

Mjerač broja okretaja sa LCD ekranom i analognim izlazom

Jurović, Jura

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:994407>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

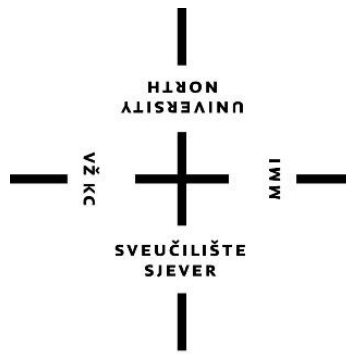
Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-17**



Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)





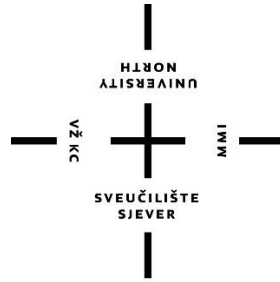
Sveučilište Sjever

Završni rad br. 421/EL/2018

Mjerač broja okretaja sa LCD ekranom i analognim izlazom

Jura Jurović, 0004/336

Varaždin, siječanj 2018. godine



Sveučilište Sjever

Odjel za elektrotehniku

Završni rad br. 421/EL/2018

Mjerač broja okretaja sa LCD ekranom i analognim izlazom

Student

Jura Jurović, 0004/336

Mentor

Stanko Vincek, struč.spec.ing.el.

Prijava završnog rada

Definiranje teme završnog rada i povjerenstva

ODJEL	Odjel za elektrotehniku		
PRISTUPNIK	Jura Jurović	MATIČNI BROJ	0004/336
DATUM	07.03.2018.	KOLEGIJ	Mjerenja u elektrotehnici
NASLOV RADA	Mjerač broja okretaja sa LCD ekranom i analognim izlazom		

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Speedometer with LCD display and analog output

MENTOR	Stanko Vincek, struč.spec.ing.el.	ZVANJE	Predavač
--------	-----------------------------------	--------	----------

ČLANOVI POVJERENSTVA	1. mr.sc. Ivan Šumiga (predsjednik)
	2. Stanko Vincek, struč.spec.ing.el (mentor)
	3. Miroslav Horvatić, dipl.ing. (član)
	4. Dunja Srpak, dipl.ing (zamjenski član)
	5. _____

Zadatak završnog rada

BROJ	421/EL/2018
------	-------------

OPIS

U uvodu je potrebno ukratko opisati ulogu mjerenja broja okretaja u automatiziranim sustavima. U nastavku je potrebno dati pregled uređaja za mjerenje broja okretaja osovine elektromotora i objasniti osnovne principe mjerenja. Opisati prednosti i nedostatke analognih i digitalnih uređaja za mjerenje. Potrebno je projektirati i izraditi mjerač broja okretaja elektromotora pomoću beskontaktnog optičkog senzora i nazubljenog diska. Izmjereni iznos brzine vrtnje osovine je potrebno u realnom vremenu prikazivati na LCD ekranu i istu informaciju slati na analogni izlaz. Analogni izlaz mora podržavati barem jedan standardni naponski i jedan standardni strujni signal koji će biti linearno ovisan o izmjerenom broju okretaja. Izrađeni mjerač broja okretaja je potrebno ispitati i usporediti sa vrijednostima tahogeneratora.

ZADATAK URUČEN

14.03.2018



SMK

Predgovor:

Zahvaljujem se mentoru struč.spec.ing.el. Stanku Vinceku na ukazanom povjerenju i strpljenju, te susretljivosti kod izrade završnog rada. Također zahvaljujem svim profesorima, profesoricama, asistentima i asistenticama Sveučilišta Sjever na znanju i vještinama koje su mi prenijeli tokom studija.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji, kolegama i prijateljima na ukazanoj podršci od početka, pa do kraja mojeg studija.

Sažetak:

Ovaj završni rad podijeljen je na tri cjeline. U prvoj cjelini govori o mjernim pretvornicima, definira se što su i koje vrste signala generiraju. Navedene su analogne i digitalne metode mjerenja broja okretaja i izrazi prema kojima se računa broj okretaja u ovisnosti o induciranom naponu za analogne metode, te vrste digitalnih metoda i pretvorbe impulsa u kutnu brzinu. Druga cjelina sadrži detaljan primjer i koncept izrade mjerača broja okretaja korištenjem P digitalne metode uz pomoć Arduino Uno pločice s ATmega328 mikrokontrolerom i fotoelektričnog senzora. Prikazani su dijagrami toka programa izbornika i jedne od četiri funkcija, objašnjena je uporaba tipkala za navigaciju izbornikom i prikaz informacija na LCD zaslon. Navedene su uloge D/A pretvornika MCP4725 i U/I XTR110KP pretvornika u pretvorbi signala, te međusobna komunikacija D/A pretvornika s mikrokontrolerom preko I²C komunikacije. Treće poglavlje sadrži dvije metode mjerenja digitalnim tahometrom i istosmjernim motorom kao tahogeneratorom, pritom se određuju statička i dinamička karakteristika s ciljem utvrđivanja kvalitete istog.

Ključne riječi: mjerni pretvornici, analogne metode, digitalne metode, P digitalna metoda, Arduino Uno, ATmega 328P, fotoelektrični senzor, LCD zaslon, tipkala, MCP4725, D/A pretvornik, XTR110KP, U/I pretvornik, I²C komunikacija, statička karakteristika, dinamička karakteristika

Popis korištenih kratica

AC	Izmjenična struja
A/m	Ampera po metru
D/A	Digitalno-analogna pretvorba
DC	Istosmjerna struja
E_d	Direktna komponenta napona
E_i	Inverzna komponenta napona
EEPROM	eng. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
f	Frekvencija
f_{osc}	Frekvencija oscilatora
Hz	Herc
IC	eng. Inter-Integrated Circuit
I_{OUT}	Izlazna struja
IR	eng. Infrared
I/O	eng. Input/output
kPa	Kilopaskal
kΩ	Kilohm
LCD	eng. Liquid Crystal Display
mA	Milliamper
mV	Millivolt
mm Hg	Milimetar živina stupca
mm H₂O	Milimetara vode
m/min	Metara u minuti
m/s	Metara u sekundi
n	Broj okretaja
MHz	Megaherc
N	Broj zavoja

okr/min	Okretaja u minuti
okr/s	Okretaja u sekundi
P	Rezolucija davača impulsa
RC	Otpornik-kondenzator
rad/s	Radijana u sekundi
SDA	eng. Serial Data line
SCL	eng. Serial Clock line
t_{ON}	Vrijeme uključenja tranzistora
t_{OFF}	Vrijeme isključenja tranzistora
t_H	Vrijeme pozitivne periode
t_L	Vrijeme negativne periode
U/I	Naponsko-strujna pretvorba
U	Napon
U_{out}	Izlazni napon
U_{REF}	Referentni napon
U_{mj}	Izmjereni napon
USB	eng. Universal Serial Bus
V	Volt
W	Wat
Wb	Weber
Ω	Ohm
$\Delta U_{\check{c}}$	Pad napona na komutatoru
°C	Stupanj Celzijev
ω	Kutna brzina
Φ	Magnetski tok
μs	Mikro sekunda

Sadržaj

1. UVOD.....	1
2. MJERENJE MJERNIH VELIČINA.....	3
3. MJERNI PRETVORNICI	5
4. METODE MJERENJA BROJA OKRETAJA.....	7
4.1. ANALOGNE METODE MJERENJA BRZINE VRTNJE	8
4.1.1. Indukcijski tahogenerator.....	8
4.1.2. Istosmjerni tahogenerator.....	9
4.1.3. Izmjenični tahogenerator.....	12
4.1.3.1. Sinkroni tahogenerator.....	12
4.1.3.2. Asinkroni tahogenerator.....	14
4.2. DIGITALNE METODE MJERENJA BRZINE VRTNJE.....	17
4.2.1. Impulsni generator	18
4.2.1.1. Mehanički davač impulsa	18
4.2.1.2. Magnetski davač impulsa.....	19
4.2.1.3. Fotoelektrični davač impulsa – IR senzor.....	20
5. DIGITALNI MJERAČ BROJA OKRETAJA	21
5.1. MJERNO OSJETILO - IR SENZOR	22
5.1.1. Karakteristike IR senzora.....	23
5.1.2. Ulazni sklop mjerača broja okretaja.....	24
5.2. MIKROKONTROLER – OBRADA SIGNALA.....	25
5.2.1. Pretvorba impulsa u broj okretaja	25
5.2.1.1. P postupak.....	26
5.2.1.2. T postupak	28
5.2.1.3. P/T postupak	30
5.2.2. „Arduino“ razvojno okruženje	32
5.2.2.1. Arduino UNO	32
5.2.3. Program mjerača broja okretaja	35
5.2.3.1. Dijagram toka programa mjerača broja okretaja.....	35
5.3. ANALOGNI IZLAZ MJERAČA BROJA OKRETAJA	37
5.3.1. D/A pretvorba	38
5.3.1.1. I ² C serijska komunikacija	38
5.3.1.2. MCP 4725 – D/A pretvornik.....	40
5.3.2. U/I pretvorba	42
5.3.2.1. XTR110KP - U/I pretvornik	42
5.3.2.2. Umjeravanje U/I pretvornika	44
5.4. TIPKALA	45
5.5. PRIKAZ INFORMACIJA - LCD ZASLON.....	46
5.6. SHEMA SPOJA PROTOTIPA – RAZVOJNA PLOČICA	48
6. SNIMANJE PRIJELAZNIH POJAVA DIGITALNIM TAHOMETROM	51
6.1. PRVA METODA – ODREĐIVANJE STATIČKE KARAKTERISTIKE	51
6.2. DRUGA METODA – SNIMANJE ZALETA ASINKRONOG ELEKTROMOTORA	55
7. ZAKLJUČAK	58
8. LITERATURA.....	60

1. Uvod

Razvojem tehnologije razvila se potreba za automatizacijom i upravljanjem procesa. U današnje doba automatika je implementirana u gotovo sve uređaje koji nas okružuju, te nam olakšava svakodnevni poslovni i privatni život. Automatika se razvija iz područja elektrotehnike, strojarstva i računarstva. Gotovo svaki tehnološki proces se može nadzirati i upravljati, a uloga automatike je čovjeku pojednostavniti nadzor, kontrolu i upravljanje proizvodnih procesa. Korisnik odabire način na koji se proces odvija bez detaljnog razumijevanja procesa, te mu je olakšano planiranje proizvodnje. Automatiziranom proizvodnjom se povećava brzina i kvaliteta proizvodnje i smanjuje se potreba za ljudskim resursima.

Prethodno je spomenuto da nam automatizacija omogućava nadzor na procesima. Mjerenje broja okretaja jedno je od ključnih procesa u industriji, može biti ostvareno pomoću analognih ili u novije doba digitalnih mjernih pretvornika. Kod analognih metoda su u praksi najviše zastupljeni istosmjerni ili izmjenični tahogeneratori. Tahogeneratori su mali generatori napona koji se mehanički povezuju na rotirajuću osovinu elektromotora, a napon induciran na njihovim stezaljkama je proporcionalan broju okretaja elektromotora. Digitalne metode se temelje na uzorkovanju i analizi digitalnih signala, te se na temelju analize izračunava broj okretaja. U ovom završnom radu opisan je koncept izrade digitalnog mjerača broja okretaja (tahometra) korištenjem digitalne P metode, namijenjenog za nadzor vrtnje osovine elektromotora.

Digitalni tahometar sadrži sljedeće funkcije: mjerenje broja okretaja, prikaz mjerenih veličina u realnom vremenu, te pretvaranje mjerene veličine u standardni strujni signal namijenjen za komunikaciju s drugim uređajima. Prednost digitalnih nad analognim instrumentima je u načinu prijenosa informacija, naime kod digitalnih instrumenata može se odrediti analogni ili digitalni oblik signala kojim će se određena informacija prenositi između sustava upravljanja. Digitalni instrumenti imaju prednost nad analognim u načinu na koji predstavljaju izmjerenu vrijednost, moguće je mjeriti analognu veličinu na izlazu pretvornika i prikazivati iznos broja okretaja na LCD ekranu istodobno, dok analogni mogu generirati samo analogni signal. Osim osnovnih, tu su još i dodatne funkcije koje korisnik može pozvati pomoću izbornika i tipkala, kao što su: prikaz broja okretaja, vrijeme jednog okretaja i informacije o naponu i struji iz pretvornika.

Cilj ovog završnoga rada je izrada digitalnog tahometra koji za određeni iznos broja okretaja osovine elektromotora generira analogni signal na izlazu koji je proporcionalan broju okretaja i prikazuje informaciju o broju okretaja na LCD ekran. Kod izrade digitalnog mjerača broja okretaja važno je pravilno dimenzionirati pojedine elemente mjerača jer bitno utječu na ukupnu točnost mjerača i brzinu odziva. Također, brzina odziva prilikom mjerenja prijelaznih pojava i točnost mjerenja ovise o odabiru digitalne metode, odnosno načinu na koji se vrši pretvorba iz jednog oblika signala u drugi. Prikaz mjerene veličine u realnom vremenu zahtjeva veliku brzinu pretvorbe i obrade podataka, te je iz navedenih razloga potrebno eliminirati ili smanjiti kašnjenje signala izlaznog sklopa. U idealnom slučaju, analogni signal na izlazu iz digitalnog tahometra nema kašnjenje za analognim signalom na ulaznom sklopu, no to je u praksi nemoguće ostvariti. Najveći nedostatak digitalnih mjernih pretvornika je to što njihova točnost uvelike ovisi o kvaliteti i pouzdanosti pojedinih mjernih članova pretvornika, ulaznom sklopu, mikrokontroleru i izlaznom sklopu. S druge strane analogni mjerni pretvornici jednostavnije su konstrukcije od digitalnih mjernih pretvornika, te se u slučaju oštećenja pojedinih elemenata lakše detektiraju kvarovi.

2. Mjerenje mjernih veličina

Mjerenje je skup djelovanja radi određivanja vrijednosti fizikalne veličine. Kod mjerenja se želi dobiti prava vrijednost mjerene veličine ili se pokušava maksimalno približiti istoj. Mjerena veličina je fizikalna veličina kojoj mjerenjem određujemo vrijednost. Mjerne veličine zadane su u mjernim jedinicama. Mjerni instrument je naprava ili uređaj kojim se provodi postupak mjerenja fizikalne veličine. Mjerna jedinica je dogovorena jedinična količina fizikalne veličine s kojom se uspoređuje mjerena veličina kako bi se saznala njezina vrijednost. Definira se kao dogovorom prihvaćenu posebnu veličinu koja služi za kvantitativno iskazivanje veličina iste dimenzije. Mjerne jedinice razvrstava se u tri skupine[1]:

1. jedinice međunarodnog SI sustava
2. decimalne jedinice
3. složene izvedene jedinice

U mjernim tehnikama koriste se mjerila i mjere. Razlikujemo mjerilo i mjeru. Mjerila su naprave ili instrumenti kojima se provodi postupak mjerenja, a mjera je element koji utjelovljuje mjernu veličinu.[2]

Za što točnije mjerenje koriste se predviđena mjerila i mjere, s namjerom određivanja prave vrijednost. Da bi saznali pravu vrijednost koriste se mjerni instrumenti visoke točnosti i preciznosti ili se prava vrijednost dobiva proračunom. Izmjerena vrijednost nikada nije prava vrijednost već od nje odstupa u većem ili manjem iznosu koji ovisi o primijenjenoj mjernoj metodi. Odstupanje od prave vrijednosti naziva se pogreška mjerenja. Pogreške kod mjerenja dijele se na: sistematske, grube i slučajne. Sistematske pogreške nastaju zbog neispravnih mjernih instrumenata, izbora pogrešne metode mjerenja ili pogrešnog izvođenja mjerene metode. Ponovljive su i prilikom ponavljanja mjerenja javljaju se u istom iznosu i smjeru, a uzrokuju ih mjerna aparatura. Grube pogreške nastaju zbog krivog očitavanja mjeritelja zbog naglih promjena na mjernom uređaju ili u okolini. Slučajne pogreške su neizbježne, a uzrokuju ih nesavršenost mjeritelja i mjernog uređaja, u praksi ih je nemoguće eliminirati u potpunosti.

Mjerna metoda je postupak ili način mjerenja koji se odabire na početku mjerenja i kojim se dolazi do vrijednosti mjerene veličine. Mjerne metode mogu biti: posredna i neposredna. Kod posredne metode mjerenja instrumenti se koriste za očitavanje fizikalnih veličina koje služe za proračun mjerne veličine, a kod neposredne metode mjerni se rezultat dobiva uspoređivanjem mjernog predmeta sa poznatom mjernom veličinom uz pomoć mjernog instrumenta, te se rezultat mjerenja očitava sa instrumenta. Kod mjerenja se koriste tzv. mjerni pretvornici, oni služe za pretvaranje mjerene veličine u oblik ili signal koji je proporcionalan vrijednosti mjerene veličine i predstavlja brojčanu vrijednost iste. Mjerni pretvornici na izlazu generiraju standardni naponski ili strujni signal pogodan za daljnju obradu. U radu se broj okretaja mjeri posrednom metodom, jer se mjerna veličina nema s čime uspoređivati, a broj okretaja dobiva se isključivo mjerenjem i naposljetku računskom operacijom.

3. Mjerni pretvornici

Razlikujemo mjerne pretvornike električnih i neelektričnih veličina. Električni pretvaraju jedan oblik električnog signala u drugi, a neelektrični pretvornici pretvaraju određeni oblik energije u električnu energiju, npr. vrtnja osovine elektromotora inducira napon na stezaljkama elektromotora. Svaki mjerni pretvornik (instrument) ima neke značajke ili karakteristike prema kojima se oni razlikuju i primjenjuju. Osnovne karakteristike mjernih pretvornika su: ulazna karakteristika, izlazna karakteristika, prijenosna karakteristika, te pouzdanost i uvjeti okoline. Mjerni pretvornici mogu npr. služiti za mjerenje sljedećih fizikalnih veličina: pomaka, položaja, tlaka, temperature, brzine, protjecanja, razine, vlage, gustoće, naprezanja, sile, momenta, itd. Ulazne karakteristike mjernih pretvornika su: mjerena veličina, mjerno područje i mjerni opseg. Mjerena veličina je veličina koju mjerni pretvornik mora registrirati i pretvoriti u mjerni signal. Mjerno područje govori nam koje vrijednosti mjerene veličine se mogu mjeriti. Mjerni opseg je razlika između gornje i donje granice mjernog područja.

Izlazne karakteristike mjernih pretvornika su: mjerni signal, područje mjernog signala, vrsta mjernog signala, izlazna impedancija i šum.[3]

Poznavanje izlazne impedancije omogućava nam prijenos maksimalne snage na opterećenje, a služi nam za eliminaciju pogreške tereta. Mjerni signal je informacija o promjeni mjerene veličine. Analogni i digitalni pretvornici razlikuju se prema načinu na koji pretvaraju ulaznu i prikazuju izlaznu mjerenu veličinu. Kod analognih, pretvorba se vrši tako da se generira konstantan električni ili neelektrični signal ekvivalentan mjerenoj veličini, npr. napon, struja, tlak, a kod digitalnih, ulazna veličina pretvara se u impulse koji se obradom naknadno pretvaraju u mjerenu veličinu.

Područje mjerenog signala određeno je nacionalnim standardima:

- a) strujni električni mjerni signal: 0-1 mA, 0-5 mA, 0-20 mA, 4-20 mA ili 0-50 mA
- b) naponski mjerni signal: 0-5V, 1-5V ili 0-10V
- c) pneumatski mjerni signal: 20-100 kPa, 0-100 mmH₂O ili 20-100 mmH₂O

Eksperimentalno se određuje stvarna statička karakteristika, taj postupak se naziva baždarenje. Iz oblika statičke karakteristike zaključuje se da li je zavisnost izlazne i ulazne vrijednosti linearna ili nelinearna, a određuju se još i druge značajke pretvornika: osjetljivost, prag osjećanja, razloženost, histereza, itd. [3]

Statičke i dinamičke prijenosne karakteristike govore o kvaliteti i ovisnosti mjernog signala o promjeni mjerene veličine i o načinu odziva mjernog pretvornika. Posljedica neželjenih djelovanja pretvorbe mjerene veličine i mjerenog signala je pogreška mjernog pretvornika. Uvjeti okoline kao što su temperatura, vlaga, vibracije, utječu na rad mjernog pretvornika, djelovanjem mogu utjecati na mjerenje ili čak oštetiti mjerni pretvornik. Sobni radni uvjeti su: temperatura $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$, relativna vlažnost zraka $60 \pm 20\%$, te atmosferski tlak $101\,325\text{ kPa} \pm 2,666\text{ kPa}$ ($760 \pm 20\text{ mmHg}$). Izloženost mjernog pretvornika utjecajima okoline utječe na izgled statičke i dinamičke karakteristike. Toplinsko djelovanje u pretvornicima utječe na toplinsko sklizanje nule ili toplinsko sklizanje osjetljivosti. Sposobnost pretvornika da pretvara mjernu veličinu u mjerni signal u navedenim utjecajima okoline, naziva se pouzdanost.

4. Metode mjerenja broja okretaja

Postoji nekoliko načina kojima se može mjeriti brzinu vrtnje osovine elektromotora. Mjerne metode mogu se podijeliti na dvije skupine, to su: analogne i digitalne metode. U prošlosti za mjerenje električnih i neelektričnih veličina upotrebljavali su se samo analogni elektromehanički instrumenti, zbog potreba veće točnosti, pouzdanosti i brzine mjerenja razvili su se digitalni instrumenti, kod njih se mehanički okret osovine motora pretvara u digitalni signal, po čemu je metoda dobila naziv.

