

Ugotavljanje začetne lege rotorja elektronsko komutiranega motorja na podlagi merjenja spremembe induktivnosti statorskih navitij

Uroš Flisar, Mitja Nemeč, Peter Zajec, Janez Nastran

Fakulteta za elektrotehniko, Univerza v Ljubljani, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija
E-pošta: uros.flisar@fe.uni-lj.si

Povzetek. V prispevku sta predstavljena postopka za brezsenzorsko ugotavljanje začetne lege elektronsko komutiranih motorjev (EKM). Metodi temeljita na merjenju sprememb induktivnosti treh statorskih navitij, ki nastanejo zaradi različne intenzivnosti nasičenja geometrijsko pogojenega magnetnega tokokroga, ob vzajemnem delovanju magnetov na rotorju in tokovno vzbujanih statorskih navitij. Induktivnost posameznega navitja merimo namreč posredno z merjenjem porasta toka enosmernega tokokroga za vseh šest razpoložljivih napetostnih vektorjev trifaznega tranzistorskega mostiča. Razlike tokov, ki jih izračunamo, ko statorska navitja vzbujamo z nasprotno usmerjenimi napetostnimi vektorji, se spreminjajo v odvisnosti od lege rotorja in pomenijo zakonitost, na podlagi katere sta bili razviti metodi za ugotavljanje začetne lege, ki se razlikujeta po računski zahtevnosti in točnosti ocene lege rotorja. Prva metoda na podlagi maksimalne pozitivne oz. negativne vrednosti dveh razlik tokov oceni lego rotorja glede na predhodno definirana področja. Druga metoda oceni lego rotorja na podlagi izračuna najmanjšega pogreška kvadratov izmerjenih in tabeliranih razlik tokov za celoten električni obrat rotorja. Omenjeni metodi omogočata dovolj natančno oceno začetne lege za zagon elektronsko komutiranega motorja.

Ključne besede: EKM motor, brezsenzorski, sprememba induktivnosti, začetna lega

BLDC Machine Rotor Position Detection by Means of Stator Winding Inductance Variation Measurement

Extended abstract. Permanent magnet brushless direct current (BLDC) motors are replacing brush motors in numerous applications as they offer significant energy efficiency improvements, lower acoustic noise and better reliability to name just a few of their advantages. Generally, a BLDC motor drive uses one or more sensors giving positional information allowing the magnetic field of rotor magnets and the magnetic field of stator windings to be kept synchronized. Such realization results in a higher drive cost due to sensor wiring and its implementation in the motor. Therefore, for cost and technical reasons, sensorless operation is an essential capability of the brushless motor controller.

This paper presents two methods for BLDC machine rotor position detection based on measuring inductance variations in the stator windings, their advantages and drawbacks, as well as their practical implementation using a modern approach to motor control. The inductance variation is a function of the changing the flux due to position of the rotor magnets and saturation effect of the stator core when impressed by the stator current. For the case when the rotor flux (Φ_{PM}) and the stator flux ($L_a(i) \cdot i_a$) support each other (Figs. 1a and 1c), the total flux linkage (Φ_{st}) with the winding is explained in Eq. (1). If the stator current i_{a+} is sufficient, the stator iron saturates and decreases the winding inductance. When the polarity of the impressed stator current changes (i_a), the total flux reduces, the magnetic circuit goes out of saturation and the stator winding inductance increases (Figs. 1b and 1c).

The relationship between the inductance and the current response can be further explained with Eq. (2), where U_{DC} is

the DC-link voltage, R_a is the winding resistance and L_a the winding inductance. If the exponential response of the current is neglected ($T_S \ll (L_a(i)/R_a)$), the equation for calculating the winding inductance can be simplified to Eq. (3). Inductance variations can therefore be monitored with the rate of change of the stator current when a constant voltage of a fixed time duration is applied to the stator windings as shown in Fig. 2. With these current measurements it is possible to estimate the relative rotor position between the rotor magnet and the stator windings.

