

## Konstruktivski ukrepi za zmanjšanje samodržnega vrtilnega momenta sinhronskega motorja s trajnimi magneti

Andrej Černigoj<sup>1</sup>, Rastko Fišer<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ISKRA Avtoelektrika d.d., Polje 15, 5290 Šempeter pri Gorici, andrej.cernigoj@iskra-ae.com

<sup>2</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, rastof@fe.uni-lj.si

**Povzetek.** V članku je predstavljena problematika nezaželenega nihanja trenutne vrednosti vrtilnega momenta sinhronskega motorja s trajnimi magneti (SMTM). Vrtilni moment glede na nastanek delimo na tri komponente: elektromagnetno, samodržno in reluktančno. Glavnina raziskave je obravnava konstrukcijskih ukrepov na rotorju in statorju, s katerimi lahko zmanjšamo amplitudo samodržnega vrtilnega momenta. Za posamezen predlagan konstrukcijski ukrep sta opisana princip delovanja in ovrednotenje vpliva na obratovalne lastnosti SMTM s pomočjo parametričnega dvodimenzionalnega (2D) modela po metodi končnih elementov (MKE). V sklepu sta podana pregled in primerjava učinkov posameznih konstrukcijskih ukrepov ter njihova tehnološka in ekonomska upravičenost.

**Ključne besede:** sinhronski motor s trajnimi magneti, nihanje vrtilnega momenta, samodržni vrtilni moment, metoda končnih elementov, analiza magnetnega polja

## Design techniques for reducing the cogging torque of a permanent-magnet synchronous motor

**Extended abstract.** Many studies in minimization of the cogging torque in permanent-magnet synchronous motors (PMSM) have been presented [1, 2, 3]. This proves the high importance of minimization of the torque ripple not only in top quality PMSM motor drives but also in mass-produced PMSMs.

In chapter 2 the paper quantifies the motor instantaneous torque  $M(\alpha)$  into two components – constant component  $M_{sr}$  and periodic component  $M_{izm}$ . The latter gives rise to the undesired torque ripple (Fig. 1), caused by the following:

- harmonics in the back EMF,
- cogging torque, and
- reluctance torque.

Chapters 3 and 4 present various design techniques for reducing the cogging torque. The influence of magnet span  $\alpha_m$  is described using a simple model (Fig. 2). A parametric 2D finite element method (FEM) model of a 36-slot and 6-pole PMSM was developed for the study (Fig. 3). In order to reduce the cogging torque, the magnet span had to be almost an integer number of the slot pitch (Figs. 4 and 5). Shifting of the permanent magnet (PM) poles was analysed with an upgraded FEM model (Fig. 7). The achieved significant reduction of the cogging torque is presented in Fig. 8.

Various shapes and PMs magnetisation patterns (Fig. 9), dictate air-gap flux distribution and considerably effect the cogging torque (Fig. 10).

A summary of the rotor design techniques is presented in Table 1. It is shown that they are all are very efficient.

As to the stator, additional notches in its teeth were implemented (Fig. 11). A minimal cogging torque reduction can be observed in Fig. 12. This design technique can be effective in conjunction with some other method, such as skewing. A magnetic anisotropy of the laminated core is considered on a 12-slot and 10-pole PMSM because of its strong influence on the cogging torque in motors where the number of poles is close to the number of stator slots (Fig. 13).

**Keywords:** permanent-magnet synchronous motor, torque ripple, cogging torque, finite element method, magnetic field analysis

### 1 Uvod

Razvoj magnetnih materialov in komponent močnostne elektronike je pripomogel k uveljavitvi visokozmogljivih pogonov, ki zaradi čedalje večjih zahtev postajajo bolj kompleksni in izpopolnjeni. Kot električni motor se v takšnih pogonih uveljavlja sinhronski motor s trajnimi magneti (SMTM).

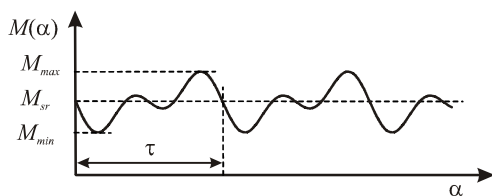
Motorji SMTM so primerni za pogon najzahtevnejših aplikacij in zajemajo široko paleto moči ter specifičnih zahtev. Pri tem je poleg ustrezne karakteristike vrtilnega momenta in dobrih lastnosti med prehodnimi pojavi nujno obravnavati tudi problematiko nezaželenega nihanja trenutne vrednosti vrtilnega momenta. Dodatna nihanja vrtilnega momenta povzročajo težave pri zagonu in poslabšajo natančnost regulacije pozicije rotorja, odražajo pa se lahko tudi kot povišan nivo vibracij in hrupa motorja.

