

Vpliv proizvodnih toleranc na velikost samodržnega vrtilnega momenta SMTM motorjev

Lovrenc Gašparin¹, Rastko Fišer²

¹ LETRIKA Iskra Avtoelektrika d.d., Polje 15, 5290 Šempeter pri Gorici, Lovrenc.Gasparin@letrika.com

² Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Rastko.Fiser@fe.uni-lj.si

The Impact of Production Tolerances on the PMSM Cogging Torque

A detailed analysis of the cogging torque components reveals that besides the well-known native cogging torque components these are also some other cogging torque components which are provoked by assembly tolerances in mass-production of permanent magnet synchronous motors (PMSM). Slightly inappropriate dimensions and misplacements of the permanent magnets (PM) introduce asymmetries in the magnetic field distribution which give rise to additional harmonic components. The finite element method and the Fast Fourier transform were used to calculate the cogging torque harmonic components for several combinations of the PM assembly imperfections. It is also shown that in some particular combinations the impact of an individual PM imprecision can compensate for those which are due to different phase shifts which may eventually decrease the cogging torque. Hypothetically, it is possible that the level of cogging torque of PMSMs with certain faults in the PM dimensions, position and magnetization can be even negligible. Considering the presented results, the harmonic components comprising the cogging torque of the mass-produced PMSMs, caused by PM imperfections can be foreseen. This enables the designers to predetermine the required manufacturing tolerances within which the level of the cogging torque will be kept within the admissible level.

1 Uvod

Sinhronske motorje s trajnimi magneti (SMTM) čedalje pogosteje uporabljamo v najzahtevnejših pogonih, kamor štejemo tudi aplikacije v pogonih hibridnih vozil, električnih servovolanskih in zavornih sistemih itd. Odlikujejo jih preprosta konstrukcija, dobre dinamične lastnosti, velika specifična moč in visok izkoristek v primerjavi z drugimi električnimi stroji. Za SMTM tip motorjev je značilen samodržni vrtilni moment M_S (ang. cogging torque), ki je vzrok pomanjkljivosti, da ima SMTM končno število ravnovesnih leg rotorja tudi, ko motor ni napajan z električnim tokom. To povzroča težave pri majhnih vrtilnih hitrostih in v primerih, ko se zahteva velika natančnost pozicioniranja rotorja. Ker se proizvajalci čedalje pogosteje srečujejo z zahtevami trga po izjemno nizkih vrednostih M_S (pod 1 % nazivnega vrtilnega momenta motorja), to predstavlja velik konstrukcijski in tehnološki izziv v velikoserijskih proizvodnji. V literaturi so poznane številne metode za

zmanjšanje M_S , ki teoretično znižajo ali v nekaterih primerih celo odpravijo samodržni vrtilni moment ter hkrati zadostijo pogoju, da se srednja vrednost vrtilnega momenta minimalno zmanjša [1-3]. Poznane in uveljavljene metode za zniževanje M_S pa pogosto v praksi na določenih topologijah SMTM ne delujejo po pričakovanjih ali celo povečajo M_S , kar je v nasprotju z želenim učinkom [4, 5]. Precizne laboratorijske meritve samodržnega vrtilnega momenta na izdelanih vzorcih mnogokrat pokažejo velike razlike med izračunanimi in izmerjenimi vrednostmi tako po velikosti kot po obliki in harmonski vsebini. Vzroke za to je treba iskati v nesimetrijah, ki so posledica proizvodnih netočnosti, toleranc ali nehomogenosti v materialih in povzročajo nastanek dodatnih harmonskih komponent samodržnega vrtilnega momenta [4-6].

2 Samodržni vrtilni moment

Za samodržni vrtilni moment M_S je značilen periodičen potek in je posledica interakcije med magnetnim poljem trajnih magnetov (TM) in zobni statorja ter ga sestavljata dve komponenti:

$$M_S(\alpha) = M_N(\alpha) + M_D(\alpha), \quad (1)$$

kjer M_N nastopa kot prispevek naravnih harmonskih komponent samodržnega vrtilnega momenta (NHK) in M_D predstavlja prispevek dodatnih harmonskih komponent samodržnega vrtilnega momenta (DHK). Za nazornejšo ponazoritev lahko M_N in M_D zapišemo kot

$$M_N(\alpha) = \sum_{i=1}^{\infty} A_{NHK i} \cdot \sin(N_{NHK i} \cdot \alpha + \varphi_{NHK i}), \quad (2)$$

$$M_D(\alpha) = \sum_{i=1}^{\infty} A_{DHK i} \cdot \sin(N_{DHK i} \cdot \alpha + \varphi_{DHK i}), \quad (3)$$

ki jih sestavljajo naslednje komponente: amplitudna vrednost A , red oziroma število ponovitev v enem obratu rotorja N ter fazni kot φ , pri čemer je $i = 1, 2, 3, \dots$ celoštevilčni števec.

