

Metod za samokalibraciju magnetno-rezistivnog senzora ugaone pozicije u servo sistemima

VLADIMIR D. ČEPERKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički fakultet, Beograd
VUJO R. DRNDAREVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički fakultet, Beograd

Originalni naučni rad
UDC: 681.513.3
DOI: 10.5937/tehnika2004469C

Magnetno-rezistivni i Hallovi senzori ugaone pozicije se često primenjuju u servo sistemima zbog svoje pouzdanosti, dugotrajnosti i otpornosti na nepovoljne uslove okruženja. U ovom radu kompenzacija greške merenja ugaone pozicije integrisana je sa upravljačkom strukturom servo sistema. Kompenzacija se sastoji od linearne kompenzacije greške merenja vektora magnetnog polja i harmonijske kompenzacije greške merenja ugaone pozicije. Predloženi metod za samokalibraciju koristi podatke prikupljene tokom kretanja najvećom dopuštenom brzinom za identifikaciju parametara modela mernog procesa. Identifikacija se izvršava periodično, svaki put kada osovina opiše pun ugao. Za identifikaciju parametara linearne kompenzacije primenjen je metod najmanjih kvadrata, dok se srednja brzina rotacije koristi kao referenca visoke tačnosti za identifikaciju parametara harmonijske kompenzacije. Predložena metoda, uz brzu konvergenciju, obezbeđuje povećanje tačnosti merenja za red veličine u odnosu na standardno primenjene metode kompenzacije greške merenja. Eksperimentalno postignuta merna nesigurnost je bolja od 0.7° , uz varijansu reziduala manju od 0.05° , što je uporedivo sa razlučivošću senzora.

Ključne reči: magnetno-rezistivni senzori, samokalibracija, servo sistem, merenje ugla

1. UVOD

Precizni servo sistemi imaju široku primenu u automobilske industriji, gde se koriste za upravljanje vozilom, kontrolu protoka smeše vazduha i goriva kod motora sa unutrašnjim sagorevanjem, te upravljanje kontrolnim površinama za usmeravanje vazduha u sistemu ventilacije. Od njih se očekuje pouzdan rad [16] u izrazito nepovoljnom radnom okruženju, širokom opsegu radnih temperatura, uz prisustvo vibracija, prašine i vlage. Izbor odgovarajućeg senzora mehaničkog ugla je kritičan za ispunjavanje ovih uslova.

Velika temperaturna stabilnost i mehanička robusnost [1] dovela je do šire primene magnetno-rezistivnih (MR) senzora ugaone pozicije. Rad ovih senzora, zasnovan je na primeni anisotropne magnetoresistive (AMR), giant magnetoresistive (GMR), ili tunnel mag-

netoresistive (TMR) efekta. Kod MR senzora stalan magnet pričvršćen na osovinu stvara magnetno polje, čija se orijentacija meri MR senzorskim elementima. Ključan aspekt njihove primene je ispravno poravnanje magnetna i senzora, pošto čak i mala odstupanja dovode do neprihvatljivo velike greške merenja. Stoga je u prisustvu uobičajenih mehaničkih tolerancija neophodna primena end-of-line (EOL) kalibracije [2, 3, 11] da bi se postigla željena tačnost.

Posebno je zahtevna primena magnetno-rezistivnih senzora za merenje ugaone pozicije regulacionih ventila visokog pritiska. Magnet je smešten u čauru od nerđajućeg čelika, na relativno velikoj udaljenosti od senzora i uz značajnu grešku poravnanja osa rotacije, magnetna i senzora. Stoga je magnetno polje na senzoru slabo, sa veoma izraženim parazitnim komponentama. Istovremeno, EOL kalibracija nije primenljiva.

Mogući uzroci nelinearnih mernih grešaka razmatrani su u [4]. Iako se studija odnosi samo na Hall-ove senzore sa koncentраторom magnetnog fluksa, rezultati su primenljivi i za MR ugaone senzore. U [5] i [6], razmatran je uticaj karakteristika stalnih magnetna i mehaničkih tolerancija na grešku merenja GMR senzora ugaone pozicije. Magnet i senzor moraju biti

Adresa autora: Vladimir Čeperković, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

e-mail: ceperkovic@etf.rs

Rad primljen: 07.07.2020.

Rad prihvaćen: 13.07.2020.

pažljivo poravnati pri montaži, inače je tačnost MR senzora značajno umanjena. Posebno, greške MR senzora su periodične, sa periodom od 180° stepeni.

Metod za samokalibraciju rezolvera u brzinskom servo sistemu baziran na linearnom modelu mernog procesa je predložen u [7]. Primenjen je gradijentni algoritam za identifikaciju parametara linearne kompenzacije, tako da se minimizuje srednje kvadratno odstupanje kompenzovanog signala od jediničnog kruga. Na žalost, 1 metod koristi prošireni observer ugaone pozicije za referencu, što ograničava tačnost samokalibracije. Nedostatak ovog metoda je i relativno spora konvergencija, procenjena u [7] na više desetina perioda rotacije. Metod [8] koristi Model-based Automatic Search Algorithm (MASA) za samokalibraciju rezolvera. Upotrebljen je polinomijalni nelinearni model merenja i back-propagation gradijentni metod za optimizaciju.