Fig. 3 illustrates the experimental setup consisting of an 18 V, 4-pole BLDC motor, a 3-phase inverter and a 128 lines rotary encoder attached to the rotor axis for monitoring the rotor position. The proposed algorithms were implemented on a TMS320F2808 DSP board. The motor can be modeled as a three-phase R-L circuit as shown in Figs. 3 and 5a when excited with voltage vector V_j defined in Fig. 4. Due to current distribution in the stator windings, the current i_a of phase A can be treated as a DC-link current i_{DC} (Fig 5b). Only currents that equaled the DC-link current (as in (4)), were used to calculate the current differences ($\Delta i_a = i_{a+} - i_{a-}$, $\Delta i_b = i_{b+} - i_{b-}$, $\Delta i_c = i_{c+} - i_{c-}$), which make the inductance variation easier to define.

Before the methods are first used, the relation between the current differences and the rotor position needs to be measured. This was done at standstill, when a sequence of six voltage vectors with the amplitude of 18 V and the duration of $T_S = 60 \mu s$ was applied and all six current responses were measured at each increment of the rotor position for one electrical turn. The calculated current differences as a function of the rotor position given in Fig. 6 represent the basis for the proposed methods.

The first method estimates the rotor position based on the positive (or negative) pair of maximal current differences

according to the six sections defined in Table 1. Figures 7a and 7b show the results achieved with the first method. The detection error is within 60 degrees electrical. The second method uses the tabulated current differences (for one electrical turn) in order to calculate the minimal square error from the measured and tabulated samples (Eq. 7). The resolution of the incremental encoder (128) and the number of pole pairs of the rotor (2) define the dimension of the lookup table (64 x 3). The rows of the table are rotor positions for one electrical turn ($k = 1 \dots 64$) and the columns are measured current differences (Δi_{ak} , Δi_{bk} in Δi_{ck}). The rotor position is most accurate when the sum of the calculated square errors is minimal. The results are illustrated in Figs. 8a and 8b. The detection error is approximately 6 electrical degrees, except in areas where the error is higher, however it remains within the boundaries of the required accuracy for the BLDC motor (60 electrical degrees).

The proposed methods offer a different approach to estimation of the rotor position utilizing the inductance variation measurements. The first method is simpler and achieves a similar accuracy when using the Hall sensors and is appropriate for applications requiring a low computing power. For the non-salient BLDC motors, the second approach is more beneficial. A Higher accuracy makes it usable for other types of motors, such as PMSM motors and switched reluctance motors.

Keywords: BLDC motor, sensorless, initial position, inductance variation

1 Uvod

Elektronsko komutirani motorji (EKM) v vedno večjem obsegu nadomeščajo motorje s ščetkami zaradi njihove večje energetske učinkovitosti, manjšega hrupa in predvsem delovanja brez mehansko obrabljivih sestavnih delov. Vendar pa ima uporaba enega ali več senzorjev za detekcijo lege rotorja EKM za posledico dodatne stroške pri namestitvi električnih povezav in vgradnji senzorja v motor. Prav tako je problematična izpostavljenost senzorjev lege povišani temperaturi in vlažnosti, kar se lahko izrazi v nezanesljivem delovanju motorja. Omenjenim pomanjkljivostim se poskušamo v čim večji meri izogniti z brezsenzorskimi načini obratovanja elektronsko komutiranega motorja.

Ena pogostejših metod temelji na zaznavi prehoda gibalne inducirane napetosti v statorskih navitjih skozi vrednost nič [1]. Za zagon motorja je tovrstna rešitev neuporabna, saj je inducirana napetost sprva enaka nič. Z naraščajočo vrtilno hitrostjo postaja zanesljivost določitve prehoda skozi nič vedno večja, a za učinkovit zagon vseeno premajhna. Zato se pri zagonu nezahtevnihtorskih pogonov omenjena metoda nadgradi z uporabo preprostega pristopa, ki ga lahko na kratko poimenujemo »nastavi in poženi« [2]. V prvem koraku rotorju vsilimo znano lego, nakar ga s počasi naraščajočim vrtilnim magnetnim poljem zavrtimo do minimalne hitrosti, pri kateri lahko že zanesljivo zaznamo prehod inducirane napetosti skozi nič.

