

# Ugađanje PID regulatora kod kursa broda koristeći Nomotov model broda

---

Cikojević, Toni

Undergraduate thesis / Završni rad

2018

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Split, Faculty of Maritime Studies / Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:164:680539>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-27**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository - Faculty of Maritime Studies - Split -  
Repository - Faculty of Maritime Studies Split for  
permanent storage and preservation of digital  
resources of the institution](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**TONI CIKOJEVIĆ**

**UGAĐANJE PID REGULATORA KOD  
KURSA BRODA KORISTEĆI NOMOTOV  
MODEL BRODA**

**ZAVRŠNI RAD**

**SPLIT, 2018.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU  
POMORSKI FAKULTET U SPLITU**

**STUDIJ: POMORSKA NAUTIKA**

**UGAĐANJE PID REGULATORA KOD  
KURSA BRODA KORISTEĆI NOMOTOV  
MODEL BRODA**

**ZAVRŠNI RAD**

**MENTOR:**  
**doc. dr. sc. Joško Šoda**

**STUDENT:**  
**Toni Cikojević**  
**(MB:0023103570)**

**SPLIT, 2018.**

## SAŽETAK

Danas, u svakodnevnom životu su neizbježni sustavi automatskog upravljanja tj. sustavi automatske regulacije. Automatska regulacija kursa broda omogućuje ekonomičnu, pouzdanu i kvalitetnu plovidbu uz olakšano radno opterećenje posade. Upravljanje brodom pomoću autopilota jedna je od najranijih primjena teorije automatskog upravljanja. Zahtjev za primjenu sofisticiranijih autopilota za upravljanje brodom uglavnom je rezultat želje za uštedom goriva i poboljšanjima performansi. Budući da su jednadžbe kretanja broda vrlo nelinearne, a parametri modela ovise o brzini kretanja i vremenskim uvjetima, treba uzeti u obzir teoriju nelinearne kontrole. Međutim, pokazuje se da kod konstrukcije autopilota kod upravljanja s kursom broda, sasvim dovoljno je koristiti Nomotov model broda prvog reda. U radu će se prikazati način ugađanja parametara PID regulatora kod upravljanja s kursom broda, vodeći računa o realnim parametrima broda.

**Ključne riječi:** automatska regulacija, kurs, Nomotov model, PID regulator

## ABSTRACT

Today, in everyday life, there are inevitable automatic control systems. The automatic regulation of the boat's course enables economical, reliable and high quality navigation with easy crew load. The management of a ship by autopilot is one of the earliest applications of automated control theory. The application for more sophisticated autopilots for ship management is mainly due to the desire to save fuel and improve performance. Since ship motion equations are non-linear, and model parameters depend on the speed of movement and the weather conditions, the theory of nonlinear control should be taken into account. It is, however, shown that in the construction of the autopilot when managing a ship's course, it is quite enough to use Nomoto's first-order ship model. This paper will show how to adjust the PID regulator parameters when managing the course of the ship, taking into account the real parameters of the ship.

**Keywords:** automatic regulation, course, Nomoto model, PID regulator

# SADRŽAJ

<b>1.UVOD</b> .....	1
<b>1.1.DEFINIRANJE PROBLEMA I PREDMETA ISTRAŽIVANJA</b> .....	2
<b>1.2.SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA</b> .....	2
<b>1.3.STRUKTURA RADA</b> .....	3
<b>2.PREGLED PRISTUPA UPRAVLJANJA BRODOM</b> .....	4
<b>2.1.PRISTUP ZASNOVAN NA ULAZNO-IZLAZNYM RELACIJAMA</b> .....	4
2.1.1.Poboljšanje stabilnosti kursa preko pomoćne automatske regulacije.....	6
<b>2.2.NYQUISTOV KRITERIJ STABILNOSTI SUSTAVA</b> .....	8
<b>2.3. REGULATORI</b> .....	13
<b>3.MATEMATIČKI MODEL BRODA</b> .....	20
<b>3.1.NOMOTOV MODEL BRODA DRUGOG REDA</b> .....	23
<b>3.2.AUTOMATSKO VOĐENJE BRODA (AUTO PILOT)</b> .....	26
<b>4.PRIMJENA NOMOTOVOG MODELA BRODA</b> .....	29
<b>5.ZAKLJUČAK</b> .....	47
<b>LITERATURA</b> .....	48
<b>POPIS SLIKA</b> .....	50
<b>POPIS TABLICA</b> .....	52
<b>POPIS KRATICA</b> .....	53

## 1. UVOD

Umni rad čovjeka koristeći dostupne informacije upravlja fizičkim radom, točnije troši se energija. Takve vrste čovjekovih operacija predstavljaju smišljen skup djelovanja koji se sastoji od operacija upravljanja i operacija reguliranja. Zamjena umnog rada čovjeka s određenim tehničkim uređajima se naziva automatizacija.

Danas, u svakodnevnom životu su neizbježni sustavi automatskog upravljanja tj. sustavi automatske regulacije. Pod pojmom automatska regulacija se podrazumijeva promjena određene fizikalne veličine po određenom zakonu bez neposrednog sudjelovanja čovjeka. Regulirana veličina jest izlazna tj. fizikalna veličina.

Razlozi tog neizbježnosti su kriteriji kao što su zadovoljenje zahtjeva u pogledu stabilnosti, stupanj osjetljivosti te brzina odziva pri promjeni ulazne veličine. Da bi se utvrdilo da li su zadovoljeni kriteriji potrebno je poznavati dinamiku sustava a dinamika sustava rješava se putem diferencijalnih jednadžbi. Navedene jednadžbe ponekad stvaraju problem jer su previše složene za analitičko rješavanje određenih problema. U toj situaciji je korisno sustav diferencijalnih jednadžbi zamijeniti analognim modelom kako bi se relacije što bolje i vjernije opisale.

Automatsko reguliranje se primjenjuje na objektu regulacije. Objekt regulacije su sva sredstva rada koji su potrebni pri ostvarenju nekog procesa kojim se regulira. Primjerice, kod svih objekata koji se gibaju kao što je brod postavlja se određeni zahtjev za kretanjem po zadanom kursu.

Općenito, gibanje objekta ne može se detaljno izraziti lineariziranim matematičkim modelom. Iz tog razloga postoje dva različita pristupa problemu. Jedan pristup se temelji na zakonima fizike a drugi na mjerenju ulazno-izlaznih relacija. Kod ulaznog-izlaznog pristupa najpoznatiji je Nomotov model broda.

## 1.1. DEFINIRANJE PROBLEMA I PREDMETA ISTRAŽIVANJA

Automatska regulacija kursa broda omogućuje ekonomičnu, pouzdanu i kvalitetnu plovidbu uz olakšano radno opterećenje posade. Upravljanje brodom pomoću autopilota jedna je od najranijih primjena teorije automatskog upravljanja.

Većina suvremenih autopilota izvedena je na osnovi proporcionalne, integralne i derivacijske sheme (PID). U teoriji je priznata značajna količina spoznaja koje se odnose na PID regulatore uglavnom oko njihove široke upotrebe kod vođenja procesa.

Stabilnost sustava automatskog upravljanja osnovni je preduvjet njegove praktične primjene. Sustav je stabilan ako se za ograničenu pobudu (ulazni signal) ima ograničeni odziv. Predmet ovog rada bit će ugađanje PID regulatora koristeći Nomotov modela broda na kojem se temelji sustav brodskog autopilota.

## 1.2. SVRHA I CILJEVI ISTRAŽIVANJA

Svrha ovog rada je opisati Nomotov model broda kroz teorijska objašnjenja te ugađanje PID regulatora koristeći Nomotov model broda na kojem se temelji sustav brodskog autopilota. Prema prethodno definiranom problemu i predmetu istraživanja postavljeni su ciljevi rada, koji se mogu svrstati u dva osnovna cilja:

1. **Spoznajni cilj** (teorijski) ovog rada je približiti tematiku Nomotovog modela broda te ugađanja PID regulatora kroz pojašnjenja i obilježja vođenja broda, automatske regulacije broda, teorijskih postavki o PID regulatorima, kriterijima stabilnosti, itd.
2. **Empirijski cilj** ovog rada je dokazati ugađanje PID regulatora kod kursa broda koristeći se Nomotovim modelom broda pomoću programskog jezika MATLAB.

### **1.3. STRUKTURA RADA**

Rad se sastoji od 5 dijelova. U prvom, uvodnom dijelu definiran je problem i predmet istraživanja, svrha i ciljevi istraživanja te je prikazana struktura rada.

Drugi dio obuhvaća teoretska polazišta pregleda pristupa upravljanja brodom. Dakle, pojam pristupa koji je zasnovan na ulazno-izlaznim relacijama te pojašnjenje poboljšanja stabilnosti kursa preko pomoćne automatske regulacije. Definiran je i objašnjen Nyquistov kriterij stabilnosti sustava kao i pojam regulatora i podjela regulatora po njihovim komponentama.

U trećem dijelu rada prezentiran je matematički model broda, teorijska obilježja Nomotovog modela broda drugog reda, automatsko vođenje broda (auto pilot).

U četvrtom dijelu rada prikazano je istraživanje te primjena automatske regulacije kursa broda uz uporabu Nomotovog modela broda te ugađanje PID regulatora.

Koristeći se dostupnom literaturom te internetskim izvorima u ovom radu prikazale su se i pojasnile temeljne teorijske postavke o regulaciji kursa broda.

U posljednjem, petom dijelu rada dana su zaključna razmatranja kao kratak osvrt na cijeli rad.



## **2. PREGLED PRISTUPA UPRAVLJANJA BRODOM**

Gibanje nekog objekta, u ovom slučaju broda u situaciji da bude istraženo kao oblik male vrtnje oko statične točke, može se upotrijebiti jednostavni linearni model, no u situaciji da ne bude shvaćeno na takav način ne može se u potpunosti detaljno izraziti u linearnom matematičkom modelu.

Primjerice, situacija u kojoj se može koristiti linearan model jest kad se brod kreće uzduž pravocrtne linije brzinom koja je konstantna (autopilot je tada u funkciji). Iz tog razloga postoje dva različita pristupa upravljanju brodom. Jedan pristup se temelji na zakonima fizike a drugi na mjerenju ulazno-izlaznih relacija. Za potrebe ovog rada objasniti će se pristup zasnovan na mjerenju ulazno-izlaznih relacija.

### **2.1. PRISTUP ZASNOVAN NA ULAZNO-IZLAZNIM RELACIJAMA**

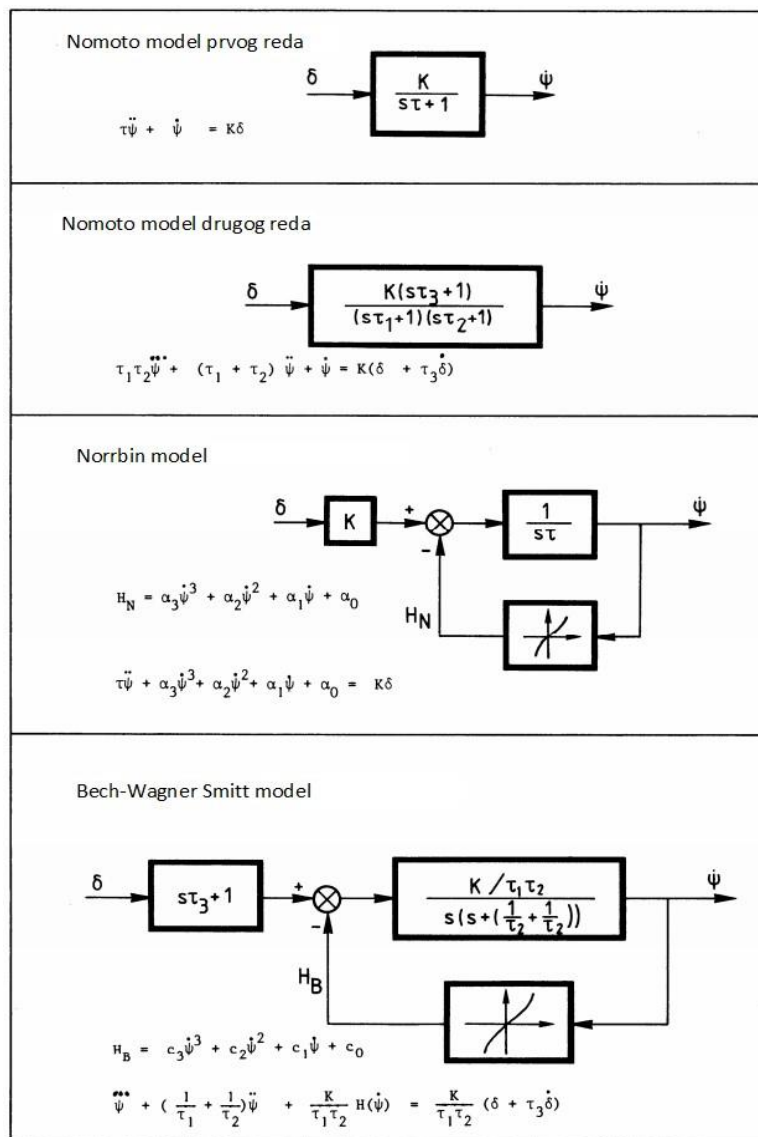
Pristup koji je zasnovan na ulazno-izlaznim relacijama se temelji na pretpostavci da se može uskladiti odziv modela s odzivom stvarnog sustava pri činjenici da je cjelokupno poznavanje sustava svedeno na minimum. Model je moguće i proširivati dok se u potpunosti ne usklade odzivi.