NHK so v motorjih s TM vedno prisotne, tudi v idealno izdelanih strojih in simulacijskih izračunih. Na njihovo izraženost vplivata predvsem izbrana kombinacija in oblika statorskih zob in TM na rotorju. NHK lahko učinkovito zmanjšamo z ustreznimi konstrukcijskimi ukrepi [1-3]. Za SMTM s simetrično razporejenimi TM na rotorju in idealnim statorskim paketom iz neorientiranega feromagnetnega materiala izračunamo $N_{NHK i}$ kot

$$N_{NHK_i} = NSV(Q, P) \cdot i, \quad (4)$$

kjer NSV pomeni najmanjši skupni večkratnik med številom statorskih zob Q in številom magnetnih polov P na rotorju.

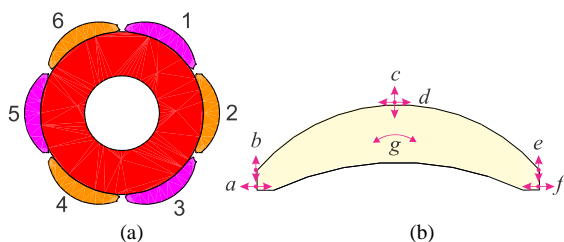
Nasprotno pa DHK nastanejo le v primerih netočnosti pri izdelavi in/ali materialu in jih idealen motor ne vsebuje [7-9]. So pa seveda realnost v velikoserijski proizvodnji in vzroke za nastanke DHK (izvori so v anomalijah tako na statorski kot na rotorski strani) je treba natančno proučiti, da lahko njihov vpliv minimiziramo. Izrazi, ki opredeljujejo rede DHK , so natančno opisani v [4-6]. V predstavljeni analizi se bomo posvetili le netočnostim na rotorju, ki prispevajo rede DHK definirane z naslednjo relacijo.

$$N_{DHK_i} = Q \cdot i \quad (5)$$

3 Parametrični MKE model SMTM

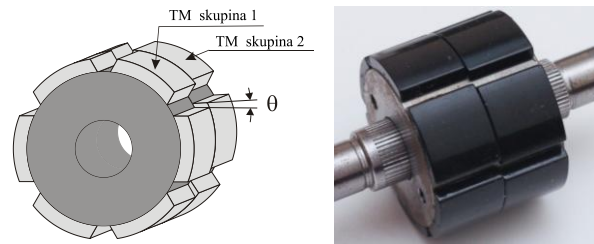
Vsebnost harmonskih komponent v M_S je izračunana s pomočjo simulacijskega modela SMTM, ki omogoča modeliranje odstopanj geometrijskih parametrov TM od idealnih razmer. Obravnavan je primer motorja konstrukcije $P=6$ in $Q=9$, ki mora izpolnjevati zahtevo po zelo nizki vrednosti M_S (manj kot 9 mNm). Za tovrstno konstrukcijo pričakujemo glede na izraza (4) in (5) v frekvenčnem spektru M_S naslednje harmonske komponente: $N_{NHK_i} = 18, 36, 54$ ter $N_{DHK_i} = 9, 18, 27$. Na rotorju je nameščenih 6 TM (slika 1a), ki imajo v realnih razmerah velikoserijske proizvodnje malenkostna odstopanja v dimenzijah (debelina, širina, radiji, pozicija). Parametrični model je zasnovan tako, da omogoča neodvisno spreminjanje naslednjih parametrov TM (slika 1b):

- a, f ... širina,
- b, e ... debelina levega in desnega roba,
- c ... debelina na sredini,
- d ... zamik zunanjega radija,
- g ... zamik pozicije na jarmu.



Slika 1. Rotor s 6 TM (a), spremenljivi parametri TM (b).

Pri 7 variabilnih parametrih za vsak TM in šestih TM na rotorju dobimo skupno 42 možnih spremenljivk. Ker pa je za zmanjšanje NHK uporabljen tudi znani konstrukcijski ukrep stopničastega zamika več skupin TM za točno določen kot θ (na sliki 2 sta prikazani dve skupini TM), moramo k modeliranim možnim netočnostim dodati tudi ta kot.



