

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET



Upravljanje brzinom motora jednosmerne struje
primenom analogne negativne povratne sprege

Diplomski rad

Mentor:

Dr Radivoje Đurić, vanredni
profesor

Kandidat:

David Milovanović, 2016/0274

Beograd, Septembar 2022.

Sadržaj

1	Teorijski uvod	2
1.1	Analogni sistemi automatskog upravljanja	2
1.2	Motor stalne struje	3
1.2.1	Princip funkcionisanja	3
1.2.2	Odskočni odziv	4
1.3	Rotacioni enkoder	4
1.3.1	Princip funkcionisanja	4
1.3.2	Pretvarač učestanosti u napon	5
1.3.3	Pretvarač učestanosti u napon sa NF filtrom	6
1.4	Princip negativne povratne sprege	7
1.5	Regulatori	8
1.5.1	$\Pi = \infty$ regulator	8
1.5.2	P regulator	9
1.5.3	PI regulator	9
1.6	Pojačavač snage	10
1.6.1	Pojačavač snage u klasi B	10
1.6.2	Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spregom	11
1.6.3	Pojačavač snage u klasi AB sa negativnom povratnom spregom	12
2	Karakteristike korišćenih komponenti sistema	13
2.1	Identifikacija modela motora	13

2.1.1	Merenje odziva motora	13
2.1.2	Merenje prenosne karakteristike motora	15
2.2	Merenje karakteristika pretvarača učestanosti	15
2.2.1	Karakteristika pretvarača bez filtra	15
2.2.2	Karakteristika pretvarača sa filtrom	16
2.3	Merenje karakteristika pojačavača snage	17
2.3.1	Statička prenosna karakteristika	17
2.3.2	Dinamička prenosna karakteristika sa i bez dioda	18
3	Rezultati i diskusija	19
3.1	Osnovni sistem	19
3.2	Sistem sa poboljšanjima pojačavača snage	19
3.3	Sistem sa poboljšanjima senzora	20
3.4	Sistem sa promenjenim regulatorom	20
3.5	Nelinearna ograničenja sistema	23
3.6	Diskusija rezultata	23
3.6.1	Obrada rezultata merenja	23
4	Zaključak	25
4.1	Merenje karakteristika pretvarača učestanosti	25
5	DC Sweep celog sistema	27
5.1	DC Sweep bez NF filtra	27
5.2	DC Sweep sa NF filtrom	27

Spisak slika

1	Principska šema jednosmernog motora.	3
2	Modelovana karakteristika jednosmernog motora.	4

3	Enkoder.	5
4	Pretvarač frekvencije u napon.	6
5	Šema NF filtra	7
6	Prenosna karakteristika NF filtra.	7
7	Opšta struktura sistema sa negativnom povratnom spregom.	7
8	Blok šema sistema sa Π regulatorom.	8
9	Blok šema PI regulatora.	9
10	Blok šema sistema sa PI regulatorom sa jediničnom povratnom spregom.	10
11	Pojačavač snage u klasi B.	10
12	Prenosna karakteristika pojačavača u klasi B, za napon $ V_{BE} = 0.7V$	10
13	Vremenski dijagram ulaznog i izlaznog signala.	11
14	Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spregom.	11
15	Pojačavač snage u klasi AB.	12
16	Prenosna karakteristika pojačavača u klasi AB.	12
17	Pojačavač snage u klasi AB sa negativnom povratnom spregom.	12
18	Eksperimentalna postavka za merenje odziva jednosmernog motora.	13
19	Određivanje optimalnog modela motora na osnovu merenog odskočnog odziva.	14
20	Vremenski oblik signala na izlazu enkodera.	15
21	Izmerena vremenska zavisnost frekvencije signala na izlazu enkodera i model sa parametrima: $K_m = 679.088 \text{ Hz}$ i $T_m = 81 \text{ ms}$	15
22	Odziv konvertora na pobudu konstante frekvencije.	15
23	Odziv konvertora na pobudu sa promenljivom frekvencijom.	15
24	Odziv konvertora sa filtrom na pobudu konstante frekvencije.	16
25	Odziv konvertora sa filtrom na pobudu sa promenljivom frekvencijom.	16
26	Prenosna karakteristika pretvarača učestanosti.	17
27	Izmerena statička karakteristika pojačavača u klasi B.	18
28	Izmerena statička karakteristika pojačavača u klasi AB.	18
29	Odskočni odziv pojačavača snage.	18

30	Odziv pojačavača na signal rampe učestanosti $f = 100[\text{kHz}]$	18
31	Električna šema projektovanog PI regulatora.	21
32	Usrednjen relativni odziv sistema $H(s)$ i njegov model.	22
33	Odskočni odziv sistema sa parametrima PI regulatora $K_p = 3$ i $T_i = 10 \text{ ms}$	22
34	Odskočni odziv sistema sa parametrima PI regulatora $K_p = 3$ i $T_i = 100 \text{ ms}$	23
35	Odnos normalizovane relativne greške u odnosu na normalizovanu frekvenciju.	24
36	Prenosna karakteristika konvertora frekvencije u napon.	25
37	Vremenski dijagram signala na izlazu konvertora frekvencije u napon bez i sa filtrom na izlazu.	26
38	Modifikovana šema upravljanja jednosmernog motora uz pomoć povratne sprege.	26
39	DC sweep celog sistema.	27
40	DC sweep celog sistema sa NF filtrom.	28

Zahvalnica

Zahvaljujem se svima koji su doprineli izradi ovog diplomskog rada, a posebno svom mentoru Dr Radivoju Đuroviću, vanrednom profesoru koji je omogućio izradu teme ovog diplomskog rada i asistentu Mr Danilu Đokiću, koji je omogućio konstantnu podršku tokom izrade ovog rada.

Najveću zahvalnost za bezgraničnu podršku tokom studiranja i izrade diplomskog rada, dugujem svom ocu Zoranu Milovanoviću.

Iskreno vam hvala.

David Milovanović

Sažetak

Jednosmerni motor je veoma zastupljen u sferama gde postoji neka vrsta upravljanja sistema. U ovom radu će biti uvedeni i objašnjeni osnovni principi funkcionisanja analognog sistema upravljanja motora jednosmerne struje. Takođe, biće isprojektovan sistem i izvršena sva potrebna merenja i njihova obrada, i izvršiće se preklapanje izmerenih rezultata sa očekivanim teorijskim rezultatima.

Rad je organizovan u tri odeljka. U teorijskom uvodu su uvedeni opšti pojmovi koji predstavljaju delove sistema koji se projektuje. Dodatno, u ovom delu su date teorijske predikcije ponašanja sistema. U odeljku „Karakteristike korišćenih komponenti“ su opisane karakteristike korišćenih delova sistema i data su merenja njihovih osobina koja su značajna za dalje modifikacije sistema. U odeljku „Rezultati i diskusija“ su navedeni rezultati celog sistema kao i njihovo preklapanje sa očekivanim teorijskim rezultatima koji su dobijeni ranije.

Premisa rada je da je moguće isprojektovati analogni sistem upravljanja koji će davati relativno iste rezultate kao i teorijski model sistema. U radu je pokazano da se uz pomoć teorije mogu dobiti parametri kontrolera sistema koji će i praktično davati iste rezultate kao i teorijski.

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



Online repozitorijum sa izvornim kodovima dosupan je na <https://github.com/dejvi997>.

1 Teorijski uvod

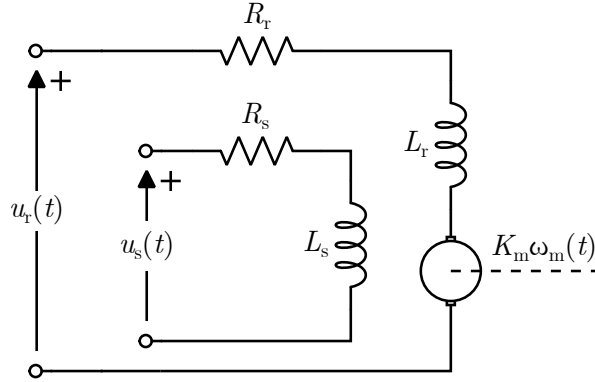
1.1 Analogni sistemi automatskog upravljanja

Sistem automatskog upravljanja predstavlja sklop električnih i mehaničkih elemenata na taj način da vrše funkcije koje su im zadate kontrolnim signalima, na kontrolisan način uz obezbeđivanje povratne informacije o stanjima delova sistema od interesa. Primer nekih od funkcija koje se mogu vršiti su kontrola izlaznog napona, održavanje stalne brzine okretanja turbine, podešavanje temperature itd. Postoje dve veće grupe sistema automatskog upravljanja, analogni i digitalni. Digitalni sistemi automatskog upravljanja koriste digitalne računare u ulozi kompenzatora i regulatora. Digitalni sistemi koriste digitalne odnosno numeričke podatke tako što se analogna merena veličina uz pomoć AD konvertora prebaci u digitalni domen, zatim digitalni računar obradi podatke i da na svom izlazu takođe digitalni podatak koji se dalje vodi na DA konvertor kako bi se signal vratio u analogni domen, i onda se dalje prosleđuje elementu kojim se upravlja. S druge strane, analogni sistemi upravljanja rade sa kontinualnim signalima, i nemaju problema gubitka informacija usled konačne preciznosti AD i DA konvertora. Takođe, podaci se ne obrađuju na svaku periodu takta nego kontinualno i izlaz sistema za kontrolu je takođe analogni signal. Još jedna prednost analognih sistema je njihova robusnost, naime, ako dodje do male promene napona usled neke greške, to neće mnogo uticati na konačni rezultat, dok kod digitalnih sistema to može dovesti do prebacivanja napona iznad ili ispod nekog od praga odlučivanja i pri daljoj obradi se može desiti da se napravi veća greška. Konkretno cilj ovog rada jeste projektovanje analognog sistema automatskog upravljanja uz pomoć kojeg bi se kontrolisao motor jednosmerne struje. Dodatno, uz pomoć povratne sprege bi se održavala zadata brzina motora bez obzira na to na koliki otpor nailazi osovina motora.

