

# Sustav regulacije protoka u laboratorijskom postrojenju za pripremu fluida

---

Žuljević, Luka

Master's thesis / Diplomski rad

2023

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:992629>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-26**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U  
OSIJEKU FAKULTET ELEKTROTEHNIKE,  
RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA  
OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**SUSTAV REGULACIJE PROTOKA U  
LABORATORIJSKOM POSTROJENJU ZA  
PRIPREMU FLUIDA**

**Diplomski rad**

**Luka Žuljević**

**Osijek, 2023.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Osijek, 12.07.2023.

**Odboru za završne i diplomske ispite****Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Luka Žuljević
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	D-1435, 07.10.2021.
<b>OIB studenta:</b>	73558575624
<b>Mentor:</b>	prof. dr. sc. Dražen Slišković
<b>Sumentor:</b>	,
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	Robert Sabljo
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	izv. prof. dr. sc. Emmanuel-Karlo Nyarko
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	prof. dr. sc. Dražen Slišković
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	doc. dr. sc. Petra Pejić
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Sustav regulacije protoka u laboratorijskom postrojenju za pripremu fluida
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Automatika (zn. polje temeljne tehničke znanosti)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	Tema rezervirana za: Luka Žuljević Sumentor iz tvrtke: Robert Sabljo (Danieli-System doo, Osijek) Potrebno je izraditi sustav upravljanja protokom fluida na maketi postrojenja za pripremu fluida. Postrojenje se sastoji od dvaju spremnika tekućine, proporcionalnog ventila, upravljive crpke i mjerača protoka tekućine. Upravljački algoritam treba osigurati regulaciju protoka tekućine primjenom PID regulatora. Razvijeni PID algoritam potrebno je implementirati u raspoloživi PLC te napraviti analizu kakvoće regulacije i uz određene promjene parametara regulatora. Analizu kakvoće regulacije potrebno je provesti i uz promjene parametara procesa (npr. uslijed promjene temperature i gustoće tekućine) te promjene parametara crpke. Osim razvoja i realizacije sustava upravljanja te provedbe navedene analize, potrebno je
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)

<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	12.07.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:



**FERIT**

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

## IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 25.07.2023.

Ime i prezime studenta:

Luka Žuljević

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1435, 07.10.2021.

Turnitin podudaranje [%]:

4

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Sustav regulacije protoka u laboratorijskom postrojenju za pripremu fluida**

izrađen pod vodstvom mentora prof. dr. sc. Dražen Slišković

i sumentora, Robert Sabljo

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

## SADRŽAJ:

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. LABORATORIJSKO POSTROJENJE .....</b>	<b>3</b>
2.1. Izvedba laboratorijskog postrojenja .....	3
2.2. Upravljanje laboratorijskim postrojenjem.....	6
2.2.1. Upravljački dio laboratorijskog postrojenja .....	8
2.3 Primjena regulacije protoka u industriji čelika .....	9
2.4. PID regulacija.....	12
2.4.1. P regulator .....	13
2.4.2. PI regulator.....	15
2.4.3. PID regulator.....	18
2.4.4. Pokazatelji kakvoće regulacije.....	20
<b>3. MODELIRANJE SUSTAVA I IZRADA PROGRAMSKOG RJEŠENJA .....</b>	<b>22</b>
3.1. Matematički model sustava upravljanja protokom.....	22
3.2. Sinteza regulatora .....	25
3.2.1. Ziegler-Nichols metoda ruba stabilnosti .....	26
3.2.2. Ziegler-Nichols metoda prijelazne funkcije.....	28
3.2.3. Tehnički optimum .....	30
3.2.4. Metoda krivulje mjesta korijena .....	32
3.3. Projektiranje programskog rješenja .....	39
3.3.1. Opis programskog rješenja .....	40
3.4. Projektiranje korisničkog sučelja .....	46
3.4.1. Nadzorno-upravljački zaslon .....	47
3.4.2. Regulacijski zaslon.....	48
3.4.3. Analitički zason .....	50
3.4.4. Zaslon za kalibraciju ventila .....	51
<b>4. ANALIZA SUSTAVA REGULACIJE PROTOKA FLUIDA .....</b>	<b>52</b>
4.1. Regulacija protoka vode.....	52
4.1.1. Eksperimentale metode .....	52
4.1.2. Grafo-analitičke metode.....	55
4.2. Regulacija protoka rashladnog sredstva.....	59
4.2.1. Eksperimentalne metode .....	60

4.2.2. Grafo-analitičke metode .....	62
4.3. Analiza rezultata .....	65
5. ZAKLJUČAK .....	68
LITERATURA .....	69
SAŽETAK .....	71
ABSTRACT .....	72
ŽIVOTOPIS .....	73
PRILOZI.....	74

## 1. UVOD

Zahtjevi industrije današnjice na vrlo su visokoj razini. Problemi u industriji izuzetno su složeni i zahtijevaju pouzdano i kvalitetno rješenje. Gotovo ne postoji industrijsko postrojenje u kojem se ne koristi regulacija. U ovom smislu najčešće se koristi PID regulacija, kao mehanizam koji u zatvorenoj regulacijskoj petlji regulira određenu veličinu. Uz današnju realizaciju regulatora predstavlja vrlo pouzdano i relativno jeftino rješenje za implementaciju u svim granama industrije. Široka rasprostranjenost PID regulacije te njena primjena u industriji motivacija je za izradu ovog diplomskog rada. Osim toga, ideja je istražiti svojstva PID regulacije na primjeru sustava upravljanja regulacijom protoka fluida, pri čemu su parametri regulatora određeni iz više različitih metoda sinteze regulatora.

PID regulator u ovom radu primijenjen je u sustavu regulacije protoka na laboratorijskom pilot postrojenju. Izrađen je matematički model regulacijske staze (procesa) te su izračunati parametri regulatora eksperimentalnim i analitičkim postupcima sinteze. Kroz četiri različite grupe parametara PID regulatora analizirani su rezultati te je promatrana kakvoća regulacije. Svi podaci korišteni u analizi podataka mjereni su u stvarnom vremenu pomoću *IBA* programskog paketa. Za cjelokupan sustav izrađeno je programsko rješenje te korisničko sučelje u TIA portal-u. Prikazan je postupak proračuna svake grupe parametara regulatora. Korištene metode sinteze su: Ziegler-Nichols metode, metoda Krivulje mjesta korijena te Tehnički optimum. Fluidi korišteni u ovome radu su voda te rashladno sredstvo. Odabirom različitog fluida ideja je prikazati kako gustoća i temperatura fluida utječu na kakvoću regulacije.

U drugom poglavlju prikazana je izvedba makete postrojenja za regulaciju protoka tekućine, način rada makete postrojenja te način rada PLC-a (Programmable logic controller). Također, objašnjena je primjena PID regulacije protoka vode u industriji čelika te je teorijski opisan način rada PID regulatora. U trećem poglavlju izveden je matematički model procesa, provedena je sinteza regulatora te programsko rješenje, dok su u četvrtom poglavlju prikazani rezultati i provedena analiza kakvoće regulacije uz regulaciju protoka različitih fluida. Peto poglavlje predstavlja zaključak u kojem se komentiraju i remiziraju rezultati testiranja protoka rashladnog sredstva i vode.



## **Zadatak**

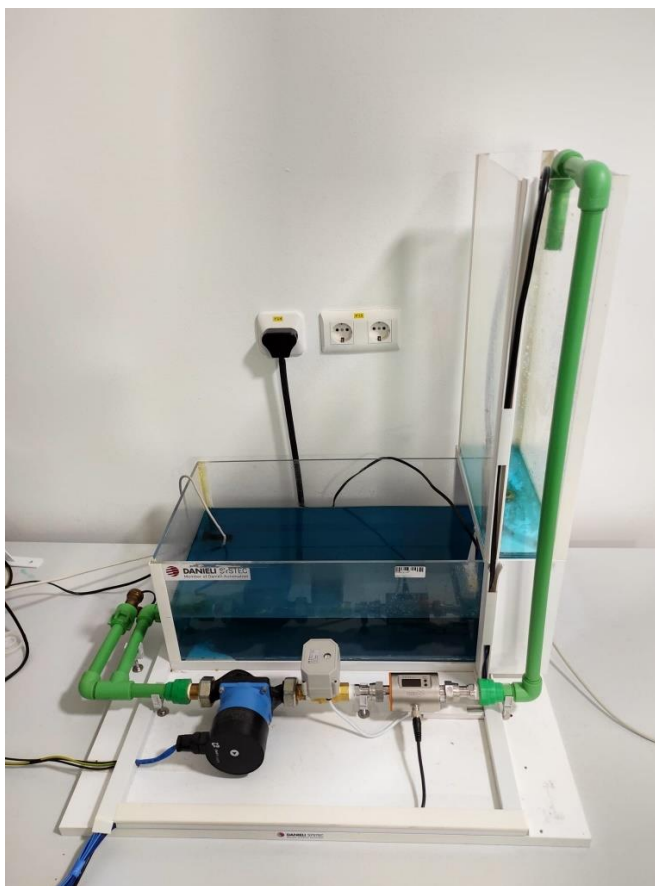
Potrebno je izraditi sustav upravljanja protokom fluida na maketi postrojenja za pripremu fluida. Postrojenje se sastoji od dvaju spremnika tekućine, proporcionalnog ventila, upravljive crpke i mjerača protoka tekućine. Upravljački algoritam treba osigurati regulaciju protoka tekućine primjenom PID regulatora. Razvijeni PID algoritam potrebno je implementirati u raspoloživi PLC te napraviti analizu kakvoće regulacije i uz određene promjene parametara regulatora. Analizu kakvoće regulacije potrebno je provesti i uz promjene parametara procesa (npr. uslijed promjene temperature i gustoće tekućine) te promjene parametara crpke. Osim razvoja i realizacije sustava upravljanja te provedbe navedene analize, potrebno je izraditi pripadno korisničko sučelje s vizualizacijom procesa te mogućnosti prikupljanja mjernih podataka u stvarnom vremenu.

## 2. LABORATORIJSKO POSTROJENJE

U ovom poglavlju opisana je izvedba laboratorijskog postrojenja, primjena PID regulacije protoka vode u industriji čelika te je objašnjen način rada PID regulatora.

### 2.1. Izvedba laboratorijskog postrojenja

Regulacija protoka tekućine izvodi se na postojećem laboratorijskom postrojenju (maketa) na kojem je napravljeno nekoliko izmjena u svrhu poboljšanja rada makete i mogućnosti izvođenja preciznijih mjerenja protoka i temperature tekućine. Izmjene su napravljene jer je na laboratorijskom postrojenju prije izmjena postojao proporcionalni ventil koji je bio u kvaru te je mjerач protoka bio iznimno niske preciznosti. U svrhu dobivanja preciznijih rezultata proporcionalni ventil i mjerач protoka zamijenjeni su novijim modelima. Na slici 2.1. prikazana je maketa nakon izmjena.



*Slika 2.1. Izgled laboratorijskog postrojenja za regulaciju protoka tekućine nakon izmjena*

Maketa se sastoji od sljedećih dijelova od kojih su izmjene napravljene na mjeracu protoka i proporcionalnom ventilu:

- mjerac protoka
- crpka
- dva spremnika fluida
- proporcionalni ventil
- upravljački dio (PLC, napajanje, releji)
- ostali dijelovi (postolje, cijevi, ventil za ispust fluida)

Opis rada makete: fluid uskladišten u donjem spremniku aktivacijom crpke pretače se u gornji spremnik. Gornji spremnik sadrži otvor koji ispušta fluid u donji spremnik, što omogućava cikličku izmjenu fluida iz jednog spremnika u drugi. Na cijevi koja spaja donji i gornji spremnik redom se nalaze crpka, proporcionalni ventil te mjerac protoka. Promjer cijevi je  $\frac{1}{2}$  inča, što iznosi 0.197 [cm]. Maketa sadrži kuglasti ventil koji se koristi za ispust fluida iz donjeg spremnika radi lakšeg održavanja.

Proporcionalni ventil (Slika 2.2.) temeljni je dio makete, predstavlja izvršni član sustava regulacije kojim se upravlja protokom. Proporcionalni ventil korišten na maketi je Tsai Fan čiji promjer iznosi  $\frac{3}{4}$  inča. Ventil se spaja pomoću tri vodiča, od kojih crveni vodič služi za napajanje ventila 24 [V], zeleni vodič koristi se za upravljački ulaz (0-10[V]) te crni vodič za negativni pol (*engl. ground*). Programibilni logički upravljač (PLC) pomoću analognog izlaza upravlja proporcionalnim ventilom, naponskim upravljačkim signalom u rasponu 0-10 [V]. Naponski iznos od 10 [V] odgovara stanju potpune otvorenosti ventila. U tom slučaju protok je maksimalan dok naponski iznos od 0 [V] predstavlja potpuno zatvoreni ventil te je tako i protok jednak nuli.



*Slika 2.2. Izgled proporcionalnog ventila Thai Fan*

Crpka NMT Mini koristi se za potiskivanje fluida iz donjeg u gornji spremnik. Crpka može raditi u tri različite brzine te tri različita načina rada koji se međusobno mogu ukomponirati. Crpka posjeduje detekciju rada na suho, točnije, stanje kada nema fluida u kućištu crpke. Maksimalan iznos tlaka crpke je 1 [MPa], dok je maksimalni kapacitet 66.667 [l/min].

Postoje digitalni i analogni mjerači. Digitalni su najčešće naponski dok su analogni strujni ili naponski. Analogni strujni mjerači u industriji najčešće imaju izlazni signal 4-20 [mA] ili 0-20 [mA], a naponski od 0-10 [V] ili  $\pm 10$  [V]. Analogni mjerači pretvaraju mjerenu fizikalnu veličinu u ekvivalentni strujni ili naponski kontinuirani signal, ovisno o vrsti mjerača. Mjerač protoka je mjerač koji mjeri protok te mjerenu fizikalnu veličinu (protok) pretvara u ekvivalentni strujni/naponski signal. PLC pomoću analognih ulaznih modula posjeduje mogućnost obrade signala s ovakvih mjerača. Za mjerenje protoka potreban je mjerač protoka. Mjerač protoka korišten na laboratorijskom postrojenju analogni je strujni mjerač sa strujnim izlaznim signalom od 4 - 20 [mA]. U slučaju maksimalnog mogućeg protok u cijevi, mjerač će generirati izlaznu struju od 20 [mA], dok u slučaju protoka jednakog nuli iznos struje će biti 4 [mA]. Ukoliko dođe do prekida vodiča vrijednost struje jednak je 0 [mA]. Na taj način PLC-u je omogućena dijagnostika prekida vodiča.

