

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

ZAVRŠNI RAD br.3654

**ANALIZA STABILNOSTI SUSTAVA SA
ČOVJEKOM U PETLJI**

Jerko Tolić

Zagreb, lipanj 2014.

Zagreb, 12. ožujka 2014.

ZAVRŠNI ZADATAK br. 3654

Pristupnik: Jerko Tolić (0036469526)
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Modul: Automatika

Zadatak: Analiza stabilnost sustava sa čovjekom u petlji

Opis zadatka:

U završnom radu nužno je analizirati stabilnost zatvorenog regulacijskog sustava s čovjekom u petlji. Sustav se sastoji od procesa (npr. PT1 član s integratorom, prijenosne funkcije zaoštjanja podvodne ronilice), regulatora-čovjeka (prikazanog prijenosnom funkcijom sa nulom, 2 pola i transportnim kašnjenjem) i pojačalom regulacijskog odstupanja ispred regulatora. Vremenske konstantne prijenosne funkcije čovjeka ovise o npr. koncentraciji ili umoru operatera, kompleksnosti zadataka, vrsti zadatka (čovjek je adaptivan i prilagođava svoju funkciju da bi stabilizirao cijeli sustav). U radu je potrebno ispitati stabilnost sustava za različite vremenske konstante funkcije operatera i pojačanja signala regulacijskog odstupanja.

Zadatak uručen pristupniku: 14. ožujka 2014.
Rok za predaju rada: 13. lipnja 2014.

Mentor:


Doc. dr. sc. Nikola Mišković

Djelovoda:


Doc. dr. sc. Nikola Mišković

Predsjednik odbora za
završni rad modula:


Prof. dr. sc. Stjepan Bogdan

Sadržaj

1. Uvod.....	1
2. Prijenosna funkcija čovjeka	2
2.1. Povijest istraživanja	2
2.2. Oblik prijenosne funkcije čovjeka	6
3. Kriteriji za određivanje stabilnosti sustava.....	9
3.1. Nyquistov kriterij stabilnosti.....	11
3.2. Provjera stabilnosti sustava čovjek-ROV	14
4. Multi Purpose Platform Technologies for Subsea Operations.....	20
4.1. Rezultati simulacije	22
5. Bang bang regulator	28
6. Zaključak	31
7. Literatura	32
Sažetak	33
Summary.....	34

1. Uvod

U sklopu završnog rada potrebno je analizirati stabilnost zatvorenog regulacijskog sustava s čovjekom u petlji. Sustav se sastoji od procesa, regulatora-čovjeka i pojačala regulacijskog odstupanja ispred regulatora. Čovjek je prikazan prijenosnom funkcijom s nulom, dva pola i transportnim kašnjenjem čije vremenske konstante ovise o više faktora, kao na primjer: koncentraciji ili umoru operatera, kompleksnosti zadatka i vrsti zadatka. Uz to, zadan je i proces daljinskog upravljanja ronilicom, čija je prijenosna funkcija :

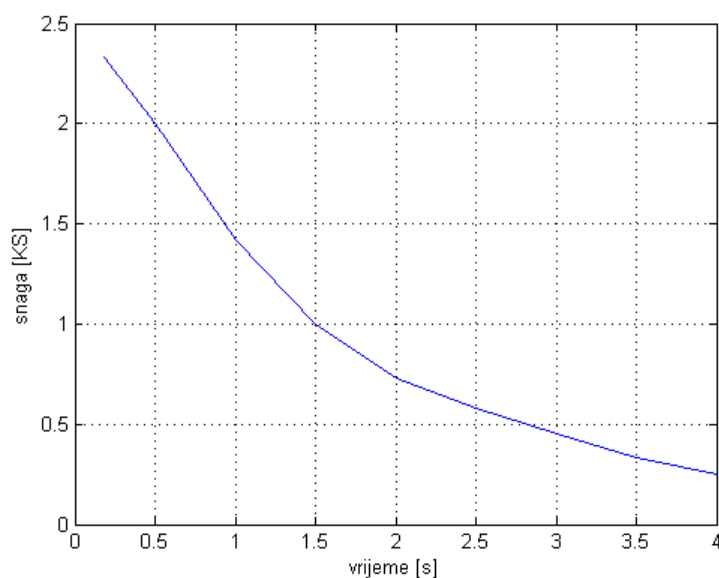
$$G_p(s) = \frac{1}{s(313s+41)} \quad (1.1)$$

Uz pomoć simulatora provodi se simulacija daljinskog upravljanja ronilicom, te se ispituje stabilnost sustava za različite vremenske konstante funkcije operatera i pojačanja signala regulacijskog odstupanja. Također, u radu će se detaljno opisati i prijenosna funkcija čovjeka, kao i povijest njenog istraživanja. Opisat će se i kriteriji za provjeru stabilnosti sustava te „*bang bang*“ regulator.

2. Prijenosna funkcija čovjeka

2.1. Povijest istraživanja

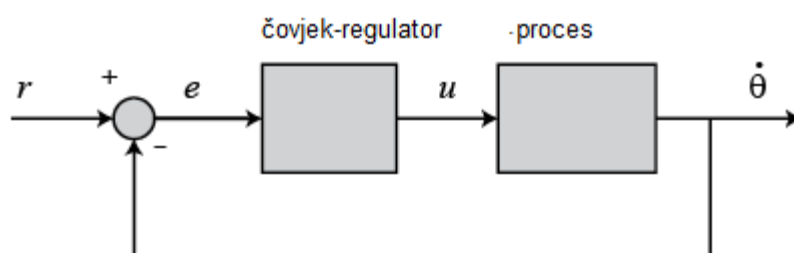
Čovjek je oduvijek bio zainteresiran za vlastite karakteristike te je pokušavao pronaći razne načine kako bi ih maksimalno iskoristio. Tijekom 1920-ih Nijemci čime prvi veći pothvat u inženjerskom modeliranju istih. Tih godina, odredbama Versajskog ugovora poslije Prvog svjetskog rata, Nijemcima je zabranjena proizvodnja motoriziranih aviona, zbog čega oni počinju proučavati *glidere* (leteće jedrilice) te pokreću znatna istraživanja kako bi što bolje iskoristili ljudsku snagu s ciljem produženja leta jedrilice. Na temelju istraživanja dolaze do zaključka da se maksimum ljudske snage postiže ukoliko čovjek pedala nogama i stopalima. Također, otkrili su da čovjek u intervalu od jedne sekunde može razviti snagu veću od 1 KS (1 konjska snaga [KS]=745.7 vata [W]) (Mahalanabis,1982.), ali u narednim sekundama ne veću od 0.5 KS, kao što je i prikazano na slici ispod.



Slika 1. Snaga čovjeka u vremenu

Nakon odbacivanja Versajskog ugovora, interes za *glidere* gotovo pa nestaje. Tijekom Drugog svjetskog rata dolazi do značajnog napretka u zrakoplovstvu. Budući su avioni postali sve brži, sve više dolazi do izražaja ljudska tromost u upravljanju zrakoplovima pogotovo kod slijetanja na nosače aviona, manevriranja avionom u borbi te ciljanja avionskim naoružanjem u bliskoj borbi. Kako bi se nastali problemi riješili i kako bi se što bolje procijenilo ponašanje sustava u cjelini, bilo je potrebno uračunati i ljudske karakteristike, budući je i on dio sustava.

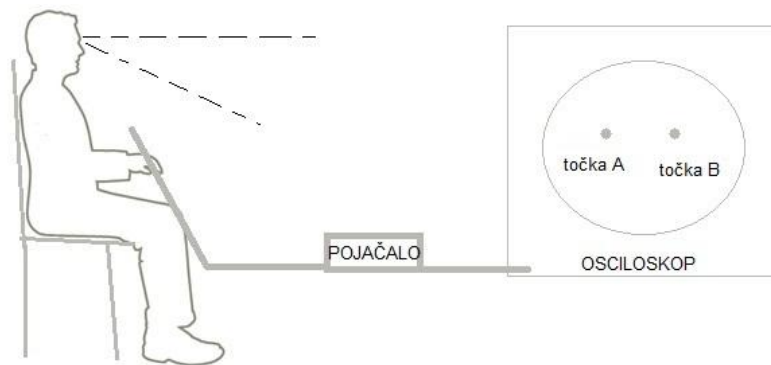
Zatvoreni sustav sa čovjekom kao regulatorom prikazan je na slici ispod.



Slika 2. Sustav sa čovjekom-regulatorom

Čovjek u ulozi regulatora obrađuje ulazne i izlazne signale te na temelju njih generira upravljači signal kako bi sveo pogrešku na minimum. Primjer takvog zatvorenog sustava je upravljanje automobilom. Proces je vožnja automobila, a čovjek je regulator. Željeni smjer predstavlja ulazni signal, a smjer automobila je izlazni signal. Uspoređujući željeni smjer i smjer automobila, čovjek po potrebi, zakretom volana, mijenja smjer automobila kako bi se što više podudarao sa željenim smjerom.