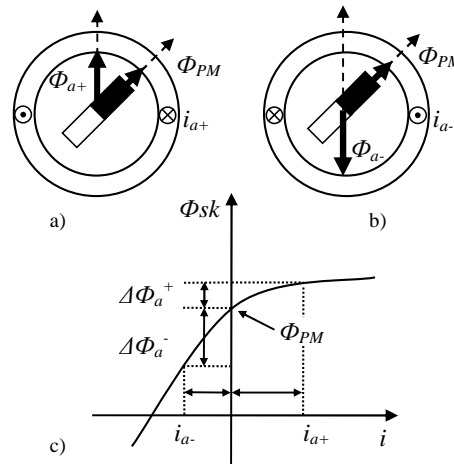
V kompleksnejših motorskih pogonih, ko nastavitev začetne lege rotorja ni mogoča (npr. vozila na električni pogon) ali dovoljena (npr. električni momentni ključ), moramo uporabiti drugačne rešitve. V teh primerih

ocena začetne lege ni pomembna le za stabilen zagon, temveč tudi za dosego čim višjega začetnega navora, s katerim zmanjšamo čas zagona motorja.

V prispevku sta predlagani računski metodi za oceno začetne lege rotorja, ki temeljita na merjenju sprememb induktivnosti statorskih navitij v odvisnosti od kota zasuka rotorja in statorskega toka [3-5]. Metodi se med seboj razlikujeta po točnosti ocenjene lege rotorja in računski zahtevnosti. Za delovanje ne zahtevata poznavanja konstrukcijskih in električnih parametrov elektronsko komutiranihtorskih motorjev. Pred njuno prvo uporabo mora mikroprocesorsko nadzorno vezje posneti zakonitost spreminjanja induktivnosti statorskih navitij po vnaprej podanem diagnostičnem postopku. Metodi sta preizkušeni na 4-polnem EKM z neizraženo geometrijo rotorskih in statorskih zob.

2 Fizikalno ozadje ugotavljanja lege rotorja na podlagi merjenja spremembe induktivnosti statorskih navitij

Induktivnost statorskih navitij je geometrijsko-snovna lastnost in je na splošno odvisna od geometrije magnetnega tokokroga, prek katerega se sklepa skupni magnetni pretok, ki ga povzročata statorsko in rotorsko vzbujanje. Pri EKM s slabo izraženimi statorskimi in rotorskimi poli je razlika induktivnosti posameznega navitja, pomejena v različnih legah rotorja, premajhna, da bi jo lahko uporabili za posredno ugotavljanje lege. Omenjeno velja toliko bolj tedaj, ko bi pri meritvi induktivnosti uporabljali majhno izmenično vzbujanje merjenca. Tehnično sprejemljivejša je rešitev, kjer statorsko navitje vzbujamo s tolikšnim tokom, da s slednjim občutno vplivamo na snovne lastnosti magnetnega tokokroga, t.j. da vplivamo na njegovo permeabilnost.



Slika 1a, 1b, 1c: Sprememba magnetnega pretoka pri različnem magnetenju statorja (i_{a+} oz. i_{a-})

Figure 1a, 1b, 1c: Flux variation due to direction of the current (i_{a+} and i_{a-})

Pri razlagi predpostavimo, da magnetni osi rotorja in statorskega vzbujanja nista poravnani (slika 1a). Z namenom, da bo izmerjena sprememba induktivnosti v različnih legah rotorja čim večja, v predlaganem postopku izmerimo induktivnost statorskega navitja pri pozitivni in negativni polariteti statorskega toka i_a ter izrazimo njuno razliko.

Pomerjena razlika induktivnosti statorskega navitja A bo namreč toliko večja, kolikor večja bo razlika v lokalnem nasičenju rotorskih in statorskih zob (slika 1c), saj se magnetna pretoka statorskega vzbujanja in trajnega magnetna rotorja (Φ_{PM}) pri pozitivnem toku (i_{a+}) podpirata

$$\Phi_{sk} = \Phi_{PM} + L_a(i) \cdot i_a, \quad (1)$$

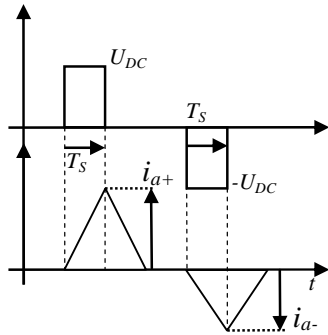
medtem ko si pri negativnem toku i_{a-} nasprotujeta (slika 1b). Nasičenje je izrazitejše, ko magnetni osi rotorskega in statorskega pola nista povsem poravnani.