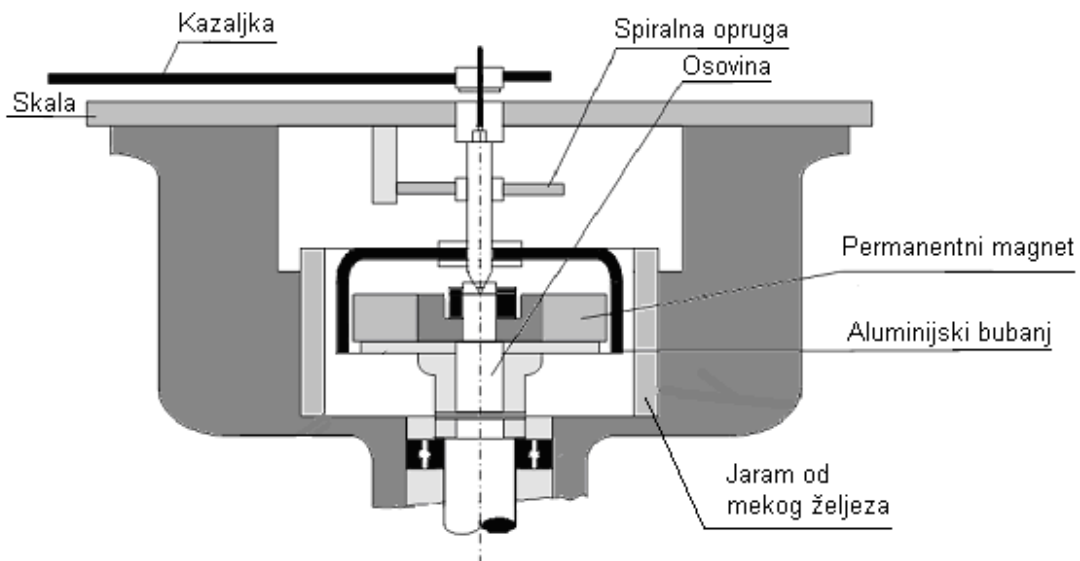
Prednost analognih metoda u odnosu na digitalne metode je robusnost, jednostavnost mjerenja na neposredan način, zbog čega još danas imaju široku primjenu u mjernoj tehnici i upravljanju. Prednost digitalne metode nad analognom metodom je univerzalnost. Primjena analognih pretvornika ograničena je za predviđeni broj okretaja i veličinu elektromotora, dok se digitalnim pretvornikom, u teoriji, mogu mjeriti broj okretaja od nula pa do nekoliko desetaka tisuća okretaja različitih elektromotora. U nastavku su pojašnjene neke od analognih metoda koje se još i dan danas široko koriste u tehnici i načini mjerenja signala digitalnim metodama. Nadalje, građa analognih mjernih članova u većini slučajeva se sastoji od jednog pomičnog dijela koji se nalazi na osovini i nepomičnog dijela, te zbog dodatne inercije mogu ometati rad slabijih motora. Digitalna metoda može biti kontaktna ili beskontaktna. Beskontaktnom metodom eliminira se pogreška dodatnog opterećenja elektromotora.

4.1. Analoge metode mjerenja brzine vrtnje

Tahogenerator je mjerni uređaj koji se koristi u mjernoj tehnici. Pretvara kutnu brzinu osovine, na koju je montiran, u mjerljivi električni signal. Najčešće se koriste u sustavima kod kojih je potreban nadzor i regulacija. Vrte se u praznom hodu i nisu opterećeni otpornim teretom, u suštini rade kako generatori, samo se razlikuju u namjeni. Postoji nekoliko vrsta tahogeneratorsa, a u nastavku je pojašnjeno nekoliko načina mjerenja analognim metodama.

4.1.1. Indukcijski tahogenerator

Svrstava se u najjednostavnije oblike tahogeneratorsa. Osnovna konstrukcija sastoji se od permanentnog magneta i svitka. Napon koji je razmjernan brzini vrtnje generira se kao posljedica vrtnje magneta ili svitka.



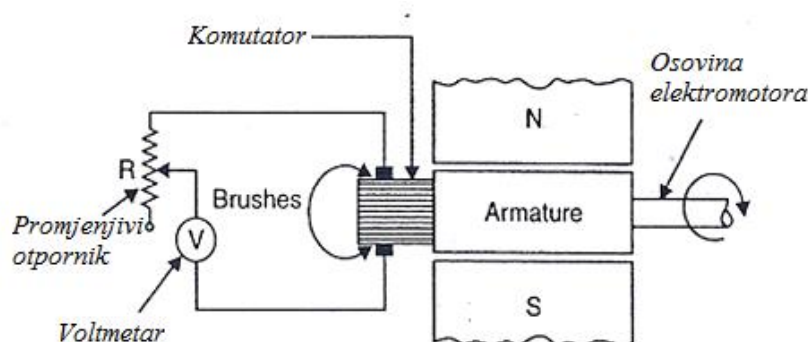
Slika 1. Indukcijski tahogenerator[4]

Na glavnoj osovini montiran je permanentni magnet. Na drugoj osovini nalazi se aluminijski bubanj, spiralna opruga i kazaljka. Zbog magnetske sile permanentnog magneta, bubanj koji se nalazi na drugoj osovini nastoji se vrtjeti, ali zbog spiralne opruge koja je povezana na drugu osovinu opire se momentu zakreta. Osovina s kazaljkom zakreće se i prikazuje brzinu vrtnje na prethodno izbaždarenoj skali koja prikazuje broj okretaja i odgovara određenom zakretu osovine. Veći broj okretaja na glavnoj osovini, odgovara većem zakretu kazaljke. Namjena ovog uređaja je isključivo indikacija broja okretaja.

4.1.2. Istosmjerni tahogenerator

Radi na principu istosmjernog generatora, kutna brzina osovine elektromotora inducira napon u svitku. Sastoje se od komutatora ili kolektora, četkica, uzbudnog i armaturnog namota. Postoje dvije izvedbe istosmjernih tahogeneratorskih uređaja, razlikuju se u načinu izvedbe uzbuđenja. Uzbuđenje može biti izvedeno pomoću permanentnog magneta ili nezavisnom uzbuđenjem. Vrijednost napona proporcionalna je brzini vrtnje motora, a polaritet napona generiran je u odnosu na smjer vrtnje elektromotora. Najveća moguća točnost istosmjernih tahogeneratorskih uređaja je oko 0,25%, no obično se ta vrijednost kreće oko 2%.

Mjerno područje istosmjernog tahometra obuhvaća 6 000 okr/min. Njegova se linearnost obično definira pri 3000 okr/min i za pretvornike najbolje vrste jest 0,01%. Istosmjerni tahometri obično su baždareni pri otporu od 250Ω.[3]



Slika 2. Istosmjerni tahogenerator s permanentnom uzbuđenjem[5]

Na točnost DC tahometra utječe nekoliko faktora. Pad napona na četkicama iznosi $\Delta U_{\zeta} = 2V$ za ugljene četkice, a za metalo-grafitne četkice $\Delta U_{\zeta} = 0.6V$, te imaju bolju komutaciju od grafitnih, no ta vrijednost je uvijek konstantna i može se uzeti u obzir kod mjerenja. Četkice uzrokuju dodatno trenje i vibracije na komutatoru tahogeneratora, te se stvara dodatni moment mjenom elektromotoru i smetnje. Problem kod točnosti uzrokuje temperatura okoline te se mora kompenzirati magnetski osjetljivim shunt otpornikom. Posljedica porasta temperature je promjena otpora armaturnog namota, što utječe na magnetski tok Φ . Najveći nedostatak mjerenja tahogeneratorom su viši harmonici koji uzrokuju šum ili valovitost napona, na višim brzinama je to osobito vidljivo zbog vibracija četkica. Utjecaj viših harmonika moguće je suzbiti RC filterima, ali oni znatno utječu na brzinu odziva sustava. U današnje vrijeme nastoji se smanjiti moment inercije armature tahogeneratora koja utječe na ubrzanje elektromotora, zbog toga se koristi konstrukcija tahogeneratora sa šupljim rotorom.

Jednadžba istosmjernog motora kao generatora na mreži glasi:

$$U = E - I_a \cdot R_a - \Delta U_{\zeta} \quad [V] \quad (4-1)$$

Gdje su:

I_a - struja armature [A]

R_a - otpor armaturnog namota [Ω]

ΔU_{ζ} - pad napona na četkicama [V]

U idealnom slučaju, ako otpor voltmetra teži u beskonačnost, $R_V \rightarrow \infty$, što znači da je $R_V \gg R_a$, tada je struja armature jednaka nuli, $I_a = 0$, što znači da treba odabrati voltmetar s čim većim unutarnjim otporom zbog točnijeg mjerenja. Pad napona na četkicama ΔU_{ζ} se može zanemariti.

Vrtnjom rotora u magnetskom polju, napon koji će se inducirati jednak je:

$$E = c_e \cdot \Phi_u \cdot n \quad [V] \quad (4-2)$$

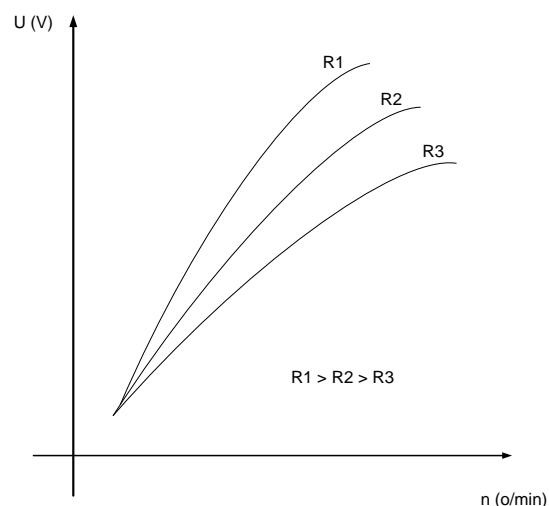
Pri čemu su:

- c_e – konstanta konstruktivne izvedbe
- Φ_u - magnetski tok uzbude po polu [Wb]
- n - brzina vrtnje [okr/min]
- E - induciran napon u motoru [V]
- U – napon [V]

Vrijedi da je: $k_e = c \cdot \Phi_u = konst.$, stoga je: $E = k_e \cdot n$, u praznom hodu $E \approx U$, napon približno je jednak induciranom naponu, ako se zanemari pad napona na četkicama, dobije se izraz:

$$E = U = k_e \cdot n \quad [V] \quad (4-3)$$

Odnosno da je napon na stezaljkama tahogeneratora u praznom hodu proporcionalan brzini i magnetskom toku. Promjenom otpora R mijenja se nagib karakteristike ovisnosti induciranog napona o broju okretaja. Odabirom većeg otpornika R nagib karakteristike se povećava, smanjenjem otpornika R nagib karakteristike se smanjuje.



Slika 3. Karakteristika ovisnosti induciranog napona o broju okretaja[4]

4.1.3. Izmjenični tahogenerator

Izmjenični tahogenerator radi na sličnom principu kao i istosmjerni tahogenerator, no za razliku od istosmjernih tahogenerators, nemaju četkice i komutator koji bi stvarao dodatne smetnje mehaničkog opterećenja i vibracija. Rotor AC tahogenerators izveden je permanentnim magnetom. Razlikujemo sinkrone i asinkrone tahogeneratore.

4.1.3.1. Sinkroni tahogenerator

Mogu biti izvedeni u obliku jednofaznog ili trofaznog tipa sa permanentnim magnetom na rotoru. Prednost nad istosmjernim tahogeneratorima je u tome što nemaju četkice i komutator, čime se izbjegava mehaničko trenje i iskrenje. Imaju široku namjenu u mjerenju brzine, no vrlo se rijetko koriste kod regulacije. Veliki moment inercije rotora ograničava uporabu kod mjerenja brzine manjih i srednjih elektromotora. Brzina se može mjeriti frekvencijom ili naponom, a inducirani napon na stezaljkama jednak je:

$$E = 2.22 \cdot f \cdot N \cdot \Phi \quad [V] \quad (4-4)$$

Pri čemu su:

N - broj zavoja

Φ - magnetski tok [Wb]

f - frekvencija [Hz]

p - broj pari polova

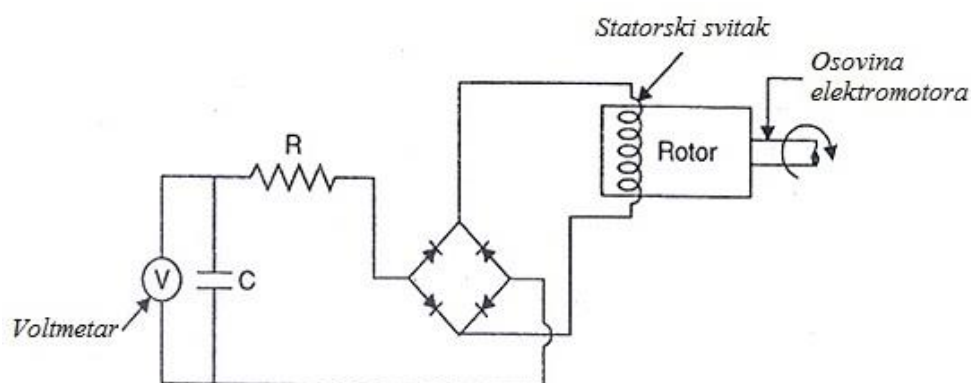
E - inducirani napon [V]

Magnetski tok $\Phi = konst.$ i broj zavoja $N = konst.$ su konstantni. Ako se uvrsti izraz za brzinu:

$$n = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ [okr/min]} \quad (4-5)$$

Dobije se jednadžba induciranog napona, ovisna o broju okretaja i magnetskom toku:

$$E = \frac{2.22}{60} \cdot n \cdot p \cdot N \cdot \phi \text{ [V]} \quad (4-6)$$

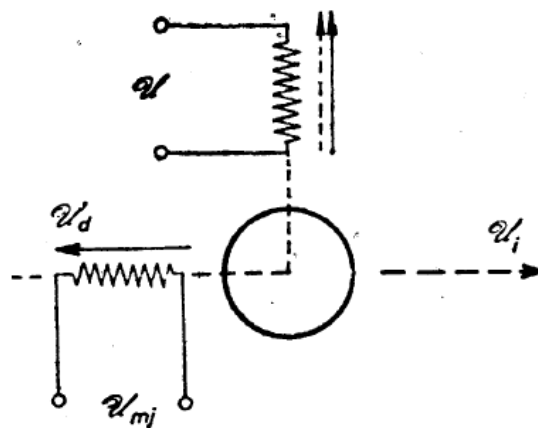


Slika 4. Izmjenični sinkroni tahogenerator u izvedbi jednofaznog napona[5]

Izmjenični napon se ispravlja Graetzovim spojem, a ispravljeni napon mjeri se kao istosmjerni napon. Kondenzator koji se dodaje paralelno Graetz-ovom spoju kao filter zbog uklanjanja valovitosti napona s ciljem stabiliziranja naponske karakteristike. Time se usporava odziv mjernog sustav zbog vremenske konstante kondenzatora. Ovakvim načinom mjerenja okretaja ne može se detektirati smjer vrtnje jer je polaritet napona uvijek jednak. Nadalje, koriste se kod sustava gdje nije potrebno snimanje prijelaznih pojava i gdje proces ne zahtijeva mjerenje i prikaz brzine u realnom vremenu.

4.1.3.2. Asinkroni tahogenerator

Razlikuju se dvije vrste asinkronih tahogeneratorsa, postoje tahogeneratori izmjenične struje i dvofazni tahogenerator. Tahogenerator izmjenične struje gradi se bez kolektora, s rotorom od permanentnog magneta i s namotom na statoru. Proporcionalno brzini vrtnje mijenja se i visina induciranog napona i njegova frekvencija, što je dosta neprikladno kad su brzine sasvim male. Točnost koja se postiže kod ovih izvedbi doseže do 0,1 %.[6] Dvofazni asinkroni tahogenerator je konstrukcijski izveden s dva namotaja na statoru koji su međusobno pomaknuti 90° . Prvi namot je uzbudni, a drugi je generatorski ili mjerni. Na generatorski namot je priključen konstantan izmjenični napon U , a na mjernom svitku mjeri se napon U_{mj} proporcionalan brzini vrtnje n . Armatura rotora može biti izvedena kaveznim ili tankim bakrenim cilindrom. Prednost ovakvog načina mjerenja je velika točnost do 0.7%, jer nemaju smetnje zbog viših harmonika. Maksimalni broj okretaja koji mogu mjeriti je do 6 000 okr/min. Često se izrađuju u kombinaciji s servomotorom koji im omogućava više funkcija. Zbog linearnosti mjerene brzine poželjno je da tahogenerator ima sinkronu brzinu veću od radne brzine mjerenog elektromotora.



Slika 5. Dvofazni izmjenični tahogenerator[6]

Izmjenični napon koji napaja uzbudni namot stvara pulsirajuće magnetsko polje koje rastavljamo na direktno i inverzno okretno magnetsko polje. Okretna magnetska polja induciraju napone E_d i E_i te je njihov umnožak jednak:

$$U = E_d \cdot E_i \quad [V] \quad (4-7)$$

Oba polja dolaze u os druge faze nakon zakreta od $\pi/2$, a napon u generatorskom svitku iznosi:

$$U_{mj} = j \cdot a \cdot E_d - j \cdot a \cdot E_i \quad (4-8)$$

Uz omjer efektivnog broja zavoja mjerne faze i faze napajanja:

$$a = \frac{N_{mj} \cdot f_{nmj}}{N \cdot f_n} \quad (4-9)$$

Ako se uzme dovoljno velik otpor rotora, tako da je njegova rasipna reaktancija zanemariva, za rotorsku impedanciju direktnog, odnosno inverznog sustava vrijedi da su:

$$Z_d = R_2/s \quad (4-10)$$

$$Z_i = R_2/(2 - s)$$

Pri čemu je: s – klizanje izmjeničnog tahogeneratorskog

Z_d – rotorska impedancija za direktni sistem [Ω]

Z_i – rotorska impedancija za inverzni sistem [Ω]

R_2 –otpor rotora [Ω]

Tada se mogu izračunati doprinosi obiju komponenti inducirano napona:

$$E_d = \frac{I}{2} \cdot R_2 / s \quad (4-11)$$

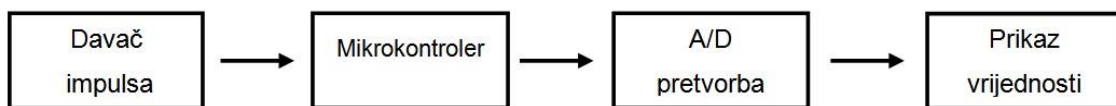
$$E_i = \frac{I}{2} \cdot R_2 / (2 - s)$$

Uvrštavanjem inducirane direktne i inverzne komponente napona u formulu dobije se omjer napona na generatorskom namotu i napona priključenog na uzbudni namot. Sređena jednačina glasi[6]:

$$U_{mj} = U \cdot j(1 - s) \quad [V] \quad (4-12)$$

4.2. Digitalne metode mjerenja brzine vrtnje

Digitalna metoda ima široku primjenu u elektromotornim pogonima, no analogni tahogeneratori se češće primjenu u regulaciji. Međutim, tahogeneratori nisu uvijek idealno rješenje, oni dodatno opterećuju motor vlastitom inercijom, te zauzima određeni prostor i nisu uvijek pogodni kod montaže na male elektromotore, zbog tih razloga je bolje koristiti digitalne metode. Prednosti digitalnih nad analognim instrumentima su: uže granice pogreške, veća točnost i prilagodljivost procesu, te nemaju fiksni mjerni opseg naspram analognih. Kod pretvaranja rotacije u broj okretaja koriste impulsne metode. Pretvaranje impulsa u broj okretaja može se realizirati na nekoliko načina, a bazira se na frekventno-digitalnoj pretvorbi. Pretvorba impulsa u broj okretaja izvršava se u mikrokontroleru, odnosno programski.



Slika 6. Blok shema rasporeda elemenata mjernih članova

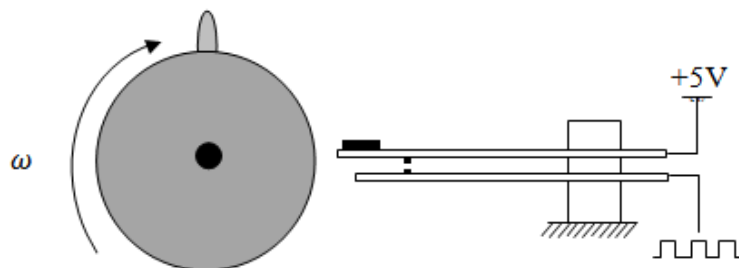
Davač impulsa ili impulsni generator, generira informaciju ovisno o stanju procesa, a signal je prikazan u obliku pravokutnih impulsa. Analogni signal pretvara se u digitalni, 0V je logička 0, a 5V je logička 1 koje mikrokontroler registrira kao stanje ulaza. Na osnovu toga izvršavaju se računске operacije čiji rezultat se prikazuje u zadanoj mjernoj jedinici.

4.2.1. Impulsni generator

Impulsni generator ili davač impulsa u kontaktu je sa procesom, a najširu primjenu kod digitalnog mjerenja imaju inkrementalni enkoderni. U teoriji rade na principu idealne on/off sklopke, samo što se u praksi ostvaruju vrlo velike brzine promjene stanja. Zahtjevi kod odabira davača impulsa su brzi odziv na mehanički podražaj i osjetljivost, te uvelike utječu na ishod mjerenja. Inkrementalni enkoderni ili davači impulsa realizirani su na nekoliko načina, te mogu biti: fotoelektrični, magnetski i mehanički.

4.2.1.1. Mehanički davač impulsa

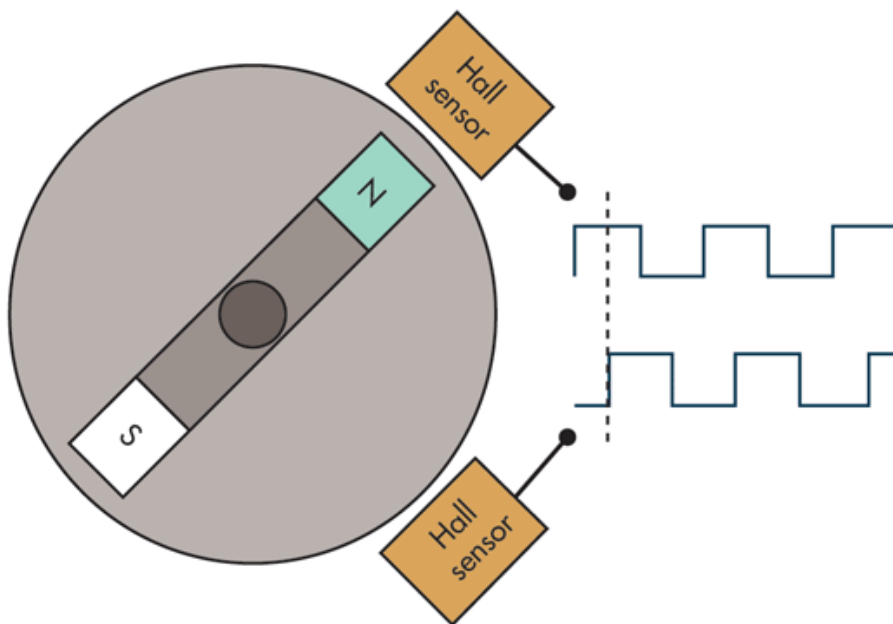
Mehanički davač impulsa sastoji se od dva kontakta od kojih jedan miruje, a drugi se pomiče. Prilikom vrtanje, izdanak na osovini od elektromotora na kojem se mjeri broj okretaja, primiče radni kontakt mirnom, čime se generira signal ili impuls.