No, kako bi se uopće mogle uračunati čovjekove karakteristike u sustav, bilo je potrebno odrediti prijenosnu funkciju čovjeka. Prvi eksperiment proveden s ciljem određivanja iste prikazan je na slici ispod (*Slika 3.*). Čovjek sjedi nasuprot osciloskopa na kojem su prikazane dvije točke koje se slobodno kreću u horizontalnom smjeru. Točkom A upravlja čovjek pomoću *joysticka*, a točkom B upravlja slučajni signal, tako da je njen položaj nepredvidiv. Čovjek nastoji što točnije točkom A pratiti točku B. Kod jednostavnijih zadataka, pozicija točke A točno pratiti pokrete *joysticka* (proces prikazan na slici (*Slika 2.*) je konstanta), a kod onih složenijih, izlaz sustava je određen prijenosnom funkcijom procesa i upravljačkim signalom (pozicija *joysticka*) (Mahalanabis,1982.).



Slika 3. Eksperiment za određivanje prijenosne funkcije čovjeka

Neprestanim provođenjem istraživanja (Mahalanabis,1982.) izvedeni su brojni zaključci :

- 1) Ulazni signal mora biti slučajan, odnosno nepredvidiv. U ranijim eksperimentima korišten je ulazni signal sinusnog oblika te se po potrebi mijenjala samo frekvencija signala. Čovjek, u ulozi regulatora, promatrajući referentnu točku i uočavajući pravilnosti u promjenama njene pozicije, vrlo brzo bi naučio predviđati ulazni signal i pratiti ga s velikom točnošću.

- 2) Učinkovitost čovjeka uvelike ovisi o motivaciji, iskustvu, predanosti te o okolnim smetnjama. Također, svaki je čovjek, kao jedinka, poseban pa postoje i varijacije od osobe do osobe. Iz svega navedenog proizlazi da je potrebno odrediti općenitu prijenosnu funkciju koja približno opisuje tipičnog čovjeka.
- 3) Učinak čovjeka naglo opada kako se kompleksnost zadatka povećava iznad granice unutar koje čovjek može razumno obaviti zadatak. Primjerice, povećavajući širinu frekvencijskog pojasa ulaznog signala, čovjek uspješno obavlja zadatak ako ulazni signal nema značajnih frekvencijskih komponenti iznad 1.2 Hz. Nakon što se širina pojasa signala poveća na 2 Hz, čovjek ne uspijeva obaviti zadatak te odustaje.
- 4) Čovjek je izrazito prilagodljiv te po potrebi mijenja svoju prijenosnu funkciju prema procesu koji regulira. Automatski prilagođava vlastitu prijenosnu funkciju kako bi dao stabilan sustav s vremenom odziva od oko dvije sekunde. Također, sposoban je prilagoditi se velikom broju prijenosnih funkcija procesa. Primjerice, čovjek bez problema vozi bicikl, automobil, avion ili brod, a to su sve različiti procesi.
- 5) Čovjek se ne može točno opisati jedinstvenom prijenosnom funkcijom iz dva razloga. Prvi je da čovjek skuplja informacije u diskretnim vremenskim intervalima, a ne kontinuirano. Drugi je da generira upravljački signal koji sadrži komponentu vezanu uz pogrešku prijenosne funkcije, ali i dodatnu komponentu (ostatak, engl. *remnant*) koja je po prirodi nepredvidiva, odnosno slučajna. Oba navedena efekta, uzorkovanje i *remnant*, su često zanemariva.

2.2. Oblik prijenosne funkcije čovjeka

Kako navodi Mahalanabis (1982.), unatoč svim poteškoćama, postoji mogućnost korištenja prijenosne funkcije koja približno opisuje ljudsko upravljanje, kao i mogućnost predviđanja dinamičkih karakteristika jednostavnih sustava sa čovjekom regulatorom. Unatoč brojnim predloženim i dobivenim prijenosnim funkcijama čovjeka, najčešće se upotrebljava sljedeća funkcija:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = H(s) = K \frac{T_0 s + 1}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-Ts} \quad (2.1)$$

$U(s)$ označava upravljački signal regulatora, u ovom slučaju čovjeka, a $E(s)$ predstavlja signal pogreške. Ostali parametri prijenosne funkcije su :

- (1) T – „transportno kašnjenje“ ili vrijeme reakcije čovjeka; vrijeme potrebno da čovjek reagira bez obzira na hitnost reakcije koju zahtjeva situacija. Minimalno vrijeme reakcije čovjeka iznosi oko 0.2 sekunde, ali znatno raste ukoliko je čovjek umoran ili pod utjecajem alkohola.
- (2) K – konstanta pojačanja; kod jednostavnih procesa, čovjek automatski podešava konstantu kako bi stabilizirao sustav s vremenom odziva od oko dvije sekunde.
- (3) T_0 - vrijeme predviđanja; ako je prijenosna funkcija oblika $K(T_0 s + 1)$, čovjek bi generirao upravljački signal $m(t)$ ovisan o signalu pogreške $e(t)$ po sljedećoj jednadžbi :

$$m(t) = K[e(t) + T_0 e'(t)] \quad (2.2)$$

gdje T_0 mjeri „diferencijalno djelovanje“, odnosno mjeru kojom čovjek nastoji predvidjeti sljedeće greške.

- (4) T_1 i T_2 – vremenske konstante; predstavljaju vrijeme potrebno čovjeku da obradi informacije. Kada dođe do pogreške, potrebno je neko vrijeme da signal pogreške dođe do mozga. On se tu obrađuje te se

odlučuje o daljnjim postupcima koje je potrebno napraviti kako bi se pogreška ispravila. Zatim se šalje električni impuls do određenih mišića koji provode korektivnu radnju. Navedeni slijed radnji ima za posljedicu zakašnjelo vrijeme reakcije.

Kod jednostavnijih zadataka upravljanja (npr. proces je opisan jednostavnom prijenosnom funkcijom K_p/s i ulazni signal je niskih frekvencija) čovjek je opušten pri obavljanju zadatka, ne trudi se predviđati buduća događanja te mu je odziv usporen. Tada vremenske konstante iznose :

$$T_0 = 0 \text{ s}, \quad T_1 = T_2 = \frac{1}{3} \text{ s} \quad (2.3)$$

Kako zadaci postaju sve teži i kompleksniji (npr. prijenosna funkcija procesa je $K_p/[s(s^2 + as + b)]$), čovjek ulaže više truda u rješavanje istih te prvo nastoji predvidjeti buduća događanja. Tada vrijeme predviđanja T_0 teži u jedan. Daljnjim otežavanjem zadataka, čovjek ubrzava svoje reakcije te se vremenske konstante T_1 i T_2 smanjuju do 0.05 s . Konačno, kada proces postane previše kompliciran i nestabilan da bi ga se reguliralo pomoću navedenih granica vremenskih konstanti T_0, T_1 i T_2 , čovjek odustaje.

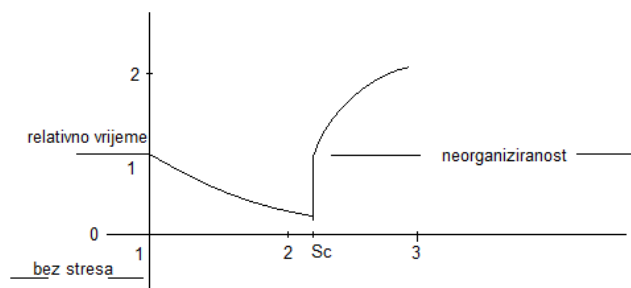
Bitno je uočiti da se razina truda koji čovjek ulaže povećava kako T_0 raste, a T_1 i T_2 smanjuju. Ukoliko se od čovjeka očekuje da upravlja nekim procesom bez obzira na vremenski period, proces mora biti dizajniran tako da se njime može upravljati s T_0 znatno manjim od jedne sekunde, a T_1 i T_2 trebaju iznositi oko $\frac{1}{3}$ sekunde.

Na učinkovitost čovjeka uvelike utječe i stres. Stres je definiran sljedećim izrazom :

$$\text{stres} = \frac{\text{vrijeme tijekom kojeg se zadatak obavlja opušteno}}{\text{preostalo vrijeme}} = \frac{T_l}{T_r} \quad (2.4)$$

Kada nema potrebe za žurbom, čovjek koristi određeni period vremena T_l za izvršavanje nekog slijeda zadataka. Ako do roka unutar kojeg zadatak mora biti obavljen ostane samo vrijeme T_r , stres raste s porastom omjera T_l/T_r .

Slika 4. prikazuje vrijeme potrebno da čovjek obavi određeni zadatak u ovisnosti o utjecaju stresa.



Slika 4. Utjecaj stresa na vrijeme potrebno da čovjek obavi određeni zadatak

Dok nema utjecaja stresa (nema potrebe za žurbom) , vrijeme potrebno za izvršavanje zadatka je poznato (označeno „1“ na vertikalnoj skali, *Slika 4.*). Kako stres raste iznad 1, čovjek ubrzava svoje radnje i potrebno vrijeme opada. Kada stres postigne kritičnu vrijednost S_c , čovjek više ne stiže zadatak završiti u roku te postaje neorganiziran (Mahalanabis,1982.).

