \cdot T - T_{tr} = I_{em} \cdot \frac{dn_1}{dt}, \quad (1)$$

i zaustavljanja

$$T_{tr} = -I_{em} \cdot \frac{dn_2}{dt} \text{ pogonskog motora.} \quad (2)$$

Za određivanje nepoznanica  $I_{em}$ ,  $T_{tr}$  i  $K_t$ , a isto tako i momenta tromosti dodatnih rotacijskih masa  $I_{dod}$  eksperimenti pokretanja i zaustavljanja su se ponovili za slučaj kada je dodatna masa pričvršćena na rotor motora, što se definirano izrazima:

$$K_t \cdot T - T_{tr} = (I_{em} + I_{dod}) \cdot \frac{dn_1^*}{dt} \text{ i} \quad (3)$$

$$T_{tr} = -(I_{em} + I_{dod}) \cdot \frac{dn_2^*}{dt}. \quad (4)$$

Izneseni sustav jednadžbi predstavlja homogeni linearni sustav s reduciranim rangom jednakim 3, te stoga sustav nema jedno rješenje za nepoznate parametre  $I_{em}$ ,  $I_{dod}$ ,  $T_{tr}$  i  $K_t$ , osim ako jedan od tih parametara nije unaprijed poznat. Ako se pretpostavi da je  $I_{dod}$  unaprijed poznat, moment tromost dodatnog vanjskog opterećenja npr. zamašnjaka koji se može pričvrstiti na pogonski motor, krajnje rješenje sustava navedenih jednadžbi glasi:

$$I_{em} = \frac{I_{dod}}{k_n}; T_{tr} = -\frac{I_{dod}}{k_n} \cdot \frac{dn_1}{dt} \text{ i} \quad (5)$$

$$K_t = \frac{I_{dod}}{T_N \cdot k_n} \cdot \left( \frac{dn_1}{dt} - \frac{dn_2}{dt} \right), \quad (6)$$

gdje je  $k_n$  karakteristični omjer brzina:

$$k_n = \frac{dn}{dt} \frac{dn_1^*}{dn_2^*} - 1. \quad (7)$$

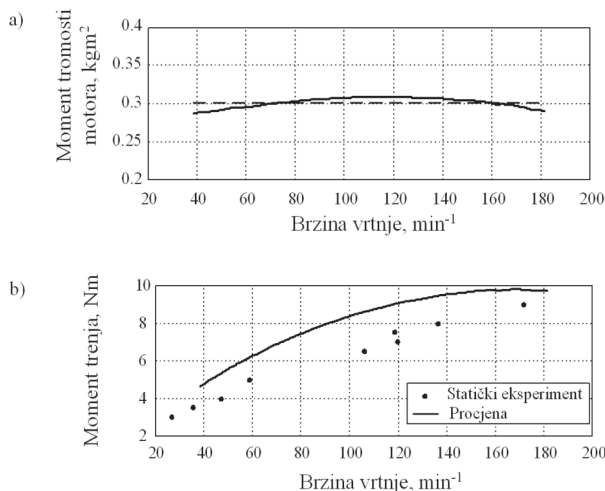
Snimljeni odzivi brzine vrtnje motora  $n(t)$  u eksperimentima pokretanja i zaustavljanja motora su interpolirani polinomom četvrtog stupnja u području brzina vrtnje pogonskog motora  $[n_d, n_g]$  pri konstantnom momentu

vrtnje. Ovo područje brzine vrtnje  $[n_d, n_g]$  odgovara području u kojem je struja momenta motora konstantna za vrijeme zaleta, da bi se zadovoljila pretpostavka o konstantnom momentu vrtnje  $T$ .

Koeficijenti polinoma se tada koriste za izračunavanje vremenske derivacije odziva brzine vrtnje  $\frac{dn}{dt}$ . Kako je moment trenja  $T_{tr}$  funkcija brzine vrtnje, odzivi u vremenskoj domeni transformiraju se u odzive u domeni brzine vrtnje  $\frac{dn}{dt}$  koristeći linearnu interpolaciju. Odzivi u domeni brzine vrtnje se koriste za izračunavanje parametara motora  $I_{em}$  i  $T_{tr}$  prema gore navedenim izrazima.

