

Meritev hitrosti z inkrementalnim dajalnikom

Milan Čurkovič, Aleš Hace, Karel Jezernik, Marko Franc
UM-FERI

Smetanova 17, Maribor

milan.curkovic@uni-mb.si, ales.hace@uni-mb.si, karel.jezernik@uni-mb.si,
marko.franc@uni-mb.si

Velocity measurement with incremental encoder

This paper presents different methods for angular velocity measurement with an incremental encoders. Particularly deals with measurement at low velocity (one pulse per measurement interval or less). Incremental encoder with sinusoidal output signals was also used. That allows for the use of interpolation, measurement of the intermediate positions and the extension of the measuring range. For rectangular output signals, the range is extended by the use of a special algorithm called alpha-beta tracker. Comparison of methods are made on acquired information from two stepper motors and incremental encoders systems in Matlab environment.

Kratek pregled prispevka

V prispevku so prikazane različne metode merjenja hitrosti z inkrementalnimi dajalniki. Poseben poudarek je pri merjenju nizkih hitrosti - en pulz na merilni interval in manj. Ob inkrementalnih dajalnikih s pravokotnimi signali so bili uporabljeni tudi dajalniki s sinusnimi izhodnimi signali. Ti omogočajo, ob uporabi interpolacije, merjenje tudi vmesnih položajev in s tem razširitev merilnega območaja. Pri pravokotnih izhodnih signalih pa območje razširimo z uporabo posebnega algoritma, alfa-beta sledilnik. Primerjava metod poteka na podatkih zajetih na dveh sistemih koračni motor-inkrementalni dajalnik v Matlab okolju.

1 Uvod

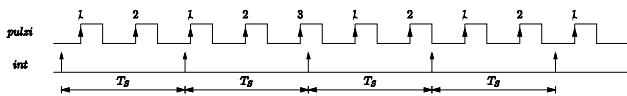
Kljub temu, da so inkrementalni dajalniki skoraj nenadomestljivi pri meritvi položaja numerično krmiljenih pogonov imajo pri meritvi hitrosti kar nekaj težav. To se kaže predvsem v področju relativno nizkih hitrosti in pri ustavljanju.

Problem rešujemo s posebnimi metodami zajema in obdelave signalov inkrementalnega dajalnika ali pa z uporabo inkrementalnih dajalnikov s sinusnimi signali.

2 Metode merjenja hitrosti

Ker je inkrementalni dajalnik po svoji zasnovi merilnik položaja se lahko hitrost meri posredno iz spremembe položaja v merilnem intervalu ali kot meritev frekvence pulzov inkrementalnega dajalnika.

2.1 M metoda



Slika 1: M metoda

Hitrost je premo sorazmerna številu prejetih pulzov inkrementalnega dajalnika v merilnem oknu. Ker je število pulzov je lahko le celo število, natančnost metode pada z manjšanjem števila pulzov oziroma hitrosti. Hitrost računamo po enačbi (1).

$$\omega = \frac{2\pi}{4 \cdot N \cdot T_S} * M = k_M * M \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) \quad (1)$$

ω - povprečna hitrost za merilni interval (rad/s),

M - število pulzov v merilnem intervalu,

N - število črtic na vrtljaj dajalnika,

T_S - merilni interval-konstanta! (s),

k_M - konstanta za izračun hitrosti pri M metodi.

$$k_M = \frac{\pi}{2 \cdot N \cdot T_S} \quad (2)$$

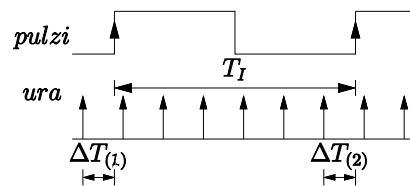
Pogrešek metode bi lahko zmanjšali s podaljševanjem merilnega intervala, če to dopušča dinamika merjenega sistema, ali pa z

uporabo inkrementalnega dajalnika z večjim številom črtic. Tudi večanje števila črtic ima posledice v višji ceni takega dajalnika in zmanjšanju najvišje hitrosti saj je maksimalna frekvenca signalov inkrementalnega dajalnika omejena.