1.2 Motor stalne struje

1.2.1 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 elektromagnetsko polje, i pri proticanju struje kroz namotaje rotora koji se nalaze u konstantnom polju, javlja se pokretački moment koji okreće rotor. Svi relevantni efekti za projektovanje i analizu sistema upravljanja motora stalne struje se mogu dobiti iz pojednostavljenog modela sistema koji je prikazan na slici 1.



Slika 1: Principialna šema jednosmernog motora.

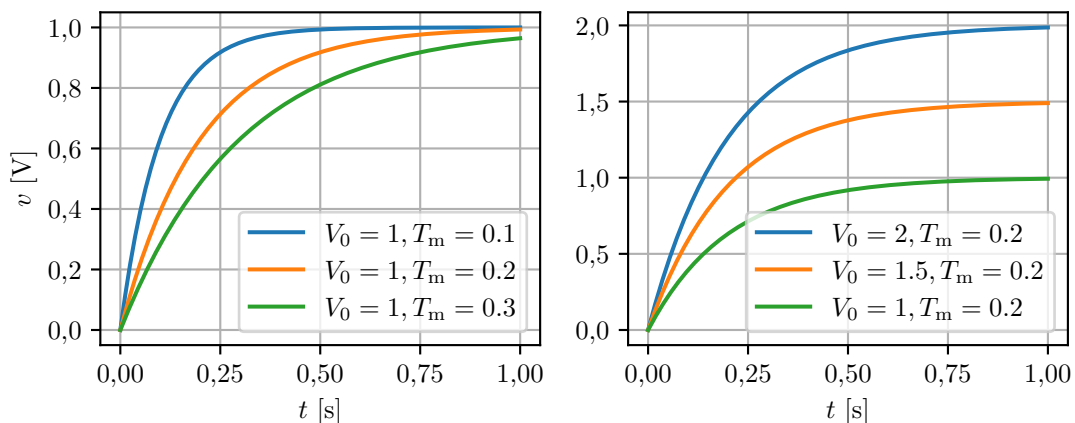
Od interesa je veza između ugaone brzine motora $\omega_m(t)$ i napona na rotoru $v_r(t)$, odnosno prenosna funkcija $G(s)$ koja se može aproksimirati sistemom prvog reda kao:

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

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

1.2.2 Odskočni odziv

Poznavanje odziva sistema na odskočnu pobudu je značajno za predikciju ponašanja sistema na različite pobude, jer se na osnovu toga može predvideti ponašanje odziva sistema za proizvoljnu pobudu. Ako je poznat odskočni odziv sistema, tada uz pomoć njega možemo da odredimo neke od parametra posmatranog sistema i njegove osobine. Što znači, ako ulazni signal predstavlja odskočnu pobudu: $v_U(t) = V_0 u(t)$, primenom Laplasove transformacije signal se prebacuje u kompleksni domen kao: $V_U(s) = \mathcal{L}\{v_U(t)\} = \frac{V_0}{s}$. Ako se za model sistema koristi uprošćeni model dat u izrazu (1), odziv na odskočnu pobudu, u kompleksnom domenu se dobija kao: $V_I(s) = G(s)V_U(s)$, što je u vremenskom domenu dato izrazom: $v_I(t) = V_0 K_m \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T_m}\right)\right)$. Na slici 2 su prikazani grafici sa različitim vrednostima parametra radi prikazivanja ponašanja modela motora.



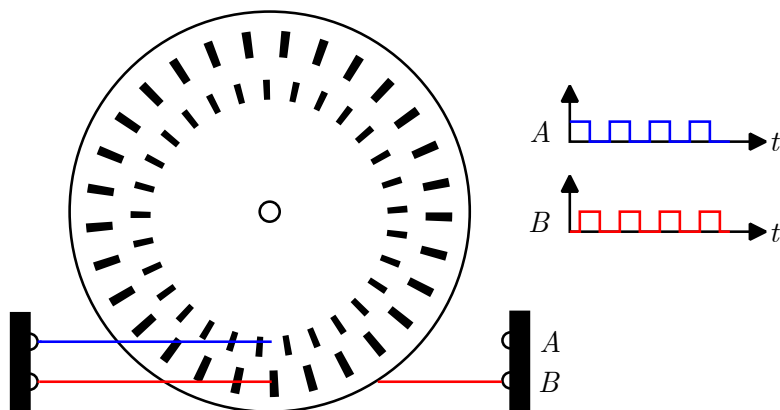
Slika 2: Modelovana karakteristika jednosmernog motora.

1.3 Rotacioni enkoder

1.3.1 Princip funkcionisanja

Uloga enkodera je da obezbeđuje informaciju o trenutnom položaju, odnosno smeru kretanja osovine. Enkoder je sačinjen iz diska priključenog za osovinu rotora, i na sebi ima proreze kroz koje može da prodje svetlost. S jedne strane je optički uređaj koji emituje svetlosne zrake dok je s druge strane optički uređaj koji ih prima. Ako se taj svetlosni signal prevede u električni, imaće oblik povorke pravougaonih impulsa. Dodatno, ako

enkoder ima opciju da daje informaciju o smeru, jedna od implementacija je da se ispod postojećih proreza nalazi još jedan set proreza koji je celokupno pomeren u jednu stranu u odnosu na proreze iznad. Na taj način se dobijaju dva signala, signal „u fazi“ i signal „u kvadraturi“, od kojih je jedan fazno pomeren u vremenu. U odnosu na to koji od signala prednjači, može se jednoznačno imati informacija o smeru kretanja. Na slici 3 je islustrativn pokazan princip rada enkodera.

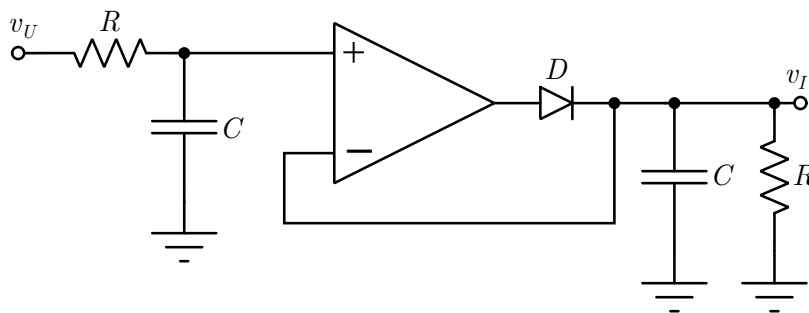


Slika 3: Enkoder.

Konačno, ako se zna broj proreza na enkoderu može se odrediti i ugaona brzina motora ω_m relativno precizno. U ovom radu je korišćen motor stalne struje sa ugrađenim enkoderom koji radi na ovom principu. Radi jednostavnosti, u ovom radu razmatra se upravljanje brzine motora bez promene smeru okretanja, na osnovu čega se koristi samo jedan signal.

1.3.2 Pretvarač učestanosti u napon

Kao što je već pomenuto u delu 1.3.1, izlazni signal enkodera je oblika povorke pravougaonih impulsa čija je frekvencija srazmerna brzini okretanja osovine. Pošto u analognom sistemu automatskog upravljanja signal treba da bude srazmeran merenoj veličini, 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.

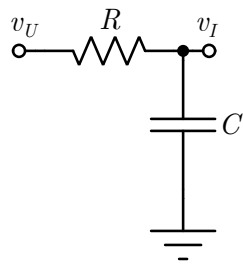


Slika 4: Pretvarač frekvencije u napon.

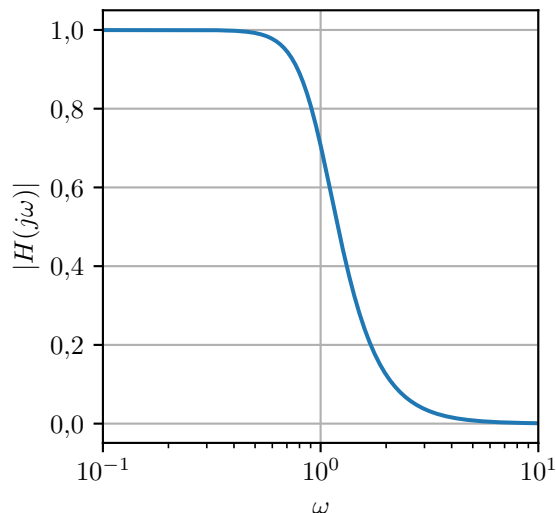
Dodatno, u signalu na izlazu konvertora se javlja veliki šum zbog vremenske RC konstante koja je potrebno da bude mala kako bi kolo ispratilo dinamiku signala ali zbog toga se pojačava šum u zonama konstantnog signala.

1.3.3 Pretvarač učestanosti u napon sa NF filtrom

Da bi se problem uveden u prethodnoj tački rešio, signal se može propustiti kroz filter propusnik niskih učestanosti. Potrebno je izabrati takvu graničnu učestanost filtra kako bi se filtrirao šum malih signala, a dinamika velikih signala ostala relativno nepromenjena. Konvertor iz tačke 1.3.2 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. Filter koji se može iskoristiti je jednostavan RC filter čija je šema prikazana na slici 5 a prenosna karakteristika na slici 6. Granična učestanost predstavlja učestanost na koju fazna karakteristika filtra opadne za 45 deg, i ona se računa kao: $f_{gr} = \frac{1}{2\pi RC}$. Podešavanjem vrednosti za R i C može se podešavati granična učestanost. Za konvertor će se u nastavku podrazumevati konvertor sa NF filtrom. Ovaj konvertor se u sistemu koji opisujemo predstavlja kao blok prenosne funkcije $F(s)$ u principskoj jednačini (2).



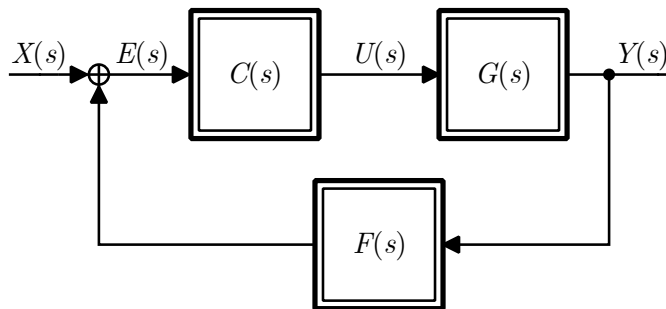
Slika 5: Šema NF filtra



Slika 6: Prenosna karakteristika NF filtra.