Samokalibracija AMR senzora opisana u [9] primenjuje pojednostavljeni linearni model senzora, čije parametre određuje korišćenjem gradijentnog algoritma. Pokazano je da rezidualna greška značajno zavisi od početne ocene parametara modela. U [10] je problem mernog ofseta rešen primenom jednostavnog sistema jednačina, uz pretpostavku da je šum mernog sistema zanemarljiv, da je osetljivost oba mosta identična, te da ne postoje drugi uzroci greške.

Jedno rešenje problema osetljivosti merenja na relativno pozicioniranje ose magnetna i senzora predstavljeno je u [11], u formi pogodnoj za EOL kalibraciju. Upotrebljena je matrica senzora, zajedno sa teoretskim modelom magnetnog polja, da bi se odredila polinomijalna kompenzaciona funkcija. Istovetan princip matrice senzora je primenjen i u [12] da bi se identifikovao i kompenzovao uticaj spoljašnjeg magnetnog polja.

Alternativni pristup, analiziran u [13], sastoji se od korišćenja fizičke zaštite napravljene od materijala velike magnetske permeabilnosti. Predloženi koncept nije našao praktičnu primenu zbog teškoća u proizvodnji takve zaštite, kao i ograničenog raspoloživog prostora za smeštanje mernog sistema.

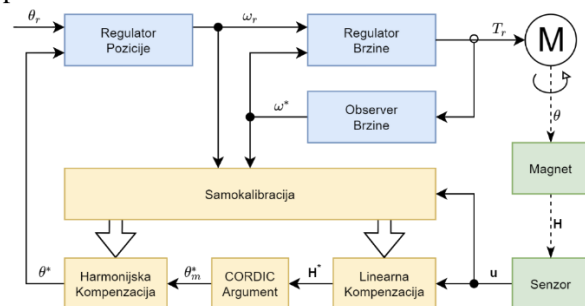
Automobilski periferni uređaji su često zasnovani na namenskim 8-bitnim mikrokontrolerima (MCU), poput [17], zbog njihove velike pouzdanosti i male cene. Istovremeno, njihova nedovoljna računarska snaga je ograničila primenu kompleksnih metoda samokalibracije. Međutim, sa pojavom adaptivnih automobilskih platformi zasnovanih na AUTOSAR standardu [18], raspoloživi računski kapaciteti su znatno povećani. Naime, adaptivna platforma uključuje bar jedan aplikativni server (AS) za izvršavanje računski zahtevnih servisa, čime je postalo moguće realizovati metod samokalibracije u distribuiranom obliku.

Cilj ovog rada je razvoj nove metode samokalibracije za MR senzore ugaone pozicije u servo sistemima, kod koje se kompenzacija greške merenja podešava na osnovu identifikovanih parametara modela senzora. Podešavanje se izvršava periodično, svaki put kada osovina opiše pun ugao rotirajući se najvećom konstantnom brzinom. Za identifikaciju parametara modela primenjena je metoda najmanjih kvadrata i diskretna Furijeova transformacija (DFT). U radu će biti pokazano da se primenom predložene metode samokalibracije tačnost merenja povećava za red veličine. Eksperimentalno će se potvrditi merna nesigurnost manja od 0.7° , koja je uporediva sa rezultatima savremenih EOL procedura kalibracije.

Ovaj rad je organizovan na sledeći način. U odeljku 2 predstavljen je metod za samokalibraciju, uključujući proces merenja i postupak za identifikaciju parametara modela. Eksperimentalna verifikacija metode merenja predstavljena je u odeljku 3. Konačno, odeljak 4 sadrži zaključke ovog rada.

2. METOD SAMOKALBRACIJE

Na slici 1 je prikazana struktura servo sistema sa sistemom merenja ugaone pozicije. Stalan magnet spojen je sa osovinom motora, tako da magnetno polje i osovina rotiraju zajedno. Ispod magnetna je postavljen MR senzor ugla, koji detektuje magnetno polje H u ravni senzora. Rezultat detekcije, posle pojačanja i A/D konverzije, je dvodimenzionalni ulazni signal u od kojeg se daljom obradom, primenom inverznog modela senzora, izračunava rezultat merenja ugaone pozicije θ^* . Istovremeno, ulazni signal u se koristi i za proces samokalibracije, tokom koje se identifikuju parametri modela senzora.



Slika 1 - Struktura servo sistema sa sistemom merenja ugaone pozicije

Inverzni model senzora se sastoji od tri sekvencijalna procesa. Prvo se, primenom linearne kompenzacije, uklanjaju sistematske greške i izračunava rezultat merenja vektora magnetnog polja H^* . Zatim se, primenom CORDIC (COordinate Rotation DIgital Computer) algoritma za izračunavanje argumenta vektora, određuje rezultat merenja ugla magnetnog polja θ_m^* . Konačno, primenom harmonijske kompenzacije, koriguje se odstupanje ugaone pozicije i ugla magnetnog

polja, te se izračunava rezultat merenja ugaone pozicije θ^* .