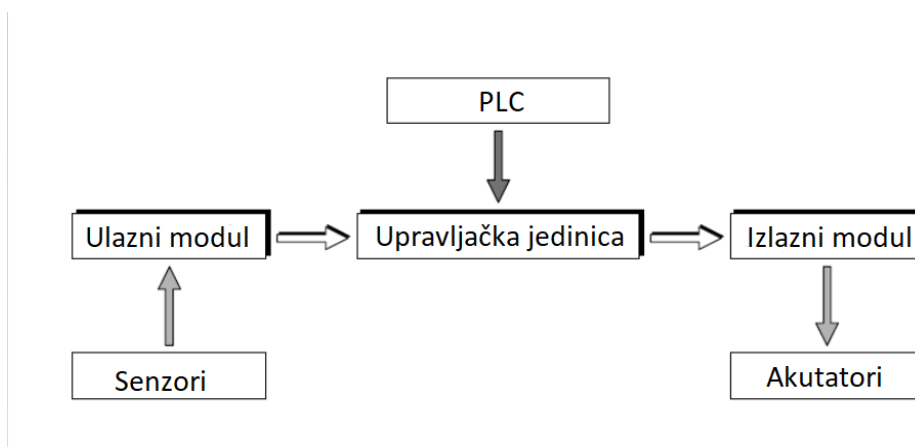


*Slika 2.3. Izgled mjerača protoka IFM SM6004*

IFM SM6004 mjerač protoka tekućine uz proporcionalni ventil i PLC predstavlja sustav upravljanja laboratorijskog postrojenja. Predstavlja mjerni član sustava regulacije protokom te daje kontinuiranu informaciju o protoku. Uz mjerač dolazi i konektor koji se sastoji od četiri vodiča (napojni vodič, negativni pol, signalni vodič protoka, signalni vodič temperature). Uz primarno mjerenje protoka mjerač posjeduje mogućnost mjerenja temperature fluida koji prolazi kroz mjerač. Mjerač (Slika 2.3.) sadrži zaslon koji prikazuje protok ili temperaturu ovisno o tome što je odabrano u izborniku mjerača. Mjerač mjeri protok od 0.1 [l/min] do 25 [l/min]. Informacije o temperaturi fluida koju prikazuje mjerač se u ovom radu ne koristi već se koristi informacija o temperaturi fluida dobivena s drugog mjerača temperature.

## 2.2. Upravljanje laboratorijskim postrojenjem

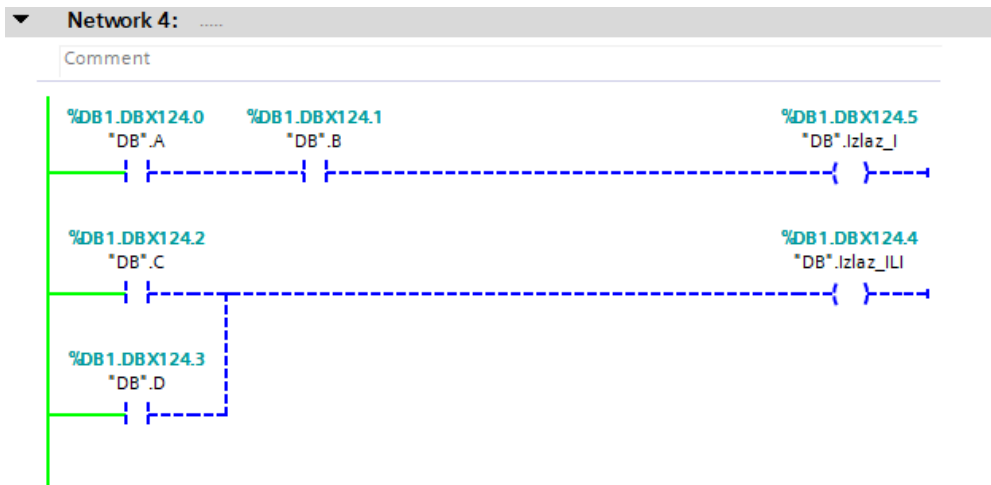
Za upravljanje laboratorijskim postrojenjem, odnosno maketom, koristi se PLC upravljač. PLC je vrsta industrijskog računala široke primjene. Obraduje podatke sa ulaza (mjerača), izvršava upravljački program, te upravlja stanjima izlaza (aktuatora, izvršnih članova). Na slici 2.4. prikazana je struktura PLC-a. [1]



*Slika 2.4. Struktura PLC-a [1]*

Ulazni moduli služe za pretvorbu fizičkog signala u upravljaču „čitljive“ signale. Izlazni moduli provode istu pretvorbu, ali obrnutim redoslijedom. Izlazni moduli pretvaraju upravljačke signale u signale koji upravljaju akuatorima (motori, crpke, ventilatori itd.). Upravljačka jedinica obrađuje signale ulaznih modula, izvršava program te postavlja stanja izlaznih modula.

PLC korišten za ovu maketu je Siemens 1513-1 PN. Programiranje Siemens PLC-a serije 1500 provodi se putem Tia Portal programskog okruženja. Programski jezici koji se mogu koristiti u ovom programskom okruženju su ljestvičasti programski jezik odnosno LAD (*ladder logic*), FBD (*function block diagram*), STL (*statement list*), SCL (*structured text*), SFC (*Sequential Function Charts*) te Graph. Program za upravljanje maketom napisan je u programskom jeziku LAD, koji je ujedno i najčešće korišteni jezik. Uz LAD koristio se i programski jezik SCL. LAD programski jezik zasnovan je na ljestvičastim dijagramima. Jedna programska linija LAD-a sastoji se od niza grafičkih simbola koji predstavljaju logičke elemente i druge komponente, kao što su brojači i ostalo. Jednostavnost i široka primjena LAD programskog jezika razlog je njegove velike popularnosti. Ime programskog jezika nastalo je zbog njegovog izgleda sličnog ljestvama. Ukratko, LAD programski jezik radi na principu mreža. Program se izvršava ciklički, PLC prolazi kroz cijeli program redoslijedno te kada se izvrši i zadnja mreža, kreće ispočetka. Primjeri SCL i LAD programskog jezika nalaze se na slikama 2.5. i 2.6. [1][2]



Slika 2.5. Prikaz ljestvičastog programskog jezika, LAD programski jezik

Network 4: PID COEFF

Pid coefficients due to selected parameters

```

1 //Manual mode
2 IF "HMI_DB".PID.Parameters = 0
3 THEN
4   "HMI_DB".PID.Manual_Mode := TRUE;
5   "SEMI_MODE_DB_PID_FW".ST_PID_COEFF.KP := "HMI_DB".PID.KP_Value;
6   "SEMI_MODE_DB_PID_FW".ST_PID_COEFF.KI := "HMI_DB".PID.KI_Value;
7   "SEMI_MODE_DB_PID_FW".ST_PID_COEFF.KD := "HMI_DB".PID.KD_Value;
8
9 END_IF;
10 // Mode Ziegler-Nichols 1
11 IF "HMI_DB".PID.Parameters = 1
12 THEN
13   "HMI_DB".PID.Manual_Mode := "FALSE";
14   "SEMI_MODE_DB_PID_FW".ST_PID_COEFF.KP := 15.00;
15   "SEMI_MODE_DB_PID_FW".ST_PID_COEFF.KI := 5.679;
16   "SEMI_MODE_DB_PID_FW".ST_PID_COEFF.KD := 9.906;
17 END_IF;
18 // Mode Ziegler-Nichols 2
19 IF "HMI_DB".PID.Parameters = 2
20 THEN
21   "HMI_DB".PID.Manual_Mode := "FALSE";
22   "SEMI_MODE_DB_PID_FW".ST_PID_COEFF.KP := 4.787;
23   "SEMI_MODE_DB_PID_FW".ST_PID_COEFF.KI := 2.131;
24   "SEMI_MODE_DB_PID_FW".ST_PID_COEFF.KD := 2.690;
25 END_IF;
26 // Technical optimum
27 IF "HMI_DB".PID.Parameters = 3
28 THEN
29   "HMI_DB".PID.Manual_Mode := "FALSE";
30   "SEMI_MODE_DB_PID_FW".ST_PID_COEFF.KP := 4.843;
  
```

Slika 2.6. Prikaz SCL programskog jezika

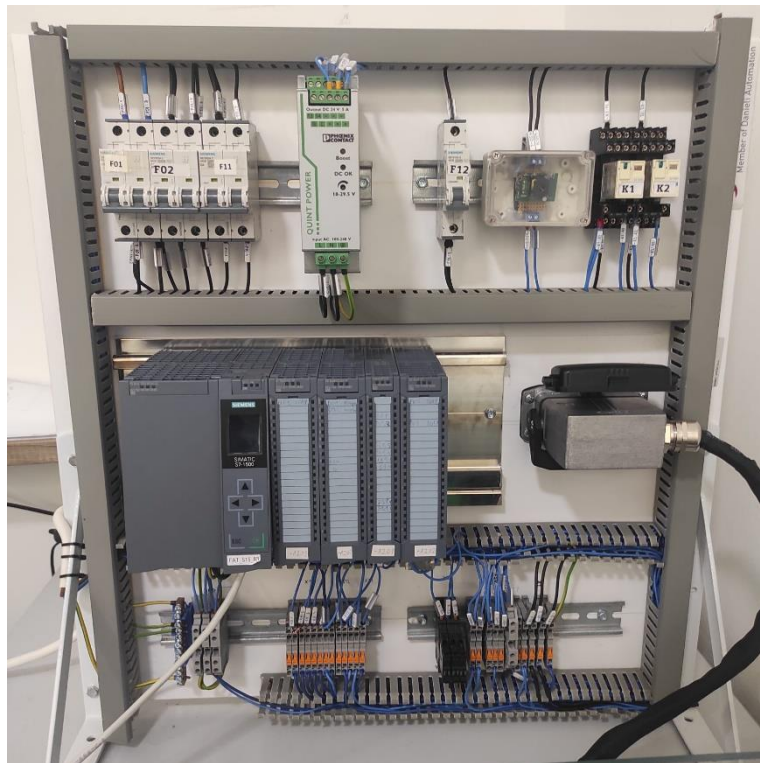
## 2.2.1. Upravljački dio laboratorijskog postrojenja



*Slika 2.7. Siemens S7 1500, CPU 1513-1 PN [4]*

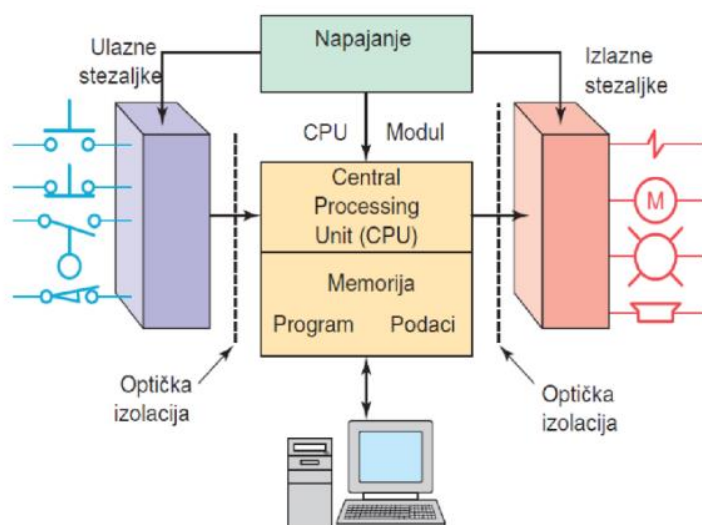
Upravljački dio laboratorijskog postrojenja predstavlja 'mozak' cijelog postrojenja. Upravljački dio sastoji se od PLC-a te ventila i mjerača. PLC je industrijsko računalo koje se sastoji od središnje procesorske jedinice te ulazno-izlaznih modula, raznih modula za komunikaciju i drugo. PLC koji se koristi za upravljanje ovom maketom je CPU 1513-1 PN koji proizvodi tvrtka Siemens. Ovaj PLC je iz obitelji S7-1500 logičkih upravljača koja je trenutno najnovija serija na tržištu. CPU sadrži i mali zaslon putem kojeg se može vidjeti u kojem je stanju PLC, alarmi te ostale mnogobrojne funkcije.

Ova verzija PLC-a posjeduje najsnažniju računalnu arhitekturu dosad te posjeduje brzinu i točnost koja je iznimno bitna s obzirom na izazove u industriji modernog svijeta. Prikaz PLC-a korištenog na laboratorijskom postrojenju nalazi se na slici 2.7.



*Slika 2.8. Izgled upravljačkog dijela laboratorijskog postrojenja*

Za napajanje CPU-a koristi se proizvod tvrtke Siemens pod oznakom PS 1507 snage 60 [W]. Upravljački dio sastoji se od ulaznih i izlaznih modula povezanih s CPU-om. Svi uži dijelovi upravljačkog sustava nalaze se unutar elektro ormara (*engl. rack*) u koji spadaju napajanje, PLC te ulazno izlazni moduli. Elektro ormar uređaj je koji unutar jednog okvira sadrži module koji međusobno komuniciraju. Za postrojenje ove složenosti dovoljna su sveukupno četiri modula. Na slici 2.8. prikazani su dijelovi redom. Prvi s lijeva modul je za napajanje, zatim CPU te nakon njega četiri modula prethodno opisana.



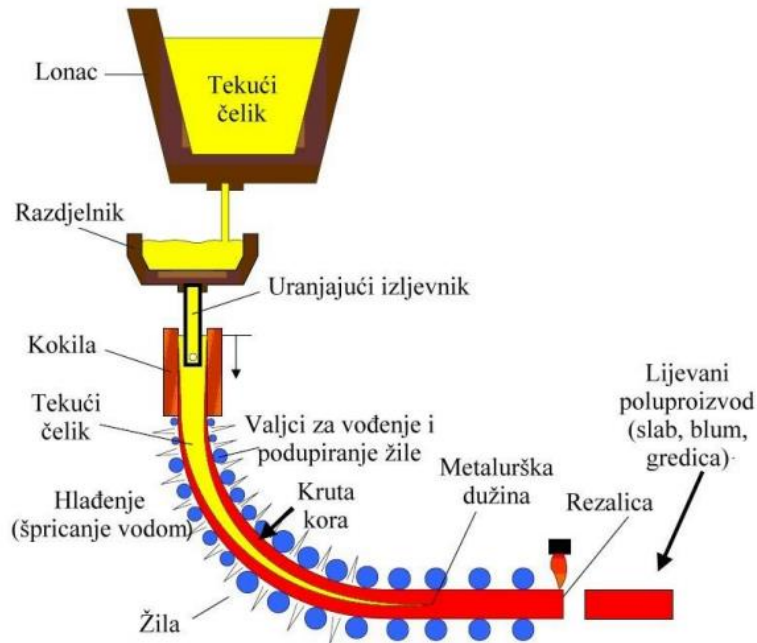
**Slika 2.9.** Arhitektura PLC-a [5]

Za bolje razumijevanje povezanosti sustava napajanja sa CPU-om i modulima na slici 2.9. može se vidjeti arhitektura PLC-a te povezanost ulazno-izlaznih modula sa CPU-om te međusobna komunikacija. Digitalni moduli služe za digitalne ulaze i izlaze (releji) dok analogni moduli služe za analogne ulaze i izlaze kao što su otvorenost ventila, očitavanje temperature, protoka, razine vode u spremniku i slično.