Slika 6a. prikazuje krajnje rezultate identifikacije momenata tromosti rotacijske mase rotora. Rezultati su dobiveni identifikacijskim krivuljama za više od 10 eksperimenata s referencom momenta vrtnje od  $T_N$  i  $T_N/3$  ( $T_N = 373$  Nm – nominalni moment vrtnje). Krivulje  $I_{em}(n)$  i  $T_{tr}(n)$  pokazuju relativno malu devijaciju od  $\approx 0,6\%$  i  $\approx 0,7\%$ , što ukazuje na konzistentnost procijenjenih parametara. Srednja vrijednost procijenjenog momenata tromosti je:  $I_{em} = 0,320$  kgm<sup>2</sup>.

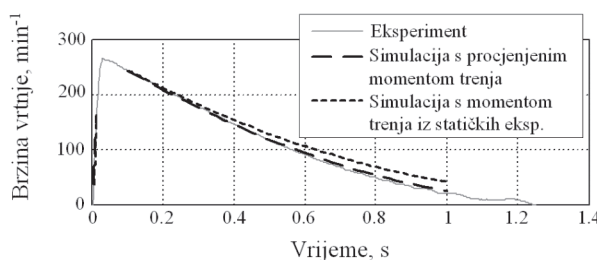
Moment trenja  $T_{tr}$  raste od 4 do 10 Nm s porastom brzine vrtnje motora  $n$  (utjecaj viskoznog trenja). Moment trenja je stoga manji od 1,2 % maksimalnog momenta vrtnje motora  $T_{max}$ . Dijagram momenta trenja, slika 5.b, sadrži također i rezultate direktne metode identifikacije trenja, bazirane na stacionarnim odzivima motora u otvorenom krugu s malim konstantnim referencama momenta vrtnje  $T=T_{tr}$ . Maksimalna greška procjene momenta trenja



**Slika 6.** a) Procijenjeni parametri momenta tromosti motora, b) procijenjeni parametri momenta trenja u funkciji brzine vrtnje

**Figure 6.** a) Estimated motor inertia vs. motor speed, b) estimated and measured friction torque as a function of motor speed

prema danim izrazima je 1,7 Nm, što je mala vrijednost u usporedbi s punom skalom momenta vrtnje od 880 Nm korištenom u eksperimentima pokretanja i zaustavljanja. Usporedni eksperimentalni i simulacijski rezultati, slika 7, potvrđuju točnost pokazane metode identifikacije.



**Slika 7.** Usporedni rezultati eksperimenta i simulacije odziva pokretanja i zaustavljanja za  $T_{em}=T_N$

**Figure 7.** Comparison of experimental and simulation results of motor speed during starting and stopping experiment

### 4.3. Analiza valovitosti momenta vrtnje

Karakteristika korištenog pogonskog motora je generiranje nepoželjnih valovitosti momenta vrtnje koje se prenose i u signal brzine vrtnje. Valovitosti momenta vrtnje pogonskog motora nastaju kao posljedica više efekata od koji su promatrana dva dominantna uzroka:

- Nesinusoidalne razdiobe magnetske indukcije (eng. Ripple Torque);
- Međudjelovanja trajnih magneta rotora u statorskim utorima tj. promjenjiva magnetska reluktancija (eng. Cogging Torque).

Nesinusoidalna razdioba magnetske indukcije, čija je amplituda proporcionalan faznoj struji, javlja se kao posljedica devijacije magnetske indukcije unutar zračnog raspora. Dominantan utjecaj na poremećaj imaju komponente na frekvencijama šest i dvanaest puta većim od statorske frekvencije, tj. na frekvencijama  $2pn/10$  i  $2pn/5$ , gdje je  $2p=33$  broj pari polova. Glavne komponente ovog poremećaja se javljaju s  $6p=198$  i  $12p=396$  pulzacija po okretu. Za standardne izvedbe visokomomentnih motora s trajnim magnetima, tipične amplitude valovitosti momenta uslijed nesinusoidalne razdiobe magnetske indukcije mogu doseći 2...4% nazivnog momenta vrtnje motora.