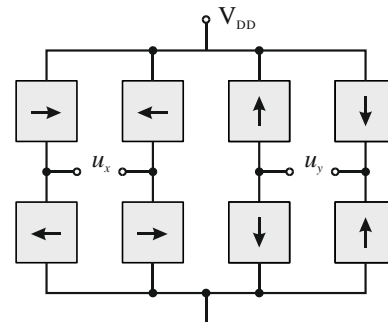
Upravljački podsistem servo sistema se sastoji od kaskadne veze regulatora pozicije i regulatora brzine. Regulator brzine je realizovan pomoću observera brzine rotacije ω^* , tako da ne koristi rezultat merenja ugaone pozicije pri velikim brzinama, dok eventualna upotreba pri manjim brzinama rotacije ne utiče na primenu predložene metode. Istovremeno, zadata brzina ω_r se kontinualno menja po zakonu upravljanja realizovanom u regulatoru pozicije u zavisnosti od razlike zadate ugaone pozicije θ_r i rezultata merenja ugaone pozicije θ^* . Kada je ova razlika dovoljno velika regulator pozicije prelazi u režim zasićenja, u kome je izlaz regulatora konstantan i jednak najvećoj dopuštenoj brzini. U ovom radnom režimu rezultat merenja ugaone pozicije ne utiče na zadatu brzinu rotacije već samo na odluku o izlasku iz režima zasićenja, pa je povratna sprega efektivno prekinuta. Kako su brzina rotacije, ugaona pozicija i ulazni signal u nezavisni od procesa merenja ugaone pozicije, moguće ih je upotrebiti za identifikaciju parametara modela senzora.

Od posebnog interesa je stacionarno stanje u režimu zasićenja regulatora pozicije, kada osovina motora rotira konstantnom brzinom. Naime, srednju brzinu je moguće izmeriti sa velikom tačnošću merenjem periode rotacije, pa se srednja brzina može upotrebiti kao unutrašnja referenca velike tačnosti. Stoga se procedura samokalibracije izvršava samo u stacionarnom stanju u režimu zasićenja regulatora pozicije, kada osovina motora rotira najvećom dopuštenom brzinom. Ukoliko procenjena ili zadata brzina opadnu iz bilo kog razloga, procedura se prekida. Procena parametara modela se vrši periodično, kada osovina opiše pun ugao. To je postignuto upotrebom pomoćnog bafera $U[i]$, $i = 1..N$, u koji se privremeno smeštaju izmerene vrednosti ulaznog signala tokom procedure samokalibracije. Tek kada se bafer napuni, smeštene vrednosti se koriste kao ulazni niz za identifikaciju parametara modela. Ovakvim postupkom obezbeđena je reprezentativnost uzorka i stabilnost procenjenih parametara modela. Istovremeno, implementacija metode samokalibracije je značajno pojednostavljena uprkos računskoj kompleksnosti, pošto se procena parametara modela može izvršavati u obliku sporadičnog zadatka niskog prioriteta na samom uređaju.

3. PROCES MERENJA MAGNETNOG POLJA

Magneto-rezistivni senzor ugla, čija je struktura prikazana na slici 2, meri magnetno polje u ravni senzora. Sam senzor se sastoji od osam MR elementa, povezana u dva merna mosta. Referentni vektori četiri MR elementa u prvom mernom mostu (u_x) su poravnati

sa x_s -osom senzora, dok su referentni vektori četiri MR elementa u drugom mernom mostu (u_y) poravnati sa y_s -osom senzora.



Slika 2 - Struktura mernih mostova MR senzora ugla

Zbog ograničenja fotolitografskog postupka koji se primenjuje u izradi MR senzora, x_s -osa i y_s -osa realnog senzora su samo približno ortogonalne. Bez gubitka opštosti, usvojeno je da y_s -osa senzora bude referentna osa, dok x_s -osa senzora odstupa od idealnog položaja za ugao ϕ u smeru kazaljke. Tada je linearni model MR senzora ugla opisan sa:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_x & u_y \end{bmatrix}^T = \mathbf{G} \cdot \mathbf{H} + \mathbf{o},$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} k_x \cdot \cos(\phi) & -k_x \cdot \sin(\phi) \\ 0 & k_y \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Parametrom \mathbf{o} modelovan je rezidualni ofset analognog interfejsa, inherentni ofset mernih mostova [1, 2, 10], te stalno spoljašnje magnetno polje [5], dok parametri k_x i k_y modeluju različite osetljivosti mostova X i Y [1, 9]. Kako je matrica \mathbf{G} regularna, funkcija prenosa linearne kompenzacije ulaznog signala u dobija se inverzijom linearnog modela (1), kao u:

$$\mathbf{H}^* = \mathbf{G}^{-1} \cdot (\mathbf{u} - \mathbf{o}). \quad (2)$$

Sa druge strane, trag signala \mathbf{u} iz modela (1) opisuje elipsu, koja se može predstaviti i u implicitnom obliku, pomoću funkcije algebarskog odstojanja $f(\mathbf{u}; \mathbf{q})$ sa vektorom parametara \mathbf{q} :

