

UNIVERZITET U BEOGRADU  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET



TRAKTOR  
Diplomski rad

Mentor:  
Dr Radivoje Đurić, profesor

Kandidat:  
David Milovanović, 2016/0274

Beograd, Septembar 2022.

# Sadržaj

1	Uvod . . . . .	2
1.1	Analogni sistemi automatskog upravljanja . . . . .	2
2	Motor stalne struje . . . . .	2
2.1	Princip funkcionisanja . . . . .	2
2.2	Odskočni odziv . . . . .	3
2.3	Enkoder . . . . .	3
2.3.1	Konvertor učestanosti u napon . . . . .	4
2.3.2	Konvertor učestanosti u napon sa NF filtrom na izlazu . . . . .	4
2.4	Negativna povratna sprega . . . . .	5
2.5	II regulator . . . . .	5
2.6	Pojačavač snage . . . . .	6
2.6.1	Pojačavač snage u klasi B . . . . .	6
2.6.2	Pojačavač snage u klasi B sa povratnom spregom . . . . .	6
2.6.3	Pojačavač snage u klasi AB sa negativnom povratnom spregom . . . . .	7
3	Aparatura i merenja . . . . .	8
3.1	Merenja . . . . .	8
3.1.1	Merenje odskočnog odziva jednosmernog motora iz stanja mirovanja . . . . .	8
3.2	Obrada rezultata merenja . . . . .	9
3.3	Merenje karakteristika pretvarača učestanosti . . . . .	10

# Spisak slika

1	Principijalna šema jednosmernog motora. . . . .	2
2	Modelovana karakteristika jednosmernog motora. . . . .	3
3	Enkoder. . . . .	3
4	Konvertor frekvencije u napon. . . . .	4
5	Opšta struktura sistema sa negativnom povratnom spregom. . . . .	5
6	Blok šema II regulatora. . . . .	6
7	Pojačavač snage u klasi B. . . . .	6
8	Prenosna karakteristika pojačavača u klasi B. . . . .	6
9	Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spregom. . . . .	7

10	Pojačavač snage u klasi AB. . . . .	7
11	Prenosna karakteristika pojačavača u klasi AB. . . . .	7
12	Šema za merenje odziva jednosmernog motora. . . . .	8
13	Određivanje optimalnog modela motora na osnovu merenog odskočnog odziva. . . . .	9
14	Vremenski oblik signala na izlazu enkodera. . . . .	10
15	Vremenski zavisnost frekvencije signala na izlazu enkodera. . . . .	10
16	Prenosna karakteristika konvertora frekvencije u napon. . . . .	11
17	Vremenski dijagram signala na izlazu konvertora frekvencije u napon bez i sa filtrom na izlazu. . . . .	11
18	Modifikovana šema upravljanja jednosmernog motora uz pomoć povratne sprege. . . . .	12

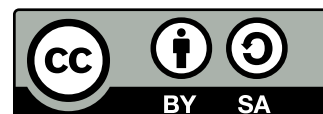
## Sažetak

Analizator mreža je jedan od osnovnih mernih instrumenata za rad u mikrotalasnom području učestanosti. U ovom radu su uvedeni i objašnjeni osnovni principi funkcije tog instrumenta. Realizovana su dva instrumenta radi ilustracije određenih teorijskih rezultata.

Rad je organizovan u pet odeljaka. U uvodu su uvedeni opšti pojmovi koji se odnose na Mikrotalasnu tehniku i merenja. U odeljku „Karakterizacija mreža na mikrotalasnim učestanostima“ uveden je i definisan pojam parametara rasejanja, kao i principi merenja. U odeljku „Analizator mreža“ je definisana osnovna struktura instrumenta i njegove komponente, kao i parametri koji ih definišu. U istom poglavlju su navedeni dobijeni rezultati za kalibraciju senzora nivoa snage koji se koriste u ovom radu i opisana je arhitektura mernog sistema sa strane upravljanja. U odeljku „Rezultati i diskusija“ su navedeni rezultati četiri ogleda koji imaju za cilj demonstraciju rada projektovanog sistema kao i ilustraciju ranije izvedenih teorijskih relacija.

Premisa rada je da je moguće, imajući precizan referentni instrument, odgovarajućim postupkom kalibracije replicirati njegove ključne performanse na značajno pristupačnijem hardveru. U radu je opisana metodologija odabira komponenti koja se može proširiti i na drugačije radne zahteve. Implementirana je i biblioteka u programskom jeziku Python koja komunicira sa uređajima u postavci, čime je korisniku ponuđen jednostavan programski interfejs.

This work is licensed under a Creative Commons  
“Attribution-ShareAlike 4.0 International” license.



Za slaganje najvećeg broja slika u ovom radu korišćena je `Xcircuit` biblioteka dostupna na <http://tnt.etf.rs/~dgrujic/xcircuit/>, izmenjena i proširena za potrebe rada.

