

# Automatizacija slatke vode na brodu

---

**Tomac, Juraj**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:187:900161>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-04**



**Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet**  
University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Maritime Studies - FMSRI Repository](#)



**uniri** DIGITALNA  
KNJIŽNICA



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**JURAJ TOMAC**

**AUTOMATIZACIJA SLATKE VODE NA BRODU**

**ZAVRŠNI RAD**

Rijeka, 2023.



**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
POMORSKI FAKULTET**

**AUTOMATIZACIJA SLATKE VODE NA BRODU  
FRESH WATER AUTOMATIZATION ON SHIP**

**ZAVRŠNI RAD**

Kolegij: Automatizacija brodskog pogona

Mentor: prof. dr. sc. Vinko Tomas

Komentor: dr. sc. Mile Perić

Student: Juraj Tomac

Studijski smjer: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112082869

Rijeka, lipanj 2023.



Student: Juraj Tomac

Studijski program: Brodostrojarstvo

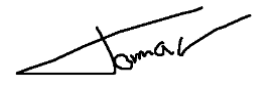
JMBAG: 0112082869

## IZJAVA O SAMOSTALNOJ IZRADI ZAVRŠNOG RADA

Kojom izjavljujem da sam završni rad s naslovom "*Automatizacija slatke vode na brodu*" izradio samostalno pod mentorstvom *prof. dr. sc. Vinka Tomasa* te komentorstvom *dr. sc. Mile Perića*.

U radu sam primijenio metodologiju izrade stručnog/znanstvenog rada i koristio literaturu koja je navedena na kraju završnog rada. Tuđe spoznaje, stavove, zaključke, teorije i zakonitosti koje sam izravno ili parafrazirajući naveo u završnom radu na uobičajen, standardan način citirao sam i povezo s fusnotama i korištenim bibliografskim jedinicama, te nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Rad je pisan u duhu hrvatskoga jezika.

Student

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Tomac', is written over a horizontal line.

Juraj Tomac



Student: Juraj Tomac

Studijski program: Brodostrojarstvo

JMBAG: 0112082869

IZJAVA STUDENTA – AUTORA  
O JAVNOJ OBJAVI OBRANJENOG ZAVRŠNOG RADA

Izjavljujem da kao student – autor završnog rada dozvoljavam Pomorskom fakultetu Sveučilišta u Rijeci da ga trajno javno objavi i besplatno učini dostupnim javnosti u cjelovitom tekstu u mrežnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta.

U svrhu podržavanja otvorenog pristupa završnim radovima trajno objavljenim u javno dostupnom digitalnom repozitoriju Pomorskog fakulteta, ovom izjavom dajem neisključivo imovinsko pravo iskorištavanja bez sadržajnog, vremenskog i prostornog ograničenja mog završnog rada kao autorskog djela pod uvjetima *Creative Commons* licencije CC BY Imenovanje, prema opisu dostupnom na <http://creativecommons.org/licenses/>

Student – autor



---

(potpis)



## **SAŽETAK**

Rad daje kratak opis vode koja se koristi na brodu tretman, analizu, provjeru, čišćenje i nadopunjavanje sustava slatke vode. Isto tako pozornost rada je usmjerena prema regulatoru koji ima tri djelovanja (proporcionalno, integracijsko i derivacijsko) te se dijeli na šest tipova regulatora (P, I, D, PI, PD, PID). Nadalje, u drugom dijelu rada prikazan je učinak pojedinih tipova regulatora na sustavu rashladne slatke vode simulatora proizvođača Kongsberg. Zadnji dio opisuje pravilno podešavanje regulatora i najčešće kvarove na istom.

Ključne riječi: automatizacija, regulator, PID regulator, slatka voda

## **SUMMARY**

The paper gives a brief description of the fresh water used on ships: treatment, analysis, verification, cleaning and replenishment of the fresh water system. The next part of the paper is directed towards the regulator which has three actions (proportional, integration and derivation) and is divided into six types of regulators (P, I, D, PI, PD, PID). Furthermore, in the second part of the paper, the effect of certain types of regulators on the fresh water cooling system on the Kongsberg simulator is presented. The final part describes the correct adjustment of the regulator and the most common malfunctions.

Keywords: automatization, regulator, PID regulator, fresh water

# SADRŽAJ

<b>SAŽETAK .....</b>	<b>II</b>
<b>SUMMARY .....</b>	<b>II</b>
<b>SADRŽAJ .....</b>	<b>III</b>
<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. SLATKA VODA NA BRODU .....</b>	<b>2</b>
2.1. Tretman slatke vode za hlađenje glavnog motora.....	3
2.2. Provjera rashladne vode i sustava .....	4
2.3. Čišćenje sustava rashladne vode .....	4
2.4. Nadopunjavanje sustava rashladnom vodom.....	5
<b>3. SUSTAV SLATKE VODE NA SIMULATORU MC 90 .....</b>	<b>6</b>
3.1. Postupak rada .....	8
3.1.1. Predgrijavanje.....	8
3.1.2. Voda za hlađenje košuljice.....	8
3.1.3. Postupak isključivanja.....	9
<b>4. PROIZVODNJA SLATKE VODE NA BRODU .....</b>	<b>10</b>
<b>5. PID REGULATOR.....</b>	<b>12</b>
5.1. Teorija pid regulatora.....	13
5.2. Proporcionalno djelovanje .....	15
5.3. Integralno djelovanje .....	16
5.4. Derivacijsko djelovanje .....	16
5.5. Usporedba karakteristika .....	18
5.6. Pregled metoda.....	19
5.7. Ziegler-nichols metoda .....	19
<b>6. KONTROLNI SUSTAV NA SIMULATORU MC 90V .....</b>	<b>21</b>
6.1. PID REGULATOR NA SIMULATORU .....	21
6.2. PODEŠAVANJE REGULATORA .....	22
<b>7. PID REGULATOR U SUSTAVU SLATKE VODE SIMULATORA     MC-90V .....</b>	<b>23</b>
7.1. Detalji pid regulatora .....	23

7.2. Proporcionalni regulator .....	25
7.3. Integralni regulator.....	26
7.4. PI regulator.....	27
7.5. PD regulator .....	28
7.6. PID regulator.....	29
<b>8. PODEŠAVANJE PID REGULATORA NA SIMULATORU MC-9032</b>	
<b>9. KVAROVI NA PID REGULATORU.....</b>	<b>37</b>
9.1. Prljav senzor temperature .....	37
9.2. Kvar aktuatora.....	39
<b>10. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>40</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>42</b>
<b>POPIS SLIKA .....</b>	<b>42</b>
<b>POPIS TABLICA .....</b>	<b>43</b>

## 1. UVOD

Slatka voda je jedan od najbitnijih medija na brodu. Bez slatke vode brod ne može funkcionirati. Razlozi ovih tvrdnji su jednostavni, u nedostatku slatke vode nemamo hlađenja glavnog motora, a time ostajemo bez pogona. Ukoliko brod za propulziju koristi parno-turbinski pogon situacija je ista bez slatke vode ne možemo proizvoditi vodenu paru u brodskom generatoru pare koja nam je potrebna za pogon turbine. Osim rashladne funkcije kod glavnog motora i proizvodnje pare slatka voda ima i druge bitne uloge. Koristi se za rashladne funkcije kod velikog broja brodskih uređaja i sustava: kod kompresora, ulja za glavni motor, ulja statvene cijevi, turbo puhala i mnogih drugih opisanih dalje u radu. Tehnološka voda se koristi i za pranje te kao protupožarno sredstvo kod gašenja nekih požara.

U ovom radu ću obraditi automatizaciju slatke vode na brodu. Rad se bazira na rashladnoj vodi koja se koristi za hlađenje glavnog motora i ostalih uređaja bitnih za dnevne operacije broda. Najveći dio rada svodi se na upravljanje PID regulatorima. Za početak osnovne informacije o PID regulatoru. Testirati će se podešavanja PID regulacije te mogućnosti upotrebe drugih regulatora za sustav slatke vode poput P, I, PI, PD regulatora. Isto tako obradit će se kvarovi kod PID regulatora. Možda i najbitnija stavka je podešavanje PID regulatora jer bez ispravnog podešavanja nema odgovarajuće automatizacije.

Sva mjerenja rađena su na simulatoru norveškog proizvođača Konsberg MC-90. Na njemu se simuliraju operacije na teretnom brodu za prijevoz sirove nafte. Glavni motor na brodu je 2-taktni sporohodni motor proizvođača MAN B&W.

## **2. SLATKA VODA NA BRODU**

Osim tehnološke uloge slatke vode ona se koristi i za potrebe posade. Takva voda se koristi za piće ili za potrebe pranja te prema propisima SOLAS-a mora biti dodatno pročišćena radi odstranjivanja raznih bakterija te mirisa. Voda koja služi za pranje i piće može biti spremna u istim tankovima ako se udovoljavaju uvjeti kao na kopnu za pitku vodu. Takav tank za skladištenje se naziva hidrofor.

Voda se na brodovima koristi u velikim količinama, a kapaciteti tankova za skladištenje slatke vode su ograničeni, uobičajeno traju do nekoliko dana. Iz tog razloga jedan od najvažnijih uređaja na brodu je onaj za proizvodnju slatke vode. Postoji više mogućih načina za proizvodnju slatke vode na brodu najčešće je to izvedeno preko broskog generatora slatke vode. Isparavanjem morske vode te kondenzacijom s toplom vodom iz glavnog motora u vakuumu, dalje u radu će proces biti detaljnije objašnjen. Osim broskog generatora slatke vode ona se dobiva i procesom obrnute osmoze.

Za potrebe ovog rada fokusirati ćemo se na slatkoj vodi za rashlađivanje glavnog motora. Voda za hlađenje motora mora biti destilirana uz odgovarajuću obradu, koja je potrebna za održavanje efektivnog hlađenja i suzbijanje korozije sustava. Iako destilirana voda najbolje odgovara normama za rashladnu vodu potreba je za dodavanjem inhibitora korozije. Iz razloga jer neobrađena destilirana voda apsorbira ugljični dioksid iz zraka te postaje korozivna.

Slatka voda u kojoj postoji mala količina morske vode nije dopuštena za korištenje kao rashladni medij glavnog motora jer i najmanja količina morske vode može dovesti do korozije u sustavu.

Kišnica je jako kontaminirana i vrlo korozivna, ona se ne preporuča za hlađenje motora. Voda koja se koristi za piće se ne preporučuje kao voda za hlađenje zbog opasnosti od stvaranja naslaga krede u rashladnom sustavu. Ukoliko destilirana voda iz generatora slatke vode nije dostupna voda za piće se može koristiti kao voda za hlađenje, ali se mora omekšati te tretirati drugim sredstvima ovisno o sastavu vode.

Vodu za hlađenje prije dodavanja inhibitora korozije treba provjeriti i tretirati kako bi zadovoljila slijedeće uvijete:

pH	7 do 10
ukupna tvrdoća kao CaCO <sub>3</sub>	max. 75 ppm(mg/l)
klorid	max. 50 ppm(mg/l)
sumpor	max. 100 ppm(mg/l)
silikat	max. 150 ppm(mg/l)
ostaci nakon isparavanja	max. 400 ppm(mg/l)

Tablica 1. Kvaliteta vode [1]

## 2.1. Tretman slatke vode za hlađenje glavnog motora

Rashladnu vodu treba pravilno testirati i dodati inhibitor korozije. Preporuke su da analizu i obradu slatke vode vrši stručna osoba, potrebo je pridržavati se postupaka obrade strogo prema uputstvima proizvođača.

Primjeri preporuka proizvođača:

Manufacturer	Brand Name	Constituent	Delivery Form	Min. Dosage
Chevron (FAMM)	Havoline XLI	Carboxylates	Liquid	50 liter / 1,000 liter
Drew Ameriod Marine Boonton	DEWT-NC	Nitrite	Powder	3.2 kg / 1,000 liter
	LIQUIDEWT		Liquid	8 liter / 1,000 liter
	MAXIGARD		Liquid	16 liter / 1,000 liter
VECOM	CWT DIESEL QC2	Nitrite	Liquid	12 liter / 1,000 liter
UNITOR CHEMICALS	DISEL GUARD NB	Nitrite	Powder	3 kg / 1,000 liter
Nal fleet Marine Chemical	9-108	Nitrite, Borate	Liquid	2.25 liter / 1,000 liter
	9-131C	Nitrite, Polymer	Liquid	8 liter / 1,000 liter

Tablica 2. Inhibitori koji se dodaju u vodu [1]

Uljni inhinitori se izbjegavaju u rashladnim sustavima jer postoji opasnost od prljanjanja na rashladnu površinu. Preporučuju se inhibitori na bazi nitrirborata. Ne smiju se miješati inhibitori različitih svojstava. Kad se inhibitori dodaju u slatku vodu

potrebno je provoditi dodatne mjere opreza, ponajprije se misli na zaštitu čovjeka zbog otrovnosti i opasnosti inhibitora.

## **2.2. Provjera rashladne vode i sustava**

Svojstva rashladne vode mogu se promijeniti tijekom rada zbog onečišćenja ili isparavanja. Stoga, rashladnu vodu i sustav treba povremeno provjeravati, po mogućnosti jednom tjedno, a često se testiranja slatke vode vrše svaka tri dana. Ova ispitivanja mogu se provesti pomoću testnih kompleta proizvođača inhibitora s uzorkom vode iz cirkulacijskog sustava. Međutim, preporučuje se i laboratorijsko testiranje uzorka vode od strane stručnjaka redovito najmanje svaka tri mjeseca.

Sve rezultate provjere treba zabilježiti i čuvati za procjenu trenda, što pridonosi pouzdanom radu motora s pravilnom obradom rashladne vode.

Ako rezultati ispitivanja pokažu da se sadržaj rashladne vode mijenja naglo ili postupno, potrebno je provjeriti sustav rashladne vode kako bi se otkrio uzrok. Ukoliko je došlo do rasta sadržaja klorida to može ukazivati na prodor morske vode u sustav, ako je to razlog potrebno je provjeriti sustav morske vode. Najčešće dolazi do prodora morske u slatku vodu kod rashladnika slatke vode. Ukoliko se pH vrijednost smanjuje ili povećava vrijednost sumpora potrebno je provjeriti je li rashladna voda kontaminirana ispušnim plinovima. Potrebno je provjeriti glavu motora hidrauličkim ispitivanjem tlaka. Ukoliko je kvaliteta voda prešla preko granica kontrole prema preporukama proizvođača potrebno je isprazniti cijeli sustav te napuniti ga novom tretiranom vodom.

## **2.3. Čišćenje sustava rashladne vode**

Ako se u sustavu vode za hlađenje otkriju bilo kakve abnormalne naslage ili hrđa, sustav treba temeljito očistiti, a zatim vodu za hlađenje također treba u potpunosti napuniti novom tretiranom vodom.

Čišćenje rashladnog sustava uključuje postupke odmašćivanja i uklanjanja kamenca za koje su potrebne posebne kemikalije. Budući da kemikalije mogu biti opasne, preporučuje se da čišćenje sustava rashladne vode izvrši pouzdana specijalizirana tvrtka. Inače to treba učiniti strogo u skladu s uputama dobavljača kemikalija za čišćenje.

#### **2.4. Nadopunjavanje sustava rashladnom vodom**

Neposredno nakon procesa čišćenja rashladnog sustava, sustav temeljito isperite vodom dok pH vrijednost ne bude oko 7, a zatim ispustite vodu. Napunite sustav destiliranom vodom do označene razine vode u ekspanzijskom spremniku, malo iznad razine alarma, kako biste imali rezervu za obradu.

Pripremite otopinu inhibitora prema uputama proizvođača i dodajte otopinu u ekspanzijsku posudu. Pustite motor da radi taloženje prema preporuci proizvođača inhibitora ili najmanje 24 sata, a zatim provjerite kvalitetu vode za potvrdu.

Ako se količina vode za hlađenje smanji zbog isparavanja ili curenja ili drenaže radi održavanja, razinu vode u spremniku treba održavati dodavanjem vode. Voda za kompenzaciju isparavanja treba biti destilirana voda, dok voda za gubitak zbog istjecanja ili drenaže treba biti ista pročišćena voda. Nakon dodavanja vode potrebno je provjeriti kvalitetu vode kako bi se potvrdila ispravna koncentracija sastojaka.

Vodu za hlađenje potpuno zamijenite novom tretiranom vodom u intervalima od najmanje svake dvije godine. Otpadnu rashladnu vodu treba tretirati u skladu s važećim zakonima.



### **3. SUSTAV SLATKE VODE NA SIMULATORU MC 90**

Sustav hlađenja slatkom vodom sastoji se od dva podsustava: sustava niske temperature i sustava visoke temperature. Nisko-temperaturni sustav slatke vode hladi svu pomoćnu opremu, kao što su:

- kompresori uputnog zraka za glavni motor
- kompresor servisnog zraka
- sustav ulja za podmazivanje turbogeneratora i turbina teretnih pumpi
- sustav za podmazivanje statvene cijevi i propelera
- sustav hlađenja ispirnog zraka glavnog motora
- hlađenje ulja u bregastom vratilu i ulju glavnog motora sustav.

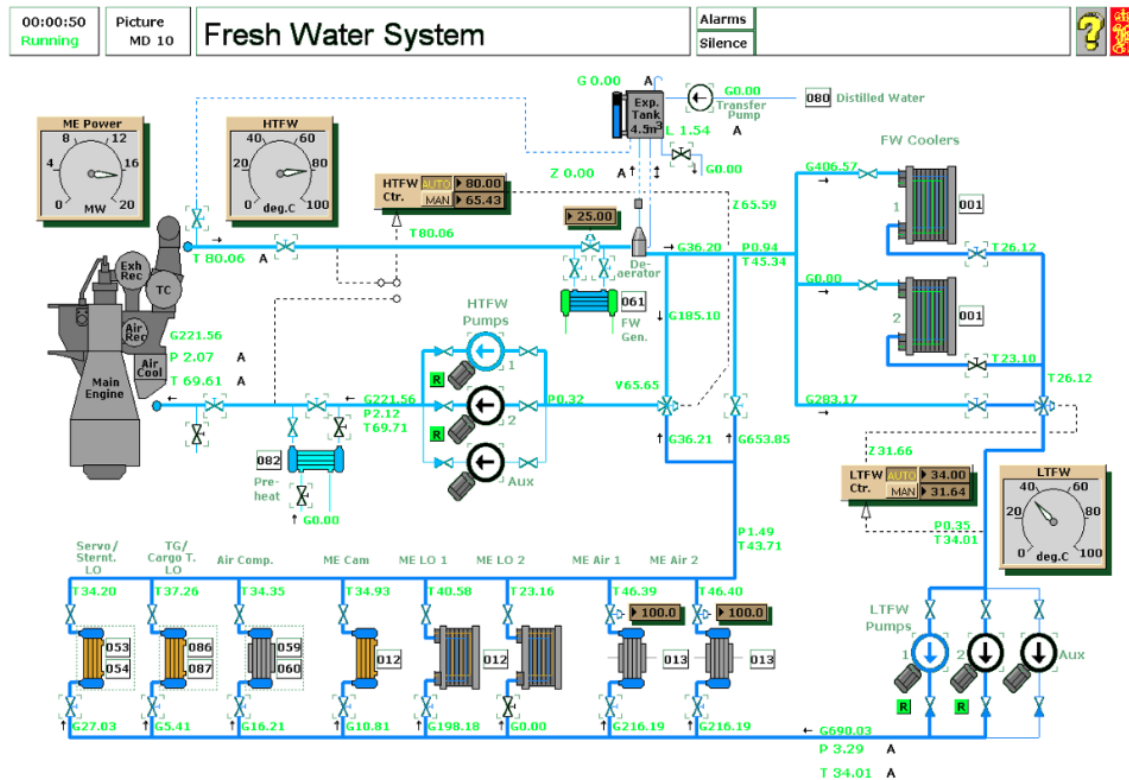
Nisko-temperaturne pumpe pumpaju svježu vodu kroz rashladnike. Sustav slatke vode sustav se hladi sustavom morske vode. Učinak kavitacije je modeliran za nisko-temperaturne pumpe. Pomoćna nisko-temperaturna pumpa uglavnom se koristi u luci ili tijekom nestanka struje.

Temperaturu svježe vode u nisko-temperaturnom sustavu slatke vode kontrolira PID regulator, koji pokreće troputni miješajući ventil, smješten iza dva rashladnika svježe vode. Ovim regulatorom može se upravljati u ručnom ili automatskom načinu rada. Ulazni signal regulatora daje temperatura prije nisko-temperaturnih pumpi.

Od spoja niske temperature i visoke temperature, dio nisko-temperaturnog kruga se vodi izravno do rashladnika slatke vode dok se dio vodi do visoko-temperaturne petlje.

Slatka voda visoke temperature hladi košuljice cilindra glavnog motora. Dio prekomjerne topline koristi se za zagrijavanje generatora slatke vode. Slatku vodu kroz glavni motor pokreću dvije glavne i jedna pomoćna visoko-temperaturna pumpa, od kojih samo jedna glavna pumpa normalno radi. Pomoćna pumpa predviđena je za

korištenje u luci. Ako se visoko-temperатурne pumpe zaustave, mali protok rashladnog medija bit će prisutan sve dok jedna od nisko-temperатурnih pumpi radi. Ako je glavni motor bio zaustavljen dulje vrijeme, potrebno je zagrijati visoko-temperатурni krug pomoću predgrijača koji se zagrijava parom.



Slika 1. Shema sustava slatke rashladne vode [3]

Odračni ventil u visoko-temperатурnom krugu nakon cilindra treba uvijek biti otvoren. Njegova je svrha zadržati malu količinu vode koja teče iz cilindra u ekspanzionu posudu kako bi se oslobodio zarobljeni zrak u visoko-temperатурnom sustavu. Sustav je samo indikativni.

Učinak kavitacije je modeliran za visoko-temperатурne pumpe. Pomoćna visoko-temperатурna pumpa uglavnom se koristi u luci ili tijekom nestanka struje. Visoko temperатурnim krugom upravlja PID regulator, koji rukuje troputnim ventilom za miješanje, miješajući vruću vodu sa izlaza glavnog motora s hladnom vodom iz nisko-temperатурnog/visoko-temperатурnog spoja. Osjetnik temperature može se premjestiti s izlaza na ulaz glavnog motora.

Ako je slatka voda na izlazu iz glavnog motora na točki vrenja, simulira se isparavanje slatke vode. Niska razina vode u ekspanzijskom spremniku dovodi do niskog tlaka u sustavu slatke vode. Visoko-temperaturne pumpe su posebno sklone kavitaciji pod ovim uvjetima niskog tlaka, uzrokujući smanjenje hlađenja glavnog motora.

Statički tlak u sustavu slatke vode određen je razinom vode u ekspanzijskom spremniku slatke vode. Postoji stalna potrošnja slatke vode zbog istjecanja i isparavanja koja je mala. Iz tog razloga ekspanzijski spremnik se mora povremeno puniti. U lošem vremenu simulira se nestabilna razina ekspanzijskog spremnika i mogu se pojaviti lažni alarmi.

### **3.1. Postupak rada**

#### **3.1.1. Predgrijavanje**

1. Tijekom razdoblja izvan upotrebe ili ako je zaustavljen na dulje vrijeme. Tijekom manevra glavni motor uvijek mora biti prethodno zagrijan. Nedovoljno prethodno zagrijavanje glavnog motora prije pokretanja može uzrokovati neusklađenost glavnih ležajeva i curenje slatke vode.
2. Kada je para dostupna, otvorite ulazni ventil HTFW i zatvorite prenosni ventil.
3. Ispravna temperatura predgrijanja je 60 - 65°C.

#### **3.1.2. Voda za hlađenje košuljice**

1. Provjerite položaj svih ventila u usisnom i tlačnom vodu i lokalno pokrenite pomoćnu pumpu za slatku vodu.
2. Normalna zadana vrijednost regulatora temperature je 80°C.

3. U stanju pripravnosti treba pokrenuti i postaviti glavnu pumpu za hlađenje u AUTO s upravljačke ploče pumpe. Druga pumpa bi trebala biti u pripravnosti.
4. Tijekom normalnog rada s motorom koji radi predgrijač nije uključen.
5. Razinu ekspanzijske posude potrebno je povremeno provjeravati.

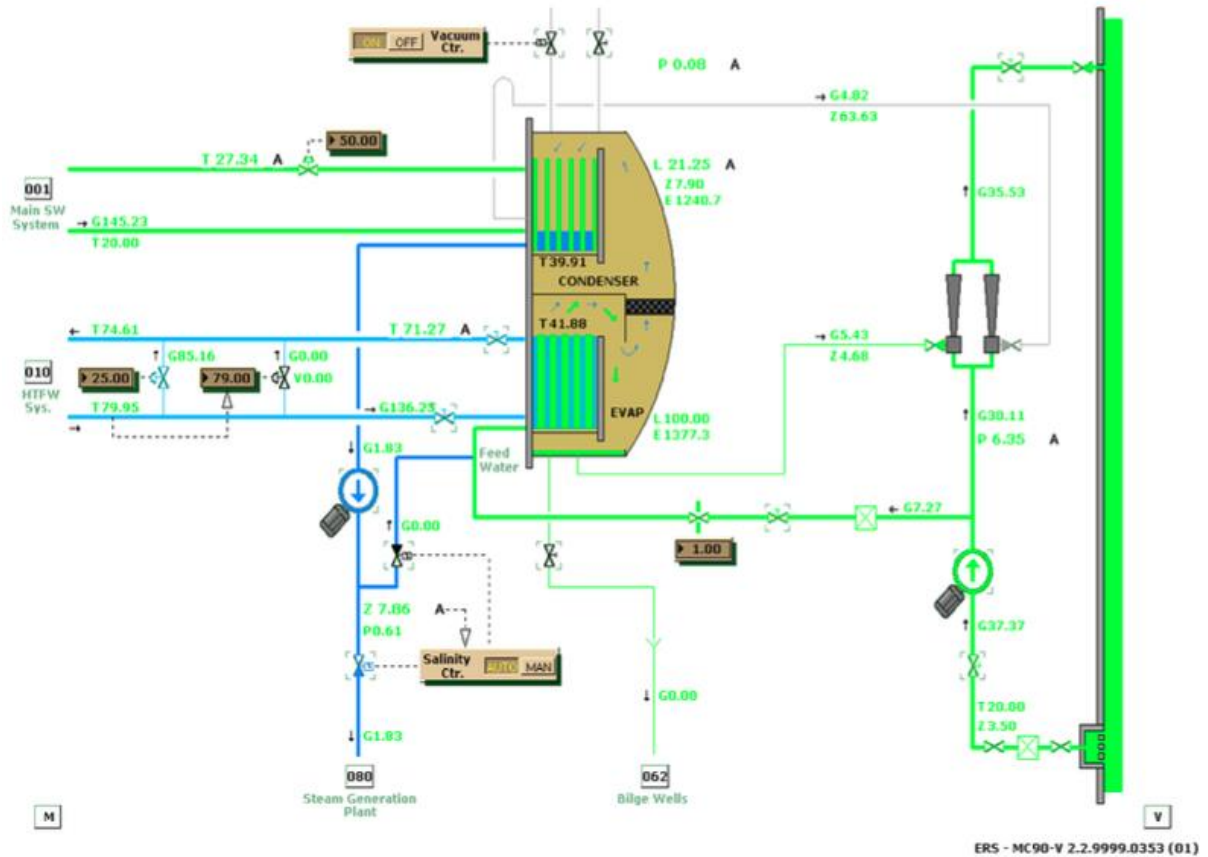
### **3.1.3. Postupak isključivanja**

1. Prije zaustavljanja motora generator svježe vode mora biti osiguran, a mimovod vode za hlađenje košuljice otvoren kako bi se spriječilo nedovoljno hlađenje košuljice tijekom manevriranja.
2. Tijekom kratkih zaustavljanja glavna visoko-temperaturna pumpa može ostati uključena, a predgrijač plašta može se koristiti.
3. Za duža zaustavljanja koristite pomoćnu visoko-temperaturnu pumpu i predgrijač košuljice.
4. Ako osiguravate motor za održavanje, isključite paru do predgrijača dok se temperatura ne ohladi na oko 40°C ili temperaturu okoline motora i zaustavite sve pumpe.

Kako bi se osigurao nisko-temperaturni krug, cijelo postrojenje mora biti zatvoreno, a zatim se mogu zaustaviti sve nisko-temperaturne pumpe

## 4. PROIZVODNJA SLATKE VODE NA BRODU

Shema generatora slatke vode prikazana je na slici 2.



Slika 2. Shema generatora slatke vode [3]

### Generator slatke vode

Vrlo veliki izvori otpadne topline mogu se koristiti kada se generator slatke vode spaja na sustav vode za hlađenje košuljica cilindra glavnog motora. Normalno je ta temperatura 75-80°C.

Postoje dva bypass ventila visoko-temperaturnog kruga slatke vode. Ventil s ručnim upravljanjem preusmjerava visoko-temperaturnu vodu kroz isparivač da ispari dovod morske vode.

Automatski bypass ventil također je montiran u visoko-temperaturnom krugu slatke vode do isparivača. Obično je zatvoren, ali na izlaznim temperaturama motora nižim od normalnih, otvara se. Ova funkcija sprječava pretjerano hlađenje motora od strane isparivača pri niskoj snazi motora, kada je proizvodnja topline u motoru nedostatna za punu proizvodnju isparivača.

Kontrolirana količina morske vode dovodi se u isparivač gdje se zagrijava preko visoko-temperaturnog kruga slatke vode. Generator svježe vode radi u uvjetima vakuuma kako bi se smanjila temperatura isparavanja. Vakuum, a time i temperatura isparavanja, moraju se kontrolirati kako bi se smanjilo stvaranje kamenca na strani isparivača s morskom vodom.