1.4 Princip negativne povratne sprege

Negativna povratna sprega se javlja kada se neka funkcija izlaza sistema, procesa ili mehanizma dovede nazad na ulaz na taj način da smanjuje fluktuacije izlaza, koje su posledice promene ulaznog signala ili nekih smetnji. Opšta blok šema sistema sa negativnom povratnom spregom je data na slici 7.



Slika 7: 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 željeno stanje tako što se oduzme od referentnog signala. Dobijeni signal greške nam govori koliko je odstupanje i kako dalje treba da se upravlja sistem da bi se dobio željeni rezultat. Signal 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 $E(s)$

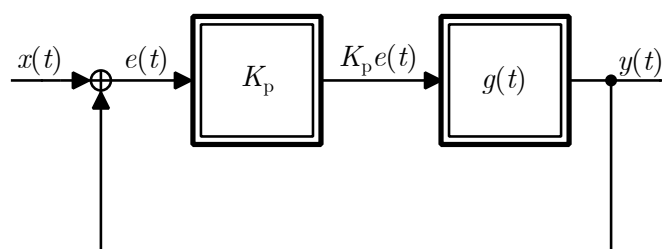
i prenosne funkcije upravljačkog bloka $C(s)$, kao $U(s) = E(s)C(s)$. On se dalje dovodi na ulaz pogonskog bloka predstavljenog prenosnom funkcijom $G(s)$. Prenosna funkcija celokupnog sistema od ulaznog signala, do izlaza je $W(s)$ i određena je izrazom:

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

1.5 Regulatori

1.5.1 $\Pi = \infty$ regulator

Uloga regulatora u sistemu jeste da kontroliše, odnosno reguliše sistem tako da se ostvari željeno ponašanje. Konkretno, Π kontroler ili proporcionalni kontroler radi po principu množenja konstantom. Naime, signal greške se množi konstantom kako bi se prividno greška povećala što dalje dovodi do burnije reakcije sistema na ispravljanje te greške. Problem koji može da se javi prilikom korišćenja ovog kontrolera jesu preskoci u izlaznom signalu koji vremenom prelaze u oscilacije i na kraj ulaze u stacionarno stanje. Konstanta kojom se množi signal greške se drugačije zove pojačanje i njegovim menjanjem može da se menja i način odziva sistema. U ovom radu je korišćen Π regulator sa pojačanjem koje teži beskonačnosti, realizovano idealnim operacionim pojačavačem. Opšta blok šema sa Π regulatorom je prikazana na slici 8.



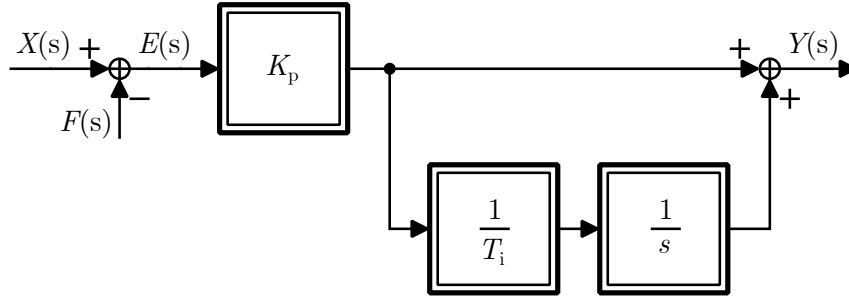
Slika 8: Blok šema sistema sa Π regulatorom.

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). Performanse Π regulatora zavise od njegovog pojačanja. U konkretnom slučaju pojačanje teži beskonačnosti, i ako se to uvrsti u jednačinu (2), znajući da je $C(s) = \frac{K_p}{s}$, čak i neznajući ostale funkcije, dobija se: $W(s) = \lim_{C(s) \rightarrow \infty} \frac{C(s)G(s)}{1 + F(s)C(s)G(s)} = \frac{\infty}{1 + \infty} = 1$.

1.5.2 P regulator

1.5.3 PI regulator

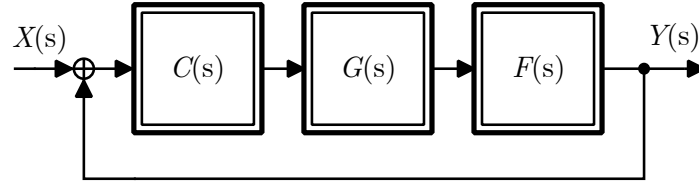
Kod sistema sa $\Pi = \infty$ regulatorom se javlja problem konstantne statičke greške, i zbog prevelikog pojačanja može doći do oscilovanja izlaza jer će sistem pojačati i najmanji šum do značajnijih vrednosti. Rešenje ovog problema je dodavanje integratora koji će obezbediti nultu grešku u stacionarnom stanju, i potencijalno ubrzati sistem uz dodavanje određenog procenta preskoka. Prenosna funkcija integratora je oblika $\frac{1}{T_i s}$, gde je T_i vremenska konstanta integratora. Znajući da je prenosna funkcija za P kontroler konstanta, za PI regulator se dobija izraz $K_p + \frac{1}{T_i s}$. Blok šema PI regulatora je prikazana na slici 31.



Slika 9: Blok šema PI regulatora.

Dodatno, poznavanjem modela sistema kojim se upravlja, se može u nekom od softverskih alata napraviti model PI regulatora i na taj način uštedeti vreme projektovanja regulatora sa optimalnim konstantama. Način određivanja konstanti regulatora je iterativan postupak, jer se ne može generalizovati nego zavisi od toga šta je optimalno za dati problem i samog sistema, odnosno njegove osetljivosti na preskoke i brze pobude. Ako se modifikuje blok šema sa slike 7 tako da izgleda kao na slici 10, može se izvesti izraz za funkciju spregnutog prenosa $W(s)$. Imajući u vidu brzu dinamiku pretvarača onda važi da je prenosna funkcija sistema bez kontrolera $H(s) = G(s)F(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1}$, znajući da za PI kontroler važi $C(s) = K_p + \frac{1}{T_i s}$, ako se to uvrsti u jednačinu (2), dobija se

$$W(s) = \frac{\left(K_p + \frac{1}{T_i s}\right) \frac{K_m}{T_m s + 1}}{1 + \left(K_p + \frac{1}{T_i s}\right) \frac{K_m}{T_m s + 1}}.$$

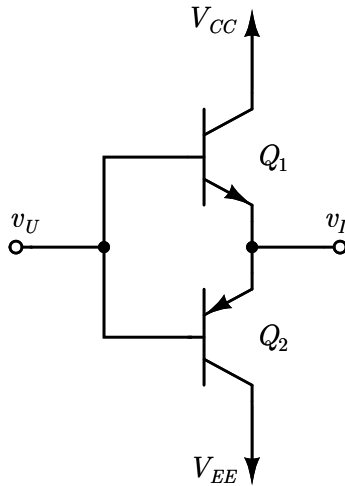


Slika 10: Blok šema sistema sa PI regulatorom sa jediničnom povratnom spregom.

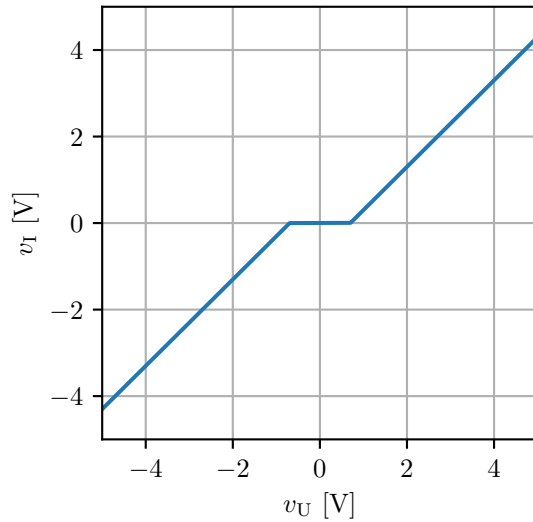
1.6 Pojačavač snage

1.6.1 Pojačavač snage u klasi B

Pojačavač snage u klasi B je pojačavač koji ima pojačanje 1 i *crossover* izobličenja, električna šema je prikazana na slici 11. Izobličenja se mogu bolje videti na prenosnoj karakteristici na slici 12 gde je prikazan izlazni napon $u_i(t)$ u funkciji ulaznog napona $u_u(t)$.

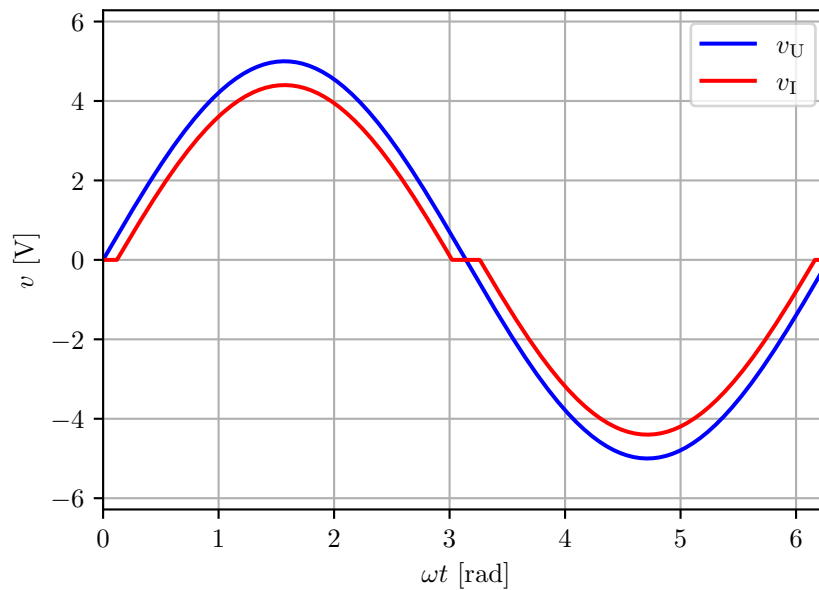


Slika 11: Pojačavač snage u klasi B.



Slika 12: Prenosna karakteristika pojačavača u klasi B, za napon $|V_{BE}| = 0.7V$.