Online repozitorijum sa izvornim kodom dosupan je na <https://github.com/djokicd/ArduinoSNA>.

# 1 Uvod

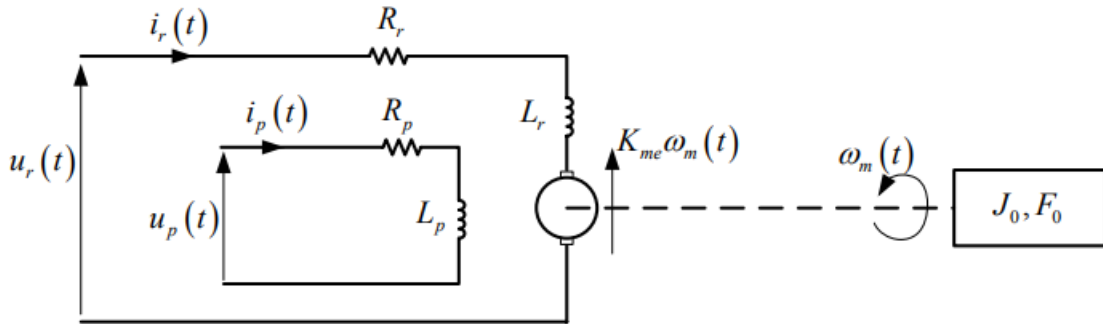
## 1.1 Analogni sistemi automatskog upravljanja

Sistem automatskog upravljanja predstavlja sistem koji je projektovan da na kontrolisan način vrši određene zahteve koji su mu zadati. Postoje dve veće grupe sistema automatskog upravljanja, analogni i digitalni. Analogni sistemi automatskog upravljanja su jednostavniji i jeftiniji za projektovanje, ali su osetljiviji, teži za održavanje na daljinu i uglavnom zauzimaju više prostora. Konkretna cilj ovog rada jeste projektovanje analognog sistema automatskog upravljanja za brzinu jednosmernog motora.

## 2 Motor stalne struje

### 2.1 Princip funkcionisanja

Jednosmerni motor je električna mašina koja pretvara električnu energiju u mehaničku, uz korišćenje jednosmerne struje, na osnovu čega se svrstava u pretvarače elektromehaničke energije. Konstrukcijski deo jednosmernog motora se sastoji iz dva dela, statora i rotora. Stator obezbeđuje konstantno magnetsko polje, dok kroz rotor protiče jednosmerna struja koja indukuje elektromagnetno polje, i pri proticanju struje kroz namotaje rotora koji se nalaze u konstantnom polju, javlja se pokretački moment koji okreće rotor. Rotor je priključen na izvor napajanja preko više odvojenih kontakata uz pomoć četkica, čime se održava smer struje konstantnim u odnosu na magnetsko polje statora. Svi relevantni efekti za projektovanje i analizu sistema upravljanja se mogu videti sa pojednostavljenog modela sistema prikazanog na slici 1.



Slika 1: Principijalna šema jednosmernog motora.

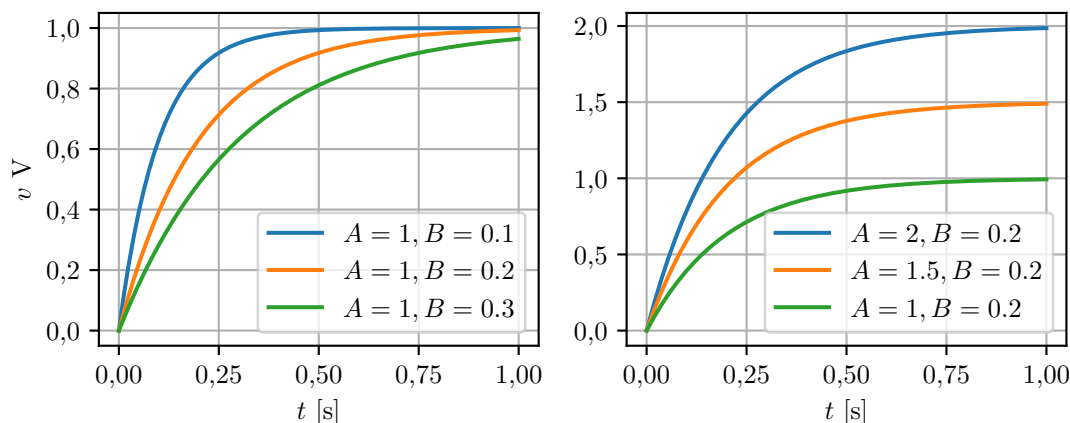
Ono što je od interesa jeste povezanost između ugaone brzine motora  $\omega_m(t)$  i napona na rotoru  $u_r(t)$ , tj. prenosna funkcija  $G(s)$  koja se može aproksimirati na sistem prvog reda kao:

$$G(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1} \cdot \quad (1)$$

Konstanta  $K_m$  predstavlja statičko pojačanje, dok konstanta  $T_m$  predstavlja vremensku konstantu jednosmernog motora upravljanog strujom u rotoru.