Valovitost momenta vrtnje uslijed promjenjive magnetske reluktancije, ne ovisi o struji motora, već je povezan s promjenjivom reluktancijom magnetske indukcije duž zračnog raspora.

Amplitude valovitosti momenta uslijed promjenjive magnetske reluktancije mogu doseći vrijednosti do 3% nazivnog momenta vrtnje motora. FFT (eng. Fast Fourier Transformation) analiza signala brzine vrtnje motora omogućila je detaljnu analizu valovitosti momenta

motora. Odnos između amplituda harmoničkih pulzacija u momentu vrtnje motora  $\Delta T_{em}$  i amplituda pulzacija brzine  $\Delta n$  pri frekvenciji  $f$  je dana izrazom:

$$\Delta T_{em} = \frac{\pi^2}{15} \cdot I_{em} \cdot \Delta n \cdot f. \quad (8)$$

Broj pulzacija u momentu vrtnje motora je povezan s brzinom vrtnje, pa je zbog toga poželjno prikazati modove oscilacija momenta motora u normiranoj frekvencijskoj domeni, tj. kutnoj domeni. Naime, frekvencija pulzacija momenta i brzine vrtnje se mijenjaju s brzinom vrtnje motora, ali je broj pulzacija po okretu konstantan. Normirana frekvencija je izračunata prema izrazu:

$$N = \frac{60f}{n}. \quad (9)$$

Za analizu pulzacija momenta vrtnje motora korišteni su odzivi motora dobiveni iz statičkih eksperimenata u praznom hodu i otvorenom krugu regulacije brzine vrtnje. Signalu brzine je oduzet DC pomak dobiven iz interpolirane krivulje brzine vrtnje motora. Preko izračunatih amplituda spektra signala brzine korištenjem FFT-a, dobivena je ovisnost amplitude brzine vrtnje o frekvenciji. Primjenom izraza za  $\Delta T_{em}$  i  $N$  na tako dobivenu amplitudu i frekvenciju prikazana je ovisnost amplitude modova momenta vrtnje motora, slika 8., s karakterističnim detaljima, slika 9., 10. i 11., u ovisnosti o broju pulzacija po okretu.

Slika 8. pokazuje da postoje dvije dominantne oscilacije momenta vrtnje na  $N=1$  okr<sup>-1</sup> i  $N=33$  okr<sup>-1</sup>. Prvi oscilacije s amplitudama do 0,2 Nm odnosno 0,02 % maksimalnog momenta vezane su uz debalans rotora motora, slika 10. Druge oscilacije na 33 okr<sup>-1</sup> odgovaraju

momentu zbog promjenjive magnetske reluktancije. Amplituda iznosi 4 Nm tj. 0,45 % maksimalnog momenta vrtnje motora, slika 8.