Temu raziskave sta obravnava vzrokov nastanka in iskanje rešitev za zmanjšanje amplitude nihanja vrtilnega momenta SMTM. Pri iskanju rešitev smo se zaradi obsežnosti problematike omejili le na analizo vpliva geometrije rotorja in statorja motorja ter analizo uporabljenih konstrukcijskih rešitev.

## 2 Trenutna vrednost vrtilnega momenta

Slika 1 prikazuje trenutno vrednost vrtilnega momenta motorja  $M(\alpha)$  v odvisnosti od kota zasuka rotorja  $\alpha$ . Zapišemo jo kot vsoto konstantne srednje vrednosti  $M_{sr}$  in izmenične komponente  $M_{izm}$  s periodo  $\tau$ , ki predstavlja nezaželeno nihanje vrtilnega momenta (ang. torque ripple) [1].

$$M(\alpha) = M_{sr} + M_{izm}(\alpha) \quad (1)$$



Slika 1: Trenutna vrednost vrtilnega momenta motorja  $M(\alpha)$ .  
Figure 1. Instantaneous torque of a motor  $M(\alpha)$ .

Pri načrtovanju SMTM konstrukter hitro naleti na enega najpogostejših problemov. Ob zahtevi za povečanje  $M_{sr}$  se sočasno pojavi še zahteva za zmanjšanje nihanja vrtilnega momenta  $M_{izm}$ . Kakovost konstrukcije motorja torej določa tudi nivo valovitosti vrtilnega momenta  $\xi$ :

$$\xi = \frac{M_{max} - M_{min}}{M_{sr}} \cdot 100\% \quad (2)$$

Pri tem je srednja vrednost vrtilnega momenta enaka:

$$M_{sr} = \frac{1}{\tau} \int_{\alpha}^{\alpha+\tau} M(\alpha) d\alpha = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} M(\alpha) d\alpha \quad (3)$$

Glede na izvor lahko vrtilni moment SMTM razdelimo na tri komponente [1, 2]:

- elektromagnetni vrtilni moment,
- samodržni vrtilni moment in
- reluktančni vrtilni moment.

**Elektromagnetni vrtilni moment** je pglavitna komponenta vrtilnega momenta motorja, ki nastane zaradi interakcije polja trajnih magnetov in polja, ki ga

povzročajo statorski ampérni ovoji. Pri trifaznem SMTM elektromagnetni vrtilni moment izrazimo kot:

$$M = \frac{1}{\omega} \cdot [e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c], \quad (4)$$

kjer so  $e_a$ ,  $e_b$  in  $e_c$  trenutne vrednosti faznih induciranih napetosti,  $i_a$ ,  $i_b$  in  $i_c$  trenutne vrednosti faznih tokov ter  $\omega$  kotna hitrost.

Enačba (4) pove, da bo vrtilni moment motorja konstanten, če bo vsota produktov faznih induciranih napetosti in faznih tokov konstantna. V tem primeru skupno magnetno polje trajnih magnetov in statorskih ampérnih ovojev ne vsebuje višjih harmonskih komponent [1].

**Samodržni vrtilni moment** (ang. cogging torque) je posledica interakcije med poljem trajnih magnetov in statorskimi zobmi. Podrobnejša analiza pokaže, da komponenta samodržnega vrtilnega momenta  $M_{cog}$  nastane zaradi spremembe energije magnetnega polja trajnih magnetov v motorju ob zasuku rotorja.

**Reluktančni vrtilni moment** nastane z interakcijo statorskega magnetnega polja in različnih reluktanc vzdolžne in prečne magnetne osi rotorja. Različni reluktanci sta predvsem posledica rotorske konfiguracije. Tudi ta komponenta povzroča dodatna nezaželeno nihanja vrtilnega momenta zaradi višjih harmonskih komponent statorskih ampérnih ovojev.

## 3 Konstrukcijski ukrepi na rotorju za zmanjšanje nihanja vrtilnega momenta

V tem poglavju se bomo omejili na rotorske konstrukcijske ukrepe, s katerimi lahko znižamo amplitudo samodržnega vrtilnega momenta.

Ukrepi, ki jih uporabljamo, temeljijo na zmanjšanju spremembe magnetne energije v odvisnosti od kota zasuka rotorja  $\alpha$  in/ali zmanjšanju magnetnega pretoka v zračni reži motorja. Pri njihovi uporabi se moramo zavedati, da le-ti povečajo zahtevnost izdelave motorja ali pa poslabšajo njegove druge karakteristike.

