

# UPRAVLJANJE BRZINOM VRTNJE MALOG ISTOSMJERNOG ELEKTROMOTORA KORIŠTENJEM ARDUINO RAZVOJNE PLATFORME

## SMALL ELECTRIC DC MOTOR SPEED CONTROL WITH ARDUINO DEVELOPMENT PLATFORM

*Nikola Korenić, Miroslav Horvatić*

Stručni članak

**Sažetak:** Mali istosmjerni elektromotori se često koriste u strojevima i uređajima. Najjednostavniji način upravljanja brzinom vrtnje istosmjernog elektromotora je promjena napona elektromotora bez mjerenja stvarne brzine vrtnje. U slučaju da je mehaničko opterećenje elektromotora nepoznato, upravljanje bez povratne veze ne može osigurati željenu promjenu brzine vrtnje elektromotora. Upravljanje brzinom vrtnje malog istosmjernog elektromotora uz korištenje povratne veze brzine vrtnje, prikazana u ovom radu, realizirano je korištenjem Arduino Uno razvojne pločice i digitalnog PID regulatora iz Arduino programske biblioteke. Realizirani su sklopovi za digitalno-analognu pretvorbu signala te pojačanje i odmak signala. Povratna veza brzine vrtnje je mjerena korištenjem malog istosmjernog elektromotora. Za odabrane parametre PID regulatora snimljeni su odzivi brzine vrtnje elektromotora. Pokazani su parametri PID regulatora koji daju zadovoljavajući odziv brzine vrtnje elektromotora.

**Ključne riječi:** upravljanje, mali istosmjerni elektromotor, Arduino, PID regulator

Professional paper

**Abstract:** Small electric DC motors are often used in machines and devices. Simple way to control DC motor speed is by changing motor voltage without measuring of motor speed. In case of unknown motor mechanical load, open loop control cannot ensure good speed control. Closed loop speed control of small DC motor, shown in this article, is implemented with Arduino Uno development board and digital PID regulator from an Arduino program library. Digital-analog conversion, amplification and signal offset circuits are implemented. Speed feedback is measured using an auxiliary small DC motor. DC motor speed variation is recorded for different parameters of PID regulator. For satisfactory DC motor speed response, parameters of PID regulator are shown.

**Key words:** control, small DC motor, Arduino, PID regulator

## 1. UVOD

Zbog svoje niske cijene i jednostavnog upravljanja mali istosmjerni elektromotori se često koriste u različitim strojevima i uređajima. Primjeri upotrebe malih istosmjernih elektromotora su stolni uređaji za ispis i DVD uređaji osobnih računala. U takvim uređajima se može nalaziti i nekoliko malih istosmjernih elektromotora. Mnogi drugi strojevi i uređaji također koriste male istosmjerne elektromotore za transport i pozicioniranje pokretnih dijelova. Najjednostavniji način upravljanja brzinom vrtnje istosmjernog elektromotora je promjena napona koji se dovodi na njegov namot bez mjerenja stvarne brzine vrtnje vratila elektromotora. Ovakav način upravljanja zove se upravljanje bez povratne veze te se može koristiti kada je mehaničko opterećenje elektromotora unaprijed poznato ili konstantno. U slučaju da je mehaničko opterećenje nepoznato, upravljanje bez povratne veze ne može osigurati željenu promjenu brzine vrtnje elektromotora. Zbog toga je potrebno koristiti zatvoreni sustav upravljanja sa mjernim članom brzine vrtnje ili neku

složeniju metodu procjene stvarne brzine vrtnje elektromotora. U zatvorenom sustavu upravljanja informacija o stvarnoj brzini vrtnje elektromotora prosljeđuje se regulatoru koji nastoji osigurati da stvarna brzina vrtnje što bolje slijedi zadanu brzinu vrtnje elektromotora. Najčešća vrsta regulatora koja se pri tome koristi je tzv. PID regulator. Osim za upravljanje brzinom vrtnje elektromotora, ova vrsta regulatora danas se standardno koristi i za regulaciju raznih industrijskih procesnih veličina, poput temperature ili tlaka.

Upravljanje brzinom vrtnje malog istosmjernog elektromotora, koje će biti prikazano u ovom radu, realizirati će se korištenjem digitalnog PID regulatora iz „PID“ programske biblioteke Arduino razvojne platforme. Arduino razvojna platforma sastoji se od Arduino programske razvojne okoline i Arduino Uno razvojne pločice. Realizirati će se i opisani dodatni sklop za filtriranje naponskog signala brzine vrtnje elektromotora, digitalno-analogni pretvornik te stupanj za naponsko pojačanje i naponski odmak izlaznog signala PID regulatora. Izvršiti će se opis svih dijelova sustava upravljanja brzinom vrtnje malog istosmjernog

elektromotora. U prikazanom sustavu koristiti će se dva jednaka istosmjerna elektromotora. Prvi elektromotor će služiti kao pogonski elektromotor čijom se brzinom vrtnje upravlja. Drugi elektromotor će biti vratilom povezan sa prvim elektromotorom, a služiti će za mjerenje brzine vrtnje pogonskog elektromotora, dakle kao tahogenerator. Izlazni napon tahogeneratora proporcionalan je brzini vrtnje pogonskog elektromotora. Tahogenerator sa pripadajućim naponskim filtrom nalazi se u negativnoj povratnoj vezi sustava upravljanja brzinom vrtnje malog istosmjernog elektromotora.