## 2.2 Odskočni odziv

Krenimo od modela jednosmernog motora datog u jednačini 1. Impulsni odziv se može dobiti kao  $Y_i(s) = G(s)\mathcal{L}\{\delta(t)\}$ , što u vremenskom delu izgleda  $y_i(t) = A \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)\right)$ . Radi lakšeg razumevanja funkcije pogledati grafike na slici 2.

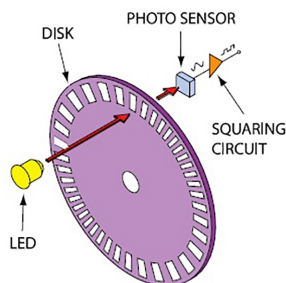


Slika 2: Modelovana karakteristika jednosmernog motora.

Na slici 2 su prikazani grafici sa različitim argumentima radi prikazivanja ponašanje modela motora.

## 2.3 Enkoder

Uloga enkodera je da obezbeđuje informaciju o poziciji, tj. smeru kretanja osovine motora. Enkoder je u obliku diska priključen za osovinu rotora jednosmernog motora, i na sebi ima proreze kroz kojih može da prodje svetlost. S jedne strane je optički uređaj koji emituje svetlosne zrake dok je s druge strane optički uređaj koji prima svetlosne zrake. Ako se taj svetlosni signal prevede u električni, imaće oblik povorke pravougaonih impulsa. Dodatno, ako enkoder ima opciju da daje informaciju o smeru, to je implementirano tako što se ispod postojećih proreza nalazi još jedan set proreza koji je srazmeran gornjem setu proreza, ali celokupno zarotiran za mali ugao  $\phi$  u odnosu na osu rotora jednosmernog motora.



Slika 3: Enkoder.

Na taj način dobijamo dva signala od kojih je jedan fazno pomeren u vremenu. U odnosu na ugao  $\phi$  i to koji je od signala stigao prvi, može se jednoznačno imati informacija o smeru kretanja motora. Konačno, ako se znaju fizičke dimenzije enkodera može se znati i tačna ugaona brzina motora  $\omega_m$ . Radi jednostavnosti, u ovom radu razmatra se upravljanje brzine motora bez promene smera okretanja, na osnovu čega se koristi samo jedna od fazi signala. Na slici 3 je islustrativno pokazan princip rada enkodera.

### 2.3.1 Konvertor učestanosti u napon

Kao što je već pomenuto, izlazni signal enkodera je oblika povorke pravougaonih impulsa i nije baš zgodan za vraćanje preko povratne sprege jer za kontrolni signal koristimo dosta sporije promenljivi signal, maltene konstantan u određenim vremenskim periodama. Imajući to u vidu potrebno je isprojektovati konvertor koji će od signala koji se dobija sa enkodera, koji predstavlja signal sa promenljivom učestanošću, dati signal koji predstavlja signal sa promenljivim nivoom. Šema konvertora je data na slici 4.



Slika 4: Konvertor frekvencije u napon.

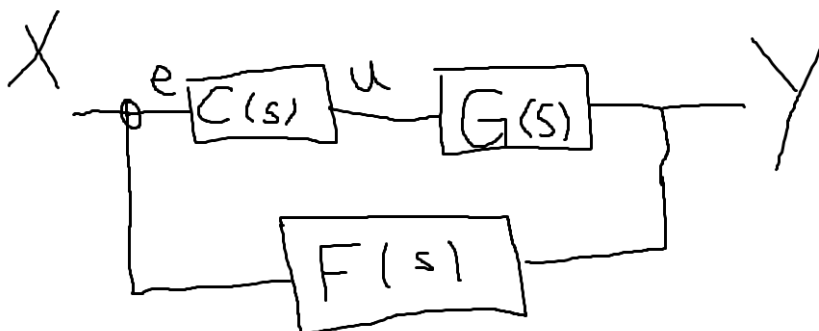
Dodatno, ako se javlja veliki šum u signalu na izlazu konvertora, signal se može propustiti kroz filter propusnik niskih učestanosti sa većom graničnom učestanošću kako bi se donekle filtrirao šum u nivoima signala, a brzina promene nivoa ostala relativno brza. Ovaj konvertor se u sistemu koji opisujemo predstavlja kao blok prenosne funkcije  $F(s)$  u principskoj jednačini 2.

### 2.3.2 Konvertor učestanosti u napon sa NF filtrom na izlazu

Konvertor će dati relativno konstantan napon za konstantne brzine motora ali usled velike učestanosti signala na izlazu enkodera će se javiti šum. Radi smanjenja snage šuma, signal će se propustiti kroz filter propusnik niskih učestanosti. Potrebno je da filter isfiltrira šum signala, ali da dinamika tj. veće promene signala održi i dalje relativno brzim.