Primer vrtenja s konstantno hitrostjo je prikazan na Slika 1. Opazno je tudi odstopanje izmerjenih vrednosti: 2, 3, 2, 2.

Izračun hitrosti ni zahteven, saj gre samo za množenja, seštevanja in odštevanja. Rezultat je povprečna hitrost na merilnem intervalu. Potek pogreška v odvisnosti od hitrosti je prikazan na Sliki 6, kjer vidimo povečevanje pogreška z manjšanjem hitrosti. Pri hitrosti 2 pulza na merilni interval doseže pogrešek že 50 %

2.2 T metoda



Slika 2: T metoda

Na Slika 2 je prikazan časovni potek števnih signalov iz inkrementalnega dajalnika in pulzov referenčnega oscilatorja. Razlog za pogrešek je kvantizacija merilnika časa med dvema zaporednima pulzoma. Odstopanje pri merilniku časa je vedno manjše od ene periode referenčnega oscilatorja. Relativni pogrešek se povečuje s povečevanjem hitrosti, krajšanjem periode. Hitrost pri T metodi računamo po enačbi 3 tako, da konstanto k_T delimo s številom ciklov referenčnega oscilatorja med dvema zaporednima pulzoma inkrementalnega dajalnika.

$$\omega = \frac{2\pi \cdot f_0}{4 \cdot N \cdot \Delta T} = \frac{k_T}{\Delta T} = \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) \quad (3)$$

f_0 - frekvenca ure za meritev časa (s^{-1}),

ΔT - število period ure med zadnjima pulzoma iz dveh zaporednih period.

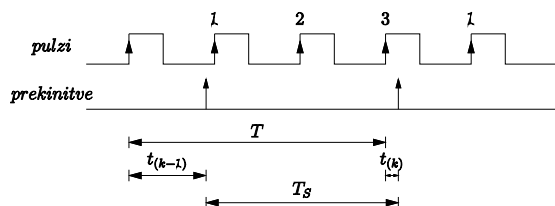
N - število črtic na vrtljaj dajalnika,

k_T - konstanta za izračun hitrosti pri T metodi

$$k_T = \frac{n \cdot f_0}{2 \cdot M} \quad (4)$$

Slabost metode je dokaj zahteven izračun, saj je deljenje tudi ob uporabi digitalnega signalnega procesorja TMS320C32 časovno zahtevno. Novejše generacije FPGA vezij omogočajo zelo visoke frekvence števecov in oscilatorjev, kar pomeni natančno meritev časa.

2.3 MT metoda



Slika 3: MT metoda

Opisani metodi (M in T) se dopolnjujeta in skupaj dajeta dobre rezultate v celotnem področju. Težava je v dvojnem izračunu in posebnem algoritmu, ki izbira primernejši rezultat. V literaturi [1] je opisana metoda, ki združuje obe do sedaj opisani metodi. V prispevkih [2,3] smo opisali našo verzijo opisane metode. Takrat je bila še realizirana s standardnimi LS TTL logičnimi vezji. Hitrost pri tej metodi računamo po enačbi 5.

Srednjo vrednost hitrosti na merilnem intervalu dobimo tako, da spremembo položaja delimo s časom, v katerem se je ta sprememba zgodila. Poudarek je na času za izmerjeno število pulzov in ne merilnem intervalu.

$$\omega \doteq \frac{\Delta\theta}{\Delta T} = \frac{2\pi \cdot f_0 \cdot N}{4 \cdot M \cdot \Delta T} = k_{MT} \frac{N}{\Delta T} = \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) \quad (5)$$

$$k_{MT} = \frac{n \cdot f_0}{2 \cdot M} \quad (6)$$

V enačbi 5 nastopajo:

f_0 - frekvenca ure za meritev časa (s⁻¹),

M - število črtic inkrementalnega dajalnika na en vrtljaj,

N - število pulzov v merilnem intervalu skupaj s predznakom,

$\Delta T(K)$ - število period ure med zadnjima pulzoma iz dveh zaporednih period.