Za upravljanje malim istosmjernim elektromotorom biti će snimljeni odzivi brzine vrtnje u slučaju odabira nekoliko skupova parametara digitalnog PID regulatora. Promjenom parametara PID regulatora pokušati će se naći parametri koji daju zadovoljavajući odziv brzine vrtnje elektromotora.

## 2. PID REGULATOR I IZ NJEGA IZVEDENI TIPOVI REGULATORA

Prvi PID regulatori realizirali su se kao pneumatski, mehanički i hidraulički regulatori u analognoj tehnici. Pojavom relativno jeftinih i točnih elektroničkih operacijskih pojačala PID regulatori se počinju raditi u analognoj elektroničkoj izvedbi. Osnovni nedostaci analognih elektroničkih PID regulatora su promjena parametara regulatora uslijed starenja i utjecaja okoline na pojedine elektroničke elemente regulatora te otežana modifikacija strukture i parametara regulatora. Današnja digitalna računala omogućavaju relativno pouzdanu i jeftinu realizaciju PID regulatora uz jednostavnu programsku modifikaciju strukture i parametara regulatora. Zbog toga se PID i ostale strukture regulatora danas realiziraju uglavnom programski, unutar neke izvedbe digitalnog računala.

Kontinuirani PID regulator sadrži tri komponente; proporcionalnu (*up*), integralnu (*ui*) i derivacijsku (*ud*) komponentu, a opisan je jednadžbama (1) i (2).

$$u(t) = up(t) + ui(t) + ud(t) \quad (1)$$

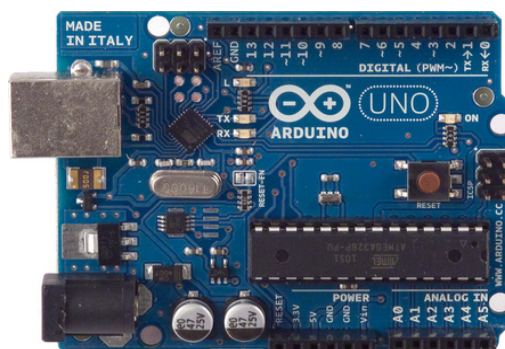
$$u(t) = Kp e(t) + Ki \int_{t_0}^t e(t) dt + Kd \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

Svaka komponenta regulatora ima odgovarajući parametar pojačanja *Kp*, *Ki* i *Kd*. Osim navedenog zapisa jednadžbe (2), često se koristi zapis jednadžbe koji sadrži vremenske konstantu  $Ti=1/Ki$  u integralnom članu i vremensku konstantu  $Td=Kd$  u derivacijskom članu.

Odabirom parametara pojedinih komponenata PID regulatora može se dobiti više podvrsta PID regulatora, kao što su npr. P, PI, ili PD regulator. Pravilnim odabirom konstanti proporcionalnog, integralnog i derivacijskog djelovanja regulatora može se dobiti zadovoljavajuća točnost, stabilnost i brzina reakcije u velikom broju regulacijskih sustava [1]. Dobro podešen upravljački sustav koji sadrži PID regulator trebao bi dati brzi odziv regulirane veličine, uz prihvatljive oscilacije tijekom prijelazne pojave i dovođenje trajnog regulacijskog odstupanja na nulu.

## 3. ARDUINO RAZVOJNA PLATFORMA

Arduino razvojna platforma je platforma „otvorenog koda“ koja služi za razvoj i testiranje elektroničkih sklopova. Sastoji se od Arduino programske razvojne okoline (IDE, engl. Integrated development environment) i Arduino razvojne pločice na kojoj se nalazi Atmelov AVR mikrokontroler. U konkretnom projektu upravljanja brzinom vrtnje malog istosmjernog elektromotora korištena je Arduino Uno razvojna pločica te Arduino programska razvojna okolina. Arduino Uno razvojna pločica prikazana na slici 1, temelji se na AVR ATmega328 mikrokontroleru proizvođača Atmel. Razvojna pločica posjeduje 20 ulazno/izlaznih pinova, generator digitalnog takta 16MHz, USB priključak za povezivanje sa osobnim računalom, reset tipke i priključaka za napajanje vanjskim istosmjernim (DC) naponskim izvorom.