## 2.4 Negativna povratna sprega

Negativna povratna sprega je princip po kome funkcionišu mnogo stvari u prirodi i ona predstavlja princip „samokontrole“ sistema. Naime, u slučaju kontrolisanja brzine jednosmernog motora uz pomoć povratne sprege, ona je zadužena za izjednačavanje kontrolnog napona sa naponom motora, i u slučaju povećanja otpora na osovini motora, negativna povratna sprega će tu informaciju preneti do ulaz kako bi se povećao kontrolisani napon i samim tim brzina održala konstantnom.



Slika 5: Opšta struktura sistema sa negativnom povratnom spregom.

Signal  $E(s)$  predstavlja signal greške za koji je u idealnom slučaju trebao da bude nula u svakom trenutku, ali pri promeni ulaznog napona usled realne dinamike sistema se javlja signal greške i on služi da olakša upravljanje sistema i da pomogne da se sistem dovede u stabilno stanje. Funkcija greške  $E(s) = X(s) - F(s)Y(s)$  nakon prolaska kroz kontroler daje signal  $U(s)$  koji predstavlja upravljački signal koji se generiše u odnosu na signal greške  $E(s)$  i prenosne funkcije upravljačkog bloka  $C(s)$ , kao  $U(s) = E(s)C(s)$ . On se dalje dovodi na ulaz pogonskog bloka predstavljenog prenosnom funkcijom  $G(s)$ . Prenosna funkcija celokupnog sistema od ulaznog signala, do izlaza je  $W(s)$  i računa se kao:

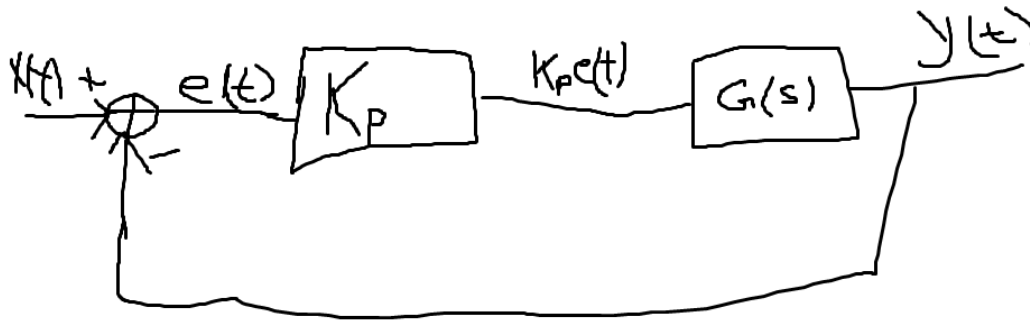
$$W(s) = \frac{C(s)G(s)}{1 + F(s)C(s)G(s)}. \quad (2)$$

## 2.5 II regulator

Uloga regulatora u sistem jeste da kontroliše, odnosno reguliše sistem po određenim principima. Ovde je korišćen II regulator sa pojačanjem koje teži beskonačnosti. Opšta blok šema sa II regulatorom je prikazana na slici 6.

Dodatno, ovaj element spada u grupu kontrolera i on se u sistemu koji opisujemo predstavlja kao blok prenosne funkcije  $C(s)$  u principskoj jednačini 2.



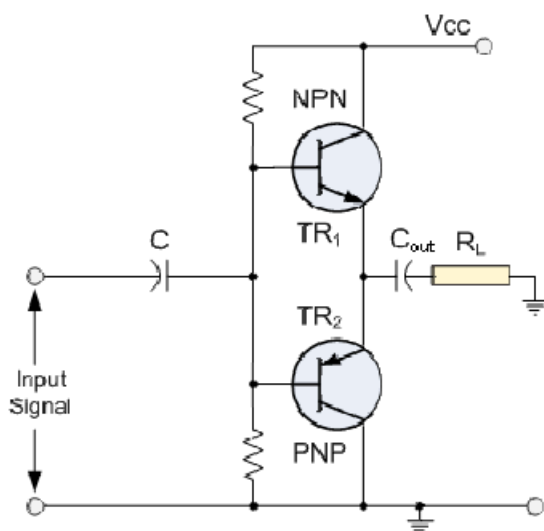


Slika 6: Blok šema II regulatora.

