

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	6
1.1	Analogni sistemi automatskog upravljanja	6
1.2	Motor stalne struje	7
1.2.1	Princip funkcionisanja	7
1.2.2	Odskočni odziv	8
1.3	Rotacioni enkoder	8
1.3.1	Princip funkcionisanja	8
1.3.2	Pretvarač učestanosti u napon	10
1.3.3	Pretvarač učestanosti u napon sa NF filtrom	10
1.4	Princip negativne povratne sprege	11
1.5	$\Pi = \infty$ regulator	12
1.6	PI regulator	13
1.7	Pojačavač snage	14
1.7.1	Pojačavač snage u klasi B	14
1.7.2	Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spregom	15
1.7.3	Pojačavač snage u klasi AB sa negativnom povratnom spregom	16
2	Karakteristike korišćenih komponenti sistema	17
2.1	Identifikacija modela motora	17
2.2	Merenje karakteristika pretvarača učestanosti	19
2.2.1	Karakteristika pretvarača bez filtra	19

2.2.2	Karakteristika pretvarača sa filtrom	21
2.3	Merenje karakteristika pojačavača snage	23
2.3.1	Statička prenosna karakteristika	23
2.3.2	Dinamička prenosna karakteristika sa i bez dioda	24
3	Rezultati i diskusija	26
3.1	Osnovni sistem	26
3.2	Sistem sa poboljšanjima pojačavača snage	26
3.3	Sistem sa poboljšanjima senzora	26
3.4	Sistem sa promenjenim regulatorom	27
3.5	Nelinearna ograničenja sistema	28
3.6	Diskusija rezultata	28
3.6.1	Obrada rezultata merenja	28
4	Zaključak	29
4.1	Merenja	29
4.2	Merenje karakteristika pretvarača učestanosti	29
5	DC Sweep celog sistema	30
5.1	DC Sweep bez NF filtra	30
5.2	DC Sweep sa NF filtrom	31
6	PI regulator - MERENJA	32

Spisak slika

1	Principska šema jednosmernog motora.	7
2	Modelovana karakteristika jednosmernog motora.	8
3	Enkoder.	9
4	Pretvarač frekvencije u napon.	10

5	Šema NF filtra	11
6	Prenosna karakteristika NF filtra.	11
7	Opšta struktura sistema sa negativnom povratnom spregom.	11
8	Blok šema II regulatora.	12
9	Blok šema PI regulatora.	13
10	Pojačavač snage u klasi B.	14
11	Prenosna karakteristika pojačavača u klasi B, za napon $ V_{BE} = 0.7V$. . .	14
12	Vremenski dijagram ulaznog i izlaznog signala.	15
13	Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spregom.	15
14	Pojačavač snage u klasi AB.	16
15	Prenosna karakteristika pojačavača u klasi AB.	16
16	Pojačavač snage u klasi AB sa negativnom povratnom spregom.	16
17	Eksperimentalna postavka za merenje odziva jednosmernog motora. . . .	17
18	Određivanje optimalnog modela motora na osnovu merenog odskočnog odziva.	18
19	Vremenski oblik signala na izlazu enkodera.	19
20	Izmerena vremenska zavisnost frekvencije signala na izlazu enkodera i mo- del sa parametrima: $K_m = 679.088 \text{ Hz}$ i $T_m = 81 \text{ ms}$	19
21	Odziv konvertora na pobudu konstante frekvencije.	20
22	Odziv konvertora na pobudu sa promenljivom frekvencijom.	21
23	Odziv konvertora sa filtrom na pobudu konstante frekvencije.	22
24	Odziv konvertora sa filtrom na pobudu sa promenljivom frekvencijom. . .	22
25	Prenosna karakteristika pretvarača učestanosti.	23
26	Izmerena statička karakteristika pojačavača u klasi B.	23
27	Izmerena statička karakteristika pojačavača u klasi AB.	23
28	Odskočni odziv pojačavača snage.	24
29	Odziv pojačavača na signal rampe učestanosti $f = 100[\text{kHz}]$	25
30	Odnos normalizovane relativne greške u odnosu na normalizovanu frekven- ciju.	29

31	Prenosna karakteristika konvertora frekvencije u napon.	29
32	Vremenski dijagram signala na izlazu konvertora frekvencije u napon bez i sa filtrom na izlazu.	30
33	Modifikovana šema upravljanja jednosmernog motora uz pomoć povratne sprege.	31
34	DC sweep celog sistema.	31
35	DC sweep celog sistema sa NF filtrom.	32
36	Električna šema projektovanog PI regulatora.	33
37	Preklopljen grafik softverski dobijenog idziva i merenog odziva.	33

1 Teorijski uvod

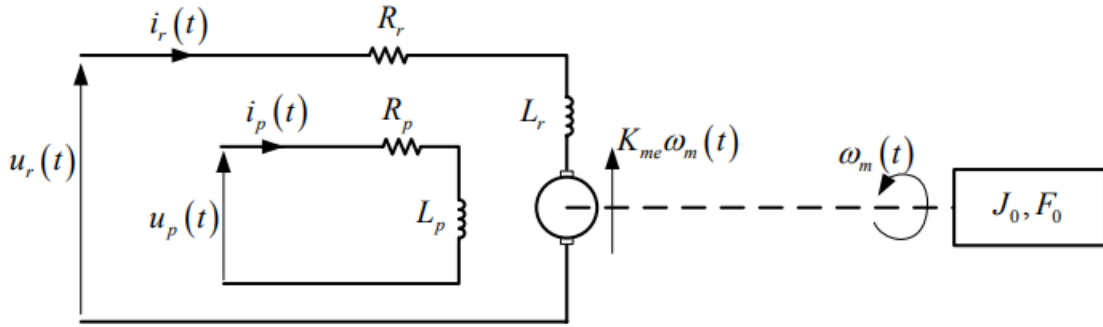
1.1 Analogni sistemi automatskog upravljanja

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.

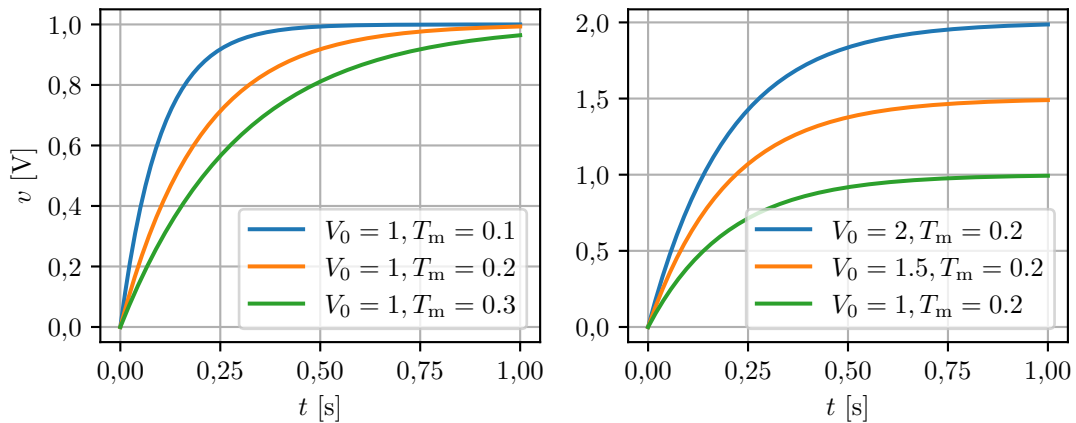
Od interesa je veza između ugaone brzine motora $\omega_m(t)$ i napona na rotoru $v_r(t)$, odnosno prenosna funkcija $G(s)$ koja se može aproksimirati sistemom prvog reda kao:

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

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.