Slika 7. Mehanički davač impulsa

4.2.1.2. Magnetski davač impulsa

Radi na principu Hallovoeg efekta, a za generiranje impulsa koristi se tzv. Hallov generator. Hallov generator koristi se za jakosti magnetskog polja reda od 10^{-5} A/m do 10^5 A/m. Hallov pretvornik sastavljen je od pločice kroz koju protječe struja i koja se nalazi u magnetskom polju. Na krajevima pločice inducira se Hallov napon koji je razmjernan struji i magnetskom polju. Osim mjernih sposobnosti, moguće je generirati i impuls zbog čega se koristi u digitalnoj i analognoj signalnoj tehnici.

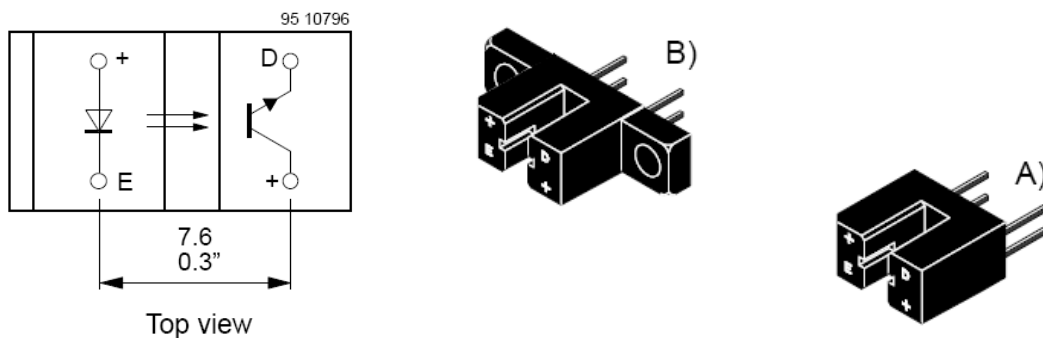


Slika 8. Inkrementalni enkoder s dva Hallova pretvarača (generatora)[7]

4.2.1.3. Fotoelektrični davač impulsa – IR senzor

Optički elementi danas imaju široku primjenu u grani elektronike nazvanoj opto-elektronika, a rade na principu fotoelektričnog efekta. Fotoelektrični efekt je pojava izbijanja elektrona iz metala pod djelovanjem elektromagnetskog zračenja.[8]

Fotoelektrični senzori sastoje se od izvora ili emitera koji konstantno generira pravocrtni svjetlosni snop i osjetila ili detektora svjetlosnog snopa. Emiter može biti izveden uz pomoć običnih LED dioda ili IR dioda. Svjetlosni snop može biti u vidljivom ili nevidljivom području svjetlosnog spektra, koje se preko optičkih leća usmjeravaju na detektor. Detektor je izrađen od tanke metalne folije koja generira električni signal i osnovne od poluvodiča koji je nanesen na metalnu foliju. Kada je detektor ozračen, metalna folija nabija se pozitivno, a poluvodič negativno, stvara se razlika potencijala. Senzor može biti izrađen u obliku foto diode u svrhu detekcije prisutnosti ili foto tranzistora u svrhu svjetlosnih prekidača.



Slika 9. IR senzor TCST2103 viljuškastog oblika[9]

5. Digitalni mjerač broja okretaja

Mjerač broja okretaja sastoji se od tri osnovna dijela: mjernog osjetila, obrade signala, prikaza mjerene veličine. Mjerno osjetilo ili senzor „osjeća“ mjerenu veličinu, te ovisno o konstrukciji daje električnu informaciju, u neposrednom je dodiru s procesom. U suštini svrha senzora je pretvorba neelektričnih veličina u električne impulse. Kod mjerača broja okretaja korišten je infra-crveni senzor u kombinaciji s fotoelektričnom tranzistorskom sklopom.

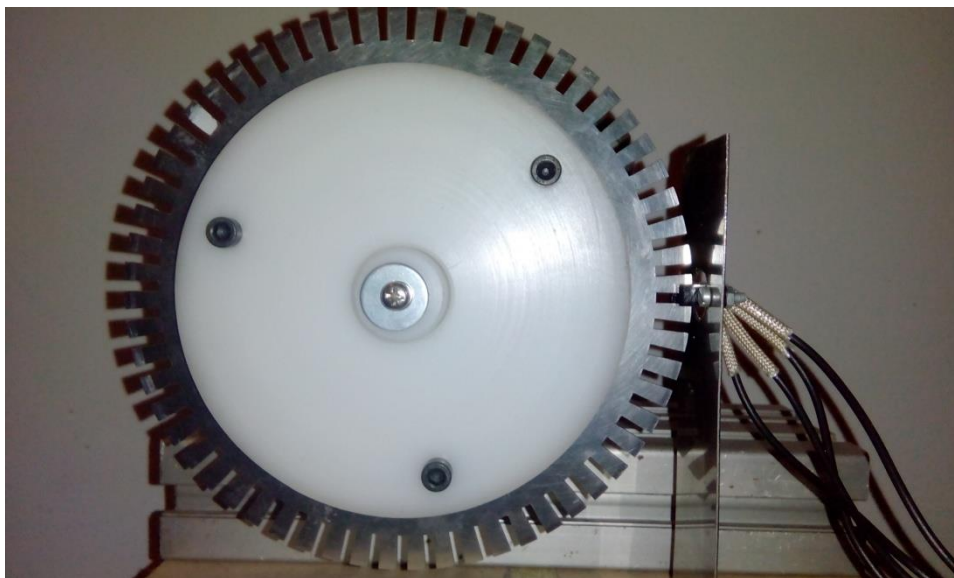
Obrada signala vrši se u mikrokontroleru koji mora očitati električnu veličinu sa senzora i ovisno o vremenu i vrijednosti električne veličine izvršiti proračun broja okretaja. Pretvorba električnih signala u broj okretaja vrši se P digitalnom metodom. Zbog velike brzina mikrokontrolera ATmega328, odnosno zbog velikog takta procesora, frekvencija kvarcnog oscilatora iznosi $f_{OSC} = 16MHz$, mikrokontroler može registrirati svaki uzlazni ili silazni brid pravokutnih impulsa kod brzina do nekoliko tisuća okretaja. Mjeri se trajanje periode digitalnog signala korištenjem pulseIn funkcije i pretvara se u broj okretaja digitalnom P metodom. Mikrokontroler upravlja radom D/A pretvornika i LCD zaslona, te vrši pretvorbu mjerene veličine u konstantnu električnu veličinu. Varijabla broja okretaja može se dodatno pretvarati i obrađivati za potrebe prijenosa. Prikaz proračunate mjerene veličine služi za predstavljanje informacije korisniku, rezultat obrade prikazuje se numerički na LCD zaslonu.

Program digitalnog mjerača broja okretaja sadrži izbornik i tri tipkala za navigaciju. Dodane su funkcije: prikaz broja okretaja, vrijeme jedne revolucije, naponski ili strujni izlaz za kontrolu D/A i U/I pretvornika. Također, može se da se unijeti željena nazivna brzina, u slučaju ako korisnik želi podesiti analogni izlaz i mjerna jedinica u kojoj će se iznos broja okretaja prikazivati, tako da korisnik može odabrati između: okretaja u sekundi (okr/s), okretaja u minuti (okr/min), metara u sekundi (m/s) i metara u minuti (m/min).

5.1. Mjerno osjetilo - IR senzor

Mjerenje se odvija tako da se na osovinu elektromotora montira nazubljeni disk. Senzor se montira na obod diska u smjeru pravca promjera diska. IR dioda označena kao emiter generira konstantni svjetlosni snop određene valne duljine. Svjetlosni signal usmjeren je na foto tranzistor (detektor) i prilikom vrtnje prolazi kroz utore ili se zaustavlja na zubima diska, time se dobiva on/off način rada, tzv. tranzistorsku sklopku. Detektor, registrira svjetlosni signal i pretvara ga u impuls. Impuls mora imati dvije naponske razine koje mikrokontroler može jasno razlikovati i čitati kao logičke nule i jedinice. Točnost uvelike ovisi o dinamičkim svojstvima tranzistora, odnosno sposobnost odziva na promjenu ulaznih parametara.

Na disku je ukupno 60 zubi i utora. Svaki pomak osovine rezultira pomakom diska, može se vrlo lako registrirati promjenu između zuba i utora, te se na temelju toga generira niz od pravokutnih impulsa. U jednom okretu proizvede se 60 pravokutnih perioda ili 120 promjena stanja. Razmak između zubi i širina utora mora uvijek biti konstantan i pravilno raspoređen po obodu diska.



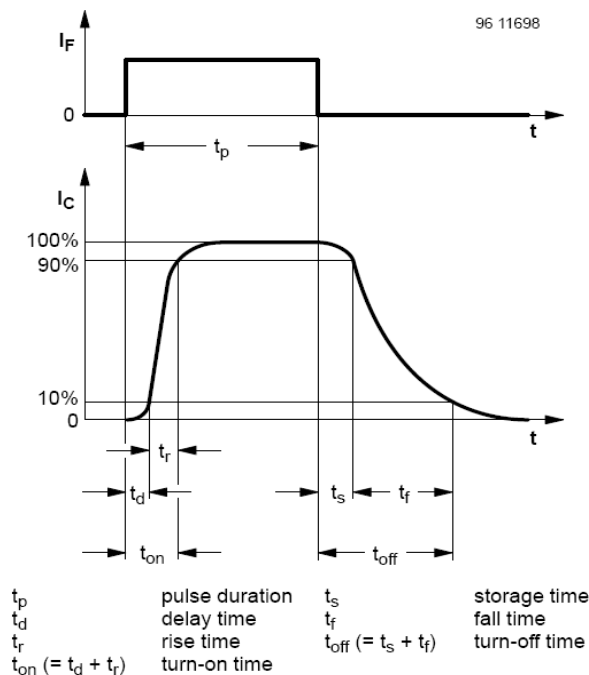
Slika 10. Montaža nazubljenog diska i senzora na osovinu motora

5.1.1. Karakteristike IR senzora

Osnovne karakteristike IR senzora su: napajanje, brzina odziva, tip kućišta i dimenzije, normalni uvjeti rada, disipacija snage na emiteru i detektoru, domet, itd. Foto senzori imaju veliku brzinu okidanja, do nekoliko desetaka mikro sekundi (u nekim slučajevima nano sekundi). Nedostatak foto senzora je što su detektori podložni smetnjama okoline, svjetlost okoline i prašina mogu dovesti do pogrešnog očitavanja senzora. Na točnost senzora utječe odziv, odnosno brzina uključanja i isključenja, pravilno montiranje u skladu s propisanim uputama proizvođača. Vremena t_{ON} i t_{OFF} (tablica 1.) može se interpretirati kao kašnjenje signala ili brzina odziva. Kod velikih brzina okretaja gdje su vrijednosti perioda signala nekoliko stotina mikrosekundi, ta vremena utječu na ukupan ishod mjerenja i kvalitetu mjernih pretvornika.

Karakteristike uključanja i isključenja				
Turn-on time	$I_c = 2\text{mA}, V_s = 5\text{V}, R_L = 100\Omega$	t_{ON}	10	μs
Turn-off time	$I_c = 2\text{mA}, V_s = 5\text{V}, R_L = 100\Omega$	t_{OFF}	8	μs

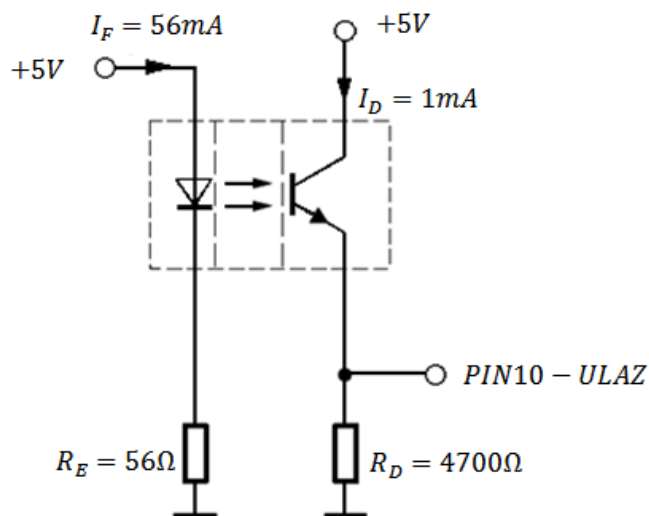
Tablica 1. Karakteristike uključanja i isključenja proizvođača Vishay[9]



Slika 11. Vremenska karakteristika uključanja i isključenja[9]

5.1.2 Ulazni sklop mjerača broja okretaja

Tranzistorska sklopka ili ulazni sklop digitalnog mjerača broja okretaja sastoji se od fotoelektričnog senzora i otpornika, a može biti izvedena pull-up ili pull-down otpornikom. Izbor prevelikog iznosa otpornika može ograničiti brzinu odziva promjene vrijednosti napona na ulazu mikrokontrolera, što zbog RC kruga na Arduino pločici rezultira velikom vremenskom konstantom. Prema specifikacijama od proizvođača Vishay za senzor TCST 2103 preporučeno je korištenje senzora kao tranzistorske sklopke u pull-down spoju otpornika. Da bi mikrokontroler uspješno očitao stanje pina kao HIGH mora se na ulazu mikrokontrolera osigurati napon veći ili jednak 3V (ako sklop radi na 5V) ili stanje LOW čija naponska razina mora biti niža ili jednaka 1V. Vrijednosti koje se nalaze između navedenih napona želi se izbjeći jer ih mikrokontroler može pogrešno očitati. Da bi se postigla željena dinamička svojstva sklopa i osigurali odgovarajuće napajanje za pojedine elemente ulaznog kruga moraju se odrediti odgovarajući iznosi otpora Ohmovim zakonom.



Slika 12. Shema ulaznog sklopa mjerača broja okretaja

5.2. Mikrokontroler – obrada signala

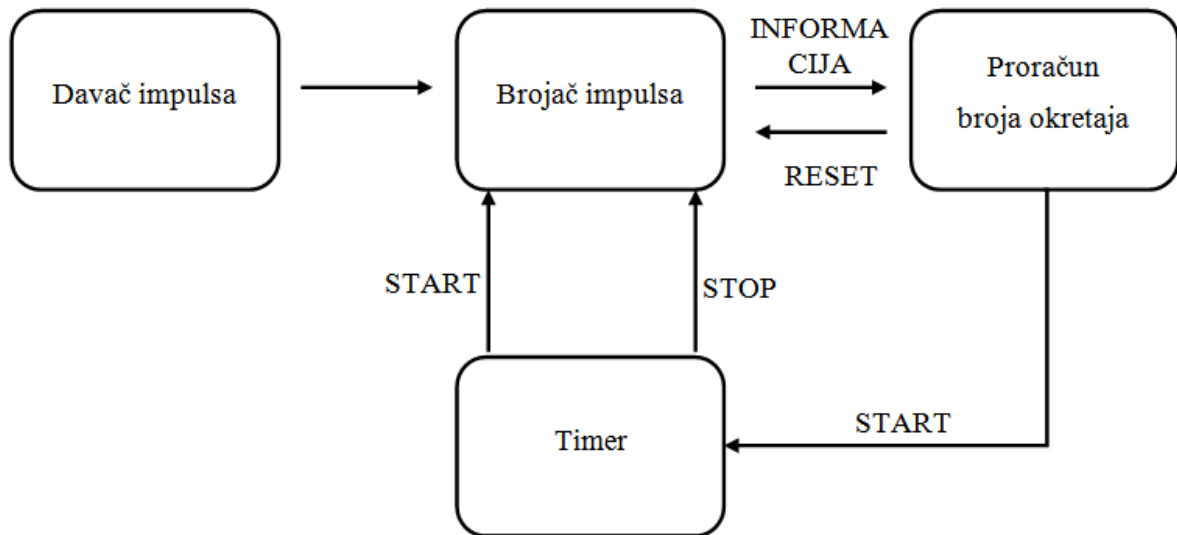
Prilikom rada mjerača postoje nekoliko vrsta pretvorba mjerene veličine. Senzor montiran na obod diska pretvara zakret u niz nula i jedinica koji su predstavljeni u obliku naponskih razina 0 ili 5V. Niz nula i jedinica koje se izmjenjuju nailaskom utora ili zuba šalju se na ulaz mikrokontrolera koji registrira kada je senzor uključen ili isključen. Mikrokontroler koji se nalazi na Arduino razvojnoj pločici mjeri vrijeme koliko je potrebno da se izmijeni jedan period sastavljen od nule i jedinice. Iz izmjerenih vrijednosti, preračunava se broj okretaja koja se sprema u varijablu cjelobrojnog numeričkog tipa integer, koja se dodatno može prilagoditi za željeni ispis. Niz pravokutnih impulsa pretvara se pomoću: P, T ili P/T digitalne metode u kutnu brzinu. Varijabla broja okretaja skalira se u 12-bitnu vrijednost, te se šalje pomoću I²C komunikacije na digitalno-analogni pretvornik MCP 4725 koji navedenu digitalnu vrijednost transformira u analognu i prikazuje u obliku napona od 0 do 5V. Brzina vrtnje osovine elektromotora od 0 do X okr/min generira napon od 0 do 5V, tako da 0 okr/min odgovara naponu od 0V, a X okr/min naponu od 5V. Nazivna vrijednost broja okretaja elektromotora može se podešavati pomoću izbornika korištenjem tipkala, čime se omogućava da se digitalni tahometar može koristiti za mjerenje elektromotora različitih nazivnih brzina.

5.2.1. Pretvorba impulsa u broj okretaja

Metoda se temelji na frekvencijsko-digitalnoj pretvorbi. Ideja je da se niz od određenog broja impulsa pretvori u broj okretaja. Razlikujemo tri načina mjerenja frekvencijsko-digitalnom pretvorbom: P postupkom, T postupkom, P/T postupkom.

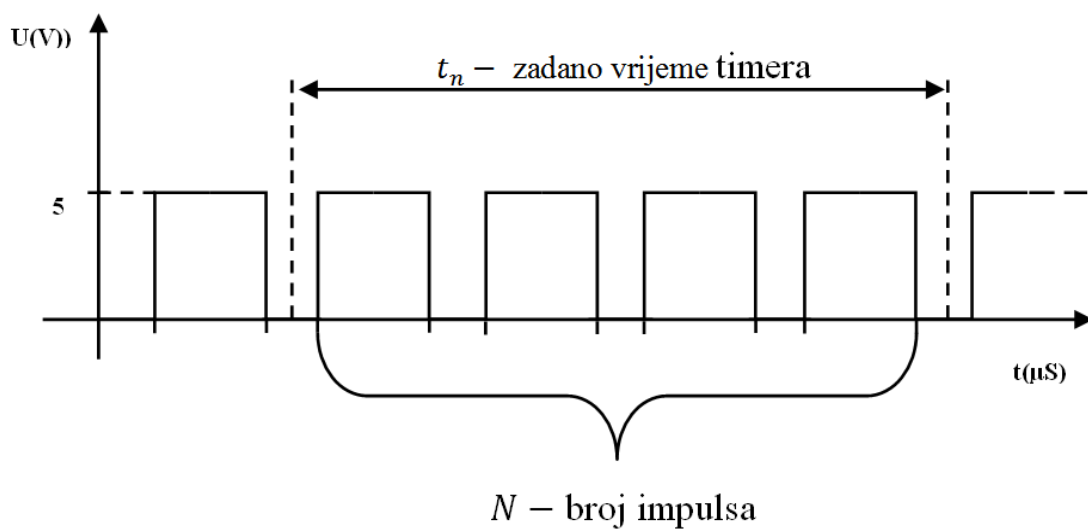
5.2.1.1. P postupak

U osnovi, mjeri se broj impulsa generiranih sa davača impulsa u unaprijed definiranom vremenu. Sastoji se od brojača impulsa i od TON ili TOFF timera.



Slika 13. Primjer mjerenja broja okretaja u P postupku

Davač impulsa generira impulse, timer daje informaciju brojaču impulsa da započne brojanje. Kada istekne unaprijed zadano vrijeme, timer zaustavlja brojač, a informacija se prenosi dalje. Kada je informacija prikazana, resetira se brojač impulsa.



Slika 14. Grafički prikaz f/D pretvorbe P metodom

Uz poznate vrijednosti varijable broja impulsa N , zadanim vremenom $t_n = konst.$, te rezolucijom davača impulsa $P = konst.$ može se izračunati broj okretaja prema izrazu[10]:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{P \cdot t_n} \quad [rad/s] \quad (5-1)$$

Gdje su:

ω – kutna brzina [rad/s]

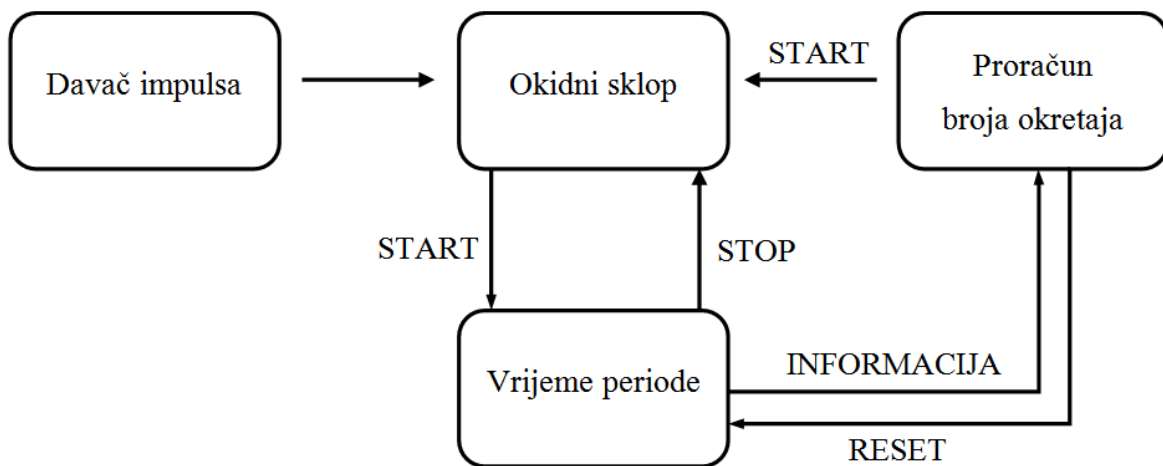
P – rezolucija davača impulsa

N – broj impulsa

t_n – unaprijed definirano vrijeme timera [s]

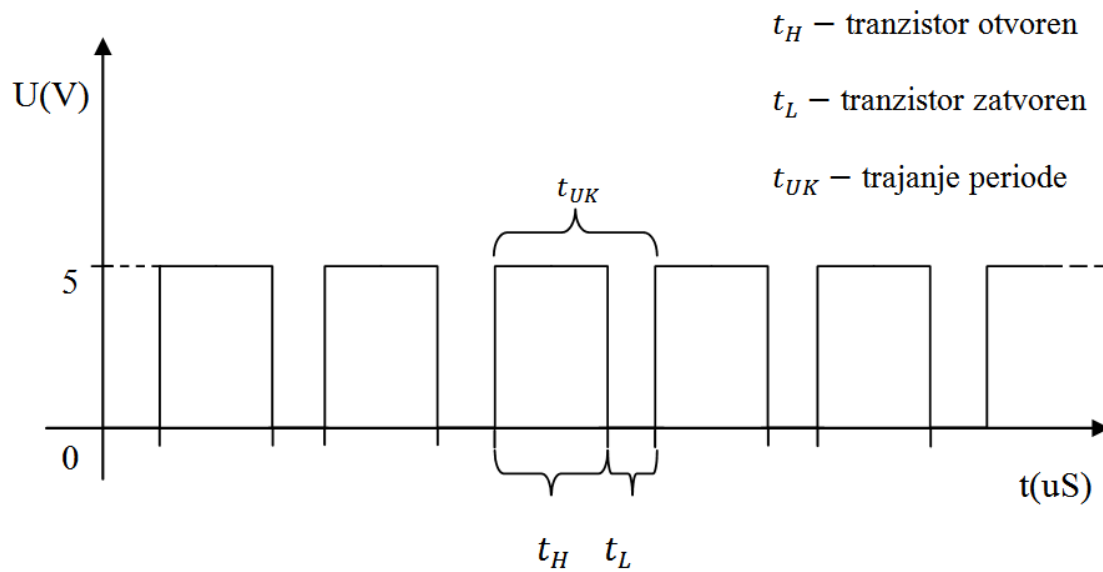
5.2.1.2. T postupak

Za razliku od P postupka gdje se mjeri broj impulsa u vremenu, u T postupku mjeri se vrijeme jedne periode. Jedan zub i jedan utor zajedno tvore jedan period, jer impuls napravi obje promjene stanja. Ideja je mjeriti period od početka uzlaznog ili silaznog brida, ovisno o odabranoj konfiguraciji, pa sve dok se opet na ulazu ne pojavi uzlazni brid (ili silazni). Metoda se primjenjuje kod potreba velike točnosti mjerenja broja okretaja.