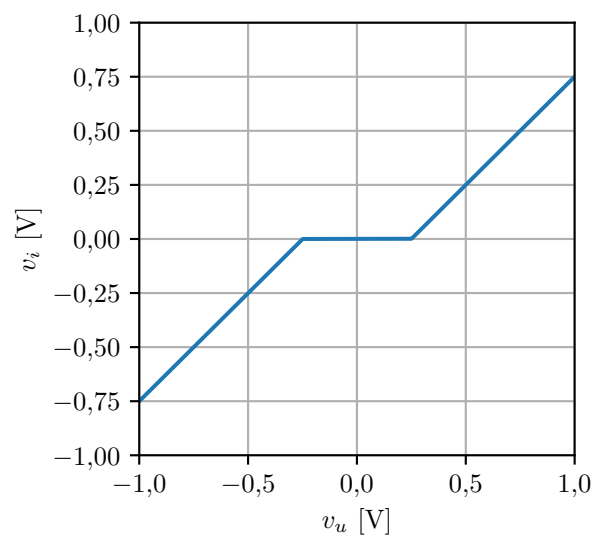
## 2.6 Pojačavač snage

### 2.6.1 Pojačavač snage u klasi B

Pojačavač snage u klasi B je linearni pojačavač sa *crossover* izobličenjem. Električna šema je prikazana na slici 7. Izobličenja se mogu bolje videti na slici 8 gde je prikazan izlazni napon  $u_i(t)$  u funkciji ulaznog napona  $u_u(t)$ .



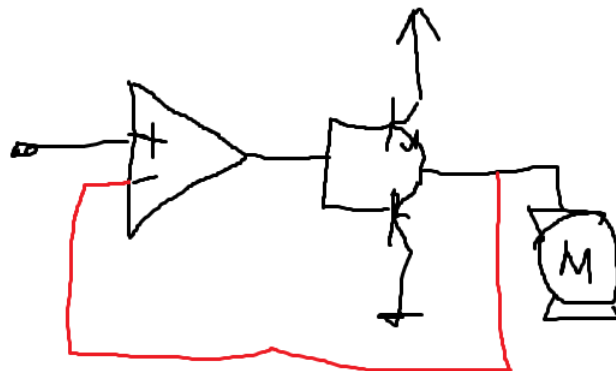
Slika 7: Pojačavač snage u klasi B.



Slika 8: Prenosna karakteristika pojačavača u klasi B.

### 2.6.2 Pojačavač snage u klasi B sa povratnom spregom

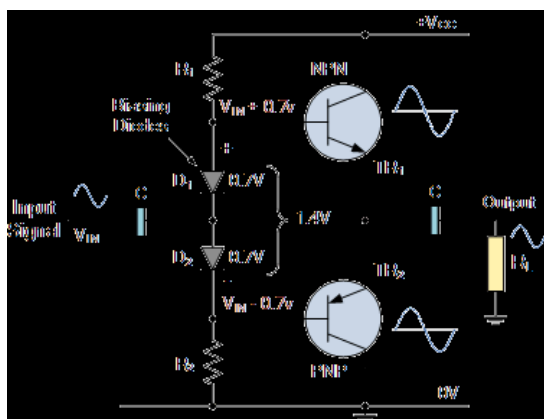
Pošto je za pokretanje motora potrebna velika snaga, samo povezivanje kontrolnog napona na motor ne bi bila dovoljna jer bi motor povukao dosta struje, i zbog toga se ubacuje pojačavač snage, ali i povratna sprega kako bi postojala informacija uz pomoć koje je moguće kontrolisati motor.



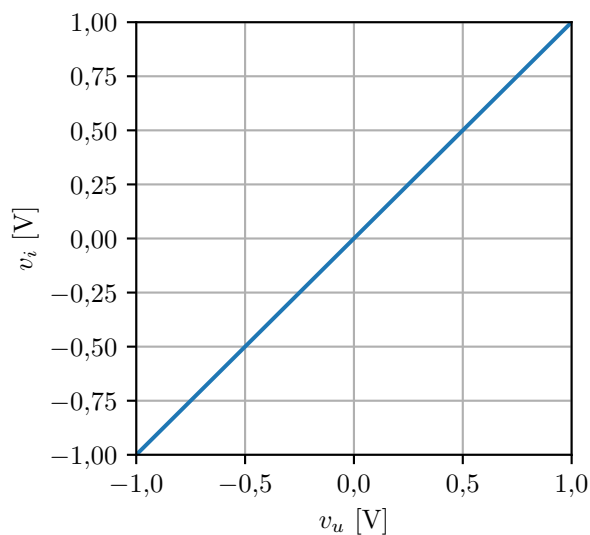
Slika 9: Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spregom.

### 2.6.3 Pojačavač snage u klasi AB sa negativnom povratnom spregom

Problem koji se ovde javlja kod pojačavača u klasi B je *crossover* koji dovodi do stepeničaste pobude motora. Imajući u vidu da motor ima svoju dinamiku koja je relativno spora u odnosu na električne procese, ovaj slučaj ne bi bio optimalan jer bi pojačavač davao struju motoru ali on ne bi mogao toliko brzo da odreaguje. Ovaj problem se može rešiti ako se pojačavač u klasi B zameni pojačavačem u klasi AB.



Slika 10: Pojačavač snage u klasi AB.



Slika 11: Prenosna karakteristika pojačavača u klasi AB.