$$f(\mathbf{u}; \mathbf{q}) = \begin{bmatrix} u_x^2 & u_x u_y & u_y^2 & u_x & u_y & 1 \end{bmatrix} \mathbf{q} = 0,$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} a & 2b & c & 2d & 2f & g \end{bmatrix}^T,$$

$$ac - b^2 > 0. \quad (3)$$

Intenzitet vektora parametra \mathbf{q} ne utiče na (3), pa ga je moguće proizvoljno odrediti tako da izraz $ac - b^2$ ima pozitivnu zadatu vrednost. Usvajanjem konstantne zadate vrednosti 0.25, pogodno izabrane tako da rezultirajuća metoda ima najmanji broj računskih operacija, dolazi se do dodatnog uslova koji menja nejednačinu iz (3):

$$ac - b^2 = 0.25. \quad (4)$$

Optimalni vektor parametara \mathbf{q} minimizuje sumu kvadrata algebarskog odstožana $f(\mathbf{u}; \mathbf{q})$ za poznati niz merenja. Njegova vrednost se može odrediti primenom direktne metode za određivanje jednačine elipse [14, 15]. Sa druge strane, elipsa (3) se može predstaviti u kanoničnom obliku linearnom transformacijom koordinata, gde je $\mathbf{R}(\alpha)$ matrica rotacije:

$$\mathbf{u} = \mathbf{R}(\phi_1) \cdot \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}(\phi_0) \cdot \mathbf{H} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{R}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Smenom (5) u (3), i rešavanjem, dobijaju se parametri kanoničnog oblika elipse u funkciji poznatih parametara elipse \mathbf{q} :

$$x_0 = 4 \cdot (b \cdot f - c \cdot d), \quad y_0 = 4 \cdot (b \cdot d - a \cdot f),$$

$$K = 4 \cdot a \cdot f^2 + 4 \cdot c \cdot d^2 - 8 \cdot b \cdot d \cdot f - g,$$

$$\Delta = \sqrt{(a-c)^2 + 4 \cdot b^2},$$

$$k_{x,y} = -\sqrt{2 \cdot K \cdot (a+c \mp \Delta)},$$

$$\phi_1 = \arctan\left(\frac{c-a-\Delta}{2 \cdot b}\right),$$

$$\phi_0 = \arctan\left(\frac{-k_x \cdot \sin(\phi_1)}{k_y \cdot \cos(\phi_1)}\right). \quad (7)$$

Konačno, upoređivanjem (7) i linearnog modela (2), određuju se parametri linearne kompenzacije:

$$\mathbf{o} = [x_0 \quad y_0]^T, \\ \mathbf{G}^{-1} = \mathbf{R}(\phi_0) \cdot \begin{bmatrix} k_x^{-1} & 0 \\ 0 & k_y^{-1} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{R}(-\phi_1). \quad (8)$$

Tačnost parametara u (8) ne zavisi od tačnosti brzine rotacije, odnosno tačnosti regulatora i observera brzine, što je posledica upotrebe implicitnog oblika elipse u modelu (3). Stoga je za ispravnu identifikaciju dovoljno da ulazni niz $U[i]$ predstavlja reprezentativan uzorak, koji obuhvata pun ugao.

3. PROCES MERENJA UGAONE POZICIJE

Rezultati predstavljeni u [4, 5, 6] ukazuju da je nelinearna merna greška, koja se javlja kao posledica karakteristika stalnih magneta i mehaničkih tolerancija sistema, sporo promenljiva periodična funkcija ugaone pozicije. Stoga je izabran harmonijski model vektora magnetnog polja u zavisnosti od ugaone pozicije θ , gde je θ_0 parametar modela:

$$\arg(\mathbf{H}) = m \cdot (\theta + \theta_0 + h(\theta)) \quad (9)$$

Celobrojna geometrijska konstanta m zavisi od tipa MR senzora i broja polova p upotrebljenog stalnog magneta, i ona iznosi $2p$ ako se koristi AMR senzor, odnosno p kada je upotrebljen TMR, GMR, ili Hall-ov senzor.

Harmonijski korektor $h(\theta)$ je dat sa:

$$h(\theta) = \sum_{k=1}^n [a_k \cos(k \cdot \theta) + b_k \sin(k \cdot \theta)] \quad (10)$$

U korektoru (10) su a_k i b_k parametri modela, a n red harmonijskog korektora. Ovaj korektor je posledica polarizacije magneta, nepoklapanja osa rotacije, magneta i senzora, te nagiba senzora u odnosu na magnet. Amplituda harmonika brzo opada, tako da se zadovoljavajuća tačnost modela postiže već sa prva dva harmonika.