Slika 1. Arduino Uno razvojna pločica [2]

Umjesto napajanja korištenjem vanjskog istosmjernog naponskog izvora, razvojna pločica se može napajati preko USB sučelja spojenog na osobno računalo pa je na taj način odmah omogućena i serijska komunikacija za upisivanje programa u memoriju mikrokontrolera.

Osnovne tehničke karakteristike Arduino Uno razvojne pločice navedene su u tabeli 1.

Tabela 1. Tehničke karakteristike Arduino Uno razvojne pločice [2]

Mikrokontroler na pločici	ATmega 328
Nazivni napon napajanja	5V
Ulazni napon (preporučeni)	7-12V
Ulazni napon (ograničen)	6-20V
Broj digitalnih ulaz/izlaz pinova	14
Broj analognih ulaznih pinova	6
Maksimalna istosmjerna struja po ulaz/izlaz pinu	40 mA
Maksimalna istosmjerna struja na 3.3 V pinu	50 mA
Flash memorija	32 KB
SRAM	2 KB
EEPROM	1 KB
Takt sata	16 MHz

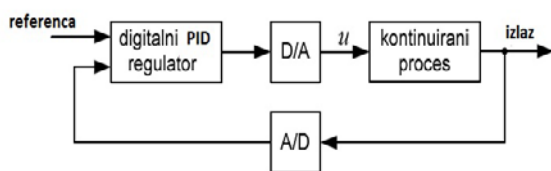
Unutar Arduino programske razvojne okoline koristi se C/C++ programski jezik, a programski kod napisan za upravljanje mikrokontrolerom naziva se „sketch“. Osim u Arduino razvojnoj okolini razvojna pločica se može

programirati i originalnim AVR alatima, kao što je AVR Studio. Glavna razlika između AVR Studia i Arduino razvojne okoline je korištenje automatiziranih funkcijskih prototipova, pisanih u programskom jeziku C, koji se tijekom prevođenja programa pretvaraju u čiste AVR C/C++ naredbe pa je time olakšano pisanje programa.

#### 4. DIGITALNI PID REGULATOR

Digitalni PID regulator realizira se korištenjem digitalnog procesnog računala koje ciklički izvršava odgovarajući algoritam. Procesno računalo može biti mikrokontrolersko računalo, programibilni logički kontroler (PLC, engl. Programmable Logic Controller) ili osobno računalo izvedeno kao „stolni uređaj“. Kod realizacije digitalnog PID regulatora potrebno je računalo opremiti odgovarajućim ulazno izlaznim karticama i programskom potporom.

Digitalni PID regulator na početku svakog ciklusa uzima vrijednosti sa ulaza A/D pretvornika i sa ulaza referentne veličine. Na temelju tih vrijednosti i prethodnog rezultata upravljanja računa se buduća vrijednost upravljačkog signala  $u$ . Izračunata vrijednost upravljačkog signala šalje se digitalno-analognom (D/A) pretvorniku koji pretvara digitalnu upravljačku vrijednost u analogni upravljački signal. Analogni upravljački signal se dalje koristi za upravljanje kontinuiranim procesom. Na slici 3 prikazan je prethodno objašnjeni princip rada digitalnog sustava upravljanja koji sadrži digitalni PID regulator.



Slika 2. Princip rada digitalnog sustava upravljanja [3]

Digitalni PID regulator može se dobiti diskretizacijom analognog PID regulatora [4]. Postupkom diskretizacije nastoji se postići da vladanje digitalnog regulatora što više slični vladanju analognog regulatora. Digitalni PID regulator ponašati će se slično analognom PID regulatoru ako je regulator ispravno projektiran i ako je njegova brzina uzimanja uzoraka i obrade signala dovoljno velika.

##### 4.1. Diskretizacija jednadžbi kontinuiranog PID regulatora

Diskretizacijom jednadžbi kontinuiranog PID regulatora (1), (2) uz vrijeme uzorkovanja  $T$  i korištenjem realnog oblika derivacijskog člana koji ima parametre  $T_d$  i  $T_v$ , dobivaju se diskretne jednadžbe PID regulatora (3), (4), (5) i (6) [3].

$$U(k) = Up(k) + Ui(k) + Ud(k) \quad (3)$$

$$Up(k) = Kp e(k) \quad (4)$$

$$Ui(k) = Ui(k-1) + \frac{KpT}{Ti} e(k-1) \quad (5)$$

$$Ud(k) = \left(1 - \frac{T}{Tv}\right) Ud(k-1) + \frac{KpTd}{Tv} (e(k) - e(k-1)) \quad (6)$$

Navedeni diskretni oblici jednadžbi PID regulatora implementirani su unutar „PID“ programske biblioteke koja će se koristiti kod realizacije upravljanja Arduino razvojnom pločicom.