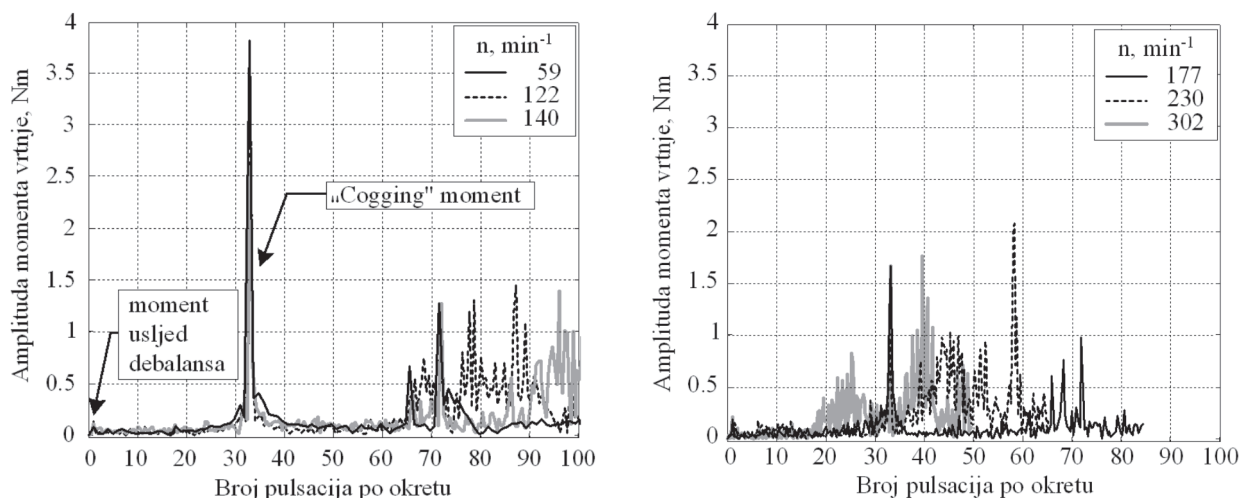
Valovitost momenta vrtnje uslijed nesinusoidalne razdiobe magnetske indukcije nije vidljiva, iako bi se trebala pojaviti na frekvenciji  $6p=198$ , jer je fazna struja kroz motor mala pri radu u praznom hodu.

## 5. Zaključak

Pogonski mehanizmi s direktnim pogonima postaju sve interesantniji svojom rasprostranjenošću i zauzimaju sve značajniju primjenu u tehničkim sustavima. U središtu direktnog pogona je visokomomentni motor, koji se može formulirati kao skup manjeg broja tehničkih funkcija [3], što mu daje izravnu prednost pri oblikovanju pogonskog mehanizma.

Šuplja izvedba pogonskog člana, kratke aksijalne duljine predstavlja pogodnu strukturu koja se može integrirati u mali prostora ugradnje. Kratka vremena pri pokretanju i zaustavljanju uz preopterećenost momentom vrtnje daju ovakvim pogonima mogućnost vrlo brzih odziva u radu. Točnost kutnog pozicioniranja je svakako značajka koja proizlazi iz davača pozicije koji je sastavni dio regulacijsko-upravljačkog kruga, dok ponovljivost isključivo ovisi o točnosti cjelokupne izrade elemenata direktnog pogona. Pored navedenih nedostataka (visoka cijena, prisilno hlađenje vodom) valovitost razvijenog momenta vrtnje može pogoršati performanse u zahtjevnim pogonima.

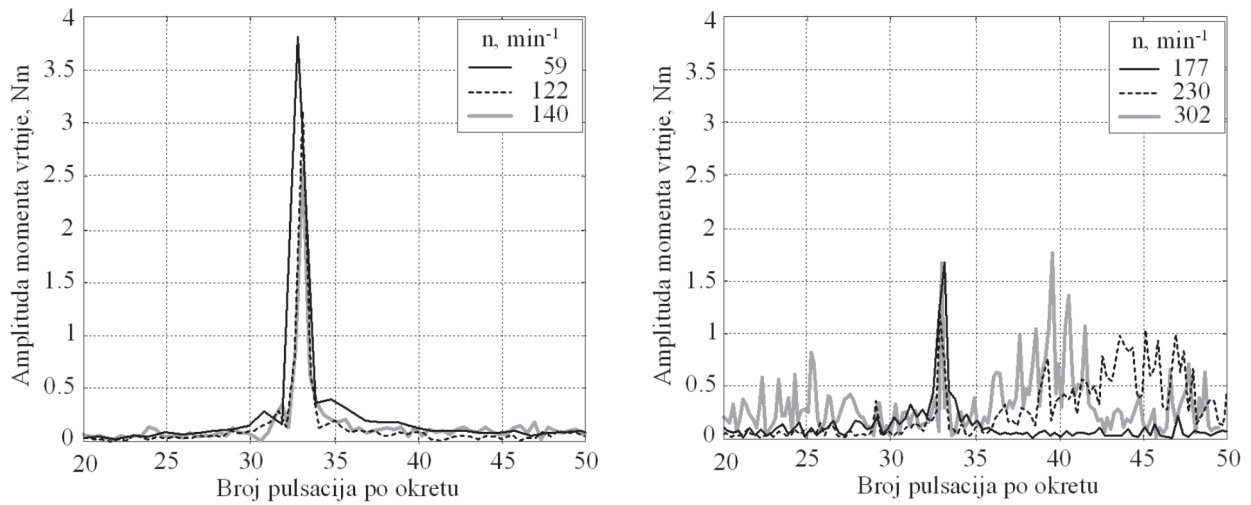
Provedenom analizom pri radu u praznom hodu glavnog pogona amplitude valovitosti momenta vrtnje uslijed



