

UNIVERZITET U BEOGRADU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET



TRAKTOR
Diplomski rad

Mentor: ^{vanredni}
Dr Radivoje Đurić, 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	2
1.2.1	Princip funkcionisanja	2
1.2.2	Odskočni odziv	3
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	5
1.4	Princip negativne povratne sprege	6
1.5	$\Pi = \infty$ regulator	7
1.6	Pojačavač snage	8
1.6.1	Pojačavač snage u klasi B	8
1.6.2	Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spre- gom	9
1.6.3	Pojačavač snage u klasi AB sa negativnom povratnom spregom	10
2	Karakteristike korišćenih komponenti sistema	10
2.1	Identifikacija modela motora	11
2.2	Merenje karakteristika pretvarača učestanosti	11
2.2.1	Karakteristika pretvarača bez filtra	11
2.2.2	Karakteristika pretvarača sa filtrom	11
2.3	Merenje karakteristika pojačavača snage	11
2.3.1	Statička prenosna karakteristika	11
2.3.2	DI namička prenosna karakteristika sa i bez dioda	11
3	Rezultati i diskusija	11
3.1	Osnovni sistem	11
3.2	Sistem sa poboljšanjima pojačavača snage	11
3.3	Sistem sa poboljšanjima senzora	11
3.4	Nelinearna ograničenja sistema	11
3.5	DI skusija rezultata	11
4	Zaključak	11
4.1	Merenja	11
4.1.1	Merenje odskočnog odziva jednosmernog motora iz stanja mirovanja	11
4.2	Obrada rezultata merenja	13

4.3	Merenje karakteristika pretvarača učestanosti	14
-----	---	----

Spisak slika

1	Principska šema jednosmernog motora.	3
2	Modelovana karakteristika jednosmernog motora.	3
3	Enkoder.	4
4	Konvertor frekvencije u napon.	5
5	Šema NF filtra	6
6	Prenosna karakteristika NF filtra.	6
7	Opšta struktura sistema sa negativnom povratnom spregom.	6
8	Blok šema II regulatora.	7
9	Pojačavač snage u klasi B.	8
10	Prenosna karakteristika pojačavača u klasi B, za napon $ V_{BE} = 0.7V$. . .	8
11	Vremenski dijagram ulaznog i izlaznog signala.	8
12	Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spregom.	9
13	Pojačavač snage u klasi AB.	10
14	Prenosna karakteristika pojačavača u klasi AB.	10
15	Eksperimentalna postavka za merenje odziva jednosmernog motora. . . .	11
16	Određivanje optimalnog modela motora na osnovu merenog odskočnog odziva.	12
17	Vremenski oblik signala na izlazu enkodera.	13
18	Izmerena vremenska zavisnost frekvencije signala na izlazu enkodera i model sa parametrima: $K_m = 679.088 \text{ Hz}$ i $T_m = 0.081 \text{ s}$	13
19	Odnos normalizovane relativne greške u odnosu na normalizovanu frekvenciju.	14
20	Prenosna karakteristika konvertora frekvencije u napon.	15
21	Vremenski dijagram signala na izlazu konvertora frekvencije u napon bez i sa filtrom na izlazu.	15
22	Modifikovana šema upravljanja jednosmernog motora uz pomoć povratne sprege.	16

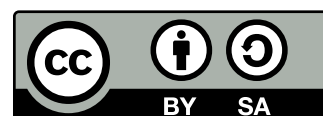
Sažetak

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 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 analogni^a 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 ~~konstantno~~^{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. Konkretni 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.

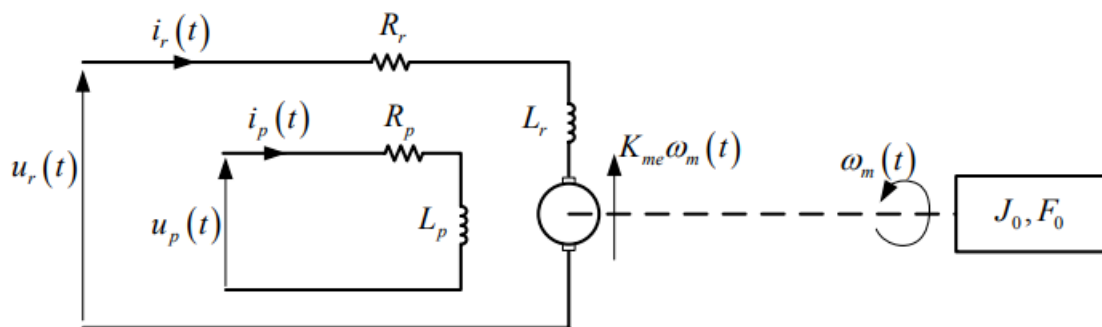
1.2 Motor stalne struje

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. ~~Ono što je od interesa jeste~~^{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:

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

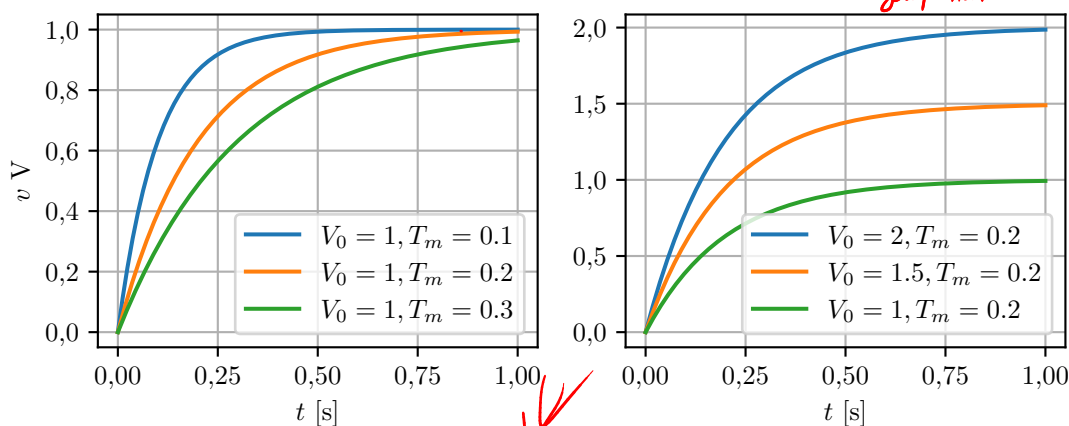
Konstanta K_m predstavlja statičko pojačanje, dok konstanta T_m predstavlja vremensku konstantu jednosmernog motora upravljaniog strujom u rotoru.



Slika 1: Principalska šema jednosmernog motora.

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, ~~automatski~~ je poznata i povezanost trenutne vrednosti izlaza sa svim prethodnim vrednostima izlaza, odnosno: $v_I(t - t_0) = f(v_I(t - t_j)), \forall t_j : \{t - t_j < t - t_0\}$. 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 jednačini 1, odziv na odskočnu pobudu, u kompleksnom domenu, se dobija kao: $V_I(s) = G(s)V_U(s)$, što u vremenskom domenu izgleda: $v_I(t) = V_0 K_m \left(1 - \exp\left(-\frac{t}{T_m}\right)\right)$. Radi lakšeg razumevanja funkcije pogledati grafike na slici 2.



Slika 2: Modelovana karakteristika jednosmernog motora.

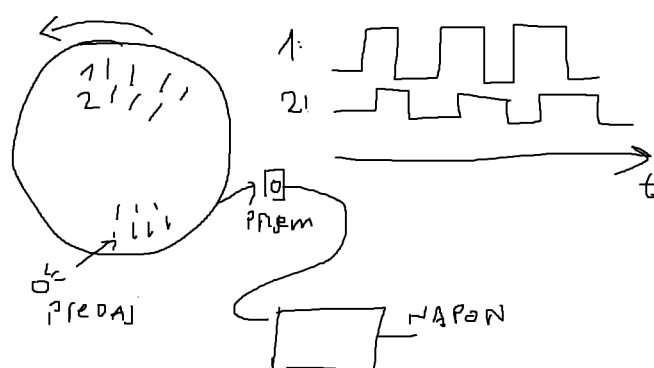
Na slici 2 su prikazani grafici sa različitim vrednostima parametra radi prikazivanja ponašanja modela motora.

Реченицу прекоћи изнад слике.

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 je od signala ~~stigao prvi~~ ^{PREDJAZI}, može se jednoznačno imati informacija o smeru kretanja. Na slici 3 je islustrativno [✓] pokazan princip rada enkodera. ✓



Slika 3: Enkoder.

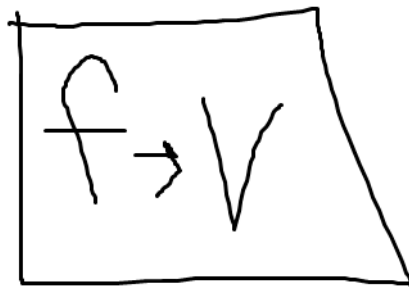
Konačno, ako se zna broj proreza na enkoderu može se odrediti i ugaona brzina motora ω_m relativno precizno. U ovom radu je korišćen motor stalne struje sa ugrađenim enkoderom koji radi na ovom principu. Radi jednostavnosti, u ovom radu razmatra se upravljanje brzine motora bez promene smeru okretanja,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

Не може одлик га буде
"сразмеран"

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 i **srazmeran je** brzini okretanja osovine. Pošto je **lakše i preciznije očitati nivo signala nego njegovu učestanost**, zbog toga je potrebno 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.