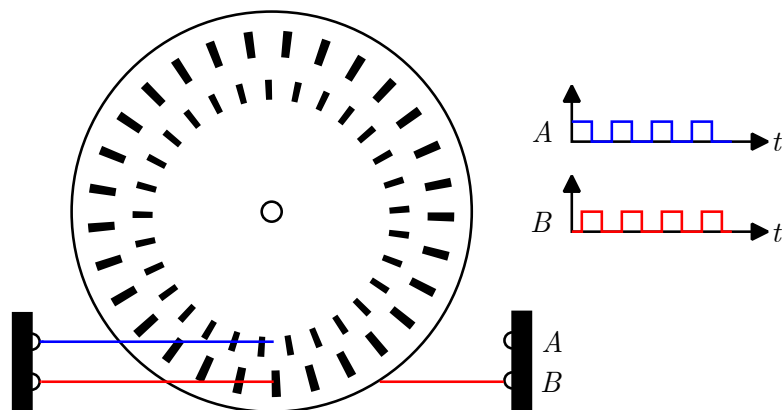
Slika 2: Modelovana karakteristika jednosmernog motora.

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.

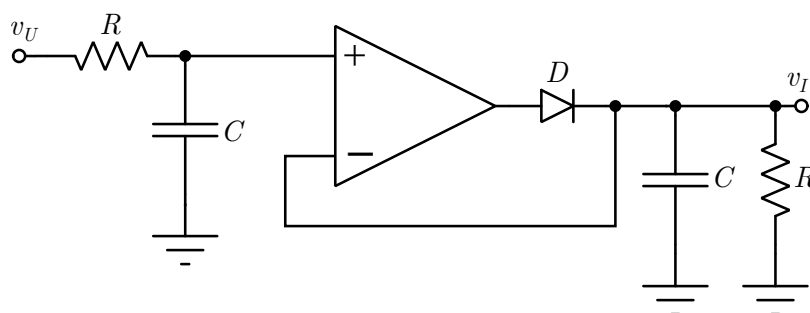


Slika 3: Enkoder.

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 smera 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.



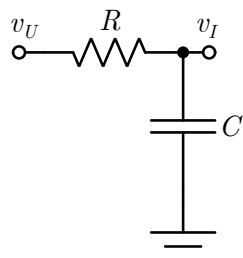
Slika 4: Pretvarač frekvencije u napon.

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.

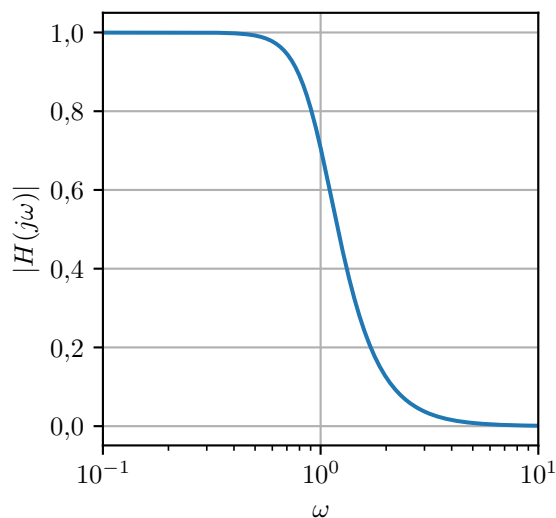
1.3.3 Pretvarač učestanosti u napon sa NF filtrom

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 nastav-

ku podrazumevati konvertor sa NF filtrom. Ovaj konvertor se u sistemu koji opisujemo predstavlja kao blok prenosne funkcije $F(s)$ u principskoj jednačini (2).



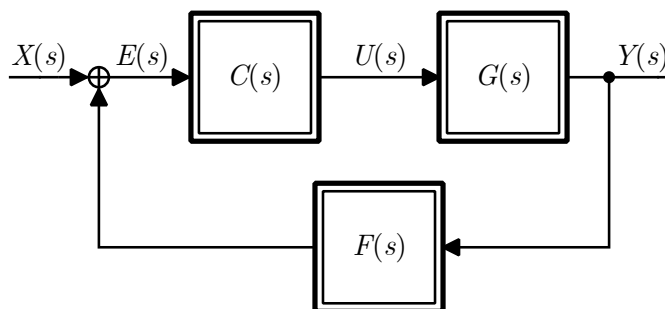
Slika 5: Šema NF filtra



Slika 6: Prenosna karakteristika NF filtra.

1.4 Princip negativne povratne sprega

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.

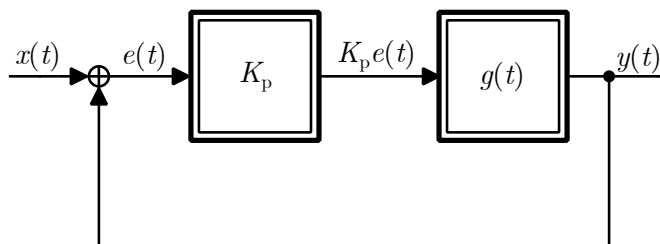
Signal $E(s)$ predstavlja signal greške za koji je u idealnom slučaju trebao da bude nula u svakom trenutku, ali pri promeni ulaznog napona usled realne dinamike sistema se javlja signal greške i on služi da olakša upravljanje sistema i da pomogne da se sistem dovede u željeno stanje tako što se oduzme 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 $\Pi = \infty$ 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.



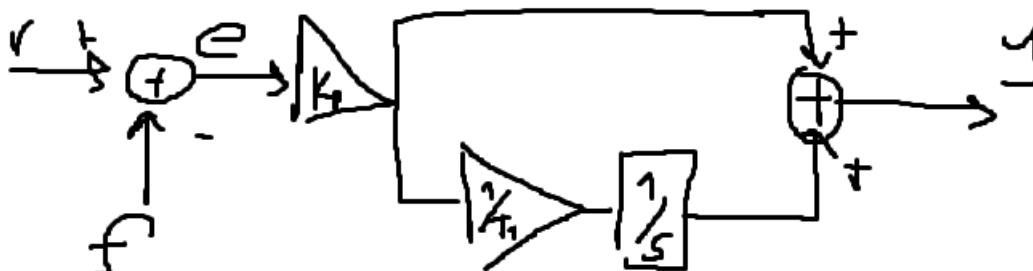
Slika 8: Blok šema Π regulatora.

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: $W(s) = \lim_{C(s) \rightarrow \infty} \frac{C(s)G(s)}{1 + F(s)C(s)G(s)} = \frac{\infty}{1 + \infty} = 1$.

1.6 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 davanje 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 36.



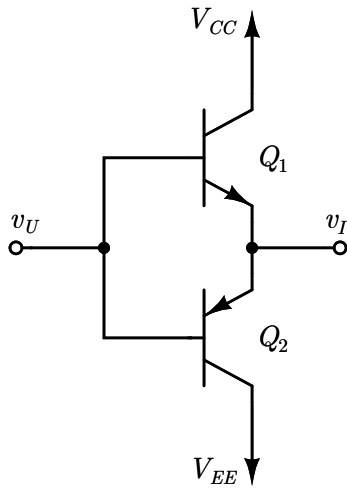
Slika 9: Blok šema PI regulatora.