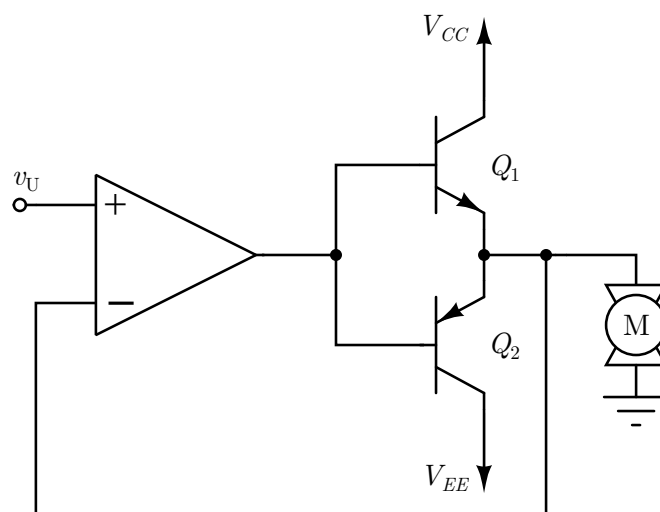
Za pozitivne vrednosti ulaznog napona veće od napona $|V_{BE}|$, pnp tranzistor je zakočen, dok npn tranzistor radi u direktnom aktivnom režimu. Dok za negativne vrednosti ulaznog napona važi dualno, kada je ulazni napon manji od $-|V_{BE}|$, npn tranzistor je zakočen, dok pnp tranzistor radi u direktnom aktivnom režimu. Dok je u oblasti ulaznog napona između $-|V_{BE}|$ i $|V_{BE}|$ izlaz jednak nuli, u slučaju napajanja sa pozitivnim i negativnim naponom. Vremenski dijagram jedne periode ulaznog i izlaznog signala na pojačavaču je prikazan na slici 13



Slika 13: Vremenski dijagram ulaznog i izlaznog signala.

1.6.2 Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spregom

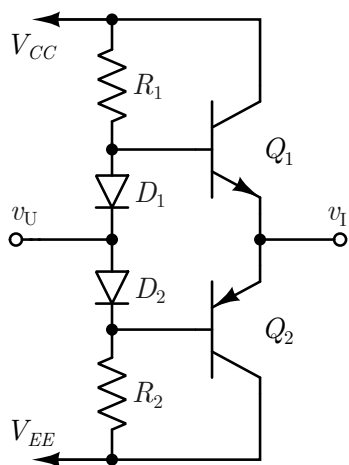
Pošto je za pokretanje motora potrebna velika snaga, samo povezivanje kontrolnog napona sa generatora signala na motor ne bi bila dovoljna jer bi motor povukao dosta struje, i zbog toga se ubacuje pojačavač snage, ali i povratna sprega kako bi postojala informacija uz pomoć koje je moguće kontrolisati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



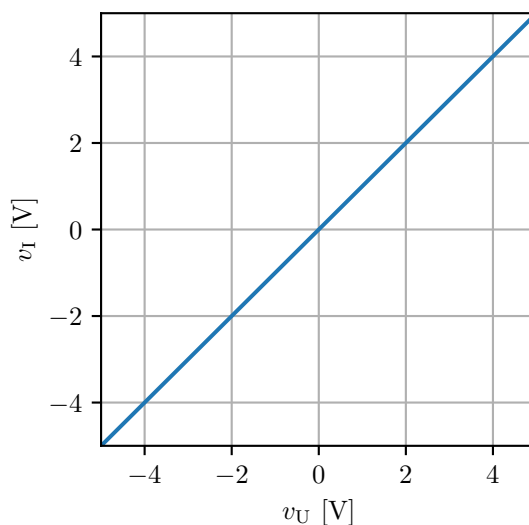
Slika 14: Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spregom.

1.6.3 Pojačavač snage u klasi AB sa negativnom povratnom spregom

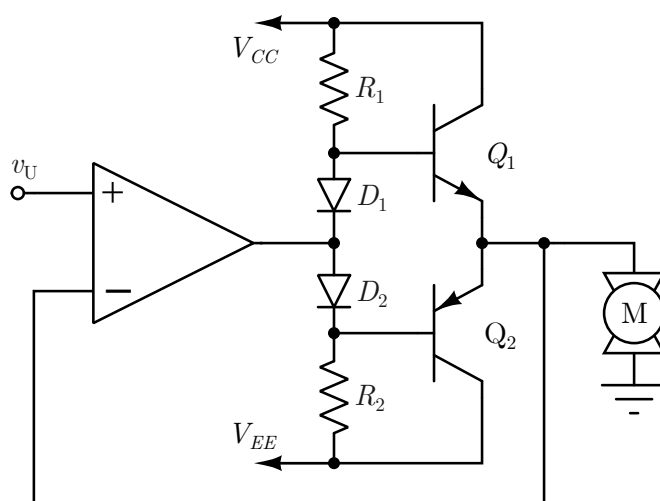
Problem koji se ovde javlja kod pojačavača u klasi B je *crossover* izobličenje zbog kojeg se ne može imati napon na izlazu veći od $V_{cc} - |V_{BE}|$, odnosno manji od $V_{ee} + |V_{BE}|$. Rešenje tog problema je modifikacija pojačavača dodavanjem dve diode sa naponom praga $V_T = |V_{BE}|$ za polarisanje tranzistora. Time se dobija pojačavač u klasi AB čija je šema prikazana na slici 15. Teorijski, naponi praga dioda i tranzistora su jednaki, i prenosna funkcija u tom slučaju linearna i može se videti na slici 16.



Slika 15: Pojačavač snage u klasi AB.



Slika 16: Prenosna karakteristika pojačavača u klasi AB.



Slika 17: Pojačavač snage u klasi AB sa negativnom povratnom spregom.

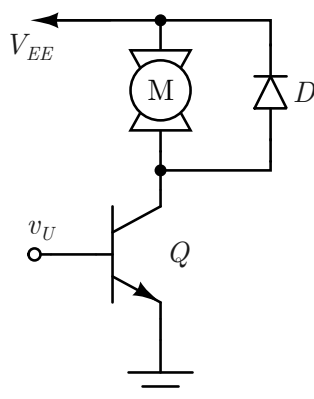
2 Karakteristike korišćenih komponenti sistema

U ovom segmentu, akcenat će biti na opisivanje komponenti sistema korišćenih za dobijena merenja.

2.1 Identifikacija modela motora

2.1.1 Merenje odziva motora

Šema koja je korišćena za merenje odziva jednosmernog motora je data na slici 18.

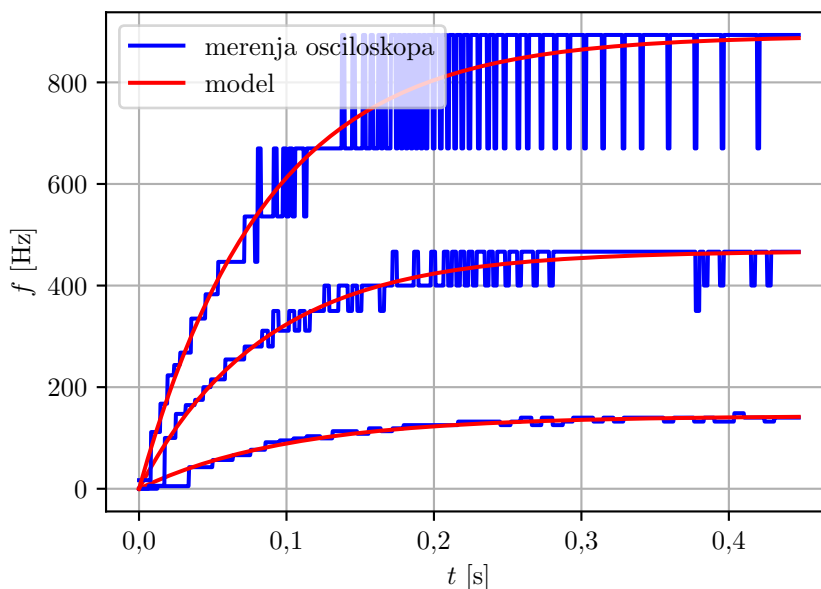


Slika 18: Eksperimentalna postavka za merenje odziva jednosmernog motora.

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

Na slici 19 je uz pomoć metode najmanjih kvadrata odrađeno modelovanje krive funkcijom oblika $f(t) = V_0 K_m \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{T_m} \right) \right)$. Određivanje optimalne krive obavljeno je pomoću funkcije `scipy.optimize.curve_fit` u programskom jeziku Python. Funkcija `curve_fit` radi po principu najmanjih kvadrata, odnosno, pravi model funkcije koja će imati najmanju kvadratnu grešku u odnosu na podatke koji su joj prosleđeni. Ako su poznati izmereni odbirci odskočnog odziva sistema, tada je poznata i povezanost vrednost trenutnog odbirka izlaza sa svim prethodnim odbircima izlaza, odnosno: $v_I[n - n_0] = f(v_I[n - n_j]), \forall n_j : \{n - n_j < n - n_0\}$. Naravno, mora postojati inicijalna pretpostavka oblika funkcije kako bi se model estimirao na najbolji mogući način, kolokvijalno, potrebno je imati neku informaciju o prirodi podataka koji se prosleđuju funkciji kao što su početni uslovi i parametri koji utiču na sam oblik funkcije. Podaci

koji su prosleđeni funkciji za estimaciju najboljeg modela su dobijeni preko osciloskopa i arduina. Osciloskop daje dobru rezoluciju signala na manjim učestanostima, dok na većim učestanostima arduino bolje prikuplja podatke. Ograničenje osciloskopa potiče od konačnog broja tačaka na ekranu osciloskopa, dok kod arduina to ne predstavlja problem.