Induktivnost statorskega navitja merimo posredno prek izmerjene rasti toka v poznanim času T_S (slika 2), ko na statorsko navitje priključimo konstantno enosmerno napetost U_{DC} , ki povzroči porast toka

$$i_a = \frac{U_{DC}}{R_a} \left(1 - e^{-\frac{R_a}{L_a(i)}t}\right), \quad (2)$$

kjer je R_a ohmska upornost statorskega navitja in $L_a(i)$ njegova induktivnost. Pri izpeljavi (2) smo zanemarili vpliv gibalne inducirane napetosti, saj rotor pri ugotavljanju lege miruje. Če nadalje izberemo $T_S \ll (L_a(i)/R_a)$, lahko predpostavimo enakomeren porast toka i_a , kar ob konstantni napetosti U_{DC} dodatno poenostavi izračun induktivnosti statorskega navitja

$$L_a(i) = \frac{U_{DC}}{i_a} \cdot T_S. \quad (3)$$



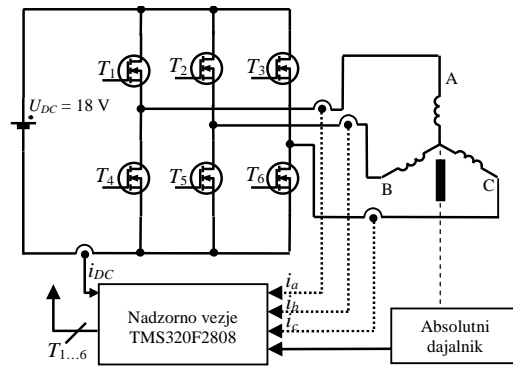
Slika 2: Posredno merjenje induktivnosti pri različnem magnetenju statorskega navitja in potek toka i_{a+} oz. i_{a-} .
Figure 2: Impressed stator voltage and corresponding phase current i_{a+} and i_{a-} .

Ob konstantnem času T_S sta amplitudi izmerjenih tokov (i_{a+} , i_{a-}) zaradi različnega nasičenja različni in obratno sorazmerni induktivnosti, kar pomeni, da nam induktivnosti pravzaprav ni treba izračunavati, temveč za spremembo induktivnosti opazujemo neposredno spremembo izmerjenih tokov. Pomanjkljivost metode se kaže v kompromisni izbiri vzbujevalnega časa T_S , ki

mora biti dovolj dolg, da dosežemo dovolj velik porast toka in s tem posredno ustrežnejšo točnost pri meritvi njegove amplitude, po drugi strani pa vzbujevalni čas ne sme biti predolg, da ne presežemo vrtilnega momenta, ki bi mu uspelo rotor premakniti iz mirujoče lege.

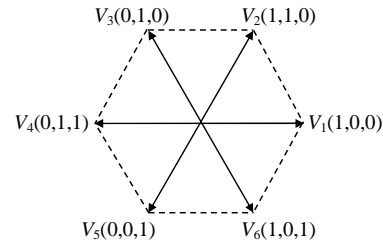
2.1 Zgradba pogonskega in merilnega sklopa za ugotavljanje lege rotorja trifaznega EKM

Predlagano metodo smo preizkusili na trifaznem motorju EKM ($R_a = R_b = R_c = 450 \text{ m}\Omega$, $L_a = L_b = L_c = 15,5 \text{ }\mu\text{H}$, $2p = 4$) z nazivno napetostjo 18 V, ki je bil priključen na standardni trifazni tranzistorski mostič, ki ga kaže slika 3. Motor je bil opremljen z absolutnim dajalnikom lege (ločljivost dajalnika: 128), ki se uporablja za izračun pogreška pri ugotavljanju rotorjeve lege. Vsi toki so bili merjeni s tokovnimi sondami LA 55-P, ki so bile povezane z A/D pretvornikom nadrejenega vezja TMS320F2808.



Slika 3: Shema vezave trifaznega mostiča, EKM in nadzornega vezja
Figure 3: System configuration of the inverter, BLDC motor and control board

S proženjem močnostnih stikal (T_1 do T_6) generiramo izhodno napetost tranzistorskega mostiča, ki jo predstavimo z enim izmed šestih aktivnih vektorjev napetosti (V_1 do V_6). Pravilno zaporedje proženja omogoča generiranje vrtilnega magnetnega polja, to isto napetost pa uporabimo za posredno meritev induktivnosti statorskih navitij.