Na žalost, direktna inverzija harmonijskog modela (9) i (10) nije moguća. Međutim, znajući da je maksimalna amplituda harmonijskog korektora (10) manja od 1.5° , to se u prvoj aproksimaciji može zanemariti kao u:

$$h(\theta) \approx h\left(\frac{\arg(\mathbf{H})}{m} - \theta_0\right) \quad (11)$$

Primenom aproksimacije (11) dolazi se do približne inverzije harmonijskog modela:

$$\theta^* = \frac{\arg(\mathbf{H}^*)}{m} - \theta_0 - h\left(\frac{\arg(\mathbf{H}^*)}{m} - \theta_0\right) \quad (12)$$

Jednačine (2), (10), (12), i CORDIC algoritam zaokružuju postupak merenja ugaone pozicije. Uzimajući u obzir da se inverzija matrice \mathbf{G} može unapred spremirati, računski zahtevno je samo izračunavanje trigonometrijskih funkcija harmonijskog korektora u (12). U praktičnim realizacijama se ovo može prevazići korišćenjem tabela, ili primenom CORDIC algoritma za istovremeno izračunavanje sinusa i kosinusa ugla.

Parametri harmonijskog modela se identifikuju upoređivanjem referentnog ugla sa nizom izmerenih vrednosti magnetnog ugla $\Theta[i]$, koji je izračunat iz ulaznog niza $U[i]$ primenom linearne kompenzacije (2) sa parametrima iz (8), i određivanjem argumenta kompenzovanog vektora, kao u:

$$\Theta[i] = \arg\left\{\mathbf{G}^{-1} \cdot (U[i] - \mathbf{o})\right\}. \quad (13)$$

Istovremeno, kada se pretpostavi konstantna brzina rotacije, referentni ugao je poznat do nivoa aditivne konstante:

$$\theta(i) = \frac{2\pi}{N}(i-1) + \theta_c. \quad (14)$$

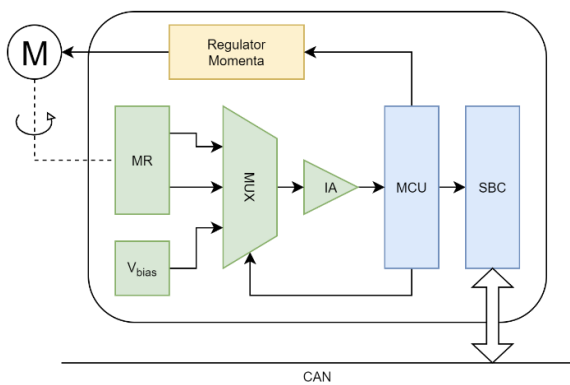
Greška referentnog ugla (14) je direktna posledica odstupanja trenutne brzine od srednje brzine. Kako su regulator i observer brzine projektovani tako da potiskuju grešku brzine u niskofrekventnom delu spektra, to u stacionarnom stanju greška reference sadrži samo visokofrekventne komponente. Koefficienti harmonijske kompenzacije se izračunavaju primenom diskretne Furijeove transformacije na razliku uglova (13) i (14):

$$\begin{aligned}\theta_c &= \theta_0 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\Theta[i] - \frac{2\pi}{N} (i-1) \right), \\ a_k &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N (\Theta[i] - \theta(i)) \cos(k \cdot \theta(i)), \\ b_k &= \frac{2}{N} \sum_{i=1}^N (\Theta[i] - \theta(i)) \sin(k \cdot \theta(i)).\end{aligned}\quad (15)$$

Primena harmonijskog modela malog reda je suštinski značajna za potiskivanje greške unutrašnje reference jer koristi samo niskofrekventni deo spektra za identifikaciju. Stoga se greška reference ponaša kao nezavisan slučajni šum, pa je greška identifikovanih parametara obrnuto proporcionalna kvadratnom korenu dužine ulaznog niza N .

4. EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA METODE MERENJA

Predloženi metod samokalibracije MR senzora ugaone pozicije je realizovan i eksperimentalno proveren na aparaturi čija je blok-shema prikazana na slici 3. Upotrebljen je reluktantni motor male snage sa prenosnim sistemom i AMR sensorom ugaone pozicije. Magnet je postavljen na relativno velikom odstojanju od MR senzora, tako da je intenzitet magnetnog polja blizu donje granice za upotrebljeni senzor, što odgovara realnim uslovima u situaciji kada su MR senzor i magnet smešteni u hermetički odvojene prostore.



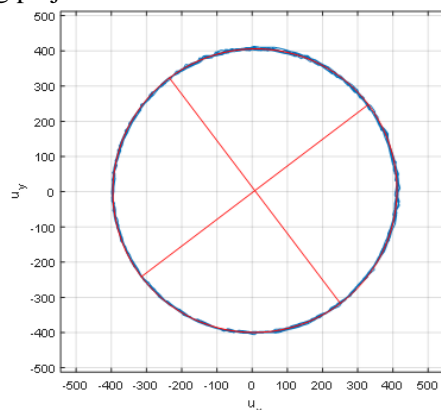
Slika 3 - Blok-shema realizovanog servo-sistema

Merni uređaj je namenski realizovan za potrebe istraživanja naprednih metoda obrade signala za servo sisteme u automobilske industriji. Upotrebljen je 8-

bitni MCU, pogodan za automobilsku primenu, sa integrisanim CAN interfejsom. Motor je povezan pomoću integrisanog regulatora momenta sa vektorskim upravljanjem, dok su regulatori pozicije i brzine realizovani kao deo programa. Analogni merni interfejs se sastoji od multipleksera (MUX), koji bira ulazni signal za merenje, i instrumentacionog pojačavača (IA), koji ga pojačava pre A/D konverzije. Time je obezbeđeno da oba MR merna mosta koriste isti IA, pa njegova greška pojačanja ne utiče na izmereni ugao. U trećem položaju MUX-a, kada je izabrana polovina referentnog napona, meri se ofset analognog interfejsa, da bi se kompenzovao nezavisno od procedure samokalibracije. Uređaj koristi *System Basis Chip* (SBC), koji sadrži kontroler napajanja i komunikacioni interfejs, za povezivanje sa automobilskom platformom.

