

## DIGITALNE METODE MERENJA UGAONE BRZINE MOTORA I POGONSKIH MEHANIZAMA

*Prof. dr Miodrag Arsić,*

*Prof. dr Dragan Denić,*

*dipl. ing. Goran Miljković,*

*Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu*

### Rezime

*Tačno merenje srednje i trenutne ugaone brzine u digitalnom obliku zahtev je savremene instrumentacije i kontrolnih sistema u različitim primenama u transportnim sistemima. U ovom radu su prikazane metode digitalnog merenja ugaone brzine korišćenjem optičkih inkrementalnih enkodera. Ove metode omogućavaju brzo dobijanje rezultata uz visoku tačnost i rezoluciju u širokom opsegu merenja, uključujući i brzine bliske nuli. Prikazano je i jedno rešenje digitalnog tahogeneratorskog uređaja za primenu u analognu/digitalnim sistemima kontrole.*

**Ključne reči:** enkoder, ugaona brzina, tahogenerator

### 1. UVOD

Merenje ugaone brzine je neophodno u različitim sistemima energetike, industrije i transporta i to u oblasti monitoringa i upravljanja procesima. Ugaona brzina je konstrukcioni i pogonski parametar koji se održava, kontroliše ili nadgleda, a merenjem trenutne ugaone brzine mogu da se prate ponašanja mehanizama u prelaznim procesima, udari, torzione vibracije i slično. U mnogim aplikacijama dovoljno je jednokanalno merenje srednje ili trenutne ugaone brzine. Razvoj digitalnih mernih pretvarača ugaone brzine, pratećih elektronskih sistema za obradu signala i savremenih mikroracunara omogućio je razvoj mernih metoda za višekanalno merenje, monitoring i kontrolu. Dobar primer za ilustraciju su ABS sistemi na putničkim vozilima ili kontrola pogona na više točkova u transportnim sistemima.

Digitalni merni pretvarači ugaone brzine su inkrementalni enkoderi najčešće optički, obzirom na mogućnost visoke

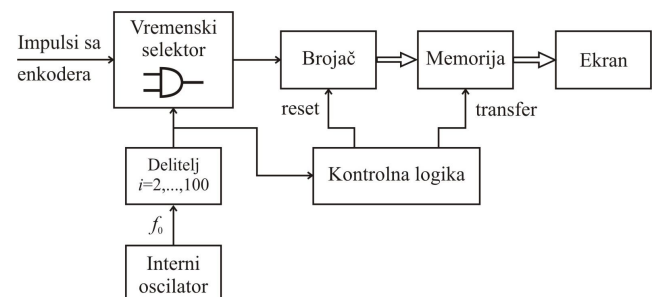
rezolucije u širokom opsegu, zavisno od namene. Digitalni izlazni signal enkodera bio je baza za razvoj više različitih metoda za merenje ugaone brzine [1, 3, 4]. Najveći značaj i primenu imaju brojačke metode bazirane na dva osnovna principa: brojanje impulsa u datom vremenskom intervalu (merenje srednje ugaone brzine) i merenje proteklog vremena za jedan ciklus signala sa enkodera (merenje trenutne ugaone brzine). Realizacija ovih metoda rezultira u vidu različitih instrumenata – tahometara i tahogeneratorskih [2, 5].

Trend korišćenja koncepta virtuelne instrumentacije u ovom slučaju rezultirao je razvojem virtuelnog instrumenta – tahometra koji koristi personalni računar, grafičko programiranje i odgovarajući softver (LabVIEW), kao i modularni hardver [6].

Za potrebe kontrole i regulacije ugaone brzine u automatizovanim sistemima prikazana je metoda i instrument – tahogenerator za generisanje digitalnog i odgovarajućeg analognog signala kod niskih brojeva obrtaja mašina.

### 2. BROJAČKE METODE MERENJA – M I T METODA

Brojačka M metoda merenja ugaone brzine (M se odnosi na broj izbrojanih impulsa tokom periode odabiranja) se zasniva na merenju frekvencije impulsa sa enkodera. Odnosno, merenje se bazira na brojanju impulsa sa enkodera u jednom fiksnom, unapred definisanom periodu odabiranja  $T_S$  [1, 4]. Tahometar koji bi koristio ovu metodu se može hardverski realizovati pomoću diskretnih komponenta ili pomoću mikroprocesora. Uopštena blok šema tahometra koji radi po ovoj metodi je data na slici 1.



Sl. 1. Blok šema uređaja za merenje ugaone brzine brojačkom metodom

Impulsi koji dolaze sa enkodera se vode na ulaz vremenskog selektora, koga kontroliše interni oscilator, tako da propušta impulse sa enkodera tokom vremena  $T_S$ . Vreme  $T_S$  predstavlja u stvari poluperiodu signala iz lokalnog oscilatora, čija se frekvencija definiše faktorom deljenja  $i$ .

Izlaz vremenskog selektora, koji praktično predstavlja logičko „I“ kolo, vodi se na brojač osnovne  $n$ , koji broji prispele impulse. Radom uređaja upravlja kontrolna logika, koja služi da resetuje brojač nakon isticanja perioda odabiranja  $T_S$ , zatim da omogući upis izbrojane vrednosti u memoriju i kontroliše postupak prikazivanja na displeju.

Vremenski interval  $T_S$ , tokom kojeg vremenski selektor propušta impulse je

$$T_S = i / (2f_0), \quad (1)$$

Ako je broj markera enkodera  $P$  (odnosno broj impulsa u toku jedne rotacije, ili eventualno broj impulsa u toku jedne rotacije posle operacije kvadrarnog dekodiranja) i ugaona brzina obrtanja  $\omega$ , onda je frekvencija impulsa sa enkodera

$$f_{VA} = \frac{\omega}{60} P. \quad (2)$$

Broj impulsa koji dolaze na brojač u toku perioda odabiranja i koje on izbroji je

$$C_P = T_S f_{VA} = \frac{i}{2f_0} \frac{\omega}{60} P. \quad (3)$$

Vidi se da između broja impulsa brojača i ugaone brzine postoji linearna veza

$$C_P = k\omega. \quad (4)$$

Odnosno, izmerena ugaona brzina se može izraziti jednačinom

$$\omega = \frac{2\pi C_P}{PT_S} \text{ [rad/s]}, \text{ ili } \omega = \frac{60C_P}{PT_S} \text{ [ob/min]}. \quad (5)$$

Analizom rada uređaja, lako je zaključiti da je greška merenja veća ukoliko je broj obrtaja manji. Pošto je kao posledica primene enkodera (digitalnog pretvarača) ugaona brzina kvantovana, postoje vrednosti između dve kvantovane vrednosti koje se ne mogu izmeriti. Uvedimo sledeće oznake

$\omega_{C_P}$  – ugaona brzina kojoj odgovara sadržaj brojača  $C_P$ ,

$\omega_{C_{P+1}}$  – ugaona brzina kojoj odgovara sadržaj brojača  $C_{P+1}$ , tj. za 1 veći nego prethodni.