## 2.3 Primjena regulacije protoka u industriji čelika

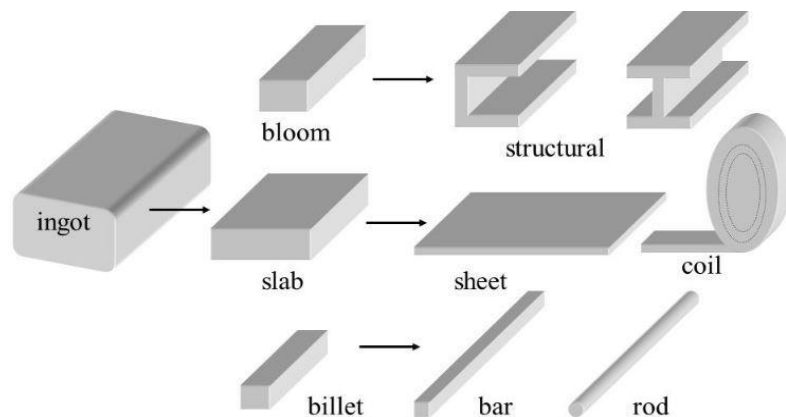
Kontinuirano lijevanje je važan segment u industriji izrade čelika. Prilikom kontinuiranog lijevanja tokom taljenja i obrade čelika stvaraju se visoke temperature, time je važno odvoditi toplinu. Slika 2.10. prikazuje shemu stroja za kontinuirano lijevanja sa svim pripadajućim dijelovima. Tekući čelik se nalazi u loncu (*eng. Ladle*) i temperatura mu je oko 1500°C, dok je temperatura lijevanog poluproizvoda negdje između 800°C i 1000°C te je potrebno odvesti veliku količinu topline u kratkom periodu. Zbog toga je iznimno važan sustav hlađenja. Hlađenje lijevanog čelika dijeli se na primarno i sekundarno hlađenje. [3]





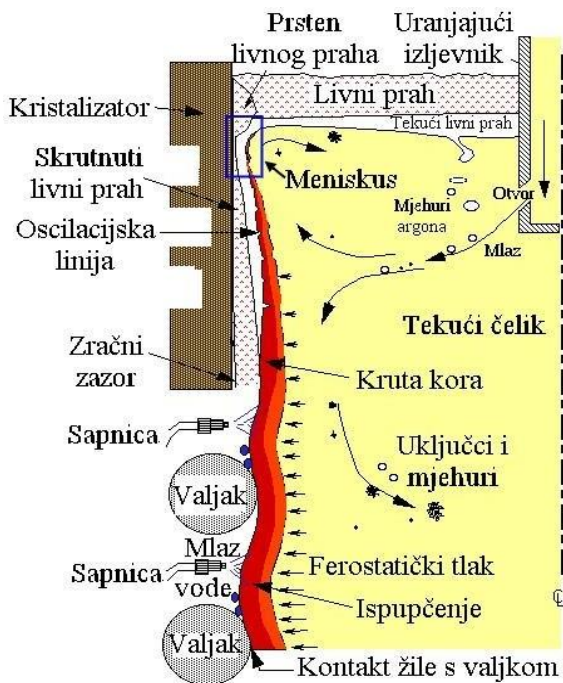
**Slika 2.10.** Shematski prikaz kontinuiranog valjanja čelika

Vrste lijevanih poluproizvoda su blumovi, slabovi i gredice. Gredice (eng. *Billet*) su lijevani poluproizvodi poprečnog presjeka u obliku kvadrata sa stranicom dužine do 150 mm i poluproizvodi kružnog poprečnog presjeka do 150 mm u promjeru. Gredice se prerađuju u proizvode poput šipke ili žice. Blumovi (engl. *Bloom*) su lijevani poluproizvodi sa stranicama od 150 mm i više i omjerom debljine prema širini manjim od 1:1.3, te lijevani poluproizvodi kružnog poprečnog presjeka 150 mm te veći. Blumovi se koriste za izradu H-profila, L-profila te tračnica i slično. Slabovi (engl. *Slab*) su lijevani poluproizvodi poprečnog presjeka oblika pravokutnika debljine do 250 mm s omjerom debljine prema širini većim od 1:1.3. Slabovi se najčešće koriste za izradu traka, limova i ploča. Oblici su prikazani na slici 2.11. [3]



**Slika 2.11.** Prikaz oblika lijevanog poluproizvoda

Kokila (eng. *Mould*) predstavlja najvažniju komponentu na stroju za kontinuirano lijevanje. Sastoji se od kristalizatora oko kojeg se nalazi komora kroz koju struji voda za hlađenje kristalizatora. Kristalizator je s obje strane otvoren te ima cjevasti oblik. Lijevanje tekućeg čelika vrši se iz razdjelnika preko uranjajućeg izljevnika dok se stranice kristalizatora hlade vodom. Dužina hlađenja kreće se od 600 do 900 mm. Donja strana kristalizatora ima pomično dno. Poprečni presjek kristalizatora je različit (pravokutni, kružni, kvadratni) i njime se definira oblik poluproizvoda. [3]



**Slika 2.12.** Prikaz kristalizatora i stvaranje krute kore u kristalizatoru za lijevanje slabova i hlađenja direktnim prskanjem vode po površini žile ispod kokile

Primarno hlađenje je zapravo hlađenje kristalizatora i njime dolazi do skrućivanja kore čelika u kokili. Kako se žila pomiče prema dolje tako se i povećava debljina krute kore što je prikazano na slici 2.12. gdje žuta boja označava tekući čelik dok crvena označava krutu koru čelika.

Kruta kora na izlazu iz kristalizatora treba biti dovoljne debljine kako bi izdržala ferostatički tlak tekućeg čelika u unutrašnjosti žile. Dakle, čelik nije u potpunosti u čvrstom agregatnom stanju nakon primarnog hlađenja već se kora čelika dovodi u kruto stanje dok je unutrašnjost zapravo tekuća. [3]

Slika 2.12. uvećani je prikaz kokile i kristalizatora, oko kristalizatora nalazi se komora kroz koju struji voda. Kontrola protoka vode kroz kokilu je iznimno važna jer povećanjem brzine žile mora se povećati i protok vode kroz komoru kako bi došlo do pravilnog hlađenja materijala. Regulacija protoka vode, a neposredno i temperature izvršava se proporcionalnim ventilom upravljanim od strane PLC koristeći metodu upravljanja PID regulatorom. Voda ulazi u komoru s donje strane kokile te izlazi s gornje strane, mjeri se temperatura vode na ulazu i izlazu iz kokile. Izlazna temperatura vode iz kokile biti će veća nego ulazna temperatura vode zbog toga što se odvodi toplina tekućeg čelika. Povećanjem protoka smanjit će se razlika između izlazne i ulazne temperature. Do smanjenja razlike temperature dolazi zbog smanjenja neposrednog kontakta između čelika i vode, samim time se odvodi i manje topline. Povećanjem brzine lijevanja, potrebno je povećati i protok kako bi se zadržao efekt odvođenja topline. Čelik kroz kalup teče brže stoga ga treba brže i hladiti što se postiže povećanjem protoka. Veličina kontrolirana PID regulacijom u ovom slučaju je razlika temperature upravljana povećanjem ili smanjenjem protoka. Povećanjem protoka razlika temperatura će se smanjiti dok će se smanjenjem protoka razlika temperatura povećati dok je brzina lijevanja nepromijenjena. U tom slučaju koriste se dva PID regulatora. Prvi PID regulator kontrolira razliku temperature pomoću protoka dok drugi PID regulator kontrolira protok koji je zapravo izlazna veličina prvog PID regulatora.

## 2.4. PID regulacija

U ovom potpoglavlju opisan je način rada PID regulatora. Potpoglavlje objašnjava načelo rada PID regulatora i njegovu primjenu uz primjere korištenja PID regulacije. P označava proporcionalni dio, I označava integralni dio, dok D označava derivacijski dio. Obradena je P regulacija, PI regulacija te PID regulacija.

Prije analize svakog regulatora potrebno je razumjeti način na koji P, PI i PID regulatori djeluju. Sva tri regulatora rade na drugačiji način te im ulaz, odnosno  $R(s)$  u regulacijski krug predstavlja željenu veličinu (brzina vrtnje motora, tlak u cijevi, protok i sl.) dok  $U(s)$  regulatora predstavlja upravljačku veličinu. Regulirana veličina može biti frekvencija, brzina okretanja crpke, otvorenost proporcionalnog ventila i sl. Regulirana veličina se mjeri i uspoređuje s željenom vrijednosti (ulaz). Razlika između ulaza i izlaza regulatora daje pogrešku.

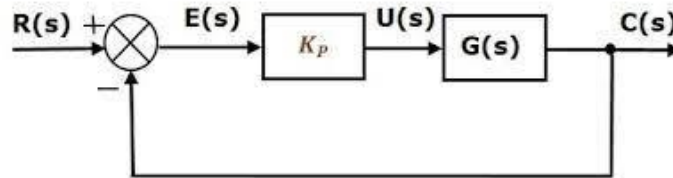
### 2.4.1. P regulator

Na slici 2.13.  $R(s)$  predstavlja ulaz ili željeni iznos veličine,  $U(s)$  predstavlja upravljačku veličinu na izvršni član kojim se upravlja željenom veličinom,  $E(s)$  predstavlja pogrešku, dok  $C(s)$  predstavlja trenutni iznos veličine kojom se upravlja, odnosno izlaz.  $U(s)$  predstavlja umnožak proporcionalne konstante ( $K_p$ ) i pogreške.  $G(s)$  predstavlja prijenosnu funkciju procesa te vrijedi:

$$E(s) = C(s) - R(s), \quad (2-1)$$

$$U(s) = K_p \cdot E(s), \quad (2-2)$$

$$C(s) = G(s) \cdot U(s), \quad (2-3)$$



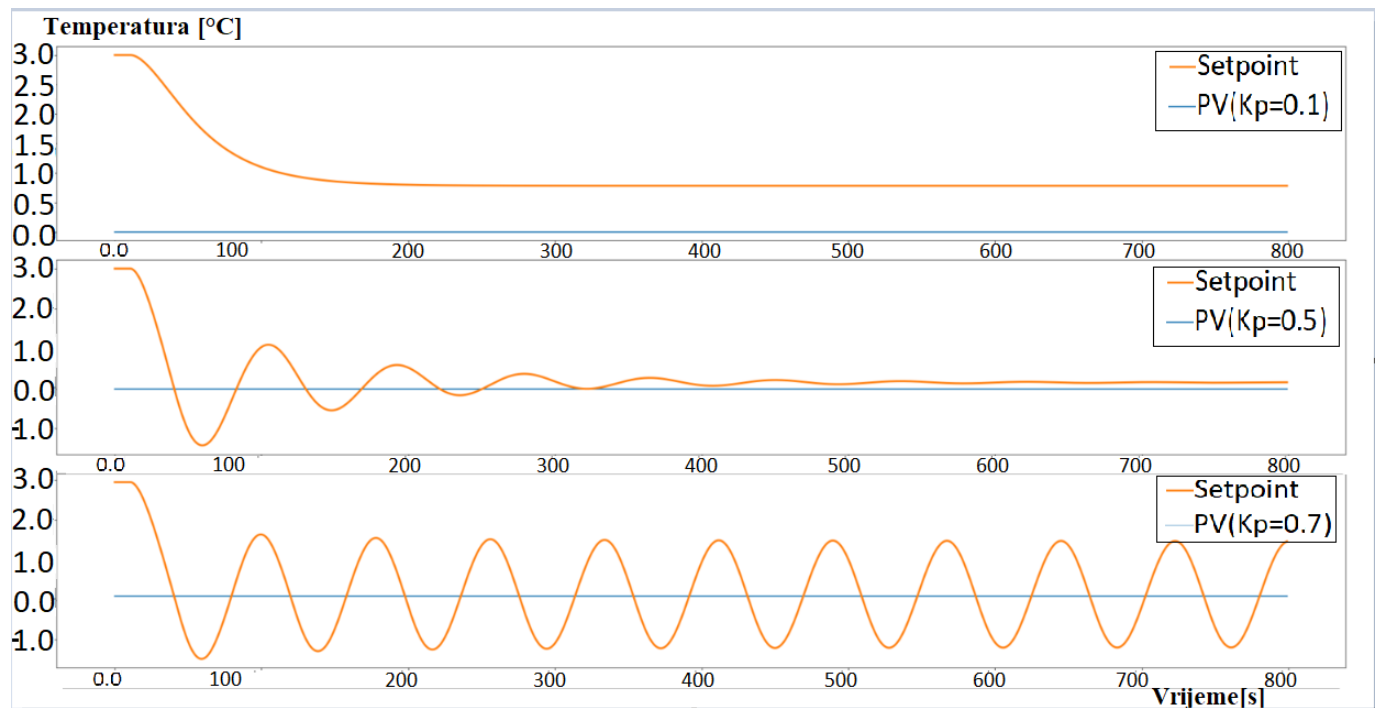
*Slika 2.13. Regulacijski krug P regulatora u S području, blok dijagram [7]*

Općenito, P regulator koristi se za stabilizaciju nestabilnog procesa prvog reda s jednom pohranom energije. Sustav prvog reda s jednom pohranom energije sustav je koji može energiju pohraniti u samo jednom spremniku energije (npr. kondenzator). Takvi sustavi ne mogu imati oscilacija. Glavna upotreba P regulatora je smanjenje pogreške ustaljenog stanja sustava u stabilnom stanju sustava. Kako se proporcionalni faktor pojačanja  $K_p$  povećava, pogreška ustaljenog stanja sustava se smanjuje. Međutim, usprkos smanjenju, P regulacija nikada ne može eliminirati pogrešku ustaljenog stanja sustava. Nadalje, prevelikim povećanjem pojačanja  $K_p$  dolazi do oscilacija te sustav postaje nestabilan. Kako se proporcionalno pojačanje povećava, to osigurava manju amplitudu [12] i faznu rezervu [12], bržu dinamiku koja zadovoljava širi frekvencijski pojas [12] i veću osjetljivost na šum. [6]

Ovaj regulator možemo koristiti kada je proces tolerantan na stalnu grešku u stacionarnom stanju. Osim toga, primjenjujući P regulator smanjuje se vrijeme porasta i nakon određene vrijednosti redukcije na pogrešku u stacionarnom stanju. P regulacija uzrokuje oscilacije ako je dovoljno agresivna u prisutnosti transportnog kašnjenja i/ili mrtvog vremena. Što je više kašnjenja (višeg reda), to dovodi do većeg problema. Transportno kašnjenje javlja se kod proporcionalnog ventila u vidu vremena koje

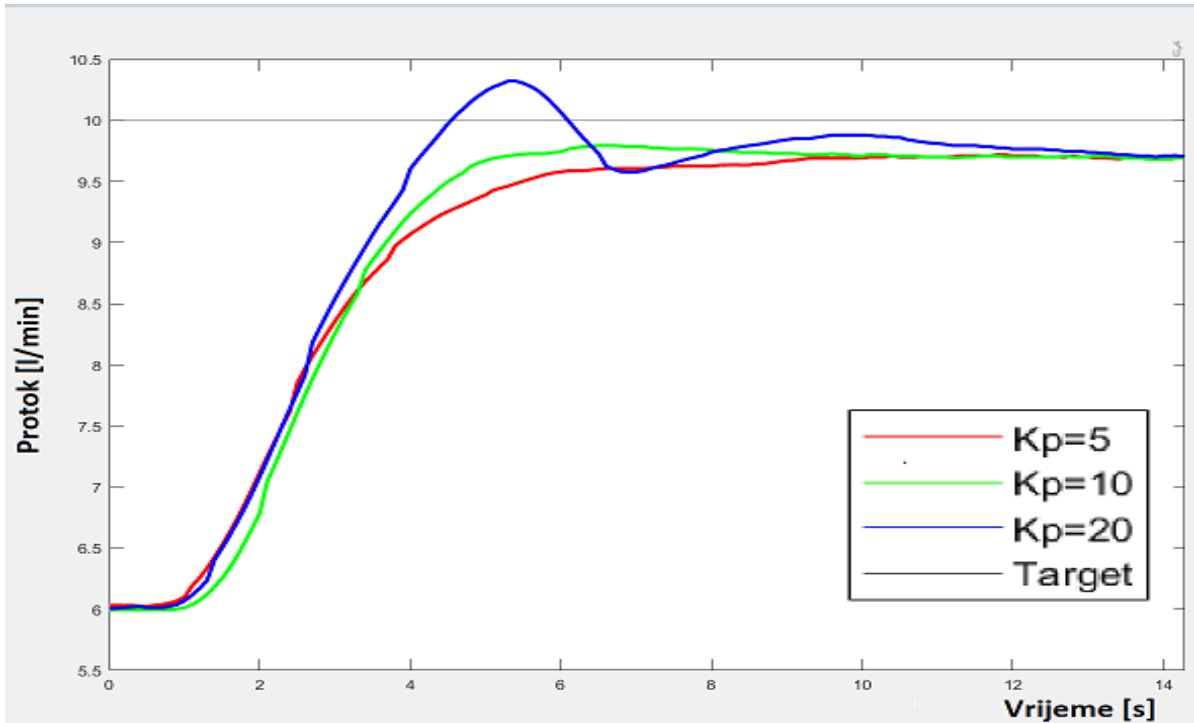
je potrebno tekućini da ispuni cijev između ventila i mjerača. Transportno kašnjenje javlja se samo u slučaju kada cijev prethodno nije potpuno puna (po cijelom volumenu).