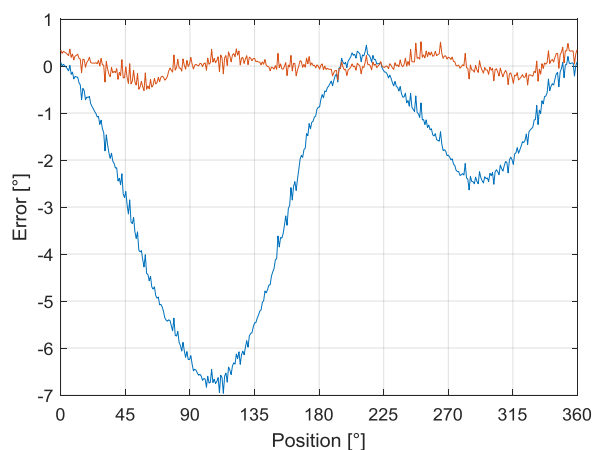
Potrebno je naglasiti da opisana mehanička konstrukcija dopušta samo kvalitativno određivanje relativne pozicije senzora i magneta. Stoga je eksperiment ponovljen sa tri osnovne konfiguracije. U prvoj konfiguraciji (I), ose magneta i senzora se poklapaju, te ne postoji nagib senzora. U drugoj konfiguraciji (II) je dodato stalno polje magnetnih smetnji. Konačno, u trećoj konfiguraciji (III), ugao između osa magneta i senzora, kao i nagib senzora, su izabrani tako da budu najveći mogući, a da pri tome intenzitet magnetnog polja u ravni senzora ostane unutar nominalnog radnog opsega, nezavisno od ugaone pozicije.

Na slici 4 je prikazan trag ulaznog signala \mathbf{u} , u eksperimentu sa trećom konfiguracijom. Bez obzira na izrazito nepovoljne uslove eksperimenta, trag pokazuje izuzetno poklapanje sa modelom. Loše poravnanje osa i stalno polje smetnji uticali su samo na translatorno pomeranje elipse, dok su preostali parametri modela praktično identični u svim eksperimentima. Ovakav rezultat jasno ukazuje na opravdanost uvođenja nezavisne kompenzacije merenja magnetnog polja.



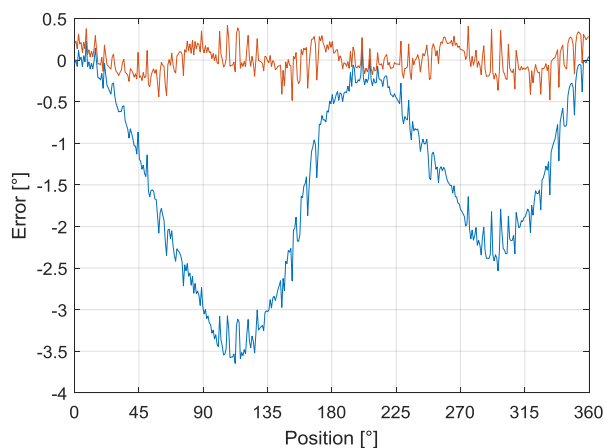
Slika 4 - Trag ulaznog vektora (plavo), i identifikovani model MR senzora (crveno)

Na slici 5 prikazano je odstupanje magnetnog ugla od referentnog ugla u eksperimentu sa trećom konfiguracijom. Najveća greška se javlja kada je odstojanje magneta i senzora najveće, pa je intenzitet magnetnog polja na granici osetljivosti senzora. Bez kompenzacije granica greške doseže 7° , odnosno 2%, što je neprihvatljivo za većinu primena. Međutim, granica greška uz primenu predložene metode je svega 0.5° , bez izraženih harmonika višeg reda.



Slika 5 - Odstupanje ugla od reference pre i posle korekcije, sa nagibom senzora

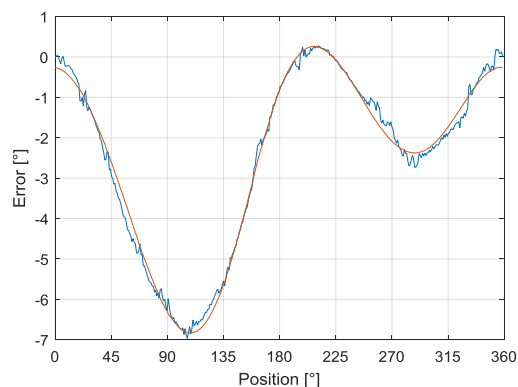
Poređenja radi, kada se identičan eksperiment ponovi bez nagiba senzora (slika 6), rezultat se značajno razlikuje samo u pravcu nagiba.