### 3.1 Obodna dolžina loka trajnega magneta $\alpha_m$

Študijo nastanka samodržnega vrtilnega momenta magneta začnemo s pomočjo modela, prikazanega na sliki 2. Ob majhnem pomiku trajnega magneta v desno se pod statorskim zobom št. 1 magnetna energija  $W_{mag}$  zmanjšuje, pod drugimi zobmi (zobje št. 2, 3 in 4) pa ostaja nespremenjena. Nastane vrtilni moment zadnjega roba trajnega magneta  $M_{zad}$ , ki je sorazmeren spremembi  $W_{mag}$  v odvisnosti od kota  $\alpha$ . Nastali vrtilni moment je periodične narave, saj nastane vsakič, ko zadnji rob magneta zapušča statorski zob. Tako ga lahko zapišemo v obliki Fourierove vrste, kjer so  $M_n$  Fourierovi koeficienti in  $N_{zob}$  število statorskih zob

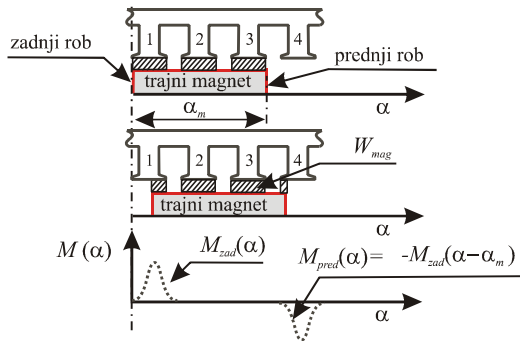
$$M_{zad}(\alpha) = M_0 + \sum_{n=1}^{\infty} M_n \cos(n \cdot N_{zob} \cdot \alpha) \quad (5)$$

Ob nadaljnjem gibanju v desno se prednji rob trajnega magneta pomakne pod statorski zob št. 4 in pod tem zobom začne magnetna energija naraščati. Zato nastane vrtilni moment prednjega roba  $M_{pred}$ , ki je nasproten vrtilnemu momentu zadnjega roba  $M_{zad}$

$$M_{pred}(\alpha) = -M_0 - \sum_{n=1}^{\infty} M_n \cos(n \cdot N_{zob} \cdot (\alpha - \alpha_m)) \quad (6)$$

Celoten samodržni vrtilni moment trajnega magneta je vsota prispevkov prednjega in zadnjega roba.

$$M_{mag}(\alpha) = M_{zad}(\alpha) + M_{pred}(\alpha) = \sum_{n=1}^{\infty} M_n [\cos(n \cdot N_{zob} \cdot \alpha) - \cos(n \cdot N_{zob} \cdot (\alpha - \alpha_m))] \quad (7)$$



Slika 2: Model za analizo nastanka samodržnega vrtilnega momenta celotnega magneta.

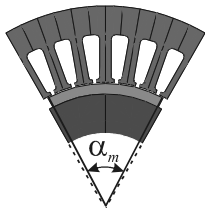
Figure 2. Model of the cogging torque mechanism on the entire magnet.

Enačba (7) je izhodišče za odpravo samodržnega vrtilnega momenta trajnega magneta. Ta bo enak nič, če bo obodna dolžina loka trajnega magneta oziroma kot magneta  $\alpha_m$  enak:

$$\alpha_m = \frac{2\pi \cdot k}{N_{zob}} = \varphi_{stat} \cdot k \quad (8)$$

kjer je  $k$  celo število in  $\varphi_{stat}$  kot statorske delitve.

Trditev, da mora biti kot trajnega magneta  $\alpha_m$  enak večkratniku kota statorske delitve  $\varphi_{stat}$ , velja le v idealnem primeru linearnega motorja. Pri realnem motorju (slika 3), ko moramo upoštevati končno dolžino, ukrivljenost rotorja in stresanje magnetnega polja trajnih magnetov, samodržnega vrtilnega momenta ne moremo povsem odpraviti [3] in ga lahko le minimiziramo.

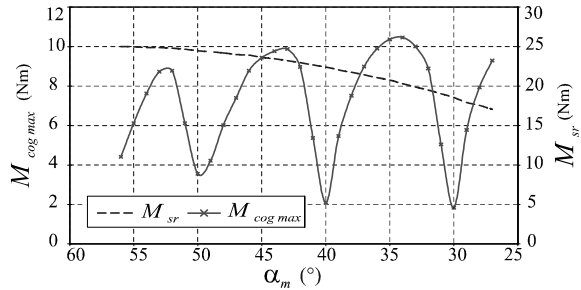


Slika 3: Del modela SMTM z definirano obodno dolžino loka trajnega magneta oziroma kotom magneta  $\alpha_m$ .