##### 4.2. Preporuke za odabir vremena uzorkovanja PID regulatora

Kako bi digitalne izvedbe regulatora na svojim izlazima dale signale poput analognih izvedbi regulatora vrijeme uzorkovanja i obrade signala regulatora mora biti dovoljno kratko. Iz navedenog se može zaključiti da je vrijeme uzorkovanja bitan parametar digitalnih regulatora te ga je potrebno pravilno odabrati. Uzorkovanjem se gube informacije o iznosu signala procesa između trenutaka uzorkovanja te se na taj način u sustav unosi pogreška uzorkovanja. Nadalje, svaki uzorak signala zapisuje se konačnim brojem bitova pa se zbog zapisa uzorka konačnim brojem bitova javlja i pogreška kvantizacije. Prilikom izbora vremena uzorkovanja potrebno je [4]:

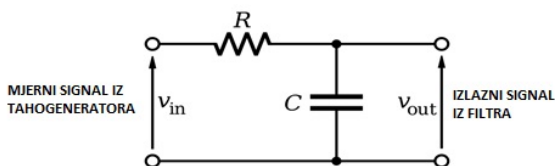
- nastojati da vrijeme uzorkovanja bude što kraće
- paziti da vrijeme uzorkovanja nije premalo da se ne bi javile greške u aritmetici procesora
- uzeti u obzir zahtijevanu kvalitetu vladanja sustava
- uzeti u obzir dinamiku i fizikalna ograničenja procesa
- uzeti u obzir frekvencijski spektar poremećajnih veličina
- uzeti u obzir karakteristike izvršnih članova
- uzeti u obzir karakteristike mjernih članova

#### 5. REALIZACIJA SUSTAVA UPRAVLJANJA

Digitalno upravljanje brzinom vrtnje malog istosmjernog elektromotora realizirana je korištenjem dva mala istosmjernog elektromotora, Arduino Uno razvojne pločice, filtra mjernog signala, izlaznog digitalno-analognog pretvornika te izlaznog stupnja za pojačanje i odmak naponskog signala. Prvi mali istosmjerni elektromotor se koristi kao upravljeni elektromotor, a drugi elektromotor služi kao mjerni član brzine vrtnje vratila prvog elektromotora. Izlazni napon drugog elektromotora proporcionalan je brzini vrtnje upravljanog elektromotora, tj. drugi elektromotor radi kao tahogenerator. Unutar mikrokontrolera Arduino Uno razvojne pločice nalazi se programska realizacija digitalnog PID regulatora koji vrši upravljanje brzinom vrtnje elektromotora. Programskoj realizaciji digitalnog PID regulatora iz „PID“ Arduino biblioteke zadavati će se parametri proporcionalne, integralne i derivacijske komponente. U nastavku će biti opisana sklopovska i programska realizacija pojedinih dijelova sustava upravljanja brzinom vrtnje malog istosmjernog elektromotora.

## 5.1. Filtar mjernog signala

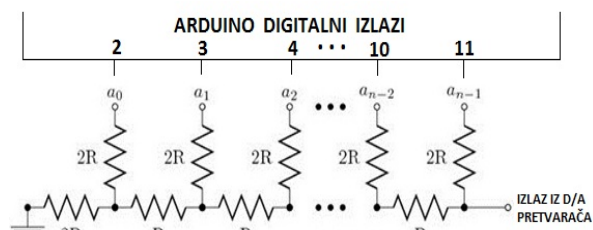
Filtar mjernog signala smanjuje mjerni šum u naponskom signalu mjernog člana brzine vrtnje elektromotora. Ovaj filter se koristi kako mjerni signali koji imaju veliku razinu šuma i smetnje ne bi pogoršali ponašanje sustava upravljanja. Kao filter mjernog signala odabran je jednostavni pasivni niskopropusni RC filter prvog reda električne sheme prikazane slikom 3.



Slika 3. Filtar mjernog signala [5]

## 5.2. Digitalno analogni pretvornik izlaznog signala PID regulatora

Mikrokontroler koji se nalazi na Arduino razvojnoj pločici nema ugrađen digitalno-analogni pretvornik. Na razvojnoj pločici također ne postoji digitalno analogni pretvornik. Kako bi se signali sa digitalnih pinova mikrokontrolera pretvorili u analogni upravljački signal izrađen je 10 bitni ljestvičasti R2R digitalno-analogni pretvornik [6]. Na slici 4 prikazana je električna shema n-bitnog ljestvičastog R2R digitalno-analognog pretvornika.