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, tj. njegove osetljivosti na preskoke i brze pobude.

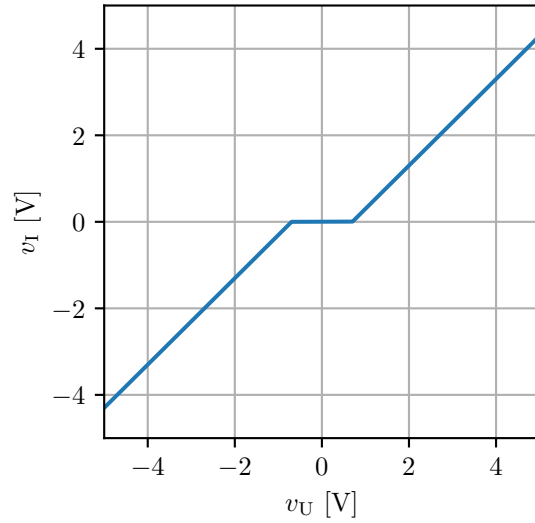
1.7 Pojačavač snage

1.7.1 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 10. Izobličenja se mogu bolje videti na prenosnoj karakteristici na slici 11 gde je prikazan izlazni napon $v_I(t)$ u funkciji ulaznog napona $v_U(t)$.

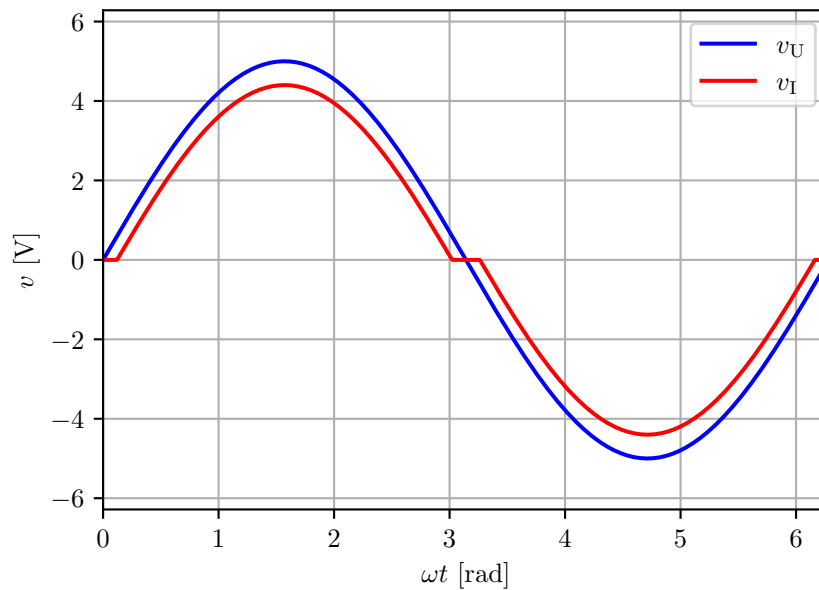


Slika 10: Pojačavač snage u klasi B.



Slika 11: Prenosna karakteristika pojačavača u klasi B, za napon $|V_{BE}| = 0.7V$.

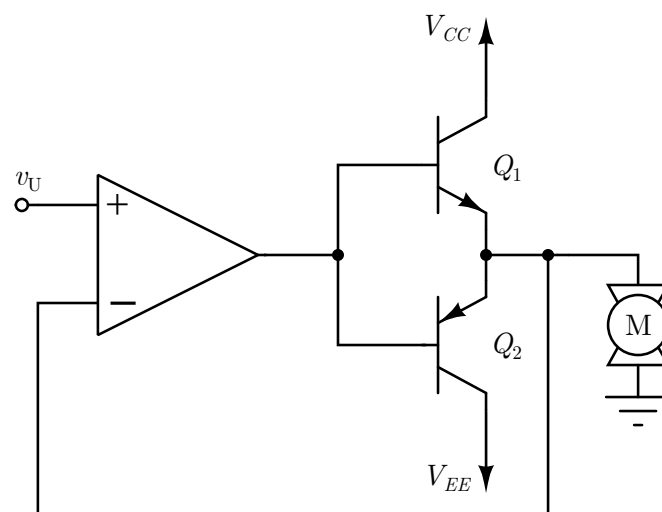
Za pozitivne vrednosti ulaznog napona veće od napona $|V_{BE}|$, pnp tranzistor je zakočen, dok npn tranzistor radi u direktnom aktivnom režimu. Dok za negativne vrednosti ulaznog napona važi dualno, kada je ulazni napon manji od $-|V_{BE}|$, npn tranzistor je zakočen, dok pnp tranzistor radi u direktnom 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 12



Slika 12: Vremenski dijagram ulaznog i izlaznog signala.

1.7.2 Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spregom

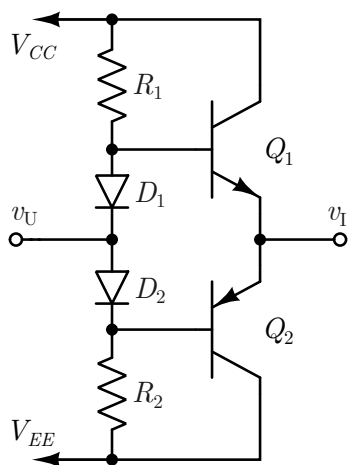
Pošto je za pokretanje motora potrebna velika snaga, samo povezivanje kontrolnog napona sa generatora signala na motor ne bi bila dovoljna jer bi motor povukao dosta struje, i zbog toga se ubacuje pojačavač snage, ali i povratna sprega kako bi postojala informacija uz pomoć koje je moguće kontrolisati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



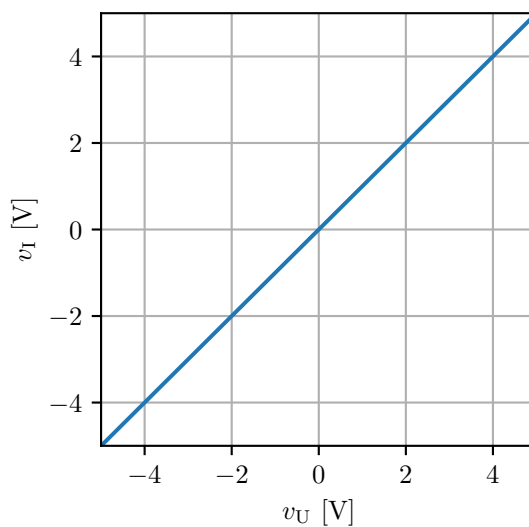
Slika 13: Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spregom.