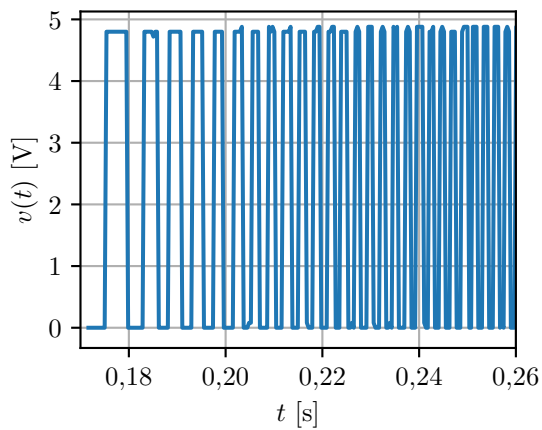


Slika 19: Određivanje optimalnog modela motora na osnovu merenog odskočnog odziva.

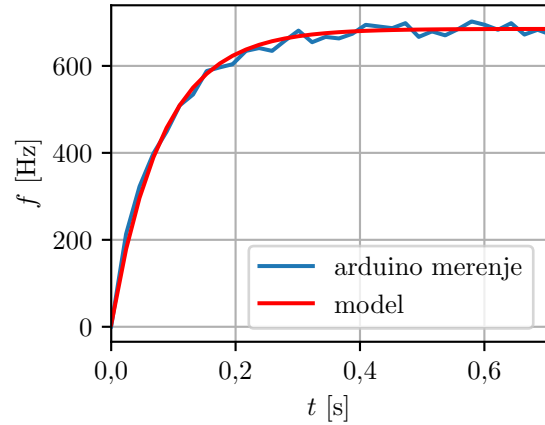
Dodatno, parametri signala sa grafika sa slike 19 prikazani u tabeli 2.1.1, u sortirani u rastućem poredku granične frekvencije.

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.



Slika 20: Vremenski oblik signala na izlazu enkodera.

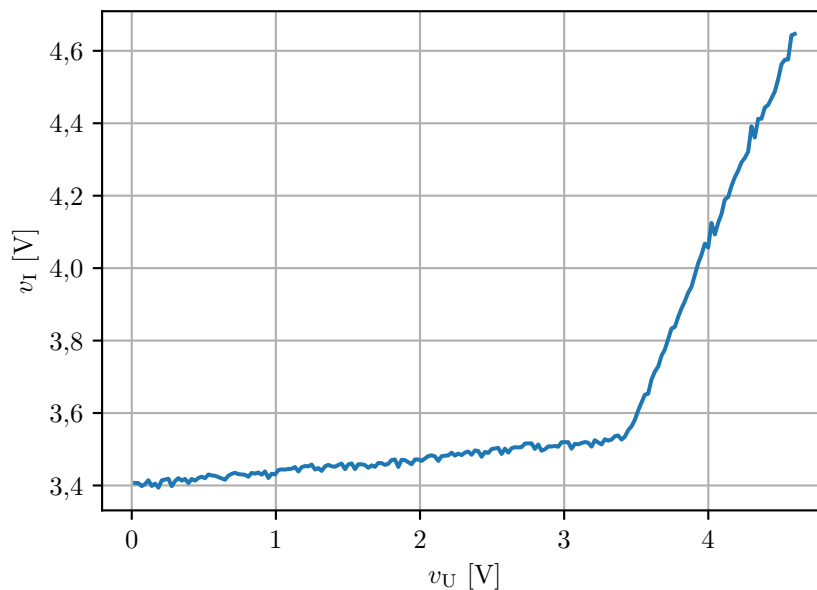


Slika 21: Izmerena vremenska zavisnost frekvencije signala na izlazu enkodera i model sa parametrima: $K_m = 679.088 \text{ Hz}$ i $T_m = 81 \text{ ms}$.

2.1.2 Merenje prenosne karakteristike motora

2.2 DC Sweep bez NF filtra

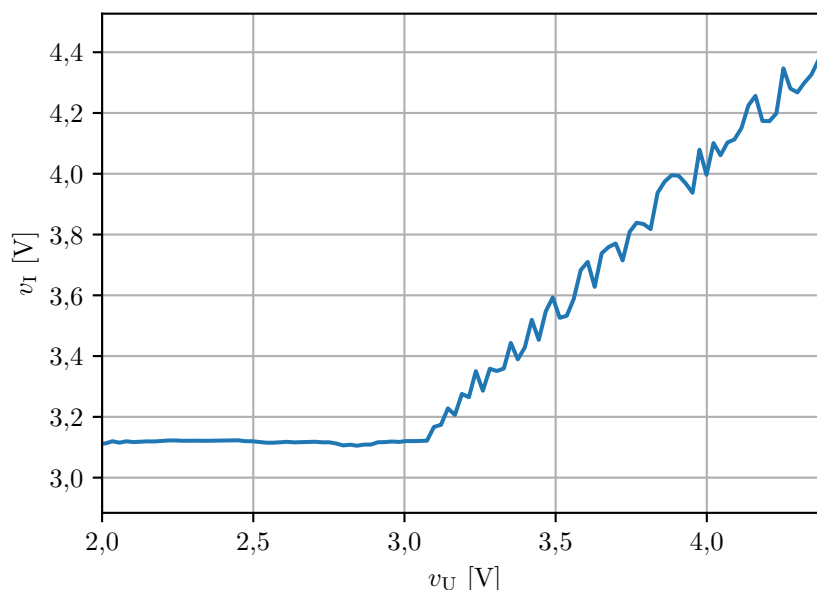
Merenja su pokazala da postoji ubrzanje motora pri povećanju ulaznog napona do nekih 3.5 V, a nakon toga je ubrzanje motora s promenom nivoa ulaznog napona značajnija. Posledica malog ubrzanja u prvom delu su paraziti u kolu i šum. Grafik zavisnosti nivoa izlaznog napona od nivoa ulaznog napona je prikazan na slici 39.



Slika 22: DC sweep celog sistema.

2.3 DC Sweep sa NF filtrom

Pošto šum predstavlja problem, dodavanjem NF filtra se taj problem može rešiti i dobija se smisleniji rezultat, odnosno da do nekih 3.1 V ulaznog napona, motor ima konstantu brzinu, a onda se brzina povećava s porastom ulaznog napona. Grafik zavisnosti nivoa izlaznog napona od nivoa ulaznog napona je prikazan na slici 40.

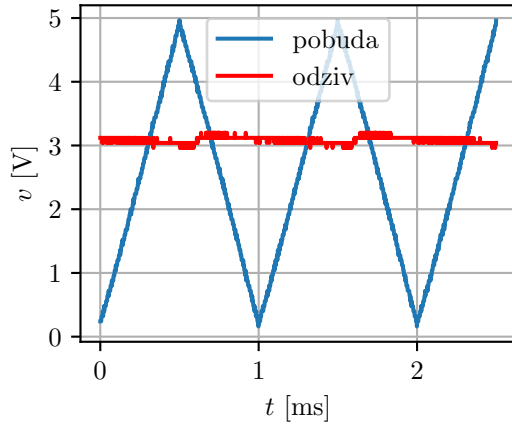


Slika 23: DC sweep celog sistema sa NF filtrom.

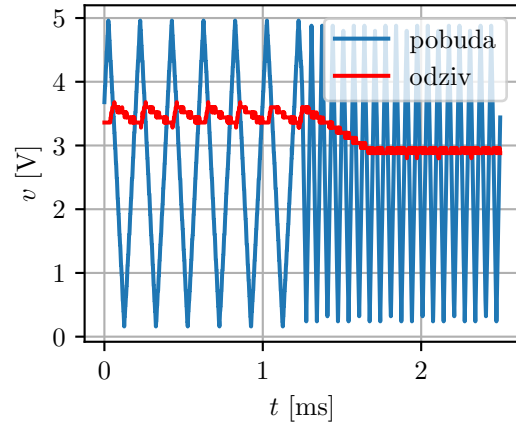
2.4 Merenje karakteristika pretvarača učestanosti

2.4.1 Karakteristika pretvarača bez filtra

Kao što je opisano u delu 1.3.2, pretvarač bi u idealnom slučaju, za napon konstantne frekvencije na ulazu, davao napon konstantnog nivoa na izlazu. U praktičnoj primeni se javljaju dosta parazita koji promene teorijski očekivan napon, i dobijamo pored očekivanog napona, i neke artefakte. Primer merenja izlaza pretvarača kada je na ulazu signal konstantne učestanosti je dat na slici 22.



Slika 24: Odziv konvertora na pobudu konstantne frekvencije.



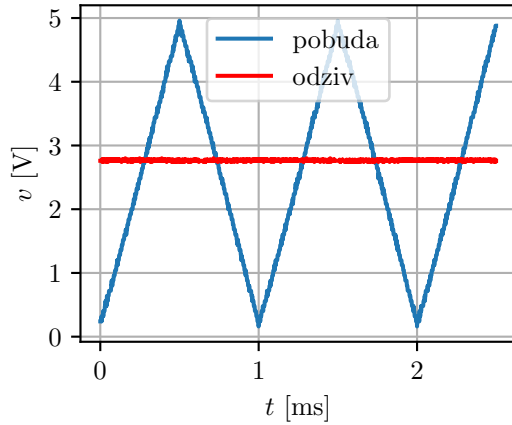
Slika 25: Odziv konvertora na pobudu sa promenljivom frekvencijom.

Pošto su male oscilacije, a učestanost je 1 kHz, dobijeni signal je upotrebljiv.

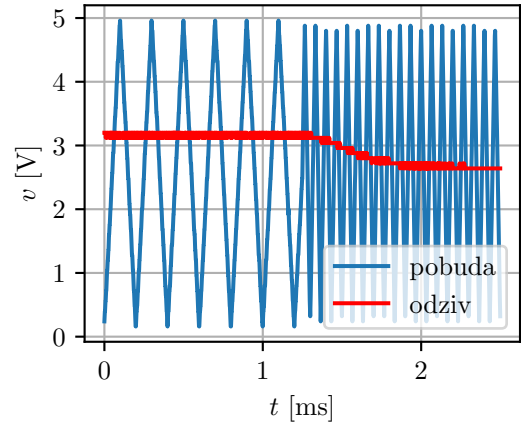
Što se tiče dinamičke karakteristike pretvarača, može se primetiti da se neželjene oscilacije koje se javljaju u nekakvoj zavisnosti od frekvencije ulaznog signala, mada, pošto nam je kod dinamičke karakteristike bitna šira slika, odnosno, nivoi signala na različitim učestanostima, male oscilacije ne predstavljaju veliki problem. Na slici 23 je prikazano merenje dinamičke karakteristike pretvarača za signal koji se menja sa 750 Hz na 1.25 kHz.