3. Kriteriji za određivanje stabilnosti sustava

Stabilnost sustava upravljanja osnovni je preduvjet njegove praktične primjene (Baotić, 2013.). Linearni vremenski nepromjenjivi sustav upravljanja asimptotski je stabilan ako za njegovu težinsku funkciju vrijedi :

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 0 \quad (3.1)$$

Sustav je nestabilan ako $g(t)$ poprimi beskonačan iznos za rastući t , a nalazi se na rubu stabilnosti ako za rastući t , $g(t)$ poprima konstantan iznos različit od nule ili oscilira konstantnom amplitudom.

Međutim, težinska funkcija $g(t)$ nije uvijek dostupna, već je na raspolaganju prijenosna funkcija $G(s)$:

$$G(s) = \int_0^{\infty} g(t)e^{-st} dt \quad (3.2)$$

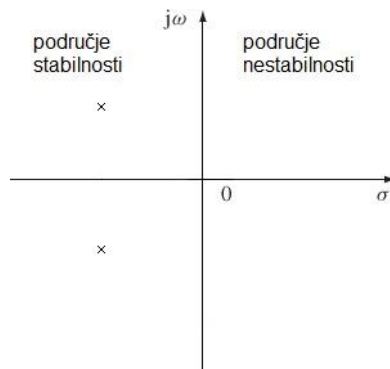
$G(s)$ ima oblik racionalne prijenosne funkcije :

$$G(s) = \frac{B(s)}{N(s)} = \frac{B(s)}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (3.3)$$

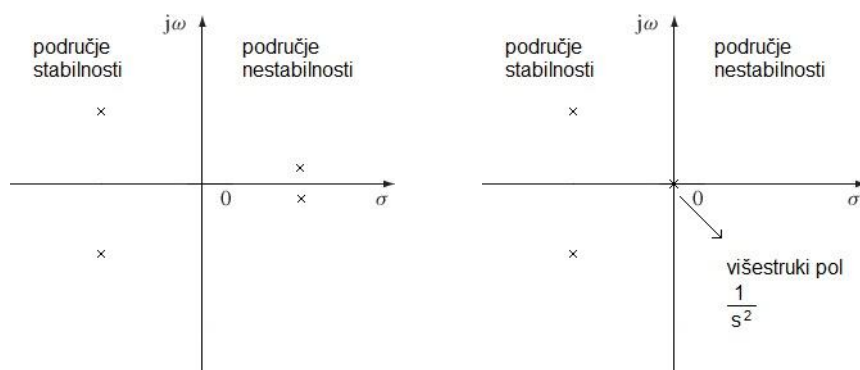
gdje su s_{pk} polovi prijenosne funkcije $G(s)$, odnosno nule polinoma $N(s)$.

Nužni i dovoljni uvjeti stabilnosti linearnih sustava prikazanih prijenosnom funkcijom $G(s)$ su:

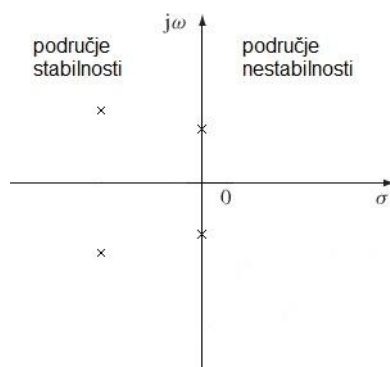
- Asimptotska stabilnost - sustav je asimptotski stabilan mu se svi polovi nalaze u lijevoj poluravnini s -ravnine.
- Nestabilnost - sustav je nestabilan ako mu se barem jedan pol nalazi u desnoj poluravnini s -ravnine ili se najmanje jedan višestruki pol nalazi na imaginarnoj osi s -ravnine.
- Granična stabilnost – sustav je granično stabilan ako nema polova u desnoj poluravnini s -ravnine, niti višestrukih polova na imaginarnoj osi. Postoji, međutim, na imaginarnoj osi barem jedan jednostruki pol.



Slika 5. Stabilan sustav, prikaz polova u ravnini



Slika 6. Nestabilan sustav, prikaz polova u ravnini



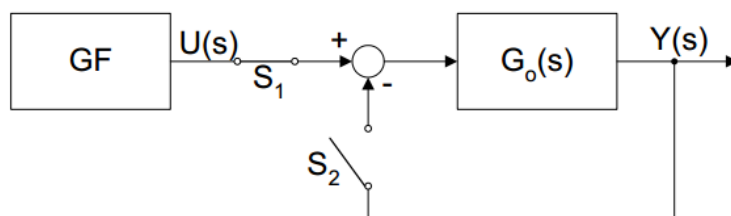
Slika 7. Granično stabilan sustav, prikaz polova u ravnini

3.1. Nyquistov kriterij stabilnosti

Nyquistov kriterij stabilnosti je grafoanalitički kriterij pomoću kojeg možemo promatrati apsolutnu i relativnu stabilnost zatvorenih regulacijskih sustava na temelju amplitudno-fazne frekvencijske karakteristike prijenosne funkcije otvorenog regulacijskog kruga. Amplitudno-fazna frekvencijska karakteristika prijenosne funkcije otvorenog regulacijskog kruga crta se u obliku polarne krivulje u kompleksnoj ravnini (Nyquistov dijagram).

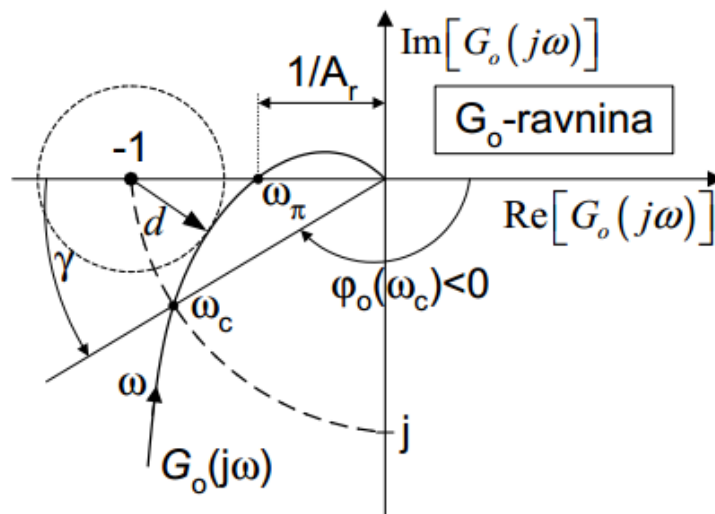
Neka je $u(t) = U_m \sin(\omega t)$ pobuda sustava generirana u generatoru funkcija (GF) promjenjive frekvencije ω te neka je sklopka S2 otvorena (nema povratne veze), a sklopka S1 zatvorena (Slika 8.). Pretpostavka je da je sustav $G_0(s)$ stabilan.

U realnim sustavima izlazni signal $y(t) = Y_m \sin(\omega t + \varphi)$ fazno zaostaje za ulaznim signalom $u(t)$ s porastom frekvencije ω . Kod frekvencije $\omega = \omega_\pi$, izlazni signal fazno zaostaje za 180° , što znači da su $u(t)$ i $y(t)$ u protufazi. Pretpostavlja se da su pri frekvenciji ω_π amplitude ulaznog i izlaznog signala jednake, odnosno da je pojačanje $K_0 = 1$. Ako se istodobno isključi sklopka S1 te uključi sklopka S2, signal povratne veze će nadomjestiti ulazni signal. Sustav počinje podržavati oscilacije, odnosno samooscilacije te se nalazi na rubu stabilnosti. Ukoliko je uz iste uvjete $K_0 > 1$, amplitude oscilacija bi se teoretski povećavale do beskonačnosti i takav sustav je nestabilan. Za $K_0 < 1$, oscilacije postupno iščezavaju te je takav sustav stabilan (Baotić, 2013).



Slika 8. Fizikalni prikaz Nyquistovog kriterija stabilnosti (Baotić, 2013.)

Nyquistov kriterij može se i grafički interpretirati. Budući da je $G(s)$ (parametarski oblik matematičkog modela sustava) apstraktni nemjerljivi oblik matematičkog prikaza linearnih sustava, potrebno ga je zamijeniti s frekvencijskom karakteristikom $G(j\omega)$ (neparametarski oblik matematičkog modela sustava) koja se može neposredno fizikalno interpretirati i mjeriti. Pomoću frekvencijske karakteristike $G(j\omega)$ se crta Nyquistov dijagram za otvoreni regulacijski krug te se jasno može odrediti je li sustav stabilan ili ne. Ako Nyquistov dijagram sječe negativnu realnu os s desne strane točke $(-1, j0)$, zatvoreni krug je stabilan. Točka $(-1, j0)$ se naziva „kritičnom točkom“. Ukoliko Nyquistov dijagram sječe negativnu realnu os s lijeve strane „kritične točke“, sustav je nestabilan, a ako je siječe u „kritičnoj točki“ sustav je granično stabilan. Općenito, ako potpuni Nyquistov dijagram (prikazuje frekvencijsku karakteristiku za raspon frekvencija od $-\infty$ do $+\infty$) ne okružuje „kritičnu točku“ zatvoreni krug je stabilan.