Slika 8. Spektar amplituda momenta vrtnje motora u normiranoj frekvenciji  $N$

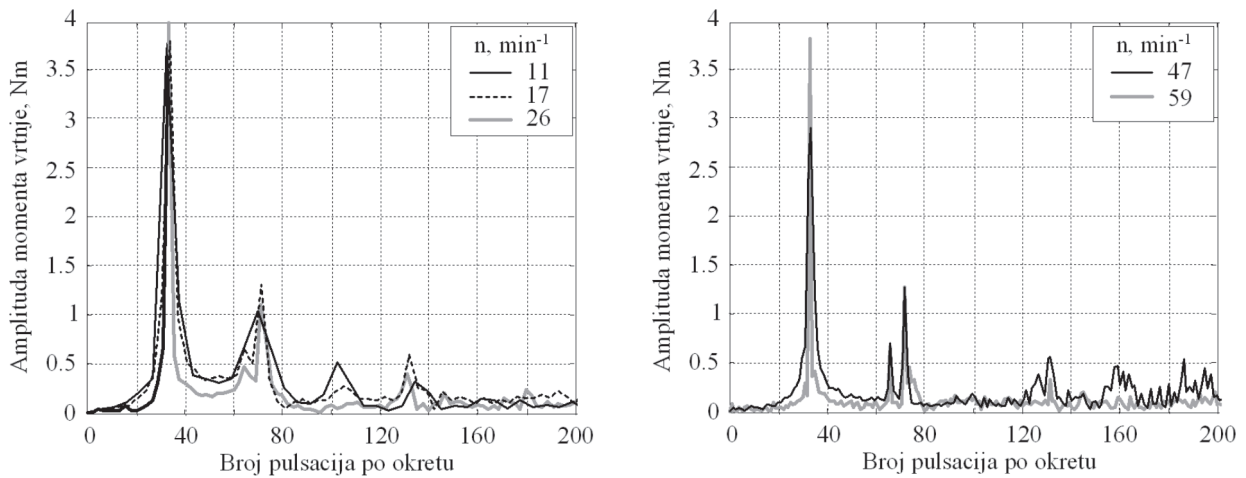
Figure 8. Motor torque amplitude spectrum given in normalized frequency





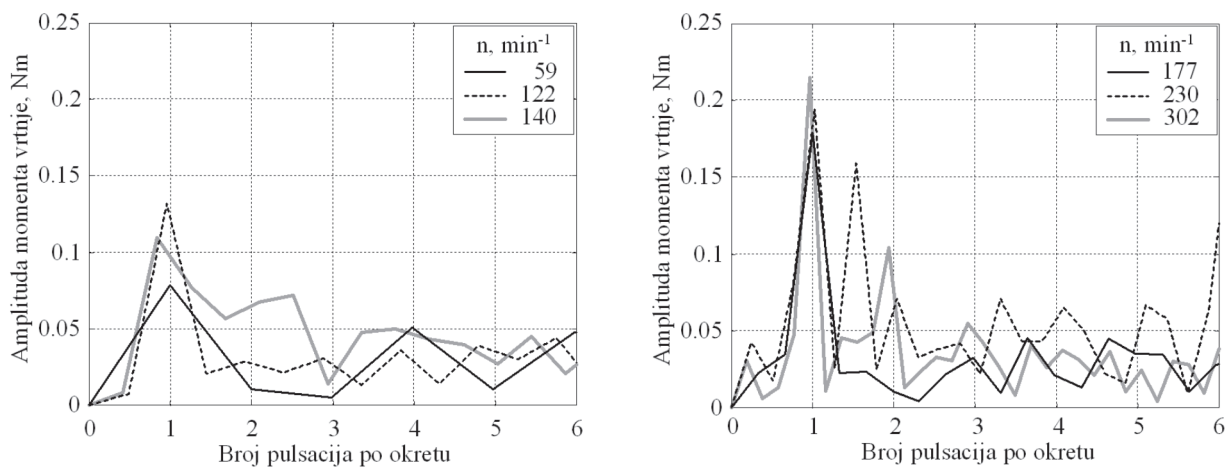
Slika 9. Amplitude valovitosti momenta vrtnje zbog promjenjive magnetske reluktancije (detalj sa slike 8.)