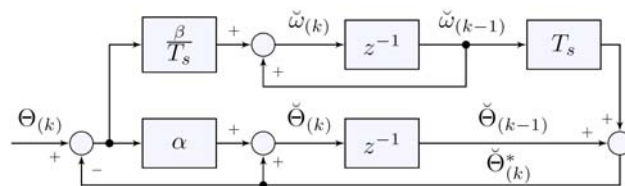
k_{MT} - konstanta za izračun hitrosti pri MT metodi

Metoda daje dobre rezultate z majhnimi pogreški vse do enega pulza na merilni interval. Izmerjena vrednost ustreza srednji hitrosti v času uporabljenih pulzov, ki odstopa od časa tipanja.

Izračun po enačbi 5 je zahteven, saj moramo v vsakem intervalu opraviti množenje in deljenje. Pri majhnih hitrostih se zakasnitev med merilnim intervalom in trenutkom izračuna spreminja in lahko doseže tudi čas tipanja. Pri hitrostih pod 1 pulz na interval T_s se dogaja, da v celotnem intervalu ni bilo sprejetega pulza in izračun hitrosti ni mogoč.

Problem rešujemo na več načinov:

1. izračunano hitrost postavimo na 0, ko pride pulz, se izračuna srednjo vrednost hitrosti na več intervalov,
2. hitrosti ne računamo, ohranimo vrednost iz prejšnjega intervala, prispevka [2, 3], ob prihodu pulza računamo srednjo vrednost hitrosti na več intervalov,
3. ekstrapolacija, iz starih vrednosti hitrosti določimo novi ob predpostavki, da se pospešek ni spremenil.
4. uporaba nekakšne PLL zanke [4, 15] oziroma α - β sledilnika [5], prikazanega na Slika 4, kjer se meri samo trenutni položaj, ki ga primerjamo z napovedanim položajem v sledilniku.



Slika 4: α - β sledilnik

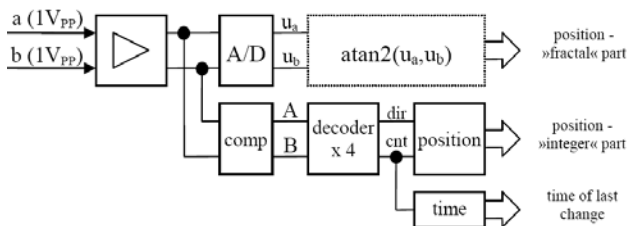
Iz sledilnika dobimo gladke vrednosti za položaj in hitrost.

2.4 Sinusni signali – CORDIC

Uporaba inkrementalnih dajalnikov s sinusnimi izhodnimi signali omogoča merjenje položaja z veliko resolucijo. Tako velika ločljivost nam omogoča računanje hitrosti kar iz spremembe položaja brez uporabe posebnih (zapletenih) metod saj lahko merimo tudi

spremembe manjše kot en pulz inkrementalnega dajalnika.

Blokovna shema opreme za zajem analognih signalov je prikazana na Slika5. Vhodna signala po vhodnem ojačevalniku vodimo na »klasičen« spodnji del, ki meri položaj in trenutke spremembe položaja (MT metoda) in dodan zgornji del za razdelitev položajev med dvema pulzoma. Izvedeni sta bili dve varianti z 12 bitno [7, 8] in 14 bitno ločljivostjo [9, 16] A/D pretvornikov.



Slika5: zajem signalov analognega enkoderja

Za izračun kota iz komponent uporabljamo algoritem CORDIC (COrdinate RotatIon DIgital Computer)[17] na FPGA vezju Spartan3-1000 (Xilinx). V primeru analizatorja dinamike koračnih motorjev [7, 8] se zajeti podatki obdelujejo naknadno na osebnem računalniku

2.5 Primerjava pogreškov metod

Primerjavo metod najenostavneje opravimo s primerjanjem pogreškov metod pri različnih hitrostih. Absoluten pogrešek opisuje enačba 7 [10], kot razliko med izmerjeno in pravo vrednostjo. Se pa v praksi pogosteje uporablja relativen pogrešek, opisan z enačbo 8, ki predstavlja razmerje med absolutnim pogreškom in pravo vrednostjo. Izraža se v odstotkih, promilih ali PPM (parts per million).