Poznavanje sustava može biti od ključne važnosti u situaciji odabira strukture modela posebice kada model iz linearnog stadija prelazi u nelinearan. Pri pristupu zasnovanom na ulazno-izlaznim relacijama najpopularniji je Nomotov model broda, prvog i drugog reda

Osim spomenutih Nomotovih modela broda koriste se još i Norrbinov model i Bech-Wagner Smittov model. Nomotov model prvog reda se koristi pri opisivanju i predstavljanju broda preko prijenosne funkcije. Ovaj model vjerodostojno predstavlja realan način rada broda [10]. Norrbinov model broda se koristi pri opisivanju broda sa velikim kutom otklona kormila i nestabilnim kursom. Autor Norrbinovog modela je proširio Nomotovu jednaždbu na empirijski način i stvorio nelinearan model. Bech-Wagner Smittov model se također

koristi pri opisivanju broda sa velikim kutom otklona kormila i nestabilnim kursom. Pri tom modelu se stabilnost kursa može definirati kao stacionarna greška koja ostaje i nakon trenutka poremećaja. Dakle, u situaciji kada je kurs broda nestabilan nema novog stacionarnog smjera već postoji stacionarna i konstantna brzina zakreta.

Svi navedeni modeli su modeli s jednim ulazom i izlazom. Na slici 1 predstavljene su sheme blokova i jednadžbe modela sa jednim ulazom i izlazom [11].



Slika 1. Kratki pregled modela sa jednim ulazom i izlazom [11]

Svaki od gore navedenih modela koji se temelje na jednom ulazu i izlazu imaju svoje prednosti i nedostatke koji su prikazani u tablici 1 [11].

**Tablica 1. Primjenjivost pojedinih modela sa jednim ulazom i jednim izlazom [11]**

+ = koristan - = nije koristan	mali kutovi otklona kormila ili stacionarni dio zig- zag kretanja	prvi dio zig-zag kretanja	brodovi sa nestabilnom kursom	konstantni parametri za sve dijelove zig-zag kretanja
Nomotov model prvog reda	+	-	-	-
Nomotov model drugog reda	+	+	-	-
Norrbin	+	-	+	-
Bech-Wagner	+	+	+	-

### 2.1.1. Poboljšanje stabilnosti kursa preko pomoćne automatske regulacije

Vertikalna ravnina kroz uzdužnicu broda u presjeku s horizontalnom ravninom daje liniju kursa. Kurs je kut koji zatvara pravac meridijana s linijom kursa. Točnije kut što ga pravac meridijana zatvara s uzdužnicom broda [3]. Kurs je usko povezan sa nestabilnosti broda i upravljanjem broda. U povijesti je dokazano, putem eksperimenata da je također značajna povezanost između nestabilnosti broda i teškoćama pri upravljanju.

Vjerojatnost ručnog upravljanja nestabilnim brodom ovisi o tome koliko brzo i efikasno kormilar može detektirati mali iznos zakreta te može li pravovremeno na takve promjene reagirati [6]. Iz navedenog se uočava da je moguće napraviti autopilota i za

nestabilni brod kao i za stabilni brod ukoliko je dostupna dovoljna regulacija brzine nastale promjene.

Uobičajeni primjer ručne regulacije uključuje ulaz, kormilara, brod i izlaz. U ovakvoj situaciji zastupljen je jako veliki nedostatak informacija što dovodi kormilara u teškoće. Dva su moguća načina kako bi se te teškoće smanjile ili u potpunosti otklonile. Prvi način je da se dodatne informacije plasiraju preko kormilara a drugi način je da se dodatne informacije obrade na automatski način. U toj situaciji dio kormilarevog posla je zamijenjen pomoćnom regulacijom. Ukoliko pomoćna regulacija bude ispravno izvedene njegove teškoće biti će uveliko reducirane. Ovakva metoda za smanjenje teškoća se u praksi nije koristila, poradi nedostatka istraživanja o problemu kako mjeriti brzinu zakreta broda i kako smanjiti pretjerano pomicanje kormila uzrokovano valovima [7].

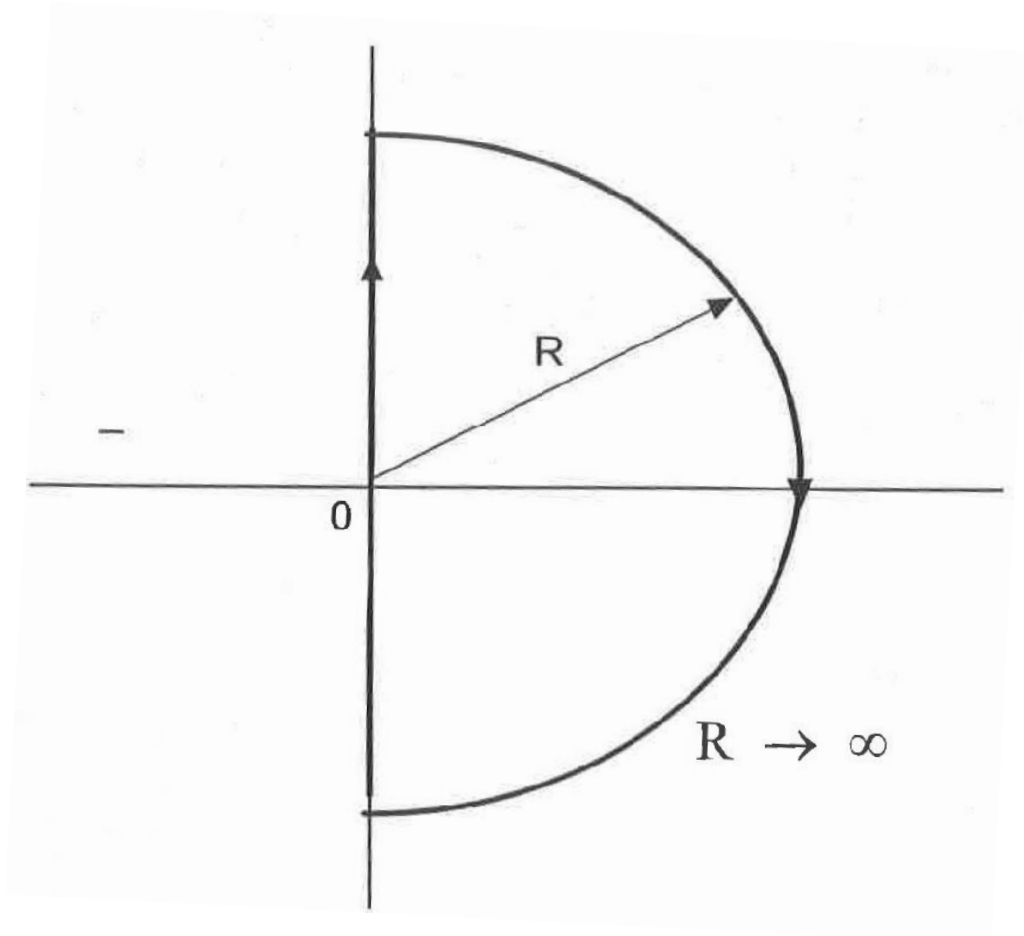
## 2.2. NYQUISTOV KRITERIJ STABILNOSTI SUSTAVA

Osnovna definicija stabilnosti sustava se može opisati kao sustav koji kad započinje s radom u blizini svoje radne točke, zauvijek i ostane u njenoj okolini. Točnije stabilnim sustavom se smatra onaj sustav čiji izlaz ostaje „pod kontrolom“ cijelo vrijeme.

Postoje tri tipa sustava, stabilni sustav daje ograničen odziv na bilo koju ograničenu pobudu, uvjetno stabilan sustav daje ograničen odziv na neke ograničene pobude a nestabilan sustav daje neograničen odziv na svaku ograničenu pobudu koja je **različita od nule**. Definicija stabilnosti sustava vodi do Nyquistovog kriterija za stabilnost sustava (s povratnom vezom). Kod sustava s povratnim vezama upitno je da li je karakteristična jednadžba  $1 + G_s G_h = 0$  povezana s pozitivnim realnim dijelom ili ne [7].

$$M(S) = \frac{G_s}{1 + G_s G_h} C(s) + \frac{1}{1 + G_s G_h} D(s) \quad (1)$$

Nyquistov kriterij kaže u slučaju da se razmatra preslikavanje konture na slici 2. koja pokriva cijelu desnu poluravninu s-ravnine, u  $G_s G_h$  ravninu te ukoliko se broji broj obilazaka oko točke (-1,0) u  $G_s G_h$  ravninu u smjeru kazaljke na satu tada N predstavlja razliku između broja polova (P) i nula (Z) funkcije  $1 + G_s G_h$  u desno poluravnini tj. dolazi se do formule  $N = Z - P$ .



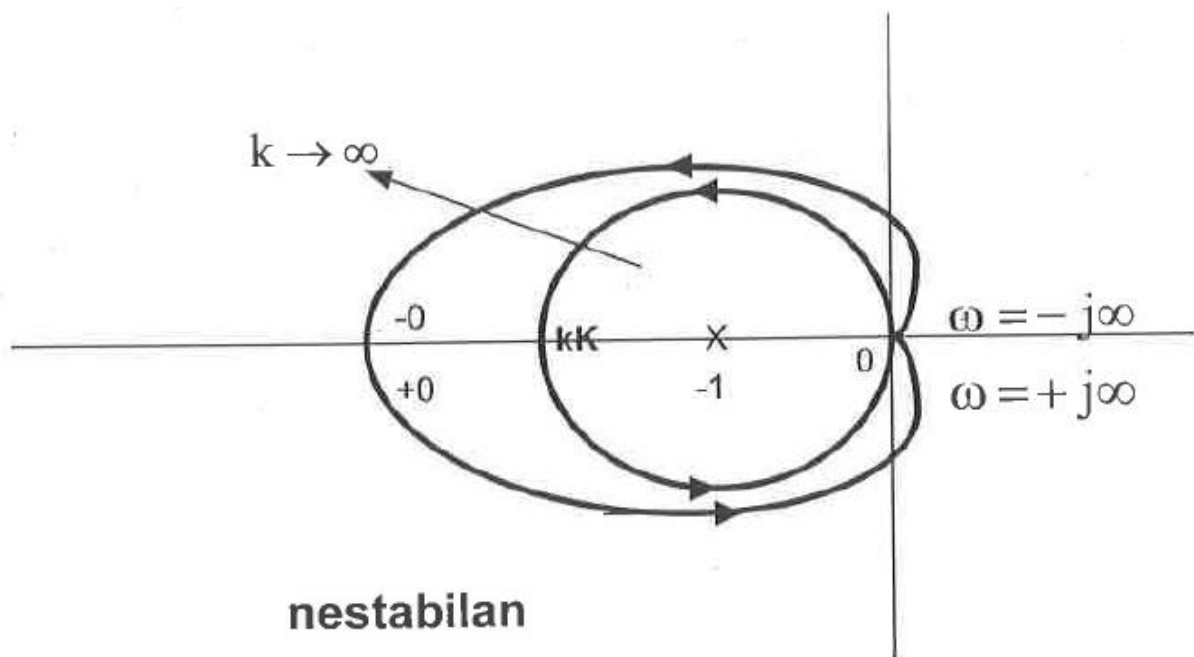
Slika 2. Nyquistova kontura [7]

P je unaprijed poznat iz situacije da su polovi te funkcije jednaki i za  $G_s$  i  $G_h$ , Z se unaprijed zna i predstavlja broj karakterističnih korijena s pozitivnim realnim dijelom. Ovaj kriterij se vrlo jednostavno primjeni na jednadžbu 2 i jednadžbu 3:

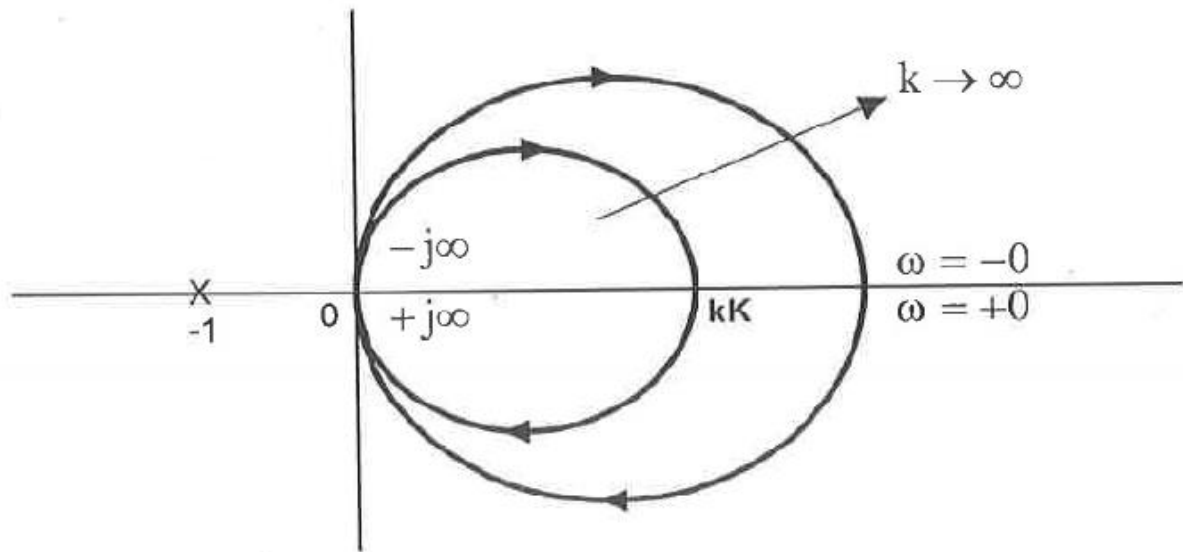
$$G_s = \frac{K(T_3s + 1)}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)} \quad (2)$$

$$G_H = k \quad (3)$$

U slučaju stabilnog broda  $K, T_1, T_2, T_3$ , uvijek su pozitivni iz razloga da se razmatranje regulacije pojednostavi.  $K$  i  $T_1$  postaju negativni samo u situaciji nestabilnog broda. Dakle  $P = 0$  ako je brod stabilan a  $P = 1$  ako je brod nestabilan. Što vodi do zaključka da je  $N = 0$  ako je brod stabilan te  $N = -1$  ako je brod nestabilan da bi cjelokupni sustav bio stabilan. Razlika između stabilnog i nestabilnog broda na Nyquistovom dijagramu je prikazana na slici 3 i slici 4.



Slika 3. Nestabilan brod preko Nyquistovog dijagrama [7]



**stabilan**

**Slika 4. Stabilan brod preko Nyquistovog dijagrama [7g]**

Na slici je vidljivo da je točka  $(0,0)$  u  $s$  ravnini preslikana u točku  $(kK,0)$  u  $G_s G_h$  ravnini. U situaciji da se izabere  $k > -1/K$  u slučaju da je brod nestabilan njegove karakteristike mogu se držati stabilnima ( $N = -1$ ) toliko dugo dok se vide sa određenom sigurnošću. Nije raspravljeno do koje se mjere treba stabilizirati brod ali navedeni uvjet u jednadžbi 4 dat će veoma dobar standard.

$$k > -\frac{1}{K} \quad (4)$$



Unutar tablice 2 se vide navedeni uvjeti stabilnosti.

**Tablica 2. Uvjeti stabilnosti broda [7]**

Brod	Vrijednost $k$	$P$	$N$	$Z = N + P$	
Nestabilan	$k > -1 / K$	<b>1</b>	<b>-1</b>	<b>0</b>	<b>stabilan</b>
	$k < -1 / K$	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>nestabilan</b>
Stabilan	<b>za sve <math>k</math></b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>stabilan</b>

## 2.3. REGULATORI

Većina suvremenih autopilota izvedena je na osnovi proporcionalne, integralne i derivacijske sheme (PID). U teoriji je priznata značajna količina spoznaja koje se odnose na PID regulatore uglavnom oko njihove široke upotrebe kod vođenja procesa. Regulator je dio regulacijskog kruga koji djeluje na određeni signal razlike iz komparatora na način da postiže zadovoljavajuće ponašanje izlazne veličine. Postoje različite vrste regulatora. Podjela se temelji na regulatorima po kriterijima i regulatorima prema vrsti djelovanja [12].

Regulatori po kriterijima:

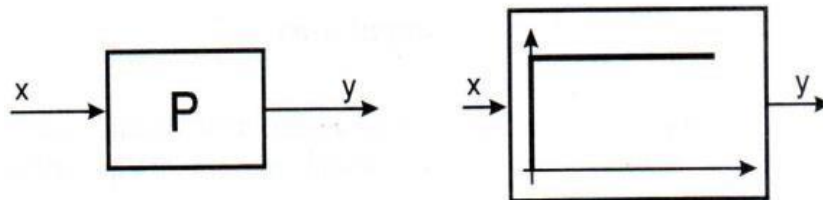
- S obzirom na opskrbu energijom: autonomni i neautonomni
- S obzirom na vrstu signala: kontinuirani i diskretni.

Regulatori prema vrsti djelovanja su:

- P regulatori
- I regulatori
- PI regulatori – PD regulatori
- PID regulatori.

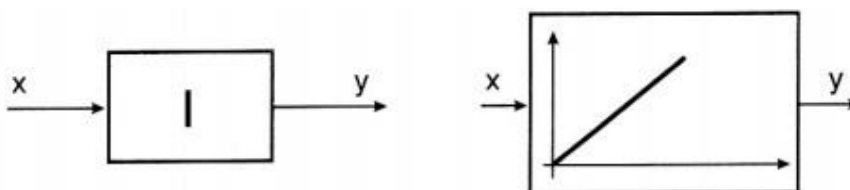
P regulatori su kontinuirani regulatori s proporcionalnim djelovanjem. Kod P regulatora se postiže regulacijsko djelovanje na lakši način. Kod P regulatora je realiziran proporcionalni zakon upravljanja. Koriste se kada je u regulacijskom sustavu dopuštena statička pogreška odnosno kad se statička pogreška tolerira. Dinamički odgovor regulatora i

stabilno stanje se postiže relativno lako i s minimumom regulacijskog djelovanja [15]. Na slici 5 su prikazani grafički simboli P regulatora [12].



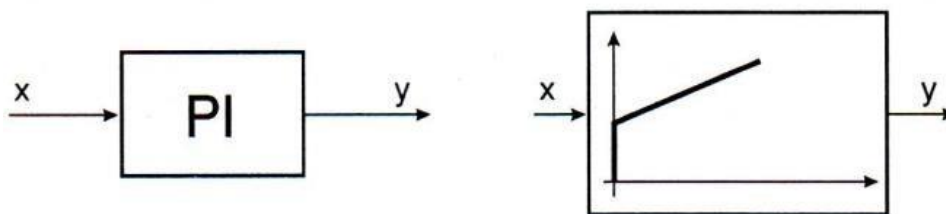
**Slika 5. Grafički simboli P regulatora [12]**

I regulatori su jedinice s integracijskim djelovanjem. Djeluju na način da uklanjaju regulacijsko odstupanje u ustaljenom stanju. Na određeno stanje djeluju sporo i brzina odziva im ovisi o iznosu regulacijskog odstupanja. Uvođenje integralnog regulatora povećava se inertnost sustava, točnije sustav sporije reagira na vanjske utjecaje ali poradi toga trajno otklanja trajno regulacijsko odstupanje. Pogodni su za sustave s niskim zahtjevima regulacije. U slučaju da zahtjevi regulacije toleriraju velika kašnjenja u odgovoru povoljna su za korištenje jer imaju nisku brzinu dinamičkog odgovora. Velika prednost ovih regulatora je u tome što je potpuno eliminirana statička pogreška [15]. Na slici 6 su prikazani grafički simboli I regulatora [12].



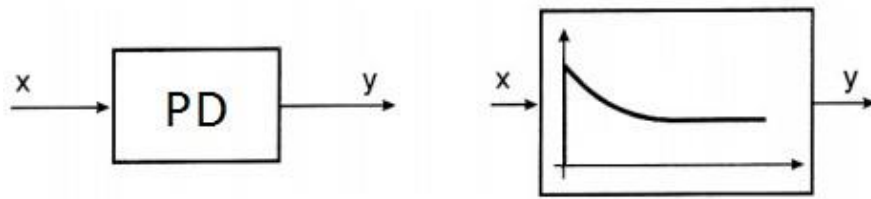
**Slika 6. Grafički simboli I regulatora [12]**

PI regulatori su kombinacija proporcionalnog i integracijskog regulatora. P regulator s jedne strane djeluje brzo ali stvara regulacijsko odstupanje a I regulatoro djeluje sporo ali uklanja regulacijsko odstupanje. PI regulatori kombiniraju prednosti P i I regulatori a smanjuju im mane. Ovaj tip regulatora daje dinamički regulacijski odgovor bez pojave statičke pogreške. Velika većina regulacijskih zahtjeva se može riješiti upotrebom ovog regulatora [15]. P regulator se ističe u početnoj fazi reguliranja zahvaljujući brzom odzivu, a I regulator u završnoj fazi kad se vrijednost podešava na točno željenu vrijednost. Time se postiže povećanje dobrih karakteristika i smanjenje loših. Sustavi sa PI regulatorom imaju veliku točnost i veliku brzinu odziva. Oni su najčešća vrsta regulatora koja se koristi. Na slici 7 su prikazani grafički simboli PI regulatora [12].



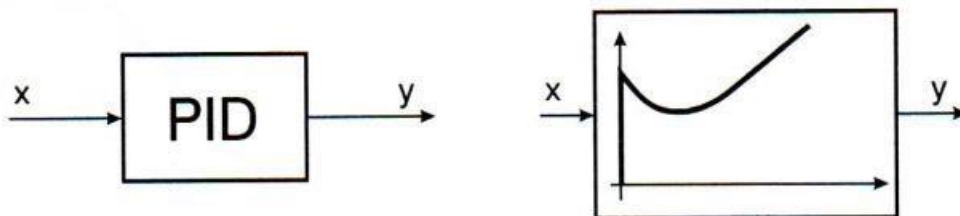
**Slika 7. Grafički simboli PI regulatora [12]**

PD regulatori su proporcionalno derivacijski regulatori. Čine spoj proporcionalnog i derivacijskog člana. Ovi regulatori se koriste kada se kod P regulatora javljaju velika kašnjenja u odgovoru [15]. Također kod PD regulatora statička pogreška se tolerira u regulacijskom sustavu. Proporcionalno djelovanje daje PD regulatoru neposrednost i stabilnost djelovanja te otklanja veća odstupanja dok se derivacijsko djelovanje suprostavlja brzim promjenama regulirane veličine koje nastaju pri djelovanju poremećaja. PD regulatori nemaju doduše veliku primjenu u tehničkoj praksi poradi osjetljivosti derivacijskog člana na smetnje. Na slici 8 su prikazani grafički simboli PD regulatora [12].