Problem prevelikog povećanja iznosa pojačanja  $K_p$  su vlastite oscilacije, tj. regulirana veličina kruži oko željene vrijednosti, sustav postaje nestabilan. Slika 2.14. prikazuje kako povećanje  $K_p$ -a utječe na pogrešku ustaljenog stanja te pojavu vlastitih oscilacija. Vidljivo je da se povećanjem pojačanja  $K_p$  greška ustaljenog stanja smanjuje, no prevelikim pojačanjem dolazi do oscilacije (Slika 2.14.,  $K_p = 0.7$ ).



**Slika 2.14.** Utjecaj povećanja proporcionalnog dijela regulatora na odziv sustava [15]

Povećanjem proporcionalnog dijela PID regulatora, uz uvjet da su derivacijski te integralni dio jednaki nuli (što je zapravo P regulator), promatran je vremenski odziv protoka (Slika 2.15.). Radna točka u početnom vremenu iznosila je 6 [l/min] dok je željena vrijednost iznosila 10 [l/min], Povećanjem proporcionalnog dijela vrijeme porasta se smanjuje, funkcija protoka je 'brža' odnosno ima veći nagib. Povećanjem pojačanja  $K_p$  dolazi i do pojave oscilacije, što je vidljivo kod slučaja kada je  $K_p = 20$ . Stacionarna pogreška i dalje je prisutna, što je vidljivo na slici 2.16. uspoređujući tri grafa koji predstavljaju funkciju protoka za različite vrijednosti pojačanja  $K_p$  i crno obojani graf koji predstavlja željenu vrijednost iznosa je 10 [l/min].



*Slika 2.15. Utjecaj povećanja proporcionalnog dijela regulatora kod regulacije protoka fluida u laboratorijskom postrojenju*

#### 2.4.2. PI regulator

PI regulator je vrsta regulatora formirana kombinacijom proporcionalnog i integralnog djelovanja. Stoga je nazvan PI regulator. Ova kombinacija dva različita regulatora proizvodi učinkovitiji regulator koji eliminira nedostatke povezane sa svakim od njih. Koristeći PI regulator umjesto P regulatora potpuno se uklanja položajna pogreška [12]. PI regulator se najčešće realizira PID-regulatorom kojem se isključi derivacijska komponenta (derivacijsko djelovanje) te je razlog tomu što derivacijska komponenta pojačava šum. Kod protoka od 100 [l/min] mjerač može zbog utjecaja elektromagnetskog polja očitati vrijednost nekoliko puta veću od 100 [l/min], što će drastično povećati upravljačku veličinu i uzrokovati trzaj aktuatora.

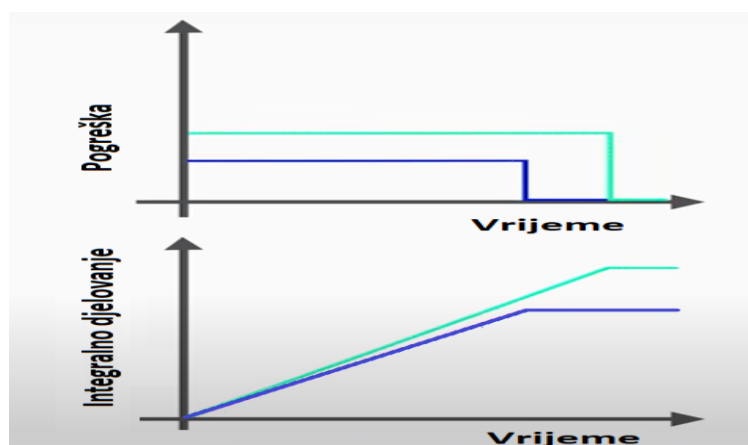
Upravljačka veličina PI-regulatora može se prikazati kroz dvije komponente:

$$u(t) = u(t)_p + u(t)_i = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt, \quad (2-4)$$

odnosno u S-području :

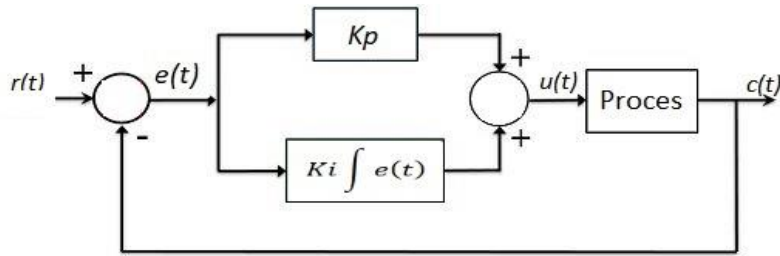
$$U(s) = K_p \cdot E(s) + K_i \frac{E(s)}{s}. \quad (2-5)$$

Primjenom PI regulatora  $K_d = 0$ , a  $K_i$  i  $K_p$  potrebno je ugoditi prema promatranoj regulacijskoj stazi (ovisno o prijenosnoj funkciji). PI regulacija uvedena je kako bi se umanjili nedostaci P regulatora. Integralni dio djeluje zajedno s proporcionalnim dijelom PI regulatora dok sustav ne dosegne grešku ustaljenog stanja. Kada sustav dosegne grešku ustaljenog stanja tada integralni dio regulatora tu pogrešku detektira kao vrijednost koja nije nula. Integral je površina ispod krivulje, stoga promatranjem krivulje regulacijskog odstupanja  $e(t)$ , integralni dio postiže sve veću vrijednost odnosno raste iznos površine ispod krivulje regulacijskog odstupanja  $e(t)$  (Slika 2.16.). Integralni dio sumira pogrešku u vremenu. Ovisno o iznosu  $K_i$  integralni dio će djelovati sve dok ne dođe do nulte vrijednosti. U slučaju tromih sustava kao što je sustav regulacije protoka fluida, integralni dio značajno utječe na iznos nadvišenja jer je potrebno duže vremena do postizanja željene vrijednosti regulirane veličine stoga je iznos sumirane pogreške veći. PI regulator je najkorišteniji tip regulatora u industriji (vidi 2.3. Primjena regulacije u industriji čelika). [10]

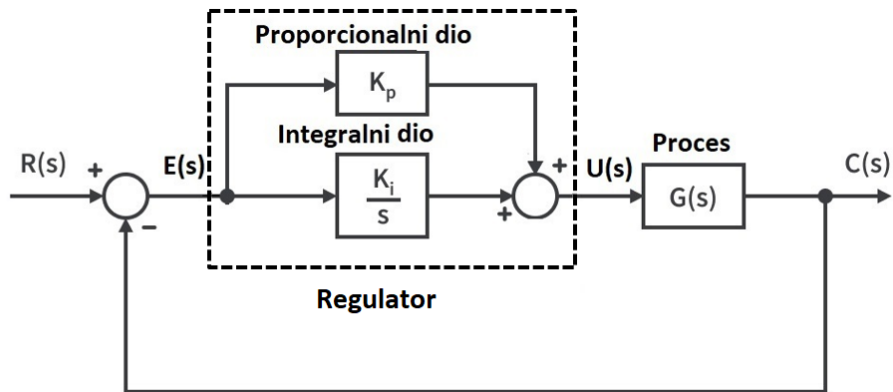


**Slika 2.16.** Prikaz integralnog djelovanja s obzirom na regulacijsko odstupanje

Na slikama 2.17. i 2.18. prikazani su blok dijagrami PI regulatora u vremenskom i S-području. S-područje dobiva se Laplaceovom transformacijom vremenskog područja. Kod različitih izračuna vezanih za regulator i regulatorsku stazu više se koriste varijable sustava i dinamički matematički modeli izraženi u S-području. U S-području daleko je lakše provoditi analizu i sintezu jer su matematičke operacije vrlo jednostavne (niskog reda). Korištenjem S - područja analiziraju se linearni vremenski nepromjenjivi LTI (*engl. Linear time-invariant system*) sustavi i prijelazne pojave LTI sustava. LTI sustavi su sustavi u kojima izlazni signal pokazuje linearnost s ulaznim signalom. Većina procesa modelira se kao LTI sustavi jer teorija nelinearnih sustava nije razvijena (razvijena za posebne slučajeve). Sustavi koji su nelinearni pokušavaju se aproksimirati oko statičke radne točke kao linearni sustavi. Razlika između P i PI regulatora vidljiva je i u blok dijagramu (vidi slike 2.13. i 2.17.)



Slika 2.17. Regulacijski krug PI regulatora u vremenskom području, blok dijagram [8]



Slika 2.18. Regulacijski krug PI regulatora u S području, blok dijagram [9]

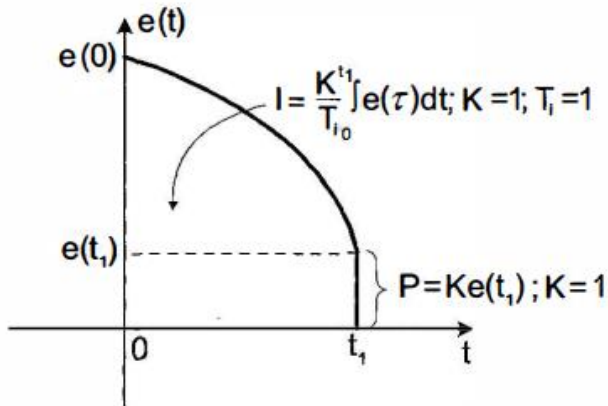
Prijenosna funkcija PI regulatora:

$$G_r(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_R \frac{1+sT_i}{sT_i}. \quad (2-6)$$

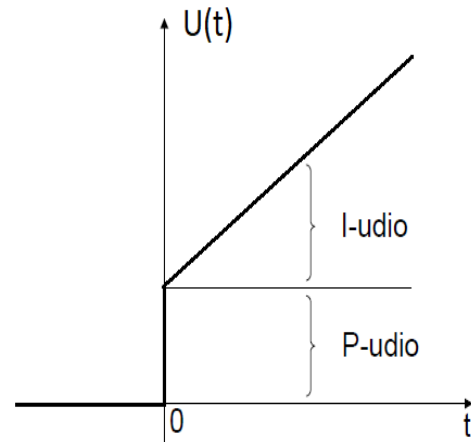
Prijenosna funkcija PI regulatora (izraz 2-6) ima dva parametra, pojačanje i vremensku konstantu. Na temelju izraza 2-4 može se nacrtati formiranje signala regulacijskog odstupanja PI regulatora tj. dati grafički uvid u osnovne dvije komponente upravljačkog signala tj. proporcionalni i integralni dio. Na slici 2.19. vidljivo je smanjenje regulacijskog odstupanja u vremenu, označen je integralni dio tj. površina ispod krivulje regulacijskog odstupanja  $e(t)$ . Promatrajući sliku 2.19. vidljivo je da integralni dio djeluje cijelo vrijeme tj. od trenutka najvećeg iznosa regulacijskog odstupanja do trenutka kada je regulacijsko odstupanje jednako nuli. Kada regulacijska staza dođe u stanje u kojemu je  $e(t)=\text{konst.}$ , upravljački signal se povećava kako bi natjerao reguliranu veličinu na porast te tako smanjiti regulacijsko odstupanje. Proporcionalni dio ostat će konstantan u tom slučaju (vidi poglavlje 3.1.). Kada  $e(t)=\text{konst.}$  tada će se proporcionalnom dijelu koji je konstantan pribrojiti integralni dio jer je proporcionalan površini ispod krivulje te će upravljački signal biti veći. U tom trenutku dolazi do povećanja regulirane veličine. Kada  $e(t) < 0$ , tj. u jednom trenutku



regulirana veličina će biti nešto veća od željene veličine no upravljački signal će se tada smanjivati dok  $e(t) = 0$  te je tada iznos proporcionalnog dijela jednak nuli, ostaje samo integralni dio kojemu ostaje suma iznosa pogreške. Na slici 2.20. prikazana je prijelazna funkcija PI regulatora za skokovitu pobudu u trenutku 0. [11]



*Slika 2.19. Formiranje signala regulacijskog odstupanja PI regulatora*



*Slika 2.20. Prijelazna funkcija PI regulatora [12]*

### 2.4.3. PID regulator

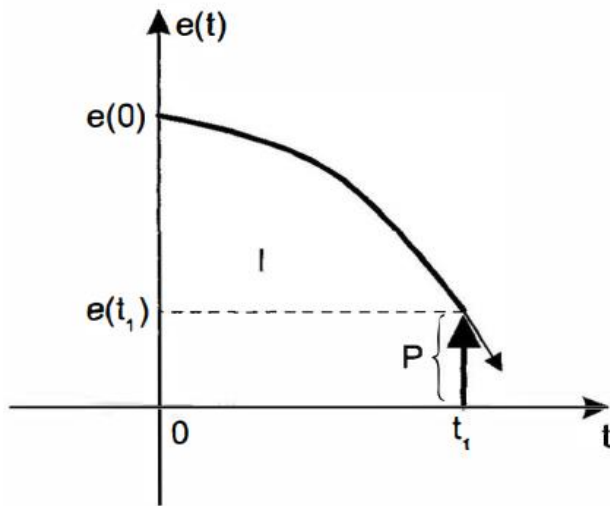
Proporcionalno-integralno-derivacijski (PID) regulator je regulacijski algoritam koji se koristi u industriji i univerzalno je prihvaćen u industrijskoj regulaciji. Kao što naziv govori, PID algoritam se sastoji od tri osnovna dijela: proporcionalne, integralne i derivacijske koji se mijenjaju kako bi se dobio optimalan odziv. PID regulator zapravo je PI regulator kojemu je dodan derivacijski dio.