V literaturi najdemo primerjave pogreškov v [1, 11, 12] in naše [2, 3, 13]

$$e = x_m - x_r \quad (7)$$

$$e_{rel} = \frac{e}{x_r} * 100 = \frac{x_m - x_r}{x_r} * 100 (\%) \quad (8)$$

Pri izračunu pogreškov predpostavljamo, da je inkrementalni dajalnik idealen, torej so pulzi enakomerno porazdeljeni znotraj enega vrtljaja dajalnika. Položaj pulzov se tudi ne spreminja s temperaturo, hitrostjo ali staranjem dajalnika. Tudi sama montaža dajalnika vpliva na

kakovost merjenja. V literaturi [14] najdemo posebne metode, ki s kompenzacijo dosežejo natančne meritve tudi pri nenatančnih (cenenih) inkrementalnih dajalnikih.

Mi bomo raziskovali bomo le napako zaradi same merilne metode. Razlog za pogrešek pri M metodi je kvantizacija položaja. Pri T in MT metodi pa kvantizacija pri meritvi periode.

Pogrešek pri M metodi pri idealnem dajalniku nastane samo zaradi kvantizacije položaja. Če v enačbo za relativni pogrešek 8 vstavimo enačbo 1 za izračun hitrosti po M metodi dobimo enačbo 9. Ker gre za relativen pogrešek konstante K_M ni potrebno upoštevati.

$$e_M = \frac{1}{M} * 100(\%) \quad (9)$$

Kjer je M - število pulzov v merilnem intervalu.

Pri T metodi se hitrost računa po enačbi 3. Upoštevamo pogrešek zaradi kvantizacije merilnika časa med dvema zaporednima pulzoma inkrementalnega dajalnika. Iz teorije, za pogreške pri posredno merjenih veličinah velja, da je pogrešek pri kvocientu približno enak vsoti pogreškov veličine v števcu in veličine v imenovalcu. Ker imamo v tem primeru v števcu konstanto, je skupen pogrešek približno enak pogrešku v imenovalcu, oziroma pogrešku pri meritvi periode. Ker periodo izražamo v periodah referenčnega oscilatorja, dobimo za pogrešek enačbo 10.

$$e_T = \frac{1}{\Delta T} * 100(\%) \quad (10)$$

Enačba 5 za izračun hitrosti po MT metodi prav tako vsebuje kvocient števila pulzov inkrementalnega dajalnika in števila pulzov referenčnega oscilatorja.

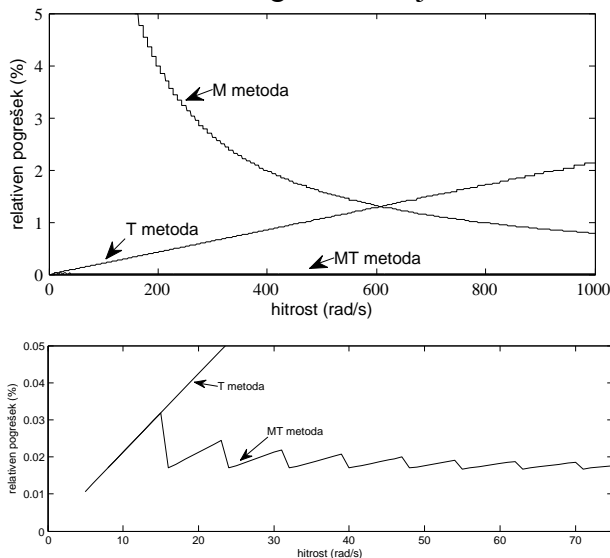
Ker je število pulzov dajalnika natančno, je pogrešek odvisen le od imenovalca kot pri T metodi le, da se tukaj čas merjenja, z večanjem hitrosti, ne zmanjšuje. Razlika med časom merjenja in časom tipanja je manjša od časa med dvema zaporednima pulzoma inkrementalnega dajalnika.

Pogrešek pri tej metodi je približno enak razmerju med frekvenco tipanja in frekvenco

referenčnega oscilatorja. Pogrešek opisuje enačba 11.