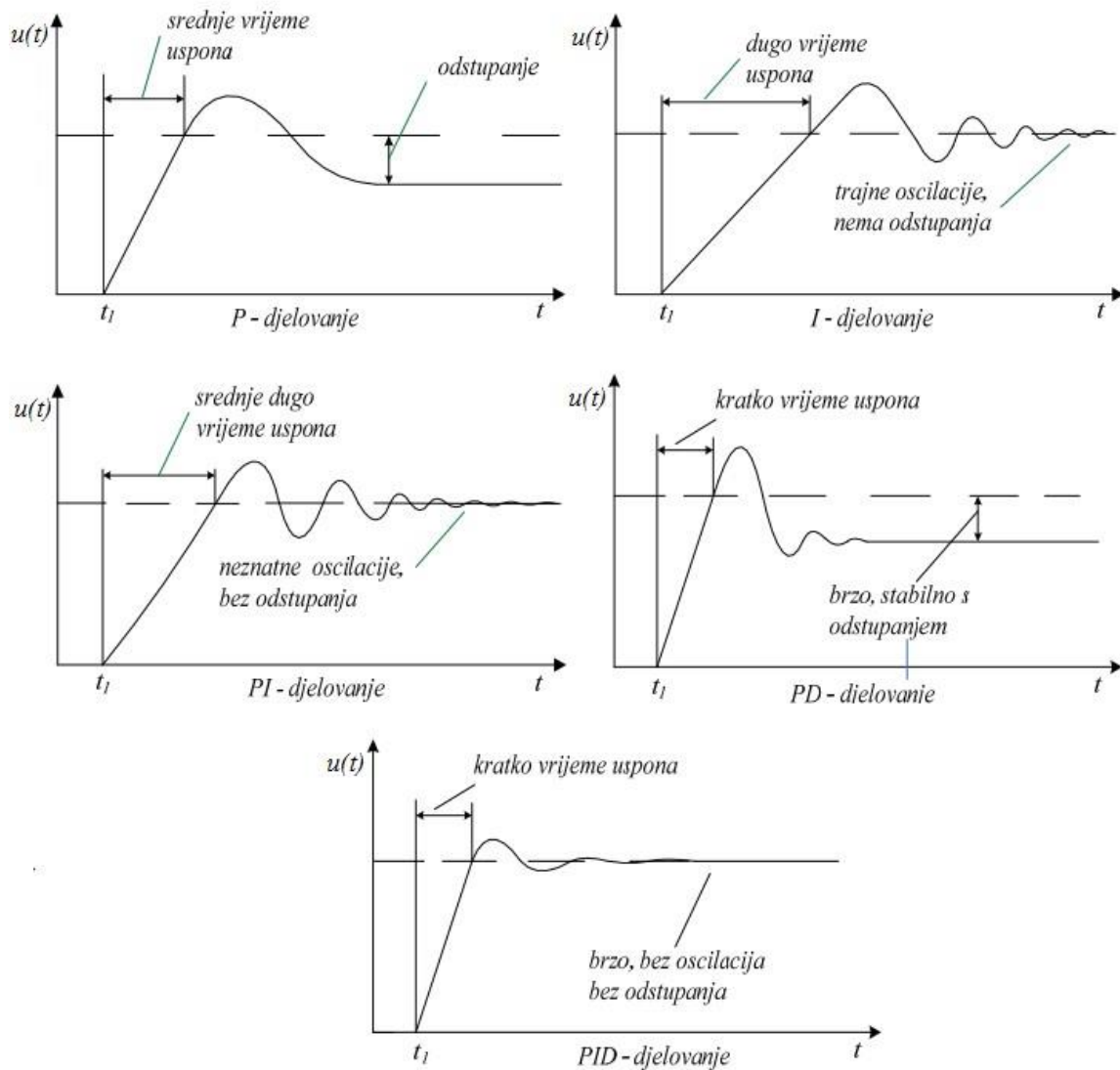
**Slika 8. Grafički simboli PD regulatora [12]**

PID regulatori su proporcionalno integracijsko derivacijski regulatori. Ovi regulatori ujedinjuju prednosti sva tri osnovna člana. Proporcionalno djelovanje osigurava stabilnost, integracijsko otklanja odstupanje a derivacijsko djelovanje daje brzinu odziva i prigušuje sklonost sustava k osciliranju. PID regulator je linearan dinamički regulator koji može izvesti tri matematičke operacije: množenje, integriranje i deriviranje. PID regulator je regulatori koji sadrži najkompleksnije i najopsežnije regulacijsko djelovanje. Pogodan je za regulacijske sustave gdje se javljaju velika kašnjenja koja se moraju eliminirati na najbrži mogući način [15]. Ukoliko se uspoređi PID regulator s PI regulatorom, daje se primjetiti da dodana D komponenta rezultira boljom regulacijskom dinamikom odnosno znatno bržim odgovorom a dodana I komponenta sprječava pojavu statičke pogreške. Također, PID regulator može poslužiti kao zamjena za djelovanje operatere u ručnoj regulaciji, naime on reagira proporcionalno u skladu s trenutnim prilikama, reagira integralno uzimajući u obzir prošlost te reagira derivacijski uzimajući u obzir buduće prilike. Na slici 9 su prikazani grafički simboli PID regulatora [12].



**Slika 9. Grafički simboli PID regulatora [12]**

Ukoliko se govori o prijelaznim karakteristikama različitih regulatora točnije o vremenu uspona, odstupanju te o oscilacijama iz slijedeće slike 10 je vidljivo da je PID regulator najbolji jer postiže traženu vrijednost u najkraćem vremenu bez oscilacija i odstupanja.



**Slika 10. Usporedni prikaz prijelaznih karakteristika tipičnog procesa pri regulaciji različitim regulatorima [12]**

Nakon teorijske obrade svih regulatora slijedi namještanje regulacijskih parametara tj. koeficijenata. Da bi se doveo sustav do zadovoljavajućih rezultata regulacije važno je da se

upotrijebi prikladan regulator te da svi regulacijski parametri budu prikladno namješteni. U najčešćem slučaju dogodi se situacija u kojoj postoji vrlo stabilan sustav ali i vrlo spor u regulacijskom odgovoru ili vrlo brz regulacijski sustav ali jako nestabilan. Da bi se to izbjeglo mora se detaljno analizirati odgovor regulacijskog sustava. Potom će uslijediti primjena nekoliko teoretskih i praktičnih pristupa s ciljem određivanja prikladnih regulacijskih koeficijenata [15].

Jedan od najpoznatijih pristupa je uporaba *Ziegler i Nichols* metode. Za ovu metodu postavljeni su slijedeći koraci [15].

- na regulatoru je potrebno postaviti regulacijske parametre  $K_p$  i  $T_v$  u najnižu vrijednost, a komponentu regulacijskog parametra  $T_n$  u najvišu vrijednost, na ovaj način se postiže najmanji mogući utjecaj regulatora na sustav,
- namjestiti regulacijski sustav ručno tj. započetu regulacijsku petlju,
- postaviti upravljajuću veličinu na ručno namještenu vrijednost i prebaciti na automatski način rada,
- započeti povećavanje vrijednosti regulacijskog parametra  $K_p$  dok izlazni signal ne postigne harmonične oscilacije,
- tako namještena vrijednost regulacijskog parametra  $K_p$  postaje kritični koeficijent proporcionalnog djelovanja  $K_{p,crit}$ ,
- odrediti vremenski raspon jedne pune oscilacijske amplitude i označi ga kao  $T_{crit}$ ,
- pomnožiti vrijednosti koeficijenta proporcionalnog djelovanja  $K_{p,crit}$  i vremenski raspon jedne pune oscilacijske amplitude  $T_{crit}$  s vrijednostima datima u tablici 3 i unijeti dobivene vrijednosti za regulacijske parametre  $K_p$ ,  $T_n$  i  $T_v$  u regulator,
- ako je potrebno ponovo namjestiti vrijednosti regulacijskih parametara  $K_p$  i  $T_n$  sve dok regulacijsko djelovanje ne pokaže zadovoljavajući dinamički odgovor.

**Tablica 3. Namještanje vrijednosti kontrolnih parametara prema Ziegler i Nichols metodi [15]**

	$K_p$	$T_n$	$T_v$
P	$0,50 \cdot K_{p,crit.}$	–	–
PI	$0,45 \cdot K_{p,crit.}$	$0,85 \cdot T_{crit.}$	–
PID	$0,59 \cdot K_{p,crit.}$	$0,50 \cdot T_{crit.}$	$0,12 \cdot T_{crit.}$



### 3. MATEMATIČKI MODEL BRODA

Poznavanje nekog procesa koji se smatra predmetom vođenja, iskazuje se matematičkim modelima dinamike sustava [13]. Matematički model uključuje samo neke značajke sustava tj. model nikada u potpunosti ne preslikava stvarni sustav već je uveliko pojednostavljen [9]. Osnovni princip automatskog vođenja broda je da se na temelju razlike stvarnog kursa i zadanog kursa određuje kurs zakreta kormila koji će tada korigirati stvarni kurs. Da bi se to dogodilo potreban je dinamički model ponašanja broda prilikom zakretanja što dovodi do osnovnih faza zakretanja broda.

Osnovne faze zakretanja broda:

- manevarska faza
- evolucijska faza i
- ustaljena faza.

Manevarska faza se vremenski poklapa sa zakretanjem kormila broda. U situaciji da se brod giba po ravnoj putanji na njega djeluju dvije sile, sila poriva  $T$  i sila hidro dinamičkog otpora  $R$  u kojoj su sadržane dvije komponente  $R_d$  – sila forme broda i  $R_v$  – sila trenja. U trenutku samog zakretanja kormila javlja se i dodatna sila kormila  $F_r$ . Prva faza traje dok nisu savladani svi momenti točnije dok još nije došlo do zakretanja broda. Za vrijeme prve faze jedina do izražaja dolazi sila  $F_r$  koja uzrokuje bočno zanošenje broda.

Evolucijska faza počinje čim počne okretanje broda oko vertikalne osi. Gibanje broda može se izraziti uz pomoć D'Alambertovog principa [14] koji kaže da sile koje djeluju na tijelo trebaju biti u ravnoteži s reakcijama usljed tri sile:

- sila poriva  $T$ ,
- otpor  $R$  i
- sila kormila  $F_r$ .

Ustaljena faza počinje kada sile dođu u novo stanje ravnoteže. Tada prestaje i kutno ubrzanje koje je djelovalo u smjeru suprotnom od linearne brzine, te gibanje postaje jednoliko. Radijus zakrivljenosti okretanja ostaje konstantan pa brod opisuje kružnicu. U ustaljenoj fazi će promjene kursa biti malene poradi projektiranja auto-pilota za održavanje stalnog kursa te će u toj situaciji brod prolaziti samo kroz prve faze.

Prelazeći na Laplaceovu transformaciju može se izvesti prijenosna funkcija broda izražena kao jednačba 5:

$$G(s) = \frac{\varphi_s(s)}{\delta(s)} = \frac{b_1s + b_0}{s(a_2s^2 + a_1s + a_0)} \quad (5)$$

iz koje je vidljivo da je to funkcija prve vrste, trećeg reda s jednom nulom. Taj podatak govori da brod pokazuje integracijski karakter tj. ne pokazuje stabilnost kretanja po kursu. U praksi se ovaj model dosta pojednostavljeno koristi. Karakteristična i realna je jednačba 6:

$$a_2s^2 + a_0 = 0 \quad (6)$$

koja vodi do jednačbe 7:

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{b_1s + b_0}{s(s + s_1)(s + s_2)} = \frac{b_0}{s_1s_2} \frac{1 + \frac{b_1}{b_0}s}{s \left(1 + \frac{s}{s_1}\right) \left(1 + \frac{s}{s_2}\right)} \\ &= \frac{K(1 + T_3s)}{s(1 + T_1)(1 + T_2s)} \end{aligned} \quad (7)$$

$$T_3 = \frac{b_1}{b_0} \quad (8)$$

$$T_1 = \frac{1}{s_1} \quad (9)$$

$$T_2 = \frac{1}{s_2} \quad (20)$$

$$K = b_0 T_1 T_2 \quad (31)$$

Sada se prijenosna funkcija  $G(s)$  aproksimira prijenosnom funkcijom prve vrste, drugog reda te je prikazana na jednadžbi 12:

$$G(s) = \frac{K_b}{s(T_b s + 1)} \quad (42)$$

tako da se uzmu jednadžbe 13 i 14:

$$K_b = K = b_0 T_1 T_2 \quad (53)$$

$$T_b = T_1 + T_2 - T_3 \quad (64)$$

Ovakav model broda se naziva **Nomotov model broda** i postavljen je 1957.godine [8].

### 3.1. NOMOTOV MODEL BRODA DRUGOG REDA

Nomotov model broda drugog reda je najjednostavniji matematički model koji se koristi za predstavljanje broda preko prijenosne funkcije.

Linearni modeli upravljača su daleko najčešće povezani s čistim gibanjem kretanja. Tradicionalno ili kolokvijalno, nazivali su ih Nomotovim modelima. Prvenstveno su razvijeni kako bi analizirali sposobnosti održavanja tečaja brodova tijekom dizajna broda i primijenili neke zakone o upravljanju brodovima, točnije stvoreni su automatski piloti. Oni su jednostavno i analitičko rješenje, uz dobru interpretaciju i neke identifikacijske postupke. Čini se da linearni modeli dobro funkcioniraju u određivanju (prepoznavanju ili kalibriranju) nekih područja sofisticiranijih, gore spomenutih modela manevriranja u cijeloj misiji.

U dimenzioniranom obliku, linearni Nomotov model broda drugog reda pojavljuje se kao jednačica 15, [2].

$$T_1 T_2 \frac{d^2 \omega'_z}{ds'^2} + (T_1 + T_2) \frac{d\omega'_z}{ds'} + \omega'_z = K \left( \delta + T_3 \frac{d\delta}{ds'} \right) \quad (75)$$

gdje je:

$T_1, T_2$  - konstante udaljenosti bez dimenzija (pretpostavljeno poradi simetrije,  $T_1 > T_2$ ),

$T_3$  - konstanta udaljenosti bez dimenzija,

$K$  - konstanta dobitka bez dimenzija,

$s'$  - dimenzija (trenutačna) udaljenost,

$\omega'$  - brzina propuštanja bez duljine,

$\delta$  - kormilo (kormilo), kao kontrolna varijabla,

$s$  - apsolutna udaljenost,

$\omega'_z$  - brzina vrtnje,

$\psi$  - naslov,

$\varepsilon'_z$  - ubrzanje kretanja bez duljine.