Не због
тога, што је
у аналогној
САУ, сигнал
треба да буде
сразмеран
(аналоган)
реперној величини



Slika 4: Konvertor frekvencije u napon. *О евоке кену
геуарбује уопену.*

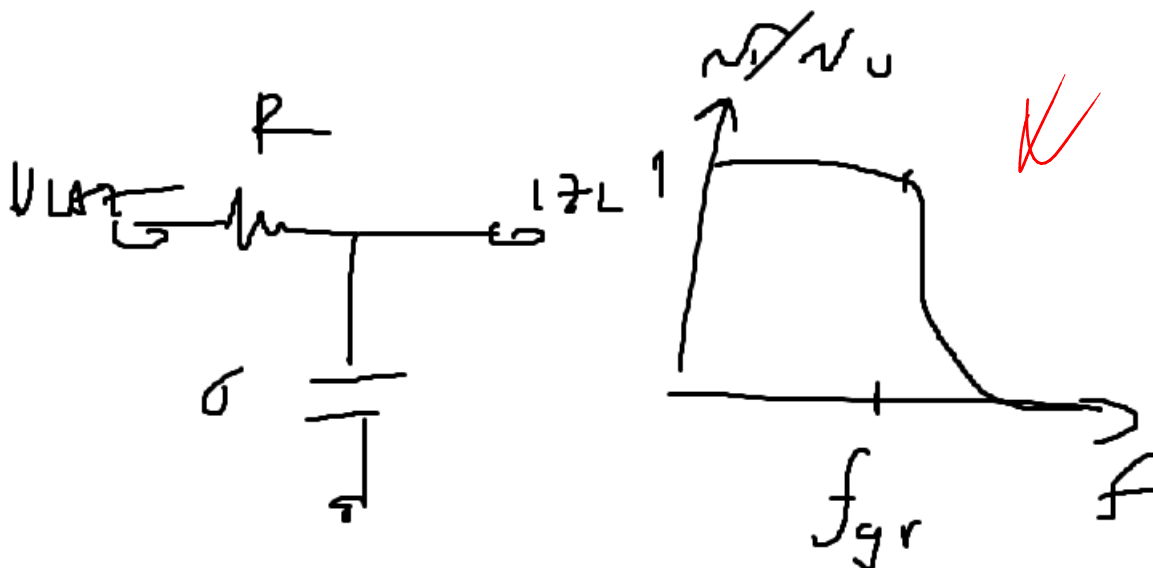
Dodatno, u signalu na izlazu konvertora se javlja veliki šum zbog vremenske RC konstante koja je potrebno da bude mala kako bi kolo ispratilo dinamiku signala ali zbog toga se pojačava šum u zonama konstantnog signala.

1.3.3 Pretvarač učestanosti u napon sa NF filtrom

УВЕДЕН У ПРЕТХОДНОЈ ТАЧКИ

Da bi se ~~taj~~ problem *uveđen 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 u 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.



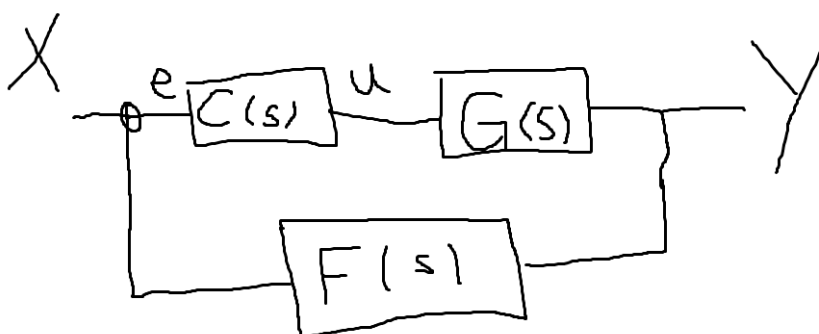


Slika 5: Šema NF filtra

Slika 6: Prenosna karakteristika NF filtra.