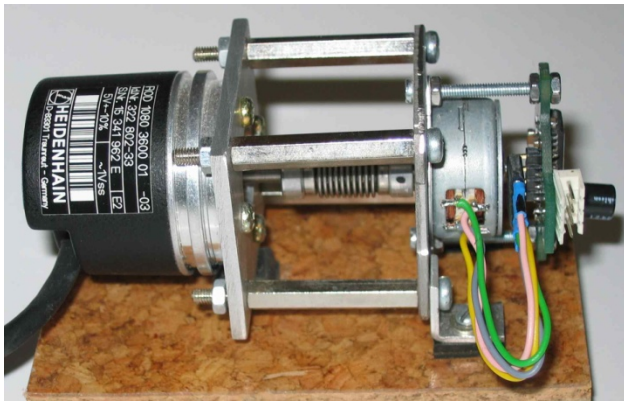
$$\epsilon_{MT} = \frac{1}{\Delta T + \Delta t} * 100(\%) \quad (11)$$

Na Sliki 6 je prikazana odvisnost pogreškov vseh treh metode za primer inkrementalnega dajalnika s 500 črticami, časom tipanja 400 μ s in frekvenco referenčnega oscilatorja 15 MHz.

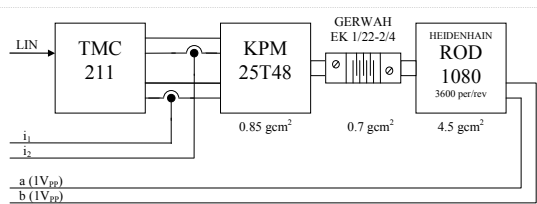


Slika 6: pogreški merilnih metod

3 Izvedba meritev



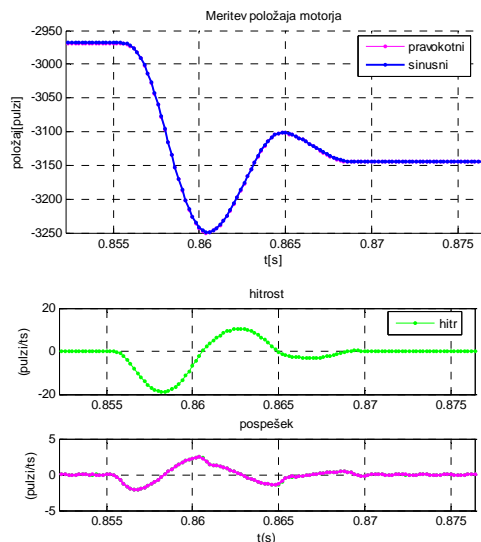
Slika 7: sistem ROD



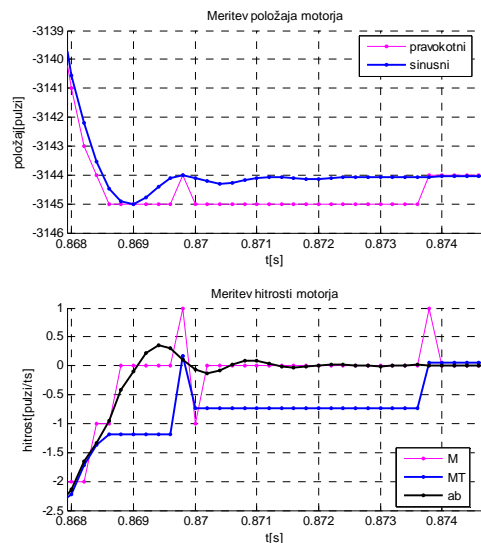
Slika 8: shema sistema ROD

Prvi sistem vsebuje inkrementalni dajalnik s sinusnimi signali ROD1080-3600 (Heidenhain),

koračni motor 25T48 (Iskra Mehanizmi) in krmilnik koračnega motorja na LIN vodilu TMC211 (Trinamic). Sistem je prikazan na Slika 7, na Slika 8 pa je njegova blokovna shema. Inkrementalni dajalnik ima 3600 črtic na obrat. Čas tipanja pri meritvi na slikah 9 in 10 je 200 μ s, tok motorja 800mA. Motor je bipolarni z 48 polnimi koraki na obrat (meritve so opravljene pri polovičnih korakih). Položaj in hitrost nista prikazana v osnovnih enotah ampak v pulzih in pulzih na čas tipanja zaradi lažjega spremljanja vpliva kvantizacije. V praksi, posebej pri v celoštevilčnem izračunu, nam takšno skaliranje spremenljivk precej poenostavi izračun.