Slika 4: Šesterokotnik, ki prikazuje položaje napetostnih vektorjev
Figure 4: Six voltage vectors

Velikost napetostnega vektorja je enaka napajalni napetosti enosmernega tokokroga U_{DC} , ki pa ni enaka vsiljeni napetosti na posameznem navitju, kot je bilo to pri opisu metode v predhodnem poglavju. Zato porasta toka v posameznem navitju ne moremo izraziti z (2), saj se pritisnjena napetost na statorskem navitju spreminja glede na generirani napetostni vektor, kar pomeni, da bi morali dodatno meriti električni potencial zvezdišča, ki pa ni nujno dostopno. Zaradi širše uporabnosti opisane metode je v nadaljevanju predlagan prilagojeni postopek za ugotavljanje lege rotorja, kjer ne merimo več porasta tokov vseh treh navitij, temveč le porast toka enosmernega tokokroga.

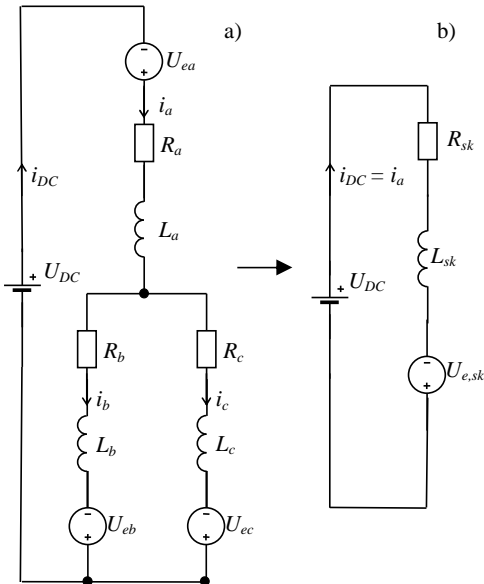
Porast slednjega določajo vrednosti elementov v nadomestni shemi, ki zaobjema vpliv vseh treh statorskih navitij (sliki 5a in 5b). Čeprav se konfiguracija izhodiščne sheme (slika 5a) spreminja glede na generirani napetostni vektor (V_1 do V_6), pa vsak trenutek velja enakost toka enosmernega tokokroga z enim izmed vejnih statorskih tokov, npr.

$$\begin{aligned} i_{DC} |_{V_1} &= i_{a+} \\ i_{DC} |_{V_4} &= i_{a-} \end{aligned} \quad (4)$$

Izmerjeni porast toka i_{DC} posledično seveda ni več obratno sorazmeren induktivnosti zgolj enega navitja, temveč vplivu vseh treh,

$$L_{sk}(i) = \frac{U_{DC}}{i_{DC}} \cdot T_S, \quad (5)$$

pri čemer povečanje induktivnosti enega navitja sovпада z zmanjšanjem induktivnosti sosednjih navitij.

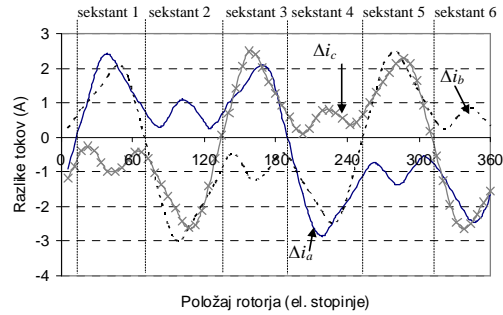


Slika 5: a) Nadomestna shema EKM motorja za napetostni vektor V_1 , b) poenostavljena shema ($i_{DC} = i_a$)
Figure 5: a) Equivalent scheme of modeled circuit for the BLDC motor for vector V_1 , b) Simplified scheme ($i_{DC} = i_a$)