2.4.2 Karakteristika pretvarača sa filtrom

U prethodnoj tački se video problem sa oscilovanjem signala, odnosno naizmenične komponente malog signala koja potiče od parazita. Kada bi se pretvarač koristio sam po sebi to i ne bi predstavljalo veoma veliki problem, ali, pošto se signal sa pretvarača vodi dalje u kolu u kom postoje pojačavači, oni će pojačati taj mali signal i onda će predstavljati problem. Rešenje tog problema je filtriranje signala sa izlaza pretvarača filtrom propusnikom niskih učestanosti. Nakon filtriranja, dobiće se konstantan signal. Grafik odziva pretvarača sa filtrom propusnikom niskih učestanosti na izlazu na pobudu sa konstantnom frekvencijom je dat na slici 24.



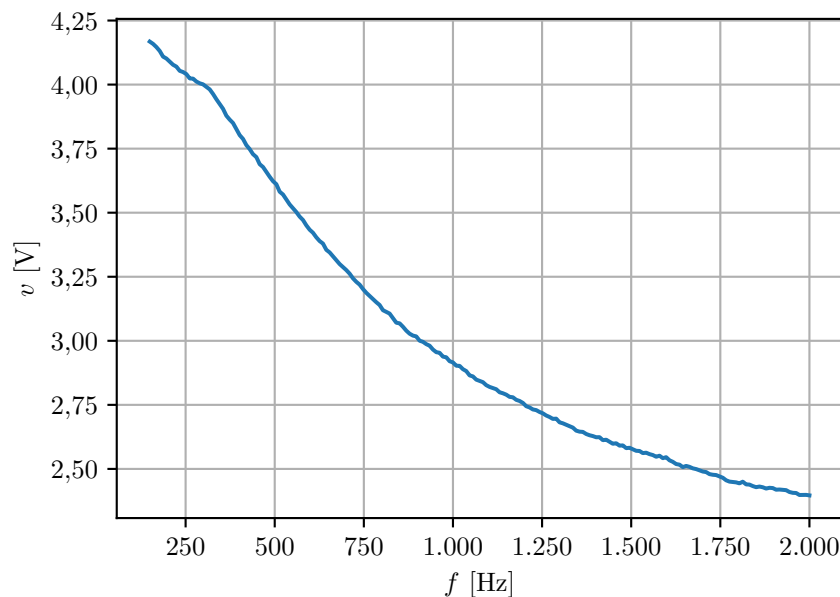
Slika 26: Odstziv konvertora sa filtrom na pobudu konstantne frekvencije.



Slika 27: Odstziv konvertora sa filtrom na pobudu sa promenljivom frekvencijom.

Dodavanjem filtra propusnika niskih učestanosti se skoro u potpunosti odstranila naizmenična komponenta malog signala, ali se i dinamika pretvarača malo usporila. Naime, filter koji ne propušta velike promene signala je uklonio naizmeničnu komponentu koja je bila posledica parazita, ali je i usporio promenu velikog signala, odnosno smanjio dinamiku. Dinamička karakteristika modifikovanog pretvarača je prikazana na slici 25.

Karakteristika pretvarača sa i bez filtra je više manje ista zato što filter ne menja funkciju pretvarača nego samo filtrira komponente na većim učestanostima, dok pretvarač sam po sebi ima veliko slabljenje na većim učestanostima, tako da dodavanje filtra ne predstavlja problem. Karakteristika pretvarača je data na slici 26.

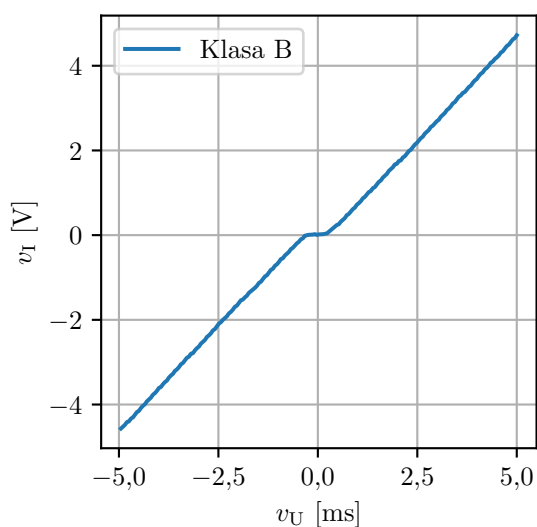


Slika 28: Prenosna karakteristika pretvarača učestanosti.

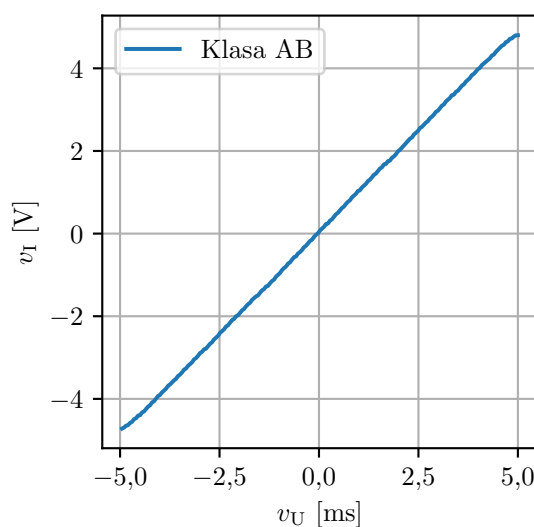
2.5 Merenje karakteristika pojačavača snage

2.5.1 Statička prenosna karakteristika

Kao što je već pomenuto u delu 1.6.2 i 1.6.3, kod pojačavača u klasi B se javlja *crossover* izobličenje, i ono je izmereno i prikazano na slici 27. Uz modifikaciju pojačavača u klasi B, odnosno dodavanjem dioda, dobija se pojačavač u klasi AB koji nema izobličenja i ima linearnu prenosnu karakteristiku. Izmerena karakteristika pojačavača u klasi AB je data na slici 28.



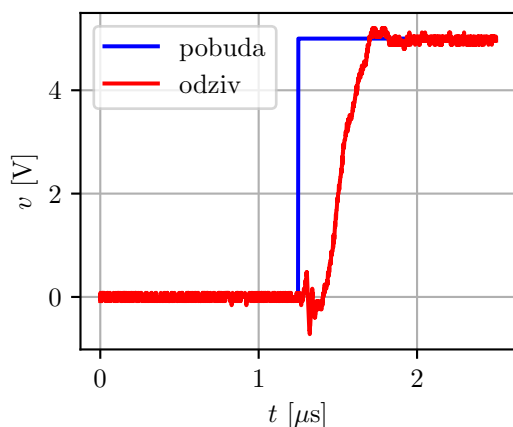
Slika 29: Izmerena statička karakteristika pojačavača u klasi B.



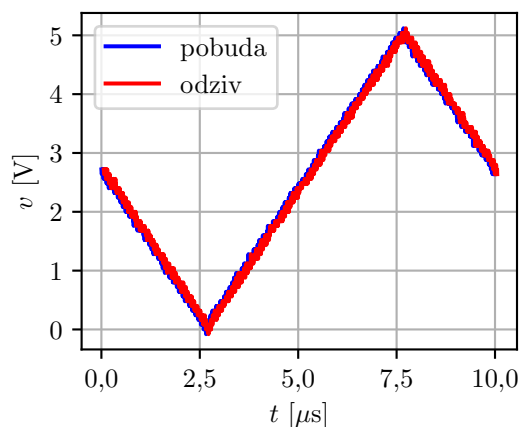
Slika 30: Izmerena statička karakteristika pojačavača u klasi AB.

2.5.2 Dinamička prenosna karakteristika sa i bez dioda

Odskočni odziv pojačavača u klasi B je prikazan na slici 29.



Slika 31: Odskočni odziv pojačavača snage.



Slika 32: Odziv pojačavača na signal rampe učestanosti $f = 100[\text{kHz}]$.

Izmerena dinamička karakteristika pojačavača u klasi B je prikazana na slici 30. Dinamika pojačavača se može još bolje videti kada se na ulazu dovede signal rampe, slika 30.

Merenja pokazuju da je dinamika pojačavača u klasi B barem 10 puta veća od dinamike signala koji se koriste u kolu, i da zadovoljava praktične zahteve za ispravan rad sistema. Pomenuto *crossover* izobličenje ne predstavlja problem u konkretnoj praktičnoj primeni zbog prirode signala koji dolazi na ulaz pojačavača. Naime, signal na ulazu pojačavača je učestanosti reda nekoliko kHz i rasprostranjen je po celom opsegu nivoa signala što znaci da je veoma mali interval vremena u zoni gde se javlja *crossover* izobličenje, tako da praktično, ne predstavlja ozbiljan problem, i sistem može da funkcioniše ispravno. Zbog toga, je u sistemu nije neophodno da postoji pojačavač u klasi AB, a dodatno se i štedi na broju komponenti potrebnih za ispravan rad sistema.

3 Rezultati i diskusija

3.1 Osnovni sistem

Ovde sema sistema

3.2 Sistem sa poboljšanjima pojačavača snage

Kao što je već objašnjeno u 1.6.2 i 1.6.3, postoji razlika između pojačavača u klasi B i pojačavača u klasi AB. Nelinearna izobličenja kod pojačavača u klasi B nisu predstavljala veliki problem dok je u sistemu korišćen P regulator sa beskonačnim pojačanjem, jer je tada signal na ulazu pojačavača snage bio izrazito oscilatornog karaktera i u veoma malim intervalima u vremenu se nalazio u zoni nelinearnosti pojačavača, što nije predstavljalo problem. Izmenama u regulatora, odnosno prelazak sa P na PI regulator signal na ulazu u pojačavač je postao manji i samim tim veći vremenski period se nalazi u zoni nelinearnih izobličenja pojačavača što je dovelo do toga se pojačavač snage poboljša, odnosno zameni pojačavačem u klasi AB koji nema nelinearna izobličenja. U ovom delu se može jasno videti tok projektovanja, odnosno modifikacije sistema koji se projektuje. Promene u

jednom delu sistema potencijalno izazivaju potrebu za promenu drugog dela sistema kako bi delovi sistema bili kompatibilni i radili ispravno. Jasno je da uz menjanje delova sistema može lako doći i do promene karakteristike i osobina celog sistema. Zbog toga je bitno da se na pravilan način izaberu delovi sistema i pre svega teorijski proveriti njihov povezan rad, a onda projektovati sistem hardverski. Ovaj način projektovanja ne garantuje ispravan rad sistema odmah nakon njegovog hardverskog projektovanja, samo smanjuje greške koje se mogu predvideti i pre hardverskog projektovanja sistema. Na ovaj način se minimizuju greške sistema u početnom stadijumu hardverskog projektovanja.