Nastavno, Nomotov model broda drugog reda uključuje jednađbu 16:

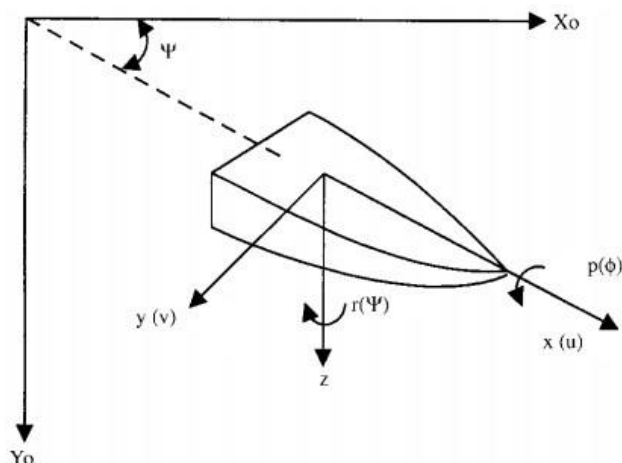
$$T_1 T_2 \varepsilon'_z(s') + (T_1 + T_2) \omega'_z(s') + \psi(s') = K \cdot \Delta(s') + K T_3 \delta(s') \quad (86)$$

Ili jednađbu 17:

$$T_1 T_2 \varepsilon'_z(s') + (T_1 + T_2) \omega'_z(s') - K \cdot \Delta(s') \pm K T_3 \delta(s') = -\psi(s') \quad (97)$$

Ovakav model broda spada u pristupe koji su zasnovani na ulazno-izlaznim relacijama s namjerom da se pokuša uskladiti odziv modela sa odzivom stvarnog sustava. Vjerodostojno predstavlja realan način broda a uz to je jednostavan za uporabu. Doduše postoje određeni nedostaci Nomotovog modela broda drugog reda. Vrijednosti indeksa upravljanja nikad nisu poznate sa sigurnošću, model ne uzima u obzir vanjske smetnje kao što je utjecaj valova te brzina kretanja koja se prilikom korištenja tog modela smatra konstantom pa je model ispravan samo u situaciji konstantnog pritiska i malih kutova otklona kormila [10].

Na slici 11 možemo vidjeti prikaz koordinatnog sustava za bočno kretanje, kut zakretanja i ljuľljanje broda.



### Slika 11. Koordinatni sustav za bočno kretanje, kut zakretanja i ljuljanje [10]

Za male kutove kormila, funkcija prijenosa između kuta kormila  $\delta$  i r brzine spuštanja površine broda može se opisati linearnim Nomotovim modelima [4]

Nomotov model drugog reda napisan je kao jednažba 18, [5]:

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{K(1 + T_3s)}{(1 + T_1)(1 + T_2s)} \quad (108)$$

gdje se  $s$  koristi za označavanje Laplaceove jednažbe,  $K$  je konstanta dobitka, a  $T_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) su tri vremenske konstante. Aproksimacijom modela prvog reda dobiva se definiranje efektivne vremenske konstante kao:  $T = T_1 + T_2 - T_3$ .

Stoga jednažba 19 prikazuje:

$$\frac{r(s)}{\delta(s)} = \frac{K}{1 + T_s} \quad (119)$$

Kvadratni kut  $\psi(t)$  odnosi se na brzinu okretanja  $r(t)$  kao:  $\psi(t) = r(t)$ .

### 3.2. AUTOMATSKO VOĐENJE BRODA (AUTO PILOT)

Auto-pilot odnosno uređaj za automatsko upravljanje brodom je uređaj kojemu je svrha zamijeniti i olakšati čovjekov rad. Auto-pilot održava brod na određenom plovidbenom kursu i dovodi ga do cilja. Djeluje prema unaprijed zadanom programu tj. njegov senzor reagira na sva odstupanja od određenog režima plovidbe.

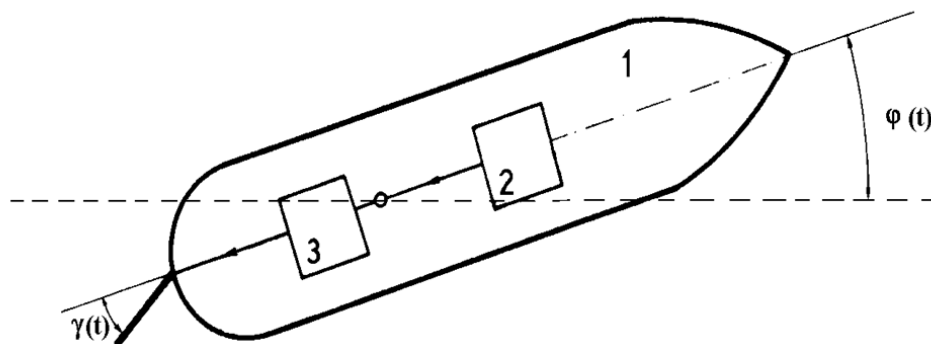
Matematički model broda dan je prijenosnom funkcijom, jednadžbom 20:

$$G(s) = \frac{\varphi_s(s)}{\delta_s(s)} = \frac{K_b}{s(T_b s + 1)} \quad (20)$$

Osnovni zadaci auto-pilota su:

- 1) signalizacija,
- 2) kontrola,
- 3) blokada i zaštita,
- 4) zaustavljanje,
- 5) gibanje i
- 6) upravljanje.

Kod gibanja broda postavlja se zahtjev za kretanjem po određeno zadanom kursu  $\varphi_0$ . U sustavu prikazanom na slici 11. izlazna veličina je kurs  $\varphi_{(t)}$ . Odstupanje izlazne veličine  $\varphi_{(t)}$  od zadanog kursa  $\varphi_0 = \text{konst.}$  mjeri se žiroskopom. Uz pomoć kormila pomiče se regulacijski uređaj za potreban kut  $\gamma$ . Izvršna veličina je upravo kut  $\gamma_{(t)}$  i ona kompenzira djelovanje raznih veličina koje bi mogle uzrokovati poremećaje ko što su valovi, morske struje, vjetar, itd te zadržava brod na zadanom kursu  $\varphi_0$ . Navedeno objašnjenje slijedi slika 12, [16].



**Slika 12. Shema broda koji se giba po zadanom kursu [16]**

Pri definiranju auto-pilota treba uzeti u obzir da je moguće razlučiti dva osnovna načina rada:

- mijenjanje kursa,
- održavanje kursa.

Prilikom mijenjanja kursa, auto-pilot treba dovesti broda iz početnog kursa u završni kurs na način koji će zadovoljiti naredbe postavljene od strane časnika. Prilikom održavanja kursa, putanja broda se treba što više poklapati sa željenom putanjom na način da se zadovolje određeni zahtjevi optimalnosti načina promjene kursa i zahtjevi optimalnosti ovise o trenutnim okolnostima tijekom plovidbe npr. da li se radi o plovidbi u slobodnim vodama ili o plovidbi u područjima u kojima je ograničen prolazak zbog gustog prometa ili prisustva kopna.

S vremenom kako se povećavala složenost brodskih sustava sve se više javljala potrebnija za njihovom automatizacijom, sve s ciljem boljih eksploatacijskih karakteristika broda koje su iskazane u navedenom [16]:



- smanjenju brojnosti posade,
- smanjenju troškova za posadu,
- smanjenju goriva,
- poboljšanju vremena operacija s teretom,
- smanjenju kvarova,
- smanjenju utroška održavanja,
- poboljšanju radnih uvjeta.

Općenito, ugradnjom kompjuterskog sustava na brod mogu se ugraditi i izvršavati brojne funkcije, kao npr, [16]:

- protusudarni sustavi,
- određivanje položaja pomoću satelita,
- izračunavanje položaja zbrajanjem kurseva,
- navigacijski proračuni,
- upravljanje ukrcavanjem i iskrcavanjem tereta,
- izračunavanje stanja broda,
- izračunavanje najpogodnijih uvjeta krcanja,
- otkrivanje pogrešaka u strojarnici,
- registriranje podataka o strojevima u strojarnici,
- upravljanje zakretnim momentom glavnog stroja,
- kompjuterska liječnička dijagnoza, itd.

#### 4. PRIMJENA NOMOTOVOG MODELA BRODA

Poglavlje primjene Nomotovog modela broda kao pomoć pri opisu uzima model broda "Esso Osaka" [1]. Opisani su i hidrodinamički koeficijenti koji su predstavljeni u tablicama 4 i 5.

Model je skaliran 1: 100 ( $k = 100$ ) od stvarnog broda VLCC Esso Osaka. Glavne karakteristike broda navedene su u tablici 4, a nondimenzionalni hidrodinamički koeficijenti prikazani su u tablici 5. Vrijednosti koeficijenata koriste se za simuliranje manevara Esso Osaka.

**Tablica 4: Pojedivosti Esso Osaka modela [1]**

<b>“Esso Osaka” Model</b>	
Ukupna duljina	3.430 m
Duljina između okomica	3.250 m
Širina	0.530 m
Dubina (procijenjena pokusima)	0.217 m
Blok koeficijent	0.831
Broj kormila	1
Premještanje (pr. pokusima)	319.40 Kg
Područje kormila	00.0120 m <sup>2</sup>
Područje propelera	0.0065 m <sup>2</sup>
Uzdužni CG	0.103 m

Oblik simulacijskih jednadžbi danih u ovom odjeljku je onaj gdje je:

- $\delta$  je odstupanje kormila;
- $m$  je masa broda;
- $I_z$  je trenutak inercije;
- $x_G$  je mjesto središta gravitacije u odnosu na srednji brod;
- $\Delta_u$  je promjena brzine naprijed (negativna  $\Delta_u$  je gubitak brzine);
- $X, Y$  i  $N$  sa indeksima  $u, v, r$  i  $\delta$  su hidrodinamički koeficijenti, kao što je  $N_v$ .

Realističnost ovog modela se očituje u prihvaćanju mogućnosti vjetra, struje i valova tijekom rada modela. Budući da je „Esso Osaka“ relativno malo iznad vodene strukture, blaga do umjerena temperatura ne bi uzrokovala znatnu vanjsku uzbudljivost. Međutim, čak i umjerene struje mogu proizvesti znatne vanjske sile na trupu, pogotovo kada trenutna brzina postane razumni dio komponenti brzine broda tijekom manevra. Budući da su hidrodinamičke sile koje djeluju na model, funkcije relativne brzine između broda, umanjene za prostornu brzinu vode, uzbuđenje je uzrokovano strujom u uzdužnom smjeru i u poprečnom smjeru, x-os i y-os, djelujući na odgovarajuće brojeve koeficijenata, kao što su  $X_u, Y_v$  i  $N_v$ . Ako je  $u_c$  trenutačna veličina, a  $\alpha$  trenutni prostorni smjer (smjer),  $\psi$  kut nagiba broda,  $u$  komponenta broda prednje brzina preko tla, i  $v$  brodska prostorno poprečna komponenta brzine, prednji dio relativne brzine  $u_r$  i poprečne komponente relativnog  $v_r$  su dati uz pomoć jednadžbi 21 i 22:

$$u_r = u - u_c \cos (\psi - \alpha) \quad (21)$$

$$v_r = v + u_c \sin (\psi - \alpha) \quad (22)$$

i brzina broda koja je dobivena unaprijed je dana jednadžbom 23:

$$U_r = \sqrt{u_r^2 + v_r^2} \quad (23)$$

„Esso Osaka“ ne dimenzionalni hidrodinamički koeficijenti su dani u tablici 5.

**Tablica 5: Esso Osaka ne dimenzionalni hidrodinamički koeficijenti [1]**

<b>Coefficient</b>	<b>Value</b>	<b>Coefficient</b>	<b>Value</b>
$(m - Y_{\dot{v}})'$	0.0352	$N'_{vrr}$	0.00611
$(I_z - N_{\dot{r}})'$	0.00222	$X'_{ee}$	-0.00224
$Y'_v$	-0.0261	$X'_{rrvv}$	-0.00715
$Y'_r$	0.00365	$N'_{eee}$	0.00116
$N'_v$	-0.0105	$Y'_{vrr}$	-0.0450
$N'_r$	-0.00480	$\eta'_1$	$-0.962 \times 10^{-5}$
$N'_{\delta}$	-0.00283	$\eta'_2$	$-0.446 \times 10^{-5}$
$X'_{vr} + m'$	0.0266	$\eta'_3$	$0.0309 \times 10^{-5}$
$N'_0$	-0.00028	$m'$	0.0181
		$C'_R$	0.00226

Kako bi se što lakše objasnio autopilot postaje neophodno pojednostavljenje matematičkog modela koji treba sadržavati samo glavna fizikalna svojstva procesa.