Vakuum omogućuje korištenje nisko-temperaturnih izvora grijanja. Stvorene pare prolaze kroz finu mrežicu kako bi se spriječilo prenošenje slane vode do kondenzatora. Kondenzator se hladi morskom vodom tako da se para kondenzira u slatku vodu. Svježa voda gravitacijom pada na dno kondenzatora i dovodi se do usisne pumpe za svježju vodu. Stanje slatke vode prati se salinometrom i ako je salinitet visok, kondenzat se recirkulira u isparivač.

Isparivač se sastoji od pločastih izmjenjivača topline. Grijanje isparivača napaja se iz visoko-temperaturnog kruga glavnog motora upravljanjem preko bypass ventila. Maksimalni kapacitet isparivača je 30 tona/24 sata na temperaturi morske vode 32 °C. Destilirana voda vodi se u spremnik za destiliranu svježju vodu.

CO <sub>2</sub>	12 – 18 ppm
Fe	0,01 ppm
SiO <sub>2</sub>	0,04 ppm
Na	0,3 – 0,4 ppm
pH	5,4 – 6
električna vodljivost	6 – 7 μS/cm

Tablica 3. Prosječna kakvoća vode destilata evaporatora [4]

## 5. PID REGULATOR

Proporcionalno -integralno-derivacijski regulator (PID regulator) je mehanizam povratne sprege regulacijske petlje (regulator) koji se široko koristi u industrijskim sustavima upravljanja. PID regulator proračunava vrijednost greške kao razliku između izmjerene procesne varijable i zadane željene vrijednosti. Kontroler pokušava minimizirati pogrešku prilagođavanjem procesa upotrebom manipulirane varijable.

Algoritam PID regulatora podrazumijeva tri odvojena kontinuirana parametra, te se u skladu s tim često naziva tročlana regulacija: proporcionalne, integralne i derivacijske vrijednosti, označene P, I i D. Jednostavno kazano, prethodne se vrijednosti mogu interpretirati u smislu vremena: P ovisi o pogrešci u sadašnjosti, I o akumulaciji prethodnih pogrešaka, a D je predviđanje sljedećih pogrešaka, temeljeno na trenutnoj stopi promjene. Ponderirani zbroj ova tri djelovanja koristi se pri prilagodbi procesa putem upravljačkog elementa poput položaja upravljačkog ventila, zaklopke ili snage koja se dovodi grijaćem elementu.

U nedostatku znanja o temeljnom procesu, PID regulator se kroz povijest smatrao najkorisnijim regulatorom. Podešavanjem triju parametra u modulu PID regulatora, regulator može osigurati radnju upravljanja dizajniranu za specifične kriterije procesa. Reakcija regulatora može se opisati u smislu reakcije regulatora na grešku, stupnja do kojeg regulator prijeđe zadanu vrijednost i stupnja oscilacije sustava. Treba imati na umu da korištenje PID algoritma za upravljanje ne jamči optimalno upravljanje sustavom ili stabilnost sustava.

Neke platforme mogu zahtijevati uporabu jedne ili dvije akcije kako bi se osigurala odgovarajuća kontrola sustava. To se ostvaruje postavljanjem preostalih parametara na nulu. PID regulator će se zvati PI, PD, P ili I regulator u nedostatku odgovarajućih upravljačkih radnji. PI regulatori su veoma česti, napominjući da je derivacija osjetljiva na šum mjerenja, dok nepostojanje integralnog člana može onemogućiti sustav da postigne ciljnu vrijednost zbog regulacije.

## 5.1. Teorija pid regulatora

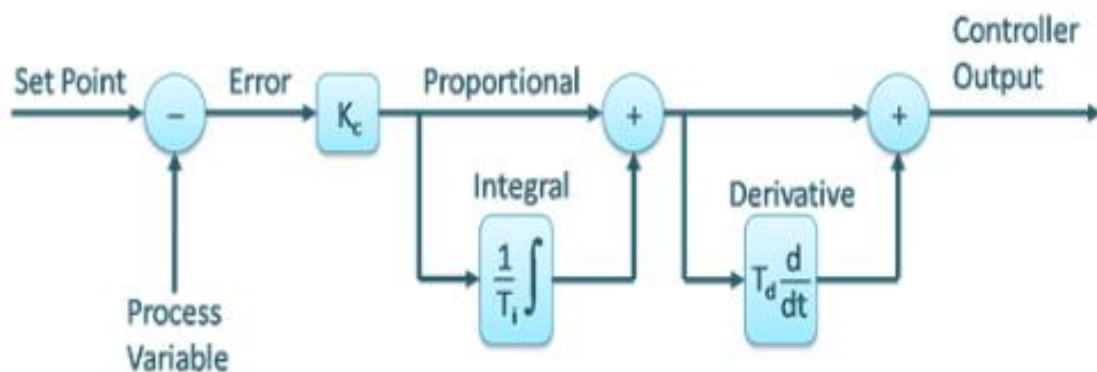
Shema PID regulacije je dobila naziv po svoja tri korektivna člana, zbroj čijih čini manipuliranu varijablu (MV). Proporcionalni, integralni i derivativni članovi sumiraju se za izračun izlaza PID regulatora. Definiranje  $u(t)$  kao izlaza regulatora.

Distributeri regulatora organiziraju proporcionalni, integralni i derivacijski rad u tri razna modula regulatora ili strukture regulatora. Oni se nazivaju: interaktivni, neinteraktivni i paralelni moduli. Neki distributeri kontrolera omogućuju izbor između raznih algoritama kontrolera kao opcije konstrukcije u softveru kontrolera.

PID algoritmi su:

1) Interaktivni algoritam

$$u(t) = K [e(t) + \int e(\tau) d\tau] \times [1 + T \frac{d}{dt} e(t)]$$

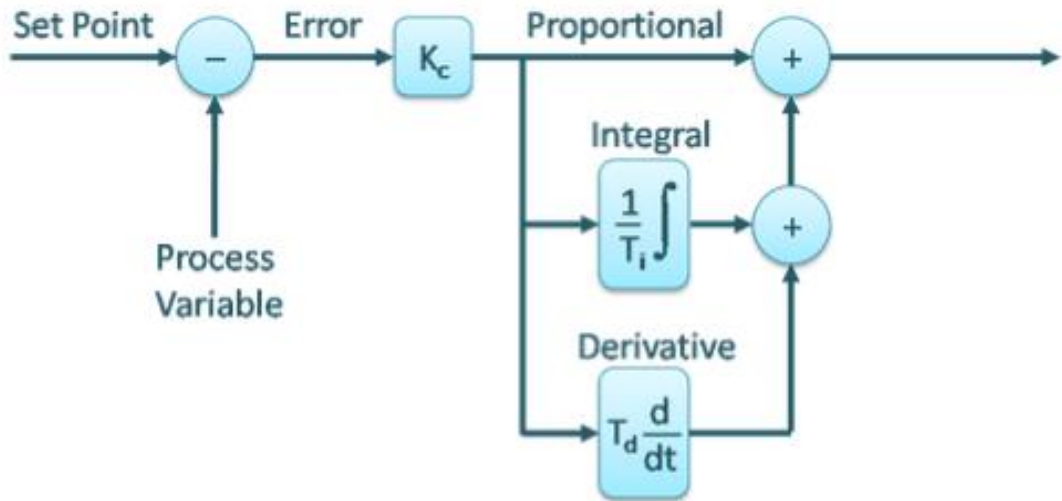


Slika 3. Interaktivni algoritam [5]

2) Neinteraktivni algoritam

$$u(t) = K [e(t) + \int e(\tau) d\tau + T \frac{d}{dt} e(t)]$$

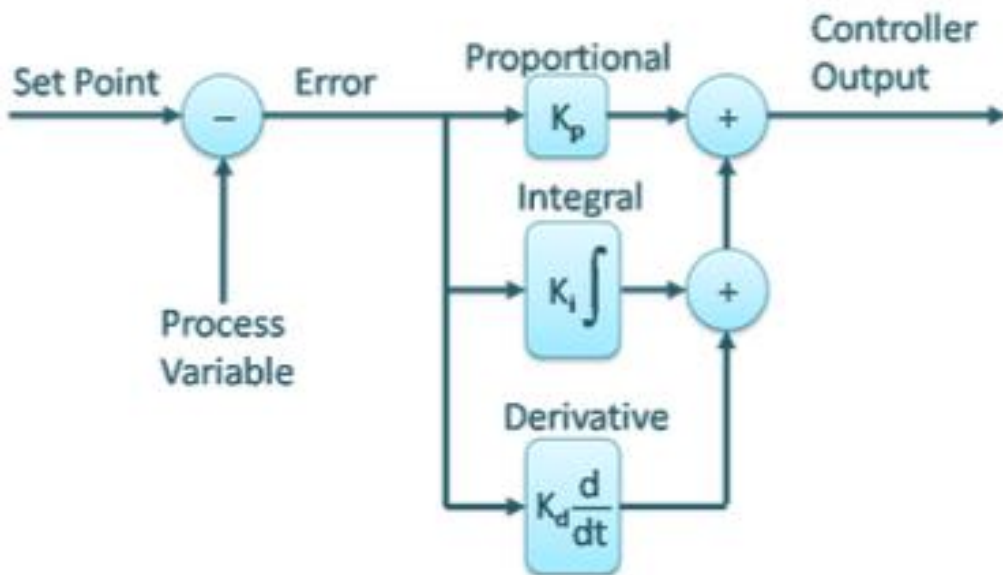




Slika 4. Neinteraktivni algoritam [6]

### 3) Paralelni algoritam

$$u(t) = K_e(t) + K_i \int e(\tau) d\tau + K_d e(t)$$



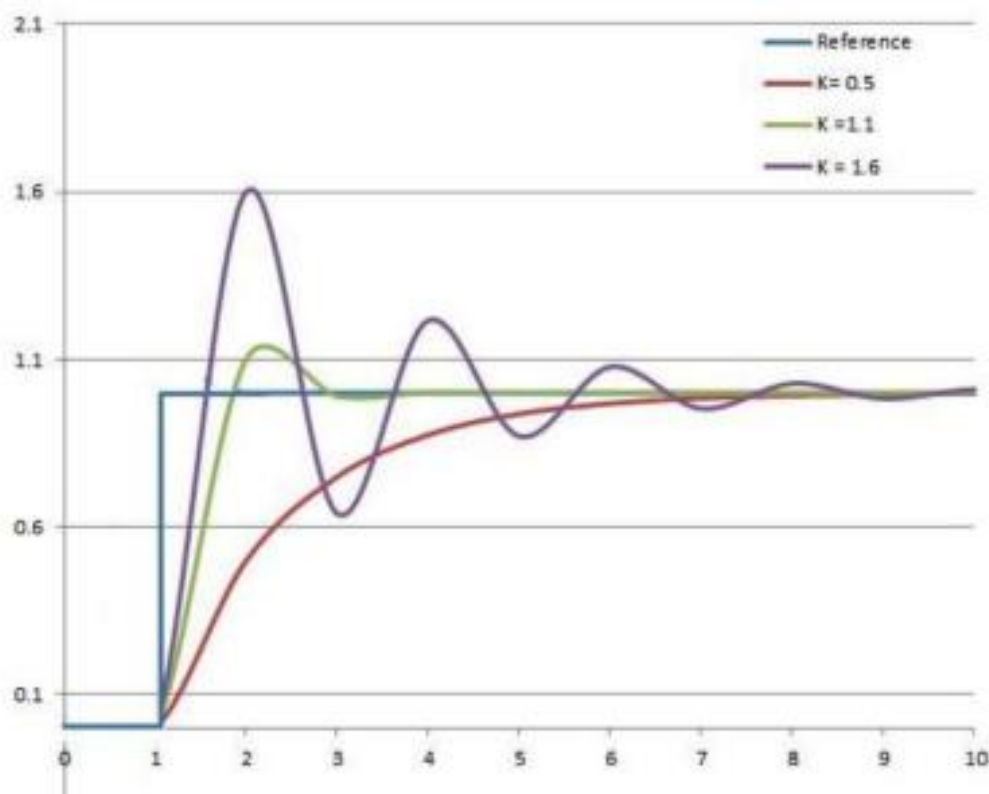
Slika 5. Paralelni algoritam [7]

## 5.2. Proporcionalno djelovanje

Proporcionalni član izlaznu vrijednost proizvodi na način da je razmjerna trenutnoj vrijednosti pogreške. Proporcionalni odziv može se prilagoditi množenjem pogreške s konstantom  $K_p$ , koja se naziva konstanta proporcionalnog pojačanja. Proporcionalni izraz je dan sa:

$$P = K_e(t)$$

Visoko proporcionalno pojačanje uzrokovano je velikom izmjenom izlaza za danu promjenu greške. Ako je proporcionalno pojačanje previsoko, model može postati nestabilan. Usprkos tome, mali dobitak rezultira malim izlaznim odgovorom na veliku ulaznu pogrešku i manje osjetljivim ili manje osjetljivim regulatorom. Ako je proporcionalno pojačanje premalo, kontrolno djelovanje može biti nedovoljno kada detektira smetnje sustava. Teorija podešavanja i praksa industrije pokazuju da bi proporcionalni izraz trebao pridonijeti najvećem dijelu promjene proizvodnje.



Slika 6. Učinak dodavanja  $K_p$  ( $K_i$  and  $K_d$  ostao je konstantan) [8]

### 5.3. Integralno djelovanje

Doprinos integralnog člana razmjernan je veličini greške i trajanju greške. Integral u PID regulatoru je suma trenutne greške u toku vremena te daje akumulirani pomak koji je prije trebao biti ispravljen. Akumulirana pogreška se zatim pomnoži s integralnim pojačanjem te dodaje izlazu regulatora.

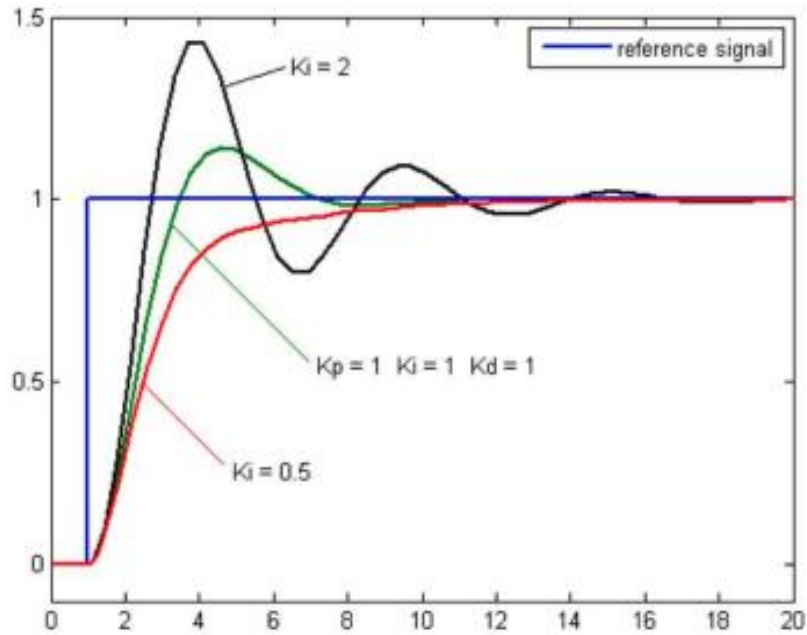
$$I_{out} = K_i \int e(\tau) d\tau$$

Integralni član pospješuje kretanje procesa k zadanoj točki i eliminira zaostalu grešku u stabilnom stanju koja se javlja kod čisto proporcionalnog regulatora. Međutim, budući da integralni član obraća pažnju na akumulirane greške iz prethodnog razdoblja, može prouzročiti da sadašnja vrijednost premaši vrijednost zadane vrijednosti.

### 5.4. Derivacijsko djelovanje

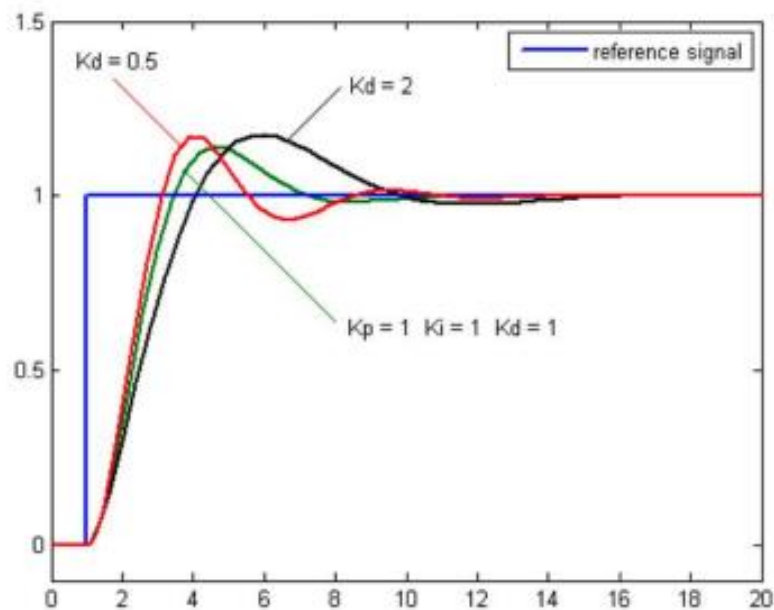
Izvod pogreške procesa računa se određivanjem nagiba pogreške tokom vremena i množenjem ove stope promjene s dobitkom izvedenice  $K_d$ . Veličina doprinosa izvedenog izraza ukupnom kontrolnom djelovanju naziva se derivativni dobitak,  $K_d$ . Izvedeni termin je:

$$D_{out} = K_d * d/d_t(t)$$



Slika 7. Učinak dodavanja  $K_i$  ( $K_p$ , and  $K_d$ ) ostao je konstantan [8]

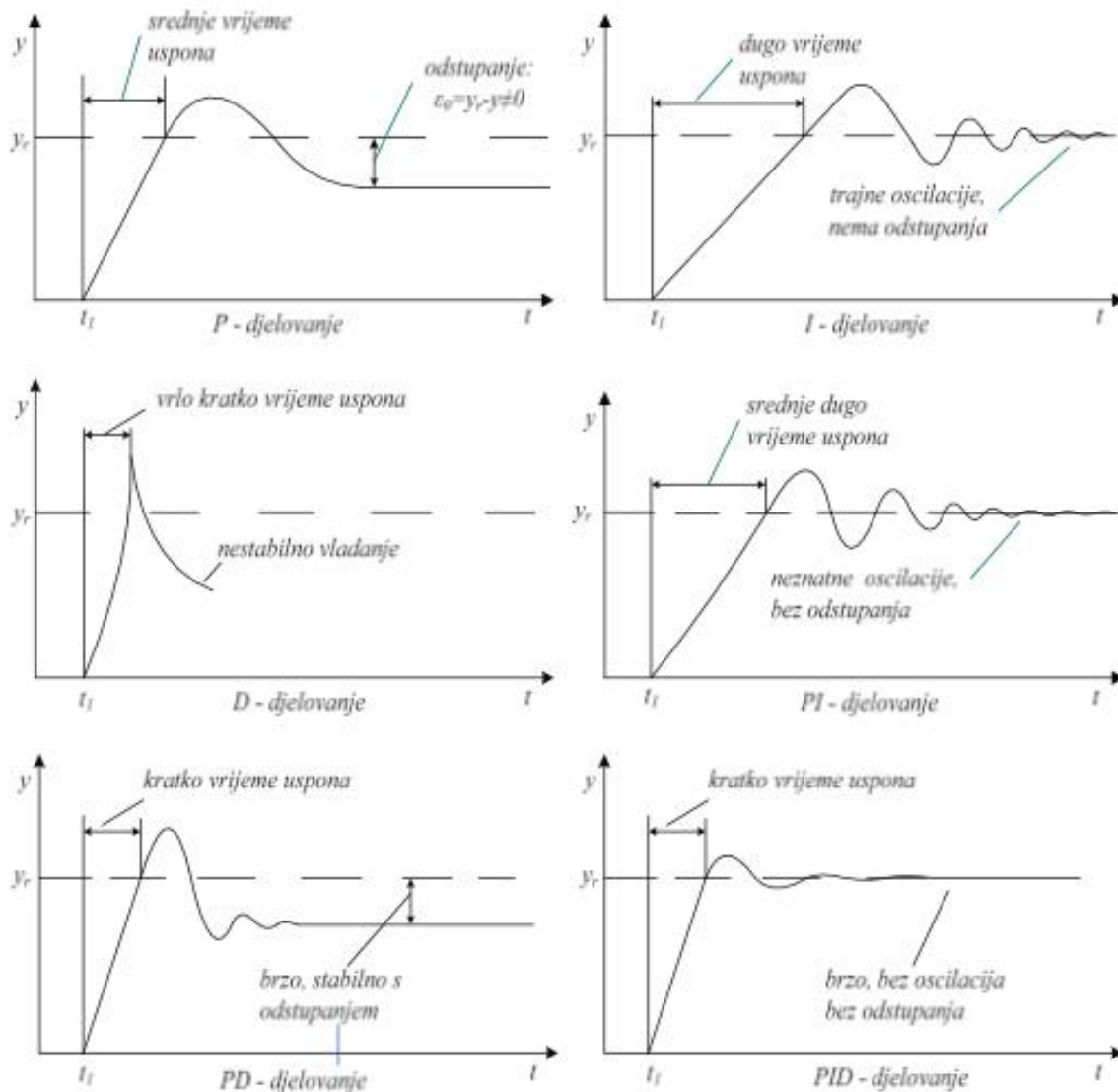
Izvedeno djelovanje predviđa ponašanje sustava i time poboljšava vrijeme smirivanja i stabilnost sustava. Idealna derivacija nije uzročna, tako da implementacije PID regulatora uključuju dodatno nisko-propusno filtriranje za derivaciju, kako bi se ograničilo visokofrekventno pojačanje i šum. Izvedeno djelovanje rijetko se koristi u praksi prema jednoj procjeni u samo 20% postavljenih kontrolera zbog njegovog promjenjivog utjecaja na stabilnost sustava u aplikacijama u stvarnom svijetu.



Slika 8. Učinak dodavanja  $K_d$  ( $K_p$ , and  $K_i$ ) ostao je konstantan [8]

## 5.5. Usporedba karakteristika

Na slici 9 dan je usporedni prikaz prijelaznih karakteristika tipičnog procesa pri regulaciji različitim regulatorima.



Slika 9. Usporedni prikaz prijelaznih karakteristika tipičnog procesa pri regulaciji različitim regulatorima [9]

## 5.6. Pregled metoda

Nekolicina metoda koristi se kod podešavanja PID petlje. Metode koje su uobičajeno najučinkovitije uključuju razvoj nekog oblika modela procesa, potom odabir P, I i D na osnovu parametara dinamičkog modela. Tehnike ručnog ugađanja mogu biti neučinkovite, naročito ako petlje imaju vremena odziva reda veličine minuta ili duže.

Odabir tehnike uvelike će odlučivati o tome može li se petlja pokrenuti izvan mreže za podešavanje, te o vremenu odgovora sustava. Ukoliko se sustav može isključiti, najbolja metoda podešavanja često uključuje podvrgavanje sustava postupnoj promjeni ulaza, očitavanje izlaza kao funkcije vremena i korištenje tog odgovora za određivanje kontrolnih parametara.

<b>Method</b>	<b>Advantages</b>	<b>Disadvantages</b>
<b>Manual Tuning</b>	No math required , Online	Requires experienced personnel
<b>Ziegler-Nichols</b>	Proven Method, Online	Process upset, some trial-and-error, very aggressive tuning
<b>Cohen-Coon</b>	Good process models	Some math; offline; only good for first-order processes
<b>Software Tools</b>	Consistent tuning; online or offline - can employ computer-automated control system design (CAutoD) techniques;	Some cost or training involved

Tablica 4. Pozitivne i negativne strane metoda [8]

## 5.7. Ziegler-nichols metoda

Nichols i Ziegler su 1940-ih smislili dvije iskustvene metode za dobivanje parametara regulatora. Te metode korištene su za situacije prvog reda i mrtvog vremena, a obuhvaćale su intenzivne ručne izračune. Korištenjem boljeg softvera za

optimizaciju, znatan broj ručnih metoda ne koristi se više. Naime, koristeći softverska pomagala, dvije metode još se koriste danas.

Naredna metoda ostaje cijenjena metoda za podešavanje regulatora koji koriste proporcionalne, integralne i izvedene radnje. Ziegler-Nicholsova metoda otvorene petlje još se naziva i metoda krivulje u obliku slova S, iz razloga što testira reakciju procesa otvorene petlje na izmjenu izlazne varijable upravljanja. Ovaj temeljni test zahtijeva snimanje odziva sustava, po mogućnosti koristeći crtač ili računalo. Nakon pronalaska određene vrijednosti odziva procesa, one se mogu uključiti u Ziegler-Nicholsovu jednadžbu sa specifičnim konstantama množenja za dobitke regulatora s radnjama P, PI ili PID.

Ovom metodom eksperimentalno dobivamo odgovor otvorene petlje FOPDT-a na jedinični ulaz koraka. Ova se metoda primjenjuje samo ako odgovor na ulaz koraka pokazuje krivulju u obliku slova S. To znači da ako postrojenje uključuje integratore (kao što je sustav prototipova 2. reda) ili kompleksno konjugirane polove (opći sustav 2. reda), tada se ova metoda ne može primijeniti jer se neće dobiti oblik - s.

Ziegler-Nicholsova metoda otvorene petlje također se naziva i metoda procesne reakcije, jer ispituje reakciju otvorene petlje procesa na promjenu izlaza kontrolne varijable.

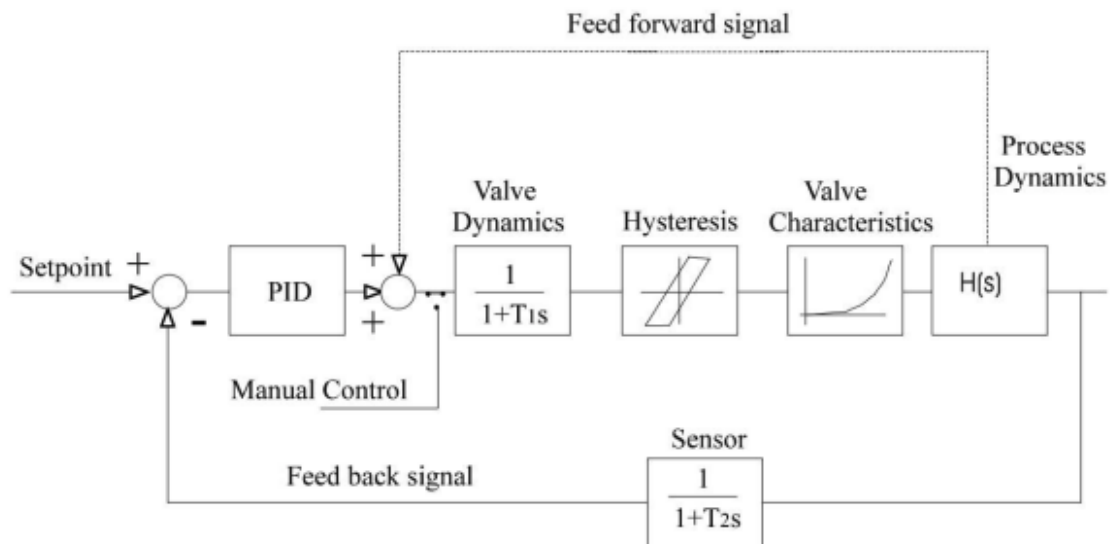
## 6. KONTROLNI SUSTAV NA SIMULATORU MC 90V

Standardna petlja jednog regulatora sastoji se od sljedećih dijelova:

- PID regulator
- aktuator
- postupak
- senzor

### 6.1. PID REGULATOR NA SIMULATORU

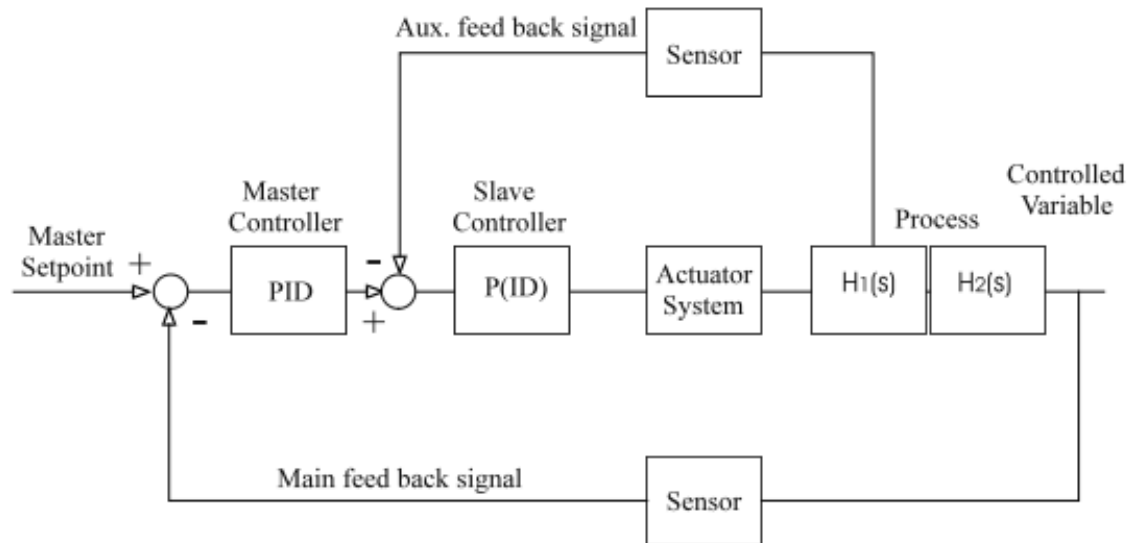
Osnovno djelovanje PID regulatora može se modificirati uključivanjem signala „naprijed“. Ovo je još jedan učinkovit način poboljšanja kontrolnih funkcija. Ove „modifikacije“ nalaze se u sustavu „Steam“.



Slika 10. Standardna petlja PID regulatora [10]



Također je moguće dodatno poboljšati kvalitetu upravljanja uvođenjem "kaskadnog upravljanja". Kontrolna funkcija se zatim provodi u dva koraka. Podređeni regulator kontrolira prednji dio procesa, a glavni kontroler provjerava konačni rezultat i šalje signal korekcije kao naredbu zadane vrijednosti podređenom regulatoru. Slika 11.



Slika 11. Petlja kaskadnog PID regulatora [10]

## 6.2. PODEŠAVANJE REGULATORA

Podešavanje se izvodi prema „Siegler Nichols“ postupku:

- a) Uklonite akciju resetiranja postavljanjem Integrala (I) = 0
- b) Uklonite derivaciju stavljajući Derivat (D) = 0
- c) Povećajte pojačanje (P) dok kontrolna petlja ne počne oscilirati
- d) Zabilježite pojačanje (GO) i period oscilacije (TO)

## **7. PID REGULATOR U SUSTAVU SLATKE VODE SIMULATORA MC-90V**

Na simulatoru MC-90 u sustavu slatke vode postoje dva PID regulatora koji služe za finu regulaciju temperature vode. Jedan PID regulator je postavljen na sustavu nisko-temperaturne vode, a drugi na sustavu visoko-temperaturne vode.

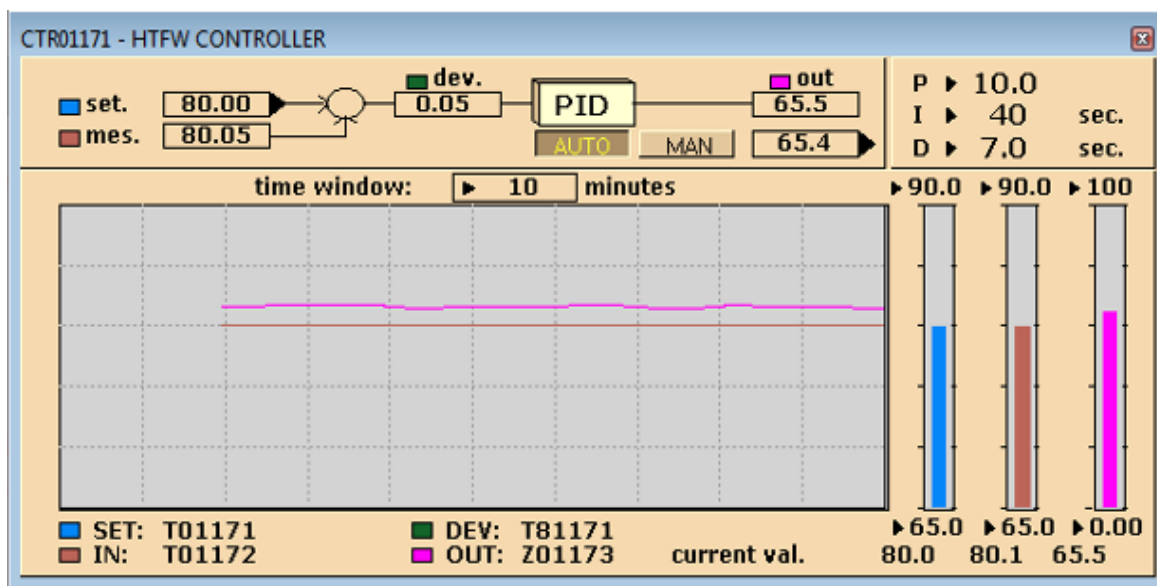
Ulazni signal za PID regulator na sustavu nisko-temperaturne vode je temperatura vode nakon topnog ventila, a izlazni signal regulatora odnosno njegovo djelovanje je na troputnom ventilu. On regulira koliko će vode proći kroz mimovod, a time direktno regulira i koliko će vode proći kroz rashladnik vode.

Ulazni signal za PID regulator na sustavu visoko-temperaturne vode može biti ili temperatura vode nakon izlaska iz glavnog motora, kada je rashladna voda već obavila funkciju hlađenja motora, ili temperatura vode prije ulaska u glavni motor. Izlazni signal regulatora odnosno njegovo djelovanje je na troputnom ventilu. Taj troputni ventil se nalazi kao spojnica između nisko-temperaturne i visoko-temperaturne vode. Te regulator djeluje koliki postotak visoko-temperaturne vode će se vratiti nazad na početak visoko-temperaturnog kruga, to direktno utječe koliko će nisko-temperaturne vode ući u visoko-temperaturni krug.

### **7.1. Detalji pid regulatora**

Za potrebe ovog testiranja uzeti ćemo PID regulator visoko-temperaturne vode jer on brže reagira iz razloga što štiti glavni motor od „nekvalitetnog“ hlađenja te mu potrebna brža reakcija.

Smeđom bojom je označena temperatura koja je izmjerena poslije glavnog motora odnosno to je ulazni signal regulatora. Plavom bojom je označena željena temperatura, temperatura koju želimo održavati u sustavu. Zelenom bojom je označena temperaturna razlika između željene i izmjerene temperature. Roza boja predstavlja postotak otvorenosti troputnog ventila.



Slika 12. Standardni PID regulator [3]

PID regulator može biti postavljen na automatski ili manualni režim rada. Manualnim režimom rada može se ručno djelovati na postotak otvorenosti troputnog ventila. Automatskim režimom rada PID regulator kontrolira otvorenost troputnog ventila prema zadanim parametrima.

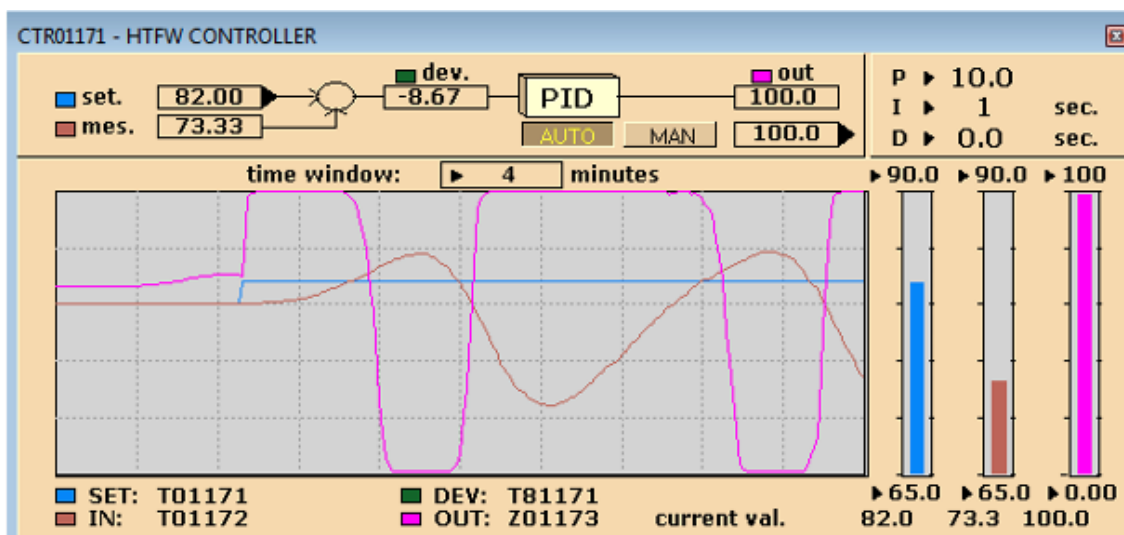
Na PID regulatoru se mogu mijenjati proporcionalno, integralno i derivacijsko djelovanje. Iz tog razloga ovaj PID regulator može „glumiti“ proporcionalni, integralni, derivacijski ili kombinaciju navedenih regulatora. Time je moguće prikazati kako bi se pojedini regulatori ponašali u ovoj situaciji te iz kojega se razloga koristi baš PID regulator kod ove regulacije.

Može se mijenjati i vrijeme vremenskog prozora regulatora. Kada se namjesti vremenski prozor na primjer 2 minute duljina y osi na grafu će biti 2 minute. Za potrebe ovog testiranja mijenjali smo vremenski prozor ovisno o brzini reakcije pojedinog regulatora i grafa koji on crta.

## 7.2. Proporcionalni regulator

Za potrebe ove regulacije promijenili smo integralno vrijeme na 1 sekundu, time smo uklonili integralno djelovanje. Derivacijsko vrijeme smo uklonili postavljanjem na 0 sekundi. Proporcionalno djelovanje smo ostavili kako je bilo i zadano. Promijenili smo željenu temperaturu (plava boja) s 80 °C na 82 °C kako bi odmah vidjeli razliku u regulaciji.

Možemo primijetiti kako je odmah pri promjeni željene temperature reagirao i regulator, na način da otvori ventil u potpunosti (100%) jer je izmjerena temperatura bila niža od željene. Tom radnjom troputni ventil je skroz otvorio stranu na kojoj visoko-temperaturna voda ponovo ulazi na početak visoko-temperaturnog kruga slatke vode, a nije dopustio nisko-temperaturnoj vodi da uđe u visoko-temperaturni krug. U trenutku kada je izmjereno da je temperatura visoko-temperaturne vode 82 °C troputni ventil je naglo počeo zatvarati čime je krenula ulaziti nisko-temperaturna voda u visoko-temperaturni krug te je počela hladiti isti.



Slika 13. P regulator [3]

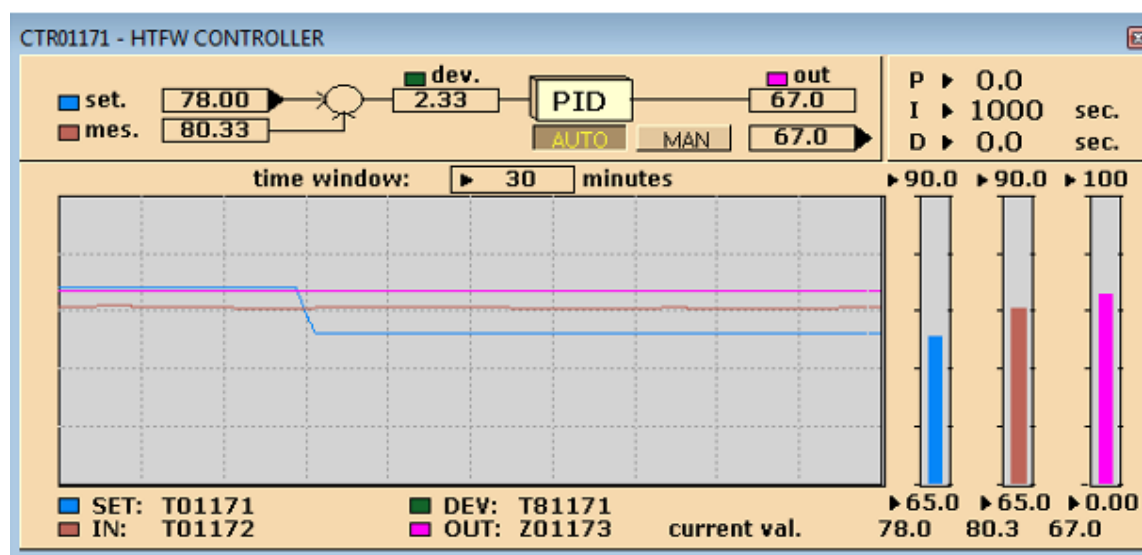
Kada ventil u potpunosti zatvori on nakon kratkog vremena opet u potpunosti otvori iz razloga što je izmjerena temperatura veća od zadane temperature. Najniža

temperatura u ovim slučaju je bila 73 °C, najviša 84,5 °C. Razlika od 11,5 °C je prevelika za finu regulaciju na brodu može se tolerirati do 2 °C razlike.

Karakteristika proporcionalnog regulatora je brzina i jednostavnost to možemo vidjeti na primjeru nagle reakcije, ali negativna strana tako nagle reakcije je što nije moguće tamo fino kontrolirati željenu temperaturu visoko-temperaturne vode. To je i negativna strana proporcionalnog regulatora, odstupanje izlazne veličine od one željene.

### 7.3. Integralni regulator

Za potrebe integralnog regulatora promijenili smo proporcionalno vrijeme na 0 %/°C, derivacijsko vrijeme na 0 sekundi, a integralno vrijeme smo povećali na 1000 sekundi kako bismo brže vidjeli razliku u regulaciji. Željenu temperaturu smo promijenili 2 puta, prvi put na 82 °C, a drugi puta na 78 °C što se može vidjeti na slici 14. po kretanju plavog grafa.



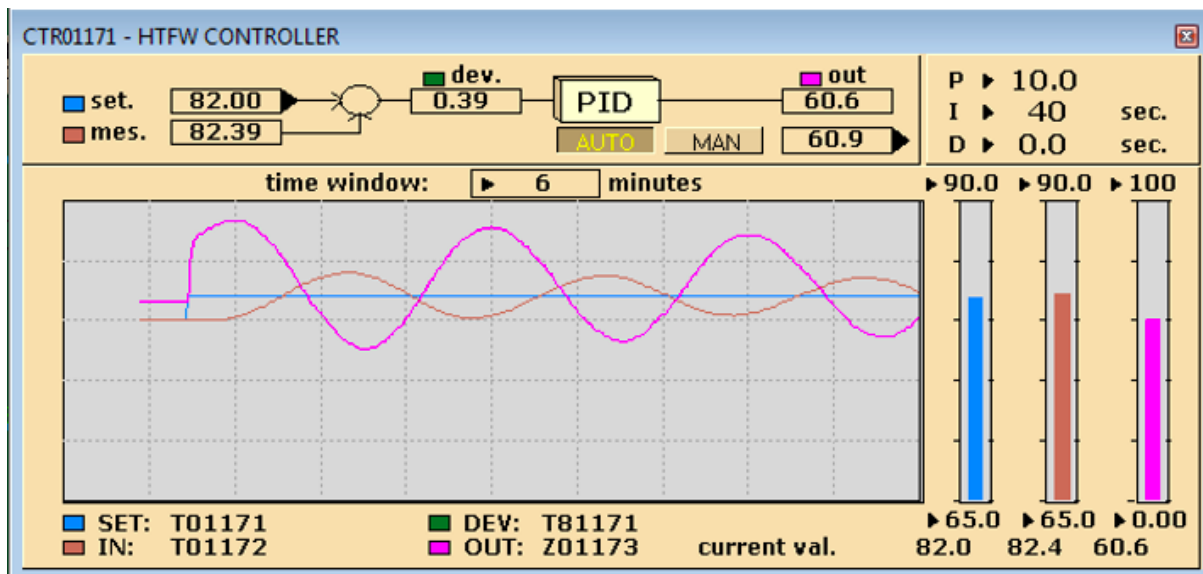
Slika 14. I regulator [3]

Reakcija integralnog regulatora na troputni ventil je gotovo nevidljiva, na grafu nije ni vidljivo da se roza linije mijenja izgleda potpuno paralelna sa y osi.

Sustav sporo reagira na promjene to je jedna od karakteristika integralnog djelovanja. Devijacije između željene i izmjerene temperature su prevelike i presporo se smanjuju te iz tog razloga ovaj se regulator ne može upotrebljavati na sustavu koji ne smije tako velike devijacije. Uvijek će integralno djelovanje oscilirati od željene vrijednosti.

#### 7.4. PI regulator

Za potrebe PI regulatora proporcionalnu i integralnu vrijednost smo ostavili na istim vrijednostima, zadanima prema simulatoru. Derivaciju djelovanje smo smanjili na 0 sekundi. Ovime smo dobili prikaz djelovanja PI regulatora u sustavu. Promijenili smo željenu vrijednost na 82 °C kako bi odmah vidjeli djelovanje regulatora.



Slika 15. PI regulator [3]

Regulator je odmah promjenom željene vrijednosti krenuo otvarati troputni ventil, ali nije ga skroz otvorio na 100% kako je otvorio P regulator u istom slučaju nego ga je otvorio do 93%. Temperatura vode je rasla te kada je došla do željene vrijednosti regulator je dao signal troputnom ventilu da počne zatvarati. Troputni ventil

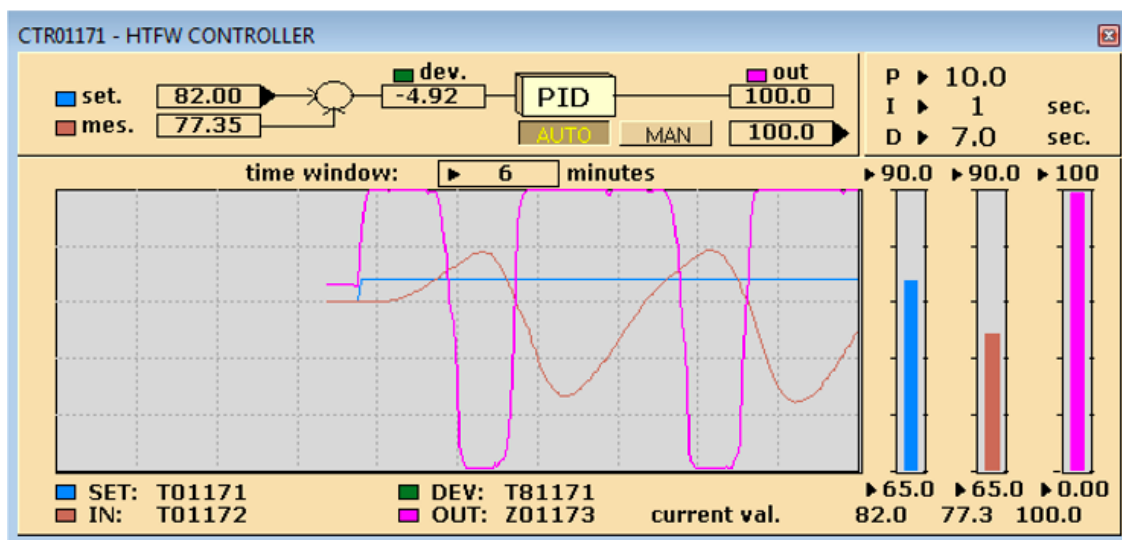
je zatvorio do 50%, a u tom trenutku je izmjerena temperatura vode bila 83,8 °C pa je ventil dobio signal od regulatora da počne zatvarati.

Razlike između željene i izmjerene temperature su se periodički počele smanjivati vremenom. Prvo je razlika bila 1,8 °C, a zatim je padala od 1,6 °C sve do 1,2 °C nakon nekog vremena kada se regulator stabilizirao.

Ova dva regulatora imaju i pozitivnih i negativnih strana. Pozitivna strana proporcionalne regulacije je brzina odaziva na početku, a integralna regulacija ima svoju prednost u završnom dijelu kada podešava na zahtijevanu vrijednost. Ova dva signala se zbrajaju te time u prednost dolaze pozitivne karakteristike, smanjuju se one loše. Ovaj se regulator ipak ne bih trebao koristiti u ovakvim sustavima jer i ovakva regulacija nije dovoljno brza i stabilna prema zahtijevanoj regulaciji.

## 7.5. PD regulator

Za potrebe PD regulatora ostavili smo iste vrijednosti proporcionalnog i derivacijskog djelovanja, a integrirano djelovanje je smanjeno na 1 sekundu čime je ono eliminirano. Time smo dobili simulaciju djelovanja PD regulatoru u sustavu visoko-temperaturne vode. Željenu vrijednost smo promijenili na 82 °C kako bi odmah vidjeli djelovanje regulatora.



Slika 16. PD regulator [3]

Istoga trenutka kada je promijenjena željena temperatura regulator je dao signal troputnom ventilu za otvaranje. Troputni ventil je otvorio 100%, a time je krenula rasti temperatura vode. Za razliku od P i PI regulatora PD regulator nije odmah počeo sa zatvaranjem troputnog ventila kada je izmjerena temperatura došla do razine željene temperature, došlo je do određenog kašnjenja u regulaciji.

Nakon kratkog kašnjenja regulator je zatvorio troputni ventil do kraja te je relativno brzo krenuo sa ponovnim otvaranjem ventila jer je izmjerena temperatura bila veća od željene. Kada je troputni ventil sljedeći put otvorio do kraja izmjerena temperatura je pala na vrijednost od 71,5 °C. To je razlika između željene i izmjerene temperature od čak 10,5 °C što je u potpunosti neprihvatljivo za ovakav sustav.

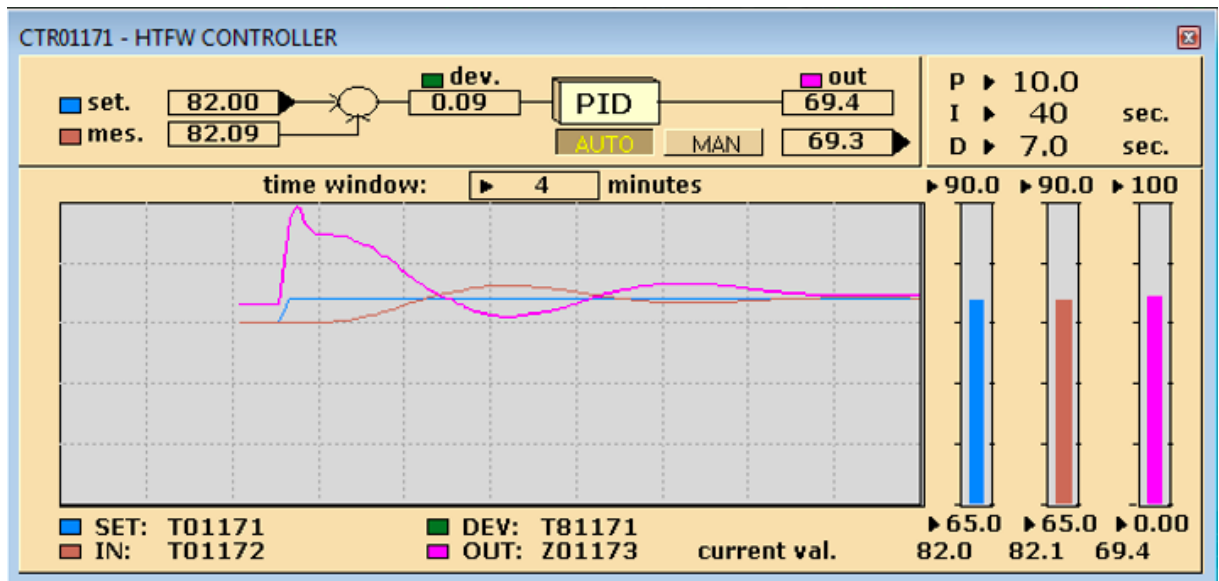
PD regulator nije mogao pratiti razliku temperature te ju je vremenom neznatno smanjio. Proporcionalno djelovanje bi ovom regulatoru trebalo davati brzinu odaziva kao svoju pozitivnu stranu, a derivacijsko djelovanje se opire brzim promjenama regulacije. U konačni dobivamo regulator koji ne može regulirati velike nestabilnosti u sustavu stalno dolazi do određenog odstupanja.

## **7.6. PID regulator**

Za potrebe PID regulatora nismo mijenjali vrijednosti proporcionalnog, integracijskog ili derivacijskog djelovanja iz tog razloga što je ovaj regulator na simulatoru već postavljen prema savršenim parametrima ovoga sustava za PID regulaciju. Promijenili smo samo željenu temperaturu s 80 °C na 82 °C kako bi odmah vidjeli djelovanje regulatora na grafu.

Odmah kao i u većini prethodnih regulatora PID regulator je poslao signal troputnom ventilu da krene sa otvaranjem. Otvorio je ventil do 100% samo na mali trenutak te je odmah prije nego što je izmjerena temperatura došla do željene temperature krenuo sa pritvaranjem. Ovaj način rada se razlikuje sa ostalim regulatorima.

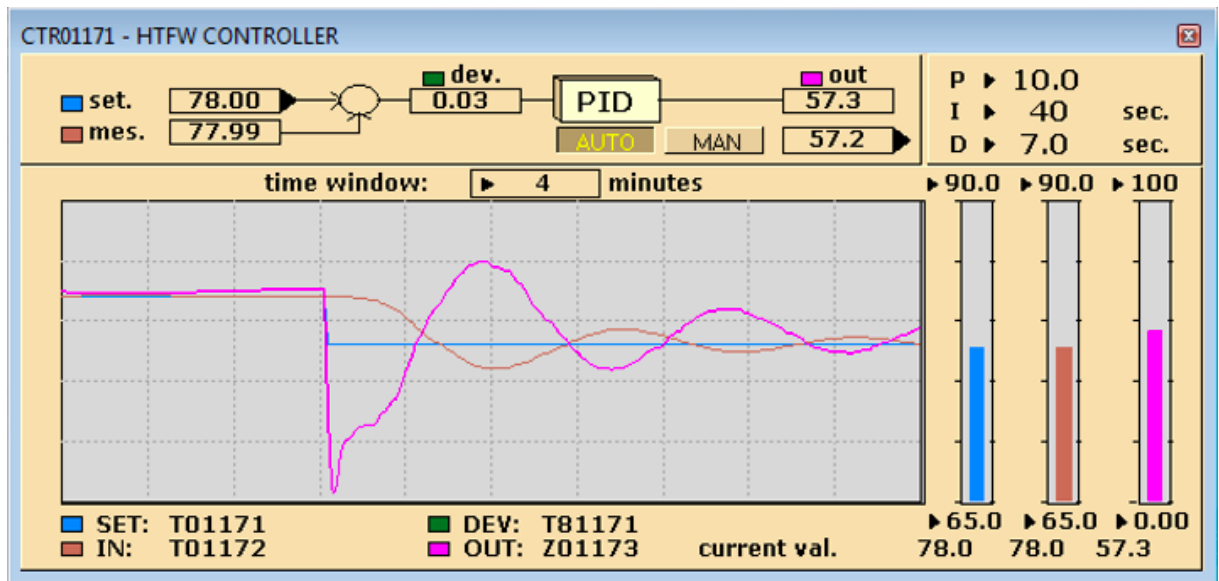




Slika 17. PID regulator [3]

Kako je izmjerena temperatura rasla tako je regulator davao signal ventilu da pritvara sve do trenutka kada je izmjerena temperatura postala veća od željene tada regulator nastoji lagano otvarati ventil. Ovaj regulator ne poseže za naglim otvaranjem ili zatvaranjem ventila jer to dovodi do smanjene stabilnosti sustava.

U početku je razlika između željene i izmjerene temperature bila 2 °C što je normalno jer smo tako i podesili sustav, ali bitno je za kazati da je u sljedećem periodu razlika bila 1,5 °C. Svakim sljedećim periodom je razlika bila sve manja. Nakon kraćeg perioda grafovi željene i izmjerene temperature su se u potpunosti preklapali.



Slika 18. PID regulator sa željenom temperaturom smanjenom za 4°C [3]

Na slici broj 18. postavili smo slučaj na način da smo željenu temperaturu smanjili sa 82 °C na 78 °C. Hitjeli smo vidjeti kako će PID regulator reagirati kada je razlika između željene i izmjerene temperature veća, u ovom slučaju to je 4 °C.

Regulator se odmah pokazao dostojnim zadatku. Počeo je predviđati utjecaj otvorenosti ventila na promjenu temperature te nakon kratkog razdoblja normalizirao je izmjerenu temperaturu prema željenoj bez većih oscilacija.

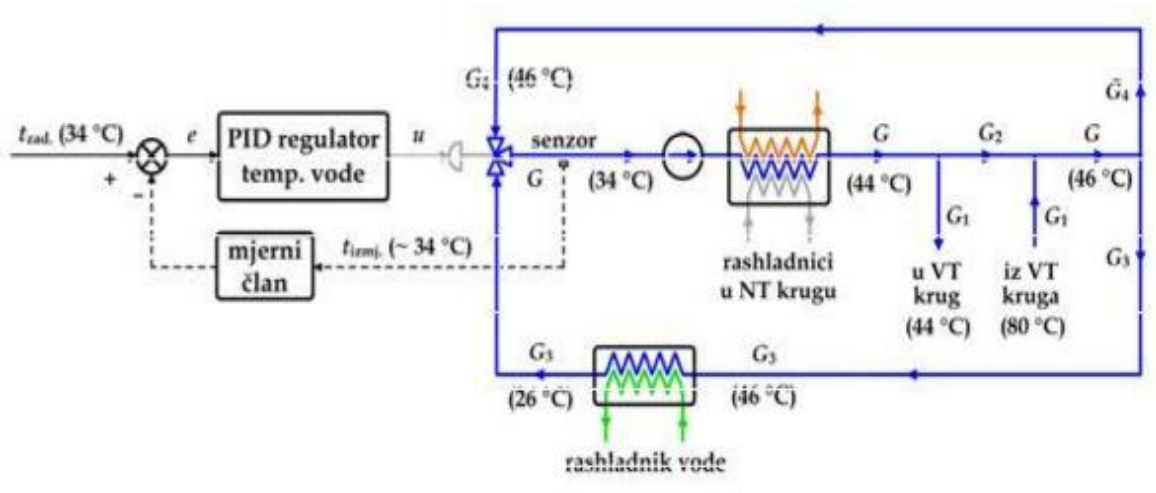
Ovaj regulator najčešće se upotrebljava u sustavima gdje su potrebne brze, ali stabilne prilagodbe na nove uvijete. Proporcionalno djelovanje mu daje brzinu odaziva, integralno djelovanje otklanja odstupanja, a derivacijsko djelovanje mu daje brzinu odaziva i smanjuje mogućnost sustava osciliranju.

## 8. PODEŠAVANJE PID REGULATORA NA SIMULATORU MC-90

Na nisko-temperaturnom sustavu slatke vode ćemo primijeniti iskustvenu metodu podešavanja PID regulatora, Da bi se lako identificirao krug niske temperature, sa slike 19. crta se pojednostavljeni regulatorni krug sustava hlađenja. U slatko-vodnom sustavu, upravljački krug je zatvoren negativnom povratnom vezom. U negativnoj povratnoj vezi mjerni član očitava temperaturu na izlazu slatke vode iz troputnog ventila kako bi PID regulator mogao znati koliki postotak ventila će biti otvoren za dobivanje dane vrijednosti koju je dao ljudski operater. Prednost negativnih povratnih veza je u tome što je poboljšana točnost samog sustava, smanjena je osjetljivost na promjene parametara, utjecaj poremećaja se smanjio, a stopa odaziva sustava i stopa propusnosti bit će poboljšana.

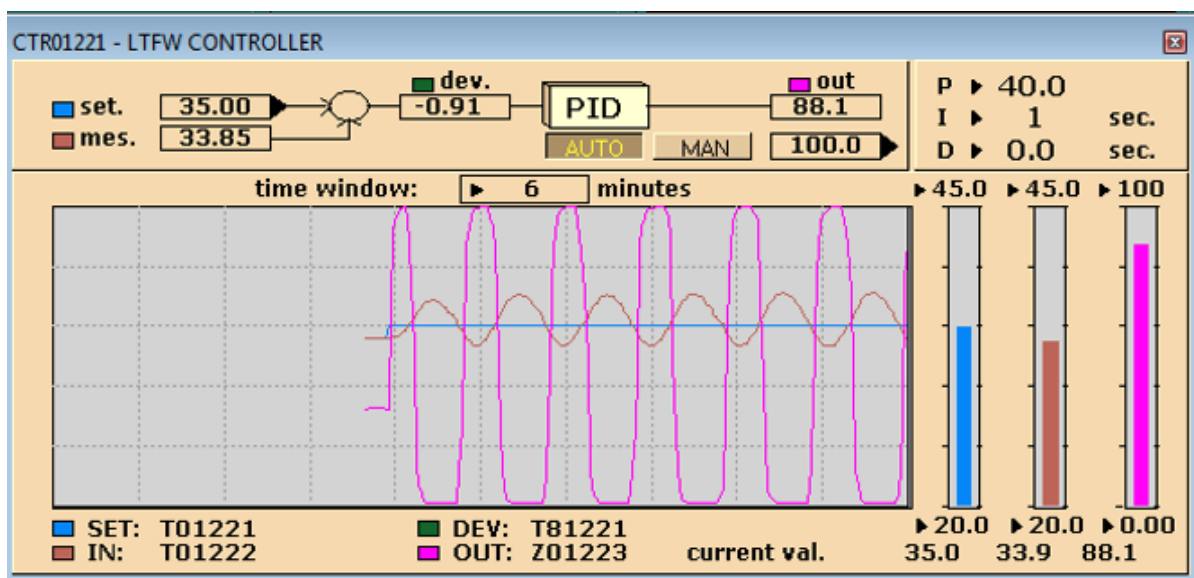
S obzirom na negativne strane povratne veze trebalo bi se držati opreza jer ima i nedostatke u sustavu, ako prilagodba nije dobro podešena može dovesti do nestabilnosti. Pumpa tlači vodu u rashladnik, a temperatura iste raste zbog hlađenja rashladnika. Nakon rashladnika, dio vode koja ima temperaturu od 44 °C ulazi je u krug visoke temperature slatke vode i odigrava ulogu sredstva za hlađenje u glavnom hlađenju motora. Nakon njegovog djelovanja, voda se vraća u nisko-temperaturne krugove koji su se zagrijavali na 80 °C. Prvo, se pomiješa s vodom koja nije ušla u visoko-temperaturni krug da bi dobila temperaturu od 46 °C. Taj dio vode se grana, dio voda se tlači na ventil gdje se temperatura vode značajno se smanjila sa 46 °C na 26 °C, a zatim se vraća u ventil.

Druga grana vode teče izravno na ventil i ponavlja postupak nakon miješanja u troputnom ventilu. Negativnom povratnim vezom, mjerni član "naređuje" regulatoru za koliki postotak treba otvoriti troputni ventil kako bi se dobila potrebna temperatura.



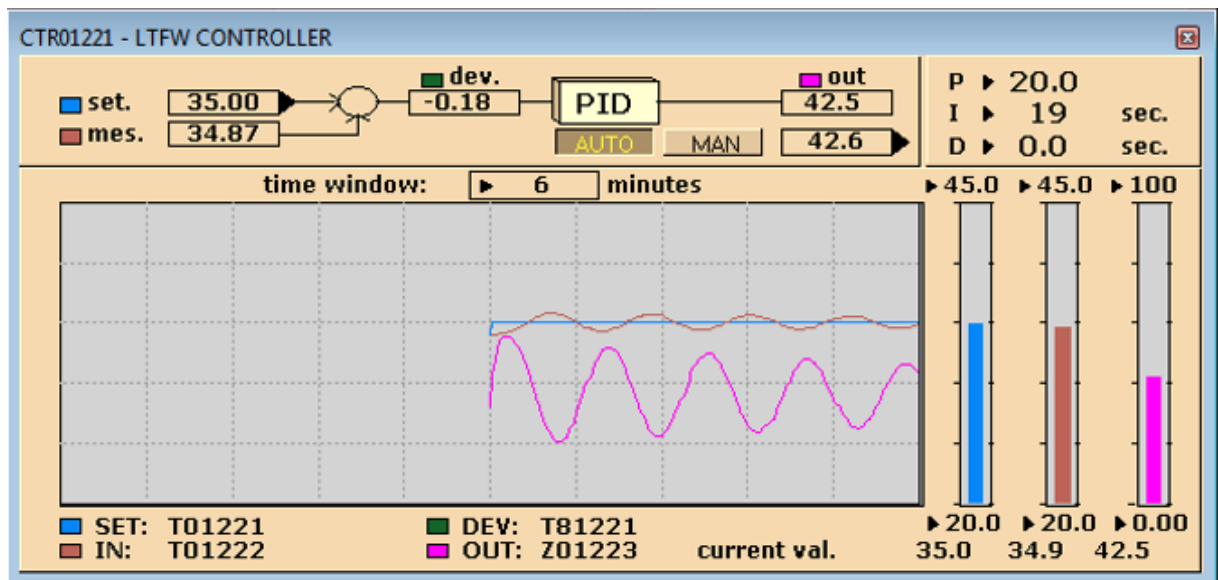
Slika 19. Shema sustava regulacije temperature slatke vode u NT krugu [11]

Početi ćemo time da integralno djelovanje postavimo na najmanju moguću vrijednost, a to je 1 sekunda, time smo isključili njen utjecaj. Zatim se derivacijsko djelovanje isključuje postavljanjem na 0 sekundi. Proporcionalno djelovanje se podiže na vrijednost gdje se događaju trajne oscilacije. Mijenjamo željno vrijeme sa 34 °C na 35 °C.



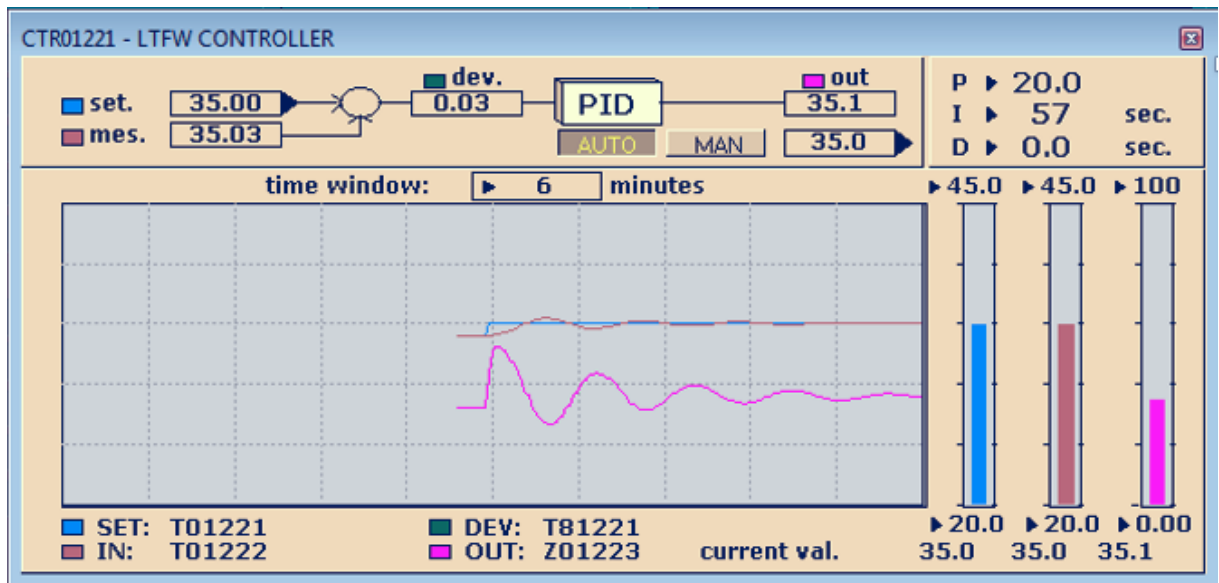
Slika 20. P djelovanje s trajnim oscilacijama [3]

Nakon što smo dobili trajne oscilacije proporcionalno djelovanje se snižava za polovinu vrijednosti kako bi se dobio jedan podbačaj i jedan prebačaj. Korak koji je slijedeći na redu je smanjivanje integralnog djelovanja, drugim riječima dolazi se do PI regulatora. U sustavu ponovo dolazi do trajnih oscilacija prikazano na slici 21.



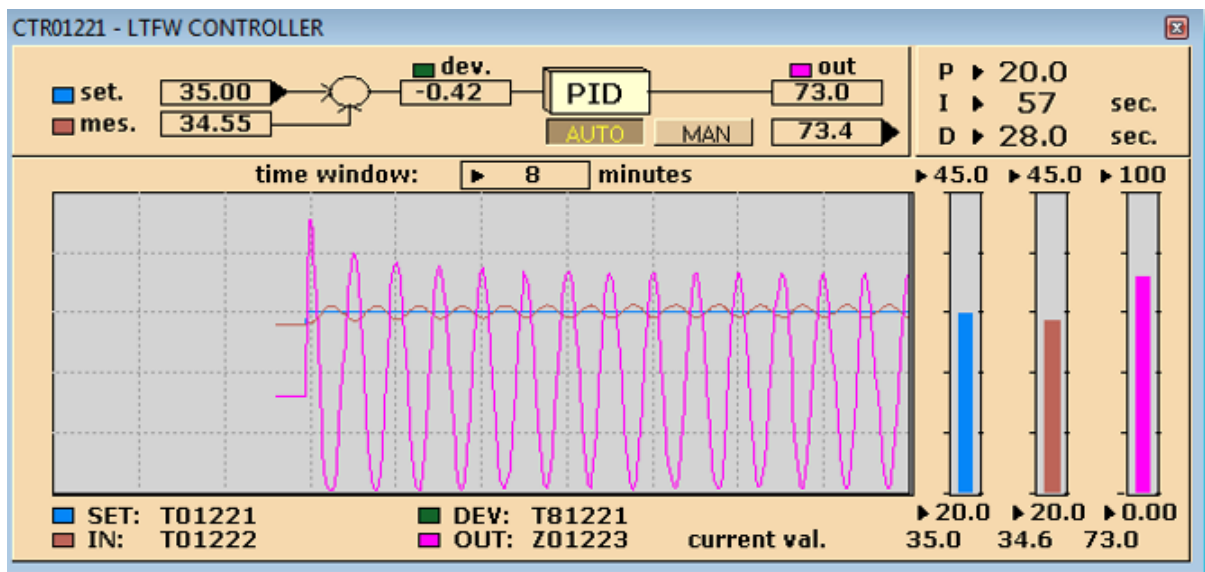
Slika 21. PI djelovanje u režimu trajnih oscilacija [3]

U trenutku kada je sustav ponovo došao na razinu stalnih oscilacija vrijeme integralnog djelovanje množi se s brojem tri. Kada se vrijednost integralnog djelovanja dovela do konačne točke ponovo bi trebali dobiti jedan podbačaj i jedan prebačaj ako je idealni slučaj. Time je regulator dobio karakteristike proporcionalnog djelovanja i integralnog djelovanja. Slika 22.



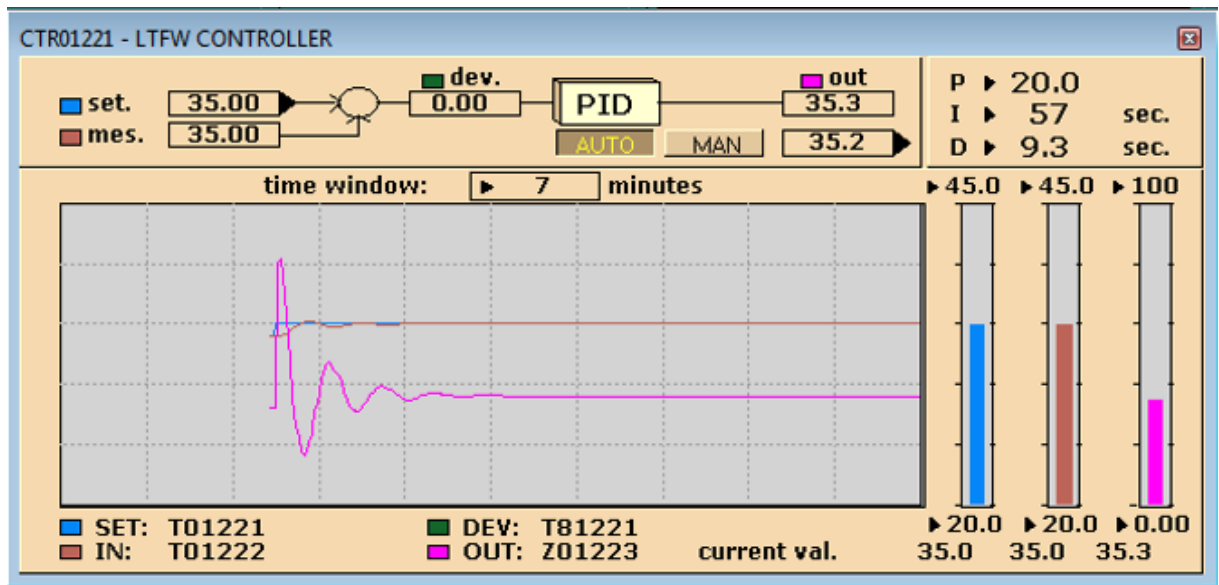
Slika 22. Podešen PI regulator[3]

Kada se derivacijsko djelovanje poveća trajne oscilacije dovode se u sustav. Slika 23.



Slika 23. Uvođenje D djelovanja [3]

PID regulator dobrih podešavanja dobiva se na način da se derivacijsko djelovanje podijeli s brojem 3. Za regulator koji je podešen najbolje sustav bi trebao imati jedan podbačaj i jedan prebačaj. U praksi to je teško postići. Slika 24.