1.4 Princip negativne povratne 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 dovede na ulaz sa negativnim predznakom i sabere se sa ulaznim signalom. 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

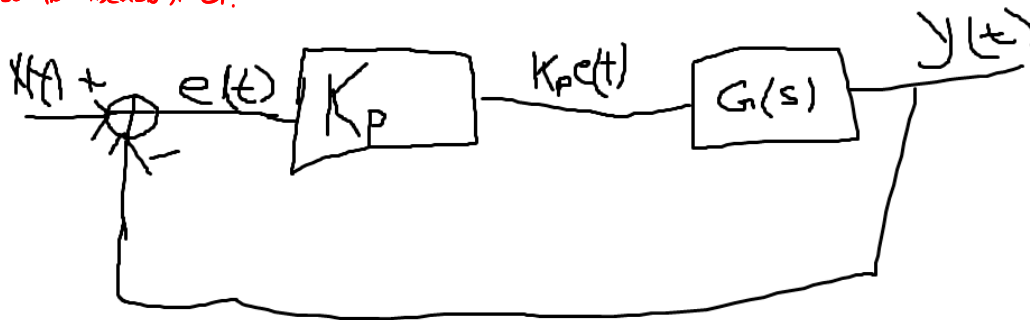
generiše u odnosu na signal greške $E(s)$ i prenosne funkcije upravljačkog bloka $C(s)$, kao $U(s) = E(s)C(s)$. On se dalje dovodi na ulaz pogonskog bloka predstavljenog prenosnom funkcijom $G(s)$. Prenosna funkcija celokupnog sistema od ulaznog signala, do izlaza je $W(s)$ i određena je izrazom:

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

1.5 $\Pi = \infty$ regulator

Uloga regulatora u sistemu jeste da kontroliše, odnosno reguliše sistem po određenim principima. 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. Opšta blok šema sa Π regulatorom je prikazana na slici 8.

REALIZOVANO IDEALNI OP.



Slika 8: Blok šema Π regulatora.

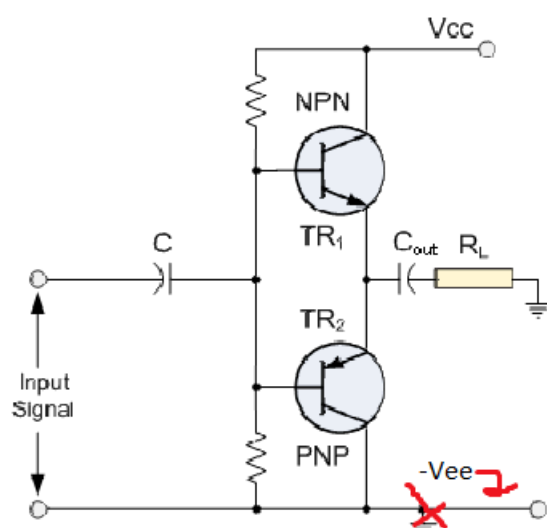
Dodatno, ovaj element spada u grupu kontrolera i on se u sistemu koji opisujemo predstavlja kao blok prenosne funkcije $C(s)$ u principskoj jednačini 2. Performanse Π regulatora zavise od njegovog pojačanja. U konkretnom slučaju pojačanje teži beskonačnosti, i ako se to uvrsti u jednačinu 7, znajući 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 Pojačavač snage

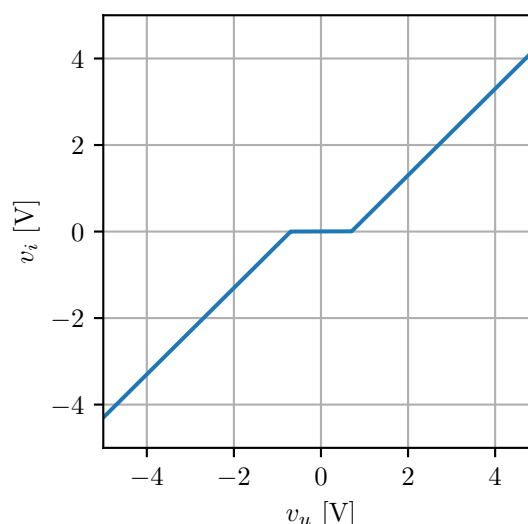
1.6.1 Pojačavač snage u klasi B

Pojačavač snage u klasi B je pojačavač koji ima pojačanje 1 i *crossover* izobličenja, električna šema je prikazana na slici 9. Izobličenja se mogu bolje videti na slici 10 gde je prikazan izlazni napon $u_i(t)$ u funkciji ulaznog napona $u_u(t)$.