Linearni manevarski model temelji se na pretpostavci da se brzina krstarenja broda  $u$  održava konstantnom ( $u = u_0 \approx$  konstantna), dok se za veličinu  $v$  i  $r$  pretpostavlja da su male. Model nelinearnog manevriranja može se izraziti kroz jednadžbu 24:

$$M_{\dot{v}} + C(v)v + D(v)v = \tau \quad (24)$$

gdje je  $M$  matrica inercije sustava,  $C(v)$  je Coriolis-centripetalna matrica,  $D(v)$  je matrica prigušenja,  $\tau$  je vektor upravljačkih ulaza i  $v = [v, r]^T$  vektor kretanja. Nastavno, brod će biti

pod kontrolom samo jednog kormila gdje je kut kormila izražen kao  $\delta$ . Jednadžba 25 prikazuje navedeno;

$$\begin{aligned}\tau &= b \delta \\ &= \begin{bmatrix} -Y_\delta \\ -N_\delta \end{bmatrix} \delta\end{aligned}\tag{25}$$

Prikladno je prikazati totalno hidro dinamičko prigušenje uz pomoć jednadžbe 26:

$$D(v) = D + D_n(v) \approx D\tag{26}$$

gdje je  $D$  matrica linearnog prigušenja i  $D_n(v)$  nelinearna matrica prigušenja koja je zanemarena u ovom prikazu.

Nastavno, model u tom slučaju postaje izražen jednadžbom 27:

$$M\dot{v} + N(u_0)v = b\delta\tag{27}$$

Nastavno na sve navedene jednadžbe dobije se linearni model za upravljačke jednadžbe broda koji se postiže uklanjanjem brzine zakretanja. Dobiveni model naziva se Nomotovim modelom drugog reda i daje jednostavnu funkciju prijenosa između  $r$  i  $\delta$ , izraženo jednadžbom 28:

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{K(1 + T_3s)}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)}\tag{28}$$

gdje je:  $T_i (i = 1,2,3)$  vremenska konstanta a  $K$  je zadana konstanta.

Aproksimacija Nomotovog modela prvog reda dobiva se definiranjem *efektivne vremenske konstante* te je izražena uz pomoć jednadžbe 29:

$$T = T_1 + T_2 - T_3 \quad (29)$$

tako da bude, jednadžba 30:

$$\frac{r}{\delta}(s) = \frac{K}{(1 + Ts)} \quad (30)$$

gdje su  $T$  i  $K$  poznate vremenske konstante. Zanemarujući ulogu modova ( $\phi = \theta = 0$ ) tako da jednadžba 31 prikazuje:

$$\dot{\psi} = r \quad (31)$$

Te konačno vodi do jednadžbe 32:

$$\begin{aligned} \frac{\psi}{\delta}(s) &= \frac{K(1 + T_3s)}{s(1 + T_1s)(1 + T_2s)} \\ &\approx \frac{K}{s(1 + Ts)} \end{aligned} \quad (32)$$

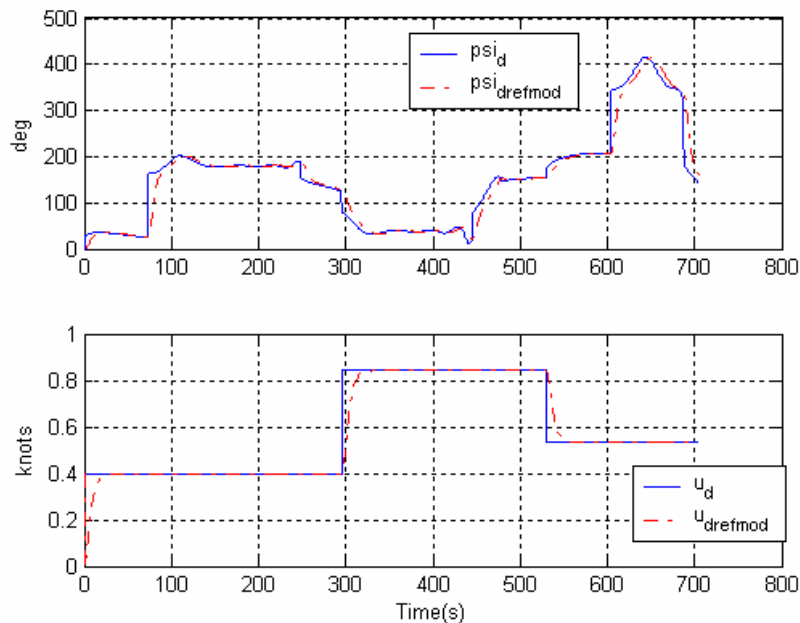
Ovaj je model široko korišten za dizajn autopilota brodova zbog svoje jednostavnosti i točnosti.

Nomotov model drugog reda također ima namjenu kod referentnog modela brzine. Naime, osnovna ideja s linearizacijom povratnih informacija jest transformirati dinamiku nelinearnih sustava u linearni sustav. Konvencionalne tehnike kontrole kao što su položaj polova i linearna kvadratna optimalna teorija kontrole mogu se zatim primijeniti na linearni sustav što pokazuje jednadžba 33, [5]:

$$\frac{u_d}{r^b}(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega^2} \quad (33)$$

gdje su  $\zeta > 0$  i  $\omega > 0$  omjer prigušenja referentnog modela i prirodna frekvencija, a  $r^b$  je zapovijedni ulaz (željena brzina vrtnje). U ovom se slučaju smatra  $\omega_n = 0.25$  rad/s i kritično prigušenje pomoću  $\zeta = 1$ .

Na slici 13 prikazana je parcela naređenih ulaza za brzinu i brzinu prenapona (krute linije) koja su postavljena s izlazima odgovarajućih referentnih modela (isprekidane linije).



**Slika 13: Naredba ulaza za brzinu vrtnje i brzinu prenapona prema odgovarajućim izlazima referentnih modela [5]**

Referirano na dana objašnjenja o PID regulatorima iz prethodnih poglavlja, pod pretpostavkom da se  $\psi$  mjeri pomoću kompas, PID regulator pokazuje jednadžba 34:

$$\tau_N(s) = \tau_{PID}(s) = -K_p \left( 1 + T_d s + \frac{1}{T_i s} \right) \tilde{\psi}(s) \quad (34)$$

gdje je  $\tau_N$  moment za promatranje regulatora,  $\tilde{\psi} = \psi - \psi_d$  je naslovna pogreška i  $K_p (> 0)$  je konstanta proporcionalnog pojačanja,  $T_d (> 0)$  je vremenska konstanta derivacijskog člana, a  $T_i (> 0)$  je vremenska konstanta člana integracije što vodi do jednadžbi 35, 36 te 37:

$$\tilde{r} = r - r_d \quad (35)$$

$$K_d = K_p T_d \quad (36)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i} \quad (37)$$

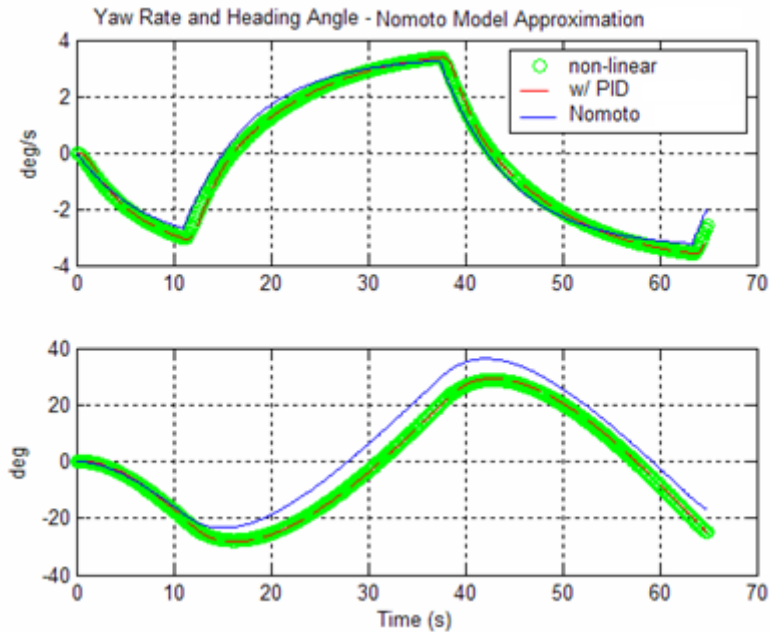
$$K_p = 41.7422$$

$$K_d = 77.6189$$

$$K_i = 0.0587$$

Slika 14 prikazuje rezultate simulacije 20 - 20 zig-zag manevara korištenjem nelinearnog matematičkog modela koji je dodan uz aproksimaciju modela prvog reda i modela prvog reda s PID regulatorom. Može se vidjeti da model prvog reda zadovoljavajuće odgovara nelinearnom modelu bez regulatora, a da u slučaju uključivanja regulatora simulacija daje gotovo jednake rezultate.





**Slika 14: Stupanj preokretanja i simulacija kuta kutova u manevriranju od 20 do 20 ciklusa pomoću nelinearnog modela i Nomotovog modela prvog reda (sa i bez PID regulatora) [5]**

Koristeći programski paket MATLAB pokazan je odziv broda u „step“ funkciji u otvorenoj i zatvorenoj petlji, za promjenu kursa zajedno sa zig-zag manevrom te s PID regulatorima. Definirano je vrijeme, ulazni signal, parametri zig-zag manevra, parametri broda, konstante te prijenosna funkcija. U programskom kodu se mogu vidjeti svi priloženi parametri:

```
clear all;
format long;

%definiranje varijabli vremena i ulaznog signala
N=16384;
tp=0;
tk=600;
t=linspace(tp,tk,N);
```

```

kk=find(t<=20);
k1=max(kk);
kurs_broda(1:N)=1;
kurs_broda(1:k1)=0;
zig_zag(1:N)=0;
pp1=find(t<=50);
p1=max(pp1);
pp2=find(t<=150);
p2=max(pp2);
pp3=find(t<=250);
p3=max(pp3);
pp4=find(t<=400);
p4=max(pp4);
pp5=find(t<=500);
p5=max(pp5);
zig_zag(p1:p2)=1;
zig_zag(p2+1:p3)=2;
zig_zag(p3+1:p4)=0;
zig_zag(p4+1:p5)=-1;
zig_zag(p5+1:N)=1;

```

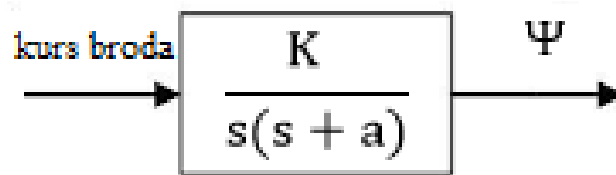
%definiranje parametara broda, konstante i prijenosna funkcija

```

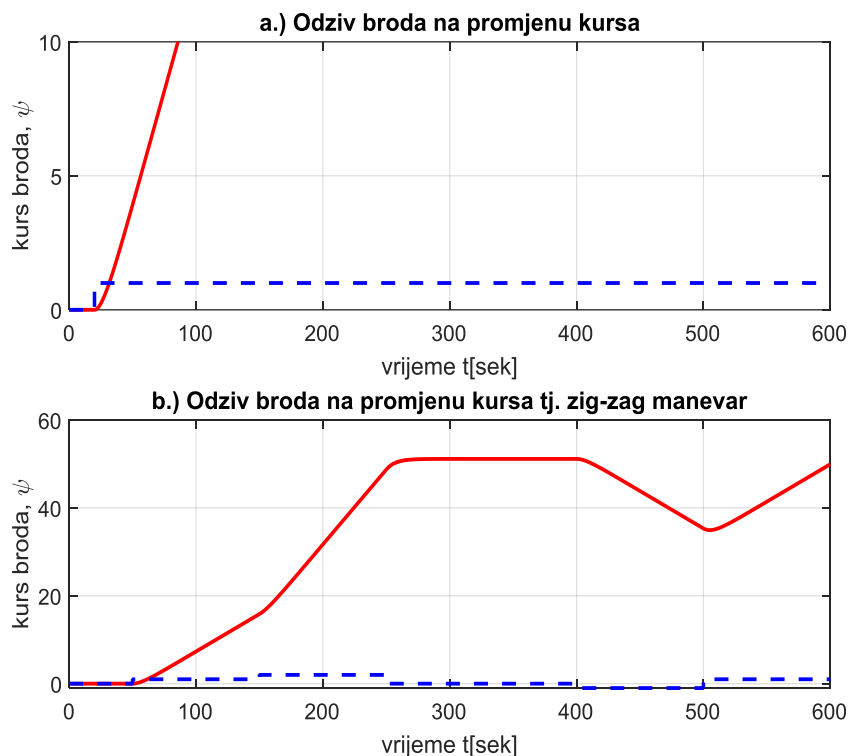
K=0.1705;
T=7.1167;
Ko=K/T;
a=1/T;
pojacanje=[Ko];
nule=[];
polovi=[0,-a];
osaka=zpk(nule, polovi, pojacanje);

```

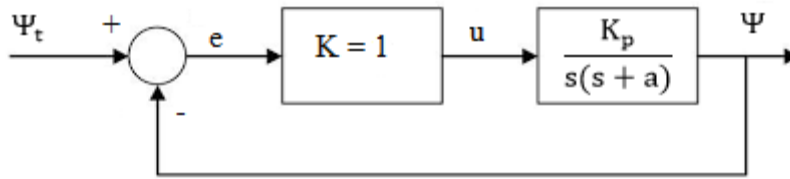
Rezultati dobiveni kod odziva broda na promjeni kursa zajedno sa zig-zag manevrom, jasno se vide na slici 16. gdje je pokazano da brod u prvih 20 sekunda nije mijenjao svoj zadani kurs potom, nakon mijenjanja kursa brod zbog integracijskog djelovanja u otvorenoj petlji nikad ne dolazi u zadani kurs. Također kod zig-zag manevra podešeni su vremenski parametri od 0 do 50 sekundi, 50 do 150 sekundi, 150 do 250 sekundi, 250 do 400 sekundi, 400 do 500 sekundi, 500 do 600 sekundi gdje se jasno vide promjene kursa kod integracijskog djelovanja te brod nikad neće doći u zadani kurs. Na slici 15 je vidljiva shema dijagrama odziva broda na promjenu kursa.