Figure 3. FEM model segment with marked magnet span  $\alpha_m$ .

Analizo vpliva kota trajnega magneta  $\alpha_m$  na velikost samodržnega vrtilnega momenta smo opravili s pomočjo parametričnega 2D MKE modela SMTM s 36 statorskimi zobmi in 6 rotorskimi magnetnimi poli. Za analizo posameznega ukrepa ali kombinacije več ukrepov (v nadaljevanju) je bilo treba opraviti vrsto izračunov vrednosti vrtilnega momenta v odvisnosti od kota zasuka rotorja. Brez parametričnega MKE modela bi bilo spreminjanje parametrov in primerjavo rezultatov praktično nemogoče izvesti.

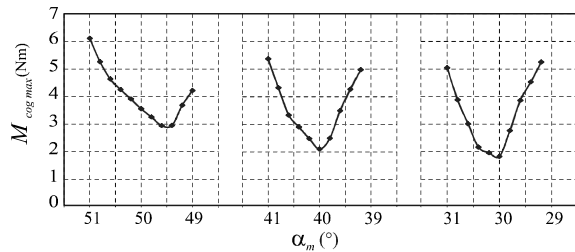
Kot trajnega magneta  $\alpha_m$  lahko teoretično v šestpolnem motorju zavzame  $60^\circ$ , vendar so magneti zaradi lažjega lepljenja na rotorski jarem ponavadi nekoliko ožji. Zato smo v modelu motorja kot trajnega magneta zmanjševali od izbranega začetnega kota  $\alpha_m = 56^\circ$  korakoma po  $1^\circ$  do končnega kota  $\alpha_m = 27^\circ$  (slika 4).



Slika 4: Vrednosti  $M_{cog max}$  in  $M_{sr}$  v odvisnosti od kota trajnega magneta  $\alpha_m$ .

Figure 4. Maximal cogging torque and mean torque versus magnet span  $\alpha_m$ .

Maksimalne vrednosti samodržnega momenta  $M_{cog max}$  v odvisnosti od kota trajnega magneta  $\alpha_m$  in srednja vrednost vrtilnega momenta  $M_{sr}$  sta prikazani na sliki 4. Vrednost  $M_{sr}$  po pričakovanjih upada z manjšanjem kota trajnega magneta  $\alpha_m$ . Najmanjše vrednosti  $M_{cog max}$  so pri  $\alpha_m = 50^\circ$ ,  $\alpha_m = 40^\circ$  in  $\alpha_m = 30^\circ$ , vendar smo upoštevali, da je korak spreminjanja kota  $\alpha_m$  relativno velik in najverjetneje nismo našli pravih minimalnih vrednosti. Zato smo opravili dodatne izračune v območjih  $\alpha_m = (51^\circ \div 49,2^\circ)$ ,  $\alpha_m = (41^\circ \div 39,2^\circ)$  in  $\alpha_m = (31^\circ \div 29,2^\circ)$ , kjer smo kot trajnega magneta  $\alpha_m$  nastavljali v korakih po  $0,2^\circ$ . Rezultati so prikazani na sliki 5.

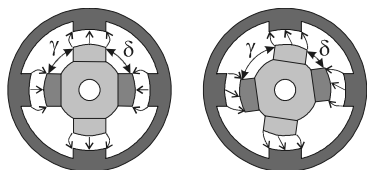


Slika 5: Izračunane vrednosti  $M_{cog max}$  v odvisnosti od kota trajnega magneta  $\alpha_m$ .

Figure 5. Maximal cogging torque versus magnet span  $\alpha_m$ .

### 3.2 Zamik magnetnih polov

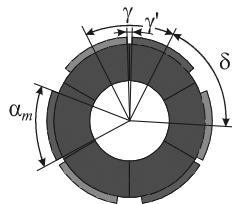
V osnovnem primeru, ko so magnetni poli na rotorju simetrično razporejeni, tangencialne sile nastanejo na vseh magnetnih polih hkrati in se izrazijo kot nezaželen samodržni vrtilni moment. Z zamikom enega ali več polovih parov na rotorju ustvarimo zamik stabilne lege posameznih magnetov in medsebojno izničenje samodržnih vrtilnih momentov, ki jih povzročijo posamezni magneti na rotorju. Princip delovanja ukrepa je prikazan na sliki 6.



Slika 6: Postavitev magnetnih polov na rotorju: osnovna – simetrična postavitev magnetov  $\gamma = \delta$  (levo) in primer zamika magnetov  $\gamma \neq \delta$  (desno).

Figure 6. Basic position of magnet poles on the rotor  $\gamma = \delta$  (left) and an example of shifted magnet poles  $\gamma \neq \delta$  (right).

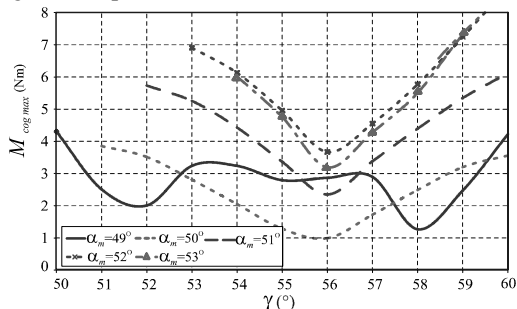
Raziskavo vpliva zamikov magnetnih polov na rotorju smo opravili s pomočjo dopoljenega 2D MKE modela, kjer smo poleg kota trajnega magnetja  $\alpha_m$  spreminjali tudi kot  $\gamma$  in tako spreminjali položaj magnetov (slika 7).



Slika 7: Zamik magnetnih polov na rotorju v dopoljenem 2D MKE modelu.

Figure 7. Shifted magnet poles on the rotor in an upgraded 2D FEM model.

Za analizo smo kot  $\alpha_m$  nastavljali od  $\alpha_m=53^\circ$  do  $\alpha_m=49^\circ$  v korakih po  $0,5^\circ$  in tako zajeli območje, kjer samodržni vrtilni moment simetrično razporejenih magnetnih polov doseže lokalno maksimalno in



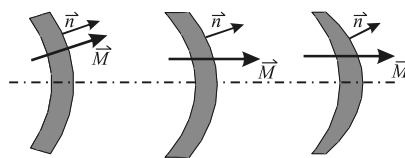
Slika 8: Maksimalne vrednosti samodržnega vrtilnega momenta  $M_{cog\ max}$  v odvisnosti od kota  $\gamma$ .  
Figure 8. Maximal cogging torque versus magnet pole shift angle  $\gamma$ .

minimalno vrednost (slika 4). Začetna vrednost kota med segmenti  $\gamma'$  je bila vedno  $1^\circ$ .

Izračunane vrednosti  $M_{cog\ max}$  v odvisnosti od kota  $\gamma$  so zbrane na sliki 8. Opazen je vpliv  $\alpha_m$  na velikost samodržnega vrtilnega momenta, saj je le-ta najmanjši pri  $\alpha_m=50^\circ$ . Minimalne vrednosti samodržnega vrtilnega momenta večinoma nastajajo pri vrednosti kota  $\gamma$  okrog  $56^\circ$  in so dvakrat do trikrat manjše kot pri simetrično razporejenih trajnih magnetih ( $\gamma=60^\circ$ ).

### 3.3 Smer magnetizacije in oblika trajnih magnetov

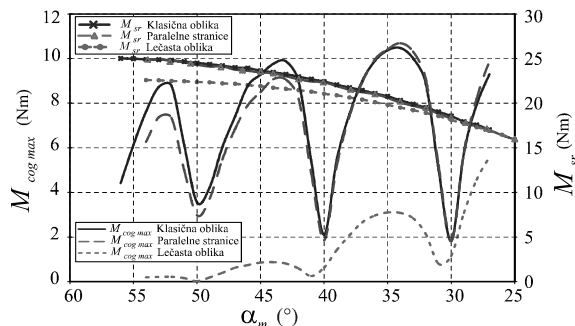
Smer magnetizacije  $\vec{M}$  in oblika trajnih magnetov vplivata na porazdelitev gostote magnetnega pretoka  $\vec{B}$  v zračni reži. To se izraža na velikosti samodržnega vrtilnega momenta, vsebnosti višjih harmonskih komponent faznih induciranih napetosti in nasičenju magnetnega kroga. Različne oblike trajnih magnetov in smeri njihove magnetizacije so prikazane na sliki 9.



Slika 9: Različne oblike trajnih magnetov in smeri magnetizacije (klasična oblika z radialno magnetizacijo, vzporedne stranice z vzporedno magnetizacijo, lečasta oblika z vzporedno magnetizacijo).

Figure 9. Various shapes and magnetization patterns of permanent magnets.