Slika 24. Odziv sustava na podešen PID regulator [3]

U konačnici nakon dobivenih vrijednosti za proporcionalno, integracijsko i derivacijsko djelovanje u nisko-temperaturnom krugu vode završeno je podešavanje regulatora. Odaziv sustava trebao bi imati što manje vrijeme porasta, te maksimalni prebačaj, vrijeme smirivanja, regulacijsko trajno odstupanje i period maksimalnog prebačaja.

## 9. KVAROVI NA PID REGULATORU

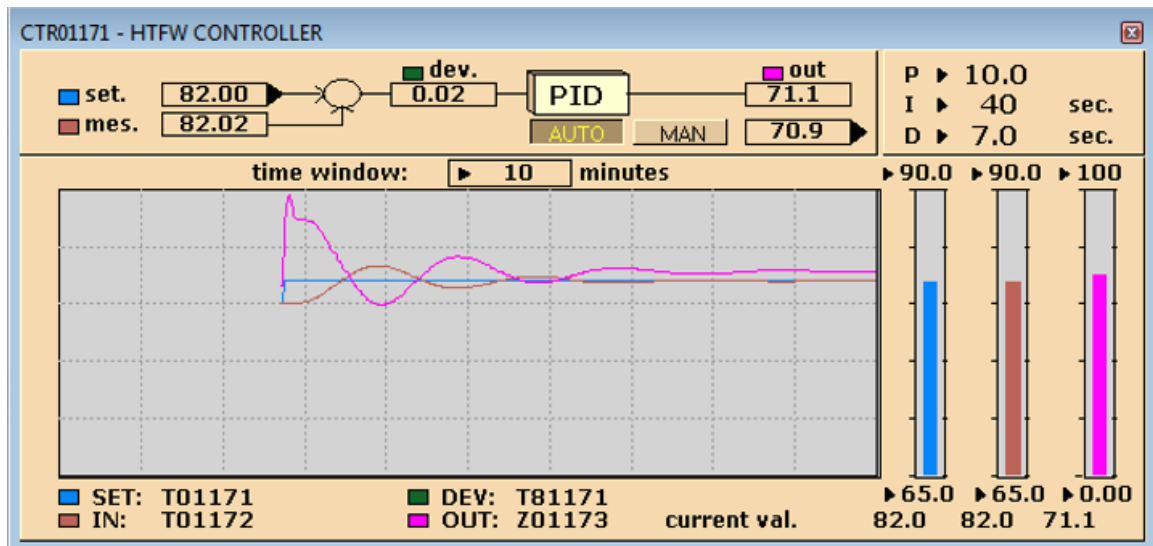
Na simulatoru MC90-V moguće je simulirati razne kvarove u sustavu slatke vode. Neki od mogućih kvarova na nisko-temperaturnom i visoko-temperaturnom krugu su: habanje pumpe ili elektromotora pumpe, kvar pumpe ili elektromotora pumpe, nestabilna kontrola, curenje vode iz pumpi, kvar aktuatora regulatora, prljav senzor temperature regulatora. Još jedan bitan parametar koji se može mijenjati na simulatoru kod kvarova je postotak kvara. Kod svih kvarova smo željenu temperaturu promijenili s 80 °C na 82 °C. Analizirati ćemo dva kvara: kvar aktuatora i prljav senzor temperature regulatora.

### 9.1. Prljav senzor temperature

Za prvi kvar simulirati ćemo prljavi senzor osjetnika temperature regulatora. Kvar smo prvo namijesiti na 30% kako bi vidjeli reakciju PID regulatora na zadani problem.

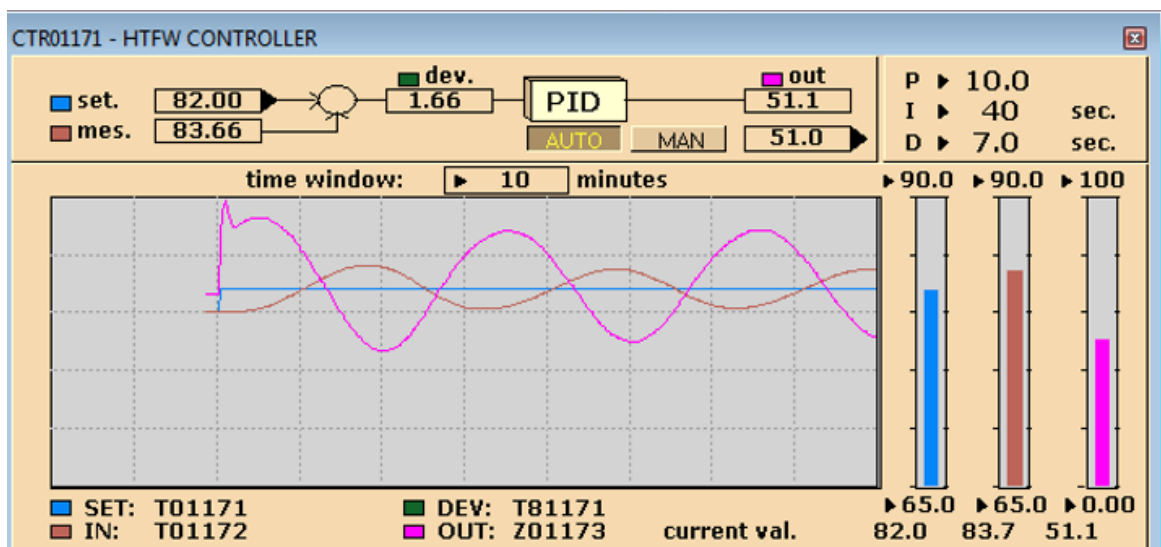
Na slici 25. možemo primijetiti kako regulator odmah reagira na promjenu željene temperature time da otvara troputni ventil, ali pošto je to ipak PID regulator ubrzo počinje s predviđanjem utjecaja otvorenosti ventila na promjenu temperature. Amplitude su nešto veće u usporedbi kada nema kvara, ali to je u potpunosti očekivano s obzirom da je osjetnik temperature 30% prljav. Regulator je kratkom vremenskom prozoru uspio vratiti sustav u ravnotežu bez regulacijskog trajnog odstupanja.





Slika 25. PID regulator sa prljavim senzorom temperature 30% [3]

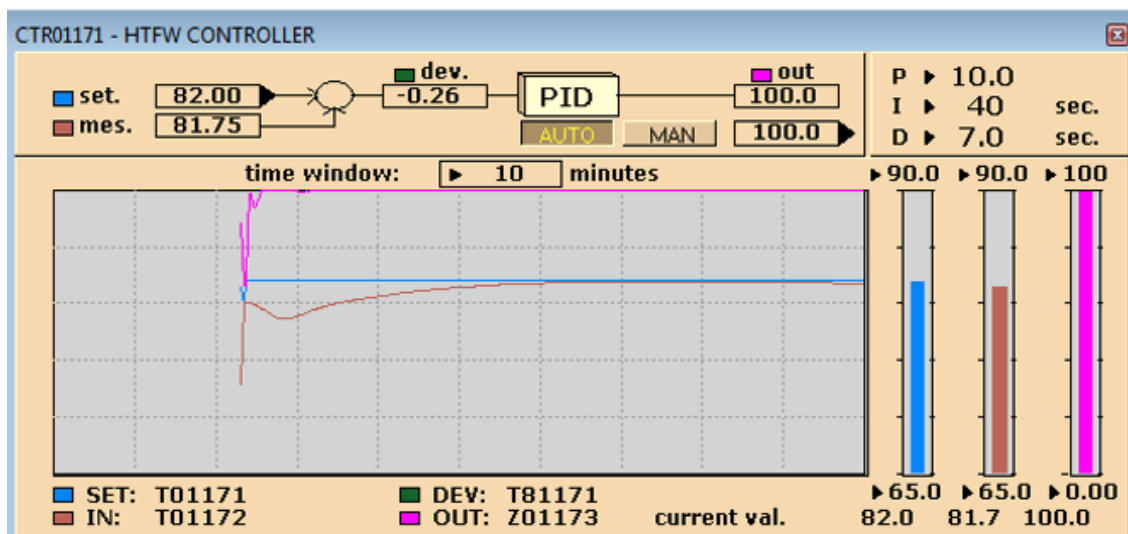
Slika 26. predstavlja zaprljanost senzora temperature regulatora od 80%. Na ovom grafu se primjećuje razlika u ponašanju PID regulatora. Zbog nekvalitetnog ulaznog signala, izmjerene temperature, regulator ne može pravovremeno reagirati i postojati će regulacijsko trajno odstupanje i nestabilnost sustava sve dok se osjetnik temperature ne očisti. Realna je mogućnost dešavanja ovog kvara zbog slatke vode niske kvalitete. Ovaj graf je jedan od načina kako možemo dijagnosticirati navedeni kvar te ga otkloniti.



Slika 26. PID regulator sa prljavim senzorom temperature 80% [3]

## 9.2. Kvar aktuatora

Postavili smo kvar aktuatora na 30%. Odmah možemo vidjeti promjenu u odnosu na ispravan rad PID regulatora. Izmjerena temperatura prvo pada te onda raste, a otvorenosti troputnog ventila je čitavo vrijeme 100%. Izmjerena temperatura se kroz par minuta približno izjednači sa željenom temperaturom, ali kako bi se to držalo u ravnoteži otvorenost troputnog ventila je 100%.



Slika 27. PID regulator s kvarom aktuatora [3]

## 10. ZAKLJUČAK

Brodski propulzijski motori se smatraju najvećima na svijetu gledajući veličinu i kapacitet. Veliki trgovački brodovi koji plove oceanima su pogonjeni ovim motorima. Takvi motori za propulziju generiraju ogromne količine snage sagorijevanjem goriva. Izgaranjem velike količine goriva nastaje i velika količina toplinske energije. Plinovi izgaranja dio topline prenose na klip, košuljicu i glavu cilindra. Ukoliko se ovi dijelovi motora ne hlade motor će stati sa radom te brod gubi svoje manevarske sposobnosti. Iz tog razloga krug rashladne slatke vode na brodu je od iznimnog značaja za funkcioniranje broda.

Na sadašnjim, ali i budućim brodovima sustav rashladne slatke vode je automatiziran kako bi hlađenje glavnog motora i ostalih brodskih uređaja bilo stabilno. Glavni dio takve automatizacije je PID regulator, on se trenutno pokazao najboljim za preciznu regulaciju bez velikih odstupanja te ima veliku prednost predviđanja utjecaja hlađenja. Što smo ovim radom i dokazali.

Kako bi PID regulator ispravno funkcionirao on mora biti pravilno podešen. Metoda koja se najčešće koristi za podešavanje PID regulatora je Ziegler-Nicholsonova, korisnik samo mora proporcionalno djelovanje dovest do ruba stabilnosti.

Danas je automatizacija prisutna u mnogim industrijskim granama. Ona je uvelike promijenila načine rada i uporabe na sustavima gdje se koristi. Ona smanjuje mogućnost ljudske pogreške čime se povećava sigurnost te je optimizira potrošnju energije to jest smanjuje se prosječna potrošnja goriva. Trenutno se radi na razvoju autonomnih brodova koji se manipuliraju bez posade na brodu, a upravljani su daljinski na kopnu. Procjena je da ova tehnologija neće biti široko upotrijebljena u bliskoj budućnosti, ali je neizbježan takav način razvoja. Postoji veliki broj problema koji se veže na ovu tehnologiju: sigurnost, opasnost od hakerskih napada, pravne regulative i utjecaj na zaposlenja ljudi na moru.

## LITERATURA

- [1] [https://marineengineeringonline.com/category/motor-engineering-knowledge/diesel\\_engines/](https://marineengineeringonline.com/category/motor-engineering-knowledge/diesel_engines/), (travanj – svibanj 2023.)
- [2] Bačić, V.: Voda i Brod, Viša pomorska škola Rijeka, Rijeka, 1975.
- [3] KONGSBERG SIMULATOR – ERS L11 5L90MC – VLCC\_Version MC90-V
- [4] Lenac, D.; kolegij: Goriva, maziva i voda
- [5] <https://blog.opticontrols.com/archives/author/jacques/page/38>, (svibanj 2023.)
- [6] <https://blog.opticontrols.com/page/41>, (svibanj 2023.)
- [7] <https://blog.opticontrols.com/archives/153>, (svibanj 2023.)
- [8] <https://medium.com/autonomous-robotics/pid-control-85596db59f35>, (lipanj 2023.)
- [9] Tomas, V., Šegulja, I., Valčić, M.; Osnove automatizacije, Sveučilište u Rijeci, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka. 2010.
- [10] KONGSBERG SIMULATOR – ERS L11 5L90MC – VLCC\_Version MC90-V – User's manual
- [11] Valčić, M.: Podešavanje parametara regulatora, Pomorski fakultet u Rijeci, Rijeka, 2015.

## POPIS SLIKA

Slika 1. Shema sustava slatke rashladne vode [3].....	5
Slika 2. Shema generatora slatke vode [3].....	8
Slika 3. Interaktivni algoritam [5].....	11
Slika 4. Neinteraktivni algoritam [6] .....	11
Slika 5. Paralelni algoritam [7].....	12
Slika 6. Učinak dodavanja $K_p$ ( $K_i$ , and $K_d$ ) ostao je konstantan [8].....	13
Slika 7. Učinak dodavanja $K_i$ ( $K_p$ , and $K_d$ ) ostao je konstantan [8]. .....	14
Slika 8. Učinak dodavanja $K_d$ ( $K_p$ , and $K_i$ ) ostao je konstantan [8]. .....	14
Slika 9. Usporedni prikaz prijelaznih karakteristika tipičnog procesa pri regulaciji različitim regulatorima [9] .....	15
Slika 10. Standardna petlja PID regulatora [10] .....	17
Slika 11. Petlja kaskadnog PID regulatora [10].....	18
Slika 12. Standardni PID regulator [3] .....	20
Slika 13. P regulator [3] .....	21
Slika 14. I regulator [3] .....	22
Slika 15. PI regulator [3] .....	23
Slika 16. PD regulator [3].....	24
Slika 17. PID regulator [3].....	25
Slika 18. PID regulator sa željenom temperaturom smanjenom za 4°C [3] .....	26
Slika 19. Shema sustava regulacije temperature slatke vode u NT krugu [11].....	27
Slika 20. P djelovanje s trajnim oscilacijama [3].....	28
Slika 21. PI djelovanje u režimu trajnih oscilacija [3].....	28
Slika 22. Podešen PI regulator[3] .....	29
Slika 23. Uvođenje D djelovanja [3] .....	29
Slika 24. Odziv sustava na podešen PID regulator [3] .....	30
Slika 25. PID regulator sa prljavim senzorom temperature 30% [3] .....	31
Slika 26. PID regulator sa prljavim senzorom temperature 80% [3] .....	32
Slika 27. PID regulator s kvarom aktuatora [3].....	32

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Kvaliteta vode [1].....	2
Tablica 2. Inhibitori koji se dodaju u vodu [1] .....	3
Tablica 3. Prosječna kakvoća vode destilata evaporatora [4] .....	9
Tablica 4. Pozitivne i negativne strane metoda [8].....	16