Figure 9. Cogging torque mode detail from Figure 8



Slika 10. Amplitude valovitosti momenta vrtnje zbog promjenjive magnetske reluktancije za male brzine vrtnje

Figure 10. Cogging torque mode with upper harmonics at low speeds



Slika 11. Valovitost momenta uslijed debalansa rotora motora (detalj sa slike 8.)

Figure 11. Motor imbalance mode detail from Figure 8

debalansa rotora su zanemarive, dok su amplitude valovitosti momenta zbog promjenjive magnetske reluktancije 0,45...0,5 % maksimalnog momenta vrtnje motora što je unutar očekivanih vrijednosti. Valovitost momenta vrtnje uslijed nesinusoidalne razdiobe magnetske indukcije nije uočena jer je ispitivanje rađeno pri radu u praznom hodu.

Valovitost momenta vrtnje u sinusoidnim motorima s trajnim magnetima može se smanjiti primjenom specifičnih raspodjela statorskih namotaja. Odgovarajuća širina magnetskih polova i profil zračnog rasporeda ispod polova imaju utjecaj na prostornu distribuciju magnetskog toka, te dovode do smanjenja neželjene valovitosti momenta vrtnje. [18].

Varijacije momenta vrtnje niske frekvencije pouzdano se eliminiraju djelovanjem regulacijskog sustava. Harmonici momenta vrtnje viših frekvencija mogu se kompenzirati u principu generiranjem inverzne komponente momenta vrtnje odgovarajućom modulacijom struje statora. Struja kompenzacije može se dobiti na različite načine, a većina postojećih rješenja zasniva se na identifikaciji valnog oblika inducirane elektromotorne sile motora.

Za praktičnu primjenu kompenzacije valovitosti potrebni su vrlo brzi regulatori struje, jer se frekvencije harmonika momenta vrtnje povećava proporcionalno s brzinom vrtnje. Konvencionalni PI regulatori nisu pogodni za pokrivanje cijelog područja frekvencija vala uslijed nedostatne brzine djelovanja ovih regulatora. Primjenom tehnike predupravljanja nastoji se izbjeći ograničenje brzine odziva PI regulatora struje. Predupravljački signali se čitaju iz memorijskih tablica [19].