Z diagnosticirnim postopkom, s katerim moramo pridobiti informacijo o zakonitosti spreminjanja induktivnosti statorja v odvisnosti od lege rotorja, smo v vsaki izmed 64 znanih leg rotorja (ustreza enemu električnemu obratu) izmerili porast toka i_{DC} , ki ga povzročijo posamezni napetostni vektorji (V_1 do V_6). Slednje smo storili pri $T_S = 60 \mu s$ in pri napetosti enosmernega tokokroga $U_{DC} = 18 V$. Ker nas pri opisani metodi pravzaprav ne zanimajo absolutni iznosi induktivnosti po enačbi 4 ter da bi čim bolj poenostavili izračun ugotavljanja lege, smo namesto razlik induktivnosti

$$\begin{aligned} \Delta L_{sk,a} &= L_{sk}(i_{a+}) - L_{sk}(i_{a-}) \\ \Delta L_{sk,b} &= L_{sk}(i_{b+}) - L_{sk}(i_{b-}) \\ \Delta L_{sk,c} &= L_{sk}(i_{c+}) - L_{sk}(i_{c-}) \end{aligned} \quad (6)$$

opazovali neposredne razlike tokov ($\Delta i_a = i_{a+} - i_{a-}$, $\Delta i_b = i_{b+} - i_{b-}$, $\Delta i_c = i_{c+} - i_{c-}$). S tem smo se izognili tudi nevarnosti deljenja z vrednostjo nič. Razlike tokov v odvisnosti od lege rotorja so razvidne iz slike 6.



Slika 6: Razlike tokov enosmernega tokokroga v odvisnosti od lege rotorja
Figure 6: Measured dc-link current difference as a function of rotor position

Tako izmerjena zakonitost spreminjanja razlike tokov ($\Delta i_a, \Delta i_b, \Delta i_c$) v odvisnosti od lege rotorja je izhodišče obeh računskih metod za brezsenzorsko ugotavljanje začetne lege rotorja, ki sta opisani v nadaljevanju.

3 Predlagani računski metodi za oceno začetne lege rotorja BLDC motorjev

3.1 Metoda 1

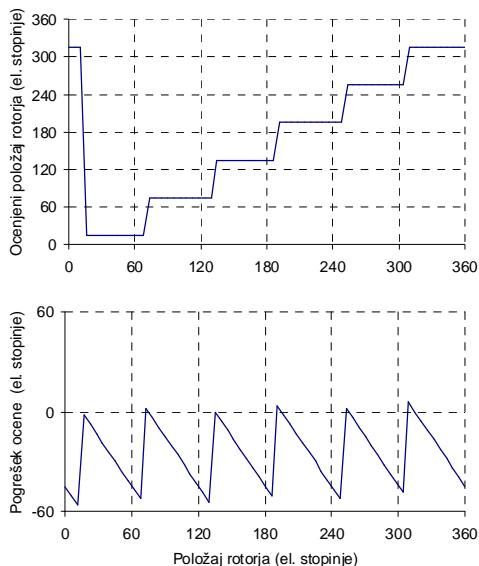
Prva metoda je bila razvita za preprostejše motorske pogone, kjer bi si želeli izogniti uporabi treh Hallovih sond, ki lego rotorja v enem električnem obratu razdelijo na šest območij s širino 60 električnih stopinj. V prid takšni brezsenzorski metodi ugotavljanja lege so izrazite posebnosti, ki so razvidne iz slike 6. Opazimo lahko, da so vrhovi krivulj z izmerjenimi maksimalnimi razlikami tokov med seboj oddaljeni za približno 60 električnih stopinj. Razvidno je tudi lokalno prekrivanje dveh krivulj. Na podlagi omenjenih zakonitosti smo električni obrat rotorja razdelili v šest polj, ki jih razmejujejo ravnovesne lege, ko je magnetna os rotorja

poravnana s statorsko osjo. Omenjene ravnovesne lege so na sliki 6 prepoznavne kot mesta, kjer posamezne krivulje preidejo skozi vrednost nič. Za posamezno področje je značilno tudi, da sta številčni vrednosti dveh izmerjenih tokovnih razlik istega predznaka, medtem ko ima tretja nasprotni predznak (tabela 1).