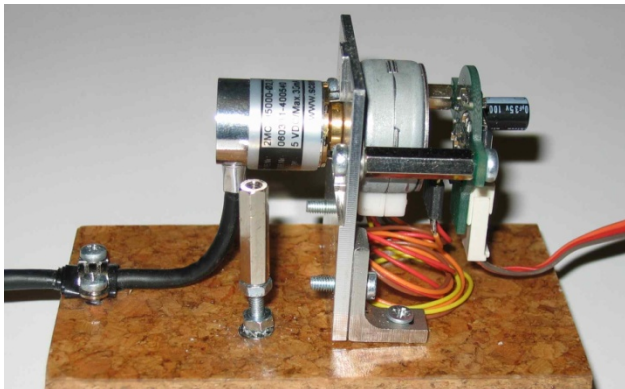


Slika 9: odziv sistema ROD

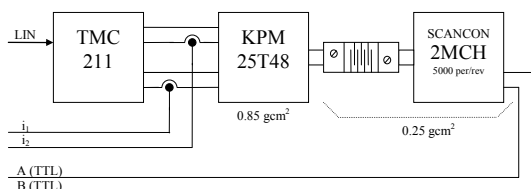


Slika 10: podrobnost iz odziva

Drugi merilni sistem sestavljajo dajalnik 2MC-H5000 (Scancon) z motorjem 25T48 in krmilnikom TMC211. Dajalnik ima 5000 črtic na vrtljaj in pravokotne izhodne signale.

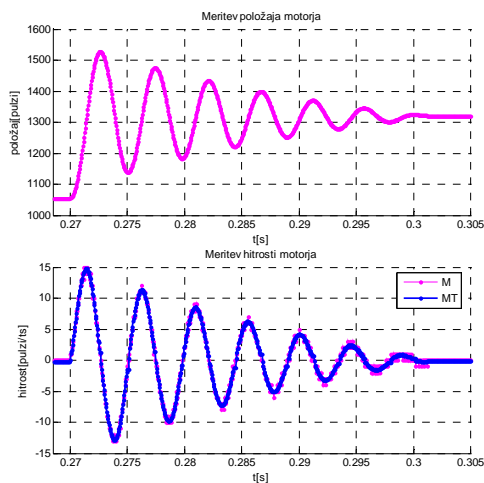


Slika 11: sistem SCANCON



Slika 12: shema sistema SCANCON

Meritev je izvedena s časom tipanja $50 \mu\text{s}$, pri toku motorja 800 mA .

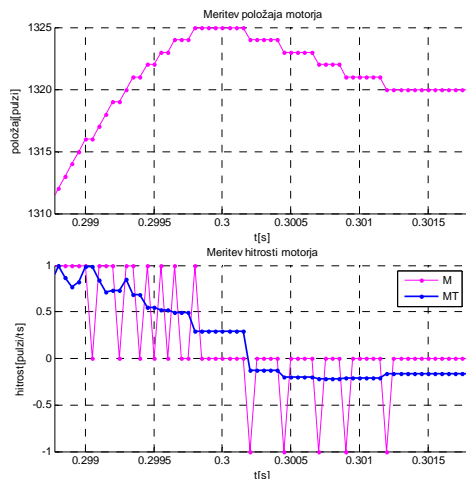


Slika 13: odziv sistema SCANCON

Pri prvem sistemu imamo na razpolago analogne signale inkrementalnega dajalnika, je pa vztrajnostni navor sklopke in dajalnika približno 6 krat večji od vztrajnostnega navora motorja. Meritev bistveno vpliva na dinamiko sistema, kar se tudi vidi iz samih odzivov

sistema. Vpliv je zmanjšan pri drugem sistemu kjer je vztrajnostni navor inkrementalnega dajalnika je približno 30% navora motorja.

Za opravljanje meritev smo uporabili sistem DSP-2 z dodatno merilno kartico [7, 8, 16] zajeti podatki so preneseni na osebni računalnik in obdelani v programskem okolju Matlab.