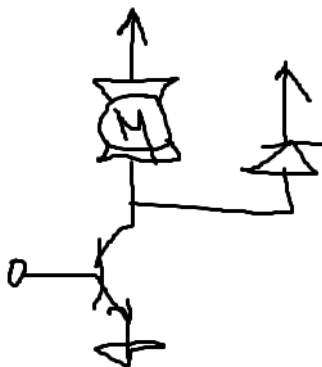
Šema pojačavača snage u klasi AB je data na slici 10 dok je njegova karakteristika data na slici 11.

## 3 Aparatura i merenja

### 3.1 Merenja

#### 3.1.1 Merenje odskočnog odziva jednosmernog motora iz stanja mirovanja

Šema koja je korišćena za merenje odziva jednosmernog motora je data na slici 12.



Slika 12: Šema za merenje odziva jednosmernog motora.

Uz pomoć osciloskopa i računara povezanog sa osciloskopom je izmerena karakteristika jednosmernog motora na stepeničastu pobudu.

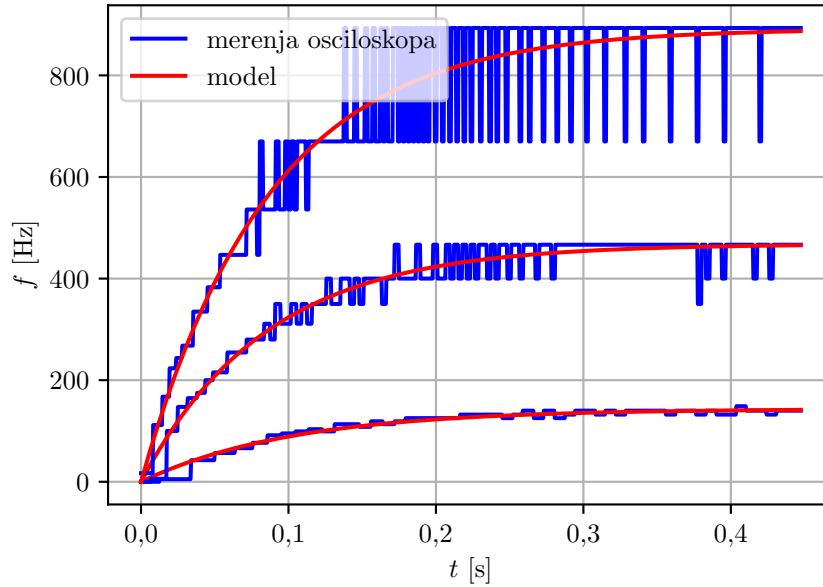
Na slici 13 je uz pomoć metode najmanjih kvadrata odrađeno modelovanje krive funkcijom oblika  $A \left( 1 - \exp \left( -\frac{t}{\tau} \right) \right)$ . Određivanje optimalne krive obavljeno je pomoću funkcije `scipy.optimize.curve_fit` u programskom jeziku Python, izvorni kod je dat u prilogu. Što se tiče merenja, ona su vršena uz pomoć osciloskopa i to na manjim učestanostima izlaznog signala enkodera zbog bolje preciznosti podataka.

Radi dobijanja preciznijih rezultata na većim učestanostima vršena su merenja i uz pomoć osciloskopa i uz pomoć arduino pločice. To poboljšava merenja zbog veće preciznosti arduino položice.

Na slici 13 se javljaju dosta velika odstupanja na većim učestanostima i teže je izmeriti tačnu učestanost, dok se na slici ?? može mnogo lakše očitati vrednost u ustaljenom stanju. Zbog pojave šuma prilikom merenja sa osciloskopa su korišćena dva instrumenta za merenje, i samim tim dobijanje preciznijih rezultata. Takođe, vidi se da se sa povećanjem učestanosti signala otežava tačno očitavanje frekvencije signala. Greška pri očitavanju signala je srazmerna samoj učestanosti signala zbog načina na koji se određuje učestanost. Naime, zbog fiksnog broja tačaka na ekranu osciloskopa, pri manjim učestanostima jedna perioda će imati više odbiraka, dok pri većim, taj broj će biti manji, s tim, greška pri brojanju odbiraka od će biti procentualno veća za veće učestanosti.

Sa povećanjem učestanosti, povećava se i nivo šuma na podacima sa osciloskopa i na učestanostima preko 1 kHz očitavanja postaju još teža.

Na slici 13 se može primetiti da učestanost raste za duplo, posledica toga je što u tom opsegu jedna perioda ima tri odbiraka, i kada dodje do greške pri čitanju za jedan odbirak, javlja se duplo veća greška, umesto 2000 dobija se 4000. Na slici 13 se može videti pomenuti fenomen jasnije.



Slika 13: Određivanje optimalnog modela motora na osnovu merenog odskočnog odziva.