Slika 6 - Odstupanje ugla od reference pre i posle korekcije, bez nagiba senzora

Na slici 7 je prikazani su rezultati eksperiment kada, usled nemerljivih poremećaja, ravnomernost kretanja nije idealna. Bez obzira na neidealne uslove, i u ovom slučaju harmonijska korekcija uspešno kompenzuje grešku merenja.

Ovo je posledica korišćenja srednje brzine za referencu što, zajedno sa malim redom harmonijskog modela, obezbeđuje značajno potiskivanje ovakvih smetnji.



Slika 7 - Odstupanje ugla od reference i procenjeni harmonijski model, promena opterećenja

Procenjena varijansa greške merenja prikazana je u tabeli 1. Vidi se da mehaničke tolerancije bitno utiču na varijansu greške merenja pre kompenzacije, koja je značajna čak i u situaciji dobrog mehaničkog poravnjanja. Međutim, primena predložene metode smanjuje varijansu za dva reda veličine i svodi je na nivo razlučivosti upotrebljenog senzora. Nije uočen značajan uticaj mehaničke konfiguracije na varijansu greške posle korekcije, osim u ekstremnim slučajevima, što ukazuje na dobro potiskivanje mehaničkih tolerancija aparature.

Tabela 1. Procena varijanse greške

Konfiguracija	Pre Kalibracije	Posle Kalibracije
I – poravnanje osa	0.884	0.028
II – stalno polje smetnji	1.782	0.018
III – nagib senzora	4.243	0.037

Procenjena apsolutna granica greške merenja, prikazana u tabeli 2, je smanjena za red veličine, što je uporedivo sa savremenim postupcima EOL kalibracije. Ispitivanjem je uočeno da je rezidualna greška dominantno posledica mernog šuma analogne elektronike i elektromagnetnih smetnji, te bi se mogla značajno potisnuti uz dodatno filtriranje.

Tabela 2. Procenjena granica greške

Konfiguracija	Pre Kalibracije	Posle Kalibracije
I – poravnanje osa	3.658	0.583
II – stalno polje smetnji	4.253	0.525
III – nagib senzora	6.742	0.747

Predstavljeni rezultati potvrđuju primenljivost predložene metode za samokalibraciju magnetno-rezistivnog senzora ugaone pozicije u servo sistemu. Kako se sam servo sistem ponaša kao niskopropusni filter, to se slučajne greške merenja dodatno potiskuju, pa je očekivana granica greške pozicioniranja bolja od procenjene granice greške merenja.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljen metod za samokalibraciju magnetno-rezistivnog senzora ugaone pozicije u servo sistemu. Na tačnost merenja ugaone pozicije upotrebom MR senzora nepovoljno utiču mehaničke tolerancije mernog sistema, a posebno odstupanje ose senzora, ose magneta i ose rotacije. U cilju redukovanja ovih nepovoljnih uticaja, sistem za kompenzaciju greške merenja integrisan je sa upravljačkom strukturom servo sistema.

Kompenzacija se sastoji od dva koraka: linearne kompenzacije greške merenja vektora magnetnog polja, posle koje je primenjena harmonijska kompenzacija greške merenja ugaone pozicije.

Predloženi metod za samokalibraciju sistema za određivanje ugaone pozicije koristi podatke prikupljene tokom kretanja najvećom dopuštenom brzinom za identifikaciju parametra modela mernog procesa. Identifikacija se izvršava periodično, svaki put kada osovina opiše pun ugao. Za identifikaciju parametara linearne kompenzacije primenjen je metod minimiziranja sume algebarskog odstojanja očitavanja senzora i parametrizovanog modela, dok se srednja brzina rotacije koristi kao referenca visoke tačnosti za identifikaciju parametara harmonijske kompenzacije.

Predloženi metod je praktično realizovan na namenskom uređaju, konstruisanom u skladu sa potrebama automobilske industrije. Periodična identifikacija parametara je pojednostavila implementaciju, uprkos znatnoj računskoj kompleksnosti predloženog metoda. Pokazano je da primena ovog novog metoda samokalibracije povećava tačnost merenja za red veličine. Postignuta merna nesigurnost je manja od 0.7° , što je uporedivo sa rezultatima savremenih EOL procedura kalibracije.

Izrazito dobro poklapanje eksperimentalnih rezultata sa teoretskim modelom otvara više potencijalnih pravaca za dalje istraživanje. Ostvareni rezultati sugerišu da bi se samokalibracija linearne kompenzacije mogla izvršavati nezavisno od brzine rotacije, umesto samo kada se osovina rotira najvećom brzinom, što bi, s druge strane, omogućilo razvoj računski jednostavnijeg inkrementalnog algoritma, bez upotrebe pomćnog bafera. Alternativno, moguće je razmotriti primenu gradijentnog algoritma za podešavanje harmonijske kompenzacije u cilju daljeg smanjenja potrebnih računskih kapaciteta.