Slika 9. Pokazatelji relativne stabilnosti (Baotić, 2013.)

Osim što se može odrediti apsolutna stabilnost, korištenjem Nyquistovog kriterija mogu se odrediti i pokazatelji relativne stabilnosti sustava upravljanja (Slika 9.) :

- i) Amplitudno osiguranje A_r - iznos povećanja pojačanja regulatora uz koje bi se dostigao rub stabilnosti („kritična točka“) :

$$A_r = \frac{1}{|G_0(j\omega_\pi)|} ; \arg[G_0(j\omega_\pi)] = -\pi \quad (3.4)$$

$$A_r * |G_0(j\omega_\pi)| = 1 \quad (3.5)$$

- ii) Fazno osiguranje γ - iznos faznog kašnjenja uz koje bi se dostigao rub stabilnosti („kritična točka“) :

$$\gamma = \pi + \arg[G_0(j\omega_c)] = \pi + \varphi_0(\omega_c) \quad (3.6)$$

$$|G_0(j\omega_c)| = 1 \quad (3.7)$$

Također, ako vrijedi $\omega_c < \omega_\pi$, sustav je stabilan.

3.2. Provjera stabilnosti sustava čovjek-ROV

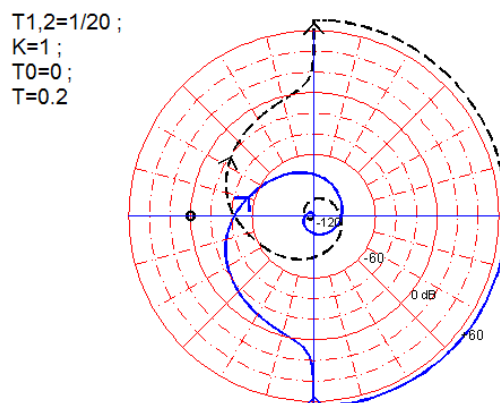
Prijenosna funkcije procesa $G_p(s)$ dana je izrazom (1.1) , a prijenosna funkcija čovjeka $H(s)$ izrazom (2.1). Prijenosna funkcija otvorenog regulacijskog kruga dobije se množenjem dviju navedenih prijenosnih funkcija:

$$G_o(s) = G_p(s) * H(s) = K \frac{T_0 s + 1}{s(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)(313s + 41)} e^{-Ts} \quad (3.8)$$

Stabilnost ovog sustava ovisi o vremenskim konstantama prijenosne funkcije čovjeka. Pretpostavka je, ako je sustav stabilan za rubne vrijednosti vremenskih konstanti, da je stabilan i za sve ostale vremenske konstante unutar tog intervala. Apsolutna stabilnost sustava određuje se Nyquistovim kriterijem. Pomoću programskog sučelja *Matlab*, koristeći funkciju *nyqlog(G)* (G označava prijenosnu funkciju za koju se crta dijagram) preuzetu s internet stranice www.mathworks.com , crta se potpuni Nyquistov dijagram te se promatra okružuje li dijagram „kritičnu točku“.

Slika 9. prikazuje Nyquistov dijagram za prijenosnu funkciju $G_o(s)$ sa sljedećim parametrima :

$$T_1 = T_2 = \frac{1}{20} s ; T_0 = 0 s ; T = 0.2 s ; K = 1 \quad (3.9)$$



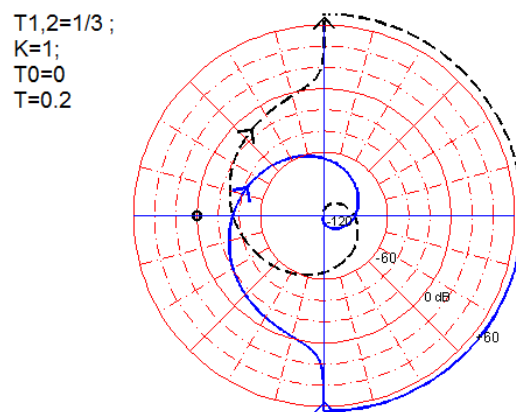
Slika 10. Nyquistov dijagram- $T_{1,2} = 1/20, T_0 = 0$

Na slici (Slika 9.) je vidljivo da potpuni Nyquistov dijagram ne okružuje „kritičnu točku“ te se može zaključiti da je sustav s gore navedenim parametrima stabilan.

Slika 10. prikazuje Nyquistov dijagram prijenosne funkcije $G_o(s)$ za parametre :

$$T_1 = T_2 = \frac{1}{3}s ; T_0 = 0s ; T = 0.2s ; K = 1 \quad (3.10)$$

Očito je da potpuni dijagram ne okružuje „kritičnu točku“ pa je sustav s ovim parametrima stabilan.



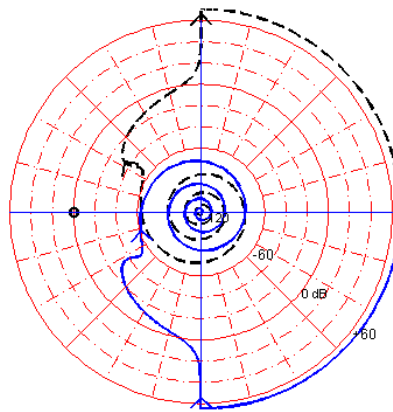
Slika 11. Nyquistov dijagram – $T_{1,2}=1/3$, $T_0=0$

Na slici ispod (Slika 11.) prikazan je Nyquistov dijagram za sljedeće parametre :

$$T_1 = T_2 = \frac{1}{20}s ; T_0 = 1s ; T = 0.2s ; K = 1 \quad (3.11)$$

Budući da potpuni dijagram ne okružuje točku $(-1, j0)$, sustav je stabilan.

$T_{1,2}=1/20$;
 $K=1$;
 $T_0=1$;
 $T=0.2$



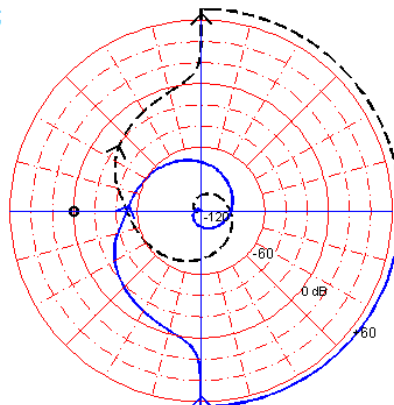
Slika 12. Nyquistov dijagram – $T_{1,2}=1/20$, $T_0=1$

Slika 12. prikazuje potpuni Nyquistov dijagram za parametre :

$$T_1 = T_2 = \frac{1}{3} s ; T_0 = 1 s ; T = 0.2 s ; K = 1 \quad (3.12)$$

Sa slike je vidljivo da dijagram ne okružuje „kritičnu točku“ pa se može zaključiti da je sustav s gore parametrima stabilan.

$T_{1,2}=1/3$;
 $K=1$;
 $T_0=1$;
 $T=0.2$;

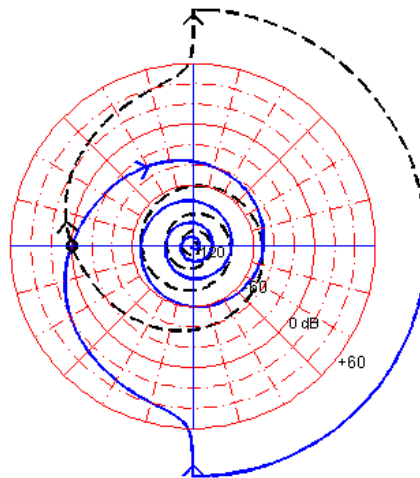


Slika 13. Nyquistov dijagram – $T_{1,2}=1/3$, $T_0=1$

Za rubne vrijednosti vremenskih konstanti sustav je apsolutno stabilan pa iz toga proizlazi da je stabilan i za sve ostale vrijednosti vremenskih konstanti T_1 i T_2 većih od $\frac{1}{20}s$ i manjih od $\frac{1}{3}s$ te za vrijednosti vremenske konstante T_0 između 0 s i 1 s.

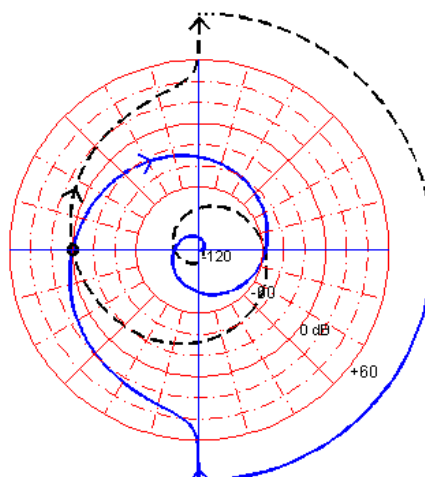
Maksimalni iznos pojačanja regulacijskog odstupanja (konstanta K), za kojeg je sustav na rubu stabilnosti, računa se pomoću *Matlab* funkcije *margin*. Navedena funkcija izračunava amplitudno osiguranje, fazno osiguranje te presječne frekvencije ω_c i ω_π za odabranu prijenosnu funkciju otvorenog regulacijskog kruga. Prijenosna funkcija dana je izrazom (3.8), a amplitudno osiguranje računa se za četiri različite kombinacije parametara :

- 1) Za parametre prijenosne funkcije dane izrazom (3.9) amplitudno osiguranje iznosi $A_r = 137.717$, a *Slika 14.* prikazuje Nyquistov dijagram za slučaj kad se konstanta K poveća 137.717 puta.