Slika 15. Primjer mjerenja broja okretaja u T postupku

Funkcija okidnog sklopa je da reagira na promjenu ulaznog signala, i da nakon što registrira promjenu šalje timeru informaciju kada počne mjeriti vrijeme perioda. Kada se izmjeri vrijeme perioda, informacija se šalje dalje. Nakon računskih operacija nastupa reset timera i opet može početi mjeriti ispočetka.



Slika 16. Grafički prikaz f/D pretvorbe T metodom

Kada se izmjeri trajanje vremena koliko je tranzistor isključen t_L i trajanje koliko je isključen t_H , zbrojem tih vrijednosti dobije se vrijeme jednog perioda: $t_{UK} = t_L + t_H$, uz konstantnu rezoluciju davača impulsa $P = konst.$, dobijemo izraz da je kutna brzina jednaka [10]:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{P \cdot t_{UK}} \quad [rad/s] \quad (5-2)$$

Gdje su:

ω – kutna brzina [rad/s]

P – rezolucija davača impulsa

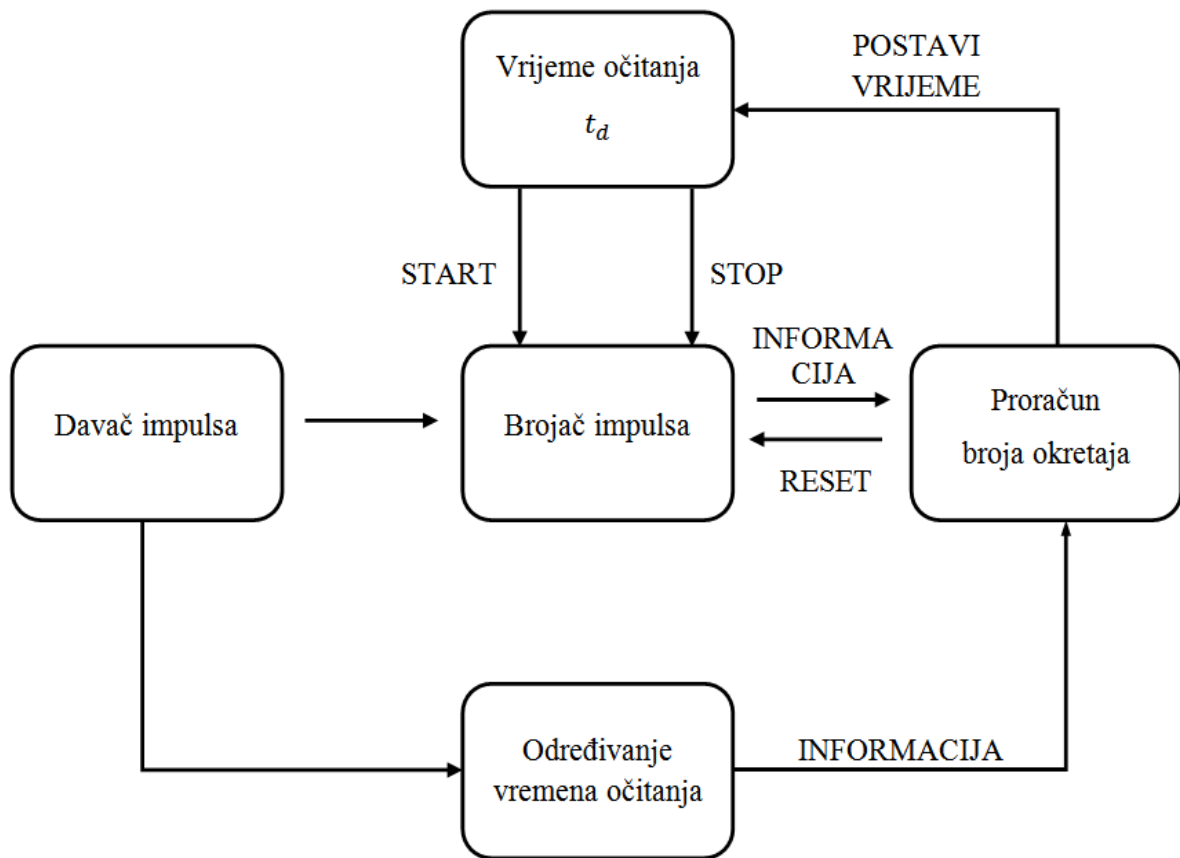
t_H – vrijeme kada je tranzistor uključen [μs]

t_L – vrijeme kada je tranzistor isključen [μs]

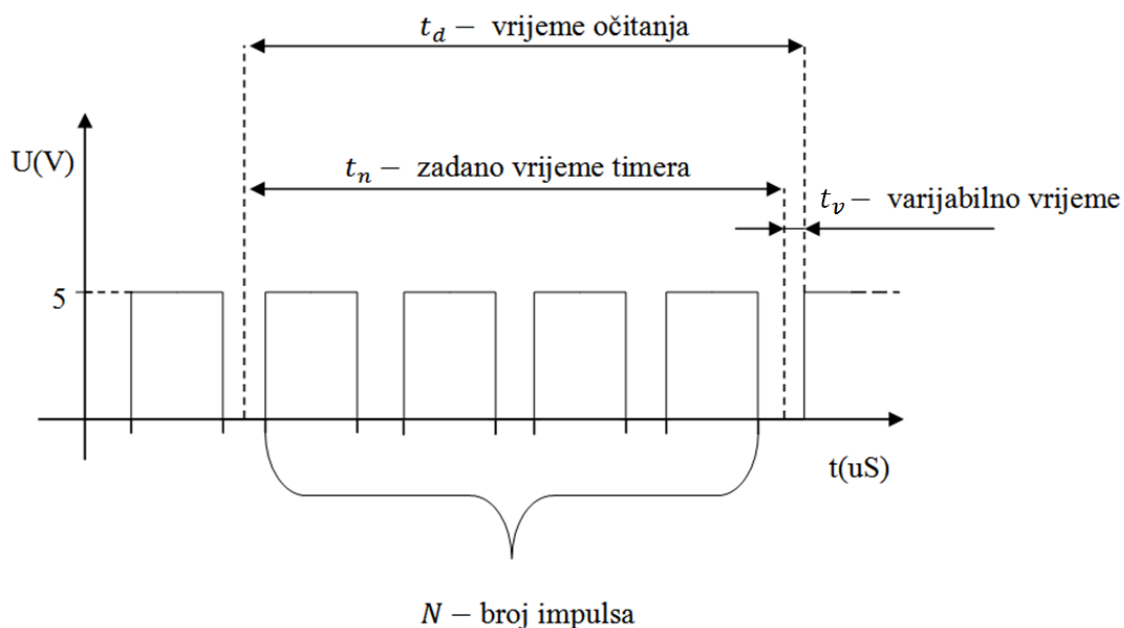
t_{UK} – ukupno trajanje periode impulsa zbroj vremena t_H i t_L [μs]

5.2.1.3. P/T postupak

Metoda koja je nastala kombinacijom P i T metode. Kombinira se postupak brojanja impulsa sa davača impulsa i postupak mjerenja periode. Broje se impulsi N u unaprijed zadanom vremenskom intervalu t_n i mjeri se varijabilno vrijeme t_v , nakon isteka zadanog vremena t_n do pojave prvog rastućeg brida. Ovi vremenski intervali služe za određivanje vremena očitavanja t_d , koje se dobiva zbrojem varijabilnog i konstantnog vremenskog intervala.



Slika 17. Primjer mjerenja broja okretaja u P/T postupku



Slika 18. Grafički prikaz f/D pretvorbe P/T metodom

Iz izmjerenih vrijednosti izraz za izračun kutne brzine, uz rezoluciju davača impulsa koja je konstantna $P = konst.$, jednak je[10]:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{P} \cdot \frac{N}{t_d + t_v} \quad [rad/s] \quad (5-3)$$

Gdje su:

ω – kutna brzina [rad/s]

P – rezolucija davača impulsa

N – broj impulsa

t_n – unaprijed zadano vrijeme timera [μs]

t_d – vrijeme očitavanja [μs]

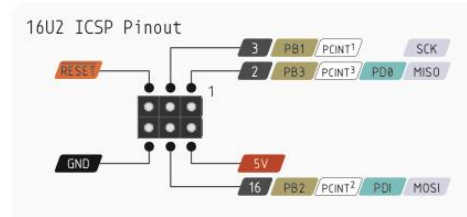
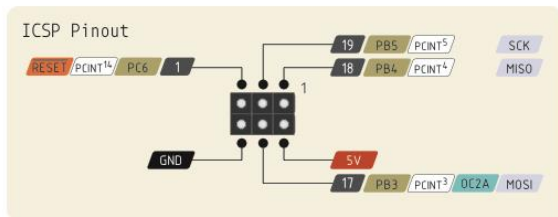
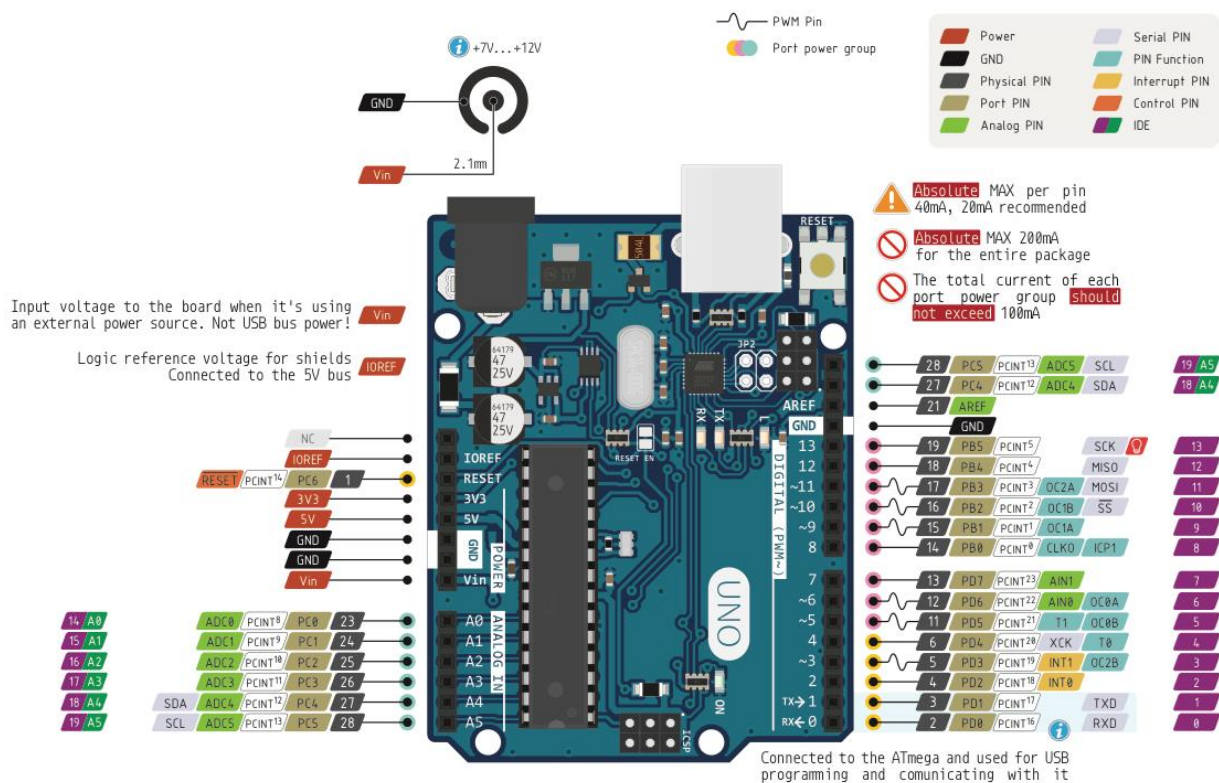
t_v – varijabilni dio vremena [μs]

5.2.2. „Arduino“ razvojno okruženje

Arduino je skup elektroničkih i softverskih komponenti koje se mogu jednostavno povezivati u složenije cjeline s ciljem izrade elektroničkih sklopova. Sadrži 8 bitni mikrokontroler u obliku integriranog sklopa, a najrasprostranjeniji model platforme je ATMEGA 328P. Glavna prednost Arduina je u njegovoj jednostavnosti i širokoj upotrebi, koristi se pojednostavljena inačica C programskog jezika. Budući da je Arduino open-source platforma, izmjene i drukčije verzije Arduina su dozvoljene, korištenje pojedinih biblioteka je dozvoljeno. Svrha biblioteka je da se određenim naredbama olakša korištenje i snalaženje programskim kodom. Jedna od velikih prednosti Arduino platforme je modularnost, čime se omogućava nadogradnja sustava potrebnom senzoričkom, digitalno/analognim pretvornicima, relej shield-ovima za upravljanje, motor shield-ovima, LCD shield-ovima, itd.

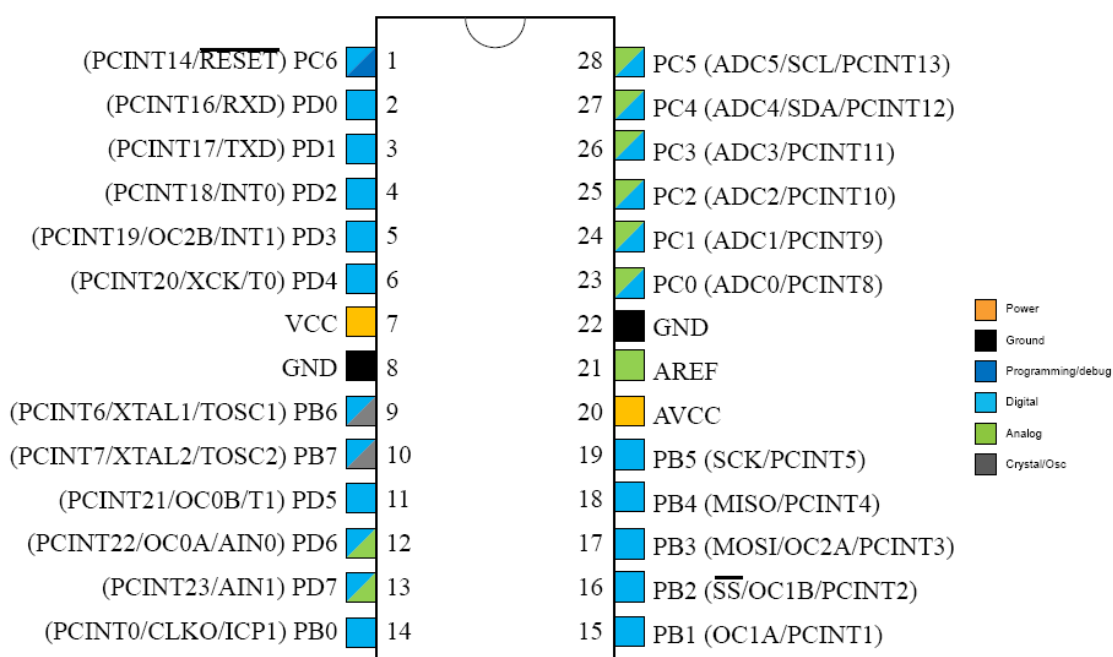
5.2.2.1. *Arduino UNO*

Arduino UNO inačica modela bazirana je na mikrokontroleru ATmega 328P, koji ima 14 digitalnih ulaza i izlaza i 6 analognih ulaza. Digitalni i analogni ulazi/izlazi rade na naponu od 1.8 do 5.5 V,. Radni takt mikrokontrolera podešen je kvarcnim kristalom na 16MHz, no ta se vrijednost može proizvoljno povećavati ili smanjiti od 200kHz do 20Mhz, ukoliko je potreban brži ili sporiji rad mikrokontrolera. Napaja se naponom do 5,5V, a potrošnja snage u normalnim radnim uvjetima približno iznosi 10W, te je pogodan za rad u niskoenergetskim uvjetima. Maksimalna struja I/O pinova je 40mA, a svaki pin ima integrirani unutarnji pull-up otpornik od 20k do 50k Ω koji se mogu programski uključiti ili isključiti.



Slika 19. Arduino Uno razvojna pločica[11]

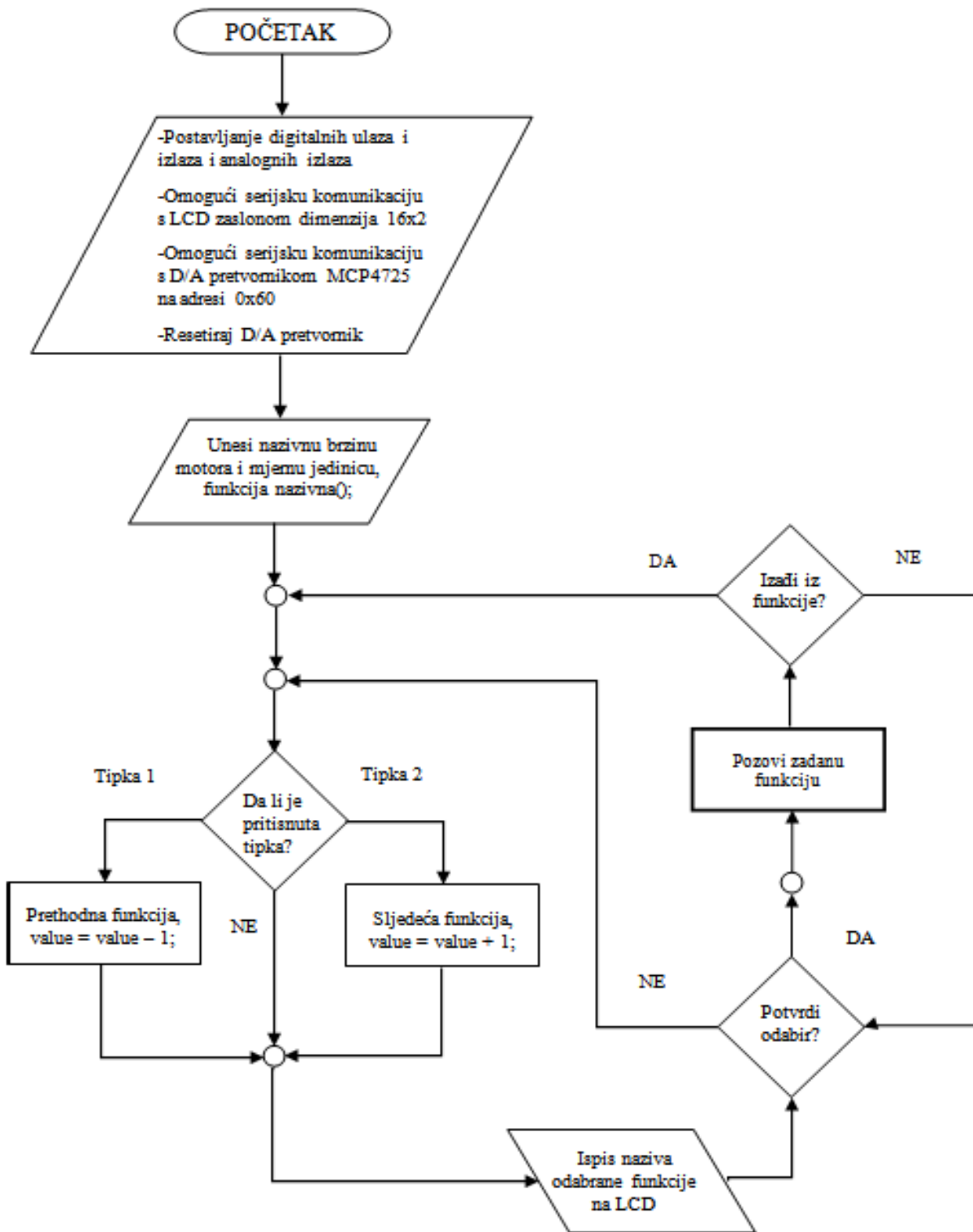
Osim jednostavnih funkcija čitanja i ispisivanja, ulazni i izlazni pinovi imaju dodijeljene specijalne funkcije, kao što su serijska komunikacija ili I²C komunikacija, pulsno-širinska modulacija, prekidi, brojači, timeri, itd. Mikrokontroler ATmega 328 proizvođača Atmel, ima 28 pinova, te svaki pin ima više funkcija pridijeljenih uz njega. Prilikom programiranja ATmega 328 mikrokontrolera, potrebno je znati barem osnovnu podjelu pinova po funkcijama. Osnovne funkcije grupirane su prema portovima B, C i D. Funkcija koja se želi programski dohvatiti, obično se veže uz određeni pin.