Slika 2. Stopničasti zamik dveh skupin TM.

4 Simulacije netočnosti v izdelavi

V modelu SMTM z zamikom dveh skupin TM imamo 84 spremenljivk ter še dodatno za kot θ . V primeru rotorja s tremi skupinami TM, s čimer še uspešneje znižamo nivo NHK [3], pa naraste število spremenljivk že na 128. Da simulacijski izračuni v čim večji meri odražajo realno stanje, ima vsak parameter predpisano tolerančno območje, ki je odvisno razpoložljive tehnologije in kvalitete vseh segmentov proizvodne linije. Analiza vseh možnih kombinacij netočnosti je praktično neizvedljiva, pa tudi fizikalna slika ob istočasnem spreminjanju več parametrov zlahka postane nepregledna. S tega razloga smo v predstavljeni študiji analizirali le vpliv enega parametra (zamik pozicije TM na jarmu - parameter g in sliki 1b), ostali so konstantni in idealnih vrednosti za vse TM.

4.1 Zamik enega TM

V primeru zamika enega od šestih TM iz idealne pozicije na rotorskem jarmu za $+0.3^\circ$ imamo 6 možnih kombinacij (tabela 1), kjer je zamaknjen TM označen z "1", preostali idealno pozicionirani pa z "0". Šestim modelom pripadajočih šest izračunanih samodržnih vrtilnih momentov rezultira v le dveh različnih karakteristikah M_S (slika 3). Kombinacije 1, 3, 5 (označene zeleno) predstavljajo zamaknjene TM južnih magnetnih polov, medtem ko kombinacije 2, 4, 6 (označene rumeno) pomenijo zamaknjene TM severnih polov. Kombinacija 0 ustreza primeru idealne namestitve vseh šestih TM. Le v tem primeru celotni M_S sestavljajo le NHK brez prisotnosti DHK (označena modro). Iz izračunanih potekov M_S za Komb. 1, 3, 5 in Komb. 2, 4, 6 je nazorno razvidno, da sta karakteristiki zamaknjeni za kot 20° (slika 3), kar pomeni, da imajo posamezne harmonske komponente M_D lahko različne fazne zamike.

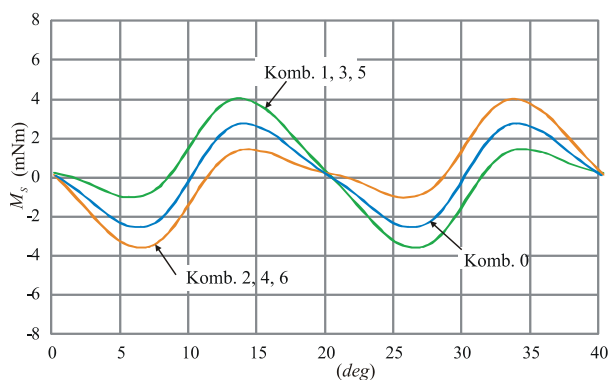
Tabela 1. Možne kombinacije zamika 1 TM iz idealne pozicije

Komb.	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 6
0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	1
2	0	0	0	0	1	0
3	0	0	0	1	0	0
4	0	0	1	0	0	0
5	0	1	0	0	0	0
6	1	0	0	0	0	0

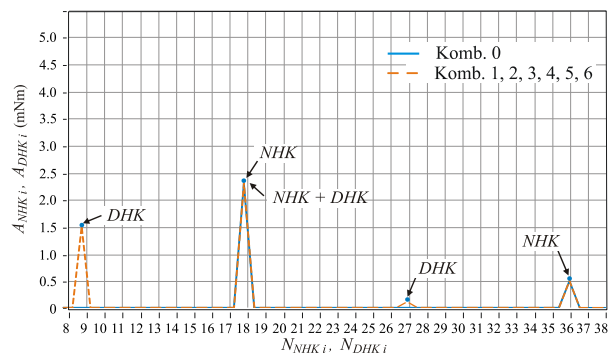
FFT analiza časovnega poteka za Komb. 0 (izhodiščni primer simetrično nameščenih vseh 6 TM) izlušči harmonski komponenti redov $N_{NHK_1} = 18$ and

$N_{NHK2} = 36$, ki ustrežata izrazu (4). Njuni amplitudni vrednosti sta $A_{NHK1} = 2.44$ mNm in $A_{NHK2} = 0.51$ mNm (slika 4), pripadajoča fazna zamika pa sta $\varphi_{NHK1} = +90^\circ$ and $\varphi_{NHK2} = -90^\circ$ (slika 5).

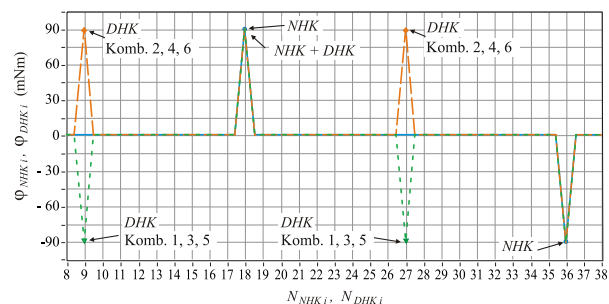
Analiza frekvenčnega spektra M_S v primeru zamika TM iz idealne pozicije razkrije DHK redov $N_{DHK1} = 9$ in $N_{DHK3} = 27$ z amplitudnimi vrednostmi $A_{DHK1} = 1.58$ mNm in $A_{DHK3} = 0.10$ mNm (slika 4). 18-ti harmonik je sestavljen iz N_{NHK1} in N_{DHK2} (enačbi (4) in (5)), z amplitudno vrednostjo $A_{NHK1+DHK2} = 2.46$ mNm. Nadalje je razvidno, da so fazni koti za Komb. 1, 3, 5 enaki $\varphi_{DHK1} = -90^\circ$ in $\varphi_{DHK3} = -90^\circ$, medtem ko so za Komb. 2, 4, 6 fazni koti $\varphi_{DHK1} = +90^\circ$ and $\varphi_{DHK3} = +90^\circ$ (slika 4). Razlika v faznih kotih med Komb. 1, 3, 5 in Komb. 2, 4, 6 je električnih 180° , kar pomeni zamik v poteku M_S za mehanskih 20° (slika 2).



Slika 3. Izračunan M_S za idealen rotor (Komb. 0) ter za 6 možnih zamikov enega TM.



Slika 4. FFT izračunane M_S - amplitudne vrednosti za vseh 7 možnih kombinacij zamika enega TM.



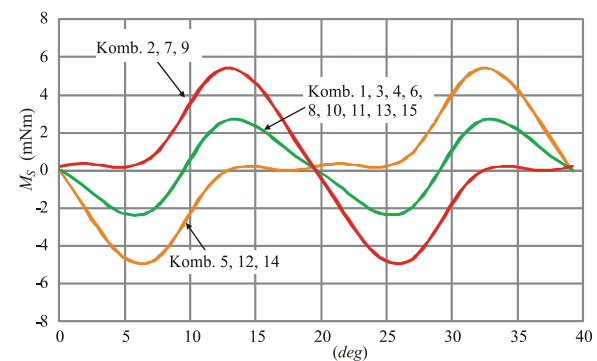
Slika 5. FFT izračunane M_S - fazni koti za vseh 7 možnih kombinacij zamika enega TM.

4.2 Zamik dveh TM

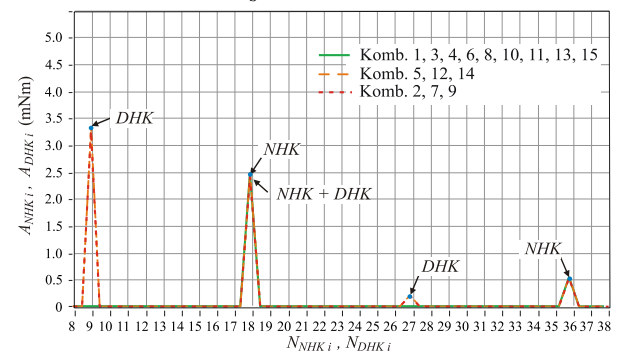
V tem primeru smo obravnavali vse možne kombinacije zamika dveh TM iz idealne pozicije na rotorskem jarmu (tabela 2, oznake "1"), ostali štirje TM pa so nameščeni optimalno (tabela 2, oznake "0"). Izračuni M_S med 15 možnimi kombinacijami dajo le 3 različne karakteristike (slika 6). Obstaja 6 kombinacij (2, 7, 9 in 5, 12, 14) s prisotnimi DHK in povišano amplitudno vrednostjo M_S glede na prejšnji primer zamika le enega TM, pri preostalih 9 kombinacijah pa se potek M_S kljub nesimetriji v poziciji TM ne spremeni glede na izhodiščni idealni primer (slika 2, Komb. 0). To pomeni, da se določene kombinacije nepravilnosti v poziciji TM medsebojno kompenzirajo in ne vplivajo na povišanje vrednosti M_S . Katere kombinacije so to, je možno enostavno ugotoviti na osnovi tabele 2 in slike 6.

Tabela 2. Možne kombinacije zamika 2 TM iz idealne pozicije

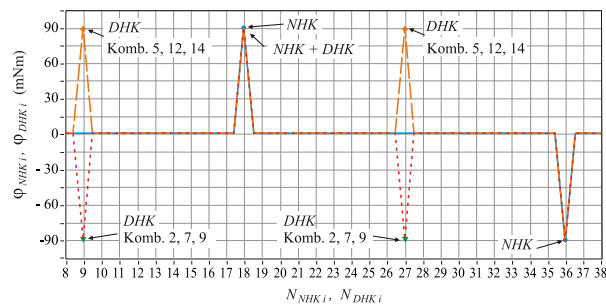
Komb.	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 6
1	0	0	0	0	1	1
2	0	0	0	1	0	1
3	0	0	0	1	1	0
4	0	0	1	0	0	1
5	0	0	1	0	1	0
6	0	0	1	1	0	0
7	0	1	0	0	0	1
8	0	1	0	0	1	0
9	0	1	0	1	0	0
10	0	1	1	0	0	0
11	1	0	0	0	0	1
12	1	0	0	0	1	0
13	1	0	0	1	0	0
14	1	0	1	0	0	0
15	1	1	0	0	0	0



Slika 6. Izračunan M_S za 15 možnih zamikov dveh TM.



Slika 7. FFT izračunane M_S - amplitudne vrednosti za vseh 15 možnih kombinacij zamika dveh TM.



Slika 8. FFT izračunane M_S – fazni koti vseh 15 možnih kombinacij zamika dveh TM.

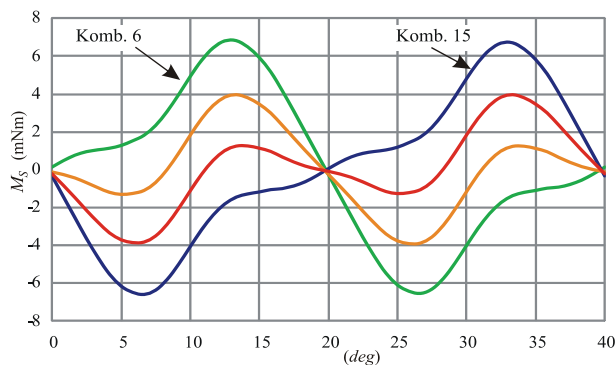
Analiza harmonskega spektra M_S razkrije DHK redov $N_{DHK1}=9$ in $N_{DHK3}=27$, torej enake kot v prejšnjem primeru enega zamaknjene TM, vendar s podvojeno amplitudno vrednostjo $A_{DHK1}=3.16$ mNm in $A_{DHK3}=0.20$ mNm (slika 7). Tudi v tem primeru je 18-ti harmonik sestavljen iz N_{DHK2} in N_{NHK1} , z amplitudno vrednostjo $A_{NHC1+AHC2}=2.48$ mNm. V 6 primerih (Komb. 2, 7, 9 in Komb. 5, 12, 14) so amplitudne vrednosti M_S enake (slika 6), v preostalih 9 kombinacijah, kjer se vplivi zamikov kompenzirajo, pa ni prisotnih DHK in je M_S ($A_{NHK1}=2.44$ mNm) enak kot v primeru idealno sestavljenega rotorja (slika 7). Fazni koti so za Komb. 5, 12, 14 enaki $\varphi_{DHK1}=+90^\circ$ in $\varphi_{DHK3}=+90^\circ$, za Komb. 2, 7, 9 pa so $\varphi_{DHK1}=-90^\circ$ in $\varphi_{DHK3}=-90^\circ$ (slika 8). Fazni kot dejansko določa, v kakšnem obsegu (in če sploh) nepravilnost v poziciji TM vpliva na vrednost M_S .