Slika 4. Ljestvičasti R2R n-bitni digitalno-analogni pretvornik [6]

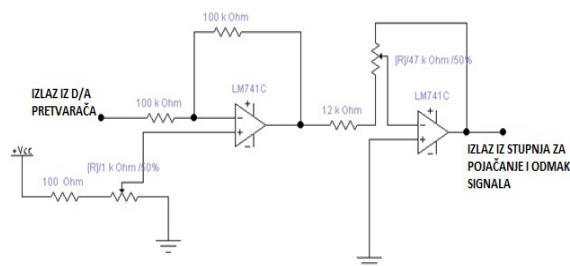
Bitovi  $a_0$  do  $a_{n-1}$  označavaju digitalne ulaze D/A pretvornika, gdje je  $a_0$  najmanje značajan bit, a  $a_{n-1}$  najznačajniji bit digitalne vrijednosti koja dolazi sa digitalnih izlaza Arduino razvojne pločice. Digitalni izlazi Arduino pločice na slici su označeni brojevima od 2 do 11. Analogni naponi koji se mogu dobiti na izlazu ovakvog pretvornika ovise o naponu visoke razine pojedinog izlaza mikrokontrolera i broju korištenih bitova. [6]

## 5.3. Stupanj za pojačanje i odmak signala

Analogni signal koji se dobiva na izlazu digitalno-analognog pretvornika može se mijenjati samo u pozitivnom području, a ograničen je na maksimalni iznos napona 5V. Kako bi se dobio unipolarni naponski signal potreban za regulaciju različitih izvršnih članova i omogućilo namještanje naponskih razina upravljačkog signala, na izlaz digitalno-analognog pretvornika spojen

je stupanj za pojačanje i odmak signala prikazan shemom na slici 5.

Stupanj za pojačanje i odmak signala sastoji se od dva operacijska pojačala i otpornika kojima je definirano pojačanje i naponski odmak signala [7]. Promjenjivim otpornikom iznosa 47 kΩ namješta se pojačanje signala, a promjenjivim otpornikom iznosa 1 kΩ naponski odmak izlaznog signala.



Slika 5. Stupanj za pojačanje i odmak signala [7]

## 5.4. Upravljanje digitalnim PID regulatorom

Podešavanje PID regulatora i upravljanje PID regulatorom izvedeno je u Arduino razvojnoj okolini korištenjem „PID“ biblioteke. Podešavanje i upravljanje regulatorom može se podijeliti u nekoliko dijelova.

Prvi dio je definiranje varijabli i inicijalizacija parametara PID regulatora prikazana na slici 6.

```
double Setpoint, Input, Output; // Definiranje varijabli
int inputPin=3; // Neg. pov. veza
int val = 0; // Varijabla za pohranu inputa
int izlazPinovi[] = {2,3,4,5,6,7,8,9,10,11}; // Izlazni Pinovi 0,1->(Rx,Tx)
int brojPinova = 10;
unsigned long serialTime; // Vrijeme serijske komunik.
PID myPID(&Input, &Output, &Setpoint,2,1,0, DIRECT); //inicijaliziranje vrijednosti
//Kp=2,Ki=1,Kd=0,smjer DIR.
```

Slika 6. Definiranje varijabli i inicijalizacija parametara PID regulatora

Drugi dio upravljanja digitalnim PID regulatorom je inicijalizacija parametara i modova pinova prikazana na slici 7.

```
void setup()
{
  Serial.begin(9600); // Otvaranje serijske komunikacije
  for (int pin = 0; pin < brojPinova; pin++){ // Postavljanje pinova u izlazne
    pinMode(izlazPinovi[pin], OUTPUT);
  }

  myPID.SetOutputLimits(0, 1023); // Postavljanje limita izlaza
  myPID.SetSampleTime(1); // Postavljanje vremena uzorkovanja - 1 ms
  Input = analogRead(inputPin); // Postavljanje ulazne vrijednosti
  Setpoint = 300; // Postavljanje referentne vrijednosti
  myPID.SetMode(AUTOMATIC); // Uključivanje PID regulatora
}
```

Slika 7. Inicijalizacija parametara i modova pinova

Treći dio upravljanja digitalnim PID regulatorom je beskonačna petlja unutar koje se izvršavaju sljedeći koraci:

1. Čitanje signala kojim se definira period uzrokovanja
2. Čitanje analognog ulaza
3. Računanje upravljačkog signala
4. Slanje upravljačkog signala na D/A pretvarač
5. Serijska komunikacija, postavljanje parametara
6. Povratak na prvi korak

Izvršavanje beskonačne petlje digitalnog PID upravljanja prikazano je na slici 8.

```
void loop()
{
  Input = analogRead(inputPin);           // Čitanje analognog ulaza
  myPID.Compute();                       // Rač. upravljačkog signala
  val=int(Output);                       // Double --> Int

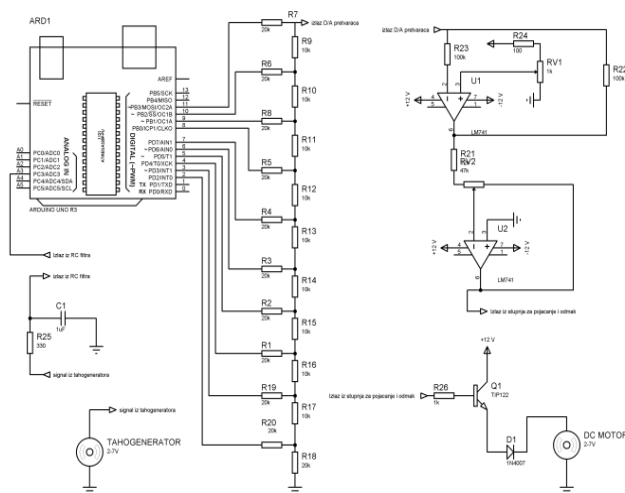
  PORTD = (val << 2);                    // Slanje signala na D/A
  PORTB = (val >> 6);                    // val --> PORTB

  if(millis()>serialTime)                // Serijska komunikacija
  {
    SerialReceive();
    SerialSend();
    serialTime+=500;
  }
}
```