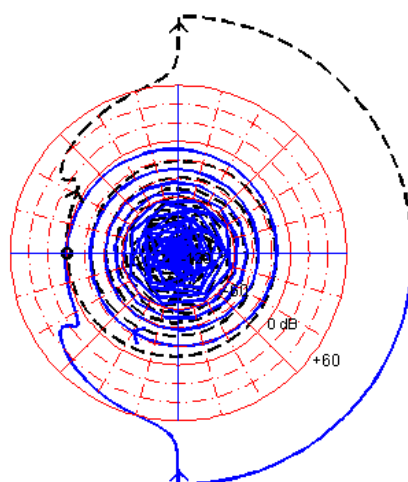
Slika 14. Rub stabilnosti- $T_{1,2}=1/20$, $T_0=0$, $K=137.717$

- 2) Za parametre prijenosne funkcije dane izrazom (3.10) amplitudno osiguranje iznosi $A_r = 49.163$. *Slika 15.* prikazuje Nyquistov dijagram za vremenske konstante jednake konstantama u izrazu (3.10) i konstantu $K=49.163$.



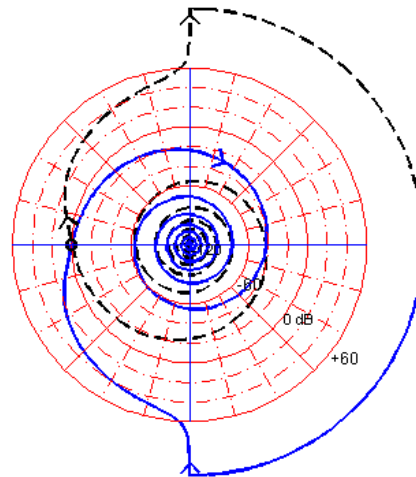
Slika 15. Rub stabilnosti- $T_{1,2}=1/3$, $T_0=0$, $K=49.163$

- 3) Za parametre prijenosne funkcije dane izrazom (3.11) amplitudno osiguranje iznosi $A_r = 1500.7$. Slika ispod (Slika 16.) prikazuje Nyquistov dijagram za $K=1500.7$ i vremenske konstante dane izrazom (3.11).



Slika 16. Rub stabilnosti- $T_{1,2}=1/20$, $T_0=1$, $K=1500.7$

- 4) Za parametre prijenosne funkcije dane izrazom (3.12) amplitudno osiguranje iznosi $A_r = 319.9916$, a *Slika 17*. Prikazuje Nyquistov dijagram za slučaj kad se konstanta K poveća 319.9916 puta.



Slika 17. Rub stabilnosti- $T_{1,2}=1/3$, $T_0=1$, $K=319.9916$

Kod sva četiri slučaja, konstanta K je prvotno iznosila 1 pa iz toga proizlazi da su maksimalni iznosi pojačanja regulacijskog odstupanja, za koje je sustav na rubu stabilnosti, jednaki amplitudnim osiguranjima.

4. Multi Purpose Platform Technologies for Subsea Operations

MPPT Ring (engl. *Multi Purpose Platform Technologies for Subsea Operations*) je set pomoćnih alata razvijenih od strane istraživačkog centra za mobilnu i podvodnu robotiku (MMRRC- *Mobile and Marine Robotics Research Centre*). Sastoji se od alata za simulaciju, modeliranje, reguliranje i alata za vizualizaciju te se, između ostalog, koristi za učinkovito planiranje i simuliranje misija, uvježbavanje ROV (engl. *Remotely Operated Underwater Vehicle*, daljinski upravljana ronilica) pilota, istraživanja i *offline* analize. Jedan od alata, obično korišten za treniranje ROV pilota, je i simulator visoke razine koji povezuje simulaciju upravljanja ROV-om u realnom vremenu s naprednim 2D i 3D (engl. *Real-Time Augmented Reality*) prikazom, regulacijskim sustavom te intuitivnim i jednostavnim za korištenje pilotskim sučeljem. Korištenjem navedenog alata moguće je simulirati vanjske smetnje, odnosno poremećaje, valove, a osobito struje, što je vrlo bitno za podvodne aplikacije. Simulator je konfiguriran za simuliranje tri ROV-a iz tri različite klase na temelju njihove veličine, težine i sposobnosti :

- 1) ROV *Falcon* (Saab Seaeye) - mini klasa
- 2) ROV LATIS (MMRRC UL) – opća ili istraživačka klasa
- 3) ROV *Holland I* (napravljena od strane SMD Ltd, Newcastle, Ujedinjeno Kraljevstvo, a u vlasništvu Instituta Irske mornarice) – radna klasa.

Prednost podržavanja većeg broja klasi jest mogućnost testiranja HMI-a (engl. *Human Machine Interface*, sučelje čovjek stroj) za različite klase ROV-ova s različitim dinamikama. HMI treba biti što robusniji kako bi omogućio upravljanje velikog broja različitih ronilica.

Audio *feedback* sustav uzima podatke s ROV simulatora o ROV poziciji i orijentaciji, poziciji mete i ROV senzorima te generira virtualne lokalizirane zvučne signale. Medij korišten za prijenos podataka je MOOS (engl. *Mission Oriented Operating Suite*) koji omogućava komunikaciju s više klijenata, koji isti, osnovni program mogu koristiti u različite svrhe od testiranja jedne te iste ronilice u različitim uvjetima pa do slanja potpuno novih konfiguracija i

njihova predispozicija, čak i prije nego što je ronilica napravljena. MOOS ima zvjezdastu topologiju, te svaka aplikacija u MOOS okruženju (klijent) ima jedinstvenu vezu s MOOS bazom podataka (MOOSDB). MOOSDB služi kao server i sva se komunikacija odvija isključivo njenim posredovanjem.

Virtualni audio *display* prilagođen je slušalicama, a lokalizirani zvučni signali generirani su pomoću besplatne aplikacije FMOD Ex API. Navedena aplikacija je primarno razvijana za programere igrica i multimedija, glazbenike i audio inženjere. Zvukovi se obrađuju na računalu, a aplikacija podržava HRTF (engl. *Head-Related Transfer Functions*) prijenosnu funkciju kako bi se simulirali lokalizirani zvučni signali te pružila 3D audio percepcija. Audio *display*, dakle, predstavlja negovorne zvukove u 3D audio okruženju, pri čemu se svaki zvuk lokalizira kako bi se stvorio privid da dolazi s odgovarajuće realne, odnosno stvarne, pozicije u prostoru. Prateći položaj, trenutnu orijentaciju i brzinu slušaoca i cilja te komponiranjem dobivenih parametara u HRTF, FMOD uspijeva lokalizirati zvuk.



Slika 18. Upravljanje ROV-om, simulacija (MMRRC,UL,2014.)

4.1. Rezultati simulacije

Pomoću ranije navedenih alata simulirana je vožnja ROV-a opće klase-LATIS. ROV-om se upravlja uz pomoć *joysticka* i potrebno ga je bez gledanja voziti po točno određenoj putanji. Zvučni signali u slušalicama daju povratnu informaciju o poziciji ROV-a. Ukoliko je intenzitet zvuka veći u desnoj slušalici, znači da je ROV lijevo od zadane putanje te ga je potrebno zakrenuti udesno. Obratno vrijedi za slučaj kad se ROV nalazi s desne strane putanje. Kad se ROV kreće po zadanoj putanji zvuk u desnoj i lijevoj slušalici je podjednake jačine. Potrebno je i podesiti iznos pojačanja regulacijskog odstupanja (konstanta K). Što je konstanta K veća, to se lakše i brže uoči da je ROV skrenuo s putanje. Simulacija upravljanja ROV-om provedena je za pet slučajeva :