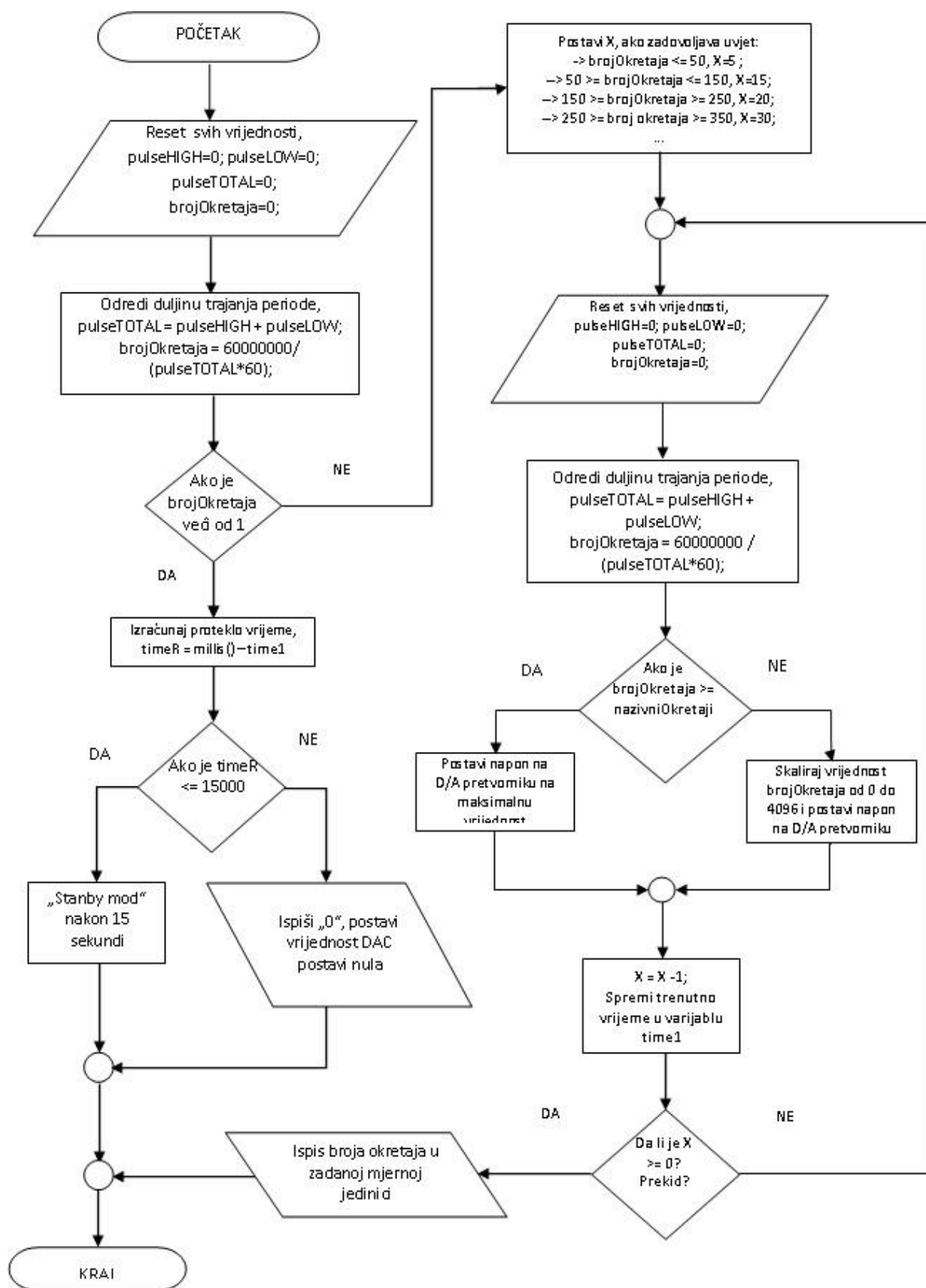
Slika 20. ATmega 328P PDIP pinout[12]

5.2.3. Program mjerača broja okretaja

5.2.3.1. Dijagram toka programa mjerača broja okretaja



Slika 21. Dijagram toka izbornika



Slika 22. Dijagram toka funkcije mjerenja i prikaza broja okretaja

5.3. Analogni izlaz mjerača broja okretaja

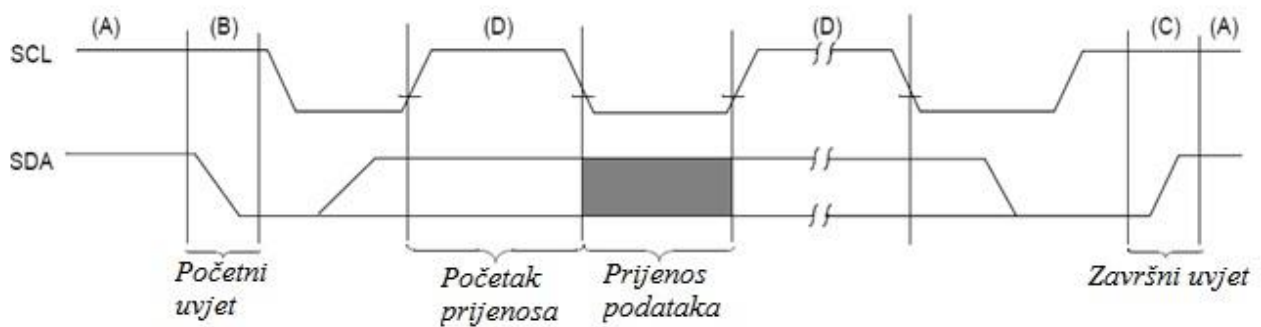
Podaci se mogu prenositi analognim ili digitalnim putem. Analogni signali su vremenski kontinuirani, što znači da se njihova amplituda mijenja u vremenu. U praksi se često primjenjuju u regulaciji kod jednostavnijih sklopova. Digitalni prijenos podataka je vremenski diskretan, šalje se niz od nekoliko bitova putem sabirnica ili nekim drugim medijem (žičanim ili bežičnim). Za digitalnu komunikaciju potrebno je uskladiti prijatelj i predajnik, prijatelj javlja predajniku kada je spreman prihvatiti binarni kod i tada se uspostavlja slanje. Digitalni signali omogućavaju efikasniji prijenos signala na veće udaljenosti i omogućuju djelotvorniju pohranu i obradu podataka. Postoji nekoliko protokola za prijenos podataka između pojedinih komponenti sustava, a najpoznatiji su: RS-232, Firewire, USB, I2C, itd. Podaci se mogu slati serijski ili paralelno. Kod serijskog prijenosa, podatak se šalje bit po bit, a kod paralelnog prijenosa, podaci se šalju po četiri ili osam bitova odjedanput. Serijski prijenos podataka koristi manje ulaznih i izlaznih pinova za komunikaciju i pogodan je za prijenos na veće udaljenosti, paralelnim prijenosom informacija se šalje većom brzinom, ali je potrebno imati veliki broj prijenosnih vodova.

Nakon što se izvrši obrada i prijenos podataka, digitalni signal se pretvara u analogni električni signal digitalno-analognom pretvorbom (D/A pretvorbom). Pretvaraču se šalje niz od nekoliko bitova, koji se mrežom otpornika, pomoću uključivanja i isključivanja naponskih razina digitalnog signala pretvaraju u analognu vrijednost, te se na izlazu iz pretvarača dobiva napon 0-5V koji je po iznosu ovisan o ulaznom signalu iz mikrokontrolera. Zatim se izlazni napon D/A pretvarača dovodi na ulaz naponsko strujnog pretvornika XTR110KP i pretvara u standardni strujni signal od 0 do 20 mA.

5.3.1. D/A pretvorba

5.3.1.1. I²C serijska komunikacija

Mikrokontroler ATmega328P ima postojeću konfiguraciju pinova za serijsku I²C (eng. „Inter-Integrated Circuit“) komunikaciju. Serijski I²C prijenos podataka koristi dvije linije sabirnice, dvije linije su za napajanje i dvije linije, SDA (eng. „Serial Data“) i SCL (eng. „Serial Clock“) za prijenos podataka. Brzina prijenosa podataka varira ovisno o vrsti i načinu na kojem D/A pretvorniku se radi, kod MCP4725 pretvornika može se odabrati jedan od tri moda kojima se postavlja brzina rada: standardni mod– 100kbit/s, brzi mod – 400kbit/s, jako brzi mod– 3,4Mbit/s. Uređaji priključeni na sabirnicu, podijeljeni su u dvije skupine: „Master“ – upravljački član koji adresira priključene „Slave“ uređaje i generira takt prijenosa i „Slave“ – prima ili predaje informacije, ovisno o upravljačkom uređaju. Master i slave uređaj mogu se istodobno konfigurirati kao ulaz i kao izlaz, a brzinu takta (brzinu prijenosa) određuje master uređaj. Da bi uređaji uspješno komunicirali preko serijske sabirnice, potrebno je vremenski uskladiti SDA i SCL linije.



Slika 23. Sekvencija prijenosa podataka serijskom I²C komunikacijom[13]

Prijenos podataka putem sabirnice određen je sekvencom koja se sastoji od četiri djela. Prvi je početni dio koji definira uvijete na sabirnici koji su neophodni za početak prijena podataka. SDA i SCL linije postavljene su u logičku jedinicu i označavaju da je sabirnica slobodna za prijenos podataka. Drugi dio, početak prijena označava primatelj prelaskom SDA linije iz logičke nule u jedinicu, pri čemu javlja da je sabirnica spremna za slanje podataka i šalje se podatak o adresi uređaja na sabirnici s kojim uređaj želi komunicirati, pritom SCL linija ostaje u logičkoj nuli. Nakon toga slijedi slanje podataka SDA linijom tako dugo dok je SCL linija u logičkoj nuli, nakon što isteče određeni broj taktova i opet se postavlja u logičku jedinicu čime se završava slanje podataka. Jedan takt impulsa ekvivalentan je prijenu jednog bita, ako je D/A pretvornik 12 bitni, tada se šalje 12 taktova impulsa. Četvrti dio označava prekid prijena informacija, a ostvaruje se prelaskom podatkovne linije (SDA) iz logičke nule u logičku jedinicu.

5.3.1.2. MCP 4725 – D/A pretvornik

Arduino Uno pločica nema mogućnost generiranja vremenski kontinuiranog signala, jedina raspoloživa opcija je korištenje pulsno-širinske modulacije (PWM), što u ovom slučaju nije pogodno za U/I pretvorbu jer uključuje korištenje pasivnih ili aktivnih RC filtara. Vremenska konstanta RC člana utječe na brzinu odziva sustava, velike brzine odziva postižu se malom RC konstantom, no tada dolazi do pojave izobličenja signala zbog valovitosti. Iz tog razloga kod mjerača broja okretaja koristi se dodatni digitalno-analogni pretvornik MCP4725, čija brzina odziva prema navodima proizvođača Microchip iznosi $6\mu\text{s}$. D/A pretvornik MCP4725 komunicira sa mikrokontrolerom preko I²C serijskog protokola, na ulaz pretvornika šalje se 12-bitna vrijednost broja okretaja koju D/A pretvornik pretvara u konstantni napon od 0 do 5V. Pretvornik je priključen na referentni napon koji mora iznositi što bliže vrijednosti od 5V jer znatno utječe na izmjerenu veličinu. Za 12-bitnu vrijednost, rezolucija se određuje prema izrazu $2^n - 1$, gdje je n jednak maksimalnom broju bitova, tako da rezolucija upisanog podatka iznosi: od minimalne vrijednosti 0 do maksimalne vrijednosti 4095, pri čemu vrijednost 0 odgovara naponu 0V, a vrijednost 4095 odgovara naponu od 5V. Izraz prema kojem se vrijednost napona mijenja ovisno o upisanom podatku, jednak je[13]:

$$V_{OUT} = \frac{(V_{REF} * D_n)}{4096} \quad [V] \quad (5-4)$$

Gdje su: V_{OUT} – izlazni napon[V]

V_{REF} – referentni napon, mora iznositi točno 5V

D_n – vrijednost od 0 do 4095 koja se pretvara u napon od 0 do 5V

Najmanja moguća promjena izlaza za određeni referentni napon ili LSB (eng. „Least Significant Bit“) može se izračunati prema izrazu[13]:

$$LSB = \frac{V_{REF}}{2^n} = \frac{V_{RASPON}}{2^n - 1} \quad [mV] \quad (5-5)$$

Ili je zadana tablicom:

Raspon referentne veličine (V_{REF})	LSB veličina	Uvjet
3.0V	0.73mV	3/4096
5.0V	1.22mV	5/4096

Tablica 2. Iznosi LSB-a u ovisnosti o naponu[13]

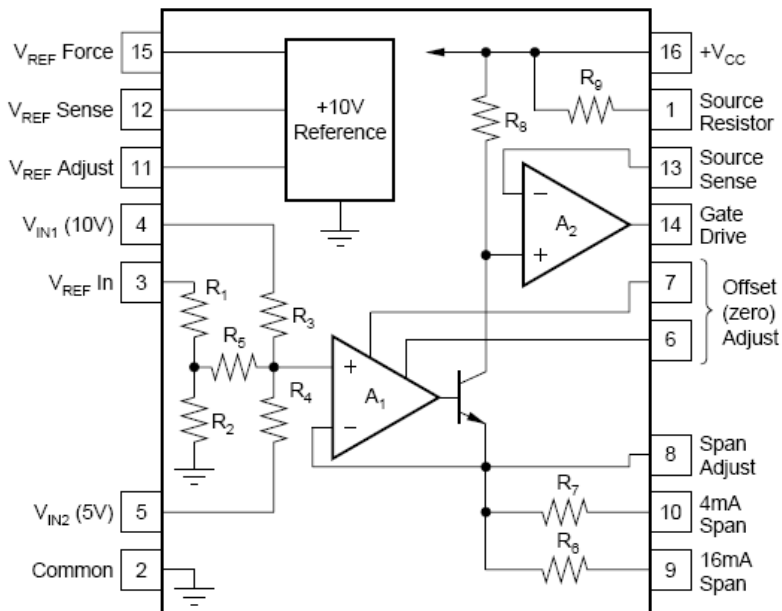
Na primjer, za motor nazivne brzine 2800 okr/min koji se vrti 1400 okr/min, izmjereni broj okretaja se skalira tako da je 0 okr/min ekvivalentno D_n vrijednosti 0, a 2800okr/min ekvivalentno vrijednosti 4095. Tada izmjerena brzina od 1400 okr/min, prema zadanoj skali, odgovara vrijednosti $D_n \approx 2048$. Prema izrazu (16), ako se uzme u obzir da je referentni napon jednak $V_{REF} = 5V$, izlazni napon iz pretvornika koji odgovara vrijednosti 1400 okr/min jednak je $V_{OUT} = \frac{(5 \cdot 2048)}{4096} = 2.5 V$. Kod programiranja mjerača broja okretaja koristi se Adafruit_MCP4725.h biblioteka. U programu se spominju dvije naredbe, za početak I²C komunikacije, naredba `dac.begin(adresa)` i za postavljanje napona `dac.setVoltage(D_n , storeflag)`. „Storeflag“ naredbom omogućava se spremanje vrijednosti u EEPROM (eng. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) memoriju pretvornika za kasnije korištenje. Upisivanje u EEPROM memoriju traje nekoliko desetaka milisekundi što je nepoželjno u slučaju gdje se snimaju prijelazne pojave, također je nepoželjno jer EEPROM memorija je ograničena brojem upisivanja podataka, prema navodima proizvođača.

5.3.2. U/I pretvorba

D/A pretvornik MCP4725 na izlazima generira naponski signal, naponski signali nisu zastupljeni u upravljanju kao strujni jer su podložni smetnjama, iz tog razloga pretvaraju se u strujne signale naponsko-strujnim ili U/I pretvornicima. Da bi se napon dobiven D/A pretvorbom pretvorio u standardni strujni signal, korišten je integrirani krug XTR110KP proizvođača Texas Instruments.

5.3.2.1. XTR110KP - U/I pretvornik

Prema definiciji, XTR110KP je precizan naponsko-strujni pretvornik namijenjen za pretvorbu analognih signala. Na ulaz pretvornika mogu se spojiti signali od 0 do 5V ili od 0 do 10V. Izlaz U/I pretvornika može generirati standardne strujne signale: 4 do 20mA, 0 do 20mA, 5 do 25mA, itd. Na ulaze U/I pretvornika V_{IN1} ili V_{IN2} (slika 24.) doveden je naponski signal iz D/A pretvornika MCP4725, izvršava se pretvorba, tako da se za pojedinu naponsku razinu generira odgovarajuća struja.



Slika 24. Integrirani krug XTR110[14]

XTR110 može generirati nekoliko vrsta opsega. Opseg koji se generira na izlazu iz sklopa odgovara konfiguraciji koja se odabire, to jest koja je bila dostupna za vrstu ulaznog signala. Svi dostupni opsezi strujnih signala i mogućih konfiguracija sklopa dostupni su u Tablici 3. Kod mjerača broja okretaja odabran je strujni opseg od 0 do 20mA i naponski opseg od 0 do 5V. Navedena konfiguracija bila je najpraktičnija za korištenje, jer nije zahtijevala dodatnu pretvorbu naponskog signala.

INPUT OPSEG(V)	OUTPUT OPSEG(mA)	PIN 3	PIN 4	PIN 5	PIN 9	PIN 10
0-10	0-20	Com	Input	Com	Com	Com
2-10	4-20	Com	Input	Com	Com	Com
0-10	4-20	+10V Ref	Input	Com	Com	Open
0-10	5-25	+10V Ref	Input	Com	Com	Com
0-5	0-20	Com	Com	Input	Com	Com
1-5	4-20	Com	Com	Input	Com	Com
0-5	5-20	+10V Ref	Com	Input	Com	Com
0-5	5-25	+10V Ref	Com	Input	Com	Open

Tablica 3. Postojeće konfiguracije ovisne o vrsti opsega[14]

Iznos izlaznog strujnog signala iz sklopa, koji je ovisan o ulaznom naponu i otporu na pinu 7, određuje se prema izrazu[14]:

$$I_{OUT} = \frac{10 * \left(\frac{V_{REFIN}}{16} + \frac{V_{IN1}}{4} + \frac{V_{IN2}}{2} \right)}{R_{SPAN}} \quad [mA] \quad (5-6)$$

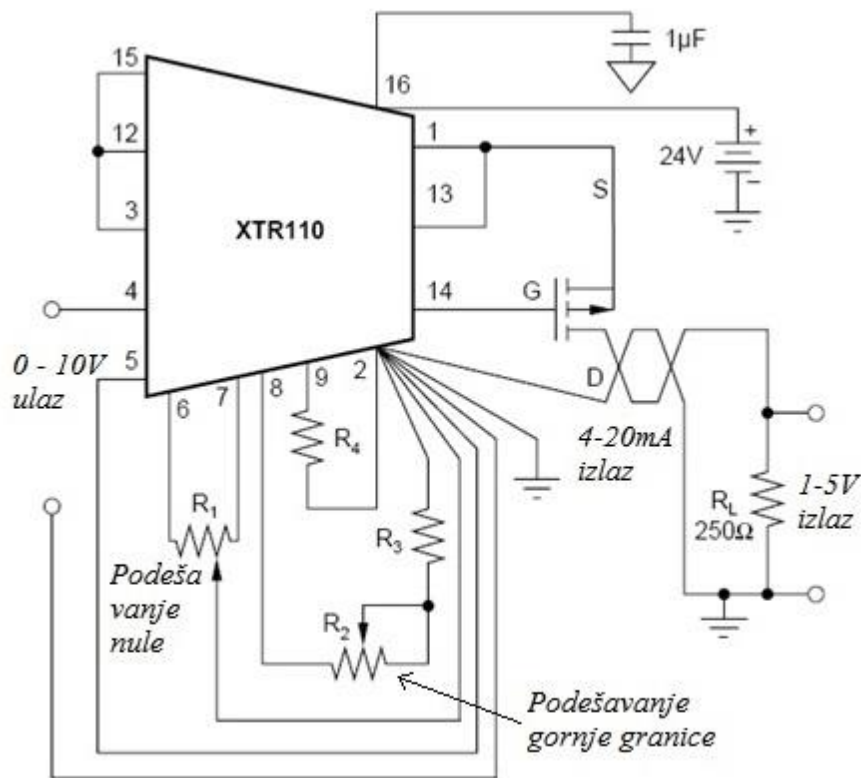
Gdje su: V_{REFIN} – referentni napon koji iznosi 0 ili 10V ovisno o konfiguraciji (tablica 3.)

V_{IN1} – ulazni napon na pinu 4, maksimalni opseg napona iznosi od 0 do 10V

V_{IN2} – ulazni napon na pinu 5, maksimalni opseg napona iznosi od 0 do 5V

R_{SPAN} – ukupni otpor koji je priključen na pinu 10 (slika 25.)

5.3.2.2. Umjeravanje U/I pretvornika



Slika 25. Umjeravanje XTR110 pretvornika[14]

Namještanje mjernog pretvornika vrši se kod maksimalne i kod minimalne vrijednosti ulaznog signala. Kod podešavanja donje granične vrijednosti mjernog opsega, napon na ulazu pretvornika jednak je 0V, a trimer potencijetrom R1 (slika 25.) namješta se izlazna struja na 0mA. Dodatna korekcija nule može se postići dodavanjem dodatnog otpora na pin 10, time se mijenja ukupni R_{SPAN} . Kod namještanja gornje granične vrijednosti, ulazni napon postavlja se na 5V i trimer potencijetrom R2 se ugodi izlazna struja sve dok se ne dobije vrijednost struje od 20mA na izlazu iz sklopa.

5.4. Tipkala

Prilikom pritiska tipkala želi se osigurati visoko ili nisko naponsko stanje. Zbog mehaničkih obilježja sklopki, tipkala ili bilo kojih drugih elemenata koji moraju ostvariti mehanički kontakt ili ga prekinuti, javljaju se određene neželjene prijelazne pojave titranja signala. Titranje signala kod uključanja može uzrokovati brojne smetnje u programu. Mikrokontroler ima veliku brzinu radnog takta procesora, zbog čega može registrirati promjenu stanja u nekoliko mikrosekundi (nanosekundi). Svaku promjenu uzrokovanu titranjem ulaznog signala može registrirati kao zasebno promjenu stanja, što može znatno utjecati na rezultat mjerenja.

Debouncing se može ostvariti na dva načina, hardverski ili softverski. Kod hardverskog načina, paralelno sa sklopkom dodaje se RC član koji bi anulirao titranje zbog vremenske konstante kondenzatora. Kod softverskog načina postoji nekoliko rješenja, npr. može se vremenski odrediti koliko će program čekati dok se signal ne stabilizira i ako je uvjet zadovoljen izvršava se operacija. Drugi način je da se odredi mikrokontroleru da ne obavlja operacije dok se stanje ne promijeni, mikrokontroler registrira da je tipka pritisnuta, ali čeka kada će se opet otpustiti. Rezultat primjene debouncinga je lakši prijelazi, odnosno bolja navigacija, što se u praksi odražava na kvalitetu i ukupni dojam mjernog pretvornika.

5.5. Prikaz informacija - LCD zaslon

Digitalni mjerac broja okretaja, osim što može komunicirati drugim uređajima, radi kao samostalan uređaj za indicaciju broja okretaja. Rezultat obrade ili proračuna broja okretaja ispisuje na LCD zaslon. Brzina promjene vrijednosti na LCD zaslonu treba biti prilagođena tako da korisnik može jasno iščitati broj okretaja i podešava se isključivo programski, a kod digitalnog tahometra iznosi približno 300mS. Dimenzija zaslona digitalnog tahometra je 16x2, gdje broj „16“ označava maksimalni broj znakova koje je moguće ispisati u jednom redu, a broj „2“ označava broj redova.