Tabela 1: Določitev šestih območij lege rotorja na podlagi dveh razlik tokov z izbranim nap. vektorjem
Table 1: Definition of six sections, based on the selected pair of phase current differences from Fig. 6

Položaj rotorja (električne °)		
Razlika tokov enakega predznaka	Področje med ravnovesnima. legama	Oznaka sekstanta
$(\Delta i_a, \Delta i_b) > 0$	15 → 70	sekstant 1
$(\Delta i_b, \Delta i_c) < 0$	70 → 135	sekstant 2
$(\Delta i_a, \Delta i_c) > 0$	135 → 190	sekstant 3
$(\Delta i_a, \Delta i_b) < 0$	190 → 255	sekstant 4
$(\Delta i_b, \Delta i_c) > 0$	255 → 315	sekstant 5
$(\Delta i_a, \Delta i_c) < 0$	315 → 15	sekstant 6

Postopek brezsenzorskega ugotavljanja se torej skrči na meritev treh tokovnih razlik, izločitvi dveh izmerjenih vrednosti enakega predznaka ter primerjavi s tabelirano zakonitostjo (tabela 1), ki kot rezultat poda oznako sekstanta ali številčno vrednost električnega kota, ki sovпада z električnim kotom začetne ravnovesne lege dotičnega sektorja.



Slika 7: a) Ocenjeni položaj v odvisnosti od lege rotorja in b) pogrešek ocene položaja rotorja
Figure 7: a) Estimated rotor position and b) error as a function of rotor position

Rezultate opisane metode kaže slika 7. Izrazita stopničasta oblika krivulje je zelo podobna tisti, ki bi jo dobili z uporabo treh Hallovih sond. Enako velja za pogrešek ocenjene lege glede na dejansko lego rotorja.

Začetni fazni odmik iz koordinatnega izhodišča, ki je razviden iz obeh grafov, ni toliko problematičen, saj nastopa tudi pri ustaljeni rešitvi z uporabo Hallovih sond (offset, neenaka geometrija namestitve). Bistvena prednost omenjene metode je zahteva po majhni računski moči nadrejenega procesorja.

3.2 Metoda 2 - Ugotavljanje lege s pomočjo metode najmanjših kvadratov

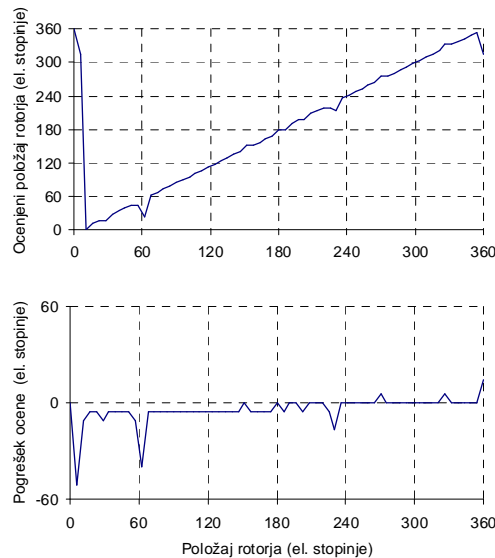
V nasprotju s predhodno metodo narekuje metoda najmanjših kvadratov računsko zahtevnejše operacije. Metoda zahteva tabeliranje razlik tokov, prikazanih na sliki 6, za vsako lego rotorja v obliki tabele dimenzij 64×3 . Vrstice označujejo lego rotorja, izmerjeno z absolutnim dajalnikom ($k = 1 \dots 64$), stolpci pa vrednosti z diagnostičnim postopkom izmerjenih razlik tokov ($\Delta i_{ak}, \Delta i_{bk}$ in Δi_{ck}).

Postopek ugotavljanja neznane lege rotorja začnemo tudi tu z generiranjem šestih napetostnih vektorjev, meritvijo toka i_{DC} in izračunom tokovnih razlik ($\Delta i_a, \Delta i_b$ in Δi_c).

S pomočjo tabeliranih vrednosti nato izračunamo pogrešek k-te lege

$$err_k = (\Delta i_a - \Delta i_{ak})^2 + (\Delta i_b - \Delta i_{bk})^2 + (\Delta i_c - \Delta i_{ck})^2. \quad (7)$$

Izmed tako izračunanimi 64 pogreški določimo tistega z minimalno vrednostjo, katerega indeks ustreza iskani legi rotorja. S to metodo dosežemo boljšo natančnost (slika 8a in 8b). Pogrešek med ocenjeno in dejansko lego rotorja (slika 8a) znaša v povprečju 6 električnih stopinj, kolikor znaša tudi ločljivost referenčnega absolutnega dajalnika pozicije. Večja lokalna odstopanja bi lahko odpravili z merjenjem razlik tokov s slike 6 za več mehanskih obratov rotorja.