4.3 Zamik treh TM

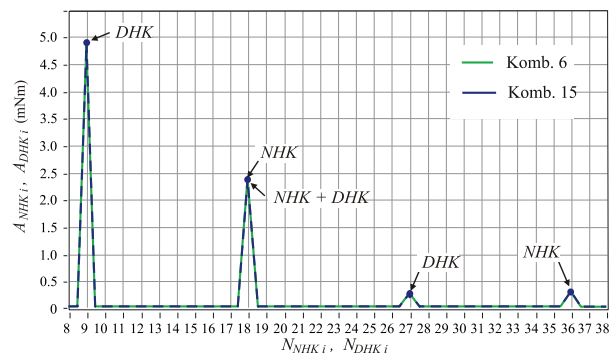
Raziskava je bila izvedena tudi za primer treh netočno pozicioniranih TM na rotorski jarem. Možnih kombinacij je 20, postopek analize pa identičen kot v predhodno opisanih primerih. Vseh 20 kombinacij rezultira v štirih različnih potekih M_S , kombinaciji dveh najneugodnejših zamikov treh TM pa sta podani v tabeli 3 in prikazani na sliki 9 in 10. Amplituda M_S ($A_{DHK1}=4.74$ mNm) naraste na trojno vrednost v primerjavi z le enim zamaknjeno TM. Izračuni vseh ostalih primerov dajo nižje vrednosti M_S .

Tabela 3. Dva primera najneugodnejših zamikov 3 TM

Komb.	TM 1	TM 2	TM 3	TM 4	TM 5	TM 6
6	0	1	0	1	0	1
15	1	0	1	0	1	0



Slika 9. Izračunan M_S za 20 možnih zamikov treh TM.



Slika 10. FFT izračunane M_S - amplitudne vrednosti dveh najneugodnejših kombinacij zamika treh TM.

5 Zaključek

Netočnosti v procesu proizvodnje SMTM, kot na primer zamaknjena pozicija trajnih magnetov glede na simetralo polov, so vzrok dodatnim harmonskim komponentam DHK v samodržnem vrtilnem momentu M_S , ki jih idealno izdelani motorji ne vsebujejo. Večinoma povzročijo povišano vrednost M_S , katerega nizek nivo je eden ključnih kriterijev kvalitete motorja. Predstavljena študija predstavlja pomemben segment pri razumevanju vsebnosti harmonskih komponent v M_S v odnosu na geometrijske in izdelavne tolerance in s tem prispeva k zagotavljanju čim manjšega procenta izmeta pri velikoserijski proizvodnji SMTM.

Literatura

- [1] S. Islam, S. Mir, T. Sebastian, "Issues in Reducing the Cogging Torque of Mass-Produced Permanent-Magnet Brushless DC Motor," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 3, May/June 2004, pp. 813-820.
- [2] L. Dosiek, P. Pillay, "Cogging Torque Reduction in Permanent Magnet Machines", *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 43, no. 6, pp. 1565 – 1571, November/December 2007.
- [3] A. Černigoj, R. Fišer, "Konstrukcijski ukrepi za zmanjšanje samodržnega vrtilnega momenta sinhronskega motorja s trajnimi magneti," *Elektrotehniški vestnik*, vol. 74, no. 4, 2007, pp. 207-212.
- [4] L. Gašparin, R. Fišer, "Detekcija in analiza dodatnih harmonskih komponent samodržnega vrtilnega momenta sinhronskega motorja s trajnimi magneti", *Elektrotehniški vestnik*, vol. 75, no. 3, pp. 129 – 135, 2008.
- [5] L. Gašparin, "Detekcija in analiza dodatnih harmonskih komponent samodržnega vrtilnega momenta sinhronskega motorja s trajnimi magneti", *Doktorska disertacija*, Fakulteta za elektrotehniko, Ljubljana, 2009.
- [6] L. Gašparin, A. Černigoj, S. Markič, R. Fišer, "Additional cogging torque components in permanent magnet motors due to manufacturing imperfections", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 3, pp. 1210 – 1213, March 2009.
- [7] I. Coenen, M.H. Gracia, K. Hameyer, "Influence and evaluation of non-ideal manufacturing process on the cogging torque of a permanent magnet excited synchronous machine", *Compel*, vol. 30, no. 3, pp. 876-884, 2011.
- [8] G. Heins, T. Brown, M. Thiele, "Statistical Analysis of the effect of magnet placement on cogging torque in fractional pitch permanent magnet motors", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 8, August 2011, pp. 2142-2148.
- [9] I. Coenen, M. van der Giet, K. Hameyer, "Manufacturing tolerances: estimation and prediction of cogging torque influenced by magnetization faults", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no. 5, May 2012, pp. 876-884.