1.7.3 Pojačavač snage u klasi AB sa negativnom povratnom spregom

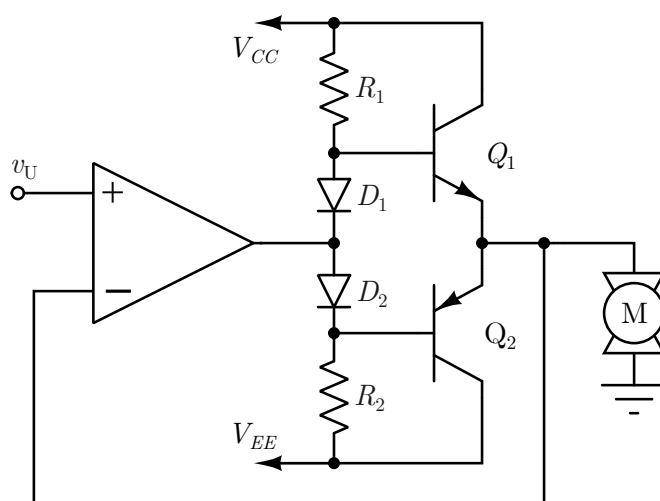
Problem koji se ovde javlja kod pojačavača u klasi B je *crossover* izobličenje zbog kojeg se ne može imati napon na izlazu veći od $V_{cc} - |V_{BE}|$, odnosno manji od $V_{ee} + |V_{BE}|$. Rešenje tog problema je modifikacija pojačavača dodavanjem dve diode sa naponom praga $V_T = |V_{BE}|$ za polarisanje tranzistora. Time se dobija pojačavač u klasi AB čija je šema prikazana na slici 14. Teorijski, naponi praga dioda i tranzistora su jednaki, i prenosna funkcija u tom slučaju linearna i može se videti na slici 15.



Slika 14: Pojačavač snage u klasi AB.



Slika 15: Prenosna karakteristika pojačavača u klasi AB.



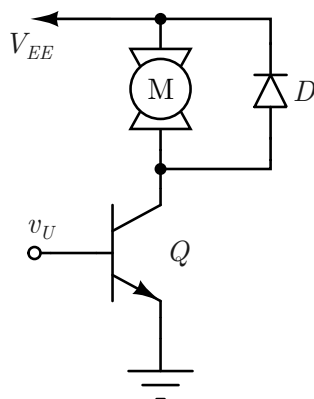
Slika 16: Pojačavač snage u klasi AB sa negativnom povratnom spregom.

2 Karakteristike korišćenih komponenti sistema

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

2.1 Identifikacija modela motora

Šema koja je korišćena za merenje odziva jednosmernog motora je data na slici 17.

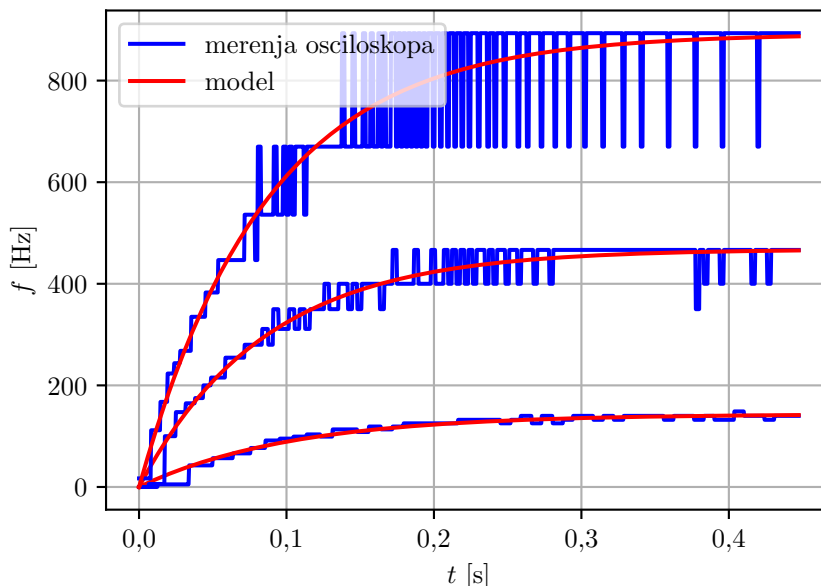


Slika 17: Eksperimentalna postavka za merenje odziva jednosmernog motora.

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

Na slici 18 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.

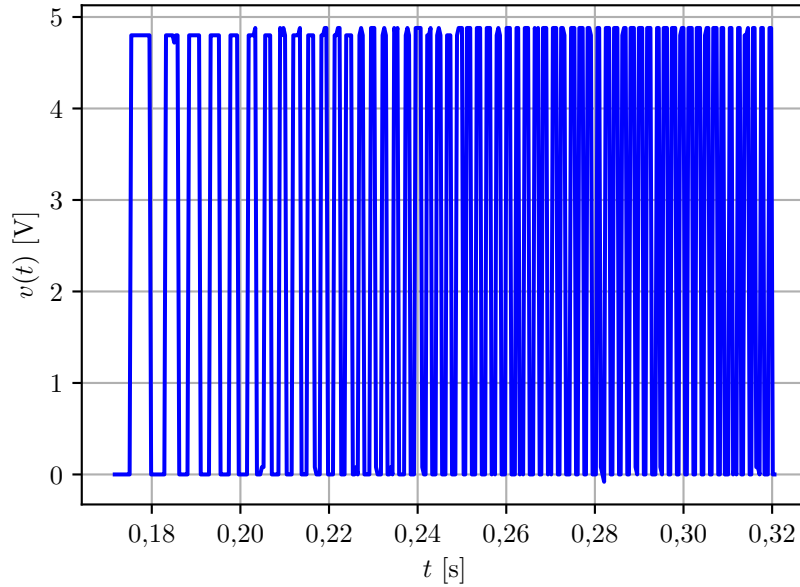


Slika 18: Određivanje optimalnog modela motora na osnovu merenog odskočnog odziva.

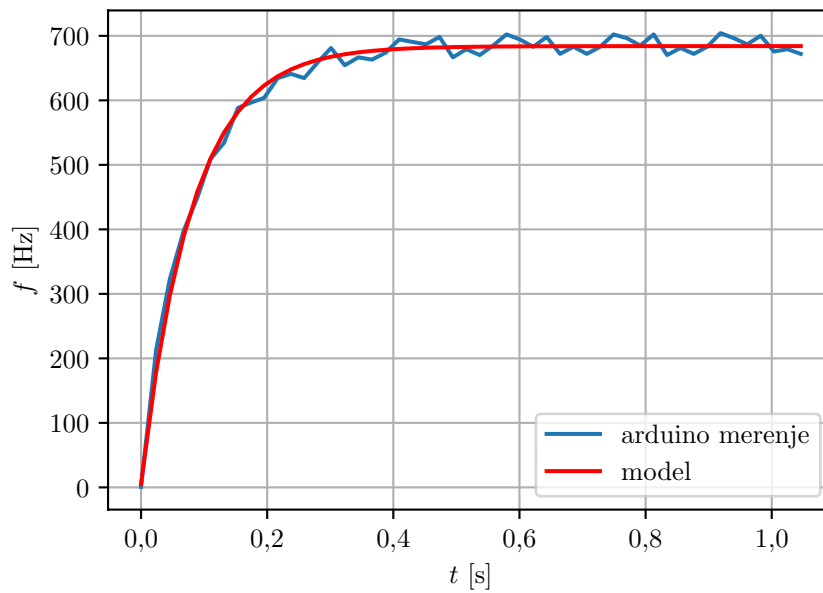
Dodatno, parametri signala sa grafika sa slike 18 prikazani u tabeli 2.1, u sortirani u rastućem poredku granične frekvencije.

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 19: Vremenski oblik signala na izlazu enkodera.