Iz rezultatov analize vpliva oblike in smeri magnetizacije trajnih magnetov na sliki 10 vidimo, da z uporabo magnetov z vzporedno magnetizacijo dejansko lahko zmanjšamo velikost samodržnega vrtilnega momenta. Pri magnetih z vzporednimi stranicami je v primerjavi z magneti klasične oblike vrednost  $M_{cog\ max}$  pri  $\alpha_m=50^\circ$  upadla za 16 %, hkrati se je srednji vrtilni moment  $M_{sr}$  zmanjšal za približno 1 %. Z magneti lečaste oblike bi  $M_{cog\ max}$  pri  $\alpha_m=50^\circ$  upadel tako rekoč na vrednost nič,  $M_{sr}$  pa bi se zmanjšal za približno 9 %.



Slika 10: Vrednosti  $M_{cog\ max}$  in  $M_{sr}$  v odvisnosti od kota trajnega magnetja  $\alpha_m$  za vse tri oblike trajnih magnetov.  
Figure 10. Maximal cogging torque and mean torque versus magnet span  $\alpha_m$  for the three shapes of permanent magnets.

### 3.4 Pregled konstrukcijskih ukrepov na rotorju

Ukrepi na rotorju za zmanjšanje samodržnega vrtilnega momenta so se izkazali kot zelo učinkoviti, v praksi pa najboljše rezultate dosežemo z ustrezno kombinacijo različnih ukrepov. Za medsebojno primerjavo in pregled posameznih rotorskih ukrepov so v tabeli 1 zbrani glavni rezultati izračunov zmanjšanja  $M_{cog\ max}$  glede na izhodiščni model s slike 3 in njihov vpliv na znižanje srednjega vrtilnega momenta  $M_{sr}$ .

Nadaljnji ukrepi pri konstruiranju rotorja so še posebej nameščeni ali posevno magneteni trajni magneti in stopničasto zamaknjeni segmenti trajnih magnetov. Teoretično lahko na primer z uporabo posevnih trajnih magnetov samodržni vrtilni moment celo povsem odpravimo [2].

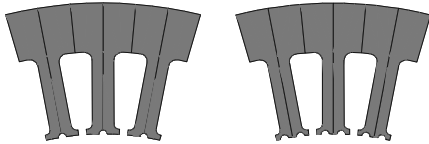
Tabela 1: Zbrani rezultati konstrukcijskih ukrepov na rotorju  
Tabele 1. Gathered results of rotor design techniques

	$M_{cog\ max}$ (Nm)	$M_{cog\ max} / M_{sr}$	$M_{sr} / M_{sr\ izhod.\ mod.}$
Izhodiščni model ( $\alpha_m=56^\circ$ )	4,42	17,7 %	100 %
Optimalni $\alpha_m$ ( $\alpha_m=40^\circ$ )	2,10	9,4 %	89 %
Zamik magnetnih polov	0,99	4,0 %	98 %
Magneti z vzporednimi str.	2,98	12,3 %	97 %
Magneti lečaste oblike	0,024	0,1 %	89 %

## 4 Konstrukcijski ukrepi na statorju za znižanje nihanja vrtilnega momenta

### 4.1 Dodatne zareze v statorskih zobeh

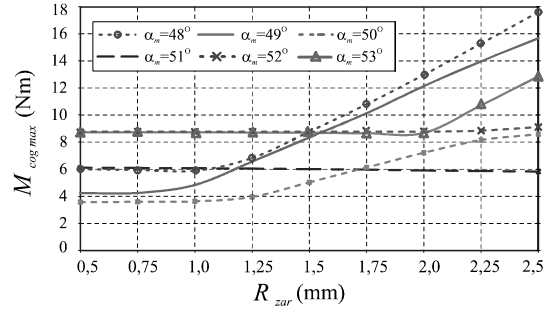
Z vnosom dodatnih zarez v čelo statorskih zob navidezno povečamo število zob. Poveča se število interakcij prednjega in zadnjega roba trajnega magneta s statorskimi zobmi, kar se izrazi kot povečano število period samodržnega vrtilnega momenta. Pri večjemu številu period pa se skupni samodržni vrtilni moment zmanjša [2].



Slika 11: Del statorja modela MKE z dodatnimi zarezi v statorskih zobeh: ena zarez (levo), dve zarezi (desno).  
Figure 11. FEM model segment with additional notches in stator teeth: one notch (left), two notches (right).