NA PRENOSNOJ KARAKTERISTICI

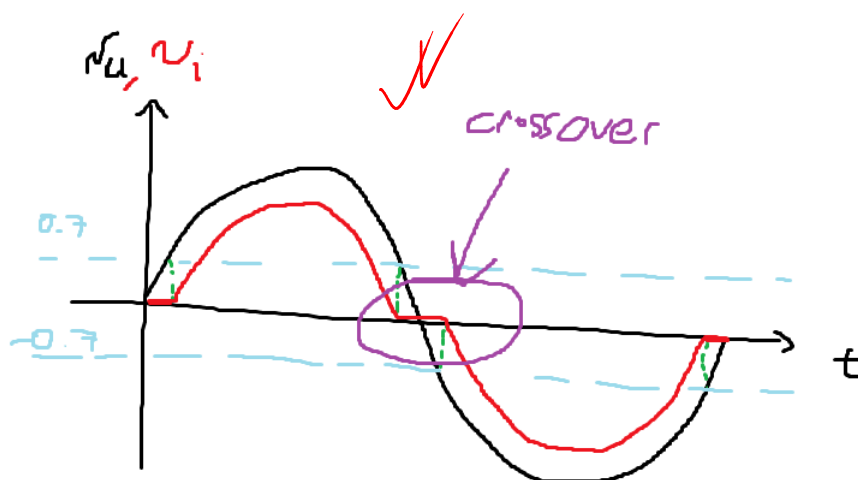


Slika 9: Pojačavač snage u klasi B.



Slika 10: Prenosna karakteristika pojačavača u klasi B, za napon $|V_{BE}| = 0.7V$.

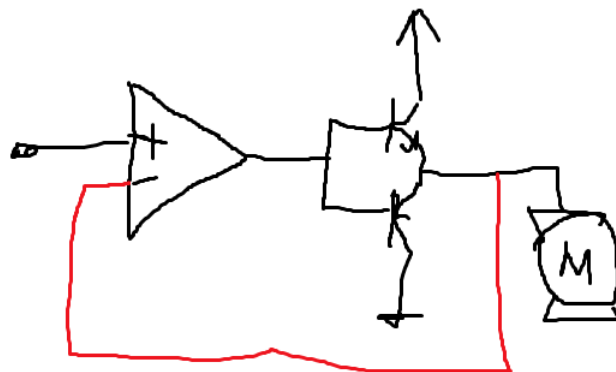
Za pozitivne vrednosti ulaznog napona veće od napona $|V_{BE}|$, pnp tranzistor je zakočen, dok npn tranzistor radi u direktnom aktivnom režimu. Dok za negativne vrednosti ulaznog napona važi dualno, kada je ulazni napon manji od $-|V_{BE}|$, npn tranzistor je zakočen, dok pnp tranzistor radi u direktnom 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 11



Slika 11: Vremenski dijagram ulaznog i izlaznog signala.

1.6.2 Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spregom

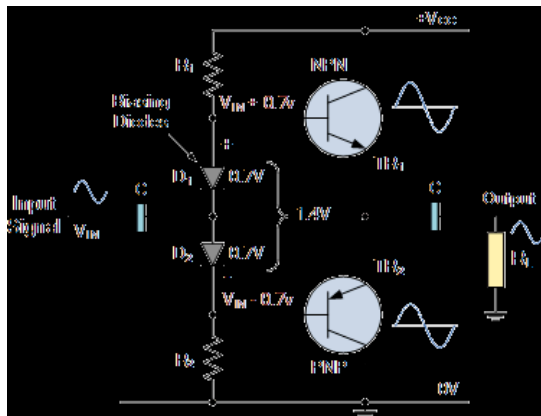
Pošto je za pokretanje motora potrebna velika snaga, samo povezivanje kontrolnog napona na motor ne bi bila dovoljna jer bi motor povukao dosta struje, i zbog toga se ubacuje pojačavač snage, ali i povratna sprega kako bi postojala informacija uz pomoć koje je moguće kontrolisati motor. *ogakne?*



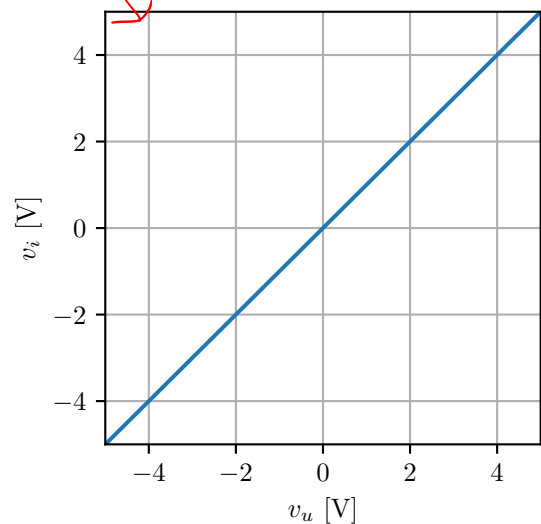
Slika 12: Pojačavač snage u klasi B sa negativnom povratnom spregom. ✓

1.6.3 Pojačavač snage u klasi AB sa negativnom povratnom spregom

Problem koji se ovde javlja kod pojačavača u klasi B je *crossover* 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 13. Teorijski, naponi praga dioda i tranzistora su jednaki, i prenosna funkcija u tom slučaju linearna i može se videti na slici 14.