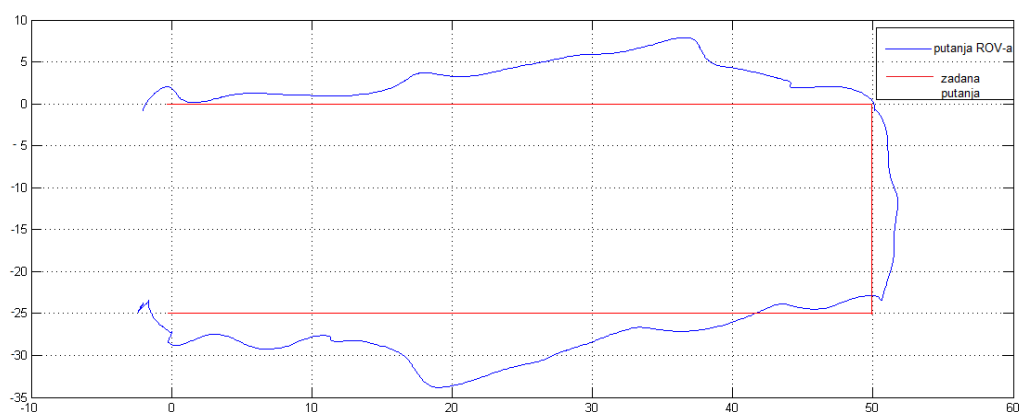
- 1) $K = 1$
- 2) $K = 3$
- 3) $K = 7$
- 4) $K = 10$
- 5) $K = 20$

Rezultati simulacije (trenutna pozicija ROV-a, moment zaošijanja *joysticka* (engl. *yaw*), udaljenost ROV-a od zadane putanje (engl. *tracking error*)) spremaju se svakih 0.015 s u tekstualnu datoteku. Kad je simulacija završena potrebno ih je prebaciti u *Excel* datoteku te na kraju obrađivati uz pomoć programskog sučelja *Matlab*. Za mjeru kvalitete upravljanja ROV-om uzima se prosječna pogreška praćenja (engl. *average tracking error*) m :

$$m = \frac{\text{tracking error}}{\text{broj mjerenja}} \quad (4.1)$$

Broj prikupljenih mjerenja jednak je za sve slučajeve i iznosi 7750.

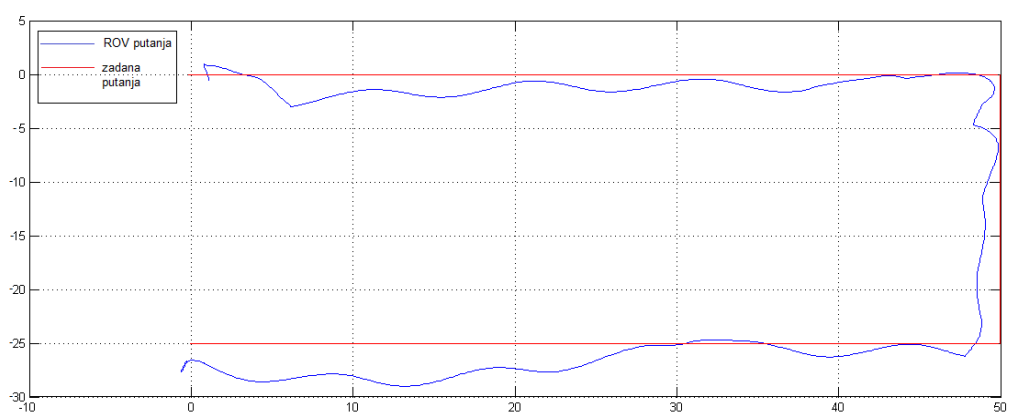
Slučaj kada je $K=1$ dao je najgore rezultate, no to je i očekivano s obzirom na jedinično pojačanja regulacijskog odstupanja. *Slika 19.* prikazuje putanju ROV-a (plava linija) i zadanu putanju (crvena linija).



Slika 19. Putanja ROV-a uz $K=1$

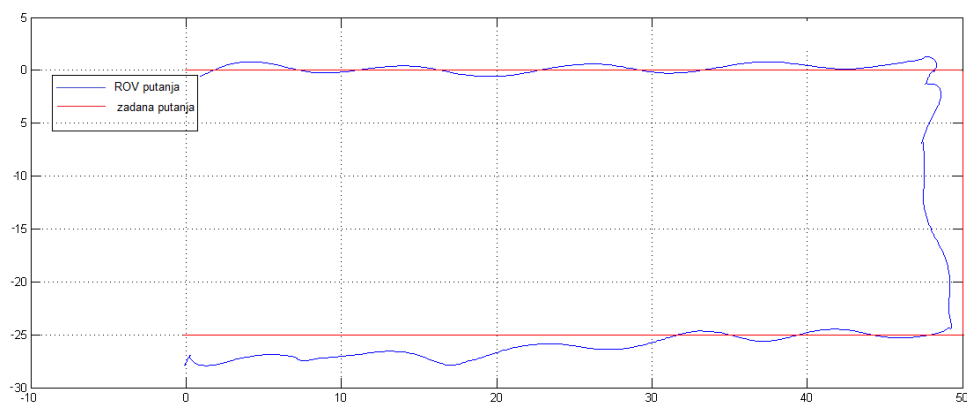
Vidljivo je da je sustav stabilan, budući se zadana putanja uspjela slijediti, ali kvaliteta upravljanja je vrlo loša, $m_1 = 2.9338 \frac{m}{uzorak}$.

Slučaj za $K=3$ prikazan je na slici ispod (Slika 20.). Rezultati u ovom slučaju pokazali su se mnogo boljima, nego za slučaj kada je $K=1$. To je i očekivano s obzirom da je ovaj put regulacijsko odstupanje, odnosno pogreška pri skretanje s putanje, pojačano tri puta pa se greška brže i lakše uoči. Sustav je stabilan, a prosječna pogreška praćenja iznosi $m_3 = 1.0808 \frac{m}{uzorak}$.



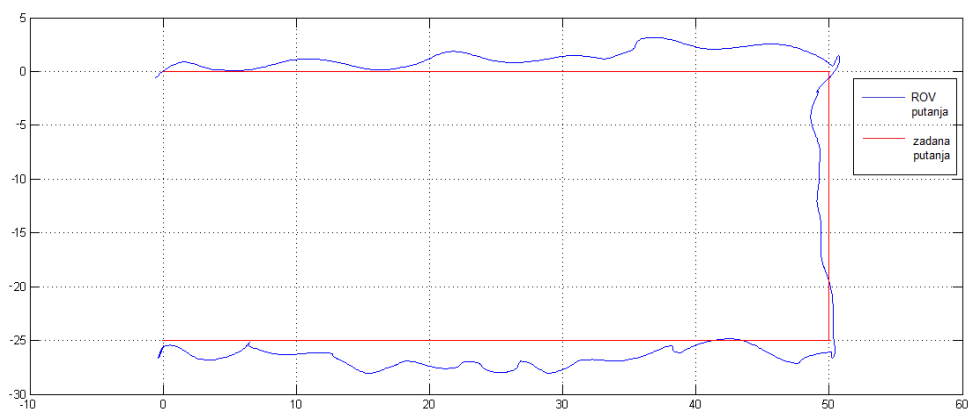
Slika 20. ROV putanja, $K=3$

Treći slučaj, odnosno slučaj kada je $K=7$, prikazan je na slici ispod (*Slika 21.*). Ovaj slučaj je također dao dobre rezultate i kvalitetan odziv. Prosječna pogreška praćenja iznosi $m_7 = 1.1419 \frac{m}{uzorak}$. Regulacijsko odstupanje pojačano je sedam puta, te se vrlo jasno i brzo osjeti pogreška.



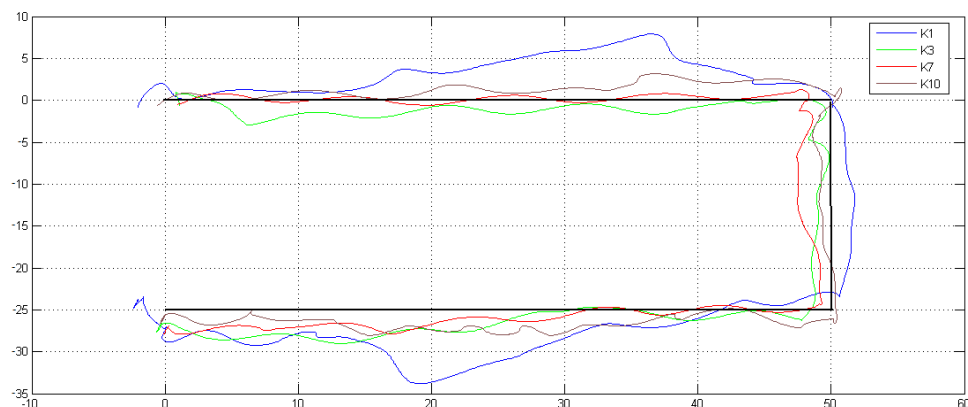
Slika 21. ROV putanja, K=7

Slika 22. prikazuje putanju ROV-a (plavo) i zadanu putanju (crveno) za slučaj kad je konstanta $K=10$. Rezultati u ovom slučaju pokazali su se nešto lošijima od prethodna dva slučaja (slučaj za $K=3$, $K=7$), ali su i dalje puno bolji, nego za slučaj u kojem je $K=1$. Kvaliteta upravljanja je zadovoljavajuća i sustav je stabilan, $m_{10} = 1.4046 \frac{m}{uzorak}$.