**Slika 15. Shema dijagrama odziva broda na promjenu kursa broda u otvorenoj petlji [izradio autor]**



**Slika 16. Odziv broda na promjenu kursa broda i zig-zag manevra [izradio autor]**



Slika 17. Shema dijagrama odziva broda na promjenu kursa u zig-zag manevru [izradio autor]

Kod za odziv broda na „step“ funkciju u zatvorenoj petlji:

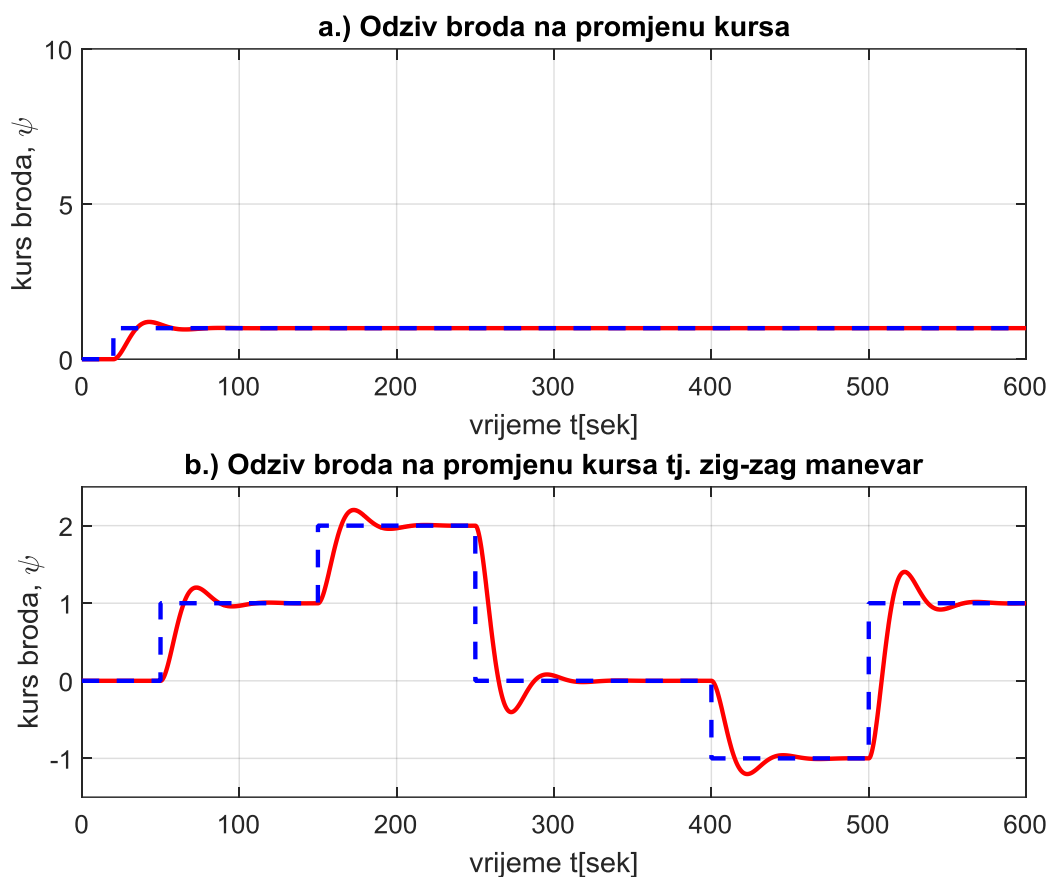
%odziv broda na step funkciju tj. na promjenu kursa broda

```

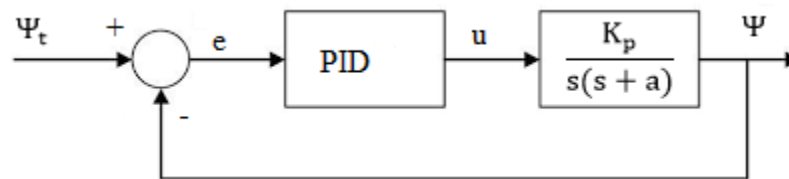
kurs_broda_trenutni=lsim(osaka,kurs_broda,t);
zig_zag_y=lsim(osaka,zig_zag,t);
subplot(2,1,1),plot(t, kurs_broda_trenutni, 'r', t, kurs_broda, '--b', 'LineWidth', 1.5);
axis([tp,tk,0, 10]);
xlabel('vrijeme t[sek]');
ylabel('kurs broda, \psi');
title('a.) Odziv broda na promjenu kursa');
grid on;
zoom on;
subplot(2,1,2),plot(t, zig_zag_y, 'r', t, zig_zag, '--b', 'LineWidth', 1.5);
axis([tp,tk,-1.5, 2.5]);
xlabel('vrijeme t[sek]');
ylabel('kurs broda, \psi');
title('b.) Odziv broda na promjenu kursa tj. zig-zag manevar');
grid on;
zoom on;

```

Promjenu kursa broda u jediničnoj zatvorenoj petlji s povratnom vezom objašnjava slika 18 tj. na navedenoj slici je prikazano ponašanje integracijskog djelovanja s zatvorenom petljom. Na slici je vidljivo da je integracijsko djelovanje s zatvorenom petljom različito od integracijskog djelovanja s otvorenom petljom kao što je pokazano na slici 16. Na već spomenutoj slici 18 je dokazana činjenica da brod nakon promjene kursa se kreće put zadanog kursa te naposljetku dolazi u kurs ali tek nakon određenog vremenskog perioda poradi tromosti broda. Vremenski periodi se najbolje mogu iskazati kod zig-zag manevra nakon učestalog mijenjanja kursa u određenom vremenskom periodu. Zbog integracijskog djelovanja brod dolazi u zadani kurs s određenim prebačajem te brod i dalje ostaje u zadanom kursu sve do slijedeće promjene.



**Slika 18. Odziv broda na promjenu kursa broda u jediničnoj petlji [izradio autor]**



**Slika 19. Shema dijagrama odziva broda na promjenu kursa u zatvorenoj petlji [izradio autor]**

Kod za odziv broda na promjenu kursa u zatvorenoj petlji:

%odziv broda na promjenu kursa u zatvorenoj petlji

```
Ke=tf([1],[1]);
```

```
Kp=tf([1],[1]);
```

```
sysQ=append(Ke,Kp,osaka);
```

```
q=[1,-3,0;2,1,0;3,0,2];
```

```
ulaziq=[1];
```

```
izlaziq=[3];
```

```
povratna_veza_osaka=connect(sysQ,q,ulaziq,izlaziq);
```

```
kurs_broda_trenutni=lsim(povratna_veza_osaka,kurs_broda,t);
```

```
zig_zag_y=lsim(povratna_veza_osaka,zig_zag,t);
```

```
subplot(2,1,1),plot(t, kurs_broda_trenutni, 'r', t, kurs_broda, '--b', 'LineWidth', 1.5);
```

```
axis([tp,tk,0, 10]);
```

```
xlabel('vrijeme t[sek]');
```

```
ylabel('kurs broda, \psi');
```

```
title('a.) Odziv broda na promjenu kursa');
```

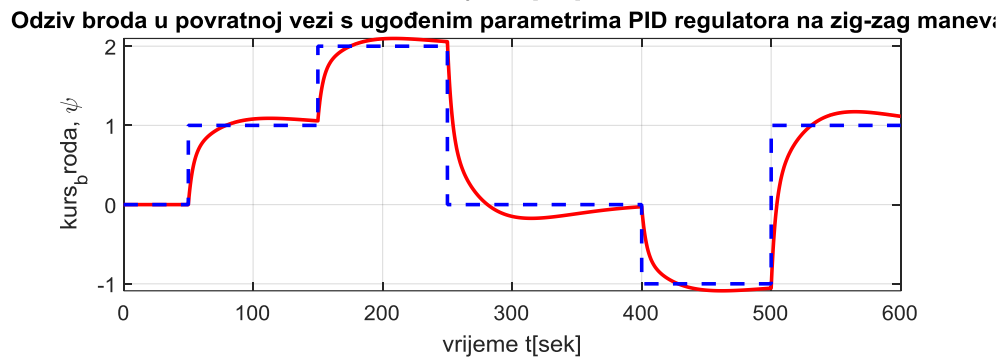
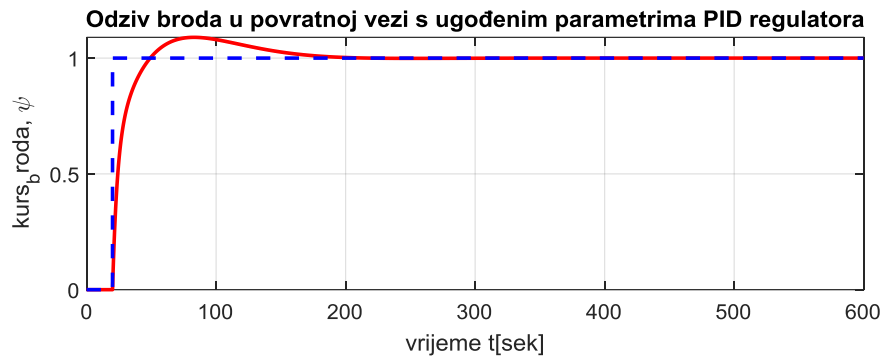
```
grid on;
```

```
zoom on;
```

```
subplot(2,1,2),plot(t, zig_zag_y, 'r', t, zig_zag, '--b', 'LineWidth', 1.5);
```

```
axis([tp,tk,-1.5, 2.5]);  
xlabel('vrijeme t[sek]');  
ylabel('kurs broda, \psi');  
title('b.) Odziv broda na promjenu kursa tj. zig-zag manevar');  
grid on;  
zoom on;
```

Odziv broda u povratnoj vezi s namještenim parametrima PID regulatora prikazan je na slici 17 kod kojeg je prebačaj namjerno namješten da bude manji od 10% zbog tromosti broda te je dokazano da brod nakon prvog prebačaja nema više grešaka, ali zbog tromosti samoga broda potrebno je otprilike 200 sekundi da brod bude na zadanom kursu. Također je pokazano da je u zig-zag manevaru na zadanim vremenskim periodima od 0 do 50 sekundi, 50 do 150 sekundi, 150 do 250 sekundi, 250 do 400 sekundi, 400 do 500 sekundi, 500 do 600 sekundi namjerno postavljena razina ispod potrebnih 200 sekundi da se pokaže prebačaj i tromost broda te brod nikad ne dođe u željeni kurs na zadanim parametrima u zig-zag manevaru. Dodatnim testiranjem utvrđeno je da povećavanjem parametra  $K_p$ , brod u zanemarivom vremenu i bez grešaka dolazi u zadani kurs, ali tada je u pitanju nerealna simulacija broda.