Slika 26. Prikazivanje broja okretaja

LCD zaslon može raditi u dva moda rada. Mod rada ovisi koliko će ulazno/izlaznih pinova Arduino pločice LCD zaslon koristiti. Postoje dva načina konfiguracije koje se razlikuju u broju korištenih podatkovnih pinova, u konfiguraciji od 4 podatkovna pina Arduino za rad koristi 7 I/O pinova, u konfiguraciji s 8 podatkovna pina LCD zaslon koristi 11 I/O pinova Arduino UNO pločice. U izradi programa digitalnog tahometra korištena je biblioteka LiquidCrystal. Naredbama se određuje početak komunikacije, ispis podataka i brisanje sadržaja zaslona.

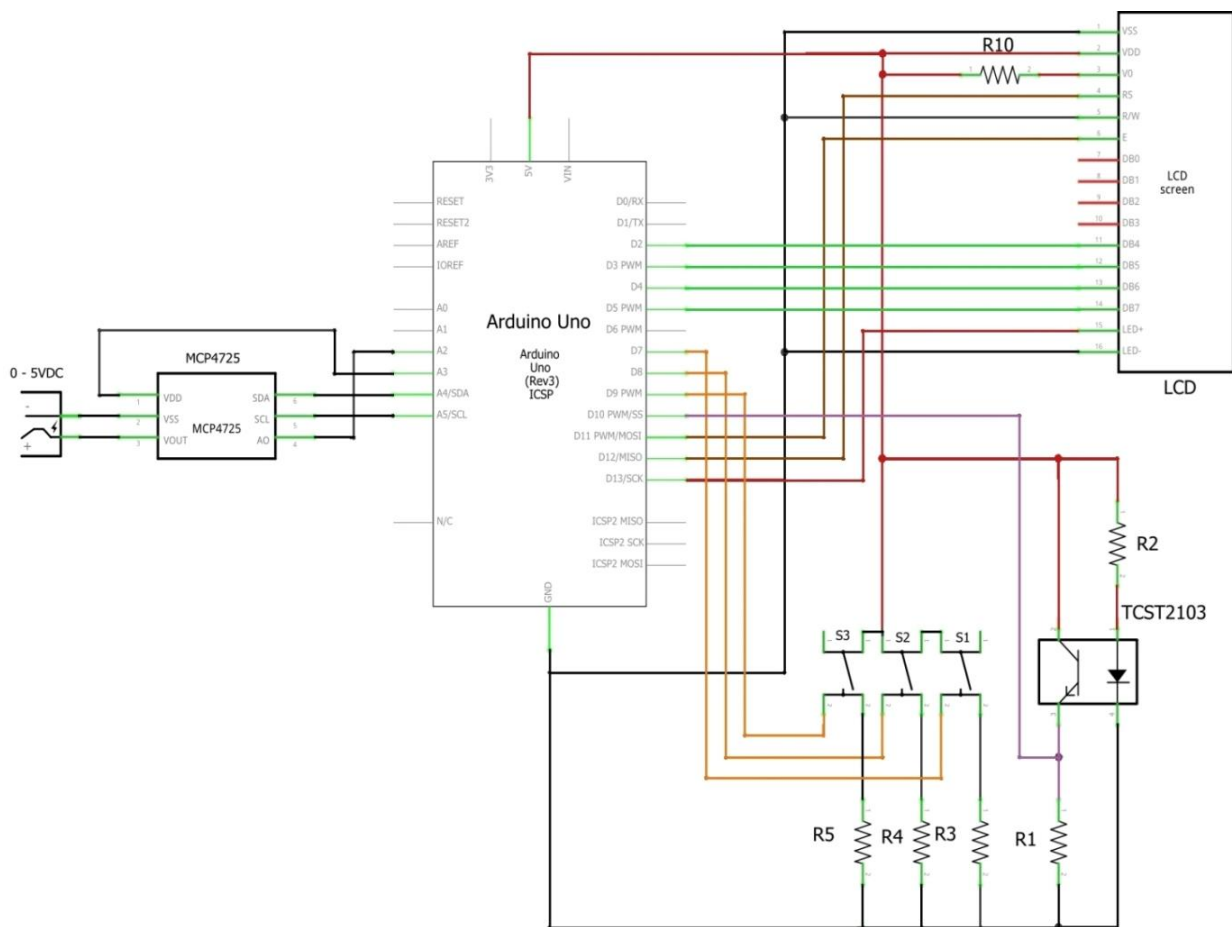
Oznaka pina LCD zaslona	Funkcija pina
V _{ss}	Napajanje LCD zaslona, GND
V _{cc}	Napajanje LCD zaslona, +5V
V ₀	Kontrast zaslona
RS	Kontrolira upis podatka u memoriju
E	Omogućava upis u registre
D0-D7	Omogućavaju prijenos podataka
A/K	Pozadinsko svjetlo

Tablica 4. Funkcije pinova LCD zaslona

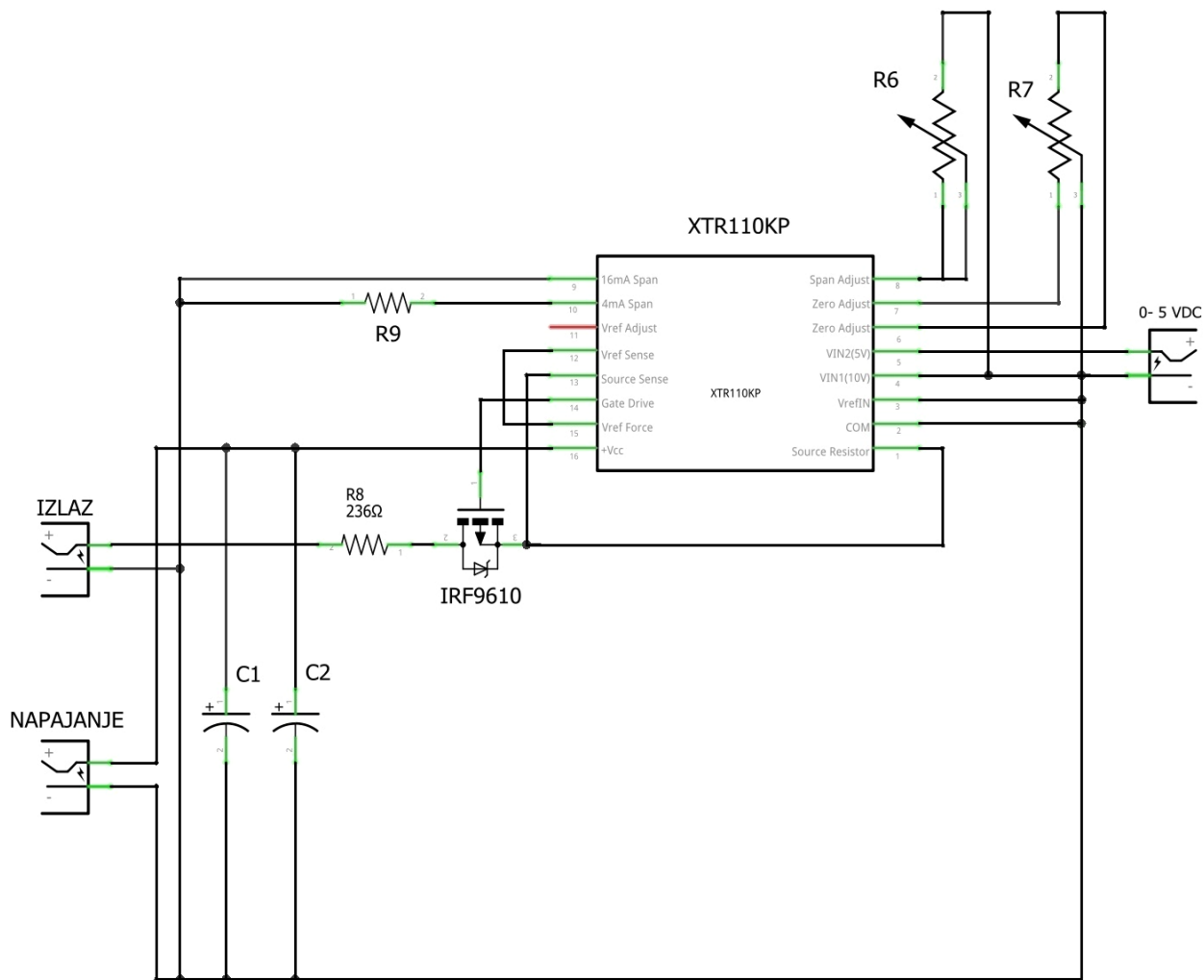
Kod prikazivanja podataka koriste se tzv. „string“ tipovi podataka. String tipovi podataka koriste se kod varijabla ili znakovnih nizova promjenjive duljine, što omogućava pridruživanje jednog znakovnog niza drugom, npr. spajanje int i char varijabla. Numerička varijabla podatkovnog tipa int i mjerna jedinica tipa char, spremaju se u znakovni niz ili string, npr. korištenje stringa u programu mjerača u operaciji pridruživanja: „lcd.print(String(brojOkretaja) + String (" [okr/min] "));“. Korištenjem pridruživanja osigurava se pravilan razmak između broja okretaja i mjerne jedinice, što je pogodno u slučaju širokog mjernog opsega instrumenta. Kod ispisivanja potrebno je pripaziti na dimenzije LCD zaslona, jer može doći do preklapanja teksta.

5.6. Shema spoja prototipa – razvojna pločica

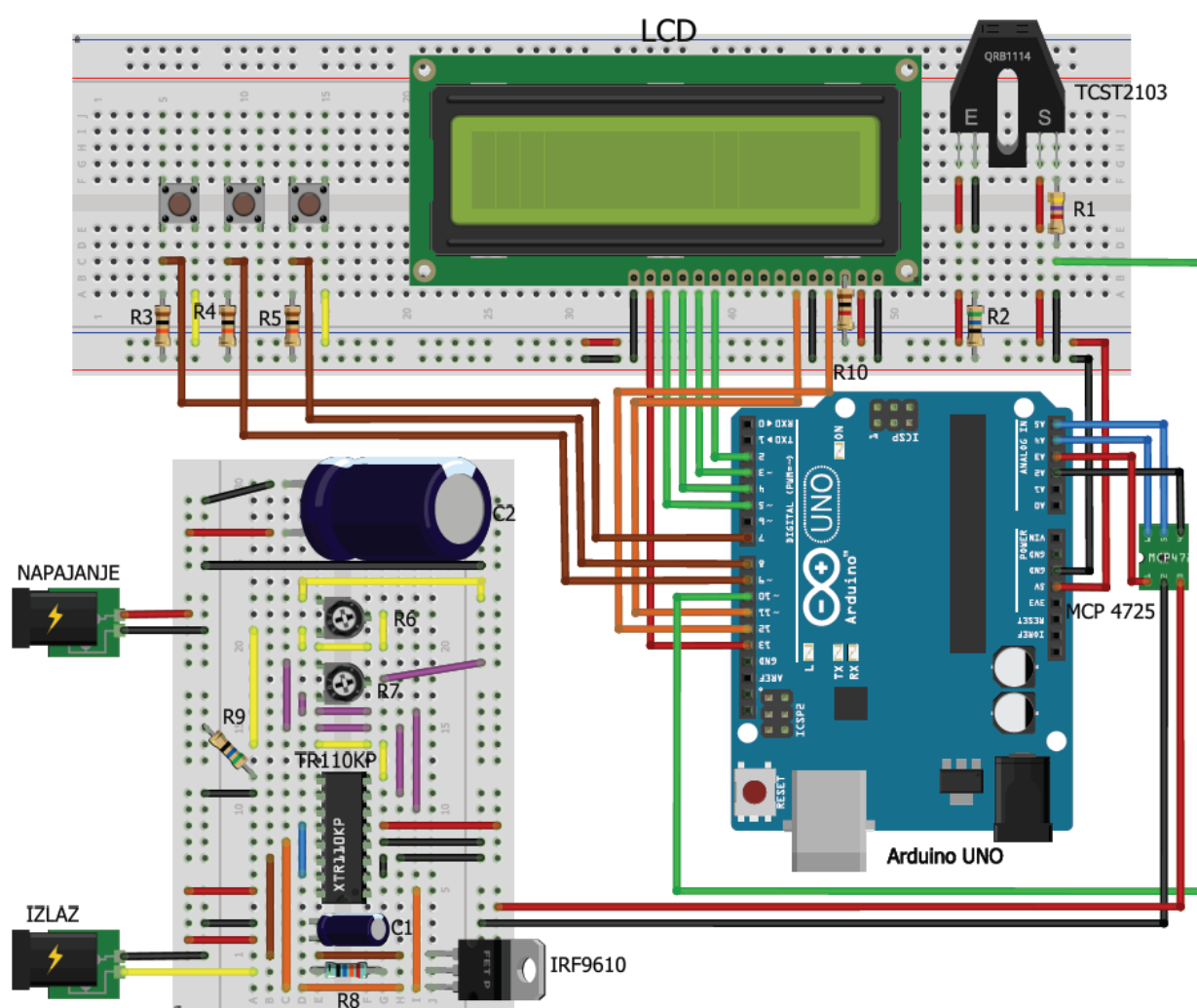
Električna i montažna shema crtane su u programu Fritzing, koji je namijenjen za vizualizaciju prototipa na razvojnoj pločici. Iz električne sheme crtane u programu proizlazi montažna shema, te se na temelju toga generira popis svih korištenih elektroničkih elemenata (senzora, LCD zaslona, tipkala, otpornika, itd.) – (Prilog 1.)



Slika 27. Električna shema LCD zaslona, MCP 4725 DAC pretvornika i Arduino Uno pločice



Slika 28. Električna shema XTR110KP U/I pretvornika

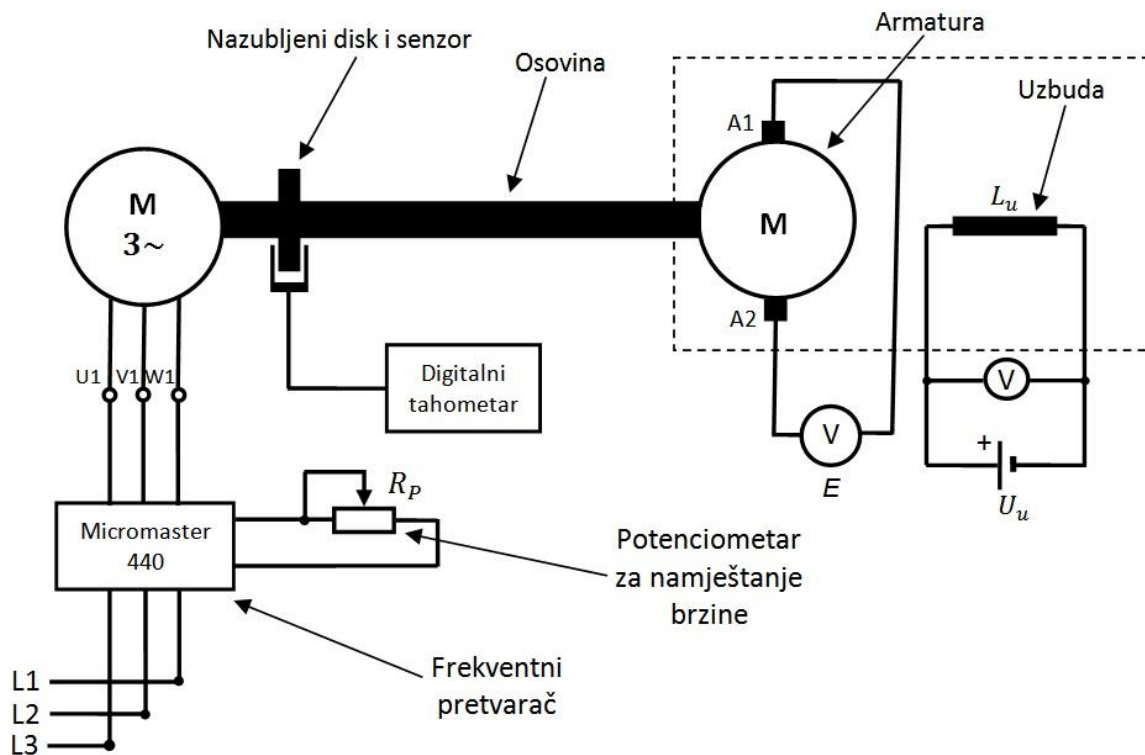


Slika 29. Montažna shema prototipa digitalnog mjerača broja okretaja

6. Snimanje prijelaznih pojava digitalnim tahometrom

6.1. Prva metoda – Određivanje statičke karakteristike

Mjeri se pomoću: frekvencijskog pretvarača Micromaster 440, trofaznog asinkronog izmjeničnog motora, istosmjernog tahogeneratora i digitalnog tahometra. Iz izmjerene broja okretaja u minuti na LCD zaslonu i napona na stezaljkama istosmjernog generatora dobiva se statička karakteristika. Statička karakteristika se ne mijenja u vremenu, kada se postavi određen broj okretaja i dođe do stacionarnog stanja mjerene veličine (broj okretaja je konstantan), očitava se napon i broj okretaja. Idealna statička karakteristika je linearna, njome se prikazuje linearni rast izlazne veličine kod linearnog rasta ulazne veličine.

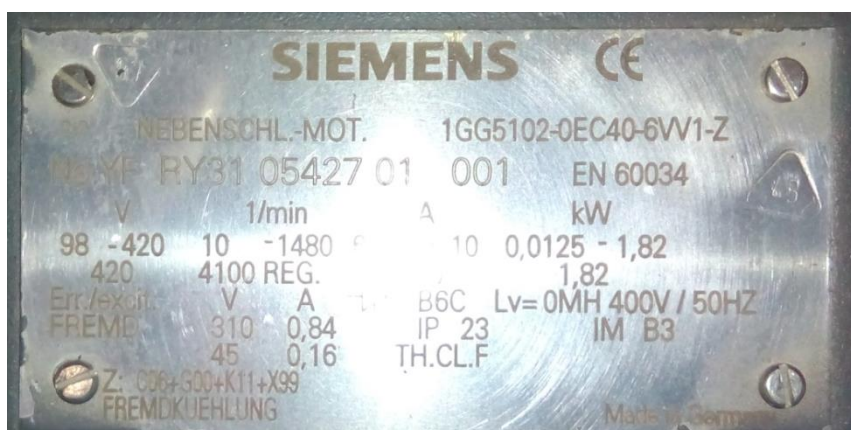


Slika 30. Shema spoja kod određivanja statičke karakteristike sustava

Asinkroni elektromotor i DC motor s nezavisnom uzбудom spojen kao tahogenerator nalaze se na zajedničkoj osovini, na koju se montira nazubljeni disk i fotoelektrični senzor. AC motor vrti se neopterećeno u praznom hodu, a brzina vrtnje postavlja se frekventnim pretvaračem. Napon uzbuđe DC tahogenerators iznosu $U_u = 193V$. Vrtnjom AC motora gibanje se prenosi na tahogenerator preko osovine, te se na armaturi inducira napon E koji je mjereno digitalnim voltmetrom Fluke 175. Mjerni opseg voltmetra je 6V. Nazivna brzina vrtnje trofaznog asinkronog motora iznosi 1415 okr/min (slika 29.), a nazivna brzina vrtnje istosmjernog generatora je 1480 okr/min (slika 30.)