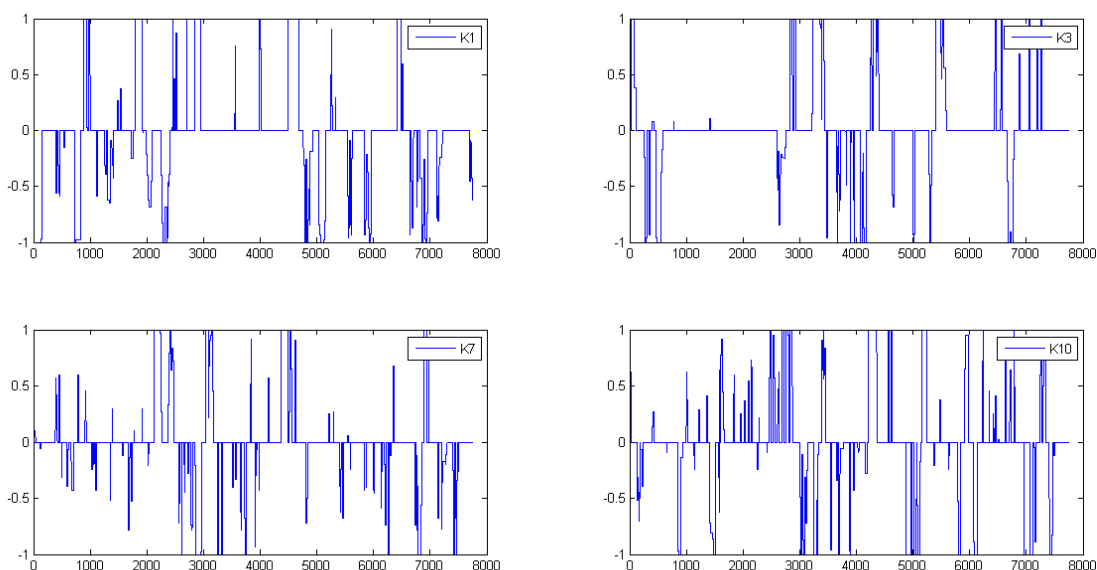
Slika 22. ROV putanja, K=10

Slika 23. prikazuje putanje ROV-a za različite iznose pojačanja regulacijskog odstupanja. Vidljivo je da je slučaj za $K=1$ najgori, dok slučajevi za $K=3$ i $K=7$ pokazuju najbolje rezultate.



Slika 23. ROV putanje za različite iznose konstante K

Uz prosječnu pogrešku praćenja te prikaz putanje ROV-a u odnosu na zadanu putanju, promatrana je i uporaba *joysticka*. *Joystickom* se upravlja unaprijednom silom X (engl. *surge*) i momentom zaošijanja N (engl. *yaw*). Bitno za analizu slijeđenja putanje je moment zaošijanja N te integral momenta, odnosno energija zaošijanja. Slika 24. prikazuje četiri grafa kojima je prikazan moment zaošijanja *joysticka* za vrijeme simulacije. Prvi graf (gore lijevo) odgovara slučaju kada je $K=1$, drugi graf (gore desno) slučaju kada je $K=3$, treći graf (dolje lijevo) slučaju za $K=7$, a četvrti graf (dolje desno) slučaju kada je $K=10$. Kako bi se dobiveni rezultati usporedili, potrebno je izračunati površinu koju krivulja zatvara s x-osi, odnosno integral dobivenih apsolutnih vrijednosti. Jedan od načina za to izračunati jest pomoću *Matlab* funkcije *trapz*, koja računa sumu površina trapeza razapetih između dviju susjednih točaka krivulje i njihovih projekcija na x-osi.



Slika 24. Momenti zaošijanja joysticka

Površine ispod grafova iznose :

- 1) za prvi graf ($K=1$) ; $A_1 = 1667.1$ kvadratnih jedinica ,
- 2) za drugi graf ($K=3$) ; $A_3 = 1192.6$ kvadratnih jedinica ,
- 3) za treći graf ($K=7$) ; $A_7 = 1202.3$ kvadratnih jedinica ,
- 4) za četvrti graf ($K=10$) ; $A_{10} = 1565.2$ kvadratnih jedinica .

Iz dobivenih rezultata vidljivo je da je energija momenta zaošijanja *joysticka* najveća za prvi slučaj , odnosno jedinično pojačanje regulacijskog odstupanja. Budući da je $K=1$, greška pri skretanju s putanje je slabo izražena te se kasno uoči. Jednom kad se uoči, potrebno je maksimalno zakrenuti *joystick* kako bi se ispravila, a to često za posljedicu ima pojavu greške skretanja s putanje, ali na suprotnoj strani. Najmanja energija zaošijanja *joysticka* odgovara drugom slučaju kada je pojačanje regulacijskog odstupanja $K=3$.

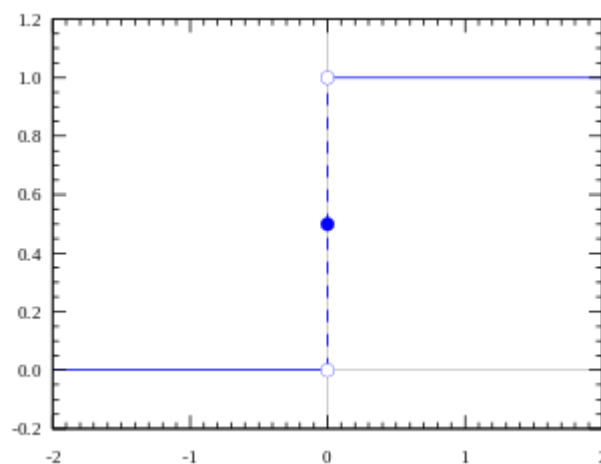
Također, potrebno je i prebrojati koliko je puta čovjek, odnosno operater, zakrenuo *joystick*. Dobiveni su sljedeći rezultati:

- 1) 33 puta za $K=1$;
- 2) 31 put za $K=3$;
- 3) 53 puta za $K=7$;
- 4) 61 put za $K=10$.

Primjećuje se sve učestalije korištenje *joysticka* porastom pojačanja K . Uzrok tome je sve veća sličnost čovjeka u ulozi regulatora s „*bang bang*“ regulatorom, koji je opisan u sljedećem poglavlju.

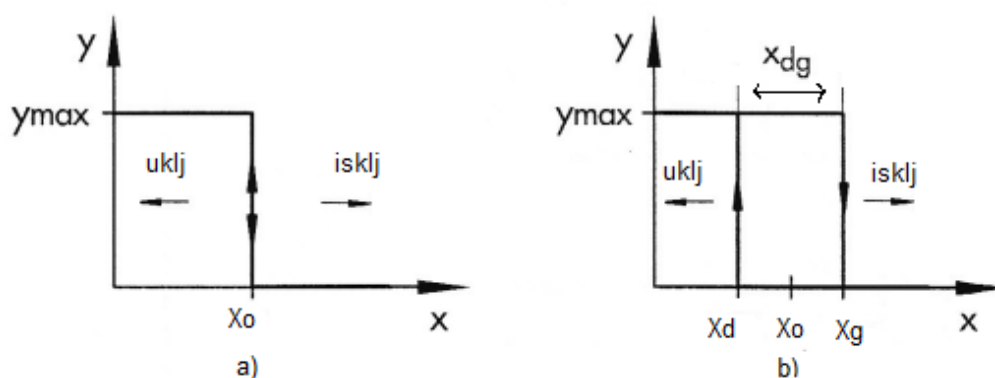
5. Bang bang regulator

„Bang bang“ regulator (histerezni regulator, on-off regulator, dvopoložajni regulator) spada u diskontinuirane regulatore, odnosno regulatore s diskretnim vrijednostima izlaznog signala. Izlazni signal „bang bang“ regulatora može poprimiti samo dvije vrijednosti, maksimalnu vrijednost i minimalnu vrijednost (najčešće nula) te se može prikazati Heavisideovom step funkcijom (Slika 25.). Kada je regulacijsko odstupanje pozitivno, odnosno kada je referentna vrijednost ulaznog signala veća od trenutne vrijednosti, regulator na svom izlazu daje maksimalnu vrijednost. Ukoliko je regulacijsko odstupanje negativno, odnosno ukoliko je referentna vrijednost premašena, regulator na svojem izlazu daje minimalnu vrijednost. Najjednostavniji primjer takvog regulatora je bimetalna traka koja se koristi kao temperaturni senzor u sustavima regulacije temperature. Kada se bimetalna traka zagrije, ona se savija te prekida tok struje prema grijaču i obratnu. Dakle, grijač ili ne grije ili grije maksimalnom snagom.