Slika 13: Pojačavač snage u klasi AB.



Slika 14: Prenosna karakteristika pojačavača u klasi AB.

2 Karakteristike korišćenih komponenti sistema

Ovde nesto

- 2.1 Identifikacija modela motora
- 2.2 Merenje karakteristika pretvarača učestanosti
 - 2.2.1 Karakteristika pretvarača bez filtra
 - 2.2.2 Karakteristika pretvarača sa filtrom
- 2.3 Merenje karakteristika pojačavača snage
 - 2.3.1 Statička prenosna karakteristika
 - 2.3.2 Dinamička prenosna karakteristika sa i bez dioda

3 Rezultati i diskusija

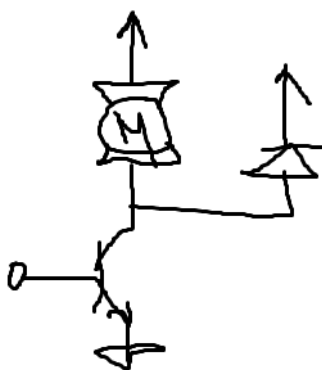
- 3.1 Osnovni sistem
- 3.2 Sistem sa poboljšanjima pojačavača snage
- 3.3 Sistem sa poboljšanjima senzora
- 3.4 Nelinearna ograničenja sistema
- 3.5 Diskusija rezultata

4 Zaključak

4.1 Merenja

4.1.1 Merenje odskočnog odziva jednosmernog motora iz stanja mirovanja

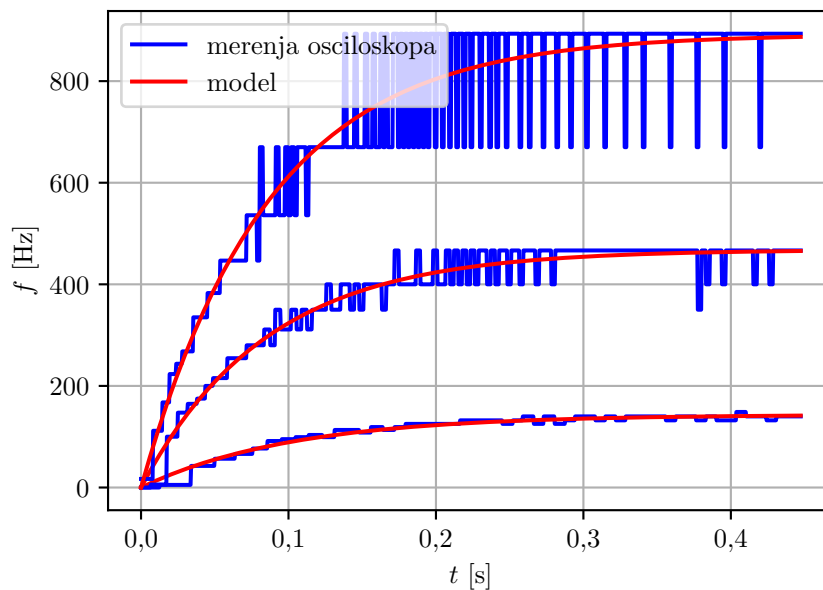
Šema koja je korišćena za merenje odziva jednosmernog motora je data na slici 15.



Slika 15: 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 16 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. Naravno, mora postojati inicijalna pretpostavka oblika funkcije kako bi se model estimirao na najbolji mogući način, ^{kojaksigurno} u prevodu, 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. ← Зашто.