Slika 31. Podaci sa pločice trofaznog asinkronog motora



Slika 32. Podaci sa pločice istosmjernog tahogenerators

Izvršeno je ukupno $n = 15$ mjerenja digitalnim tahometrom koja su prikazana u tablici 5. Mjeri se od najmanje moguće brzine broja okretaja koja se može postići frekventnim pretvaračem 100okr/min pa do 1500 okr/min. Apsolutna pogreška p_a je odstupanje izmjerene vrijednosti n_{mj} od prave vrijednosti n_{pr} , a računa se izrazom:

$$p_a = |n_{mj} - n_{pr}| \quad [okr/min] \quad (6-1)$$

Iz apsolutne pogreške izračunava se iznos relativne pogreške p izrazom:

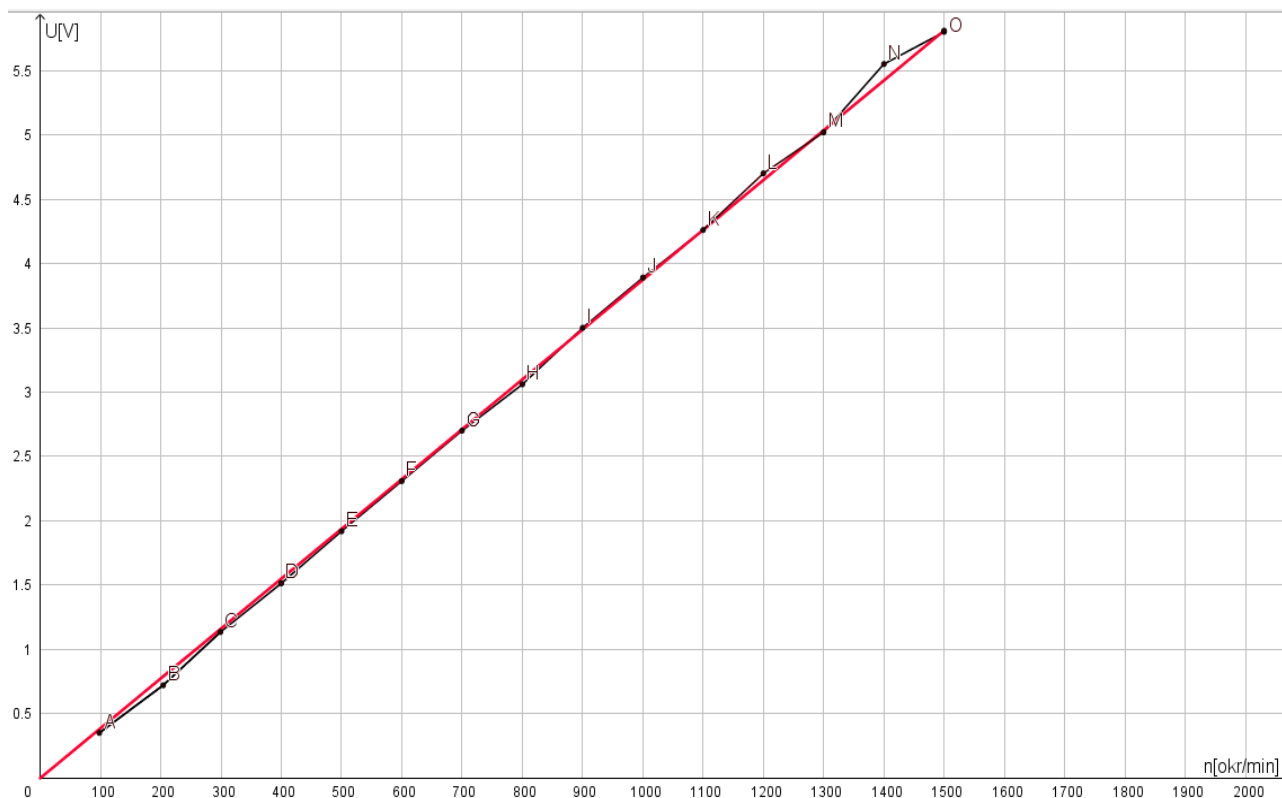
$$p = \frac{p_a}{n_{pr}} * 100 \quad [okr/min] \quad (6-2)$$

Rezultati mjerenja prikazani su tablicom:

Redni broj mjerenja	Izmjeren broj okretaja n_{mj} [okr/min]	Izmjeren napon E [V]	Prava vrijednost n_{pr} [okr/min]	Apsolutna pogreška p_a [V]	Relativna pogreška p (%)
A	98	0.351	91	7	7,69
B	204	0.722	187	17	9,09
C	299	1.135	294	5	1,7
D	400	1.514	392	8	2,04
E	502	1.919	496	6	1,21
F	600	2.309	597	3	0,5
G	700	2.7	698	2	0,29
H	800	3.06	791	9	1,14
I	900	3.5	905	5	0,55
J	1000	3.89	1006	6	0,6
K	1100	4.26	1102	2	0,18
L	1200	4.7	1216	16	1,32
M	1300	5.02	1298	2	0,15
N	1400	5.55	1435	35	2,44
O	1500	5.8	1500	0	0

Tablica 5. Izmjerene vrijednosti pokusom određivanja statičke karakteristike

Iz izmjerenih vrijednosti induciranog napona i broja okretaja crta se graf statičke karakteristike:



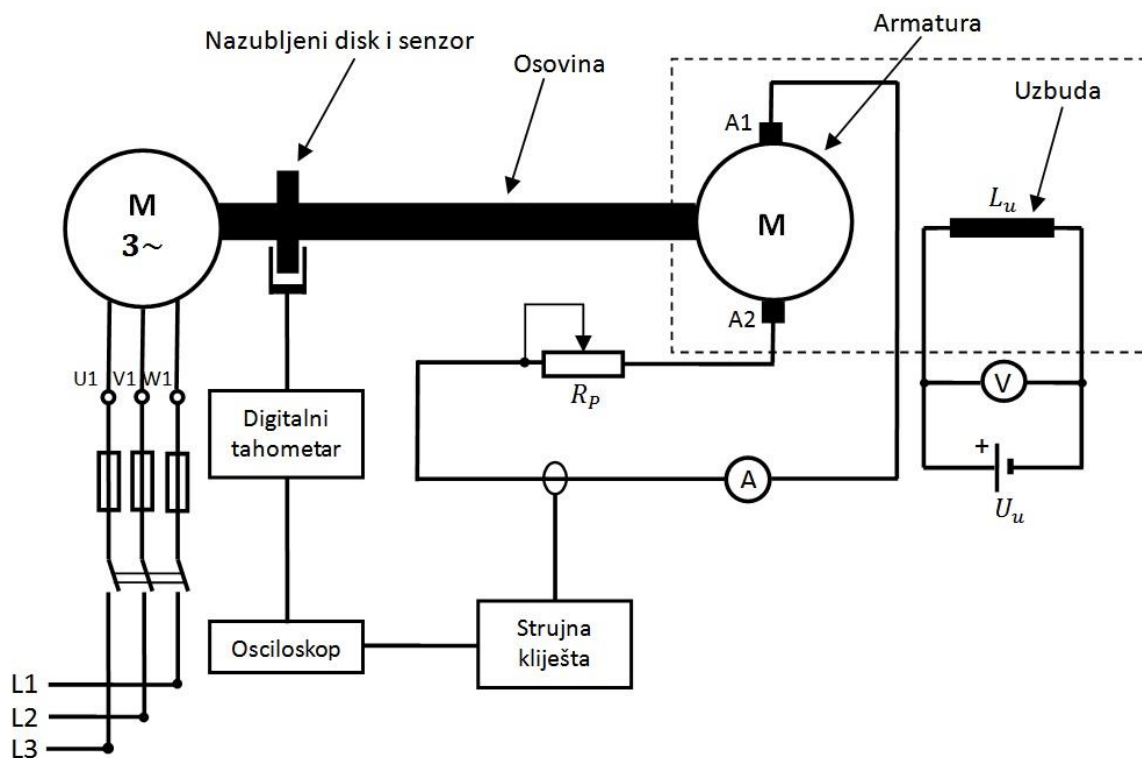
Slika 33. Statička karakteristika digitalnog tahometra

Iz slike 33. može se zaključiti da graf izmjerene vrijednosti dobro prati idealnu statičku karakteristiku, najveća odstupanja prema tablici 5. događaju se kod manjih brzina, razlog tome je što kod visokih i niskih brzina frekventni pretvarač teško održava brzinu vrtnje elektromotora konstantnom, što otežava očitavanje broja okretaja. Broj okretaja motora stalno varira, iz tog razloga teško je očitati pravu vrijednost. Za točnije rezultate, mjerenje se izvršava nekoliko puta te se iz dobivenih rezultata računa aritmetička sredina i standardna devijacija.

6.2. Druga metoda – Snimanje zaleta asinkronog elektromotora

Druga metoda ili analogna metoda zasniva se na promatranju prijelaznih pojava korištenjem osciloskopa prilikom zaleta asinkronog motora, rezultati su prikazani u obliku grafa ili tzv. dinamičke karakterisitke.

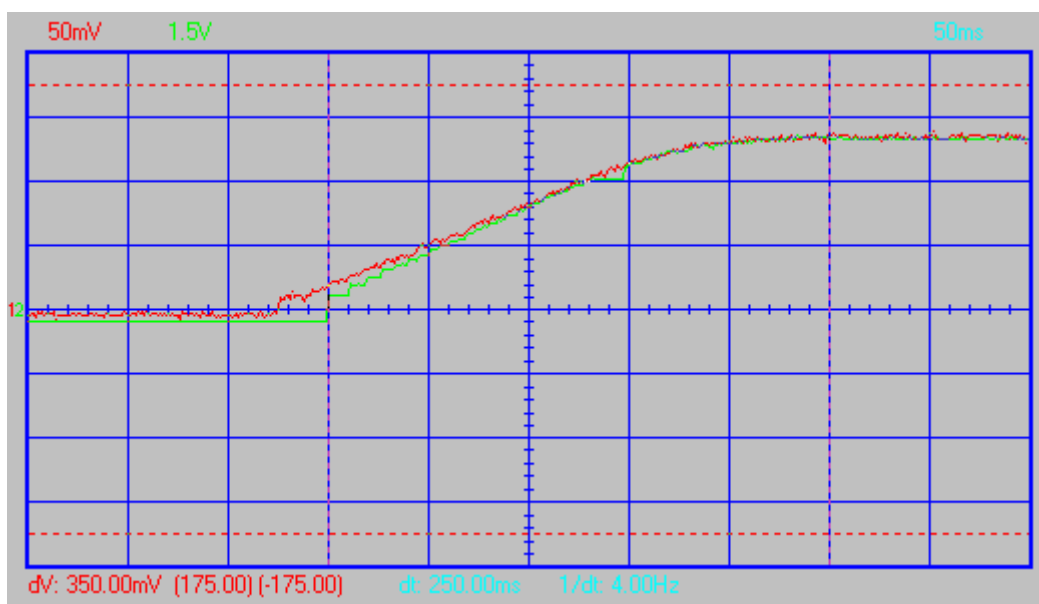
Dinamičke karakteristike su rezultat dinamičke analize pri čemu se ispituju vremenske promjene izlaznih veličina u odnosu na vremenske promjene ulaznih veličina.[15]



Slika 34. Shema spoja kod određivanja dinamičke karakteristike

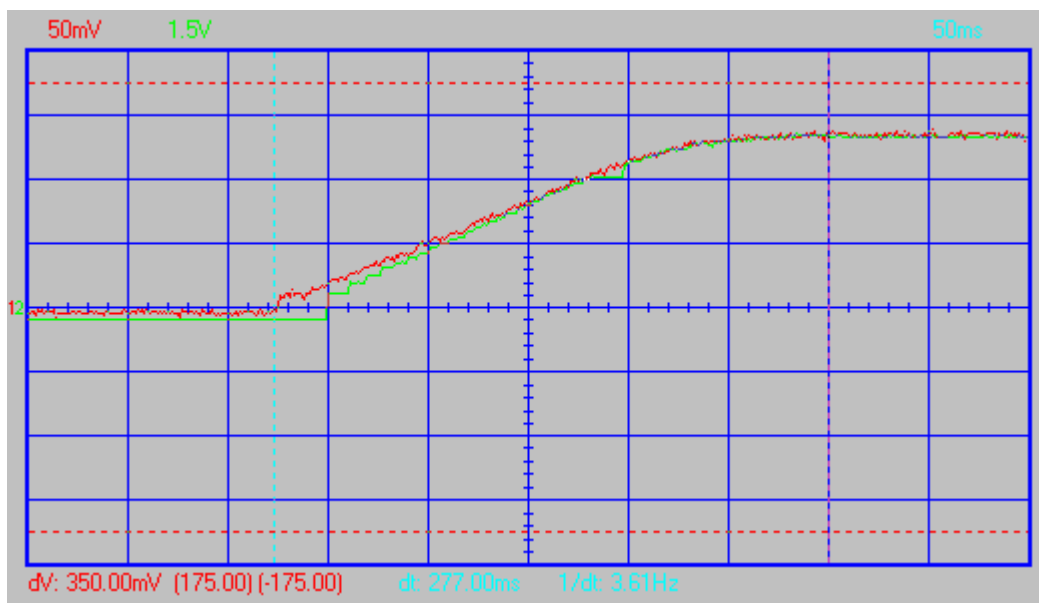
Na armaturu DC tahogeneratora (slika 32.) spojen je promjenjivi otpornik iznosa $R_p = 245\Omega$. Inducirani napon mjeri se strujnim kliještama, podešenim na 100 mV/A. Strujna kliješta i naponski izlaz iz D/A pretvornika digitalnog tahometra spojeni su na osciloskop, strujna kliješta na CH1, a digitalni tahometar na CH2. Trofazni asinkroni motor (slika 31.) vrti se od mirujućeg položaja do nazivne brzine, osciloskopom se mjeri vrijeme zaleta.

Na prvom kanalu osciloskopa CH1 (50mV/DIV DC) snimljen je signal generiran od strane istosmjernog generatora (crvena boja na grafu), a na drugom CH2 (1,5V/DIV DC) snimljen je signal generiran na D/A pretvorniku digitalnog tahometra (zeleno boja na grafu).



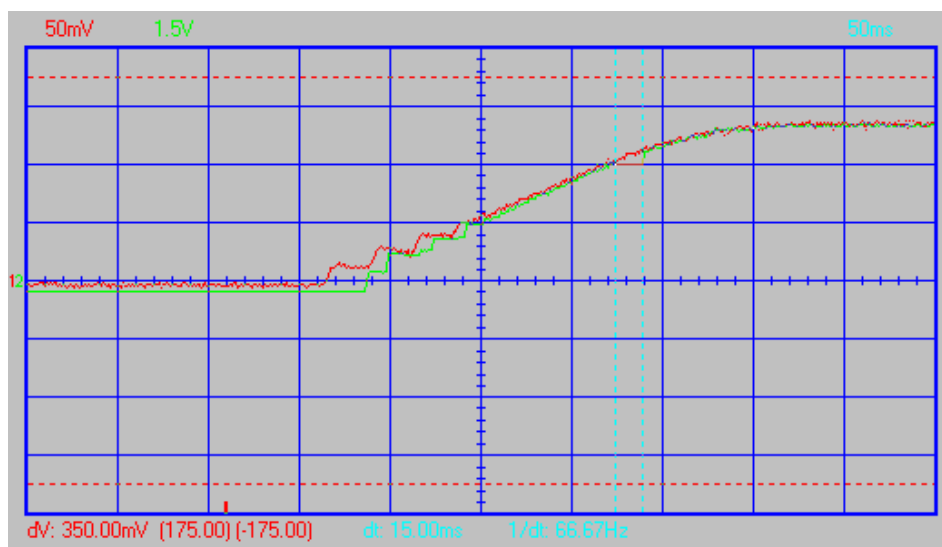
Slika 35. Graf zaleta asinkronog motora i signal na izlazu D/A pretvornika (zeleno boja)

Iz slike 35. izmjereno trajanje zaleta trofaznog elektromotora pomoću digitalnog tahometra iznosi 250mS. Iz karakteristike je vidljivo da graf digitalnog tahometra (zeleno) zaostaje za grafom istosmjernog tahogeneratora (crveno), grafovi se spoje nakon nekoliko desetaka milisekundi, razlog tome je što mikrokontroler mora izvršiti čitanje i obradu ulaznog signala, te naposljetku mora izvršiti pretvorbu vrijednosti u konstantan napon D/A pretvornikom. Pogreška na početku karakteristike uzrokovana je vremenskim konstantama RC članova D/A pretvornika prilikom pretvorbe signala.



Slika 36. Graf zaleta asinkronog motora i signal na izlazu DC generatora (crvena boja)

Iz slike 36. ukupno izmjereno trajanje zaleta trofaznog asinkronog elektromotora u praznom hodu pomoću istosmjernog tahogeneratora iznosi 277mS. Razlika između snimljenih dinamičkih karakteristika iznosi 27mS i nakon nekoliko mjerenja utvrđeno je da je početna razlika približno istog iznosa (10–30mS). Kod 1000 okr/min na karakteristici signala iz D/A pretvornika (slika 37.) uočeno je određeno „udubljenje“ koje iznosi 15mS, razlog tome je brzina ispisivanja LCD zaslona. Potrebno je određeno vrijeme da se rezultat obrade ispiše na zaslon, stoga se događa pojava da se vrijednost napona D/A pretvornika ne mijenja u vremenu dok program opet ne uđe u petlju. Rješenje problema je optimizacija programa i prilagodba ispisa.



Slika 37. Mjerenje pogreške dinamičke D/A pretvornika

7. Zaključak

Mjerna tehnologija ima široku primjenu u automatizaciji. Mjerenje broja okretaja elektromotora jedan je od sastavnih elemenata mjerne tehnologije korištene kod upravljanja procesa. Proizvodni procesi postaju zahtjevniji, te se zbog napretka tehnologije javljaju potrebe veće točnosti, pouzdanosti i autonomnosti u radu. Naime, prednost digitalnog mjernog pretvornika je prilagodljivost zahtjevima procesa, pretvornik vrši pretvorbu i obradu signala, te se rezultat obrade šalje udaljenom upravljačkom članu automatiziranog procesa. Izrada digitalnog mjernog pretvornika složen je proces i zahtjeva dobro poznavanje signalne i mjerne tehnike.

Digitalni mjerač broja okretaja s LCD zaslonom razrađeni je koncept digitalnog mjernog pretvornika koji se bazira oko osnovnih zahtjeva modernih industrijskih digitalnih mjerača. Cilj ovog završnog rada bio je izraditi univerzalni autonomni mjerni pretvornik analognog izlaza velike točnosti mjerenja i brzine odziva radi snimanja prijelaznih pojava, prilagodljivog na svaki elektromotor. Usporedbom statičke i dinamičke karakteristike digitalnog i analognog pretvornika može se zaključiti da je izrađeni pretvornik zadovoljavajuće kvalitete. Očekivano je da će se dinamička karakteristika digitalnog pretvornika razlikovati od analognog, jer obrada i pretvorba signala u mikrokontroleru zahtijevaju određeno vrijeme bez obzira na kvalitetu mjernog pretvornika. Za postizanje maksimalne točnosti i brzine ispisa, potrebno je odraditi velik broj mjerenja čime bi se uočili uzroci nastalih nepravilnosti, te ih optimizacijom pojedinih segmenata digitalnog mjerača naposljetku otklonili.

U Varaždinu dana 7.3.2018.

Sveučilište
SjeverIZJAVA O AUTORSTVU
I
SUGLASNOST ZA JAVNU OBJAVU

Završni/diplomski rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, JURA JURONJIĆ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom MJERAČ BROJA OKRETAJA SA LCD EKRAKOM I ANALOGNIM IZLAZOM (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Jura Juronjić
(vlastoručni potpis)

Sukladno Zakonu o znanstvenoj djelatnosti i visokom obrazovanju završne/diplomske radove sveučilišta su dužna trajno objaviti na javnoj internetskoj bazi sveučilišne knjižnice u sastavu sveučilišta te kopirati u javnu internetsku bazu završnih/diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice. Završni radovi istovrsnih umjetničkih studija koji se realiziraju kroz umjetnička ostvarenja objavljuju se na odgovarajući način.

Ja, JURA JURONJIĆ (ime i prezime) neopozivo izjavljujem da sam suglasan/na s javnom objavom završnog/diplomskog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom MJERAČ BROJA OKRETAJA SA LCD EKRAKOM I ANALOGNIM IZLAZOM (upisati naslov) čiji sam autor/ica.

Student/ica:
(upisati ime i prezime)

Jura Juronjić
(vlastoručni potpis)

8. Literatura

- [1] <https://element.hr/artikli/file/2926> - dostupno 22.1.2018 , dostupno 5.1.2018.
- [2] <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=41311> , dostupno 6.1.2018.
- [3] Božičević J. - Temelji Automatike 2 - Mjerni pretvornici i mjerenje
- [4] Mario Abraham - Digitalni instrument na mjerenje broja okretaja elektromotora (digitalni tahometar)
- [5] <http://www.electrical-engineering-assignment.com/tachometer-generators#!prettyPhoto>, dostupno 15.1.2018.
- [6] R. Wolf - Osnove električnih strojeva
- [7] <http://www.electronicdesign.com/components/understanding-resolution-optical-and-magnetic-encoders>, dostupno 16.1.2018.
- [8] http://phy.grf.unizg.hr/media/download_gallery/4_Fotoelektricni%20efekt.pdf , dostupno 25.1.2018
- [9] <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/26411/VISHAY/TCST2103.html>, dostupno 15.1.2018.
- [10] https://bib.irb.hr/datoteka/358185.PLC_brzina_MIPRO_08_CTS.pdf, dostupno 19.1.2018.
- [11] <http://www.pighixx.com/test/wp-content/uploads/2017/05/uno.png> , dostupno 18.1.2018.
- [12] http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-42735-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega328-328P_Datasheet.pdf - 25.1.2018, dostupno 20.1.2018.
- [13] <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22039d.pdf>, dostupno 16.1.2018.
- [14] <http://www.ti.com/product/XTR110>, dostupno 16.1.2018.
- [15] https://www.veleri.hr/files/datotekep/nastavni_materijali/k_telematika_1/Predavanje_8.pdf, dostupno 5.2.2018.

Popis slika

Slika 1. Indukcijski tahogenerator[4]	8
Slika 2. Istosmjerni tahogenerator s permanentnom uzбудom[5]	9
Slika 3. Karakteristika ovisnosti induciranog napona o broju okretaja[4]	11
Slika 4. Izmjenični sinkroni tahogenerator u izvedbi jednofaznog napona[5]	13
Slika 5. Dvofazni izmjenični tahogenerator[6].....	14
Slika 6. Blok shema rasporeda elemenata mjernih članova	17
Slika 7. Mehanički davač impulsa	18
Slika 8. Inkrementalni enkoder s dva Hallova pretvarača (generatora)[7]	19
Slika 9. IR senzor TCST2103 viljuškastog oblika[9]	20
Slika 10. Montaža nazubljenog diska i senzora na osovinu motora	22
Slika 11. Vremenska karakteristika uključanja i isključanja[9]	23
Slika 12. Shema ulaznog sklopa mjerača broja okretaja	24
Slika 13. Primjer mjerenja broja okretaja u P postupku	26
Slika 14. Grafički prikaz f/D pretvorbe P metodom.....	27
Slika 15. Primjer mjerenja broja okretaja u T postupku	28
Slika 16. Grafički prikaz f/D pretvorbe T metodom	29
Slika 17. Primjer mjerenja broja okretaja u P/T postupku	30
Slika 18. Grafički prikaz f/D pretvorbe P/T metodom	31
Slika 19. Arduino Uno razvojna pločica[11].....	33
Slika 20. ATmega 328P PDIP pinout[12]	34
Slika 21. Dijagram toka izbornika.....	35
Slika 22. Dijagram toka funkcije mjerenja i prikaza broja okretaja.....	36
Slika 23. Sekvencija prijenosa podataka serijskom I ² C komunikacijom[13].....	38
Slika 24. Integrirani krug XTR110[14]	42
Slika 25. Umjeravanje XTR110 pretvornika[14]	44
Slika 26. Prikazivanje broja okretaja.....	46

Slika 27. Električna shema LCD zaslona, MCP 4725 DAC pretvornika i Arduino Uno pločice	48
Slika 28. Električna shema XTR110KP U/I pretvornika	49
Slika 29. Montažna shema prototipa digitalnog mjerača broja okretaja	50
Slika 30. Shema spoja kod određivanja statičke karakteristike sustava	51
Slika 31. Podaci sa pločice trofaznog asinkronog motora	52
Slika 32. Podaci sa pločice istosmjernog tahogeneratorskog motora	52
Slika 33. Statička karakteristika digitalnog tahometra	54
Slika 34. Shema spoja kod određivanja dinamičke karakteristike	55
Slika 35. Graf zaleta asinkronog motora i signal na izlazu D/A pretvornika (zelena boja)	56
Slika 36. Graf zaleta asinkronog motora i signal na izlazu DC generatora (crvena boja)	57
Slika 37. Mjerenje pogreške dinamičke D/A pretvornika	57

Popis tablica

Tablica 1. Karakteristike uključenja i isključenja proizvođača Vishay[9]	23
Tablica 2. Iznosi LSB-a u ovisnosti o naponu[13]	41
Tablica 3. Postojeće konfiguracije ovisne o vrsti opsega[14]	43
Tablica 4. Funkcije pinova LCD zaslona	47
Tablica 5. Izmjerene vrijednosti pokusom određivanja statičke karakteristike	53