Upravljačka veličina PID regulatora može se prikazati kroz tri komponente:

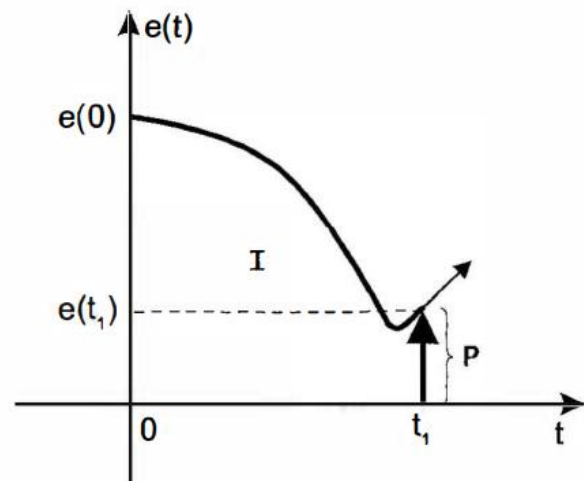
$$u(t) = u(t)_p + u(t)_i + u(t)_d = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (2-7)$$

Prema relaciji 2-7 derivacijski dio se zbraja s integralnim i proporcionalnim dijelom PID regulatora. Derivacijski dio proporcionalan je promjeni odnosno trendu regulacijskog odstupanja. S derivacijskim

dijelom se zapravo pretpostavlja buduće ponašanje regulacijskog odstupanja u vremenu.



Slika 2.21. Primjer 1. [11]



Slika 2.22. Primjer 2. [11]

Slika 2.21. i 2.22. prikazuju signal regulacijskog odstupanja. Prilikom trenutka  $t_0$  javlja se skokovita pobuda na ulazu. Na slici 2.21. u trenutku  $t_1$  vidljiv je nagli pad krivulje regulacijskog odstupanja dok je na slici 2.22. vidljiv nagli rast krivulje regulacijskog odstupanja. Ukupni signal na izlazu PI regulatora biti će isti u oba primjera ako se pretpostavlja jednaka površina ispod krivulje regulacijskog odstupanja. Iako PI regulator promatra ove dvije situacije kao identične (trenutak  $t_1$  na slici 2.21. i 2.22.), potrebne su potpuno različite intervencije te dolazi do potrebe za korištenjem derivacijskog dijela regulatora. U prvom slučaju krivulja regulacijskog odstupanja naglo pada te je potrebna brza reakcija regulatora i smanjivanje upravljačkog signala. U drugom slučaju signal regulacijskog odstupanja naglo raste te je potrebna reakcija suprotna prvom slučaju tj. upravljački signal se mora povećavati kako bi se regulacijsko odstupanje smanjilo. Derivacijski dio omogućuje brzu reakciju kod nagle promjene regulacijskog odstupanja i predviđanje ponašanja krivulje regulacijskog odstupanja. Integralni dio omogućuje povećanje upravljačkog signala kako bi regulacijsko odstupanje postiglo vrijednost nula, a proporcionalni dio omogućuje eliminiranje vlastitih oscilacija te predstavlja energetska sadržaj unutar područja regulacijskog odstupanja. Obično su parametri PID regulacije u odnosu:  $K_p > K_i > K_d$ .  $K_d$  je obično malog iznosa jer je vrlo osjetljiv na šum. Ukoliko se pojavi kratka, ali intenzivna smetnja (*engl. outlier*) na signalu mjernog člana, derivacijski dio će znatno djelovati na izvršni član. Na primjer, željena vrijednost protoka iznosi 100 [l/min], koristi se mjerac protoka koji očitava iznos protoka od 100 [l/min] te proporcionalni ventil koji predstavlja izvršni

član. Regulacija se provodi PID regulatorom kod kojeg postoji derivacijski dio. Uslijed trenutne pojave promjenjivog magnetskog polja inducira se struja u signalnom vodiču mjernog člana. U tom trenutku očitava se vrijednost protoka od 500 [l/min]. Derivacijski dio otvara proporcionalni ventil uslijed trenutne pojave vrlo visokog iznosa pogreške iako je smetnja nastala utjecajem magnetskog polja trenutna. Dolazi do nepotrebnog otvaranja ventila te je to jedan od razloga zbog kojeg je derivacijski dio često izrazito malog iznosa ili je jednak nuli pa PID regulator zapravo postaje PI regulator. [11]

#### 2.4.4. Pokazatelji kakvoće regulacije

Kroz postupke sinteze određuje se regulator s kojim će se postići zadano dinamičko vladanje regulacijskog kruga. Pokazatelji kakvoće regulacije mogu se odrediti u vremenskom ili frekvencijskom području. Pokazatelji kakvoće regulacije u vremenskom području nazivaju se izravni ili neposredni pokazatelji dok se pokazatelji u frekvencijskom području nazivaju neizravni ili posredni pokazatelji. Pokazatelji kakvoće regulacije definirani su na prijelaznoj funkciji, odnosno frekvencijskoj karakteristici zatvorenog regulacijskog kruga. [11] [12] [14]

Pokazatelji kvalitete korišteni u analizi regulacije protoka fluida su:

- maksimalno nadvišenje,  $\sigma_m$ ,
- vrijeme prvog maksimuma,  $t_m$ ,
- vrijeme porasta,  $t_r$ ,
- vrijeme ustaljivanja,  $t_\varepsilon$ .

Maksimalno nadvišenje  $\sigma_m$  predstavlja iznos maksimalnog regulacijskog odstupanja nakon prvog dostizanja željenog stacionarnog stanja. Maksimalno nadvišenje zapravo je omjer razlike između maksimalnog iznosa regulirane veličine i iznosa u stacionarnom stanju i razlike između stacionarnog stanja i početne točke. Izražava se u postocima [11][12]

Maksimalno nadvišenje definira se:

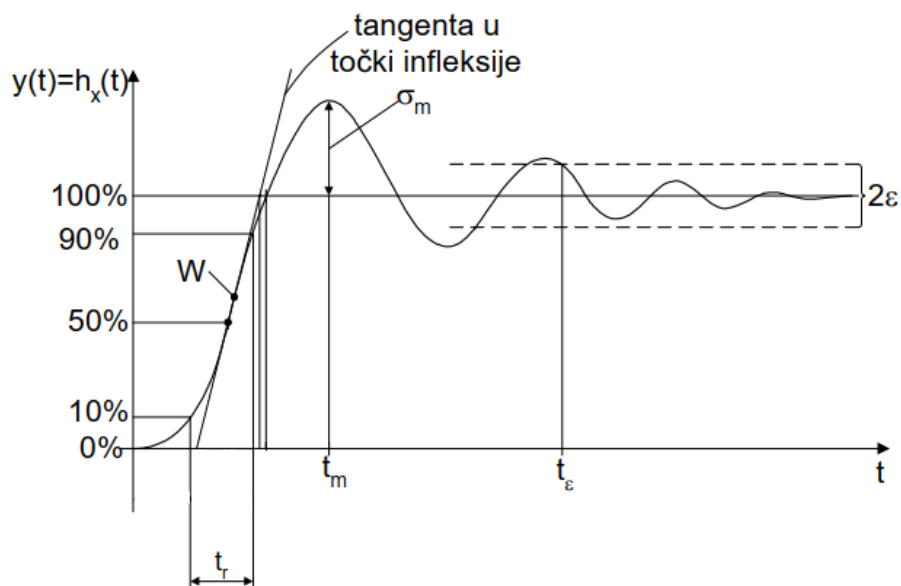
$$\sigma_m = \frac{y_{max} - y_{stac}}{y_{stac} - y_{poč.toč}}, \quad (2-8)$$

gdje  $y_{max}$  predstavlja iznos maksimalne dosegnute vrijednosti regulirane veličine,  $y_{stac}$  predstavlja vrijednost regulirane veličine u stacionarnom stanju, a  $y_{poč.toč}$  označava iznos stacionarnog stanja prije dovođenja stepenaste pobude.

Vrijeme prvog maksimuma  $t_m$  vrijeme je pri kojem se pojavljuje maksimalno nadvišenje, vrijeme porasta  $t_r$  predstavlja vrijeme koje je potrebno reguliranoj veličini da dosegne vrijednost 0.1 do 0.9 ukupnog do iznosa u stacionarnom stanju, odnosno ako je protok iznosa 5 [l/min] te se dovede skokovita pobuda odnosno rast iznosa 3 [l/min], vrijeme porasta biti će vrijeme potrebno funkciji protoka od iznosa 5.3 [l/min] do 7.7 [l/min].

Vrijeme ustaljivanja  $t_\varepsilon$  vrijeme je kojim je određeno trajanje procesa u kojem regulacijsko odstupanje postane manje od zadanog iznosa  $\varepsilon$ . U analizi kakvoće regulacije protoka fluida na laboratorijskom postrojenju uzima se  $\varepsilon = 3$  [%].

Svi pokazatelji kakvoće regulacije prikazani su na slici 2.23.



Slika 2.23. Prikaz parametara kakvoće regulacije [12]

Pokazatelji kakvoće regulacije  $\sigma_m$  i  $t_\varepsilon$  ukazuju na prigušenje regulacijskog kruga dok je veličinama  $t_r$  i  $t_m$  određena brzina odnosno dinamika sustava upravljanja. [12]

### 3. MODELIRANJE SUSTAVA I IZRADA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

U ovom poglavlju izvodi se matematički model promatranog procesa, koji je osnova za sintezu PID regulatora prema odabranim metodama. Poglavlje sadrži sintezu regulatora<sup>1</sup> kroz tri različita pristupa (Ziegler-Nichols, KMK i tehnički optimum) te izradu programskog rješenja za nadzorno upravljanje s vizualizacijom procesa, te prikupljanjem mjernih podataka u stvarnom vremenu. U potpoglavlju 3.1. izveden je matematički model procesa, a u potpoglavlju 3.2. provedena je sinteza regulatora. U potpoglavlju 3.3. obrađeno je projektiranje programskog rješenja, dok je u potpoglavlju 3.4. sadržano projektiranje korisničkog sučelja.

#### 3.1. Matematički model sustava upravljanja protokom

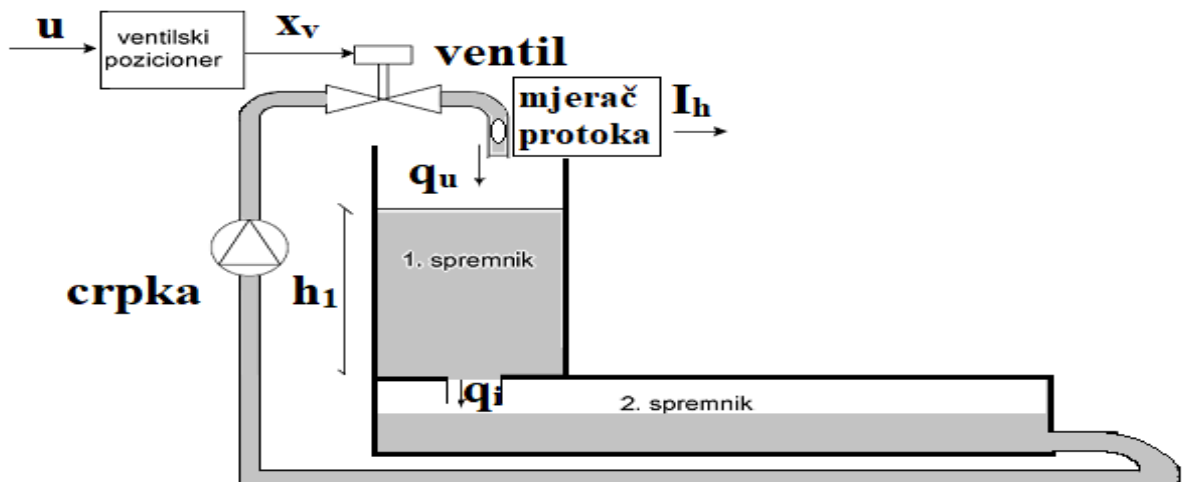
Radi lakše izrade matematičkog modela i razumijevanja sustava potrebno je napraviti shematski prikaz sustava (Slika 3.1). Ukratko, najvažnije varijable promatranog sustava na temelju kojih se izrađuje matematički model su :

- $u$  – naponski upravljački signal ventilskeg pozicionera [V],
- $xv$  – otvorenost ventilskeg pozicionera,
- $qu$  – promatrani protok fluida ujedno i procesna veličina [l/min],
- $ih$  – strujni signal mjernog pretvornika (mjerača protoka) [mA].

Varijable  $qi$ ,  $hl$  koje se mogu uočiti na shematskom prikazu ne utječu na protok  $qu$  i nisu obuhvaćene (budućim) regulacijskim krugom, te stoga nisu relevantne za izradu matematičkog modela.

---

<sup>1</sup> Sinteza regulatora – određivanje parametara regulatora, odnosno iznosa proporcionalnog, integralnog i derivacijskog dijela PID regulatora, grafo-analitičkim ili eksperimentalnim metodama



*Slika 3.1. Shema laboratorijskog postrojenja za regulaciju protoka fluida*

Protok laboratorijskog postrojenja isključivo ovisi o poziciji ventilskog pozicionera, odnosno proporcionalnog ventila, s obzirom da crpka nije upravljiva (moguće ručno upravljanje crpkom). Diferencijalna jednačba koja opisuje ovisnost protoka  $q_u$  o otvorenosti ventila  $x_v$  gdje je:

$T_v$  – vremenska konstanta ventila,  
 $K_v$  – konstanta proporcionalnosti ventila (ovisi o konstrukciji ventila),

glasi:

$$q_u + T_v \frac{dq_u}{dt} = K_v \cdot x_v . \quad (3-1)$$

Jednačba ovisnosti otvorenosti ventila  $x_v$  o naponskom signalu (upravljajućoj veličini)  $u$  [V] na proporcionalnom ventilu glasi:

$$x_v = K_m \cdot u , \quad (3-2)$$

gdje je:

$K_m$  – konstanta proporcionalnosti (pojačanje) ventilskog pozicionera.

Uvrštavanjem relacije (3-2) unutar jednačbe (3-1) diferencijalna jednačba sustava je:

$$q_u + T_v \frac{dq_u}{dt} = K_v \cdot K_m \cdot u , \quad (3-3)$$

Konstante  $K_v$ ,  $K_m$  te  $T_v$  su nepoznate te ih je potrebno odrediti eksperimentalnim putem.  $T_v$  predstavlja vremensku konstantu ventila i određuje se snimanjem prijelazne funkcije. Detaljnije objašnjenje eksperimentalnog određivanja konstante  $T_v$  prikazano je u odjeljku 3.2.2.

Ako je poznata otvorenost ventila moguće je izračunati  $K_m$  na način:

Kod iznosa signala od 0 [V] otvorenost ventila je 0 (ventil je u potpunosti zatvoren, otvorenost 0 [%]) dok je kod naponskog signala od 10 [V] iznos otvorenosti ventila 1 (ventil je u potpunosti otvoren, otvorenost 100 [%]). Promatrajući odnos otvorenosti ventila i naponskog signala određena je vrijednost  $K_m=0.1$ .