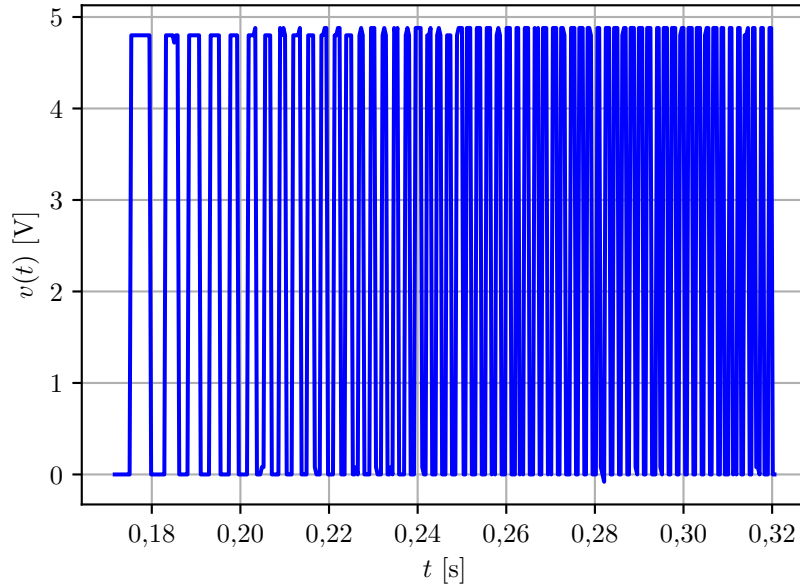


Slika 16: Određivanje optimalnog modela motora na osnovu merenog odskočnog odziva.

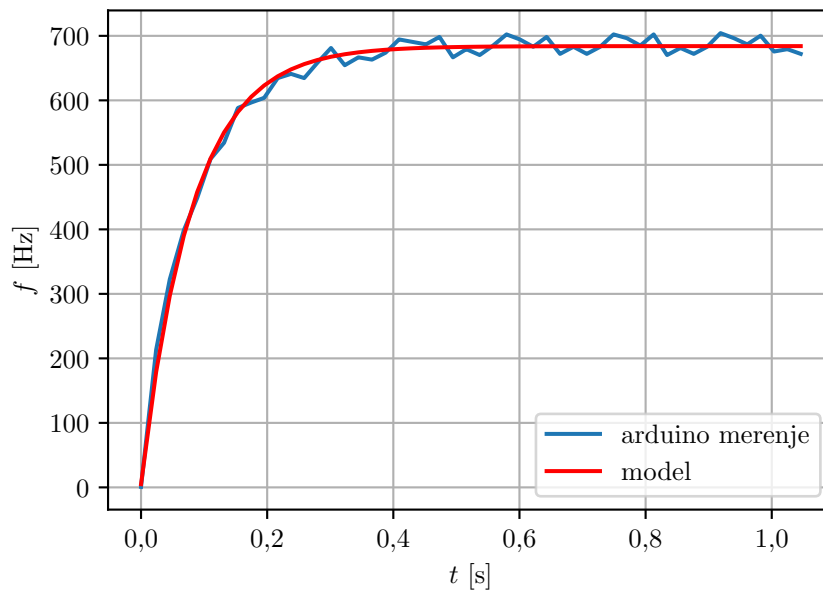
Dodatno, parametri signala sa grafika sa slike 16 prikazani u tabeli 4.1.1, u sortirani u rastućem poredku granične frekvencije.

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 17: Vremenski oblik signala na izlazu enkodera.



Slika 18: Izmerena vremenska zavisnost frekvencije signala na izlazu enkodera i model sa parametrima: $K_m = 679.088 \text{ Hz}$ i $T_m = 0.081 \text{ s}$.

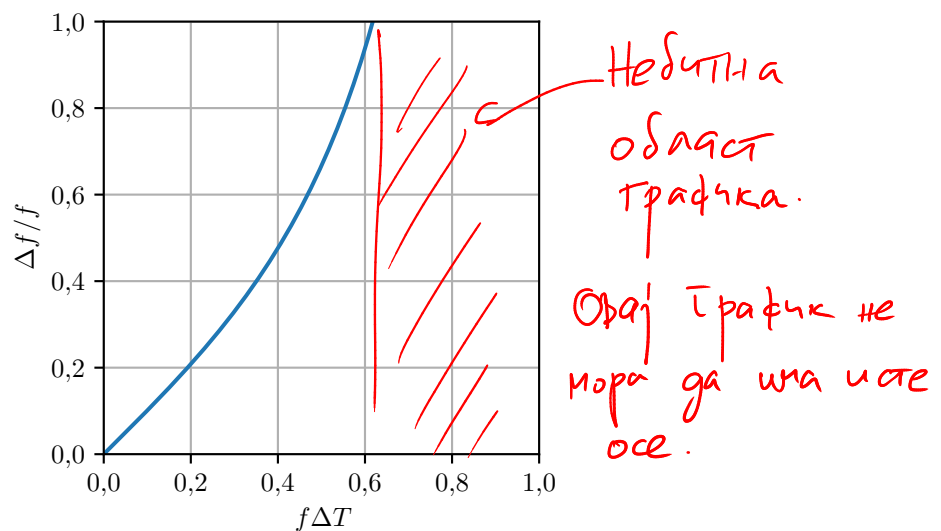
81 ms

4.2 Obrada rezultata merenja

Od signala sa slike 18 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

dakle?