Pri analizi vpliva dodatnih zarez v čelu statorskih zob smo polmer zarez v obeh modelih MKE spreminjali v območju od  $R_{zar}=0,5$  mm do  $R_{zar}=2,5$  mm v korakih po 0,25 mm. Kot trajnega magneta  $\alpha_m$  smo nastavljali v območju od  $53^\circ$  do  $48^\circ$  v korakih po  $1^\circ$  in tako zajeli območje, kjer samodržni vrtilni moment  $M_{cog\ max}$  motorja brez dodatnih zarez doseže lokalno maksimalno in minimalno vrednost (slika 4). Izračunane vrednosti

$M_{cog\ max}$  v odvisnosti od polmera zarez (za eno dodatno zarezu na zob) so zbrane na sliki 12.



Slika 12: Vrednosti  $M_{cog\ max}$  za eno dodatno zarezu v statorskem zobu v odvisnosti od polmera zareze  $R_{zar}$  in kota trajnega magneta  $\alpha_m$ .

Figure 12. Maximal value of cogging torque for one notch per stator tooth versus notch radius  $R_{zar}$  and magnet span  $\alpha_m$ .

Dodatne zareze v statorskih zobeh otežijo izdelavo motorja. Poleg tega dobljeni rezultati analize kažejo, da je ukrep neučinkovit. Vpliv zarez na zmanjšanje velikosti samodržnega vrtilnega momenta je minimalen. Izkáže se celo, da prevelike zareze povzročijo povečanje  $M_{cog\ max}$ , kar je v nasprotju s trditvijo podano v [2]. Večanje zarez tudi zmanjšuje srednji vrtilni moment.

### 4.2 Upoštevanje anizotropije statorske pločevine

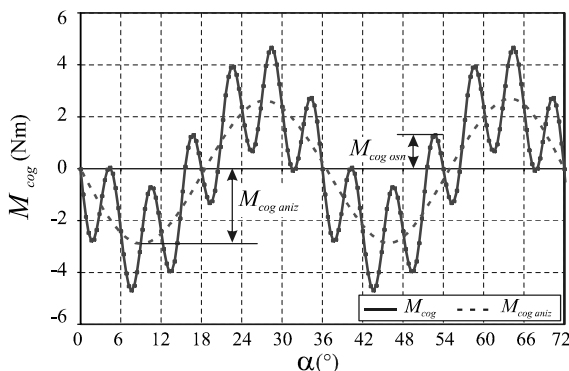
Feromagnetni material za izdelavo statorja (elektropločevina) je izdelan s postopkom valjanja. Posledično je kristalna struktura pločevine usmerjena in je njena magnetna prevodnost v vzdolžni smeri (smer valjanja) večja od magnetne prevodnosti v prečni smeri. Zato je tudi neorientirana elektropločevina, ki se uporablja za izdelavo rotacijskih motorjev, magnetno anizotropna. Velja pravilo, da pločevina boljše kakovosti (npr. pločevina z oznako M330–35A) izkazuje večjo anizotropijo kot pločevina slabše kakovosti (npr. pločevina z oznako M800–50A) [5]. Zaradi magnetne anizotropije se v motorju spremeni porazdelitev magnetnega polja, kar povzroči nastanek dodatnega samodržnega vrtilnega momenta  $M_{cog\ aniz}$ . Dodatni vrtilni moment bo izrazil predvsem v motorjih, kjer se število statorskih zob malo razlikuje od števila rotorskih magnetnih polov [5].

Vpliv anizotropije feromagnetnega materiala na nastanek dodatnega samodržnega vrtilnega momenta smo raziskali z 2D MKE modelom, v katerem smo izotropen statorski material zamenjali z anizotropnim. Permeabilnost  $\mu$  je tenzorska veličina.

$$\mu = \begin{bmatrix} \left. \frac{B_x}{H_x} \right|_{\theta_H = \theta_B = 0^\circ} & 0 \\ 0 & \left. \frac{B_y}{H_y} \right|_{\theta_H = \theta_B = 90^\circ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_x & 0 \\ 0 & \mu_y \end{bmatrix} \quad (9)$$

Vpliv anizotropije statorskega materiala je za model SMTM s 36 statorskimi zobmi in 6 rotorskimi

magnetnimi poli zanemarljiv. Zato smo izračun poteka samodržnega vrtilnega momenta opravili za model SMTM z 12 statorskimi zobmi in 10 rotorskimi magnetnimi poli, pri čemer smo rotor zavrteli za kot ene rotorske delitve  $\varphi_{rot}=72^\circ$  v ekvidistantnih korakih po  $0,4^\circ$ . Rezultati izračuna so prikazani na sliki 13.



Slika 13: Samodržni vrtilni moment  $M_{cog}$  za model SMTM z 12 statorskimi zobmi in 10 rotorskimi poli v odvisnosti od kota zasuka rotorja  $\alpha$ .

Figure 13. Cogging torque for PMSM having 12 stator slots and 10 rotor poles versus rotor position  $\alpha$ .