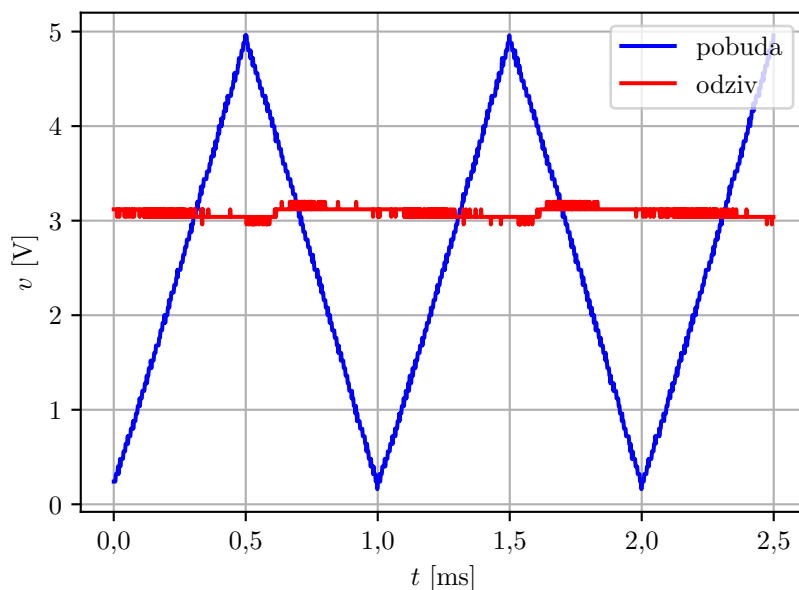
Slika 20: Izmerena vremenska zavisnost frekvencije signala na izlazu enkodera i model sa parametrima: $K_m = 679.088 \text{ Hz}$ i $T_m = 81 \text{ ms}$.

2.2 Merenje karakteristika pretvarača učestanosti

2.2.1 Karakteristika pretvarača bez filtra

Kao što je opisano u delu 1.3.2, pretvarač bi u idealnom slučaju, za napon konstante frekvencije na ulazu, davao napon konstantnog nivoa na izlazu. U praktičnoj primeni se javljaju dosta parazita koji promene teorijski očekivan napon, i dobijamo pored očekiva-

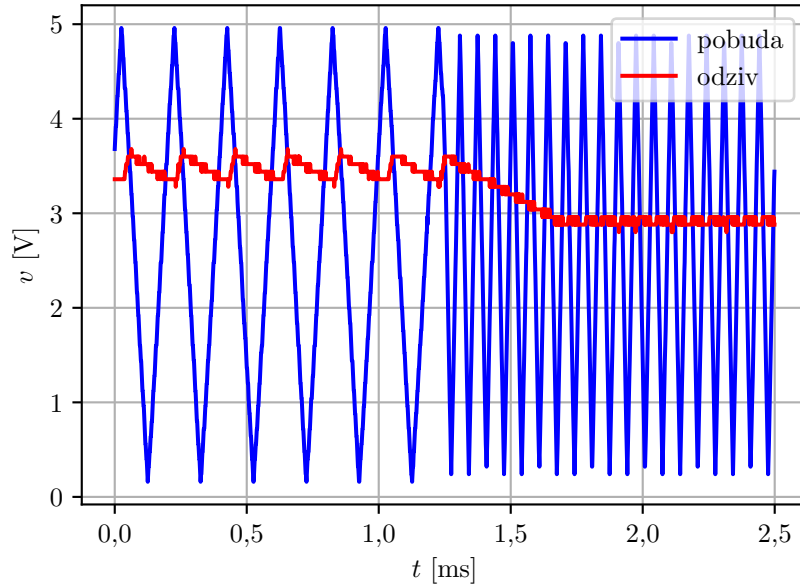
nog napona, i neke artefakte. Primer merenja izlaza pretvarača kada je na ulazu signal konstante učestanosti je dat na slici 21.



Slika 21: Odziv konvertora na pobudu konstante frekvencije.

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 22 je prikazano merenje dinamičke karakteristike pretvarača za signal koji se menja sa 750 Hz na 1.25 kHz.

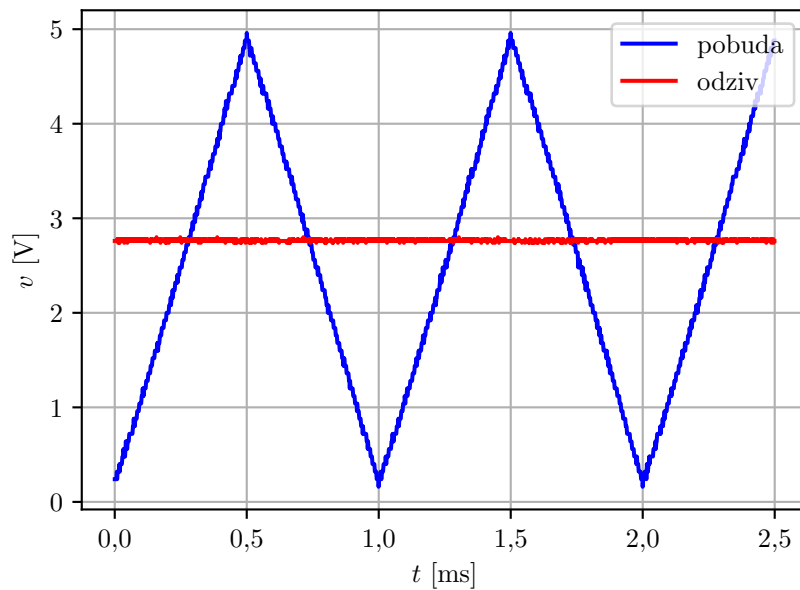


Slika 22: Odziv konvertora na pobudu sa promenljivom frekvencijom.

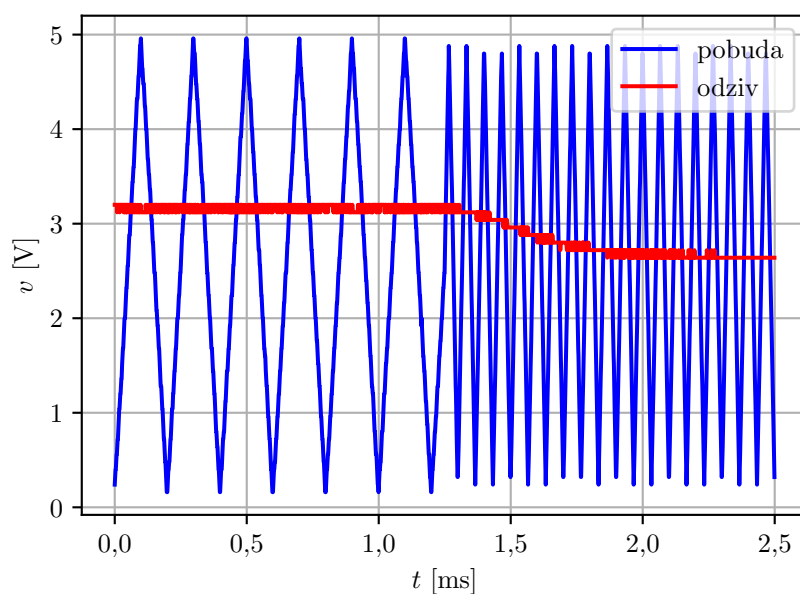
2.2.2 Karakteristika pretvarača sa filtrom

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 23.