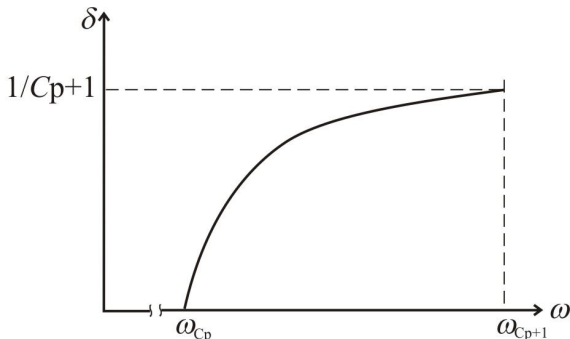
Relativna greška izmerene vrednosti ugaone brzine, računata u odnosu na pravu, odnosno tačnu vrednost merene ugaone brzine je

$$\delta(\%) = \frac{\omega_T - \omega_M}{\omega_T} 100\%, \quad (6)$$

gde indeksi T i M označavaju tačnu i merenu vrednost, respektivno. Ako je ugaona brzina takva da važi  $\omega_{C_P} \leq \omega < \omega_{C_{P+1}}$ , ta ugaona brzina će biti izmerena kao vrednost  $\omega_{C_P}$ , te će greška merenja biti

$$\delta(\%) = \frac{\omega - \omega_{C_P}}{\omega} 100\% = \left[ 1 - \frac{\omega_{C_P}}{\omega} \right] 100\%, \quad (7)$$

čiji je grafik dat na slici 2, sa kojeg se vidi, da je za  $\omega = \omega_{C_P}$ , greška  $\delta$  jednaka nuli, dok je za  $\omega \rightarrow \omega_{C_{P+1}}$ , greška  $\delta$ , saglasno formuli (7) jednaka  $1/(C_{P+1})$ .



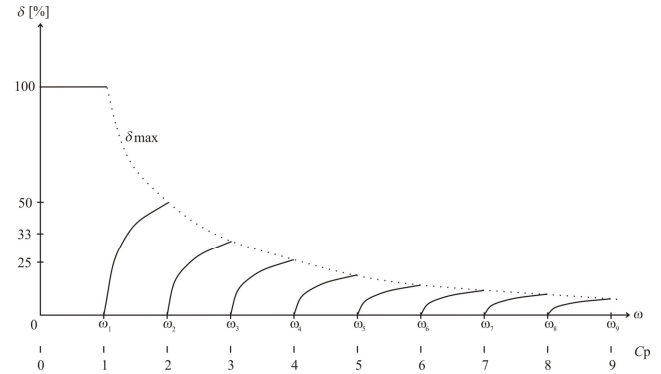
Sl. 2. Zavisnost relativne greške od ugaone brzine na segmentu između dve merljive ugaone brzine

Posmatranjem  $\omega$  na različitim segmentima, dobija se grafik zavisnosti  $\delta=f(\omega)$  koji je prikazan na slici 3. Sa dobijenog grafika se vidi da maksimalna relativna greška na segmentu

opada sa povećanjem ugaone brzine, te je ovakav uređaj dobar za merenje velikih ugaonih brzina.

Donja granica ugaone brzine koja može da se meri, određena je željenom maksimalnom relativnom greškom. Maksimalna relativna greška, saglasno prethodnim razmatranjima i činjenici da je očekivani sadržaj brojača  $C_P = m$ , je na  $m$ -tom segmentu jednaka

$$\delta(\%) = \frac{1}{m+1} 100\%. \quad (8)$$



Sl. 3. Zavisnost relativne greške merenja od ugaone brzine

Na osnovu zadate maksimalne relativne greške, može se korišćenjem izraza (8) izračunati sadržaj brojača  $C_{Pmin}$  koji je dopustivi minimum i za sve sadržaje brojača veće od njega, maksimalna relativna greška će biti manja. Donja granica ugaone brzine koja se može meriti, dobija se na osnovu izraza (3) i iznosi

$$\omega_{donja} = \frac{2 \cdot 60 f_0}{iP} C_{Pmin} = \frac{60}{PT_S} m = \frac{60}{PT_S} \left( \frac{1}{\delta_{max}} - 1 \right). \quad (9)$$

Donja granica ugaone brzine se može dodatno sniziti povećanjem broja markera na enkoderu i/ili produženjem periode odabiranja  $T_S$ .

Gornja granica brzine je određena karakteristikama upotrebljenog brojača, njegovom osnovom brojanja i graničnom frekvencijom rada. Dakle, u skladu sa tim je

$$\omega_{gornja} = \min \left[ \frac{60 f_{VAmax}}{P}, \frac{60}{PT_S} C_{Pmax} \right], \quad (10)$$

gde je  $C_{Pmax} = 2^n$ , gde je  $n$  broj bitova brojača, a  $f_{VAmax}$  maksimalna frekvencija rada brojača.

Ukoliko se za obradu signala koristi mikroprocesor koji ima ugrađene brojače/tajmere, obično je frekvencija rada tajmera duplo veća od frekvencije rada brojača, što povlači činjenicu da je prvi član u izrazu (10) manji, a to ima za posledicu da je za gornju graničnu ugaonu brzinu  $\omega_{gornja}$  u mikroprocesorskim sistemima presudna frekvencija rada brojača.