## LITERATURA

- [1] ZIMMER, D.; BÖCKER, J.; SCHMIDT, A.; SCHULTZ, B.: *Direktantriebe passend ausgewählt*, Antriebstechnik, Vol. 2/2005, S. 40-45, 2005.
- [2] CANDERES, W.R.; LAUBE, F.; MOSEBACH, H.: *Vorstudie Technologien und Grenzen von High Torque Antrieb*, Abschlussbereich zum FVA Forschungsvorhaben 352, FVA Forschungsheft 586, 1999.
- [3] KOSTELAC, M.: *Utjecaj direktnih pogona na strukturu pogonskih mehanizama*, Doktorska disertacija, FSB Zagreb, 2006.
- [4] SCHULTZE, M.: *Synchron unter Spannung*, Lift Report , Heft 6, S.46-48, 2005.
- [5] MEYER, N.: *Direkt ist einfach*, Konstruktion & Entwicklung, Vol. 8/2002, S. 30-35, 2002.
- [6] INOUE, K.; MIYAKE, N.; DAIKOKU, A.; HASHIGUCHI, N.; YOSUE, M.: *Neue Antrieb für Triebwerksraumlose Aufzüge*, Lift-Report, Heft1, S. 4-8, 2005.
- [7] HOLZ, J.; SPRINGOB, L.: *Identification and Compensation of Torque Ripple in High-Precision Permanent Magnet Motor Drives*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 43, No. 2, 1996.
- [8] BROCK, S.; DESKUR, J.: *A Practical Approach to Compensation of Torque Ripple in High-Precision Permanent Magnet Motor Drives*, EDPE Dubrovnik, Croatia, , September 2005.
- [9] JAHNS, T. M.: *Motion Control with Permanent Magnet AC Machines*, Proc. IEEE, Vol.82, No.8, pp. 1241-1252, 1994.
- [10] CROS, J. et al.: *A Novel current Control Strategy in trapezoidal EMF Actuators to minimize Torque Ripples due to Phase Commutation*, EPE Eur. Conf. Power Electron., Application (EPE), Brihton, UK, Vol.4, pp.266-271, 1993.
- [11] *Maschine Design Magazine*, Direct Drive Motors - Fast and Accurate, Basic of Design Engineering, 1999.
- [12] MURAI, Y.; WATANABE, T.; IWASAKI, H.: *Waveform Distortions Correction circuit for PWM Inverters with Switching Lag-Time*, IEEE Trans. Ind. Applications, Vol. 23, No.5, pp. 410-420, 1993.
- [13] DEUR, J.; KOSTELAC, M.; HEROLD, Z.; IVANOVIC, V.; PAVKOVIC, D.; TROULIS, M.; HROVAT, D.: *An Experimental Electrical Vehicle with In-wheel Motor*, CD Proc. of 13th Int. Conference on Electrical Drives and Power Electronics, (EDPE 2005), Dubrovnik, Croatia, Sep 2005.
- [14] IVANOVIĆ, V.; DEUR, J.; KOSTELAC, M.; HEROLD, Z.; TROULIS, M.; MIANO, C.; HROVAT, D.; ASGARI, J.; HIGGINS, D.; BLACKFORD, J.; KOUTSOS, V.: *Experimental Identification of Dynamic Tire Friction Potential on Ice Surfaces*, XIX IAVSD Symposium (to appear in 2006 Vehicle System Dynamics Supplement), Milan, Italy, Aug/Sep 2005. Istraživači s FSB-a, dobili su prestižnu nagradu za najbolji članak (Best Paper Award). Rad je nastao u suradnji FSB istraživačke grupe s Fordovim istraživačkim centrima u Dearbornu i Aachenu i Sveučilištem u Edinburghu.
- [15] MOSBACH, H.; CANDERS, W. R.: *Average thrust of permanent magnet excited linear synchronous motors for different stator current waveforms*, Proc ICEM 1998, 2-4 September 1998. Istanbul, Turkey
- [16] PERIĆ, N.: *Digital Measurement of Angular Speed* (in Croatian), Automatika, Vol. 31, No. 3-4, pp. 123-128, 1990.
- [17] DEUR, J., BOŽIĆ, A.; PERIĆ, N.: *Control of Electric Drives with Elastic Transmission, Friction, and Backlash - Experimental System*, Automatika, Vol. 40, No. 3-4, pp. 129-137, 1999.
- [18] MARINESCU: *Influence of Magnet Pole Size and air gap Dimensions on Torque Ripple in permanent Magnet synchronous Motors*, Ph. D. dissertation, Aachen, Germany, 1991.
- [19] LE-HUY, H.; SLIMANI, K.; VIAROGUE, P.: *A Productive current Controller for synchronous servo Drives*, Eur. Conf. Power Electr. Applications (EPE) Florence, Italy, pp. 2114-2119, 1991.