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 24.

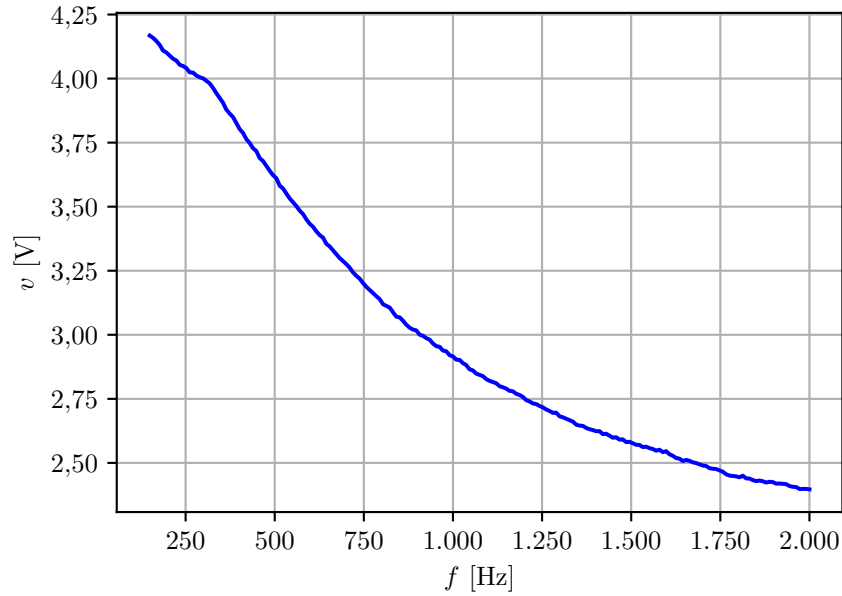


Slika 23: Odziv konvertora sa filtrom na pobudu konstante frekvencije.



Slika 24: Odziv konvertora sa filtrom na pobudu sa promenljivom frekvencijom.

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 25.

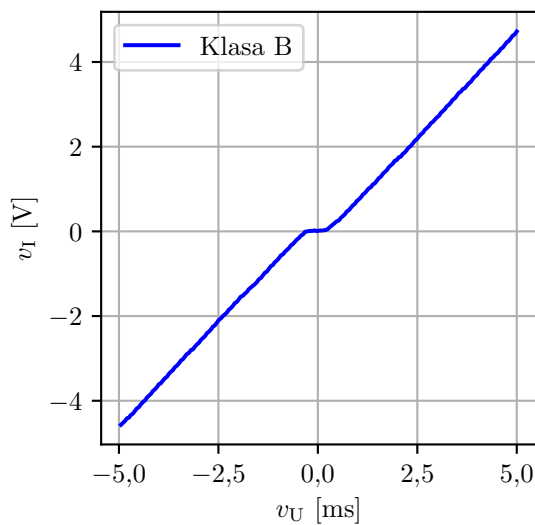


Slika 25: Prenosna karakteristika pretvarača učestanosti.

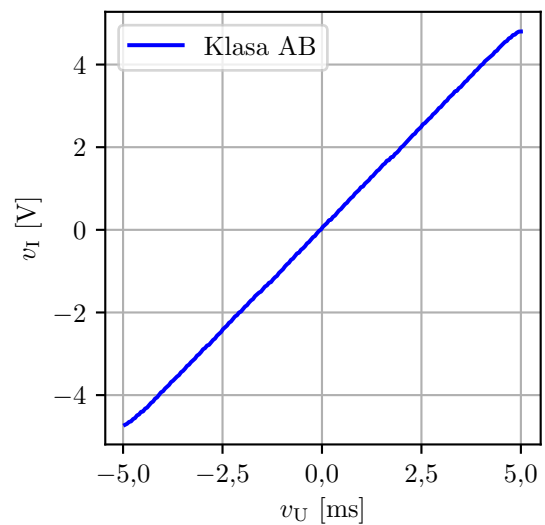
2.3 Merenje karakteristika pojačavača snage

2.3.1 Statička prenosna karakteristika

Kao što je već pomenuto u delu 1.7.2 i 1.7.3, kod pojačavača u klasi B se javlja *crossover* izobličenje, i ono je izmereno i prikazano na slici 26. 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 27.



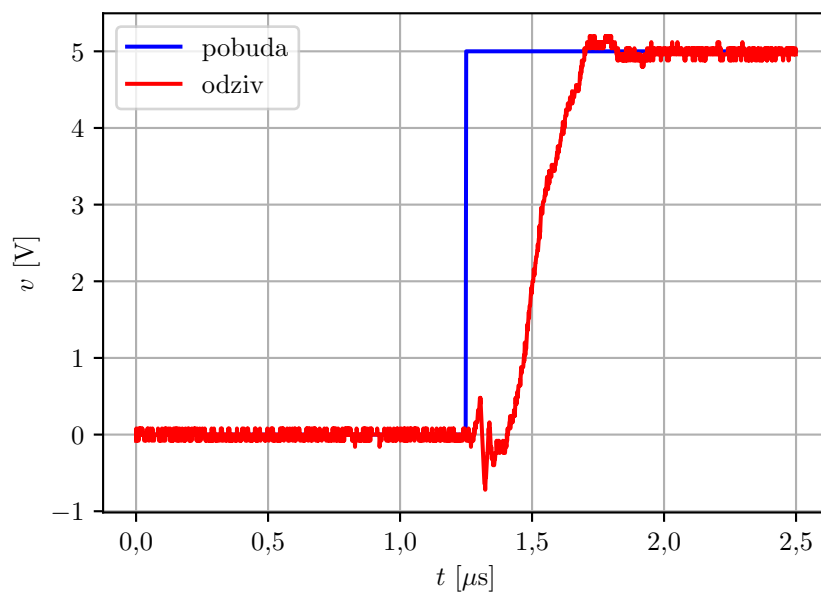
Slika 26: Izmerena statička karakteristika pojačavača u klasi B.



Slika 27: Izmerena statička karakteristika pojačavača u klasi AB.

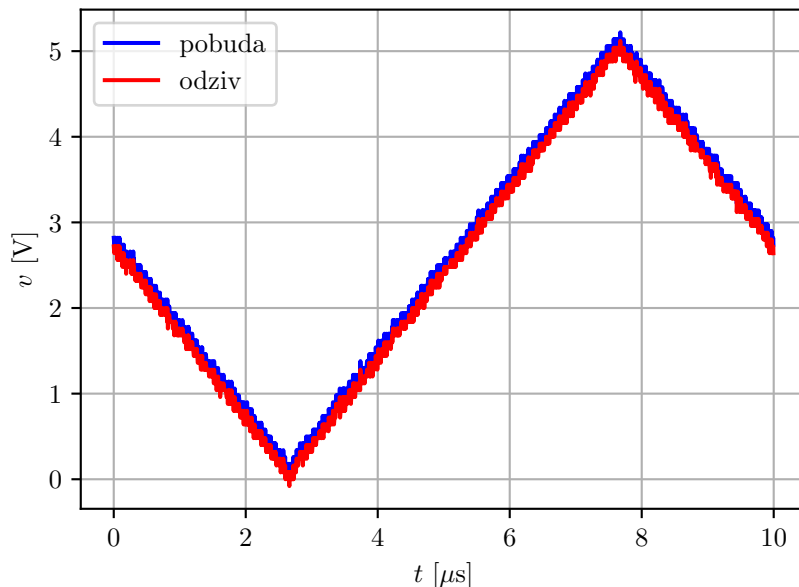
2.3.2 Dinamička prenosna karakteristika sa i bez dioda

Odskočni odziv pojačavača u klasi B je prikazan na slici 28.