Za širinu mernog opsega važi

$$\Delta\omega = \omega_{gornja} - \omega_{donja}. \quad (11)$$

Zamenom izraza (9) i (10) u izraz (11) dobijamo

$$\Delta\omega = \left( \frac{60 f_{VAmax}}{P} \right) - \left( \frac{60(1 - \delta_{max})}{PT_S \delta_{max}} \right). \quad (12)$$

Ukoliko bi uređaj bio realizovan pomoću mikroprocesora, kod kojih je maksimalna frekvencija rada brojača duplo manja od frekvencije rada tajmera, odnosno

$$f_{TAJMER} = 2^n / T_S = 2 f_{VABROJAC}, \quad (13)$$

za širinu mernog opsega bi imali

$$\Delta\omega = \frac{60 f_{VAmax} (2^{n-1} \delta_{max} - 1 + \delta_{max})}{2^{n-1} P \delta_{max}} \approx \frac{60 f_{VAmax} (2^{n-1} \delta_{max} - 1)}{2^{n-1} P \delta_{max}} \quad (14)$$

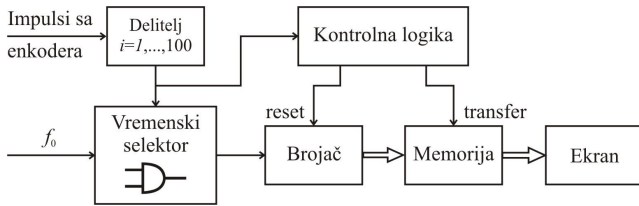
Rezolucija merenja ugaone brzine M metodom se može dobiti promenom sadržaja brojača  $C_P$  za jedan i predstaviti izrazom

$$Q_V = \frac{2\pi(C_P + 1 - C_P)}{PT_S} = \frac{2\pi}{PT_S}. \quad (15)$$

Vreme merenja M metodom je konstantno i jednako je

$$T_m = T_S. \quad (16)$$

Recipročna metoda merenja je T metoda (T se odnosi na vremenski interval između dva susedna impulsa) bazirana na merenju trajanja periode impulsa sa enkodera, [4]. Principijelna blok šema tahometra za merenje ugaone brzine recipročnom metodom prikazana je na slici 4.



Sl. 4. Blok šema uređaja za merenje ugaone brzine recipročnom metodom

Vremenski selektor propušta impulse iz osnovnog oscilatora u periodu kada je otvoren impulsom sa enkodera. Aktivna zona impulsa sa enkodera može biti proširena korišćenjem delitelja frekvencije, kako bi se omogućilo merenje većih ugaonih brzina. Širina aktivnog dela impulsa sa enkodera  $\Delta t$  obrnuto je proporcionalna ugaonoj brzini osovine na koju je enkoder pričvršćen, tj. važi

$$\Delta t = \frac{60i}{2\omega P}, \quad (17)$$

gde je  $i$  – faktor deljenja frekvencije impulsa sa enkodera, a  $P$  broj markera enkodera. U toku ovog vremena je omogućen prolaz impulsa iz oscilatora kroz selektorsko kolo do brojača, koji broji impulse iz lokalnog oscilatora frekvencije  $f_0$ . Za vreme  $\Delta t$  brojač će izbrojati  $C_t$  impulsa, pa je

$$C_t = f_0 \Delta t. \quad (18)$$

Smenom izraza (18) u (17) dobijamo

$$C_t = \frac{60if_0}{P} \frac{1}{\omega} = \frac{k}{\omega}; k = C^{ta}. \quad (19)$$

Na osnovu prethodnog izraza ugaona brzina se računa po jednačini

$$\omega = \frac{2\pi}{C_t PT_0} \text{ [rad/s], ili } \omega = \frac{60}{C_t PT_0} \text{ [ob/min]}. \quad (20)$$

Pošto je  $C_t$  iz skupa prirodnih brojeva, a  $\omega$  iz skupa realnih, to ukazuje na činjenicu da postoje ugaone brzine  $\omega$ , koje se ne mogu tačno izmeriti. Uvedimo sledeće oznake:

$\omega_{C_t}$  – ugaona brzina kojoj odgovara sadržaju brojača  $C_t$ ,

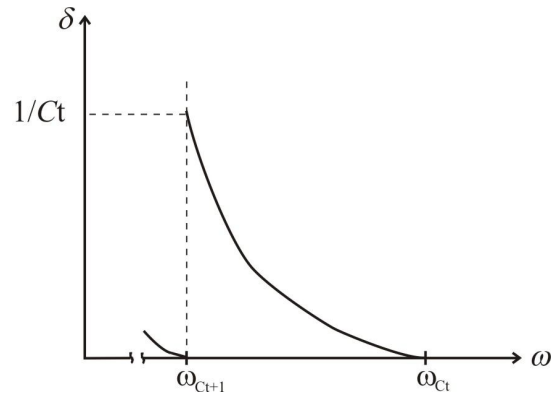
$\omega_{C_{t+1}}$  – ugaona brzina kojoj odgovara sadržaj brojača  $C_{t+1}$ , za 1 veći od prethodnog.

U skladu sa načinom izračunavanja relativne greške (6), posmatrajmo interval kada važi da je  $\omega_{C_{t+1}} \leq \omega < \omega_{C_t}$ , jer sada manjem sadržaju brojača odgovara veća ugaona brzina. U skladu sa već opisanim načinom rada uređaja, zaključujemo da će ova ugaona brzina  $\omega$  biti izmerena kao  $\omega_{C_t}$ , te ako obeležimo da je  $\omega_T = \omega$ , a  $\omega_M = \omega_{C_t}$ , dobijamo da je

$$\delta(\%) = \frac{\omega_M - \omega_T}{\omega_T} 100\% = \frac{\omega_{C_t} - \omega}{\omega} 100\%, \quad (21)$$

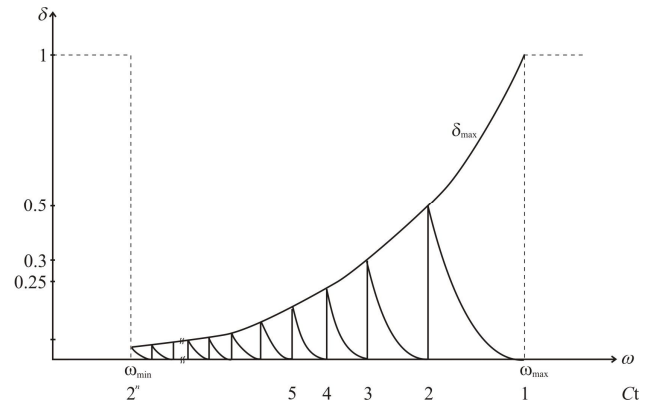
čiji je grafik zavisnosti dat na slici 5. Na ovom intervalu relativna greška će biti nula za  $\omega = \omega_{C_t}$ , a maksimalna je kad važi  $\omega \rightarrow \omega_{C_{t+1}}$  i tada je, uz uzimanje u obzir izraza (19)

$$\delta_{\max}(\%) = \frac{\omega_{C_t} - \omega_{C_{t+1}}}{\omega_{C_{t+1}}} = \left( \frac{C_{t+1}}{C_t} - 1 \right) 100\% = \frac{1}{C_t} 100\%. \quad (22)$$



Sl. 5. Zavisnost relativne greške od ugaone brzine na intervalu između dve merljive ugaone brzine

Inače, u tačkama  $\omega_{C_t}$  za  $C_t = 1, \dots, C_{\max}$  je relativna greška  $\delta$  jednaka nuli. Posmatranjem  $\omega$  u svim intervalima između pojedinačnih sadržaja brojača, dobija se grafik zavisnosti relativne greške od merene ugaone brzine, koji je prikazan na slici 6.



Sl. 6. Zavisnost relativne greške od ugaone brzine pri merenju recipročnom metodom

Sa grafika na slici 6 se vidi da sa porastom ugaone brzine maksimalna relativna greška merenja raste. Ukoliko bi kvalitet merenja definisali željenom maksimalnom relativnom greškom, time bi ograničili gornju vrednost ugaone brzine koju može uređaj da meri, a da pri tome relativna greška bude sigurno manja od zadate. Korišćenjem izraza (22) za  $\delta_{\max}$ , dobija se minimalan sadržaj brojača za koji je relativna greška merenja jednaka zadatoj maksimalnoj

$$C_{t \min} = \frac{100}{\delta_{\max}(\%)}. \quad (23)$$

Smenom izraza (23) u (19) nalazi se maksimalna ugaona brzina  $\omega_{\text{gornja}}$  za koju je tačnost uređaja jednaka  $\delta_{\max}$

$$\omega_{gornja} = \frac{60if_0}{2P} \frac{1}{C_{t\min}} = \frac{60if_0}{2P} \frac{\delta_{\max}(\%)}{100}. \quad (24)$$

Donja granična ugaona brzina diktirana je mogućnostima brojača, tj. zavisi od maksimalnog broja koji brojač može izbrojati, dakle od broja bitova brojača

$$\omega_{donja} = \frac{60if_0}{2P} \frac{1}{C_{t\max}} = \frac{60if_0}{2P2^n}, \quad (25)$$

gde je  $n$  – broj bitova brojača.

Za širinu mernog opsega imamo

$$\Delta\omega = \omega_{gornja} - \omega_{donja}. \quad (26)$$

Smenom izraza (24) i (25) u (26) dobijamo

$$\Delta\omega = \frac{60if_0}{2P} \left[ \frac{1}{C_{t\min}} - \frac{1}{C_{t\max}} \right] = \frac{60if_0}{2P} \left[ \frac{\delta(\%)}{100} - \frac{1}{2^n} \right]. \quad (27)$$

Rezolucija T metode merenja ugaone brzine se dobija promenom sadržaja brojača  $C_t$  za jedan. Rezolucija i vreme merenja T metode se mogu izraziti relacijama koje slede, respektivno

$$Q_v = \frac{2\pi}{C_t(C_t - 1)PT_0}, \quad (28)$$

$$T_m = C_t T_0 \quad (\text{gde je } C_t = 2\pi P \omega T_0). \quad (29)$$

Pri izboru broja markera treba tražiti kompromis između malog vremena merenja, s jedne strane, željenog opsega merenja i male relativne greške, s druge strane. Prednost merenja ovom metodom je visoka tačnost pri maloj ugaonoj brzini. Nedostatak je relativno mala gornja granična vrednost ugaone brzine i zavisnost vremena merenja od ugaone brzine.

### 3. METODA KONSTANTNOG VREMENSKOG INTERVALA

Metoda konstantnog vremenskog intervala, CET metoda, koristi kombinaciju brojanja impulsa sa enkodera i merenja vremena trajanja izbrojanih impulsa sa enkodera [3]. CET metoda zahteva relativno kratko vreme merenja koje malo varira kroz opseg merenih ugaonih brzina. U globalu gledano, CET metoda predstavlja kompromis između rezolucije i vremena merenja. Rezultati poređenja ove metode sa klasičnim metodama merenja ugaone brzine dati su u tabeli 1.

Vreme se meri brojanjem pomoćnih impulsa iz internog oscilatora periode  $T_0$  (obično frekvencija rada tajmera mikrokontrolera). Mereni vremenski interval se selektuje tako da je duži ili jednak predodređenom CET intervalu  $T_{el}$  i on je celobrojni umnožak impulsa sa enkodera.

Tabela 1. Poređenje CET metode sa brojačkim metodama za merenje ugaone brzine

	$\Delta n/n$ (relativna greška)		
	M metoda	T metoda	CET metoda
pri 30 ob/min	85 %	0.025 %	0.025 %
pri 3000 ob/min	0.85 %	2.5 %	0.05 %

	Vreme merenja		
	M metoda	T metoda	CET metoda
pri 30 ob/min	2.3 ms	1.95 ms	1.95 ms
pri 3000 ob/min	2.3 ms	0.02 ms	1.02 ms

Princip procesa brojanja u CET metodi ilustrovan je na slici 7(a). Brojač impulsa sa enkodera i brojač impulsa takta (tajmer) se istovremeno startuju uzlaznom ivicom impulsa sa enkodera. Brojač se zaustavlja prvom uzlaznom ivicom impulsa sa enkodera, koja se pojavi nakon što je istekao CET interval  $T_{el}$ . Sadržaj brojača impulsa je tada  $C_p$ . Sadržaj brojača impulsa takta (tajmera) je  $C_t$ .

Ugaona brzina se može izračunati preko priraštaja  $\Delta\varphi/\Delta t$ .  $\Delta\varphi$  je priraštaj ugaonog pomeraja u toku vremenskog intervala  $\Delta t$ , tako da imamo

$$\Delta\varphi = C_p \frac{2\pi}{P} [\text{rad}], \quad (30)$$

$$\Delta t = C_t T_C [\text{s}], \quad (31)$$

gde je  $P$  broj markera na disku enkodera. Korišćenjem izraza (30) i (31) dobijamo za vrednost ugaone brzine

$$\omega = 60C_p / (PT_0C_t) = 60f_0 C_p / (PC_t) [\text{ob/min}]. \quad (32)$$

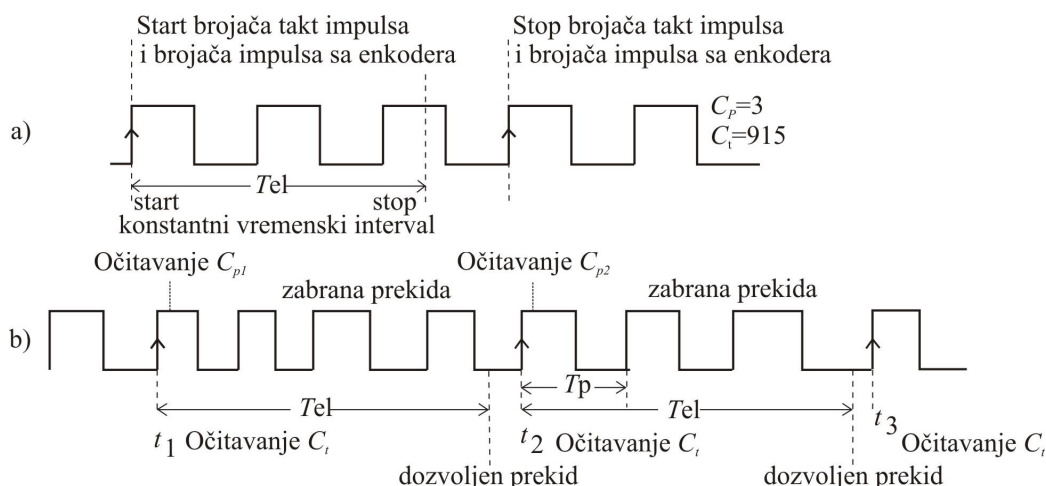
Razmatranjem procesa merenja, vidi se da je  $\Delta t$  zavisno od vrednosti ugaone brzine, sa varijacijama koje su manje od 1:2.  $\Delta t$  je duže od trajanja impulsa sa enkodera, a kraće od vremena  $T_{el}$ .

Pri vrlo malim brzinama, trajanje impulsa sa enkodera se povećava i prevazilazi na kraju uobičajene varijacije od  $2T_{el}$ . Dakle, pri malim brzinama CET metoda je identična metodi merenja trajanja impulsa sa enkodera. Pri brzinama koje se približavaju nultoj brzini, trajanje impulsa sa enkodera i odgovarajući vremenski odziv teže beskonačnosti. U praktičnim kontrolnim sistemima zahteva se da vreme merenja bude unutar određenog opsega, pa se definiše maksimalno vreme merenja  $T_{\max}$ . Ako trajanje impulsa sa enkodera prevazilazi vreme  $T_{\max}$ , izmerena ugaona brzina će biti 0 ob/min. Minimalna merljiva ugaona brzina je osobina svih digitalnih tahometara i definiše se kao

$$\omega_{\min} = \frac{60}{T_{\max} P}. \quad (33)$$

Prilikom implementacije ove metode merenja ugaone brzine nije potrebno ponavljanje restartovanja i stopiranja brojača impulsa sa enkodera i brojača impulsa takta. Ponovljeno startovanje i stopiranje brojača je nedostatak, jer zahteva reinicijalizaciju brojača. Ovaj proces troši određeno vreme, pa se smanjuje brzina odabiranja prilikom merenja ugaone brzine.

Bolji pristup je merenje vremenskog intervala pomoću brojača koji kontinualno radi i očitavanje vrednosti brojača na kraju svakog intervala merenja. Na slici 7 (b) je prikazan vremenski dijagram za ovakav način rada. Pri uzlaznoj ivici impulsa sa enkodera trenutak  $t_1$  se registruje i očitava se vrednost brojača impulsa sa enkodera  $C_{P1}$ .



Sl. 7. Vremenski dijagram CET metode: a) izračunavanje nakon svakog odabiranja, b) izračunavanje nakon nekoliko odabiranja

Posle minimalnog proteklog intervala vremena  $T_{el}$ , pri sledećoj uzlaznoj ivici impulsa sa enkodera registruje se trenutak  $t_2$  i vrednost brojača impulsa sa enkodera  $C_{p2}$ . Brzina se može odrediti korišćenjem izraza (32), sa vrednošću  $C_i$  koja je razlika vremena  $t_2$  i  $t_1$ , i sa vrednošću  $C_p$  koja je razlika između  $C_{p2}$  i  $C_{p1}$ . Kako je perioda takta tajmera reda mikrosekunde, očitavanje tajmera se mora implementirati hardverski. Prihvatni registri memorišu sadržaj slobodnog brojača na uzlaznoj ivici izabranog spoljašnjeg signala. Impulsi sa enkodera se broje pomoću akumulatora impulsa. Nailaskom rastuće ivice prihvatni registar memoriše sadržaj tajmera i generiše se prekid. Prekidna rutina uzima očitavanja brojača impulsa sa enkodera i zatim zabranjuje funkciju prihvatnog registra dok ne istekne vreme  $T_{el}$ . Posle toga se reaktivira funkcija prihvatnog registra da bi se odazvala na sledeću rastuću ivicu impulsa sa enkodera.

Očitavanje brojača impulsa sa enkodera i zabrana funkcije prihvatnog registra se vrši softverski u prekidnoj rutini. Dostupno vreme za izvršavanje ovih zadataka je perioda impulsa sa enkodera, zbog činjenice da se funkcija prihvatnog registra mora zabraniti pre pojave sledeće rastuće ivice. Ovo vremensko ograničenje određuje maksimalnu frekvenciju impulsa sa enkodera, odnosno maksimalnu ugaonu brzinu koja se može meriti.

Greška merenja ugaone brzine je uslovljena greškom merenja ugaonog pomeraja  $\Delta\varphi$  i greškom merenja vremena  $\Delta t$ , kao i greškama nastalim prilikom računanja. CET metod merenja ugaone brzine za svoju realizaciju koristi dva softverska tajmera i dva hardverska tajmera/brojača unutar mikrokontrolera. Metoda ima zadovoljavajuću tačnost i dobre dinamičke karakteristike.

#### 4. REALIZACIJA MERENJA UGAONE BRZINE PRIMENOM VIRTUELNE INSTRUMENTACIJE

Virtuelnu instrumentaciju izdvajaju njene prepoznatljive osobine fleksibilnosti, jednostavnosti i primenljivosti u različitim aplikacijama. U cilju istraživanja mogućnosti virtuelne instrumentacije za merenje ugaone brzine, izvršena je realizacija brojačkih metoda, kao što su M, T i M metoda sa usrednjavanjem. Za realizaciju i testiranje

ovih metoda je korišćena PCI multifunkcijska akviziciona kartica NI 6251, PC sa instaliranim softverom LabVIEW i generator funkcija HP 8116A za simulaciju impulsa sa enkodera. Univerzalni brojač HP 5316B je iskorišćen za tačno merenje izlazne frekvencije generatora funkcija. Akviziciona kartica ima dva brojača opšte namene, koji su iskorišćeni za realizaciju različitih metoda za merenje ugaone brzine. Ona ima interni takt frekvencije 80 MHz. Razvijen je jedan virtuelni instrument koji kombinuje prethodne tri metode, M, T i M metodu sa usrednjavanjem.

Najznačajnije greške koje se javljaju pri merenju ugaone brzine baziranom na konceptu virtuelne instrumentacije sa bilo kojom od ovih metoda su klasifikovane kao: greške uvedene od strane kvarnog oscilatora na akvizicionoj kartici  $\delta_{f_c}$ , greške okidanja usled šuma u signalu  $\delta_{trigger}$  i kvantizaciona greška  $\delta_q$ :

$$\delta_{\omega} = \frac{\Delta\omega}{\omega} = \delta_{f_c} + \delta_{trigger} + \delta_q, \quad (34)$$

Vrednosti grešaka uvedenih od strane kvarnog oscilatora na akvizicionoj kartici mogu biti određene iz specifikacija proizvođača. Tačnost oscilatora PCI 6251 akvizicione kartice je oko  $5 \times 10^{-5}$ , ali ova greška može biti smanjena kalibracijom projektovanog virtuelnog instrumenta pomoću tačnijeg spoljašnjeg instrumenta.

Greške okidanja i uobličavanja usled šuma u signalu zavise od kvaliteta signala na ulazu akvizicione kartice, a mogu biti smanjene sa odgovarajućim kolima za kondicioniranje. Ova greška ne dominira ako se primenjuje M metoda, ili ako je primenjeno merenje sa usrednjavanjem nekoliko perioda ulaznog signala.

Kvantizaciona greška je definisana relacijom:

$$\delta_q = \left| \frac{\omega(C+1) - \omega(C)}{\omega(C)} \right|, \quad (35)$$

gde je  $C$  sadržaj brojača.

Nezavisno od korišćene metode za određivanje ugaone brzine, ili M metode ili T metode, može se zaključiti da kvantizaciona greška direktno zavisi od sadržaja brojača,

$$\delta_q \approx \frac{1}{C}. \quad (36)$$

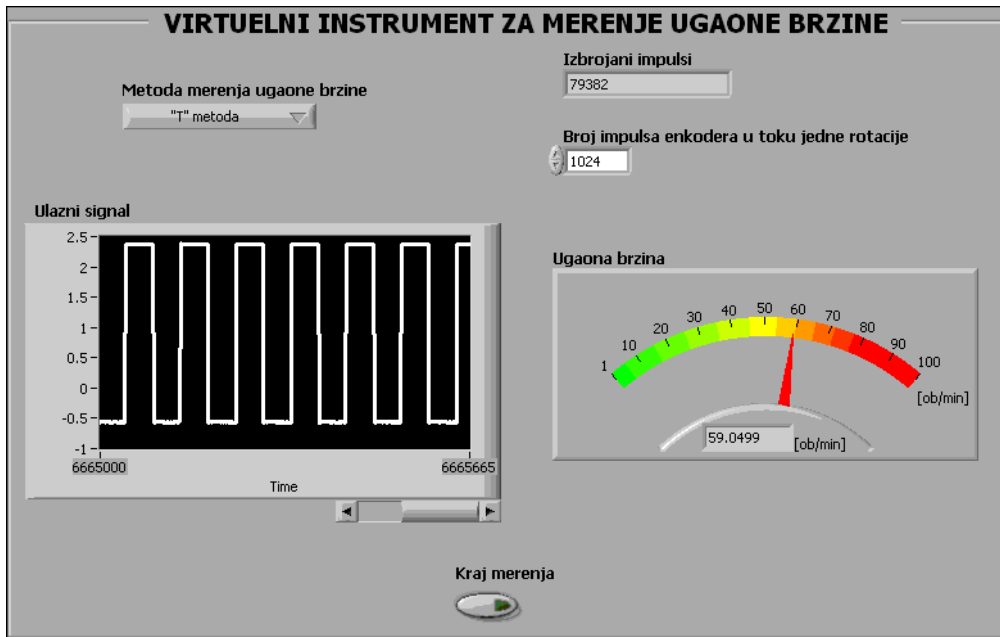


Ovde konkretno nisu razmatrani uticaji grešaka koje unosi sam enkoder.

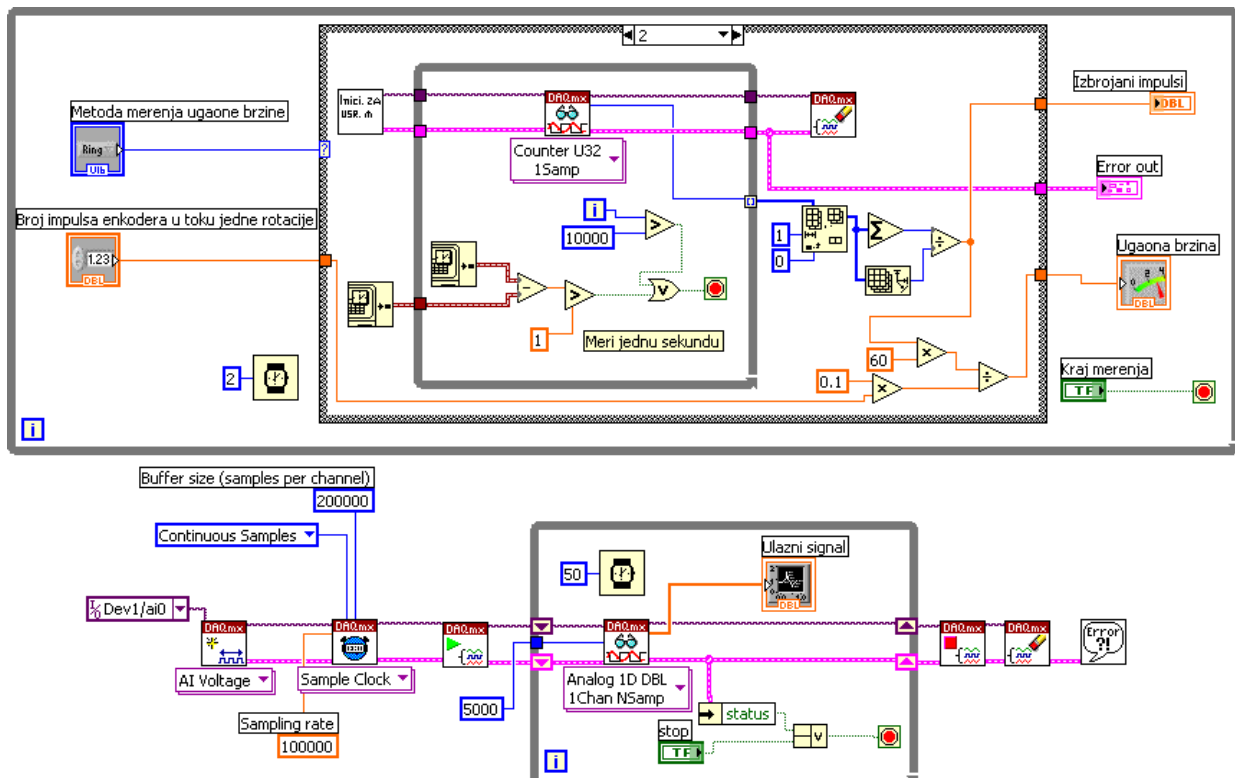
Prednji panel i blok dijagram realizovanog virtuelnog instrumenta, koji koristi prethodne tri metode merenja ugaone brzine, su prikazani na slikama 8 i 9, respektivno. Broj impulsa enkodera po obrtaju može biti promenjen na prednjem panelu virtuelnog instrumenta. Ring kontrola je iskorišćena za izbor metode merenja. Čart na prednjem panelu prikazuje ulazni signal. Iz blok dijagrama na slici 9 može se videti da u slučaju M metode sa usrednjavanjem

je izvršeno unutar vremenskog intervala od 1s, koji se može menjati.

Eksperimentalni rezultati izvršenih merenja pomoću realizovanog virtuelnog instrumenta su prezentovani u tabeli 2. U gornjem delu tabele 2 su frekvencije testiranja, merenje ovih frekvencija tačnijim spoljašnjim brojačem i izračunata ugaona brzina na osnovu toga. Za svaki od tri metode merenja rezultati merenja ugaone brzine i odgovarajuće relativne greške su date u donjem delu tabele 2.



Sl. 8. Prednji panel realizovanog virtuelnog instrumenta



Sl. 9. Blok dijagram M metode sa usrednjavanjem

Tabela 2. Eksperimentalni rezultati merenja ugaone brzine  $M$ ,  $T$  i  $M$  metode sa usrednjavanjem

Izlaz generatora funkcija		10 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz	2 MHz	5 MHz
Očitavanje frekvencmetra		10.09 Hz	99.39 Hz	1.0071 kHz	10.031 kHz	103.054 kHz	1.0389 MHz	2.0678 MHz	5.126 MHz
Ekvivalentna ugaona brzina (za $P = 1024$ ) [ob/min]		0.5912	5.8236	59.0097	587.754	6038.32	60873.0	121160	300351
M metoda	Ugaona brzina [ob/min]	0.538	5.55	58.85	587.95	6037.7	60868.1	121155	300349
	Relativna greška [%]	8.96	4.698	0.27	0.033	0.01	0.008	0.004	0.0006
T metoda	Ugaona brzina [ob/min]	0.591198	5.8238	59.0085	587.748	6036.5	60325.1	114980.8	278875.9
	Relativna greška [%]	0.0003	0.0034	0.002	0.001	0.03	0.9	5.1	7.15
M metoda sa usrednjavanjem	Ugaona brzina [ob/min]	0.5374	5.5254	58.91528	587.775	6038.52	60873.8	121159.5	300350.429
	Relativna greška [%]	9.1	5.12	0.16	0.0036	0.003	0.0013	0.0004	0.00019

## 5. REALIZACIJA DIGITALNOG TAHOGENERATORA

U automatskim sistemima za kontrolu broja obrtaja važnu ulogu uma tahogenerator – merni pretvarač broja obrtaja koji daje informaciju o smeru obrtanja i trenutnoj ugaonoj brzini osovine sa kojom je spregnut. Klasični tahogenerator generiše jednosmerni napon (pozitivnog ili negativnog polariteta, zavisno od smera obrtanja), niske je tačnosti, nelinearan i temperaturno zavisna, i u mnogome je prevaziđen elektronskim digitalnim tahogeneratorom.

Ovde je predloženo rešenje pogodno za merenje niskog broja obrtaja (0-3000 ob/min) sa digitalnim izlaznim signalom (10 bit) i analognim izlaznim signalom 0-10 V (greška 0,1 %).

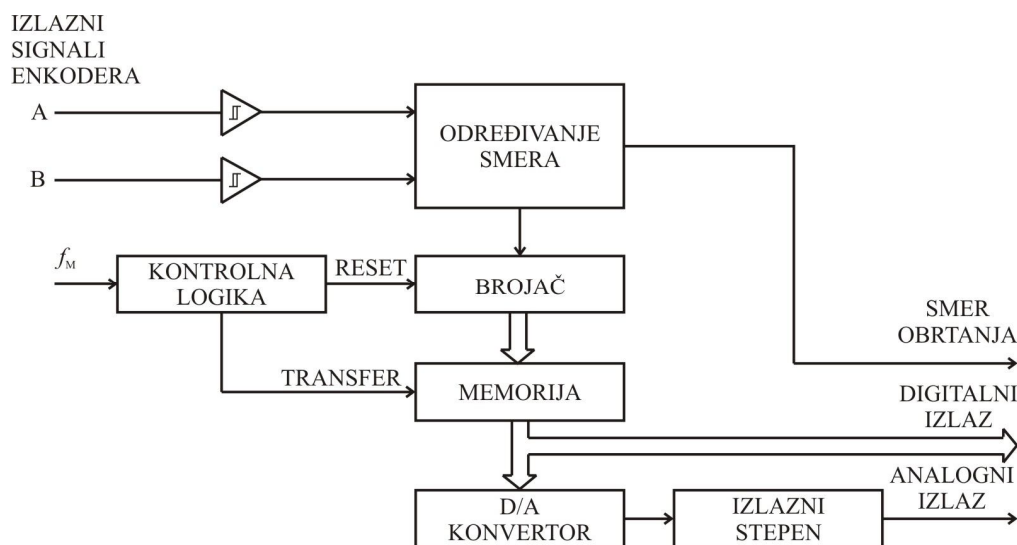
Funkcionalna blok šema realizovanog modela prikazana je na slici 10. Signali A i B su impulsi iz enkodera fazno pomereni za  $\pi/2$ , što je uslov za određivanje smera obrtanja. Merenje broja obrtaja ostvareno je brojačkom M

metodom, a generisanje analognog signala blokom digitalno/analognog konvertora (D/A).

Promena stanja D/A konvertora je u taktu sa frekvencijom  $f_M$ , koja se projektuje prema brzini promena ugaone brzine. Analogni izlazni napon dobija se posle procesiranja u izlaznom stepenu kalibracijom u referentnim uslovima. Prenosna funkcija digitalnog tahogeneratora je linearna, a digitalni odgovor se ispituje test sekvencom sa modulacijom linearnom i sinusnom funkcijom.

## 6. ZAKLJUČAK

Razmatrane su metode merenja niskih i visokih vrednosti ugaone brzine i odgovarajuće realizacije tahometara. Izbor merne metode za kontrolu pogonskih sistema, mehanizama i transmisije zavisi od prirode procesa, odnosno opsega brzina, prolaznih pojava, vibracija, udara, zakašnjenja, promena opterećenja i slično.



Povećanje tačnosti tahometra uslovljava povećanje vremena merenja i suženje mernog opsega, te se za određene realizacije mora tražiti kompromisno rešenje. CET metoda predstavlja dobru alternativu i obezbeđuje visoku tačnost, koja je gotovo konstantna u celom opsegu merenja ugaone brzine. Realizacija na bazi mikroracunara pruža određenu fleksibilnost i ona je u ovom slučaju iskorišćena u smeru maksimiziranja karakteristika digitalnog tahometra. Dodatno, obezbeđena mogućnost dvostruke komunikacije sa računom doprinosi velikoj fleksibilnosti realizovanog uređaja i pruža mogućnost kvalitetnog praćenja procesa u realnom vremenu.

Korišćenje LabVIEW softvera i realizacija digitalnog tahometra kao virtuelnog instrumenta povećava fleksibilnost i mogućnosti primene uređaja. Ovim pristupom realizovani inteligentni merni modul može biti sastavni deo nekih kompleksnih multifunkcionalnih instrumenata, što je često slučaj u današnjim industrijskim aplikacijama.

## LITERATURA

- [1] Cenzo C. D., Szabados B. and N. K. Sinha, *Digital measurement of angular velocity for instrumentation and control*, IEEE Trans. Ind. Electron. Contr. Instrum., Vol. IECI-23, pp. 83-86, Feb. 1976.
- [2] Denić D., Milenković V., Arsić M., Đorđević J., *Wide range high accuracy digital tachometer*, IMECO TC-4 Symposium on Development in Digital Measurement Instrumentation and Control, 3<sup>rd</sup> Workshop on ADC Modelling and Testing, Sept. 17-18, Naples, Italy, pp. 930-933, 1988.
- [3] Bonert, R., *Design of a high performance digital tachometer with a microcontroller*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 38, No. 6, pp. 1104-1108, 1989.
- [4] Kavanagh, R.C., *Performance analysis and compensation of M/T-type digital tachometers*, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 50, pp. 83-98, 2004.
- [5] Denić, D., Miljković, G. and D. Živanović, *Microcomputer based wide range digital tachometer*, Electronics and Electrical Engineering, Vol. 3, No. 67, pp 31-36, 2006.

[6] Miljković, G., Živanović, D., Arsić, M., Simić, M., Denić, D., *Merenje ugaone brzine primenom virtuelne instrumentacije*, YU INFO, 2011.

## DIGITAL METHODS FOR MEASURING ANGULAR VELOCITY OF MOTORS AND DRIVING MECHANISMS

*Prof. dr Miodrag Arsić, EF Niš*  
*Prof. dr Dragan Denić, EF Niš*  
*dipl. ing. Goran Miljković, EF Niš*

### Summary

*Accurate measurement of the mean and the instantaneous angular velocity in digital form is required in modern instrumentation and control systems in various transportation systems applications. This paper presents methods to perform digital measurements of angular velocity using optical incremental encoders. Such approach allows to quickly obtain results with high accuracy and resolution over a wide range of measurements, including those when the velocity is close to zero. It is also presented one possible solution for digital tachogenerator applied in analog and digital control systems.*

*Keywords: encoder, angular speed, tachogenerator*

### Adresa za kontakt:

Prof. dr Miodrag Arsić  
Univerzitet u Nišu, Elektronski fakultet u Nišu  
18000 Niš  
Aleksandra Medvedeva 14  
E-mail: [miodrag.arsic@elfak.ni.ac.rs](mailto:miodrag.arsic@elfak.ni.ac.rs)