**Slika 8.** Izvršavanje beskonačne petlje digitalnog PID upravljanja

## 6. ISPITIVANJE UPRAVLJANJA BRZINOM VRTNJE MALOG ISTOSMJERNOG ELEKTROMOTORA

Sustav upravljanja brzinom vrtnje malog istosmjernog elektromotora prikazan je na slici 9.



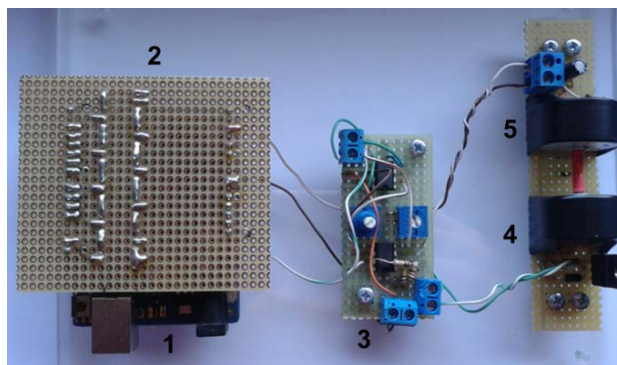
**Slika 9.** Sustav upravljanja brzinom vrtnje malog istosmjernog elektromotora

Na slici je Arduino razvojna pločica označena sa ARD1, a dobro se vidi i način spajanja razvojne pločice sa otpornicima digitalno-analognog pretvornika te ostalim dijelovima regulacijskog sustava. Regulirani istosmjerni elektromotor na slici ima oznaku DC MOTOR. Vratilo tog pogonskog elektromotora spojeno je s vratilom identičnog elektromotora koji se koristi u povratnoj vezi regulacijskog sustava kao mjerni član brzine vrtnje. Taj motor koji služi kao mjerni član brzine vrtnje označen je natpisom TAHOGENERATOR. U opisanom sustavu korišteni su mali istosmjerni elektromotori oznake „RF300EA“ sljedećih karakteristika [8]:

- Naponsko radno područje: 2.8 V– 7 V
- Nazivni napon: 3.9 V
- Nazivna brzina bez tereta: 4400 okr/min
- Nazivna struja bez tereta: 0.021 A

Izlazni naponski signal iz tahogeneratora vodi se na pasivni RC filtar prvog reda sastavljen od komponenata R25 i C1.

Na slici 10 prikazan je sastavljeni sustav upravljanja brzinom vrtnje malog istosmjernog elektromotora. Broj 1 nalazi se ispod Arduino razvojne pločice. Iznad tiskane pločice na kojoj je otpornicima realiziran ljestvičasti R2R digitalno-analogni pretvornik nalazi se broj 2. Broj 3 se nalazi ispod tiskane pločice stupnja za pojačanje i odmak signala. Lijevo od pogonskog istosmjernog elektromotora sa pripadnim tranzistorom nalazi se broj 4. Istosmjerni elektromotor koji služi kao tahogenerator označen je brojem 5 sa lijeve strane.



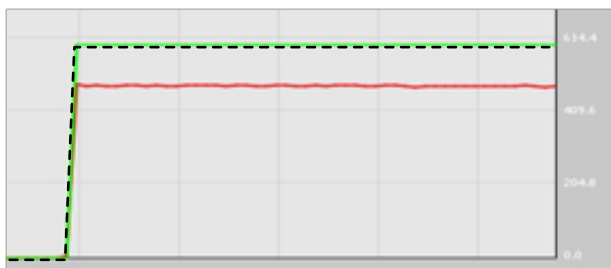
**Slika 10.** Sastavljeni sustav upravljanja brzinom vrtnje malog istosmjernog elektromotora

Nakon sastavljanja sustava upravljanja prema slici 9 pristupilo se ispitivanju rada sustava.

### 6.1. Upravljanje uz različite iznose parametara regulatora

U nastavku će se ispitati upravljanje brzine vrtnje malog istosmjernog elektromotora u slučaju različitih iznosa parametara PID regulatora. Upravljanje će se prikazati promatranjem odziva brzine vrtnje elektromotora uz različite iznose proporcionalnog, integracijskog i derivacijskog pojačanja regulatora. Iznosi pojačanja i referentna vrijednost regulatora zadaju su korištenjem „open-source“ programa Processing [9]. Za svaki iznos parametara PID regulatora na istoj će slici crtkano biti prikazana vremenska promjena referentnog signala brzine vrtnje, a punom crtom promjena signala izmjerene brzine vrtnje elektromotora. Na svim slikama na osi x nalazi se vrijeme, a na osi y broj koji odgovara odgovarajućoj brzini vrtnje.