Prilozi

Prilog 1. Popis elektroničkih elemenata generiran pomoću programa Fritzing

Oznaka	Tip elementa	Opis
NAPAJANJE	Utičnica	Napajanje od 13.5 do 40VDC
IZLAZ	Utičnica	Izlaz istosmjerne struje 0-20mA
MCP 4725	D/A Pretvornik	12-bitna rezolucija, D/A pretvornik
C1	Elektrolitski kondenzator	1uF/25 V – okruglo kućište
C2	Elektrolitski kondenzator	1000uF/63 V – okruglo kućište
XTR110KP	U/I pretvornik	U/I mjerni pretvornik, DIP 16 kućište
LCD	LCD zaslon	16 pinova, 16x2 dimenzije
Arduino Uno	Pločica	Mikrokontroler ATMEL ATmega328P
IRF9610	Tranzistor	P-kanalni FET tranzistor
R1	4.7k Ω \pm 5%	Otpornik
R2	56 Ω \pm 5%	Otpornik
R3	10k Ω \pm 5%	Otpornik
R4	10k Ω \pm 5%	Otpornik
R5	10k Ω \pm 5%	Otpornik
R6	100k Ω	Trimer potencijometar
R7	100k Ω	Trimer potencijometar
R8	236 Ω \pm 5%	Otpornik
R9	56 Ω \pm 5%	Otpornik
R10	1k Ω \pm 5%	Otpornik
S1	Tipkalo	
S2	Tipkalo	
S3	Tipkalo	
TCST2103	Fotoelektrični senzor	Viljuškasti tip senzora

Prilog 2. Program digitalnog mjerača broja okretaja

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <Adafruit_MCP4725.h>

//DEFINICIJA VARIJABLI//

Adafruit_MCP4725 dac;
int value = 1;
int odaberi = 1;
int jedinica = 1;
int nazivniOkretaji;
int pulsePin = 10;
int X;
int nazivnaBrzina = 1200; //DEFAULT BROJ OKRETAJA
int vrijemeOkretaja;
int skaliranje;
int brojOkretaja;

unsigned long time1;
unsigned long timeR;

unsigned long pulseHIGH;
unsigned long pulseLOW;
unsigned long pulseTOTAL;

float napon;
float struja;

LiquidCrystal lcd(12, 11, 2, 3, 4, 5);

//DEFINICIJA ULAZA I IZLAZA, DAC ADRESE, POČETAK LCD KOMUNIKACIJE//

void setup() {

    pinMode(8, INPUT); //BUTTON1
    pinMode(9, INPUT); //BUTTON2
    pinMode(7, INPUT); //BUTTON3
    pinMode(pulsePin, INPUT);
    pinMode(A2, OUTPUT);
    pinMode(A3, OUTPUT);
    pinMode(13, OUTPUT);
    lcd.begin(16, 2);
    lcd.clear();
    dac.begin(0x60);
    digitalWrite(A2, LOW); //Set A2 as GND
    digitalWrite(A3, HIGH); //Set A3 as Vcc
    digitalWrite(13, HIGH);
    dac.setVoltage(0, false);
    delay(100);
    nazivna();
    while (digitalRead(7) == HIGH){}
}
```

```

//GLAVNI PROGRAM//

void loop() {

    if (digitalRead(9) == HIGH){value++;}
    while(digitalRead(9) == HIGH) {}

    if (digitalRead(8) == HIGH){value--;}
    while(digitalRead(8) == HIGH) {}

    if (value >= 6){value = 1;}

    if (value <= 0){value = 5;}

    if (digitalRead(7) == HIGH){odaberi++;}
    else if (odaberi >= 3){odaberi = 1;}
    else{odaberi = odaberi;}
    while (digitalRead(7) == HIGH){}

    if (odaberi == 1){

        dac.setVoltage(0, false);
        timel = millis();

        switch (value){

            case 1:
                lcd.display();
                digitalWrite(13, HIGH);
                lcd.clear();
                lcd.setCursor(0, 0);
                lcd.print("***MOD 1**");
                lcd.setCursor(0, 1);
                lcd.print("BROJ OKRETAJA");
                delay(20);
                break;

            case 2:
                lcd.display();
                digitalWrite(13, HIGH);
                lcd.clear();
                lcd.setCursor(0, 0);
                lcd.print("***MOD 2**");
                lcd.setCursor(0, 1);
                lcd.print("VRIJEME OKRETA");
                delay(20);
                break;

            case 3:
                lcd.display();
                digitalWrite(13, HIGH);
                lcd.clear();
                lcd.setCursor(0, 0);
                lcd.print("***MOD 3**");
                lcd.setCursor(0, 1);
                lcd.print("NAPON DAC");
                delay(20);
                break;
        }
    }
}

```

```

    case 4:
        lcd.display();
        digitalWrite(13, HIGH);
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("***MOD 4**");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print("STRUJA DAC");
        delay(20);
        break;

    case 5:
        lcd.display();
        digitalWrite(13, HIGH);
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("***SETTINGS**");
        delay(20);
        break;
}
}

if (odaberi == 2){
    switch (value){

        case 1:
            funkcija1();
            break;

        case 2:
            funkcija2();
            break;

        case 3:
            funkcija3();
            break;

        case 4:
            funkcija4();
            break;

        case 5:
            nazivna();
            break;
    }
}
}

```

```

//1. FUNKCIJA - PRIKAZ BROJA OKRETAJA U ODABRANOJ MJERNOJ JEDINICI//

void funkcija1(){

    pulseHIGH = 0;
    pulseLOW = 0;
    pulseTOTAL = 0;
    brojOkretaja = 0;

    pulseHIGH = pulseIn(pulsePin, HIGH);
    pulseLOW = pulseIn(pulsePin, LOW);
    pulseTOTAL = pulseHIGH + pulseLOW;
    brojOkretaja = ((60000000) / (pulseTOTAL * 60));

    if (brojOkretaja >= 1){

        if (brojOkretaja >= 2700){X = 275;}
        if ((brojOkretaja <= 2700) && (brojOkretaja >= 2400)){X = 250;}
        if ((brojOkretaja <= 2400) && (brojOkretaja >= 2100)){X = 230;}
        if ((brojOkretaja <= 2100) && (brojOkretaja >= 1800)){X = 195;}
        if ((brojOkretaja <= 1800) && (brojOkretaja >= 1500)){X = 170;}
        if ((brojOkretaja <= 1500) && (brojOkretaja >= 1250)){X = 145;}
        if ((brojOkretaja <= 1250) && (brojOkretaja >= 1000)){X = 125;}
        if ((brojOkretaja <= 1000) && (brojOkretaja >= 850)){X = 105;}
        if ((brojOkretaja <= 850) && (brojOkretaja >= 700)){X = 85;}
        if ((brojOkretaja <= 700) && (brojOkretaja >= 550)){X = 70;}
        if ((brojOkretaja <= 550) && (brojOkretaja >= 450)){X = 55;}
        if ((brojOkretaja <= 450) && (brojOkretaja >= 350)){X = 40;}
        if ((brojOkretaja <= 350) && (brojOkretaja >= 250)){X = 30;}
        if ((brojOkretaja <= 250) && (brojOkretaja >= 150)){X = 20;}
        if ((brojOkretaja <= 150) && (brojOkretaja >= 50)){X = 15;}
        if (brojOkretaja <= 50){X = 5;}

        do{

            pulseHIGH = 0;
            pulseLOW = 0;
            pulseTOTAL = 0;

            pulseHIGH = pulseIn(pulsePin, HIGH);
            pulseLOW = pulseIn(pulsePin, LOW);
            pulseTOTAL = pulseHIGH + pulseLOW;

            brojOkretaja = 0;
            brojOkretaja = ((60000000) / (pulseTOTAL * 60)); // U OKRETAJIMA U
MINUTI//

            if (brojOkretaja >= nazivniOkretaji){
                skaliranje = 4095;
                dac.setVoltage(skaliranje, false);}
            else{
                skaliranje = map(brojOkretaja, 0, nazivniOkretaji, 0, 4095);
                dac.setVoltage(skaliranje, false);}

            X = X - 1;
            time1 = millis();

        }while((X >= 0) && (digitalRead(7) == LOW) && (brojOkretaja >= 1));

```

```

switch (jedinica){

    case 1:
        jedinica1();
        break;

    case 2:
        jedinica2();
        break;

    case 3:
        jedinica3();
        break;

    case 4:
        jedinica4();
        break;
}
}

else{

    timerR = millis() - time1;

    if (timerR <= 30000){
        switch (jedinica){

            case 1:
                jedinica1();
                break;

            case 2:
                jedinica2();
                break;

            case 3:
                jedinica3();
                break;

            case 4:
                jedinica4();
                break;
        }
    }

    if(timerR >= 30000){

        lcd.noDisplay();
        lcd.clear();
        digitalWrite(13, LOW);
        dac.setVoltage(0, false);
    }
}
}

```

```
//2. FUNKCIJA - VRIJEME JEDNE REVOLUCIJE
```

```
void funkcija2(){
```

```
    pulseHIGH = 0;  
    pulseLOW = 0;  
    pulseTOTAL = 0;  
    brojOkretaja = 0;
```

```
    pulseHIGH = pulseIn(pulsePin, HIGH);  
    pulseLOW = pulseIn(pulsePin, LOW);  
    pulseTOTAL = pulseHIGH + pulseLOW;  
    brojOkretaja = ((60000000) / (pulseTOTAL * 60));
```

```
    if (brojOkretaja >= 1){
```

```
        if (brojOkretaja >= 2700){X = 275;}  
        if ((brojOkretaja <= 2700) && (brojOkretaja >= 2400)){X = 250;}  
        if ((brojOkretaja <= 2400) && (brojOkretaja >= 2100)){X = 230;}  
        if ((brojOkretaja <= 2100) && (brojOkretaja >= 1800)){X = 195;}  
        if ((brojOkretaja <= 1800) && (brojOkretaja >= 1500)){X = 170;}  
        if ((brojOkretaja <= 1500) && (brojOkretaja >= 1250)){X = 145;}  
        if ((brojOkretaja <= 1250) && (brojOkretaja >= 1000)){X = 125;}  
        if ((brojOkretaja <= 1000) && (brojOkretaja >= 850)){X = 105;}  
        if ((brojOkretaja <= 850) && (brojOkretaja >= 700)){X = 85;}  
        if ((brojOkretaja <= 700) && (brojOkretaja >= 550)){X = 70;}  
        if ((brojOkretaja <= 550) && (brojOkretaja >= 450)){X = 55;}  
        if ((brojOkretaja <= 450) && (brojOkretaja >= 350)){X = 40;}  
        if ((brojOkretaja <= 350) && (brojOkretaja >= 250)){X = 30;}  
        if ((brojOkretaja <= 250) && (brojOkretaja >= 150)){X = 20;}  
        if ((brojOkretaja <= 150) && (brojOkretaja >= 50)){X = 15;}  
        if (brojOkretaja <= 50){X = 5;}
```

```
    do{
```

```
        pulseHIGH = 0;  
        pulseLOW = 0;  
        pulseTOTAL = 0;
```

```
        pulseHIGH = pulseIn(pulsePin, HIGH);  
        pulseLOW = pulseIn(pulsePin, LOW);  
        pulseTOTAL = pulseHIGH + pulseLOW;
```

```
        brojOkretaja = 0;
```

```
        brojOkretaja = ((60000000) / (pulseTOTAL * 60)); // U OKRETAJIMA U  
MINUTI//
```

```
        if (brojOkretaja >= nazivniOkretaji){  
            skaliranje = 4095;  
            dac.setVoltage(skaliranje, false);}  
        else{  
            skaliranje = map(brojOkretaja, 0, nazivniOkretaji, 0, 4095);  
            dac.setVoltage(skaliranje, false);}  
        X = X - 1;  
        time1 = millis();
```

```
    }while((X >= 0) && (digitalRead(7) == LOW) && (brojOkretaja >= 1));
```

```

vrijemeOkretaja = (60 * pulseTOTAL) / 1000;
digitalWrite(13, HIGH);
lcd.display();
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("VRIJEME OKR.:");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(String(vrijemeOkretaja) + String(" [mS] "));}

else{

    timeR = millis() - time1;

    if (timeR <= 30000){

        dac.setVoltage(0, false);
        digitalWrite(13, HIGH);
        lcd.display();
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("VRIJEME OKR.:");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(String(" 0 ") + String(" [mS] "));}

    }

    if (timeR >= 30000){

        lcd.noDisplay();
        lcd.clear();
        digitalWrite(13, LOW);
        dac.setVoltage(0, false);}

    }
}

//3. FUNKCIJA - NAPON IZ D/A PRETVORNIKA//

void funkcija3(){

    pulseHIGH = 0;
    pulseLOW = 0;
    pulseTOTAL = 0;
    brojOkretaja = 0;

    pulseHIGH = pulseIn(pulsePin, HIGH);
    pulseLOW = pulseIn(pulsePin, LOW);
    pulseTOTAL = pulseHIGH + pulseLOW;
    brojOkretaja = ((60000000) / (pulseTOTAL * 60));

    if (brojOkretaja >= 1){
        if (brojOkretaja >= 2700){X = 275;}
        if ((brojOkretaja <= 2700) && (brojOkretaja >= 2400)){X = 250;}
        if ((brojOkretaja <= 2400) && (brojOkretaja >= 2100)){X = 230;}
        if ((brojOkretaja <= 2100) && (brojOkretaja >= 1800)){X = 195;}
        if ((brojOkretaja <= 1800) && (brojOkretaja >= 1500)){X = 170;}
        if ((brojOkretaja <= 1500) && (brojOkretaja >= 1250)){X = 145;}
        if ((brojOkretaja <= 1250) && (brojOkretaja >= 1000)){X = 125;}
        if ((brojOkretaja <= 1000) && (brojOkretaja >= 850)){X = 105;}
        if ((brojOkretaja <= 850) && (brojOkretaja >= 700)){X = 85;}
    }
}

```



```

if ((brojOkretaja <= 700) && (brojOkretaja >= 550)){X = 70;}
if ((brojOkretaja <= 550) && (brojOkretaja >= 450)){X = 55;}
if ((brojOkretaja <= 450) && (brojOkretaja >= 350)){X = 40;}
if ((brojOkretaja <= 350) && (brojOkretaja >= 250)){X = 30;}
if ((brojOkretaja <= 250) && (brojOkretaja >= 150)){X = 20;}
if ((brojOkretaja <= 150) && (brojOkretaja >= 50)){X = 15;}
if (brojOkretaja <= 50){X = 5;}

do{

    pulseHIGH = 0;
    pulseLOW = 0;
    pulseTOTAL = 0;

    pulseHIGH = pulseIn(pulsePin, HIGH);
    pulseLOW = pulseIn(pulsePin, LOW);
    pulseTOTAL = pulseHIGH + pulseLOW;

    brojOkretaja = 0;
    brojOkretaja = ((60000000) / (pulseTOTAL * 60)); // U OKRETAJIMA U
MINUTI//

    if (brojOkretaja >= nazivniOkretaji){
        skaliranje = 4095;
        dac.setVoltage(skaliranje, false);}
    else{
        skaliranje = map(brojOkretaja, 0, nazivniOkretaji, 0, 4095);
        dac.setVoltage(skaliranje, false);}

    X = X - 1;
    time1 = millis();

}while((X >= 0) && (digitalRead(7) == LOW) && (brojOkretaja >= 1));

napon = 0;
napon = (float)skaliranje / 819.0;
digitalWrite(13, HIGH);
lcd.display();
lcd.clear();
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("NAPON DAC:");
lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print(String(napon) + String(" [V ]"));}

else{

    timeR = millis() - time1;

    if (timeR <= 30000){

        dac.setVoltage(0, false);
        digitalWrite(13, HIGH);
        lcd.display();
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("NAPON DAC:");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(String(" 0 ") + String(" [V ]"));}
}

```

```

    if (timeR >= 30000){
        lcd.noDisplay();
        lcd.clear();
        digitalWrite(13, LOW);
        dac.setVoltage(0, false);}
    }
}

//2. FUNKCIJA - STRUJA IZ U/I PRETVORNIKA XTR110KP//

void funkcija4(){
    pulseHIGH = 0;
    pulseLOW = 0;
    pulseTOTAL = 0;
    brojOkretaja = 0;

    pulseHIGH = pulseIn(pulsePin, HIGH);
    pulseLOW = pulseIn(pulsePin, LOW);
    pulseTOTAL = pulseHIGH + pulseLOW;
    brojOkretaja = ((60000000) / (pulseTOTAL * 60));

    if (brojOkretaja >= 1){
        if (brojOkretaja >= 2700){X = 275;}
        if ((brojOkretaja <= 2700) && (brojOkretaja >= 2400)){X = 250;}
        if ((brojOkretaja <= 2400) && (brojOkretaja >= 2100)){X = 230;}
        if ((brojOkretaja <= 2100) && (brojOkretaja >= 1800)){X = 195;}
        if ((brojOkretaja <= 1800) && (brojOkretaja >= 1500)){X = 170;}
        if ((brojOkretaja <= 1500) && (brojOkretaja >= 1250)){X = 145;}
        if ((brojOkretaja <= 1250) && (brojOkretaja >= 1000)){X = 125;}
        if ((brojOkretaja <= 1000) && (brojOkretaja >= 850)){X = 105;}
        if ((brojOkretaja <= 850) && (brojOkretaja >= 700)){X = 85;}
        if ((brojOkretaja <= 700) && (brojOkretaja >= 550)){X = 70;}
        if ((brojOkretaja <= 550) && (brojOkretaja >= 450)){X = 55;}
        if ((brojOkretaja <= 450) && (brojOkretaja >= 350)){X = 40;}
        if ((brojOkretaja <= 350) && (brojOkretaja >= 250)){X = 30;}
        if ((brojOkretaja <= 250) && (brojOkretaja >= 150)){X = 20;}
        if ((brojOkretaja <= 150) && (brojOkretaja >= 50)){X = 15;}
        if (brojOkretaja <= 50){X = 5;}

        do{
            pulseHIGH = 0;
            pulseLOW = 0;
            pulseTOTAL = 0;

            pulseHIGH = pulseIn(pulsePin, HIGH);
            pulseLOW = pulseIn(pulsePin, LOW);
            pulseTOTAL = pulseHIGH + pulseLOW;

            brojOkretaja = 0;
            brojOkretaja = ((60000000) / (pulseTOTAL * 60)); // U OKRETAJIMA U
MINUTI//

            if (brojOkretaja >= nazivniOkretaji){
                skaliranje = 4095;
                dac.setVoltage(skaliranje, false);}
        }
    }
}

```

```

else{
    skaliranje = map(brojOkretaja, 0, nazivniOkretaji, 0, 4095);
    dac.setVoltage(skaliranje, false);}

X = X - 1;
time1 = millis();

}while((X >= 0) && (digitalRead(7) == LOW) && (brojOkretaja >= 1));

    napon = 0;
    struja = 0;
    napon = (float)skaliranje / 819.0;
    struja = ((float)4 * napon);
    digitalWrite(13, HIGH);
    lcd.display();
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("STRUJA DAC:");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(String(struja) + String(" [mA] "));}

else{

    timeR = millis() - time1;

    if (timeR <= 30000){

        dac.setVoltage(0, false);
        digitalWrite(13, HIGH);
        lcd.display();
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("STRUJA DAC:");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(String(" 0 ") + String(" [mA] "));}

    if (timeR >= 30000){

        lcd.noDisplay();
        lcd.clear();
        digitalWrite(13, LOW);
        dac.setVoltage(0, false);}
    }
}

//MJERNE JEDINICE - DODATAK FUNKCIJE 1. //
//OKRETAJA U MINUTI//

void jedinical(){

    if (brojOkretaja >= 1){

        digitalWrite(13, HIGH);
        lcd.display();
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("BROJ OKRETAJA:");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(String(brojOkretaja) + String(" [okr/min] "));}
}

```

```

if (brojOkretaja <= 1){

    dac.setVoltage(0, false);
    digitalWrite(13, HIGH);
    lcd.display();
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("BROJ OKRETAJA:");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(String(" 0 ") + String(" [okr/min] "));}
}

//OKRETAJA U SEKUNDI//

void jedinica2(){

    if (brojOkretaja >= 1){

        float brojOkretajaS = float(brojOkretaja) / 60.0;
        digitalWrite(13, HIGH);
        lcd.display();
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("BROJ OKRETAJA:");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(String(brojOkretajaS) + String(" [okr/s] "));}

    if (brojOkretaja <= 1){

        dac.setVoltage(0, false);
        digitalWrite(13, HIGH);
        lcd.display();
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("BROJ OKRETAJA:");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(String(" 0 ") + String(" [okr/s] "));}
}

//METARA U MINUTI//

void jedinica3(){

    if (brojOkretaja >= 1){

        float metarMin = (0.08 * 0.10472 * float(brojOkretaja) * 60);
        digitalWrite(13, HIGH);
        lcd.display();
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("BROJ OKRETAJA:");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(String(metarMin) + String(" [m/min] "));}

    else{

        dac.setVoltage(0, false);
        digitalWrite(13, HIGH);
        lcd.display();
        lcd.clear();

```

```

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("BROJ OKRETAJA:");
    lcd.setCursor(0, 1);
    lcd.print(String(" 0 ") + String(" [m/min] "));}
}

//METARA U SEKUNDI//

void jedinica4(){

    if (brojOkretaja >= 1){

        float metarS = (0.08 * 0.10472 * float(brojOkretaja));
        digitalWrite(13, HIGH);
        lcd.display();
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("BROJ OKRETAJA:");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(String(metarS) + String(" [m/s] "));}

    else{

        dac.setVoltage(0, false);
        digitalWrite(13, HIGH);
        lcd.display();
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("BROJ OKRETAJA:");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(String(" 0 ") + String(" [m/s] "));}
}

//NAZIVNA FUNKCIJA - POSTAVKE MJERAČA//

void nazivna(){

    do{

        if (digitalRead(8) == HIGH) { nazivnaBrzina = nazivnaBrzina - 50;}
        if (digitalRead(9) == HIGH) { nazivnaBrzina = nazivnaBrzina + 50;}
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(0, 0);
        lcd.print("NAZ. BRZINA: < >");
        lcd.setCursor(0, 1);
        lcd.print(String(nazivnaBrzina) + String(" [okr/min] "));
        delay(200);

    }while (digitalRead(7) == LOW);

    while (digitalRead(7) == HIGH){}
    nazivniOkretaji = nazivnaBrzina;

    do{

        lcd.clear();

        if ( digitalRead(8) == HIGH){ jedinica = jedinica + 1;}
        while (digitalRead(8) == HIGH) {}
    }
}

```

```

if (digitalRead(9) == HIGH){ jedinica = jedinica - 1;}
while (digitalRead(9) == HIGH){}

if (jedinica >= 5){jedinica = 1;}
if (jedinica <= 0){jedinica = 4;}

if (jedinica == 1){

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("ODABERI MJ. JED.");
    lcd.setCursor(6, 1);
    lcd.print("[OKR/MIN]");}

if (jedinica == 2){

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("ODABERI MJ. JED.");
    lcd.setCursor(6, 1);
    lcd.print("[OKR/S]");}

if (jedinica == 3){

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("ODABERI MJ. JED.");
    lcd.setCursor(6, 1);
    lcd.print("[M/MIN]");}

if (jedinica == 4){

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("ODABERI MJ. JED.");
    lcd.setCursor(6, 1);
    lcd.print("[M/S]");}

delay(20);}
while (digitalRead(7) == LOW);
}

```