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. Naime, 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 $\Delta f = \frac{f}{2} \frac{2f\Delta T}{1 - (f\Delta T)^2}$. 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 19.

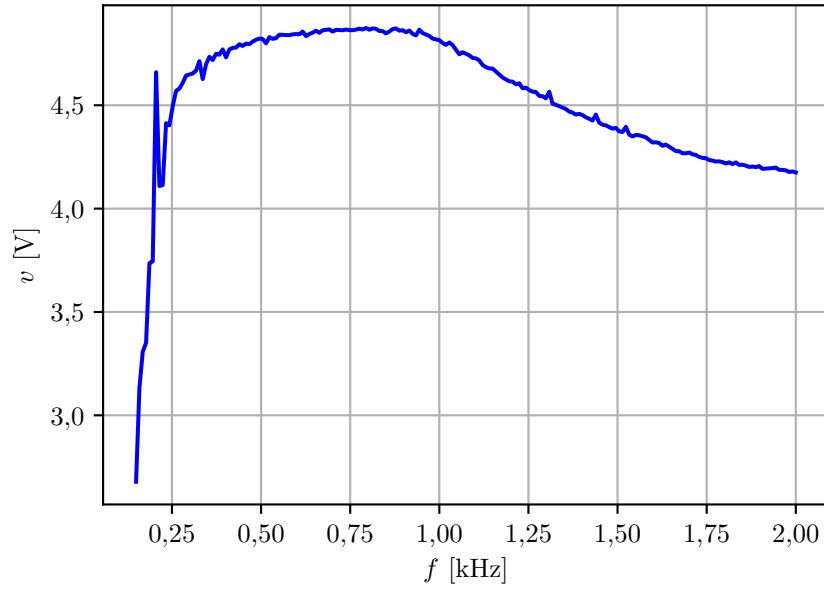


Slika 19: Odnos normalizovane relativne greške u odnosu na normalizovanu frekvenciju.

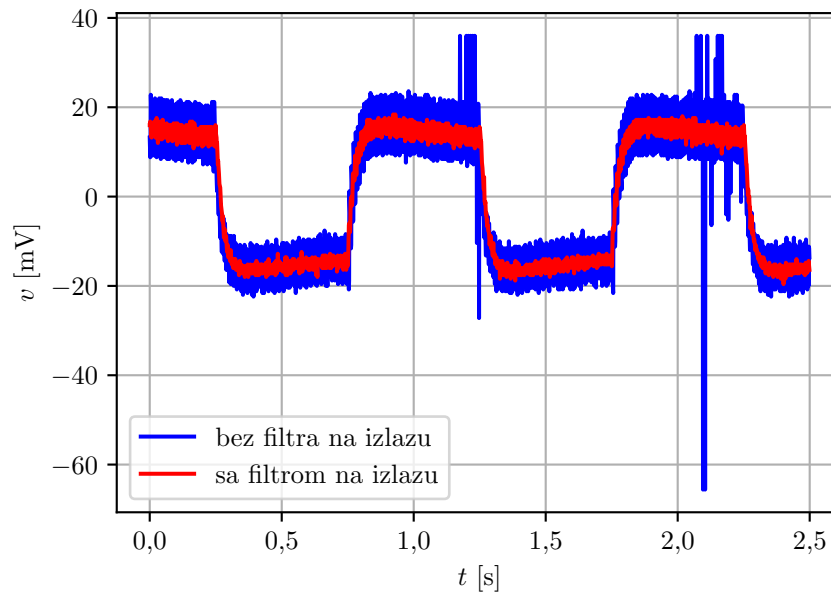
4.3 Merenje karakteristika pretvarača učestanosti

Prenosna karakteristika konvertora se može videti na slici 20.

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 20 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 21, i on je označen crvenom bojom.

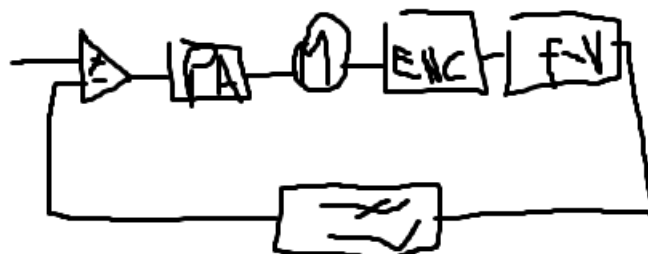


Slika 20: Prenosna karakteristika konvertora frekvencije u napon.



Slika 21: 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 22.



Slika 22: Modifikovana šema upravljanja jednosmernog motora uz pomoć povratne sprege.