3.3 Sistem sa poboljšanjima senzora

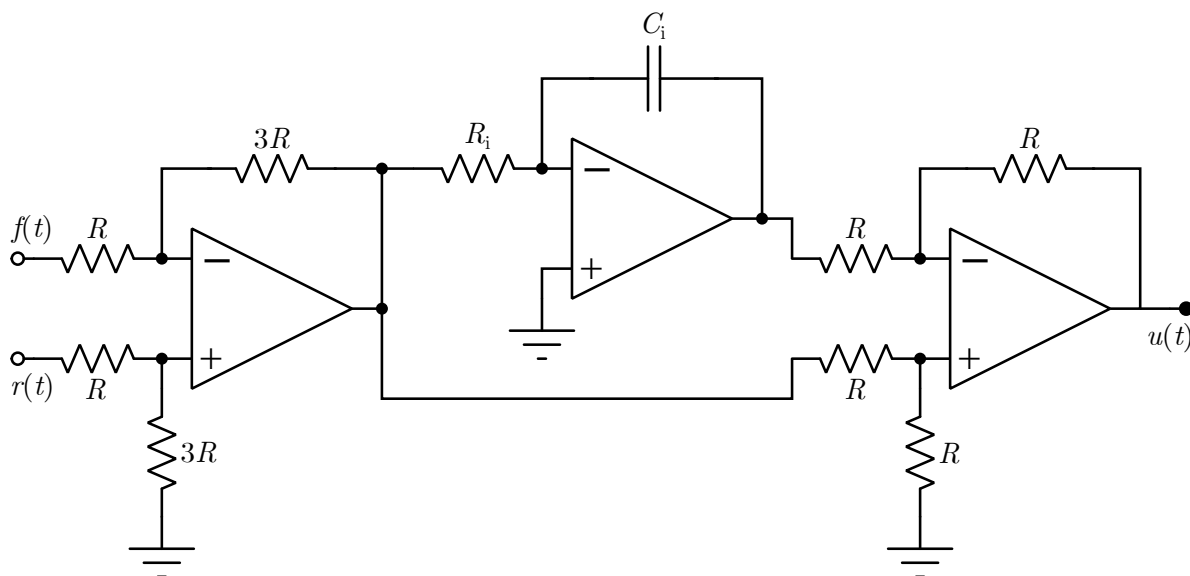
Pretvarač učestanosti u napon koji je pomenut u delu 1.3.2 dobro vrši funkciju konvertovanja učestanosti signala na ulazu u napon. Problem koji ima je unošenje šuma. To samo po sebi ne bi predstavljalo veliki problem, ali zbog pojačavača u sistemu, šum može dovesti do neisporavnog rada celog sistema. Zbog toga je, kao što je opisano u delu 1.3.3 dodat filtar propusnik niskih učestanosti na izlaz pretvarača i time rešen problem šuma, teorijski. Pošto filtar nije idealan, šum i dalje postoji, ali to ne predstavlja veliki problem jer je šum značajno oslabljen tako da ne predstavlja problem ostatku sistema. Kao što se vidi, pored projektovanja sistema na isti način teorijski i hardverski, rezultati se ne poklapaju u potpunosti, ali je zadržano rešenje zato što je to dovoljno dobro za ispravan rad sistema. Teorijska i hardverska implementacija, pored toga što su teorijski iste, neće dati iste rezultate u većini slučajeva, ali vrlo verovatno će se dobiti zadovoljavajući rezultati, tako da je obavezno teorijski isprojektovati sistem pre hardverskog projektovanja.

3.4 Sistem sa promenjenim regulatorom

Sistem je sa P regulatorom radi relativno dobro. Problem je konstantna statička greška i preveliko pojačanje koje pojačava i neželjene komponente signala, odnosno šum. Zamenom P regulatora za PI regulator je dobijen sistem koji ima konačno pojačanje i nema statičku grešku. Cena za to poboljšanje je preskok. Koeficijenti su izabrani na taj način da preskok bude što manji, a da se ujedno i zadovolji brzina odziva sistema. U si-

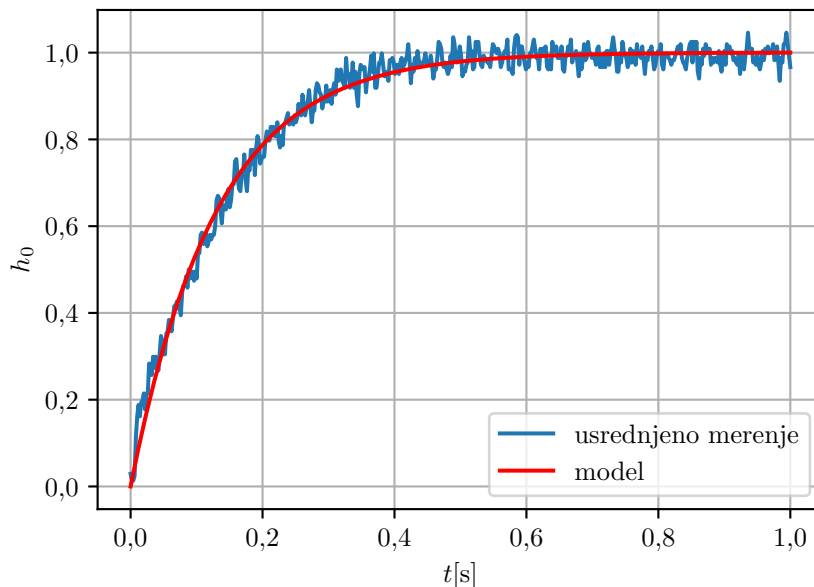
stemima upravljanja, nakon zamene PI regulatora umesko P regulatora, sledi zamena PI regulatora za PID regulator koji dodaje i diferencijator u sistem. U konkretnom slučaju to nije potrebno jer bi diferencijator pogoršao stvari, baš zbog velike nelinearnosti sistema. Konačno, jedine ideje za dalju modifikaciju datog sistema sa slike 7 su eventualne promene konstante proporcionalnosti K_p i integracione konstante T_i radi dobijanja drugačijeg oblika odziva. Razlog tome je različita upotreba sistema i drugačijih komponenti. Ako se sistem koristi za kretanje, veliki preskok i oscilacije nisu optimalne, a potrebno je imati brzinu koja se zada sistemu. Dok recimo ako se sistem koristi kao rashladni sistem, nije toliko bitno ako postoji preskok, ili oscilacije ili čak i mala greška u stacionarnom stanju. Tako da, predlozi daljih modifikacija i poboljšanja sistema se ne mogu dati jer ne postoji generalizovan slučaj nego zavisi od konkretne implementacije i načina upotrebe sistema.

Projektovanje $\Pi = \infty$ regulatora je relativno jednostavno uz korišćenje operacionog pojačavača. Projektovanje PI regulatora je malo složenije jer je potrebno podesiti parametre K_p i T_i takve da zadovolje zahteve koji su postavljeni. Podešavanjem koeficijenata je potrebno da se sistem ubrza onoliko koliko dinamika sistema to dozvoljava, i da se dobije relativno mali preskok. Dodatno, potrebno je podesiti parametre na taj način da oni budu realizibilni u hardveru. Električna šema PI regulatora koja je korišćena za merenja je prikazana na slici 31.



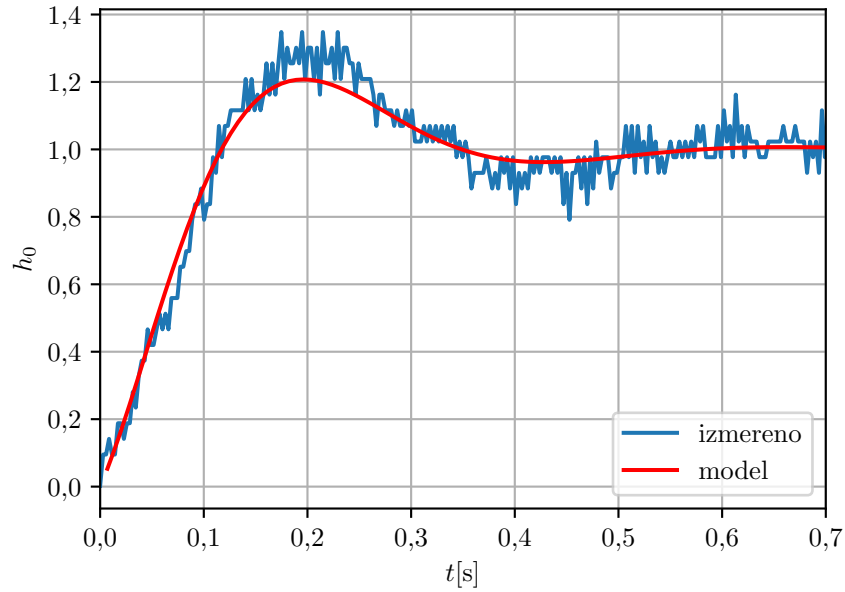
Slika 33: Električna šema projektovanog PI regulatora.

Da bi se isprojektovao PI regulator potrebno je znati prenosnu funkciju sistema $H(s) = \frac{K_m}{T_m s + 1}$, odnosno njene koeficijente, kao što je objašnjeno u delu 1.5.3. Koeficijenti mogu varirati u zavisnosti od sistema, u konkretnom slučaju oni iznose $K_m = 0.314$ i $T_m = 132$ ms. Koeficijenti se mogu dobiti merenjem odziva sistema $H(s)$ na nekoliko različitih pobuda i usrednjavanjem odziva sistema. Rezultati merenja i model usrednjenog odziva su dati na slici 32.