Slika 28: Odskočni odziv pojačavača snage.

Izmerena dinamička karakteristika pojačavača u klasi B je prikazana na slici 29. Dinamika pojačavača se može još bolje videti kada se na ulazu dovede signal rampe, slika 29.



Slika 29: Odziv pojačavača na signal rampe učestanosti $f = 100[\text{kHz}]$.

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 1.7.2 i 1.7.3, 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

doivesti do neisporavnog rada celog sistema. Zbog toga je, kao što je opisano u delu 1.3.3 dodat filter propusnik niskih učestanosti na izlaz pretvarača i time rešen problem šuma, teorijski. Pošto filter 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 radio relativno dobro. Problem je bio 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 sistemima 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.

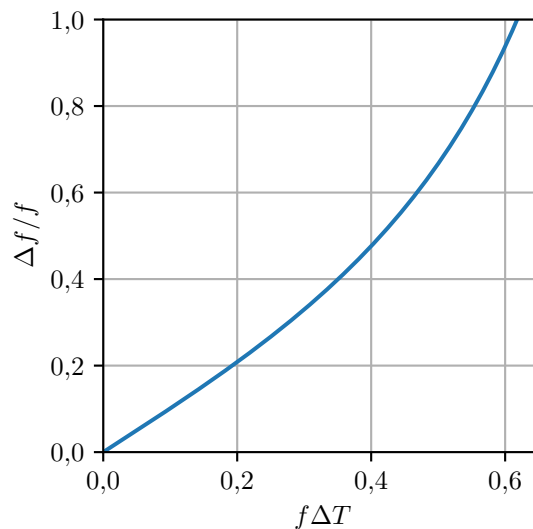
3.5 Nelinearna ograničenja sistema

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 obrađenje 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 30.



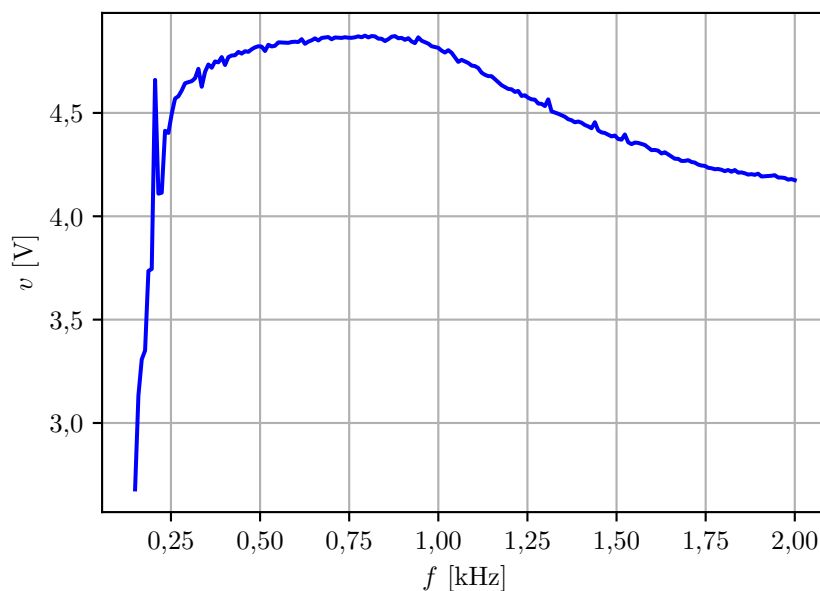
Slika 30: Odnos normalizovane relativne greške u odnosu na normalizovanu frekvenciju.

4 Zaključak

4.1 Merenja

4.2 Merenje karakteristika pretvarača učestanosti

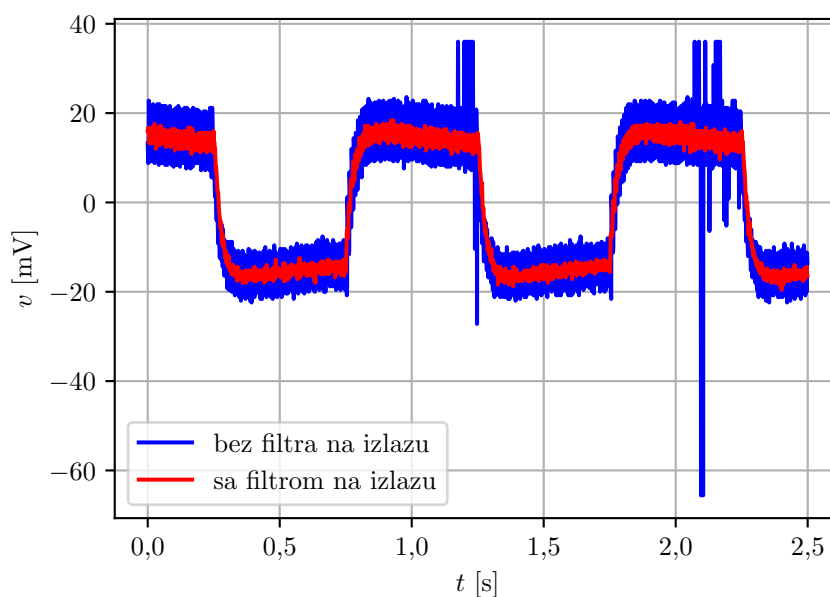
Prenosna karakteristika konvertora se može videti na slici 31.



Slika 31: Prenosna karakteristika konvertora frekvencije u napon.

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 31 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 32, i on je označen crvenom bojom.



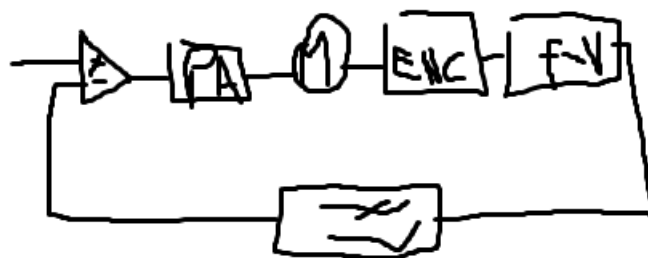
Slika 32: Vremenski dijagram signala na izlazu konvertora frekvencije u napon bez i sa filtrom na izlazu.

Pošto se za kontrolni signal dovodi izlaz generatora signala koji predstavlja pozitivnu unipolarnu povorku pravougaonih impulsa, radi lakšeg upravljanja je 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 33.