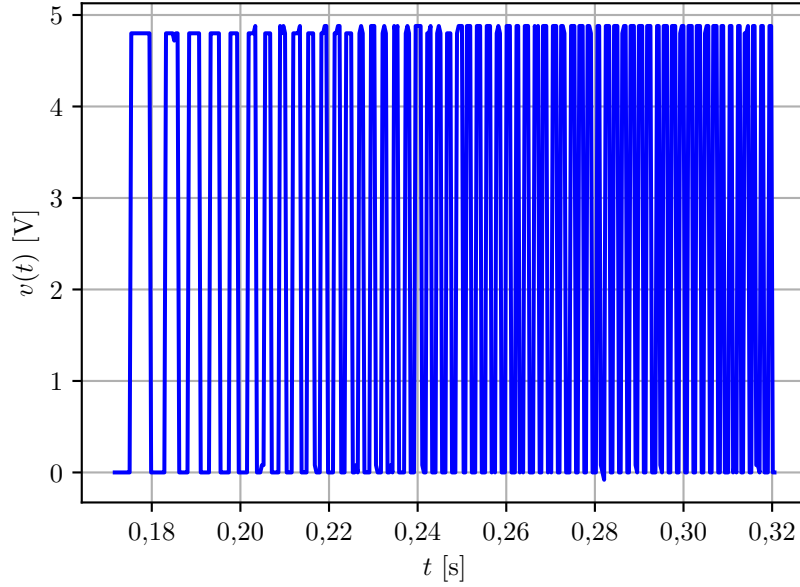
Dodatno, argumenti signala sa grafika sa slike 13 prikazani u tabeli 3.1.1, u sortirani u rastućem poredku granične frekvencije.

Br.	$K_m$ [Hz]	$T_m$ [s]
1	143.450	1.972
2	468.033	0.569
3	892.078	0.345

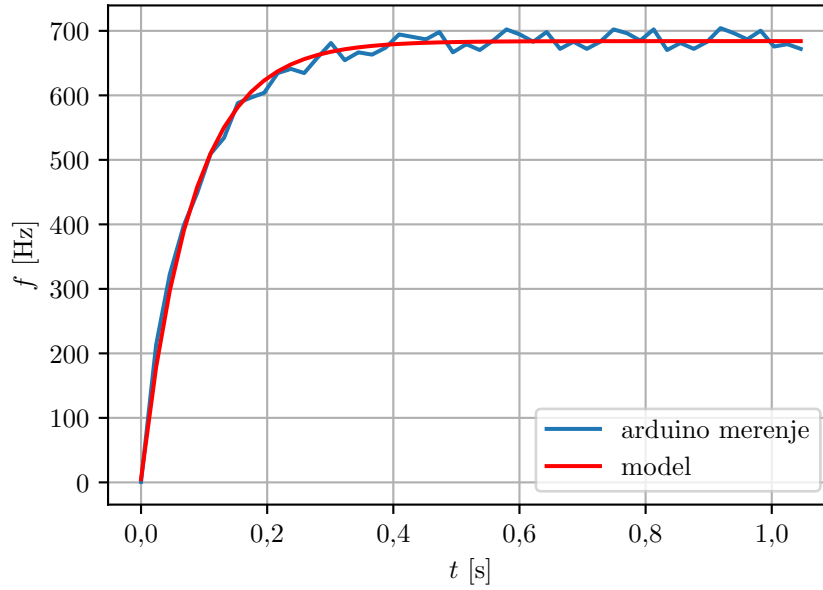
Signal koji se posmatrao na prethodnim graphicima je izlazni signal enkodera motora koji je oblika povorke pravougaonih impulsa sa promenljivom frekvencijom koja je srazmerna brzini okretanja osovine jednosmernog motora.

## 3.2 Obrada rezultata merenja

Od signala sa slike 15 su dobijeni ostali već pomenuti signali pomoću Python skripte koja radi na sledeći način. Pošto su podaci koji stižu binarni, ili 5 V ili 0 V obrada signala je podrazumevala brojanje perioda koje je bilo realizovano tako što su se brojali podaci koji su 5 V počevši od prvog, zatim svi naredni podaci koji su nule sve do prvog sledećeg



Slika 14: Vremenski oblik signala na izlazu enkodera.



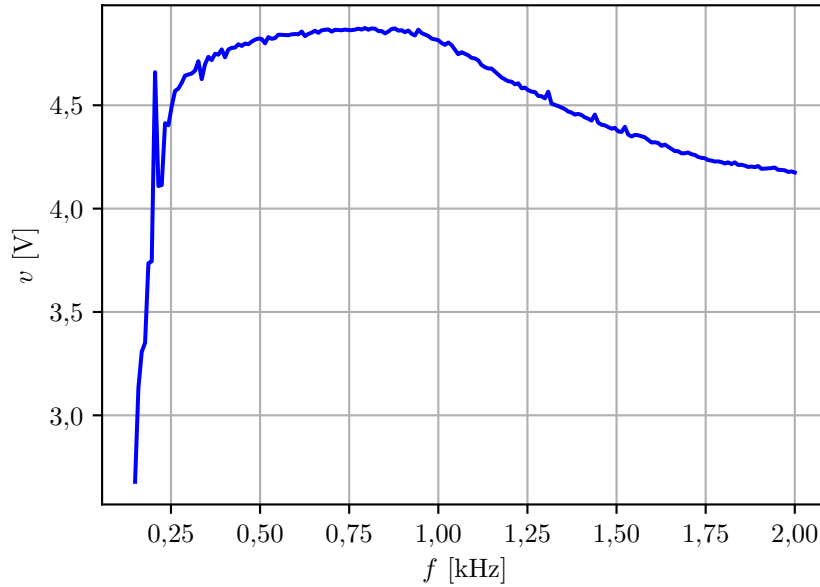
Slika 15: Vremenski zavisnost frekvencije signala na izlazu enkodera.