Za određivanje konstante  $K_v$  potrebno je promotriti relaciju (3-1) u kojoj se s lijeve strane jednadžbe nalazi izraz koji odgovara protoku fluida kroz proporcionalni ventil. Protok u tom slučaju ovisi o umnošku otvorenosti ventila  $x_v$  i konstanti proporcionalnosti ventila  $K_v$ . Pretpostavlja se linearna promjena protoka u odnosu na otvorenost ventila. Poznat je maksimalan mogući protok koji iznosi 14.450 [l/min] kod otvorenosti ventila 1. Uz maksimalnu otvorenost ventila od  $x_v = 1$ , vrijede sljedeće relacije:

$$q_u + T_v \cdot \frac{dq_u}{dt} = 14.45 \left[ \frac{l}{min} \right], K_v \cdot x_v = 14.45 \left[ \frac{l}{min} \right], \quad (3-4)$$

$$K_v = 14.45. \quad (3-5)$$

Uvrštavanjem konstanti  $K_v$ ,  $K_m$  i  $T_v$  u relaciju (3-3) dobiva se jednadžba sljedećeg oblika,  $T_v = 4.48$  (vidi odjeljak 3.2.2.)

$$q_u + 4.48 \cdot \frac{dq_u}{dt} = 1.445u \quad (3-6)$$

Relacija (3-6) predstavlja matematički model promatranog sustava izraženog u vremenskom području, za određivanje prijenosne funkcije te određivanje funkcije PID regulatora potrebno je matematički model izraziti u s-području. Laplaceovom transformacijom jednadžbe (izraz 3-6) dobiva se sljedeći oblik:

$$Q_u(s) + s \cdot T_v \cdot Q_u(s) = 1.445 \cdot U(s). \quad (3-7)$$

Ako se  $Q_u(s)$  izluči, dobiva se sljedeći izraz:

$$Q_u(s) \cdot (1 + s \cdot T_v) = 1.445 \cdot U(s), \quad (3-8)$$

pa prijenosna funkcija procesa glasi:

$$G_p(s) = \frac{Q_u(s)}{U(s)} = \frac{1.445}{(1+s \cdot T_v)} \quad (3-9)$$

Protok  $Q_u(s)$  predstavlja procesnu izlaznu veličinu, a napon  $U(s)$  upravljačku veličinu. Promatrajući relaciju (3-10) vidljivo je kako se radi od  $PT_1$  članu. Ovaj  $PT_1$  član u obzir uzima vremensko kašnjenje ventila, ali ne i kašnjenja u sustavu te kašnjenje mjerača protoka. Ovakva prijenosna funkcija nije zadovoljavajuća te je proces potrebno opisati  $PT_2$  članom.  $PT_1$  vladanje je pregrub opis dinamike procesa pa je potrebno ići do dinamike drugog reda. S obzirom da je vremenska konstanta mjernog člana jednaka 0.3 sekunde (upute proizvođača mjerača) prijenosna funkcija glasi:

$$G_s(s) = \frac{Q_u(s)}{U(s)} = \frac{K_{i\check{c}}}{(1+s \cdot T_v)} \cdot \frac{K_{m\check{c}}}{(1+s \cdot T_{m\check{c}})} \quad (3-10)$$

Uzimajući u obzir pojačanje sustava  $K_s = K_{i\check{c}} \cdot K_{m\check{c}}$ ,  $K_s = 1.5418$ , gdje je  $K_{i\check{c}} = 1.445$  (vidi (3-9)) dok je  $K_{m\check{c}} = 1.067$  (upute proizvođača mjerača).

Stoga prijenosna funkcija regulacijske staze glasi:

$$G_s(s) = \frac{Q_u(s)}{U(s)} = \frac{1.5418}{(1+s \cdot 4.48)} \cdot \frac{1}{(1+s \cdot 0.3)} \quad (3-11)$$

Prijenosna funkcija određena relacijom (3-11) konačna je prijenosna funkcija procesa koja se koristi u daljnjoj analizi i sintezi.

### 3.2. Sinteza regulatora

Prije testiranja i analize vladanja zatvorenog regulacijskog kruga potrebno je odrediti parametre regulatora. Za sintezu regulatora korištene su Ziegler-Nichols metode (ZN), metoda krivulje mjesta korijena (KMK) te metoda Tehničkog optimuma (TO) pri čemu su parametri regulatora za regulaciju protoka na promatranom procesu s ciljem postizanja zadane kakvoće regulacije. U ovom potpoglavlju objašnjen je način određivanja vremenske konstante ventila koja je neophodna za određivanje prijenosne funkcije procesa prikazano relacijom (3-12). Unutar odjeljka 3.2.1. obrađena je ZN metoda ruba stabilnosti dok odjeljak 3.2.2. prikazuje ZN metodu prijenosne funkcije. Odjeljak 3.2.3. prikazuje sintezu regulatora metodom Tehničkog optimuma dok odjeljak 3.2.4. prikazuje metodu krivulje mjesta korijena.

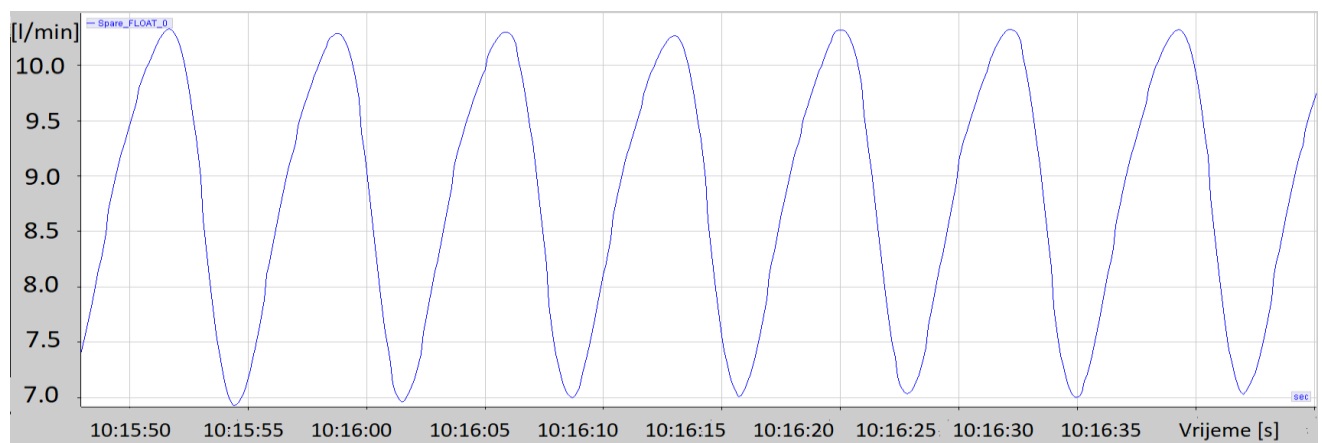


### 3.2.1. Ziegler-Nichols metoda ruba stabilnosti

Najpoznatiji i najkorišteniji iskustveni postupak podešavanja parametara regulatora koju su razvili Ziegler i Nichols (1948. godine). Ziegler i Nichols definirali su dva načina određivanja parametara, odnosno sinteze regulatora, metodu ruba stabilnosti te metodu prijelazne funkcije. Ove metode predstavljaju eksperimentalne postupke za podešavanje parametara regulatora kod kojih nije potrebno poznavati matematički model procesa. Budući da je u praksi čest slučaj da se ne raspolaže matematičkim modelom procesa (regulacijske staze) ove dvije metode često se koriste kao približne metode za određivanje parametara regulatora. Parametri određeni Ziegler-Nichols metodama pri tome se koriste kao početni parametri za optimiranje vladanja regulacijskog kruga (tj. traženje optimalnih parametara regulatora). Parametri se koriste kao početni jer ZN postupci ne daju informaciju o kakvoći regulacije postignutih primjenom istih. [12]

Pravila za sintezu regulatora metodom ruba stabilnosti:

0. Dovođenje procesa u radnu točku u kojoj će se proces održavati;
  1. Uspostavi se regulacijski krug s P-regulatorom;
  2. Pojačanje regulatora  $K_R$  povećava se postupno dok se u zatvorenom regulacijskom krugu ne proizvedu trajne oscilacije, pojačanje  $K_R$  uz koje dolazi do trajnih oscilacija naziva se kritičnim pojačanjem  $K_{Rkr}$ ;
  3. Nakon određivanja  $K_{Rkr}$  mjeri se iznos periode trajnih oscilacija  $T_{kr}$  (Slika 3.2) ;
  4. Na temelju dobivenih vrijednosti  $K_{Rkr}$  te  $T_{kr}$  određuju se parametri regulatora (Tablica 3.3).
- [12]



*Slika 3.2* Trajne oscilacije zatvorenog regulacijskog kruga

Trajne oscilacije sustava postignute su pri iznosu  $K_{Rkr} = 24$ . Određen je iznos periode trajnih oscilacija tako što je uzeto u obzir 10 perioda te je izračunata njihova srednja vrijednost radi veće točnosti izračuna. Iznos periode trajnih oscilacija  $T_{kr} = 5.283$ .

**Tablica 3.1.** Tablica za određivanje parametar regulatora prema metodi ruba stabilnosti

	Tip regulatora	Vrijednosti parametara regulatora		
		$K_R$	$T_I$	$T_D$
Metoda ruba stabilnosti	P	$0,5 K_{Rkr}$	-	-
	PI	$0,45 K_{Rkr}$	$0,85 T_{kr}$	-
	PID	$0,6 K_{Rkr}$	$0,5 T_{kr}$	$0,125 T_{kr}$

Uzimajući u obzir vrijednosti  $K_{Rkr}$  i  $T_{kr}$  prema izrazima danim u tablici 3.1. određeni su parametri regulatora gdje su  $T_i = 2.642$ ,  $T_d = 0.660$  pa njegova prijenosna funkcija glasi:

$$G_R(s) = K_R \cdot \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d\right) = K_R \frac{(1+sT_i)(1+sT_d)}{sT_i(1+sT)} \quad (3-12)$$

Ako se relacija (3-12) izjednači s relacijom (3-13) koja glasi:

$$G_R(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \cdot s^2\right), \quad (3-13)$$

slijede parametri PID regulatora :

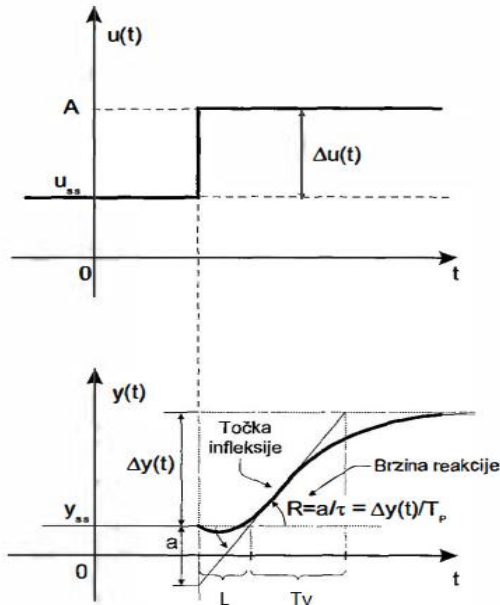
$$K_p = 15.000, \quad (3-14)$$

$$K_i = 5.679, \quad (3-15)$$

$$K_d = 9.906. \quad (3-16)$$

### 3.2.2. Ziegler-Nichols metoda prijelazne funkcije

Metoda prijelazne funkcije temelji se na snimanju prijelazne karakteristike procesa. Snimanje se provodi na procesu (regulacijskoj stazu) i očitavaju se parametri potrebni za izračun parametara regulatora.



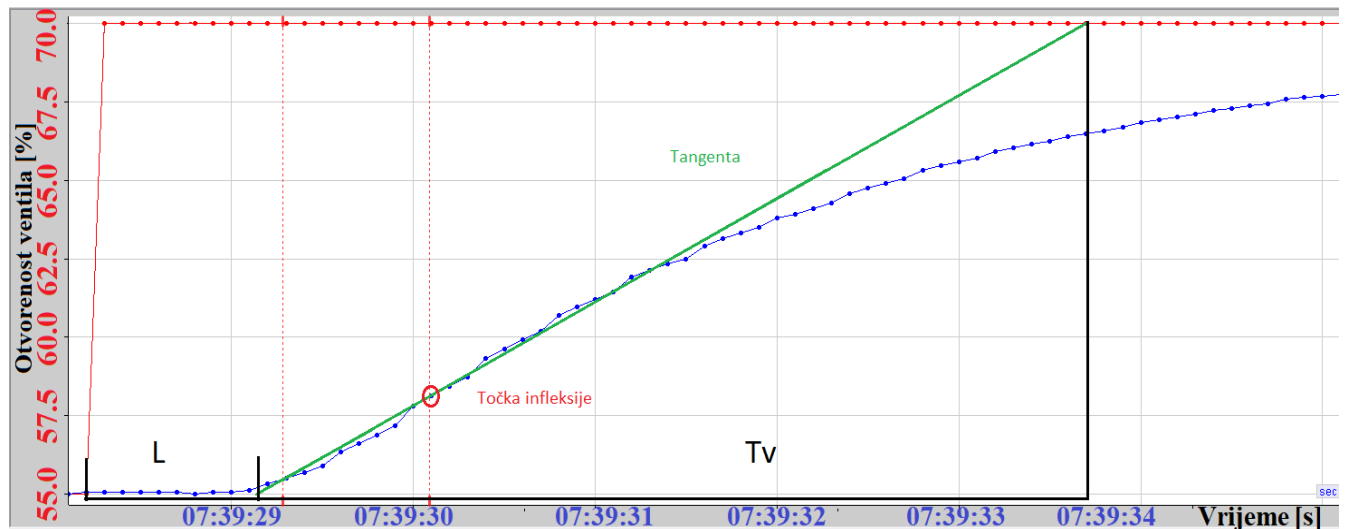
Slika 3.3. Odziv procesa na skokovitu pobudu u otvorenom krugu [11]

Promatra se odziv procesa na skokovitu pobudu što je prikazano na slici 3.3. Na slici 3.3. prikazan je način određivanja značajki  $T_v$  i  $L$  koji se prema tablici 3.2. koriste za određivanje parametara regulatora. Uspoređujući ove eksperimentalne rezultate s izvedenim matematičkim modelom,  $T_v$  je zapravo vremenska konstanta ventila i koristi se u prijenosnoj funkciji procesa.

Tablica 3.2. Tablica za određivanje parametar regulatora prema metodi prijelazne funkcije [13]

Tip regulatora	$K_P$	$T_i$	$T_d$
<b>P</b>	$\frac{T}{L}$	$\infty$	0
<b>PI</b>	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
<b>PID</b>	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Napravljeno je je više odziva procesa uz različite amplitude skokovite pobude. Na slici 3.6 nalazi se odziv procesa gdje je ventil otvoren s  $x_v = 55$  [%] na  $x_v = 70$  [%].



**Slika 3.4.** Prikaz određivanja parametara  $T_v$  i  $L$  na kod promijene otvorenosti ventila

Slika 3.4. prikazuje način na koji se određuju parametri  $T_v$  i  $L$  na stvarnim mjernim podacima potrebni za određivanje parametara regulatora.  $T_v$  predstavlja vremensku konstantu ventila i određuje se grafičkim putem, predstavlja vrijeme između sjecišta tangente s x-osi i sjecišta tangente s stepenastom pobudom.  $L$  predstavlja vrijeme zadržavanja procesa, predstavlja vrijeme od nastupanja stepenaste pobude do sjecišta tangente s x-osi. Na slici 3.4 stepenasta funkcija predstavljena je crvenom bojom (otvorenost ventila), plava boja predstavlja odziv procesa (protok). Vidljivo je kako odziv procesa nije trenutno upravo zbog tromosti, tj. ventil se ne može otvoriti trenutno pod utjecajem skokovite pobude, već treba proći određeno vrijeme. Ovo vrijeme ovisi o tome koliki je početni iznos te konačni iznos otvorenosti ventila. Odziv procesa je dobiven mjerenjem protoka. Za mjerene vrijednosti protoka (u trenucima uzorkovanja) napravljena je *best-fit* krivulja polinoma desetog stupnja na kojoj je određena točka infleksije i tangenta. Na temelju tangente određeni su parametri  $T_v$  i  $L$ . Tangenta i točka infleksije napravljene su u programskom paketu Matlab iscrtavanjem grafa funkcije odziva na temelju preuzetih točaka. Odzivi procesa na skokovitu pobudu i pripadajući im  $T_v$  i  $L$  prikazani su u tablici 3.3.

**Tablica 3.3.** Promjena parametara procesa  $T_v$  i  $L$  na različite otvorenosti ventila

Početna vrijednost [%]	Krajnja vrijednost [%]	$T_v$	$L$
55	70	4.67	0.92
40	70	4.55	1.2
40	60	4.2	1.25
60	85	4.5	1.12

Vrijednosti  $T_v$  i  $L$  mijenjaju se tijekom promijene skokovite pobude no približne su. Za izračun parametara regulatora metodom prijelazne funkcije uzeta je srednja vrijednost svih dobivenih  $T_v$  i  $L$  tijekom različitih skokovityh pobuda u sustavu, na temelju čega je dobiveno:

$$T_v = 4.48, \quad (3-17)$$

$$L = 1.123. \quad (3-18)$$

Na temelju ovih značajki i izraza u tablici, dobiveni su sljedeći parametri PID regulatora:

$$K_p = 4.787, \quad (3-19)$$

$$T_i = 2.246, \quad (3-20)$$

$$T_d = 0.562. \quad (3-21)$$

Na isti način kao u odjeljku 3.2.1. kod relacija (3-12) i (3-13) određeni su parametri regulatora:

$$K_p = 4.787, \quad (3-22)$$

$$K_i = 2.131, \quad (3-23)$$

$$K_d = 2.690. \quad (3-24)$$

### 3.2.3. Tehnički optimum

Metoda Tehničkog optimuma (TO) pogodna je za određivanje parametara regulatora regulacijskih krugova s procesom bez astatizma. Zasniva se na sljedećim zahtjevima:

1. Amplitudno frekvencijska karakteristika zatvorenog regulacijskog kruga  $|G_x(j\omega)|$  treba imati konstantu vrijednost u čim širem frekvencijskom području.
2.  $|G_x(j\omega)|$  praktički ne smije imati rezonantno uzdizanje, odnosno da je odziv što brži, ali bez nadvišenja ( $\zeta=1$ ).

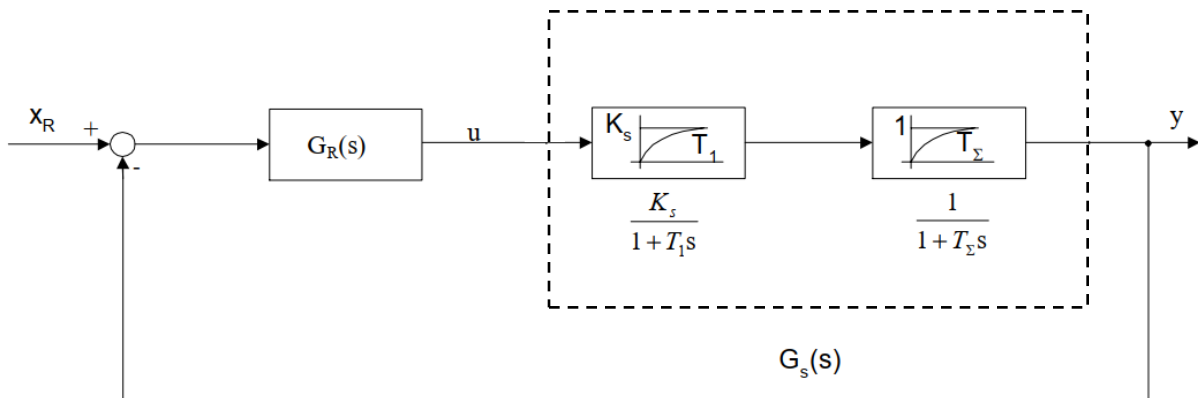
Ovi zahtjevi omogućavaju brži i gotovo aperiodski odziv regulacijskog kruga<sup>2</sup>. [12]

Na slici 3.8 prikazan je regulacijski krug s jednom dominantnom vremenskom konstantom<sup>3</sup> procesa

<sup>2</sup> Aperiodski odziv – prigušen odziv sustava odnosno odziv sustava bez prisutnih oscilacija

<sup>3</sup> Dominantna vremenska konstanta – iznosom najveća vremenska konstanta promatranog sustava, ukazuje na brzinu odziva sustava odnosno predstavlja mjeru brzine promjene nekog sustava, što je vremenska konstanta veća to je odziv sustava sporiji

te s jednom nedominantnom vremenskom konstantom procesa što je i slučaj za promatrani proces protoka fluida (vidi relaciju 4-12). Nedominantna vremenska konstanta često predstavlja sumu svih nedominantnih vremenskih konstanti u prigušenom procesu visokog reda, no matematički model promatranog procesa regulacije protoka obuhvaća jednu nedominantnu vremensku konstantu. Dominantna vremenska konstanta predstavlja vremensku konstantu proporcionalnog ventila (3-17) dok nedominantna vremenska konstanta predstavlja vremensku konstantu mjernog člana (3-27).



**Slika 3.5.** Prikaz regulacijskog kruga sustava regulacije protoka [12]

Tehničkim optimumom se određuju parametri regulatora, čiju strukturu treba unaprijed zadati. Za ovakvu strukturu procesa (prigušeno  $PT_2$  vladanje) preporučuje se koristiti PI regulator, čija prijenosna funkcija glasi:

$$G_R(s) = K_R \cdot \frac{1+T_i \cdot s}{T_i \cdot s} \quad (3-25)$$

Sa stajališta prvog zahtjeva TO, najprije se podešava integralna vremenska konstanta  $T_i$  i to na način da se nulom regulatora kompenzira utjecaj dominantne vremenske konstante, u ovom slučaju vremenske konstante ventila, iz čega slijedi:

$$T_i = T_v = 4.48. \quad (3-26)$$

Vrijedi:

$$T_\Sigma = T_{m\check{c}} = 0.3. \quad (3-27)$$

$K_s$  predstavlja pojačanje procesa (regulacijske staze) (vidi 3-11, 3-10) dok  $T_\Sigma$  predstavlja sumu svih nedominantnih vremenskih konstanti (3-27). U ovom slučaju postoji jedna nedominantna vremenska konstanta odnosno vremenska konstanta mjernog člana (mjerač protoka). Određivanje preostalog parametra regulatora, pojačanja regulatora  $K_R$ , primjenjuje se drugi zahtjev TO.

Prema drugom zahtjevu TO potrebno je podesiti pojačanje regulatora  $K_R$  tako da se postigne granično prigušeno vladanje regulacijskog kruga ( $\zeta=1$ ). Međutim, u praksi se u okviru TO ipak dozvoljava nadvišenje ( $\sigma_m$ ) do 5 %, pa se može podesiti na vrijednost manju od 1, ali ne manju od 0.7. U praksi se često odabire  $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$  te se iz formule  $K_R = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{K_s} \cdot \frac{T_i}{T_\Sigma}$  dobiva [12] :

$$K_R = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{K_s} \cdot \frac{T_i}{T_\Sigma} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{K_s} \cdot \frac{T_v}{T_{m\check{c}}} = 4.8428. \quad (3-28)$$

Parametri regulatora određuju se prema sljedećim relacijama:

$$K_R = K_p = 4.843, \quad (3-29)$$

$$K_i = \frac{K_R}{T_i} = 1.081. \quad (3-30)$$

Parametri regulatora određeni relacijama (3-30) i (3-29) trebaju dati odziv sustava s nadvišenjem do 4.3 % te oscilacijama manjim od  $\pm 2\%$ . Sami odzivi procesa na parametre određene tehničkim optimumom prikazani su u poglavlju 4.

### 3.2.4. Metoda krivulje mjesta korijena

Metoda krivulje mjesta korijena (u daljnjem tekstu: KMK) je grafička metoda analize i sinteze sustava upravljanja. Pod KMK podrazumijeva se skup svih točaka kojima prolaze korijeni promatrane karakteristične jednadžbe<sup>4</sup> (polovi prijenosne funkcije zatvorenog kruga) u s-ravnini pri promjeni nekog parametra regulacijskog kruga. Parametar se mijenja od 0 do  $\infty$ . KMK metoda upotrebljava se za analizu stabilnosti i općenito sinteze regulatora. Kao promjenjivi odnosno slobodni parametar može se odabrati bilo koji parametar regulacijskog kruga.

<sup>4</sup> Karakteristična jednadžba – jednadžba koja nastaje izjednačavanjem nazivnika prijenosne funkcije s nulom, rješenja karakteristične jednadžbe jednaka su korijenima odnosno polovima sustava

U praksi se KMK crta najčešće za promjenu pojačanja u petlji, pri čemu se pojačanje mijenja od 0 do  $\infty$ . U ovom radu KMK se koristi za određivanje parametara PID regulatora uz pomoć *Matlab* programskog paketa. [12][13]

Metoda krivulje mjesta korijena iziskuje poznavanje prijenosne funkcije procesa koja glasi:

$$G_s(s) = \frac{Q_u(s)}{U(s)} = \frac{1.1472}{(s+0.22321)(s+3.33)} \quad (3-31)$$

Prijenosna funkcija određena relacijom (3-31) razlikuje se zapisom od prijenosne funkcije određene relacijom (3-11). Relacijom (3-11) u brojniku je istaknuto pojačanje procesa dok je relacijom (3-31) u brojniku istaknut faktor pojačanja procesa. Zapis prijenosne funkcije kod relacije (3-31) upotrebljava se zbog crtanja krivulje mjesta korijena u *Matlab* programskog paketa. Metodom krivulje mjesta korijena prvo se određuju parametri PI regulatora uz relativni koeficijent prigušenja (*engl. damping*) jednak  $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$ , što predstavlja zahtjev u okviru tehničkog optimuma. Kako bi se metodom KMK odredilo pojačanje regulatora prethodno je potrebno odrediti njegovu vremensku konstatnu  $T_I$ , kojom se smješta nula regulatora. Prijenosna funkcija regulatora je stoga:

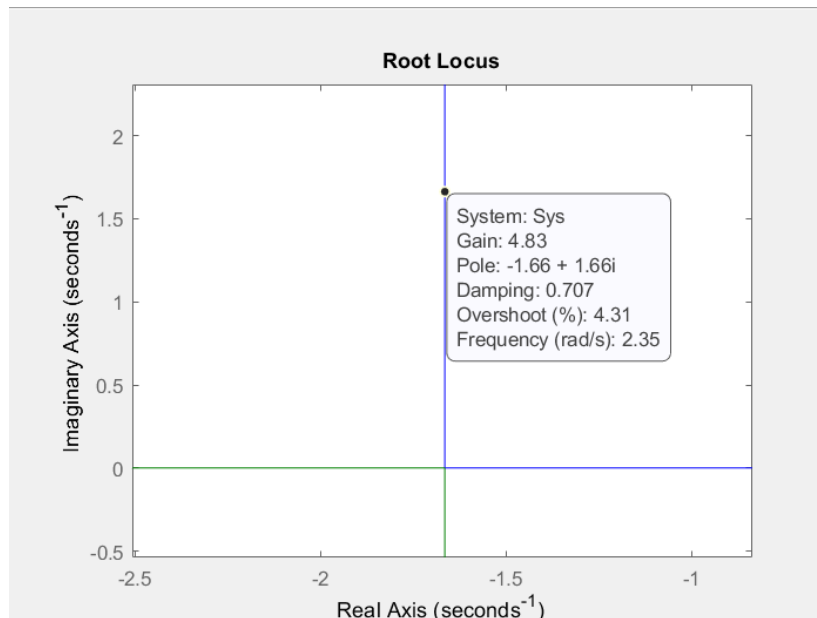
$$G_R(s) = K_R \cdot \frac{(s+0.22321)}{s} \quad (3-32)$$

Uzimajući u obzir prijenosnu funkciju procesa i prijenosnu funkciju regulatora, prijenosna funkcija sustava otvorenog regulacijskog kruga ima sljedeći oblik:

$$G_o(s) = G_R(s) \cdot G_p(s) = K_R \cdot \frac{(s+0.22321)}{s} \cdot \frac{1.1472}{(s+0.22321)(s+3.33)} = K_R \cdot \frac{1.1472}{s(s+3.33)} \quad (3-33)$$

Potrebno je odrediti pojačanje  $K_R$ . Pomoću naredbe *rlocus* u *Matlab* programskom paketu iscrta se krivulja mjesta korijena regulacijskog kruga iz relacije (3-33) te se za  $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$  odredi pojačanje  $K_R$ . Na slici 3.6. prikazana je KMK te pripadajuća očitana vrijednost  $K_R$  za  $\zeta = \frac{\sqrt{2}}{2} = 0.707$ .





**Slika 3.6.** Krivulja mjesta korijena za PI regulaciju

Određivanjem  $K_R$  dobiva se sljedeća prijenosna funkcija regulatora:

$$G_R(s) = 4.83 \cdot \frac{(s+0.22321)}{s}. \quad (3-34)$$

Na isti način kao i u relaciji (3-13) određuju se parametri regulatora, u ovom slučaju su:

$$K_R = K_p = 4.83, \quad (3-35)$$

$$K_i = 1.078. \quad (3-36)$$

Promatrajući rješenja parametara regulatora iz odjeljka 3.2.1. vidljivo je kako se radi o identičnim parametrima regulatora. Pokazana su dva načina određivanja Tehničkog optimuma. Napravljeni su testovi prilikom smanjenja, odnosno povećanja relativnog koeficijenta prigušenja (*engl.damping*). Za relativni koeficijent prigušenja  $\zeta=0.6$  dobiveni su sljedeći parametri regulatora, na isti načina kao i u prethodnom primjeru. Parametri regulatora su:

$$K_p = 6.72, \quad (3-37)$$

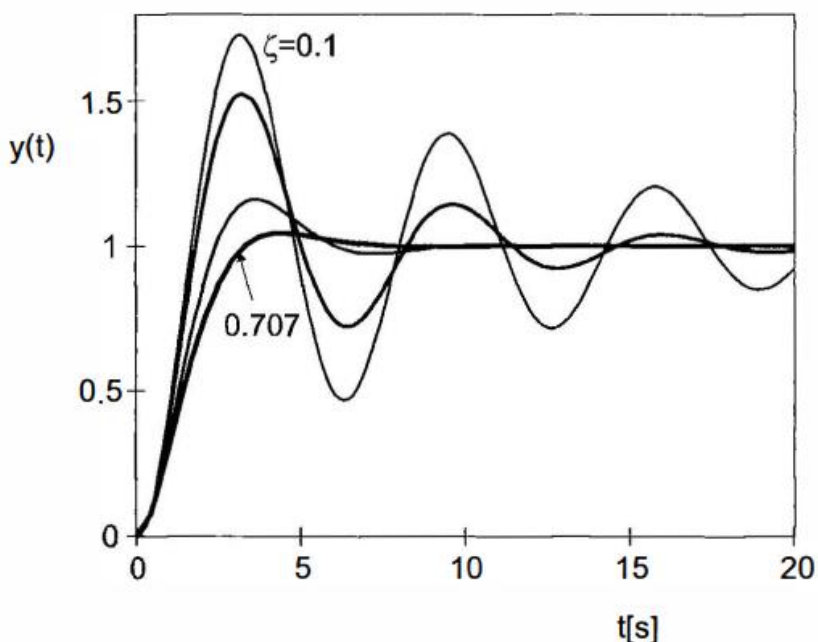
$$K_i = 1.5. \quad (3-38)$$

Dok su parametri regulatora za relativni koeficijent prigušenja  $\zeta=0.8$  jednaki:

$$K_p = 3.77, \quad (3-39)$$

$$K_i = 0.842. \quad (3-40)$$

Smanjenjem faktora prigušenja veće su frekvencije prigušenih oscilacija, tj. sustav će biti neprigušen (*engl. underdamped*), javljat se sve veće nadvišenje. Dok sa povećanjem faktora prigušenja smanjuje nadvišenje i povećava prigušenost sustava (*engl. overdamped*). Ponašanje sustava s obzirom na promjenu faktora prigušenja prikazan je na slici 3.7.