Slika 14: podrobnost iz odziva

4 Povzetek

V prispevku so opisane metode meritev hitrosti z inkrementalnim dajalnikom. Opisane metode smo primerjali predvsem glede odstopanja izmerjenih vrednosti od dejanskih in tudi glede zahtevnosti izračuna. Metode so izvedene na digitalnem signalnem procesorju TMS320c32 (DSP-2 sistem) in na FPGA kartici NEXYS(Digilent).

Pri rezultatih izstopa meritev z uporabo sinusnih signalov, ki pa zahteva posebne inkrementalne dajalnike.

5 Literatura

- [1] T. Ohmae; T. Matsuda; K. Kamiyama; M. Kachikawa. A microprocessor-controlled high-accuracy wide-range speed regulator for motor drives, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 29(3):207–211, Aug 1982.
- [2] M. Čurkovič; P. Cafuta; K. Jezernik. Diskretna meritev kotne hitrosti z razširjenim merilnim območjem, Zbornik MIPRO'85, svezak 3, pages 145–149(PU), Rijeka, Croatia, 1985.

- [3] M. Čurkovič; K. Jezernik; P. Cafuta. *Digitalno merjenje hitrosti*, Zbornik radova JUREMA, svezak 3, pages 21–24, Zagreb, Croatia, 1986.
- [4] S.-H. Lee; J.-B. Song. *Acceleration estimator for low-velocity and low-acceleration regions based on encoder position data*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 6(1):58–64, 2001.
- [5] Matevž Čadonic. *Alfa-beta sledilnik*, Diplomsko delo, Univerza v Mariboru, FERi, April 2000.
- [6] Milan Čurkovič. *Vgrajeni sistemi DSP/FPGA v sistemih vodenja*, Magistrsko delo, Univerza v Mariboru, FERi, April 2010.
- [7] A. Hace; M. Čurkovič; D. Kos; A. Kapun. *Analizator dinamike koračnih motorjev*, Delovno poročilo, Univerza v Mariboru, FERi, Inštitut za robotiko, Maribor, September 2006.
- [8] M. Čurkovič; A. Hace. *Analizator dinamičnega obnašanja koračnih motorjev*. In Zbornik pete konference Avtomatizacija v industriji in gospodarstvu, pages 193–198, Maribor, Slovenija, April 2007.
- [9] Aljaž Kapun. *Dogodkovno osnovano vodenje motorja s trajnimi magneti*, Doktorska disertacija, Univerza v Mariboru, FERi, Februar 2009.
- [10] Jože Puhar. *Tehnološke meritve I. del*, Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 1996.
- [11] R. Petrella; M. Tursini; L. Peretti; M. Zigliotto. *Speed measurement algorithms for low-resolution incremental encoder equipped drives: a comparative analysis*, International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics, 2007. ACEMP '07, pages 780–787, Sept. 2007.
- [12] E. Sisinni; A. Flammini; D. Marioli; A. Taroni. *A PLD based encoder interface with accurate position and velocity estimation*. In *Industrial Electronics, ISIE 2002*. Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on, volume 2, pages 606–611, November 2002.
- [13] M. Franc; M. Čurkovič; A. Hace. *Napredna metoda meritve hitrosti z FPGA digitalnim krmiljem*, Zbornik Elektrotehniške in računalniške konference ERK'2010, Portorož, A:75-78.
- [14] N. K. Boggarpu; R. C. Kavanagh. *New learning algorithm for high-quality velocity measurement and control when using low-cost optical encoders*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 59(3):565–574, March 2010.
- [15] Lilit Kovudhikulrungsri; Takafumi Koseki. *Precise speed estimation from a lowresolution encoder by dual-sampling-rate observer*, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, pages 661–670, December 2006.
- [16] M. Čurkovič; A. Hace. *Analizator dinamičnega obnašanja koračnih motorjev*, Ventil, 13(4):232–237, Avgust 2007.
- [17] Ray Andraka, *A survey of CORDIC algorithms for FPGAs based computers*, ACM/SIGDA sixth international symposium on Field programmable gate arrays, Feb. 22-24, 1998, Monterey, CA. pp191-200.