Vpliv anizotropije elektroplöčevine odpravimo tako, da posamezne lamele pri sestavljanju statorskega paketa medsebojno zamikamo glede na smer valjanja plöčevine.

### 4.3 Pregled konstrukcijskih ukrepov na statorju

Konstrukcijski ukrep na statorju, kot je uvedba dodatnih zarez v statorskih zobeh, se v nasprotju z ukrepi na rotorju ni izkazal za učinkovitega, saj je njegov vpliv na zmanjšanje samodržnega vrtilnega momenta minimalen.

Analizirali smo tudi vpliv anizotropije elektroplöčevine na nastanek dodatnega samodržnega vrtilnega momenta. Pojav je izrazit predvsem v motorjih, kjer se število statorskih zob malo razlikuje od števila rotorskih magnetnih polov.

## 5 Sklep

Predstavljeni so konstrukcijski ukrepi na rotorju in statorju za zmanjšanje samodržnega vrtilnega momenta SMTM. Za posamezen ukrep je podan njegov princip delovanja, ki je nato ovrednoten z numeričnimi izračuni.

Za analizo vpliva ukrepov ali kombinacije več ukrepov (npr. spreminjanje kota trajnega magneta in zamik magnetnih polov) na velikost samodržnega vrtilnega momenta je zgrajen parametričen MKE model SMTM. To je bilo potrebno zato, ker je za analizo posameznega ukrepa ali kombinacije več ukrepov treba opraviti vrsto izračunov vrednosti vrtilnega momenta v odvisnosti od kota zasuka rotorja. Brez parametričnega modela MKE bi bilo spreminjanje parametrov in primerjava rezultatov tako rekoč nemogoča.

Konstrukcijski ukrepi za zmanjšanje samodržnega vrtilnega momenta na rotorju so se izkazali kot zelo učinkoviti. Z ekonomskega vidika so primerni ukrepi spreminjanja kota in posledično obodne dolžine loka trajnega magneta in zamika magnetnih polov, saj njihova uporaba ne pomeni večjega dviga stroškov in ne povzroči bistvenih zapletov pri tehnološki izdelavi motorja. Najboljše rezultate vsekakor dosežemo z ustrezno kombinacijo različnih ukrepov.

V sklopu raziskave smo analizirali tudi nekaj drugih konstrukcijskih posegov na rotorju in statorju SMTM, ki pa so manj vplivni pri zmanjšanju samodržnega vrtilnega momenta kot opisani ukrepi.

## 6 Literatura

- [1] J. Gieras, M. Wing, *Permanent Magnet Motor Technology*, New York, Marcel Dekker, 1997.
- [2] N. Bianchi, S. Bolognani, Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface-Mounted PM Motors, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 38, No. 5, pp. 1259-1265, Sept/Oct 2002.
- [3] R. Lateb, N. Takorabet, F. Meibody-Tabar, J. Enon, A. Sarrbouete, Design Technique for Reducing the Cogging Torque in Large Surface Mounted Magnet Motors, *ICEM 2004 International Conference on Electrical Machines, Proceedings ICEM 2004 CD-ROM*, Krakow, 5-8 Sept 2004.
- [4] M. Furlan, A. Černigoj, M. Boltežar, A coupled electromagnetic-mechanical-acoustic model of a DC electric motor, *Compel*, Vol. 22, No. 4, pp. 1155-1165, 2003.
- [5] S. Yamaguchi, A. Daikoku, Cogging torque calculation considering magnetic anisotropy for permanent magnet synchronous motors, *Compel*, Vol. 23, No. 3, pp. 639-646, 2004.

**Andrej Černigoj** je diplomiral leta 1999 in magistriral leta 2006 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Od leta 1999 je zaposlen v Razvojnem centru Iskre Avtoelektrike d.d., kjer se ukvarja z modeliranjem in konstrukcijo električnih strojev.

**Rastko Fišer** je diplomiral leta 1984, magistriral leta 1989 in doktoriral leta 1998 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani, kjer je tudi zaposlen kot docent. Predava predmete s področja električnih pogonov in močnostne elektronike ter je predstojnik Laboratorija za elektromotorske pogone. Leta 1999 je za doktorsko disertacijo prejel nagrado dr. Vratislava Bedjaniča. Njegovo raziskovalno delo je povezano z modeliranjem rotacijskih in linearnih električnih motorjev, načrtovanjem elektromotorskih pogonov ter novimi pristopi na področju nadzora stanja in diagnostike rotacijskih strojev. Rastko Fišer je član IEEE in SLOSIM.