Slika 8: a) Ocenjeni položaj v odvisnosti od lege rotorja in b) pogrešek ocene položaja rotorja
Figure 8: a) Estimated rotor position and b) error as a function of rotor position

4 Sklep

V članku sta predstavljeni metodi, s katerima uspešno ugotovimo lego rotorja elektronsko komutiranega motorja. Z vzbujanjem statorskih navitij s šestimi napetosnimi vektorji, s katerimi dosežemo različno intenzivnost nasičenja magnetnega tokokroga motorja, lahko posredno z merjenjem porasta toka enosmernega tokokroga ocenimo spremembo induktivnosti statorskih navitij, na podlagi katere pridobimo informacijo o absolutni legi rotorja. Metodi temeljita na predhodno pomerjeni zakonitosti spreminjanja razlik tokov enosmernega tokokroga, ki so odvisne od rotorjeve lege.

Ugotavljanje lege s prvo metodo je računsko manj zahtevno, dosežena natančnost pa je primerljiva s senzorsko rešitvijo z uporabo Hallovih sond, kar potrjujejo tudi opravljene meritve lege z referenčnim absolutnim dajalnikom. Drugo metodo, ki računa najmanjši pogrešek kvadratov izmerjenih in shranjenih razlik tokov, odlikuje boljša točnost, vendar je računsko zahtevnejša. Primerna je za zmogljivejše motorske pogone, kot so npr. sinhronski motorji s trajnimi magneti.

5 Literatura

- [1] BOSE, Bimal K., *Modern Power Electronics and AC Drives*, 2001, ISBN 0-13-016743-6, pp. 515-522.
- [2] OGASAWARA, S., and AKAGI, H.: "An approach to position sensorless drive for brushless DC motors", *IEEE Trans. Ind Appl.*, 1991, 27, (5), pp 928-933.
- [3] WOOK-JIN Lee, SEUNG-KI Sul, "A New Starting Method of BLDC Motors Without Position Sensor", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, Vol. 42, No. 6, November/December 2006.
- [4] JANG G. H., PARK J. H., and CHANG J. H., "Position detection and startup algorithm of a rotor in a sensorless BLDC motor utilizing inductance variation," *Proc. Inst. Electr. Eng.—Electr. Power Appl.*, vol. 149, no. 2, pp. 137–142, Mar. 2002.
- [5] NEMEC, Mitja, FLISAR, Uroš, NEDELJKOVIĆ, David, AMBROŽIČ, Vanja. Accurate detection of initial rotor position in a multi-pole synchronous machine. V: *International Symposium on Industrial Electronics*, June 4-7, 2007, Vigo, Spain. *Proceedings.*, cop. 2007, pp. 2274-2277.

Uroš Flisar je mladi raziskovalec na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani in je diplomiral leta 2005 na isti fakulteti. Raziskovalno se ukvarja z motorskimi pogoni in močnostno elektrotehniko.

Mitja Nemeč je diplomiral leta 2003 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Je mladi raziskovalec v laboratoriju za regulacijsko tehniko in močnostno elektrotehniko. Njegovo področje raziskav zajema pretvorniške naprave in motorske pogone.

Peter Zajec je diplomiral leta 1994 in magistriral leta 1997 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Leta 1999 je na isti fakulteti zagovarjal doktorsko disertacijo, za katero je prejel nagrado dr. Vratislava Bedjaniča. V letu 2000 je bil na trimesečnem strokovnem izpopolnjevanju na Universität Stuttgart, Institut für Leistungselektronik und Regelungstechnik. Zaposlen je kot docent na Fakulteti za elektrotehniko, v Laboratoriju za regulacijsko tehniko in močnostno elektroniko. Težišče njegovega raziskovalnega dela je na področju statičnih pretvornikov in pripadajočih merilnih sistemih.

Janez Nastran je diplomiral leta 1971, magistriral pa leta 1977 na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Leta 1985 je na isti fakulteti uspešno zagovarjal doktorsko disertacijo, za katero je prejel nagrado dr. Vratislava Bedjaniča. Težišče njegovega dela sta močnostna elektronika in regulacijska tehnika. Leta 1993 je dobil nagrado Republike Slovenije za znanstvenoraziskovalno delo. Leta 2003 je bil izvoljen za rednega profesorja na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani.