

Realizacija sistema za merenje velikih ugaonih brzina

PREDRAG D. PETRONIJEVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički fakultet, Beograd
VUJO R. DRNDAREVIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički fakultet, Beograd

Stručni rad
UDC: 531.77
DOI: 10.5937/tehnika1804539P

U ovom radu prikazano je jedno rešenje sistema za precizno i pouzdano merenje ugaone brzine turbomotora u širokom dinamičkom opsegu, od 10.000 do 95.000 obrtaja u minuti. Posebna pažnja posvećena je izboru senzorskog elementa i implementaciji hardvera za kondicioniranje signala dobijenog na izlazu senzora koji radi u sredini u kojoj su prisutni izduvni gasovi, velike mehaničke vibracije i velike promene temperature. Realizovani sistem pokazuje preciznost bolju od $\pm 0,45\%$ na celom mernom opsegu.

Ključne reči: merni sistem, ugaona brzina, induktivni senzor, turbomotor

1. UVOD

U mnogim granama industrije zahteva se precizno merenje ugaonih brzina rotirajućih delova uređaja i sistema, a za potrebe monitoringa i kontrole procesa. Navedena merenja vrše se pri ispitivanju i u eksploataciji motora u automobilskoj i avio industriji, turbina i generatora za proizvodnju električne energije, transportnih traka u postrojenjima za proizvodnju i preradu različitih sirovina i materijala, i dr [1].

Ugaona brzina ω je vektorska fizička veličina kojom se definiše brzina i smer rotacije posmatranog tela. Pravac ugaone brzine se poklapa sa osom rotacije, a smer je određen pravilom desne ruke. Intenzitet ugaone brzine ω (u daljem tekstu ugaona brzina) određen je odnosom promene ugla rotacije $d\theta$ u vremenu dt

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (1)$$

i izražava se u radijanima u sekundi (rad/s).

U tehnici se ugaona brzina često izražava kao broj obrtaja u minuti (Revolutions Per Minute – RPM), pri čemu se koristi jedinica (o/min), tako da važi $1 \text{ rad/s} = 60/2\pi \text{ o/min}$.

Merenje ugaone brzine se vrši pomoću tahome-

tara koji, u zavisnosti od tipa konverzije energije, mogu biti mehanički, magnetni, elektromehanički i stroboskopski [2]. Svaki od pomenutih tipova tahometara ima svoje prednosti i nedostatke, i izbor za konkretnu primenu se vrši uzimajući u obzir način ugradnje, metodu merenja, gabarit, tačnost merenja, vreme odziva, cenu i dr.

Od posebne je važnosti precizno i pouzdano merenje ugaone brzine u sistemima nadzora i upravljanja turbomotorima male snage, koji su po gabaritu malih dimenzija, ali imaju veoma veliku ugaonu brzinu. U ovakvim uslovima, u kojima su prisutne vibracije, izduvni gasovi i velike promene temperature, kao senzorski element za merenje ugaone brzine se najčešće koristi induktivni senzor čiji se princip rada zasniva na promeni induktivnosti kalemata pri promeni magnetne otpornosti [2], [3].

Na izlazu induktivnog senzora se dobija merni signal čija je frekvencija proporcionalna ugaonoj brzini. Merni signal je pomešan sa šumom i ima velike amplitudne promene za različite ugaone brzine, pa je neophodno izvršiti filtriranje i pretvaranje mernog signala u povorku pravougaonih impulsa radi dalje obrade pomoću mikrokontrolera. Induktivni senzori se odlikuju velikom pouzdanošću, kompaktnom konstrukcijom, otpornošću na hemikalije, mehaničke vibracije i vlagu [2], ali imaju i relativno visoku cenu.

U raspoloživoj literaturi postoje različiti primeri realizacije sistema za merenje ugaone brzine. Jedan primer realizacije pretvarača i princip merenja ugaone brzine turbine generatora je prikazan u [4]. Ostvarena

Adresa autora: Predrag Petronijević, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

e-mail: pedja.veverak@gmail.com

Rad primljen: 17.07.2018.

Rad prihvaćen: 06.08.2018.

tačnost je bolja od 0,05% ali za opseg merenja od 0 do samo 3.000 o/min. U [5] je opisan sistem za merenje ugaone brzine rotora motora u opsegu od 500 do 3.800 o/min sa tačnošću od 0,22%, pri čemu je korišćen optički senzor.

Najveći nedostatak navedene implementacije se, pored uskog opsega merenja, ogleda u nemogućnosti pouzdanog rada optičkog senzora u sredinama u kojima su prisutni izduvni gasovi. Na tržištu se nude integrisana kola koja se mogu koristiti za merenje ugaonih brzina preko 140.000 o/min [6].

Princip rada ovih kola se zasniva na generisanju impulsnog signala prilikom detekcije infracrvene svetlosti sa predajne diode (IR LED). Infracrveni predajnik i prijemnik se, kao što je navedeno u [6], montiraju na suprotnim stranama rotirajućeg diska. Međutim, ovakav način montaže senzorskog elementa nije moguće ostvariti zbog mehaničkih uslova i konstrukcije lopatica korišćenog turbomotora. Naime, u ovom radu je predviđena radialna ugradnja senzorskog elementa u odnosu na osovinu turbomotora.

Metode merenja ugaone brzine primenom virtualne instrumentacije su objavljene u [7] i [8]. U ovim radovima se navodi da je ostvarena tačnost merenja bolja od 0,02%, odnosno 0,006%, respektivno. Treba imati u vidu da su u navedenim radovima signali sa senzora simulirani korišćenjem generatora impulsa.

Cilj ovog rada je da se analiziraju mogućnosti realizacije i ponudi jedno rešenje sistema za precizno merenje velikih ugaonih brzina, pogodno za primenu u testiranju i eksploataciji turbomotora. Zahteve koje sistem treba da zadovolji se odnose na brz odziv, veliku pouzdanost i veliku tačnost u otežanim klimo-mehaničkim uslovima i širokom opsegu merenja od 10.000 do 95.000 o/min.

Na osnovu postavljenih zahteva i analize postojećih rešenja [4]-[8] projektovan je i realizovan laboratorijski model sistema za merenje velikih ugaonih brzina. Posebna pažnja je posvećena izboru senzora, njegovoj montaži i povezivanju i implementaciji hardvera za preciznu detekciju mernog signala u uslovima u kojima su prisutna značajna izobličenja signala usled dejstva različitih faktora kao što su velike promene temperature, prisustvo izduvnih gasova, vibracije rotirajućih delova i dr.

Sistem se sastoji od induktivnog blizinskog senzora, filtra propusnika niskih učestanosti, pojačivača, kola za određivanje gornjeg i donjeg praga diskriminacije pojačanog i filtriranog mernog signala, logike za uobličavanje i preciznu detekciju pojačanog i filtriranog mernog signala korišćenjem dobijenih pragova diskriminacije, mikrokontrolera za obradu podataka, LCD displeja za prikaz rezultata merenja i serijskog interfejsa za komunikaciju sa personalnim računarnom.

Za realizaciju softvera u ovom radu je korišćeno razvojno okruženje Keil uVision [9]. Rezultati testiranja realizovanog mernog sistema pokazuju da je moguće postići veliku tačnost merenja u celom radnom opsegu.

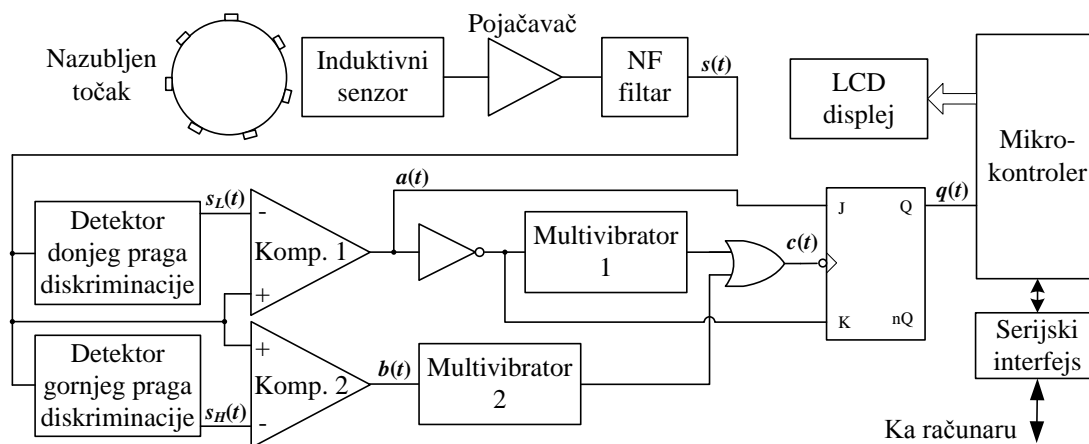
Rad je podeljen u pet celina. Nakon uvoda, u drugom poglavlju je predstavljen opis mernog sistema. Hardverska struktura sistema je prikazana preko blok šeme, pri čemu su detaljnije opisani elementi sistema pomoću kojih se određuju gornji i donji prag diskriminacije. U trećem poglavlju je opisana realizacija softvera i prikazan je tok softverskog algoritma mikrokontrolera. Četvrto poglavlje se odnosi na prikaz dobijenih eksperimentalnih rezultata merenja za različite vrednosti ugaone brzine. U petom poglavlju su izneti zaključci.

2. OPIS MERNOG SISTEMA

Sistem za merenje ugaone brzine se, kao što je navedeno u uvodu, sastoji iz senzorskog elementa, kola za kondicioniranje signala i mikrokontrolera za obradu podataka i prikaz rezultata merenja na LCD displeju. Akvizicija i prikaz rezultata merenja može se vršiti i na personalnom računaru, povezivanjem mikrokontrolera i računara preko serijskog interfejsa. Kao senzorski element u ovom radu se koristi induktivni blizinski senzor bezkontaktnog tipa koji pri prolasku pored metalnog objekta generiše strujni signal [10].

Kako je merni signal na izlazu senzora niskog nivoa i pomešan sa šumom, potrebno je izvršiti njegovo pojačanje i filtriranje u cilju povećanja odnosa signal/šum i rezolucije merenja. Pojačani merni signal se pomoću komparatorskih i uobličavačkih kola pretvara u povorku pravougaonih impulsa koja se prosleđuje mikrokontroleru radi dalje obrade. Učestanost uobličenih impulsa proporcionalna je ugaonoj brzini, odnosno brzini rotacije. Samim tim, tačnost merenja zavisi od precizne detekcije impulsa koji se dobijaju iz senzora.

U ovom radu je realizovan originalni sistem za precizno kondicioniranje signala iz induktivnog blizinskog senzora učestanosti od 1 do 11 kHz u otežanim klimo-mehaničkim uslovima u kojima variraju amplituda i izobličenje mernog signala pri promeni ugaone brzine i usled uticaja smetnji. U konkretnim uslovima primene posebno su izražene velike promene temperature, prisustvo izduvnih gasova, promene rastojanja između senzora i rotirajućeg metalnog objekta usled mehaničkih vibracija, i dr. Dodatno, na nelinearnost mernog signala utiču i ofset i drift pojačavača [11] koji se koriste za kondicioniranje signala. Na osnovu analize pomenutih problema predložen je sistem za precizno merenje ugaone brzine, koji je predstavljen blok šemom na slici 1.



Slika 1 - Hardverska struktura mernog sistema

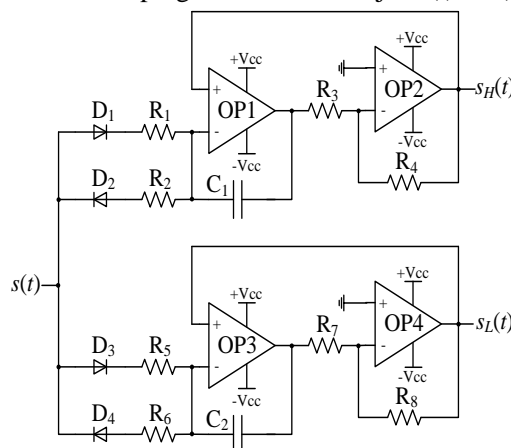
U testiranju sistema turbina turbomotora je simulirana pomoću metalnog nazubljenog točka sa $N_z = 7$ zubaca naspram koga je postavljen senzor. Usled prisustva/odsustva zubaca na izlazu senzora se generiše strujni signal koji ima vrednost manju ili jednaku 1 mA, odnosno veću ili jednaku 2,2 mA, respektivno. Ovakav tip induktivnog blizinskog senzora, za razliku od konvencionalnih [2], nema izlazni pojačavač i može se koristiti u eksplozivnim sredinama [10].

Strujni signal koji se dobija iz senzora se konvertuje u naponski korišćenjem preciznog mernog otpornika i dovodi na ulaz pojačavača. Nakon pojačanja vrši se filtriranje signala. Za filtriranje signala se koristi aktivni Sallen-Key filter propusnik niskih učestanosti sa dva pola [12], koji pokazuje dobre karakteristike u posmatranoj primeni i odlikuje se jednostavnošću. Gornji i donji prag diskriminacije pojačanog i filtriranog signala $s(t)$ se određuju korišćenjem detektora realizovanih pomoću integratora, operacionih pojačavača i šotki dioda. Osnovni razlog za korišćenje ovih detektora za uobličavanje mernog signala proizilazi iz činjenice da postoje značajna izobličenja mernog signala usled šuma, vibracija lopatica turbomotora, velikih promena temperature i prisustva izduvnih gasova. Takođe, amplitudne promene mernog signala se razlikuju za različite ugaone brzine turbomotora. Pored ugaone brzine, na amplitudu mernog signala utiču i ofset i drift pojačavača koji se koriste za pojačanje i filtriranje signala.

U ovom radu se za preciznu detekciju korisnih impulsa iz induktivnog senzora koriste detektori pomoću kojih se generišu pragovi diskriminacije koji prate amplitudne promene mernog signala. Na slici 2 je prikazana električna šema detektora gornjeg $s_H(t)$ i donjeg $s_L(t)$ praga diskriminacije.

Detektor se, kao što se vidi sa slike 2, sastoji od dva integratora na čijim izlazima se dobijaju donji i gornji prag diskriminacije. Pojačan i filtriran merni signal $s(t)$ se preko dve šotki diode dovodi na

invertujuće ulaze integratora. Šotki diode su postavljene tako da kada je jedna propusno polarizovana druga je nepropusno polarizovana, i obrnuto. Na ovaj način je moguće definisati različito vreme punjenja i pražnjenja kondenzatora kod integratora i samim tim definisati nivoe pragova diskriminacije $s_H(t)$ i $s_L(t)$.

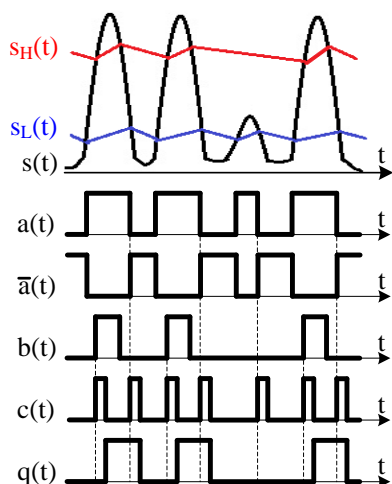


Slika 2 - Detektor gornjeg $s_H(t)$ i donjeg $s_L(t)$ praga diskriminacije

Princip funkcionisanja sistema za preciznu detekciju impulsa iz induktivnog senzora ilustrovan je pomoću vremenskih dijagrama signala na slici 3.

Signal $s(t)$ se najpre poredi sa pragovima diskriminacije. Komparacijom $s(t)$ sa $s_L(t)$ se dobija povorka pravougaonih impulsa $a(t)$ dok se signal $b(t)$ dobija komparacijom $s(t)$ sa $s_H(t)$.

U idealnim uslovima moguće je koristiti samo jedan komparator za uobličavanje mernog signala i određivanje ugaone brzine. Međutim, kako se sistem koristi u testiranju i eksploataciji turbomotora, moguće je da se na izlazu komparatora generišu lažni impulsi usled pojave šuma ili izobličenja mernog signala, kao što je prikazano na slici 3. Na ovaj način se javlja greška merenja, jer je ugaona brzina proporcionalna frekvenciji generisanih impulsa.



Slika 3 – Ilustracija principa funkcionisanja sistema pomoću vremenskih dijagrama karakterističnih signala

U ovom radu se, u cilju smanjenje greške merenja usled pojave lažnih impulsa, koristi digitalna logika realizovana korišćenjem logičkih kola, multivibratora i sinhronog JK flipflopa. Izlazi iz multivibratora, kao što je prikazano na blok šemi na slici 1, se preko logičkog ILI kola koriste za generisanje signala $c(t)$ koji je povezan na taktni ulaz ivičnog JK flipflopa. Promena stanja flipflopa se vrši na silaznu ivicu signala takta. Na osnovu vrednosti logičkih nivoa signala $a(t)$ i invertovane verzije ovog signala, koji se dovode na J i K ulaze flipflopa, respektivno, dobija se impulsni signal $q(t)$. Kao što se vidi sa slike 3, generisan impulsni signal $q(t)$ ne sadrži lažni impuls koji je detektovan na izlazu prvog komparatora. Na ovaj način je omogućena precizna detekcija impulsa iz senzora.

Impulsni signal $q(t)$ se preko ulaza mikrokontrolera dovodi do integrisanog hardverskog brojača pomoću kojeg se vrši brojanje impulsa $q(t)$ u konstantnom vremenskom intervalu T . Na osnovu izbrojanih impulsa se računa ugaona brzina ω izražena u (o/min)

$$\omega = \frac{60C}{N_z T} \quad (2)$$

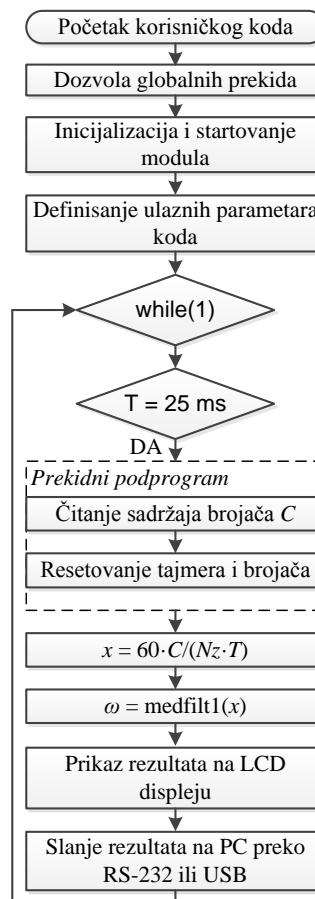
gde je C broj impulsa, T proteklo vreme i N_z broj zubaca. Rezultati merenja se prikazuju na LCD displeju i/ili personalom računaru sa kojim je mikrokontroler povezan preko serijskog interfejsa.

3. SOFTVER

Implementacija softverskog algoritma za merenje ugaone brzine je omogućena korišćenjem 32-bitnog ARM Cortex-M3 mikrokontrolera LPC1768FBD100,551 [13]. Izabrani mikrokontroler sadrži 512 kB fleš memoriju, 64 kB RAM, Ethernet MAC, USB interfejs, 8-kanalni DMA kontroler, 4xUART, 2xCAN, 2xSSP, SPI interfejs, 3xI²C, 12-bitni AD konvertor,

10-bitni DA konvertor, PWM modul, 4 32-bitna tajmera/brojača, RTC i 70 GPIO pinova.

U mikrokontrolerskom programu je realizovana metoda merenja ugaone brzine, koja se zasniva na brojanju impulsa u fiksnom poznatom intervalu, i ona je proporcionalna broju impulsa [14]. Na slici 4 je prikazan tok softverskog algoritma realizovanog sistema.



Slika 4 – Tok softverskog algoritma

Nakon inicijalizacije i definisanja ulaznih parametara započinje izvršavanje glavnog mikrokontrolerskog programa. Pin 8 mikrokontrolera se definiše kao *capture* ulaz CAP3.1 [13] pomoću kojeg se impulsni signal $q(t)$ dovodi do integrisanog brojača TIM3. Upišom odgovarajućih vrednosti u konfiguracioni registar sistemskog tajmera SysTic mikrokontrolera LPC1768-FBD100,551 definiše se vremenski interval T u kome se vrši brojanje impulsa. Kada T dostigne zadatu vrednost ulazi se u prekidnu rutinu programa. U prekidnom podprogramu se vrši očitavanje sadržaja C brojača TIM3, njegovo resetovanje i resetovanje tajmera SysTic kao priprema za naredni ciklus brojanja. Ugaona brzina se računa prema jednačini (2).

Rezultati merenja se filtriraju korišćenjem nelinearnog Median filtra [15] pozivanjem funkcije `medfilt1()`. Osnovna funkcija ovog filtra je smanjivanje

greške merenja usled pojave impulsnog šuma. Filtriranje rezultata merenja se vrši u tri koraka. U prvom koraku se izdvajaju vrednosti 7 uzastopnih rezultata merenja. Zatim se rezultati merenja sortiraju po neopadajućim vrednostima i formira se niz od 7 članova. Konačno se na izlazu filtra dobija rezultat merenja koji ima vrednost jednaku vrednosti četvrtog člana niza.

Na kraju programa rezultati merenja ugaone brzine se prikazuju na LCD displej i prenose do personalnog računara preko serijskog RS-232 interfejsa. Pored RS-232 interfejsa, komunikacija između mernog sistema i personalnog računara se može ostvariti preko USB magistrale, koja se dobija konverzijom RS-232 u USB magistralu korišćenjem FTDI integrisanog kola [16].

Realizovan sistem za merenje ugaone brzine sadrži interfejs za programiranje mikrokontrolera, tako da postoji mogućnost jednostavnog menjanja programskog koda. Pisanje, editovanje, verifikacija i testiranje koda i programiranje mikrokontrolera je omogućeno korišćenjem Keil uVision razvojnog okruženja [9].

4. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U cilju utvrđivanja performansi realizovanog mernog sistema izvršena su merenja ugaone brzine nazubljenog točka u opsegu od 10.000 do 95.000 o/min na sobnoj temperaturi. Kao referentne vrednosti ugaone brzine korišćeni su rezultati merenja dostupnog bezkontaktnog tahometra koji ima opseg merenja od 10.000 do 99.999 o/min [17]. Na slici 5 prikazan je merni sistem tokom testiranja.

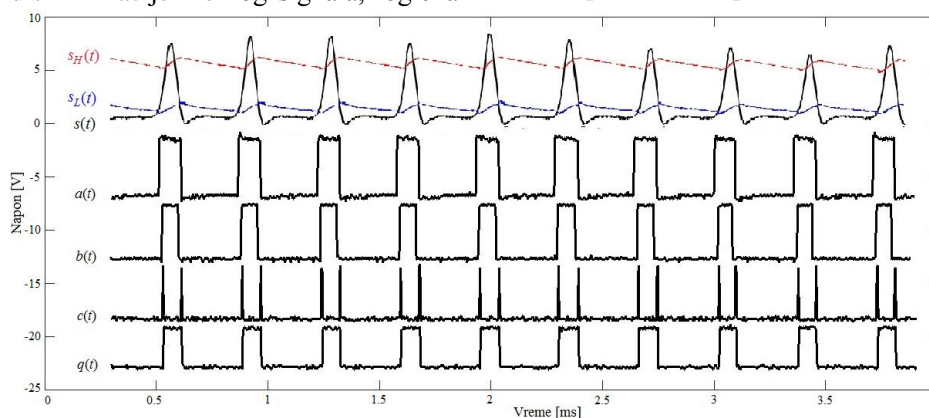
Kola za pojačanje, filtriranje i detekciju gornjeg i donjeg praga diskriminacije mernog signala, logička

kola za uobličavanje i precizno generisanje impulsa na izlazu senzora i mikrokontroler pomoću kojeg se meri ugaona brzina na osnovu izbrojanih impulsa u jedinici vremena realizovani su u vidu dvoslojng PCB kola (Printed Circuit Board) dimenzije 10x10 cm. Takođe, na samom PCB kolu je implementirano napajanje sistema. Na slici 6 je prikazan vremenski dijagram karakterističnih signala realizovanog mernog sistema.



Slika 5 – Merni sistem tokom testiranja

Prikazani signali su snimljeni pri ugaonoj brzini od 20.000 o/min. Induktivni blizinski senzor je postavljen na rastojanju $r = 1$ mm od zubaca točka iako je nominalno rastojanje za izabrani senzor 0,8 mm [10]. Rastojanje r je određeno na osnovu mogućnosti mehaničke ugradnje senzora naspram lopatica turbomotora, a u cilju bezbednog i pouzdanog rada turbomotora u uslovima u kojima su prisutne vibracije, izduvni gasovi i velike promene temperature.



Slika 6 - Vremenski dijagram karakterističnih signala

Na slici 7 dat je izgled realizovanog PCB kola. Induktivni senzor blizine se na štampano kolo povezuje preko 2-pinskog konektora. Sprega sa personalnim računarom je ostvarena preko RS-232 interfejsa. Pored personalnog računara, prikaz rezultata merenja je omogućen i na LCD displeju.

Takođe, na štampanom kolu se nalazi i konektor za programiranje mikrokontrolera.

Od pomoćnih funkcija razvijenog mernog sistema implementiran je CAN (Controller Area Network) interfejs za povezivanje sa drugim mikrokontrolerima i uređajima i ulaz za povezivanje termopara za merenje temperature sredine u cilju temperaturne kompenzacije.

Interfejs za termopar je realizovan pomoću integrisanog kola MAX31855 [18].



Slika 7 – Izgled realizovanog štampanog kola

U tabeli 1 su prikazani rezultati izvršenih merenja pomoću realizovanog mernog sistema. Merenja su obavljena na sobnoj temperaturi za deset poznatih vrednosti ugaone brzine, u opsegu od 10.000 do 95.000 o/min.

Veličina ω_{ref} označava referentnu vrednost ugaone brzine dobijene korišćenjem tahometra [17], ω_{iz} predstavlja vrednost ugaone brzine izmerene pomoću realizovanog sistema a $\delta\omega$ relativnu grešku pune skale.

Tabela 1. Rezultati testiranja sistema

n	ω_{ref} [o/min]	ω_{iz} [o/min]	$\delta\omega$ [%FS]
1	10.000	9.943	-0,06
2	20.000	19.886	-0,12
3	30.000	30.171	0,18
4	40.000	39.771	-0,24
5	50.000	49.714	-0,30
6	60.000	60.343	0,36
7	70.000	69.582	-0,44
8	80.000	80.229	0,24
9	90.000	90.171	0,18
10	95.000	94.629	-0,39

Relativna greška merenja pune skale $\delta\omega$ je određena izrazom

$$\delta\omega[\%FS] = \frac{\omega_{izn} - \omega_{refn}}{\max(\omega)}, \quad (3)$$

gde je sa n označen redni broj vrednosti referentne ugaone brzine a $\max(\omega)$ je maksimalna vrednost opsega merenja realizovanog sistema i iznosi 95.000 o/min. Iz prikazane tabele se može videti da je maksimalna relativna greška manja od $\pm 0,45\%$ na celom mernom opsegu.

Rezolucija merenja ugaone brzine korišćenjem frekvencijske metode opisane pomoću jednačine (2) se dobija promenom sadržaja brojača TIM3 za jedan i predstavlja se izrazom

$$Q = 60 \frac{C+1}{N_z T} - 60 \frac{C}{N_z T} = \frac{60}{N_z T}, \quad (4)$$

gde je C sadržaj brojača TIM3 za vreme $T = 25$ ms i $N_z = 7$ broj zubaca točka.

Kvantizaciona greška je definisana relacijom

$$\delta_q = \left| \frac{\omega(C+1) - \omega(C)}{\omega(C)} \right|, \quad (5)$$

gde su $\omega(C+1)$ i $\omega(C)$ ugaone brzine određene na osnovu sadržaja brojača $C+1$ i C , respektivno.

Može se zaključiti da kvantizaciona greška direktno zavisi od sadržaja brojača C , odnosno $\delta_q = 1/C$, i opada sa povećanjem ugaone brzine.

5. ZAKLJUČAK

U ovom radu je opisana metoda i postupak realizacije digitalnog sistema za merenje velikih ugaonih brzina turbomotora u opsegu od 10.000 do 95.000 o/min. Posebna pažnja je posvećena implementaciji hardvera za preciznu detekciju mernog signala sa induktivnog senzora blizine u uslovima u kojima su prisutna značajna izobličenja signala usled dejstva različitih faktora kao što su velike promene temperature, prisustvo izduvnih gasova, vibracije rotirajućih delova, i dr. Smetnje koje se javljaju u pomenutim uslovima mogu dovesti do pogrešnog merenja usled pojave dodatnih impulsnih signala pomoću kojih se utvrđuje ugaona brzina.

Predloženi merni sistem sadrži kola pomoću kojih se određuju plivajući gornji i donji prag diskriminacije pojačanog i filtriranog mernog signala. Ovi pragovi prate amplitudne promene mernog signala koje nastaju usled promene ugaone brzine turbomotora ali i usled uticaja ofseta i drifta pojačavača koji se koriste za pojačanje i filtriranje signala.

Na ovaj način je omogućeno precizno generisanje impulsa mernog signala prilikom prolaska zubaca točka naspram induktivnog senzora, pri čemu je značajno smanjen uticaj šuma na pojavu lažnih impulsa. Za izračunavanje ugaone brzine i digitalno filtriranje podataka korišćen je mikrokontroler Cortex-M3. Mikrokontrolerski program je realizovan u Keil uVision razvojnom okruženju.

Eksperimentalna ispitivanja pokazuju da sistem ispunjava sve postavljene funkcionalne zahteve. Ostvarena tačnost mernog sistema je bolja od $\pm 0,45\%$ na celom mernom opsegu. Razvijeni sistem je pouzdan, jednostavan za proizvodnju i može se prilagoditi za merenje ugaonih brzina u zahtevanom mernom opsegu.

LITERATURA

- [1] Ernest O. Doebelin, *Measurement Systems Application and Design*, fourth edition, McGraw-Hill Publishing Company, Printed in Singapore, 1990.
- [2] Mladen Popović, *Senzori i merenja*, četvrto izdanje, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Sarajevo, 2004, 279s.
- [3] Sivarao, M. R. Muhamad, T. S. Liang, Kadirgama, M. Shajahan, Embedded Inductive Sensor System in Helping Industrial Machine Maintenance Problems, *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, volume 7, no. 2, page 71-75, 2015.
- [4] Ljubiša Jovanović, Precizni merni pretvarač ugaone brzine, YU INFO 2010 konferencija o računarskim naukama i informacionim tehnologijama, Kopaonik, 2010.
- [5] Peng Cheng, Mohamed Sobh Mohamed Mustafa, Bengt Oelmann, Contactless Rotor RPM Measurement Using Laser Mouse Sensors, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, volume 61, no. 3, March 2012.
- [6] Ajinkya Chouthai, Rathin Karhu, Soham Kulkarni, RPM measurement and calculations using TSOP IR receiver, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, volume 2, issue 7, July 2013.
- [7] Dragan Denić, Ivana Ranđelović, Miodrag Arsić, Virtuelni instrument za merenje ugaone brzine, *Simpozijum informacione tehnologije INFOTEH-JAHORINA 2006*, tom 5, strana 458-461, Jahorina, mart 2006.
- [8] Goran Miljković, Dragan Denić, Milan Simić, Aleksandar Jocić, Miroljub Pešić, Merenje ugaone brzine primenom metode adaptivne optimizacije, *YU INFO 2012 konferencija o računarskim naukama i informacionim tehnologijama*, Kopaonik, 2012.
- [9] ARM Keil, μ Vision® Integrated Development Environment [Internet]. Dostupno na: <http://www2.keil.com/mdk5/uvision/>
- [10] Contrinex AG, Inductive sensor DW-AD-605-04 [Internet]. Dostupno na: <https://www.contrinex.com/product/dw-ad-605-04/>
- [11] C. Enz, G. Temez, Circuit techniques for reducing the effects of op-amp imperfections, *Proceedings of the IEEE*, volume 84, page 1584-1614, November 1996.
- [12] A. Soltan Ali, A. G. Radwan, Ahmed M. Soliman, Fractional Order Butterworth Filter: Active and Passive Realizations, *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, volume 3, page 346-354, September 2013.
- [13] NXP, UM10360 LPC176x/5x User manual, Rev. 4.1, 2016 [Internet]. Dostupno na: <https://www.nxp.com/docs/en/user-guide/UM10360.pdf>
- [14] Kirianaki, N, Yurish, S., Shpak, N. and V. Deynega, *Data acquisition and signal processing for smart sensors*, John Wiley & Sons Ltd, ISBN: 0-470-84317-9, 2002.
- [15] O. Uma Maheshwari, G. B. Vanisree, D. Ebenezer, Performance of Several Types of Median Filters in Spectral Domain, *IIP 2004 International Conference on Intelligent Information Processing II*, page 135-142, 2004.
- [16] Future Technology Devices International Ltd, FT232R USB UART IC Datasheet, Document No.: FT_000053, Version 2.13 [Internet]. Dostupno na: http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf
- [17] AZ Instrument, OPERATION MANUAL, Economy digital contact/non-contact 2 in 1 tachometer, V02, 2009 [Internet]. Dostupno na: https://www.az-instrument.com.tw/az-instrument/upload/product_pdf/ODAwMC0xLTgoVklVODAwMU4p-1510890518-CZTsq.pdf
- [18] Maxim Integrated, MAX31855 Cold-Junction Compensated Thermocouple-to-Digital Converter, Rev. 5, 2015 [Internet]. Dostupno na: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX31855.pdf>

SUMMARY**REALIZATION OF THE SYSTEM FOR MEASUREMENT OF HIGH ANGULAR VELOCITY**

This paper presents a system solution for precise and reliable measurement of the turbomotor angular velocity in a wide dynamic range, from 10.000 to 95.000 rpm. Special attention is dedicated for selection of sensor element and hardware implementation for conditioning the signal obtained at the output of a sensor operating in the environment in which are present exhaust gases, high mechanical vibrations and big temperature changes. The accuracy of implemented system is better than $\pm 0,45\%$ on the whole measuring range.

Key words: *measurement system, angular velocity, inductive sensor, turbomotor*