**Slika 20. Odziv broda u povratnoj vezi s ugođenim parametrima PID regulatora [izradió autor]**

Kod za promjenu kursa broda uz namještene PID regulatore:

%simulacija odzivaq broda na promjenu kursa i zig-zag manevar uz namjestene

%parametre PID regulatora

Kp=0.65;

Ti=54.765;

Td=12.56;

z0=Kp;

z1=Kp\*Ti;

z2=Kp\*Ti\*Td;

Ke=tf([1],[1]);

PID=tf([z2,z1,z0],[Ti 0]);

sysQ=append(Ke,PID,osaka);

q=[1,-3,0;2,1,0;3,0,2];

ulaziq=[1];



```

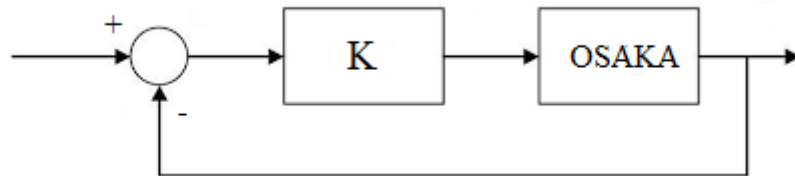
izlaziq=[3];
pid_osaka=connect(sysQ,q,ulaziq,izlaziq);

pid_signal=lsim(pid_osaka,kurs_broda,t);
pid_zig_zag_y=lsim(pid_osaka,zig_zag,t);
subplot(2,1,1),plot(t,pid_signal, 'r', t,kurs_broda, '--b','LineWidth', 1.5)
xlabel('vrijeme t[sek]');
ylabel('kurs_broda, \psi');
title('Odziv broda u povratnoj vezi s ugođenim parametrima PID regulatora');
grid on;
zoom on;

subplot(2,1,2),plot(t,pid_zig_zag_y, 'r', t,zig_zag, '--b','LineWidth', 1.5)
xlabel('vrijeme t[sek]');
ylabel('kurs_broda, \psi');
title('Odziv broda u povratnoj vezi s ugođenim parametrima PID regulatora na zig-zag
manevar');
grid on;
zoom on;

```

Potrebno je ugađanje PID regulatora za simulacije broda. Prikazano je na slici 18. postupak mijenjanja  $K$  parametra, koji je u početku bio postavljen na  $K = 1$ , potom je postupno smanjena vrijednost zadanog  $K$  dok se vrijednost  $K$  nije spustio na  $K = 0,65$ , uz pomoć kojega se dobio odziv s jednim prebačajem.



Slika 21 Blok dijagram  $K$  parametra i „Esso Osaka“ broda [izradio autor]

Uz pomoć očitanih parametara  $T_1$  i  $T_2$  dolazi se do  $\Delta T$  preko jednadžbe 38:

$$\Delta T = T_2 - T_1 \quad (38)$$

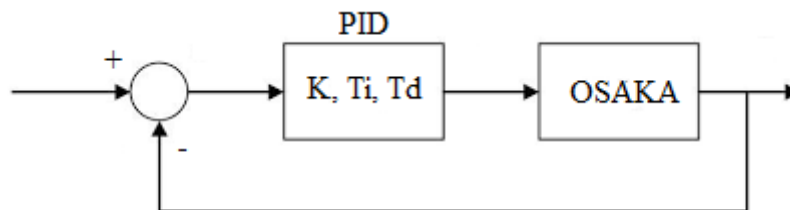
Nakon dobivanja  $\Delta T$  potrebno je pronaći parametar  $T_i$  preko jednadžbe 39:

$$T_i = 1,5 \cdot \Delta T \quad (39)$$

Zatim je potrebno odrediti  $T_d$  koji je u početku iznosio  $T_d = 0$ , te nakon određivanja parametara  $\Delta T$ ,  $T_i$  možemo izračunati parametar  $T_d$  preko jednadžbe 40:

$$T_d \approx \frac{T_i}{5} \quad (40)$$

Dobiven je PID regulator sa „step“ funkcijom i zig-zag funkcijom na slici 19.



**Slika 22. Blok dijagram PID regulatora i „Esso Osaka“ broda [izradio autor]**

U programskom jeziku MATLAB, iz priloženog koda u kojem se PID regulator podešavao na način da se u dijelu koda `PID=tf([1],[1]);` numerator smanjivao postupno sve do vrijednosti 0.65 (`PID=tf([0.65],[1]);`), odnosno vrijednosti parametra  $K$ , željeno se postiglo da prebačaj sa slike 17 bude ispod 10% zbog tromosti broda.

Kod za namještanje PID regulatora:

```
clear all;
format long;

%definiranje varijabli vremena i ulaznog signala
N=16384;
tp=0;
tk=200;
t=linspace(tp,tk,N);
kurs_broda(1:N)=1;

%definiranje parametara broda, konstante i prijenosna funkcija
K=0.1705;
T=7.1167;
Ko=K/T;
a=1/T;
pojacanje=[Ko];
nule=[];
polovi=[0,-a];
osaka=zpk(nule, polovi, pojacanje);
%ugađanje parametara regulatora
Ke=tf([1],[1]);
PID=tf([1],[1]);
sysQ=append(Ke,PID,osaka);
q=[1,-3,0;2,1,0;3,0,2];
ulaziq=[1];
izlaziq=[3];
sys_osaka=connect(sysQ,q,ulaziq,izlaziq);
```

```
pid_signal=lsim(sys_osaka,kurs_broda,t);

plot(t,pid_signal, 'r', t,kurs_broda, '--b','LineWidth', 1.5)
%axis([tp,tk,0, 1.2]);
xlabel('vrijeme t[sek]');
ylabel('kurs_broda, \psi');
grid on;
zoom on;
```

## ZAKLJUČAK

Zahtjev za primjenu sofisticiranijih autopilota za upravljanje brodom uglavnom je rezultat želje za uštedom goriva i poboljšanjima performansi. Budući da su jednadžbe kretanja broda vrlo nelinearne, a parametri modela ovise o brzini kretanja i vremenskim uvjetima, treba uzeti u obzir teoriju nelinearne kontrole. Fleksibilnost tih kontrola dopušta namještanje autopilota kako za održavanje tečajeva tako i za mijenjanje tečaja, umjesto da se vrijeme utroši na projektiranje dva nezavisna autopilota za obavljanje tih zadataka.

U završnom radu izvršeno je ispitivanje u programskom paketu MATLAB na temu ugađanja PID regulatora kod kursa broda koristeći Nomotov model realnog broda prvog reda. Prilikom istraživanja prikazan je odziv broda za promjenu kursa zajedno sa zig-zag manevrom, u „step“ funkciji u zatvorenoj petlji, te s PID regulatorima.

Uz pomoć rezultata koji su dobiveni kod odziva broda na promjeni kursa zajedno sa zig-zag manevrom, pokazano je da brod nikad ne dolazi u zadani kurs.

Kod odziva broda na promjenu kursa u jediničnoj zatvorenoj petlji s povratnom vezom pokazano je da brod nakon promjene kursa dolazi u zadani kurs ali tek nakon određenog vremenskog perioda poradi tromosti broda.

Kod odziva broda u povratnoj vezi s namještenim parametrima PID regulatora je pokazano da brod nakon prvog prebačaja nema pogreške ustaljenog stanja, ali zbog tromosti samoga broda potrebno je otprilike 200 sekundi da brod bude na zadanom kursu.

Dodatnim testiranjem utvrđeno je da povećavanjem parametra  $K_p$ , brod u zanemarivom vremenu i bez pogreške u ustaljenom stanju dolazi u zadani kurs, ali tada je u pitanju nerealna simulacija broda. Potrebno je ugađanje PID regulatora za realnu simulaciju broda.

## LITERATURA

- [1] Abkowitz, M.A. (1980), "Measurement of Hydrodynamic Characteristics from Ship Maneuvering Trials by System Identification", *SNAME Transactions*, Vol.88, pp.283- 318.
- [2] Artyszuk, J., „A study on the identification of the second-order linear Nomoto model from the zigzag test, *Scientifi Journals of the Maritime University of Szczecin* 53, 2018.
- [3] Benković F., Piškorec M., Lako Lj., Čepelak K., Stajić D.,:Terestrička i elektronska navigacija, Hidrografski institut ratne mornarice. Split, 1986.
- [4] Fossen,T.I.,: Nonlinear Modelling and Control of Underwater Vehicles. Dr.ing thesis, Division of Enginnering Cybernetics, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, June 1991.
- [5] Fossen, T.I., Paulsen, M.J., : Adaptive Feedback Linearization Applied to Steering of Ships, Division of Enginnering Cybernetics, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, September 1992
- [6] Koyama T.,:A proposal of a method to specify the permissible region of instability in the sterring characteristic of ships. *International Shipbuilding Progress*, vol. 19, April, 72
- [7] Koyama T.,:Improvement of course stability by the subsidiary automatic control. *International Shipbuilding Progress*, vol. 19, April, 72
- [8] Nomoto, K., Taguchi, K., Honda, K. and Hirano, S., „On the Steering Quality of Ships,“ *International Shipbuilding Progress*, Vol. 4 pp.354-370, 1957.
- [9] T. Ersal, H.K. Fathy, D.G. Rideout, L.S. Louca, J.L. Stein, A review of proper modeling techniques, *Trans. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 130, 2008.
- [10] Tzeng, C. Y.; Chen J. F.: FUNDAMENTAL PROPERTIES OF LINEAR SHIP STEERING DYNAMIC MODELS, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 7, No. 2, pp. 79-88 (1999)

[11]<http://repository.tudelft.nl/assets/uuid:2edf96d7ed7f40a5a92772ff62dea72e/JACOB%20VAN%20AMERONGEN.pdf>

[12] <https://www.scribd.com/doc/166647318/osnovni-pojmovi-automatizacije-doc>

[13][http://titan.fsb.hr/~jpetric/Udzbenici/Udzbenik\\_AUTOMATSKA%20REGULACIJA\\_JPetric.pdf](http://titan.fsb.hr/~jpetric/Udzbenici/Udzbenik_AUTOMATSKA%20REGULACIJA_JPetric.pdf)

[14][http://rgn.hr/~lfrgic/nids\\_lfrgic/PDF\\_Print\\_Opca%20mehanika\\_Rudar/PDF\\_R/13\\_R\\_2d\\_D\\_Alambert\\_Zakoni\\_Oscilacije.pdf](http://rgn.hr/~lfrgic/nids_lfrgic/PDF_Print_Opca%20mehanika_Rudar/PDF_R/13_R_2d_D_Alambert_Zakoni_Oscilacije.pdf)

[15] <http://www.unidu.hr/datoteke/majelic/ABP-18.pdf>

[16] [www.pfst.unist.hr/~ivujovic/stare\\_stranice/ppt/bee\\_ptjm\\_pm5.ppt](http://www.pfst.unist.hr/~ivujovic/stare_stranice/ppt/bee_ptjm_pm5.ppt)

## POPIS SLIKA

Slika 1. Kratki pregled modela sa jednim ulazom i izlazom.....	5
Slika 2. Nyquistova kontura.....	9
Slika 3. Nestabilan brod preko Nyquistovog dijagrama.....	10
Slika 4. Stabilan brod preko Nyquistovog dijagrama.....	11
Slika 5. Grafički simboli P regulatora.....	14
Slika 6. Grafički simboli I regulatora.....	14
Slika 7. Grafički simboli PI regulatora.....	15
Slika 8. Grafički simboli PD regulatora.....	16
Slika 9. Grafički simboli PID regulatora.....	16
Slika 10. Usporedni prikaz prijelaznih karakteristika tipičnog procesa pri regulaciji različitim regulatorima.....	17
Slika 11. Koordinatni sustav za bočno kretanje, kut zakretanja i ljuljanje.....	24
Slika 12. Shema broda koji se giba po zadanom kursu.....	27
Slika 13. Naredba ulaza za brzinu vrtnje i brzinu vrtnje prema odgovarajućim izlazima referentnih modela.....	34
Slika 14. Stupanj preokretanja i simulacija kuta kutova u manevriranju od 20 do 20 ciklusa pomoću nelinearnog modela i Nomotovog modela prvog reda (sa i bez PID regulatora).....	36
Slika 15. Shema dijagrama odziva broda na promjenu kursa u otvorenoj petlji.....	38
Slika 16. Odziv broda na promjenu kursa broda i zig-zag manevra.....	38



Slika 17. Shema dijagrama odziva broda na promjenu kursa u zig-zag manevru.....	39
Slika 18. Odziv broda na promjenu kursa broda na jediničnu petlju.....	40
Slika 19. Shema dijagrama odziva broda na promjenu kursa u zatvorenoj petlji..	41
Slika 20. Odziv broda u povratnoj vezi s ugođenim parametrima PID regulatora.....	43
Slika 21. Blok dijagram K parametra i „Esso Osaka“ broda.....	44
Slika 22. Blok dijagram PID regulatora i „Esso Osaka“ broda.....	45

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Primjenjivost pojedinih modela sa jednim ulazom i jednim izlazom.....	6
Tablica 2. Uvjeti stabilnosti broda.....	12
Tablica 3. Namještanje vrijednosti kontrolnih parametara prema Ziegler i Nichols metodi...19	
Tablica 4. Pojedivosti Eso Osaka modela.....	29
Tablica 5. Eso Osaka ne dimenzionalni hidrodinamički koeficijenti.....	31

## **POPIS KRATICA**

PID proporcionalno-integralno-derivacijski