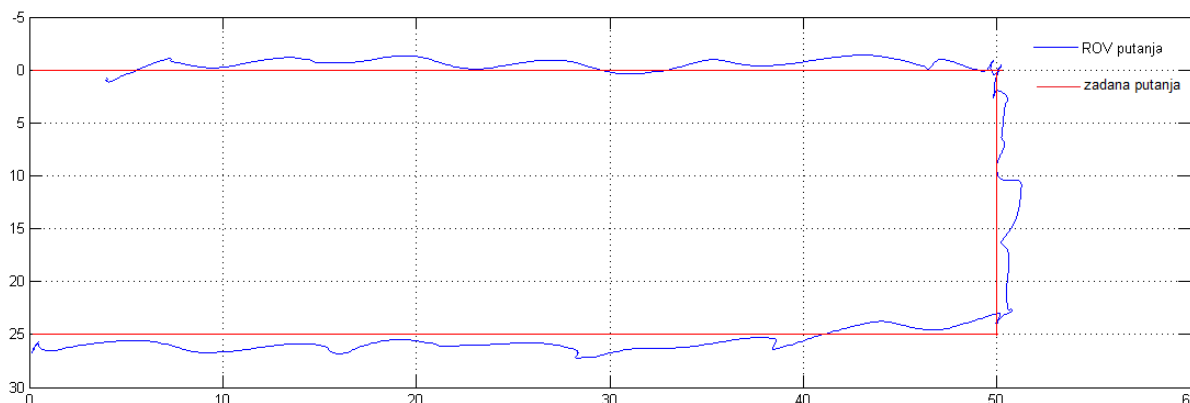
Slika 25. Heavisideova step funkcija

Uvođenjem diferencijalnog razmaka (histereze) smanjuje se učestalost mijenjanja izlaznog stanja regulatora. U ovom slučaju regulator daje maksimalnu vrijednost na izlazu kod vrijednosti nešto nižih od X_0 , a minimalnu vrijednost kod vrijednosti nešto viših od X_0 (Slika 26.b).



Slika 26. Izlazne karakteristike dvopoložajnog regulatora : a) bez histereze, b) sa histerezom

Signali slični dobivenima iz „bang bang“ regulatora primjećuju se i na izlazu iz *joysticka* za veća pojačanja regulacijskog odstupanja. Na slici ispod (Slika 27.) prikazana je putanja ROV-a (plavo) i zadana putanja (crveno) za pojačanje regulacijskog odstupanja $K=20$.

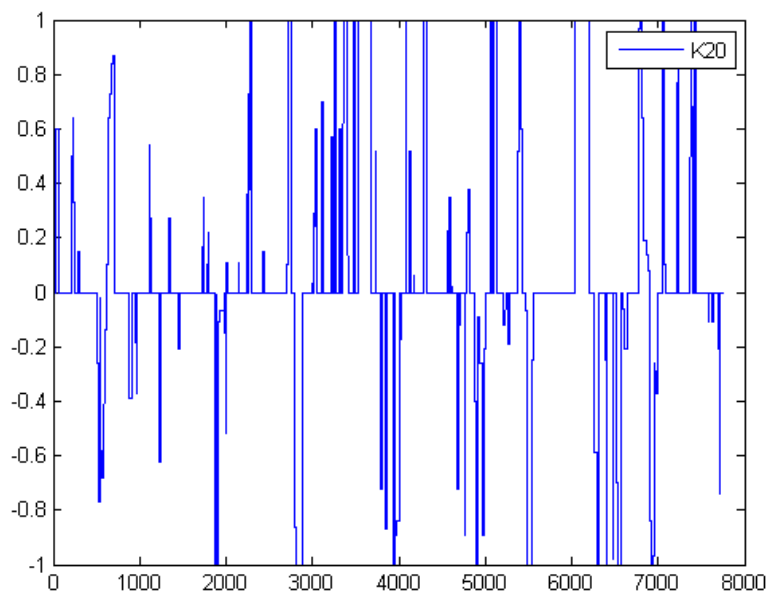


Slika 27. ROV putanja, $K=20$

Budući da putanja ROV-a uspijeva pratiti zadanu putanju, može se zaključiti da je sustav stabilan, a kvaliteta upravljanje je zadovoljavajuća.

U ovom slučaju regulacijska pogreška nastala pri skretanju s putanje povećana je 20 puta. Već malo odstupanje od zadane putanje je vrlo uočljivo,

što znači da se zvuk čuje isključivo u lijevoj ili isključivo u desnoj slušalici, ovisno o poziciji ROV-a. Gotovo nemoguće je ujednačiti intenzitet zvuka u slušalicama, a to za posljedicu ima učestalije zakretanje *joystickom*, kao što je prikazano na slici ispod (*Slika 28.*).



Slika 28. Intenzitet korištenja joysticka za K=20

Sa slike se prebroji da je čovjek zakrenuo *joystickom* 63 puta te je zakret najčešće bio maksimalan, odnosno minimalan, što nedvojbeno podsjeća na izlazni signal „*bang bang*“ regulatora.

6. Zaključak

Kroz ovaj rad opisana je prijenosna funkcija čovjeka, kao i povijest istraživanja iste. Također, objašnjeno je što predstavlja pojedini parametar prijenosne funkcije čovjeka te je prikazan raspon vrijednosti vremenskih konstanti. Ispitivana je stabilnost sustava u kojem je čovjek regulator, a proces daljinsko upravljanje ROV-om te je korištenjem Nyquistovog kriterija, uz pomoć programskog sučelja *Matlab*, zaključeno da je takav sustav stabilan. Pomoću Nyquistovog kriterija i *Matlab*-a, određen je i maksimalni iznos konstante K za kojeg je sustav na rubu stabilnosti. U radu je opisan i simulator visoke razine, korišten kako bi se analizirao utjecaj pojačanja regulacijskog odstupanja na čovjeka u ulozi regulatora, te na sustav općenito. ROV-om se upravljalo uz pomoć *joysticka*, a smjer kretanja ROV-a određen je uz pomoć zvučnih signala u slušalicama. Najbolji rezultati, odnosno najmanja greška slijeđenja putanje, dobiveni su za $K=3$, a najgori za slučaj kada je $K=1$. Također, promatran je i moment zaošijanja *joysticka* za pojedine iznose konstante K . Na temelju dobivenih rezultata zaključeno je da je sustav s čovjekom u petlji stabilan, bez obzira na veličinu K , jer čovjek stabilizira cjelokupni proces promjenom načina reguliranja. Za velike vrijednosti K , čovjek kao regulator je sve sličniji „*bang bang*“ regulatoru.

Sve većim i bržim napretkom tehnologije, prijenosna funkcija čovjeka sve više dobiva na važnosti. Kako bi se uspješno ostvarila sinteza čovjeka i stroja, potrebno je poznavati karakteristike stroja, ali i čovjeka. Stoga, nisu na odmet daljnja istraživanja na ovu temu.

Vlastoručni potpis: _____

7. Literatura

- [1] Andersen,T. , *Nyquist plot with logarithmic amplitudes*, 04.06.2009., <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/7444-nyquist-plot-with-logarithmic-amplitudes/content/nyqlog.m>, 01.06.2014.
- [2] Baotić, M. ,Mišković,N. ,Perić, N. ,Vukić, Z. *Predavanje 12-Stabilnost linearnih kontinuiranih sustava upravljanja*. Automatsko upravljanje. Fakultet elektrotehnike i računarstva. Zagreb, 2013.
- [3] Mahalanabis,A.K. *Intoductory system engineering*. John Wiley & sons. New Delhi, 1982.
- [4] Milat,T. *Simulator plovila temeljen na MOOS-u*. Završni rad. Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2010.
- [5] MMRRC,UL, *Multi Purpose Platform Tehnologies for Subsea Operations* (MPPT rings) , <http://www.mmrrc.ul.ie/dotnetnuke/AboutUS/Research/OceanEnergy.aspx>, 25.5.2014.
- [6] Ravlić,V. *Automatika - za elektrotehničke škole*. Ravel d.o.o. Zagreb, 2009.

ANALIZA STABILNOSTI SUSTAVA SA ČOVJEKOM U PETLJI

Sažetak

U završnom radu analizirala se stabilnost zatvorenog regulacijskog sustava s čovjekom u petlji. Sustav koji je promatran sastoji se od procesa (upravljanje ronilicom pomoću *joysticka*), čovjeka regulatora i pojačanja regulacijskog odstupanja ispred regulatora. U radu je opisana prijenosna funkcija čovjeka te povijest istraživanja iste. Apsolutna stabilnost sustava provjeravana je Nyquistovim kriterijem za rubne vremenske konstante prijenosne funkcije čovjeka te je određeno maksimalno pojačanje regulacijskog odstupanja za koje je sustav stabilan. Također, provedena je simulacija za različita pojačanja regulacijskog odstupanja te su dobiveni odzivi analizirani i komentirani.

Ključne riječi : čovjek, regulator, sustav, stabilnost, regulacijsko odstupanje

ANALYSIS OF SYSTEM STABILITY WITH HUMAN IN THE LOOP

Summary

The task is to analyse stability of closed loop regulation with the human in the loop. System consists of process (yaw control of the remotely operated underwater vehicle), human regulator and error amplifier in front of the regulator. Transfer function of a human and its history of research is described. Absolute stability of the system is tested by using Nyquist criteria for the edge time constants of the transfer function of the human and the max error amplifier for which the system is stable, is also determined by the Nyquist criteria. Furthermore, simulation for different error amplifier is conducted and results are analyzed and commented.

Key words: human, controller, system , stability, error