LITERATURA

- [1] Infineon, *TLE5309D Dual GMR/AMR Angle Sensor*, 2017. Available: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLE5x09A16_D-DS-v02_00-EN.pdf?fileId=5546d462696dbf12016977889fe858c9
- [2] Infineon, *TLE5014 Data Sheet*, 2017. Available: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-TLE5014-c_s_p-DS-v01_00-EN.pdf-DS-v01_00-EN.pdf?fileId=5546d462636cc8fb0164376c5f635050
- [3] Allegro, *AN269121 Advanced On-Chip Linearization in the A1332 Angle Sensor IC*, 2015. Available: <https://www.allegromicro.com/-/media/Files/Technical-Documents/AN269121-Advanced-On-Chip-Linearization-A1332-Angle-Sensor-IC.ashx?la=en&hash=A1D5567A0EDC018BE0A8EA83D043C731D30360A1>
- [4] P. M. Drljača, M. Demierre, C. Schott, R. Popović, "Nonlinear effects in magnetic angular position sensor with integrated flux concentrator", *Proc. of IEEE International Conference on Microelectronics*, vol. 1, pp. 223-226, 12-15 May, 2002.
- [5] U. Ausserlechner, "Inaccuracies of Giant Magneto-Resistive Angle Sensors Due to Assembly Tolerances", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, no. 5, pp. 2165-2174, May, 2009.
- [6] U. Ausserlechner, "The Optimum Layout for Giant Magneto-Resistive Angle Sensors", *IEEE Sensors Journal*, vol. 10, no. 10, pp. 1571-1582, Oct. 2010.
- [7] J. Faber, "Self-calibration and noise reduction of resolver sensor in servo drive application", *Proc. of 2012 ELEKTRO, Rajec Teplice, Slovakia*, pp. 174-178, 21-22 May, 2012.
- [8] Z. Gao, B. Zhou, B. Hou, C. Li, Q. Wei, R. Zhang, "Self-Calibration of Nonlinear Signal Model for Angular Position Sensors by Model-Based Automatic Search Algorithm", *Sensors 2019*, vol. 19, no. 12, pp. 2760, June, 2019
- [9] A. Arami, J. D. Rechenmann, K. Aminian, "Reference-free Automated Magnetic Sensor Calibration for Angle Estimation in Smart Knee Prostheses", *IEEE Sensors Journal*, vol. 14, no. 6, pp. 1788-1796, January, 2014
- [10] A. Zambrano, H. Kerkhoff, "Online Digital Offset Voltage Compensation Method for AMR Sensors", *Proc. of 2015 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 1512-1515, 11-14 May, 2015
- [11] P. Meier, K. Rohramann, M. Sandner, M. Prochaska, "A method to calculate displacements as End of Line Calibration for AMR-based angular sensors", *Proc. of 2018 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference*, pp. 1-6, 14-17 May, 2018
- [12] P. Meier, K. Rohramann, M. Sandner, M. Prochaska, "Analysis of output signals of angular position

- sensors for the use of neural networks ", *Proc. of 2019 IEEE Sensors Applications Symposium*, pp. 1-6, 11-13 March, 2019
- [13] A. Faria, J. Fontainhas, D. Araujo, J. Cabral, L. A. Rocha, "Study of the shielding of angular position sensors with magnetic transduction", *Proc. of 2016 17th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*, pp. 1-5, 11-13 April, 2016
- [14] A. Fitzgibbon, M. Pilu, R. B. Fisher, "Direct least square fitting of ellipses", *Proc. of 13th International Conference on Pattern Recognition*, vol. 1, pp. 253-257, 25-29 Aug, 1996
- [15] R. Halir, J. Flusser, "Numerically stable direct least squares fitting of ellipses", 1998. Available: <http://autotrace.sourceforge.net/WSCG98.pdf>
- [16] *Road vehicles – Functional safety*, ISO-26262, 2011.
- [17] Microchip, *ATmega16M1/ATmega32M1/ATmega64M1/ATmega32C1/ATmega64C1 Automotive*, 2015. Available: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7647-Automotive-Microcontrollers-ATmega16M1-32M1-64M1-32C1-64C1_datasheet.pdf
- [18] *Adaptive Platform*, AUTOSAR AP Release 18-03, 2018.

SUMMARY

A METHOD FOR SELF-CALIBRATION OF A MAGNETO-RESISTIVE ANGULAR POSITION SENSOR IN SERVO SYSTEMS

Magneto-resistive and Hall angular position sensors are frequently used in servo systems, due to their reliability, longevity, and tolerance to environmental conditions. In this paper, a measurement error compensation is integrated into the servo system control structure. The compensation consists of two steps: a linear compensation of the magnetic field vector measurement error, and harmonic compensation of the angular position measurement error. The self-calibration method uses data collected during rotation with maximal speed to identify parameters of the measurement process model. Identification is executed periodically, each time when the shaft makes a full rotation. The least squares method is utilized for identification of the linear compensation parameters, while the average rotational speed is used as an internal reference for the harmonic compensation parameters identification. The method, together with a fast convergence, increases the measurement accuracy by an order of magnitude. Experimentally achieved measurement error is below 0.7°, with residual variance below 0.05°, comparable with sensor differentiability.

Key words: *magneto-resistive sensors; self-calibration; servo system; angular position measurement*