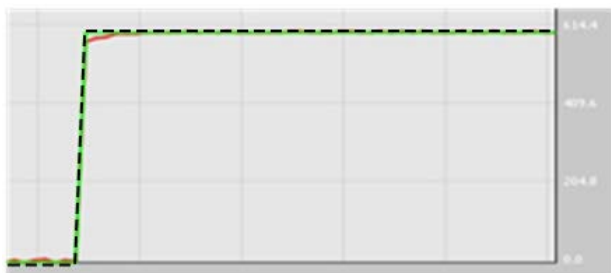
Najprije će se promotriti upravljanje uz postojanje samo proporcionalne komponente PID regulatora. Parametri pojačanja proporcionalne, integralne i derivacijske komponente u ovom slučaju iznose  $K_p = 1$ ,  $K_i = 0$ ,  $K_d = 0$ . Odzivi referentnog i izmjerene signala brzine vrtnje uz navedene parametre prikazani su na slici 11.



**Slika 11.** Odzivi signala brzine vrtnje uz  $K_p = 1$ ,  $K_i = 0$ ,  $K_d = 0$ .

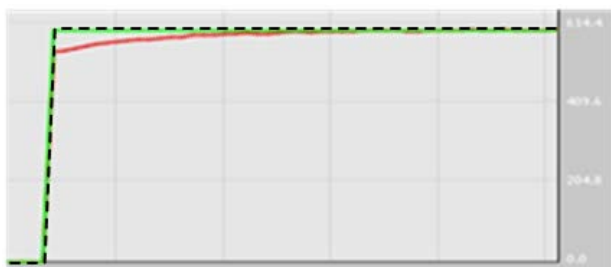
Iz slike se vidi da zbog nepostojanja integralne komponente regulatora postoji trajno regulacijsko odstupanje između referentnog i izmjerenog signala brzine vrtnje. Može se zaključiti da ovakva struktura regulatora nije pogodna za upravljanje brzinom vrtnje elektromotora.

Sljedeći slučaj koji će se razmotriti je upravljanje uz postojanje proporcionalne i integralne komponente regulatora. Odabrani su parametri pojačanja proporcionalne, integralne i derivacijske komponente koji iznose  $K_p = 2$ ,  $K_i = 1$ ,  $K_d = 0$ . Odzivi referentnog i izmjerenog signala brzine vrtnje uz navedene parametre prikazani su na slici 12.



**Slika 12.** Odzivi signala brzine vrtnje uz  $K_p = 2$ ,  $K_i = 1$ ,  $K_d = 0$ .

Iz slike je vidljivo da integracijski dio korištenog PI regulatora potpuno uklanja trajno regulacijsko odstupanje. Smanjenjem integracijskog pojačanja  $K_i$  dobije se sporiji odziv sustava pa je takav odziv uz  $K_i = 0.25$  prikazan na slici 13.



**Slika 13.** Odzivi signala brzine vrtnje uz  $K_p = 2$ ,  $K_i = 0.25$ ,  $K_d = 0$ .

I u ovom slučaju integracijska komponenta PI regulatora u potpunosti uklanja regulacijsko odstupanje.

Posljednji slučaj koji će se razmotriti je primjena proporcionalne i derivacijske komponente PID regulatora. Dobivena PD struktura neće moći ukloniti trajno regulacijsko odstupanje, a derivacijska komponenta regulatora još će dodatno pojačati šum

prisutan u signalu. Uz parametre regulatora  $K_p = 2$ ,  $K_i = 0$ ,  $K_d = 0.2$  navedena PD struktura daje odzive brzine vrtnje prikazane na slici 14.



**Slika 14.** Odzivi signala brzine vrtnje uz  $K_p = 2$ ,  $K_i = 0$ ,  $K_d = 0.2$ .

Iz slike se vidi da derivacijska komponenta regulatora pojačava šum i uzrokuje oscilacije brzine vrtnje elektromotora. Prikazane oscilacije brzine vrtnje nisu poželjne pa se može zaključiti da PD struktura regulatora nije pogodna za upravljanje promatranim sustavom.

Navedeni primjeri pokazuju da je od svih ispitanih struktura PID regulatora za upravljanje istosmjernog elektromotora najbolje upotrijebiti PI strukturu regulatora sa iznosima parametara  $K_p = 2$  i  $K_i = 1$ .