5 DC Sweep celog sistema

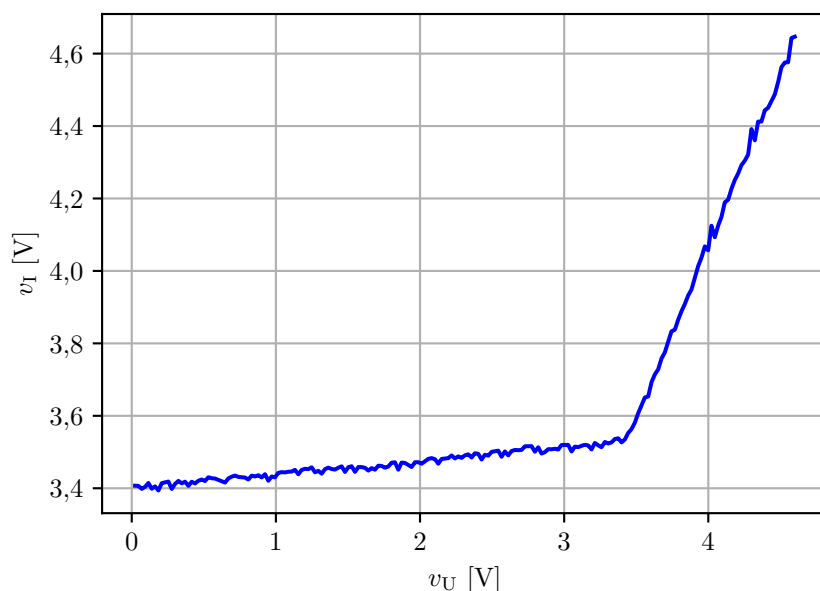
5.1 DC Sweep bez NF filtra

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 značaj-



Slika 33: Modifikovana šema upravljanja jednosmernog motora uz pomoć povratne sprege.

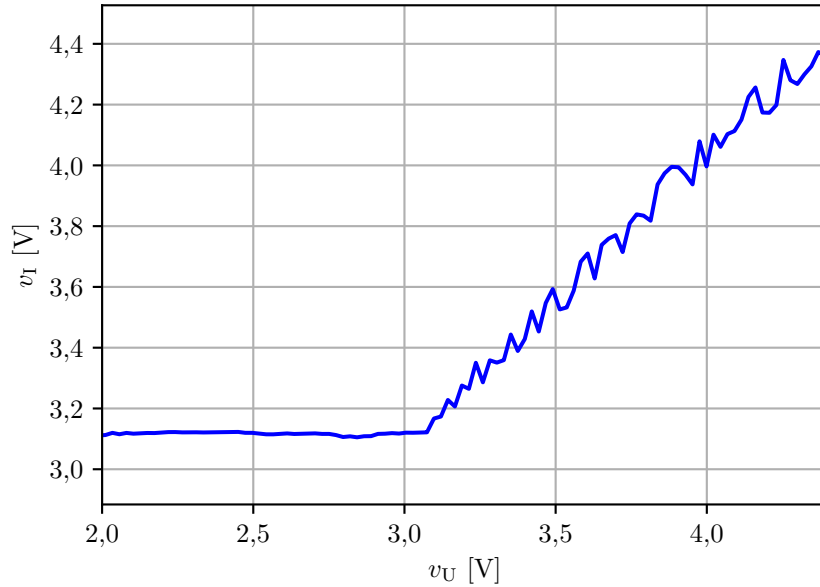
nija. Posledica malog ubrzanja u prvom delu su paraziti u kolu i šum. Grafik zavisnosti nivoa izlaznog napona od nivoa ulaznog napona je prikazan na slici 34.



Slika 34: DC sweep celog sistema.

5.2 DC Sweep sa NF filtrom

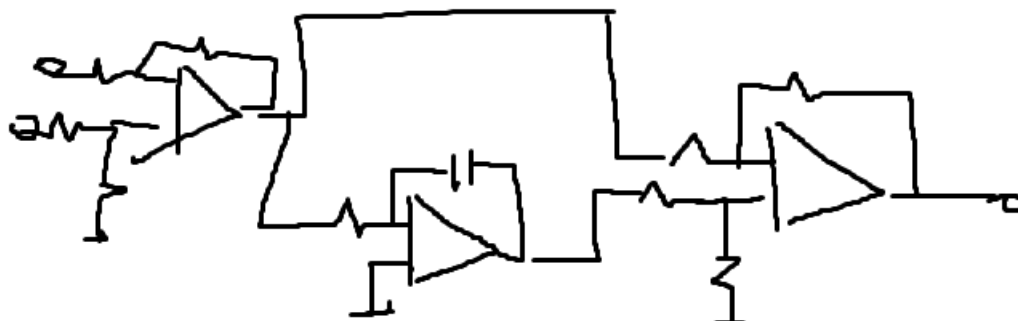
Pošto šum predstavlja problem, dodavanjem NF filtra se taj problem može rešiti i dobija se smisleniji rezultat, odnosno da do nekih 3.1 V ulaznog napona, motor ima konstantu brzinu, a onda se brzina povećava s porastom ulaznog napona. Grafik zavisnosti nivoa izlaznog napona od nivoa ulaznog napona je prikazan na slici 35.



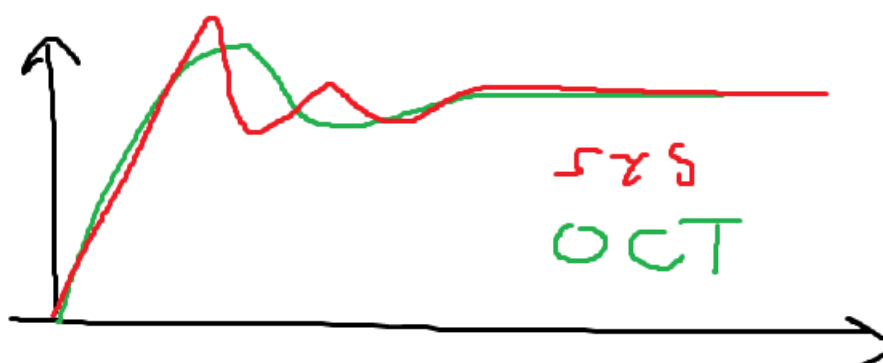
Slika 35: DC sweep celog sistema sa NF filtrom.

6 PI regulator - MERENJA

Da bi se mogao pravilno isprojektovati kontroler potrebno je znati prenosnu funkciju sistema kojim se upravlja. U konkretnom slučaju to je $H(s) = G(s)F(s)$ sa slike 7. Kada se dobije izmereni odziv sistema $H(s)$ potrebno je, u nekom od programskih paketa, konkretno GNU Octave, naći odskočni odziv sistema i softverski modifikovati sistem davanjem integratora i podešavanjem koeficijenata tako da se dobije željeni izlaz sistema na odskočnu pobudu. Potrebno je ubrzati sistem dovoljno da to ima smisla, dok s druge strane, potrebno je smanjiti preskok što je više moguće, takođe, potrebno je i podesiti parametre u softverskom alatu tako da regulator koji se simulira bude i realan za projektovanje. Nakon iterativnog postupka dobijanja optimalnih komponenti se za dati sistem dobija da je $K_p = 3, T_i = 100 \text{ ms}$, što je takođe i lako isprojektovati hardverski. Nakon izračunavanja optimalnih koeficijenata, potrebno je isprojektovati PI regulator i izmeriti odziv sistema i uporediti ga sa softverski dobijenim rezultatima. Električna šema PI regulatora je prikazana na slici 36 dok su rezultati merenja su prikazani na slici 37.



Slika 36: Električna šema projektovanog PI regulatora.



Slika 37: Preklopljen grafik softverski dobijenog idziva i merenog odziva.