koji je opet 5 V. Na taj način imamo broj odbiraka signala u jednoj periodi, postupak se ponavlja za svaku narednu periodu. Učestanost jedne periode se računa kao  $f_{\text{periode}} = \frac{1}{(n-1)T_s}$ . Dobijeni broj predstavlja učestanost obrađene periode i predstavlja jednu tačku na grafiku zavisnosti periode od vremena. Postupak se ponavlja za sve periode u prikupljenim podacima.

### 3.3 Merenje karakteristika pretvarača učestanosti

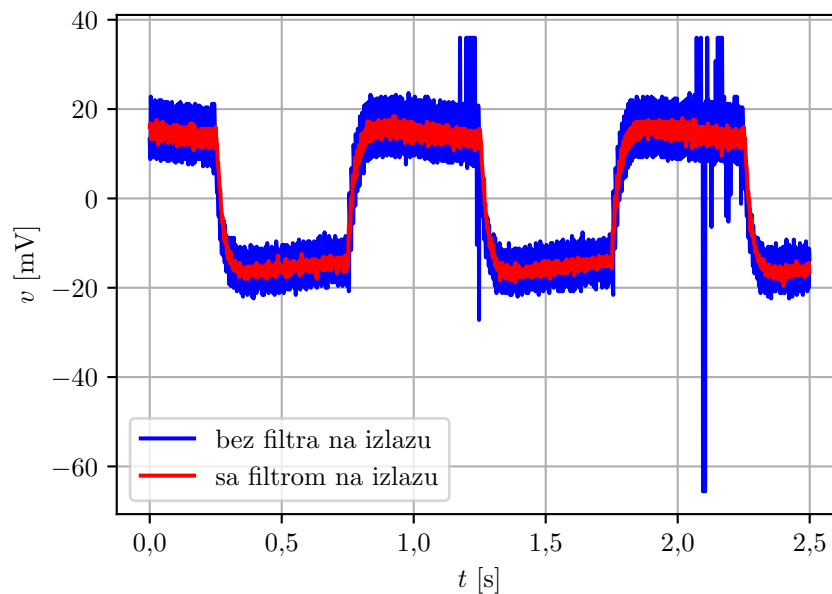
Prenosna karakteristika konvertora se može videti na slici 16.

Konvertor je sam po sebi veoma brz u poređenju sa odzivom motora i može se smatrati



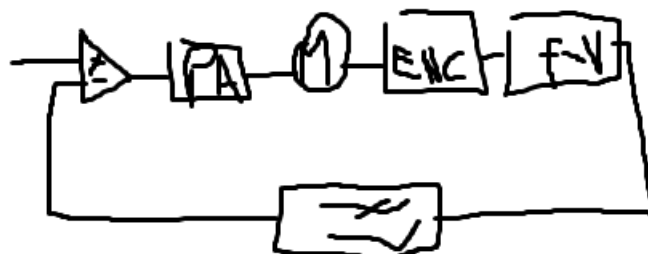
Slika 16: Prenosna karakteristika konvertora frekvencije u napon.

da je njegov prelazni režim zanemarujući u odnosu na dinamiku jednosmernog motora. Testiranje konvertora se može odraditi kao periodična promena kontrolnog signala i posmatranje izlaza konvertora. Prenosna karakteristika takvog sistema je prikazana na slici 16 označena plavom bojom. Može se videti da ima dosta šuma koji se uz pomoć filtra propusnika niskih učestanosti može donekle isfiltrirati uz održanje brzine ivica koje su posledice velikog signala. Napon na izlazu dodatog filtra se takođe može videti na slici 17, i on je označen crvenom bojom.



Slika 17: Vremenski dijagram signala na izlazu konvertora frekvencije u napon bez i sa filtrom na izlazu.

Pošto se za kontrolni signal dovodi izlaz generatora signala koji predstavlja pozitivnu unipolarnu povorku pravougaonih impulsa, radi lakšeg upravljanja je zgodnije dovesti signal čiji je nivo srazmeran brzini motora. Rešenje tog problema je povratna sprega i mala modifikacija kola koja se može videti na slici 18.



Slika 18: Modifikovana šema upravljanja jednosmernog motora uz pomoć povratne sprege.