## 6.2. Kompenzacija djelovanja momenta tereta

Djelovanje momenta tereta na vratilo pogonskog elektromotora koji nije upravljan u zatvorenoj petlji, izazvalo bi smanjenje brzine vrtnje elektromotora. Zbog toga se u ovom radu koristi upravljanje u zatvorenoj petlji koje i u slučaju djelovanja momenta tereta može osigurati željenu brzinu vrtnje elektromotora. Navedena kompenzacija djelovanja momenta tereta može se dobro ilustrirati djelovanjem momenta tereta na vratilo pogonskog elektromotora kako je opisano u nastavku. Moment tereta koji se koristi u pokusu dobiven je iznenadnim pritiskom na vratilo elektromotora koje se vrti konstantnom brzinom. U pokusu je korištena prethodno navedena PI struktura regulatora koja ima iznose parametara  $K_p = 2$  i  $K_i = 1$ . Na slici 15 prikazan je odziv signala brzine vrtnje elektromotora prije i nakon trenutka  $t_0$  od kojeg je počelo djelovanje konstantnog momenta tereta.



**Slika 15.** Kompenzacija djelovanja momenta tereta

Iz dobivenog odziva vidljivo je da sustav upravljanja nakon početnog propada brzine vrtnje uspješno kompenzira djelovanje momenta tereta i vraća brzinu vrtnje na zadani iznos. Navedeni odzivi pokazuju da je

uz prikladno odabranu strukturu i parametre regulatora moguće zadovoljavajuće upravljati brzinom vrtnje malog istosmjernog elektromotora.

## 7. ZAKLJUČAK

Upravljanje bez povratne veze ne može osigurati željenu brzinu vrtnje elektromotora ako nije poznata promjena momenta tereta koji djeluje na vratilo. Kako bi se dobila željena brzina vrtnje u slučaju djelovanja nepoznatog momenta tereta, koriste se zatvoreni sustavi upravljanja. Takvi sustavi upravljanja imaju povratnu vezu pomoću koje dobivaju informacije o brzini vrtnje elektromotora. Informacije o brzini vrtnje se mogu dobiti direktnim mjerenjem na vratilu elektromotora ili procjenom na temelju mjerenja njegovih električnih veličina.

U radu je prikazana realizacija zatvorenog sustava upravljanja brzinom vrtnje malog istosmjernog elektromotora korištenjem Arduino Uno razvojne pločice. Upravljanje se vrši korištenjem PID regulatora definiranog u „PID“ programskoj biblioteci Arduino razvojne platforme. Povratna veza brzine vrtnje realizirana je malim istosmjernim elektromotorom koji se koristi kao mjerni član brzine vrtnje pogonskog elektromotora. Za mjerni član brzine vrtnje realiziran je pripadni niskopropusni filter. Na temelju realiziranog sklopa digitalno-analognog pretvornika pokazano je da se i uz relativno malo elektroničkih komponenata može realizirati digitalno-analognu pretvorbu digitalnih signala mikrokontrolera.

Snimljeni su eksperimentalni odzivi za različite vrijednosti proporcionalnog ( $K_p$ ), integralnog ( $K_i$ ) i derivacijskog ( $K_d$ ) pojačanja korištenog PID regulatora. Na temelju snimljenih odziva određeni su zadovoljavajući parametri pojačanja regulatora koji se mogu koristiti za upravljanje malim istosmjernim elektromotorom. Zaključeno je da se zadovoljavajući odzivi brzine vrtnje elektromotora dobivaju uz parametre PID regulatora  $K_p=2$ ,  $K_i=1$ ,  $K_d=0$ .

## 8. LITERATURA

- [1] Vukić, Z.; Kuljača, Lj.: Automatsko upravljanje - analiza linearnih sustava, Kigen, Zagreb, 2004.
- [2] <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardUno> (Dostupno: 02.03.2015)
- [3] Cupec, R.: Diskretni sustavi upravljanja, Elektrotehnički fakultet Osijek- nastavni materijal, Zavod za automatiku i procesno računarstvo, Osijek, 2008.
- [4] Grafina, I.: Realizacija proporcionalno integralno derivacijskog regulatora korištenjem mikrokontrolera, Veleučilište Varaždin, završni rad br. 298/EL/2013
- [5] [http://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass\\_filter](http://en.wikipedia.org/wiki/Low-pass_filter) (Dostupno: 02.03.2015)
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/Resistor\\_ladder](http://en.wikipedia.org/wiki/Resistor_ladder) (Dostupno: 02.03.2015)

- [7] <http://www.scienceprog.com/avr-dds-signal-generator-v20/> (Dostupno: 02.03.2015)
- [8] <http://www.kysanelectronics.com/graphics/RF-300EA-1D390.pdf> (Dostupno: 02.03.2015)
- [9] <https://www.processing.org/download/> (Dostupno: 02.03.2015)

Kontakt autora:

**Nikola Korenić**, student  
Sveučilište Sjever  
nikorenice@unin.hr

**Miroslav Horvatić**, dipl. ing.  
Sveučilište Sjever  
104. brigade 3  
42000 Varaždin  
miroslav.horvatic@unin.hr