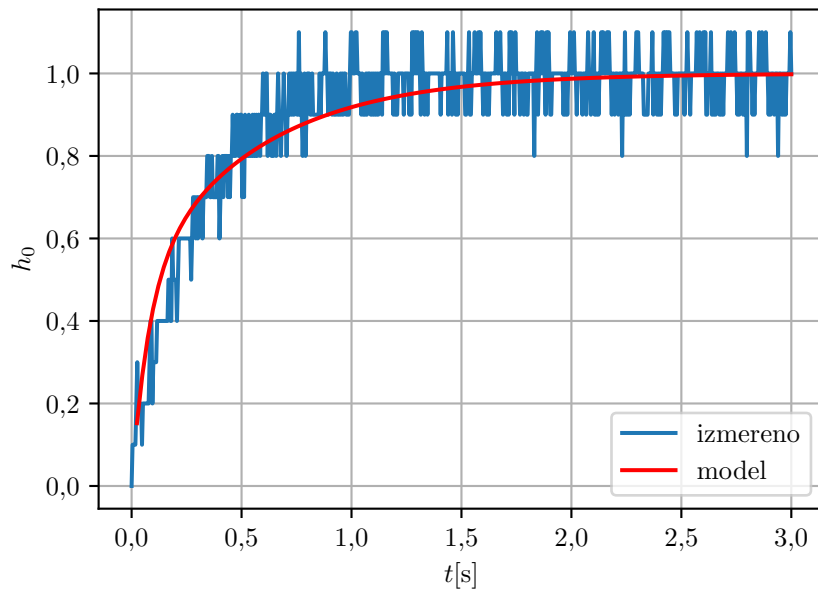


Slika 34: Usrednjen relativni odziv sistema $H(s)$ i njegov model.

Uz pomoć softverskog alata Octave je moguće isprojektovati model regulatora za više različitih koeficijenata i dobiti teorijski očekivani odskočni odziv sistema sa projektovanim regulatorom. Projektovana su dva regulatora, jedan sa bržim odzivom i preskokom i drugi, sporiji i bez preskoka. Preklopljeni rezultati softverskog modela i merenja izlaza sistema za različite koeficijente PI regulatora su prikazani na slikama 33 i 34.



Slika 35: Odskočni odziv sistema sa parametrima PI regulatora $K_p = 3$ i $T_i = 10$ ms.



Slika 36: Odskočni odziv sistema sa parametrima PI regulatora $K_p = 3$ i $T_i = 100$ ms.

Na slikama 32, 33 i 34 H_0 predstavlja relativnu brzinu motora.

3.5 Nelinearna ograničenja sistema

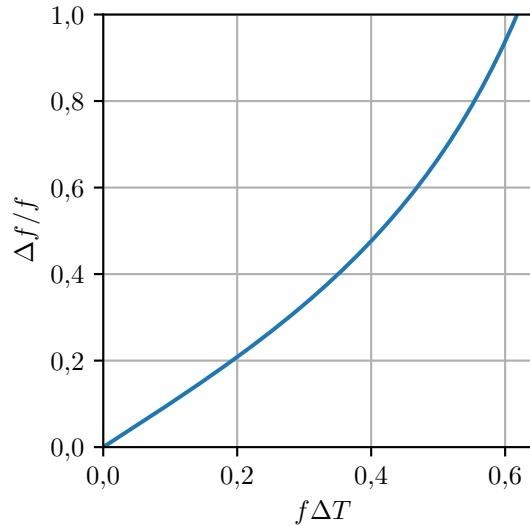
Šum je jedan od najvećih problema u sistemu. Naime, u sistemu postoje pojačavači koji treba da pojačaju mali signal kako bi mogla da se vrši njegova dalja hardverska obrada, ali pošto su ti signali već sami po sebi relativno mali, potrebno je da pojačanja

budu velika. Problem nastaje kada se tu javi šum koji prolazi kroz pojačavač s velikim pojačanjem i samim tim pojačava šum do značajnijih nivoa koji stvaraju velika nelinearna ograničenja. Ovaj problem se može donekle rešiti filtriranjem i modifikacijama sistema na taj način da se mogu smanjiti pojačanja pojačavača. To je jedan od razloga zbog kojeg se nakon P regulatora sa beskonačnim pojačanjem uveo PI regulator koj ima konačno pojačanje.

3.6 Diskusija rezultata

3.6.1 Obrada rezultata merenja

Od signala sa slike 20 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 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. Mana ovakvog pristupa je povećanje greške merenja sa povećanjem učestanosti signala. Dakle, ako imamo da je $f_0 = \frac{1}{T}$, najveća greška pri očitavanju učestanosti je jedan period odabiranja ΔT što dalje dovodi do toga da je najveća greška učestanosti $\Delta f = f \frac{f \Delta T}{1 - (f \Delta T)^2}$. Procentualna greška u odnosu na frekvenciju signala se može dobiti kao: $\frac{\Delta f}{f} = \frac{f \Delta T}{1 - (f \Delta T)^2}$. Sada je već jasno da se sa povećanjem učestanosti povećava i greška pri pogrešnom računanju frekvencije, što je i prikazano na slici 35.



Slika 37: Odnos normalizovane relativne greške u odnosu na normalizovanu frekvenciju.

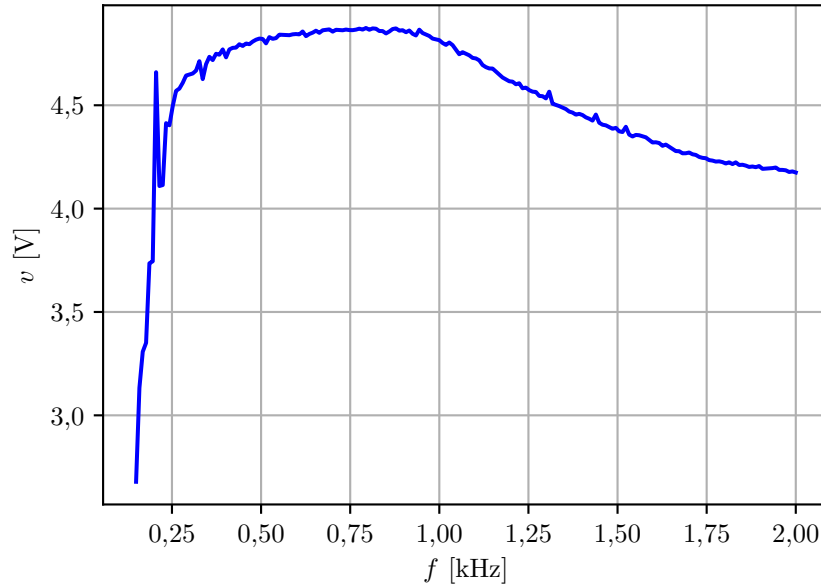
4 Zaključak

U ovom radu je izložen postupak projektovanja analognog sistema automatskog upravljanja motora jednosmerne struje. Ideja je bila da se uz pomoć analognog signala na ulazu sistema kontroliše brzina motora jednosmerne struje uz minimalnu grešku i što brži odziv sistema. Isprojektovan je hardver koji je sačinjen od pojačavača snage, motora jednosmerne struje i konvertora učestanosti u napon. Odrađena su sva potrebna merenja i ustanovljeno je da sistem daje teorijski očekivane rezultate što je i pokazano u delu 3.4.

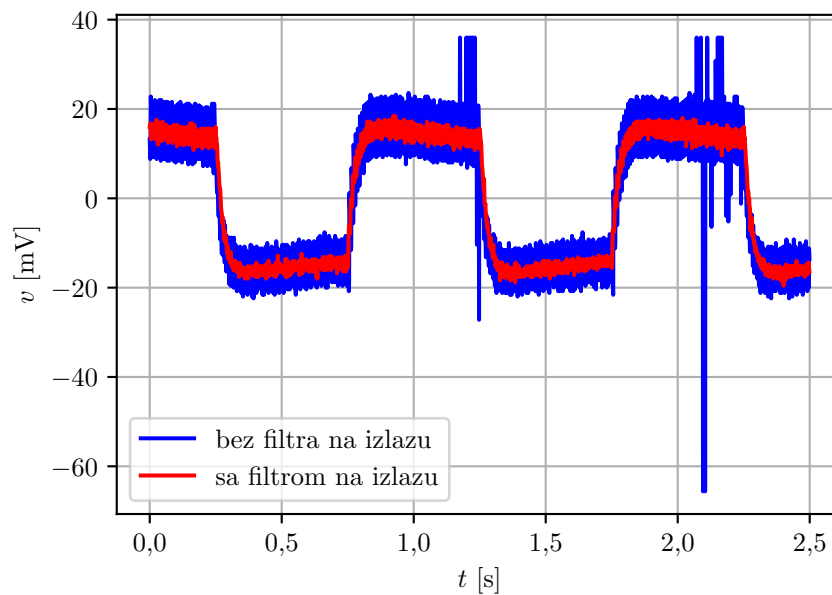
4.1 Merenje karakteristika pretvarača učestanosti

Prenosna karakteristika konvertora se može videti na slici 36.

Konvertor je sam po sebi veoma brz u poređenju sa odzivom motora i može se smatrati 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 36 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 37, i on je označen crvenom bojom.

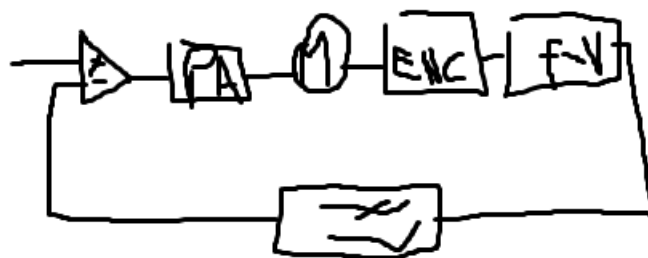


Slika 38: Prenosna karakteristika konvertora frekvencije u napon.



Slika 39: 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 urpavljanja je optimalnije dovesti signal čiji je nivo srazmeran brzini motora. Rešenje tog problema je povratna sprega i mala modifikacija kola koja se može videti na slici 38.



Slika 40: Modifikovana šema upravljanja jednosmernog motora uz pomoć povratne sprege.