**Slika 3.7.** Prikaz odziva regulacijskog kruga s obzirom na promjenu relativnog koeficijenta prigušenja  $\zeta=0.1, 0.2, 0.5, 0.707$ . [12]

Nakon određivanja parametara PI regulatora pomoću KMK metode provedeno je i određivanje parametara PID regulatora. Prije određivanja  $K_R$  potrebno je pozicionirati dvije nule i pol regulatora (tj. odrediti vremenske konstante  $T_i, T_d, T$ ). Jedan pol regulatora postavlja se u ishodište (I-vladanje), drugi pol regulatora znatno je udaljen od nedominantnog pola procesa (na suprotnu stranu od ishodišta), dominantnija nula regulatora postavlja se na mjesto dominantnog pola procesa, dodaje se još jedna nula regulatora koja će se nalaziti između dominantno i nedominantnog pola procesa (u točke -1, -2 i -3). Dakle, regulator će se sastojati od dva pola i dvije nule, jedna nula će se mijenjati (nula između dominantnog i nedominantnog

pola) te će se promatrati kako to utječe na parametre regulatora.

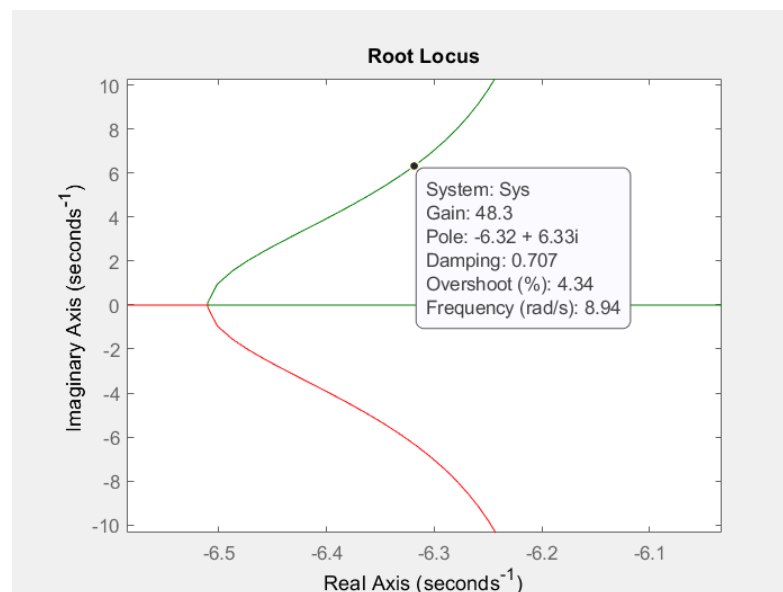
Promatrajući prijenosnu funkciju procesa iz relacije (3-34) te postavljanjem nule regulatora u točku -1 na x-osi s-ravnine prijenosna funkcija regulatora glasi:

$$G_R(s) = K_R \cdot \frac{(s+0.22321)(s+1)}{s(s+10)}. \quad (3-41)$$

Iz relacije (3-41) pol regulatora smješten je u ishodište i u točku -10 na x-osi s-ravnine te prijenosna funkcija otvorenog regulacijskog kruga glasi:

$$G_o(s) = G_r(s) \cdot G_p(s) = K_r \frac{(s+0.22321)(s+1)}{s(s+10)} \cdot \frac{1.1472}{(s+0.22321)(s+3.33)} = K_R \cdot \frac{1.1472(s+1)}{s(s+3.33)(s+10)} \quad (3-42)$$

Promatrajući relaciju (3-42) vidljivo je kako je kompenziran dominantni pol procesa. Na slici 3.8. prikazan je KMK te je očitana vrijednost pojačanja regulatora  $K_R$  kada je faktor prigušenja  $\zeta=0.707$ . Tijekom sinteze PID regulatora KMK metodom, vrijednost relativnog koeficijenta prigušenja se neće mijenjati. Vrijednost koja se mijenja je nula regulatora (mijenja se vremenska konstanta  $T_d$ ) koja je u ovom primjeru u točki -1 s-ravnine.



**Slika 3.8.** Krivulja mjesta korijena PID regulacije sustava kada je nula regulatora u -1

Iznos pojačanja regulatora sa slike 3.8 iznosi  $K_R=48.3$  te se prema relaciji (3-41) dobivaju sljedeći parametri PID regulatora:

$$K_p = 5.8, \quad (3-43)$$

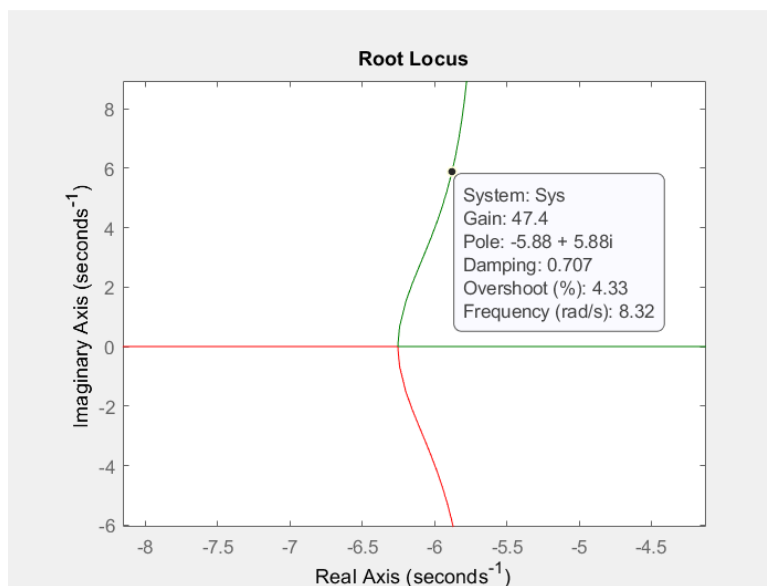
$$K_i = 1.078, \quad (3-44)$$

$$K_d = 4.25. \quad (3-45)$$

Promjenom nule regulatora iz točke -1 u točku -2 x-osi s-ravnine dobiva se sljedeća prijenosna funkcija otvorenog regulacijskog kruga:

$$G_o(s) = G_r(s) \cdot G_p(s) = K_R \frac{(s+0.22321)(s+2)}{s(s+10)} \cdot \frac{1.1472}{(s+0.22321)(s+3.33)} = K_R \cdot \frac{1.1472(s+2)}{s(s+3.33)(s+10)} \quad (3-46)$$

Na slici 3.9. prikazan je KMK te je očitana vrijednost pojačanja regulatora  $K_R$  kada je faktor prigušenja  $\zeta=0.707$ .



**Slika 3.9.** Krivulja mjesta korijena PID regulacije sustava kada je nula regulatora u -2

Vrijednost  $K_R=47.4$ , prema relaciji (3-41) dobivaju se sljedeći parametri PID regulatora:

$$K_p = 10.328, \quad (3-47)$$

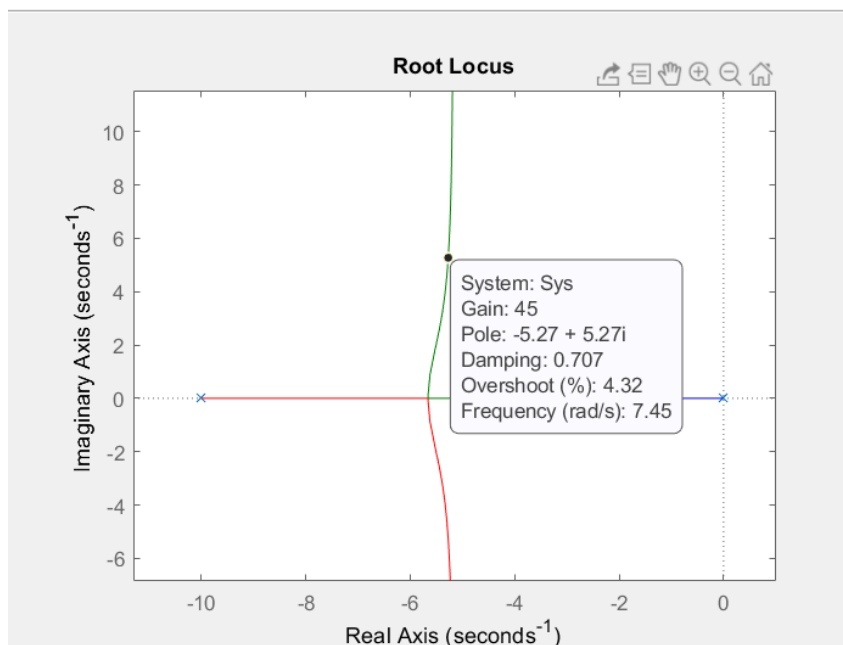
$$K_i = 2.098, \quad (3-48)$$

$$K_d = 3.707. \quad (3-49)$$

Promjenom nule regulatora iz točke -2 u točku -3 x-osi s-ravnine dobiva se sljedeća prijenosna funkcija otvorenog kruga:

$$G_o(s) = G_R(s) \cdot G_p(s) = K_R \cdot \frac{(s+0.22321)(s+3)}{s(s+10)} \cdot \frac{1.1472}{(s+0.22321)(s+3.33)} = K_R \cdot \frac{1.1472(s+3)}{s(s+3.33)(s+10)} \quad (3-50)$$

Na slici 3.10. prikazan je KMK te je očitana vrijednost pojačanja regulatora  $K_R$  kada je relativni koeficijent prigušenja  $\zeta=0.707$ .



*Slika 3.10. Krivulja mjesta korijena PID regulacije sustava kada je nula regulatora u -3*

Vrijednost  $K_r=43.4$ , prema relaciji (3-42) dobivaju se sljedeći parametri PID regulatora:

$$K_p = 14.203, \quad (3-51)$$

$$K_i = 3.013, \quad (3-52)$$

$$K_d = 3.079. \quad (3-53)$$

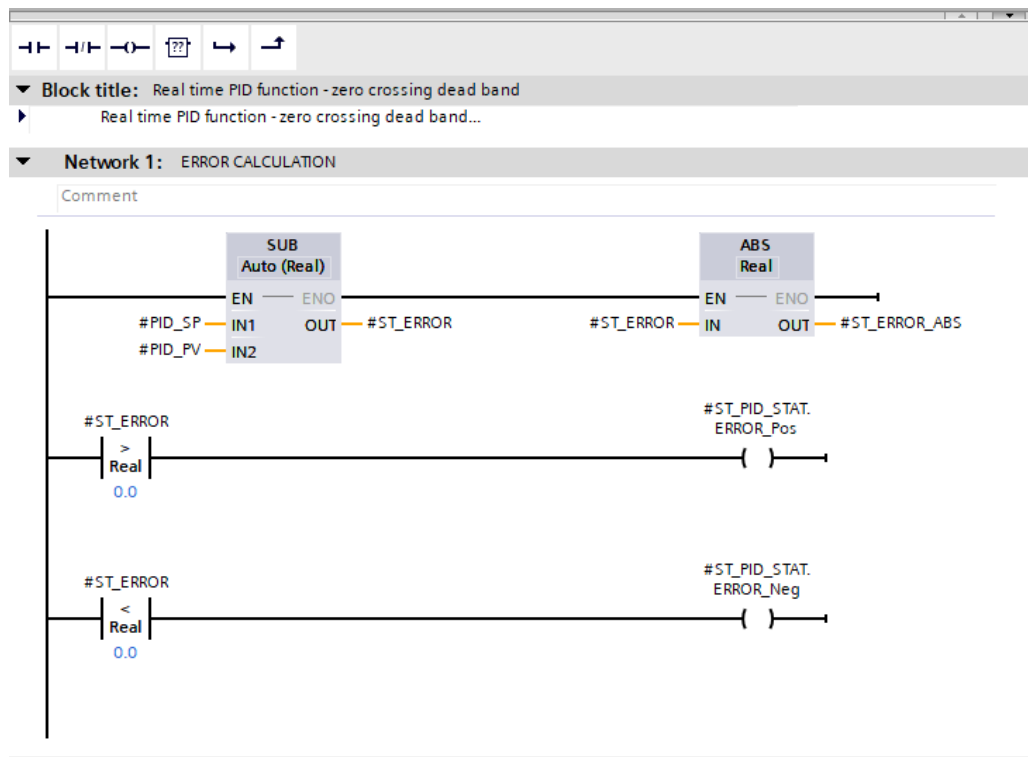
Promatrajući parametre PID regulatora u sva tri slučaja uočljivo je kako se odmicanjem nule regulatora od ishodišta smanjuje utjecaj derivacijskog dijela PID-a, dok sve više dolazi do izražaja utjecaj proporcionalnog te integralnog dijela. Analiza kakvoće regulacije s obzirom na položaj nule sadrži 4. poglavlje te se jasnije može vidjeti utjecaj pomicanja nule regulatora na vladanje regulacijskog kruga.

### 3.3. Projektiranje programskog rješenja

U ovom potpoglavlju opisano je programsko rješenje za regulaciju protoka fluida. Programsko rješenje izvedeno je u programskom alatu TIA portal. Više o načinu rada TIA portala i općenito o PLC-u nalazi se u potpoglavlju 2.2. Unutar ovog potpoglavlja objašnjen je dio vezan za korisničko sučelje, odnosno HMI (engl. Human Machine Interface), te je prikazan svaki od zaslona koji se koriste za nadzor procesa i nadzorno upravljanje (od strane operatera). Objašnjava se svaka korištena funkcija, način na koji se funkcije izvode te njihova svrha. Na slici 3.11 a) i b) prikazani su podatkovni blok i funkcija u TIA portalu.

SEMI_MODE_DB_PID_FW											
	Name	Data type	Offset	Start value	Retain	Accessible f...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Supervis...	Comment
1	▼ Input				<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
2	IN_Clock	Real	0.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		PLC execution time
3	PID_PV	Real	4.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		PID Process variable
4	PID_SP	Real	8.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		PID Set point
5	PID_TIEBACK	Real	12.0	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		PID Manual reference
6	PID_AUTO	Bool	16.0	false	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		1= automatic mode is enabled

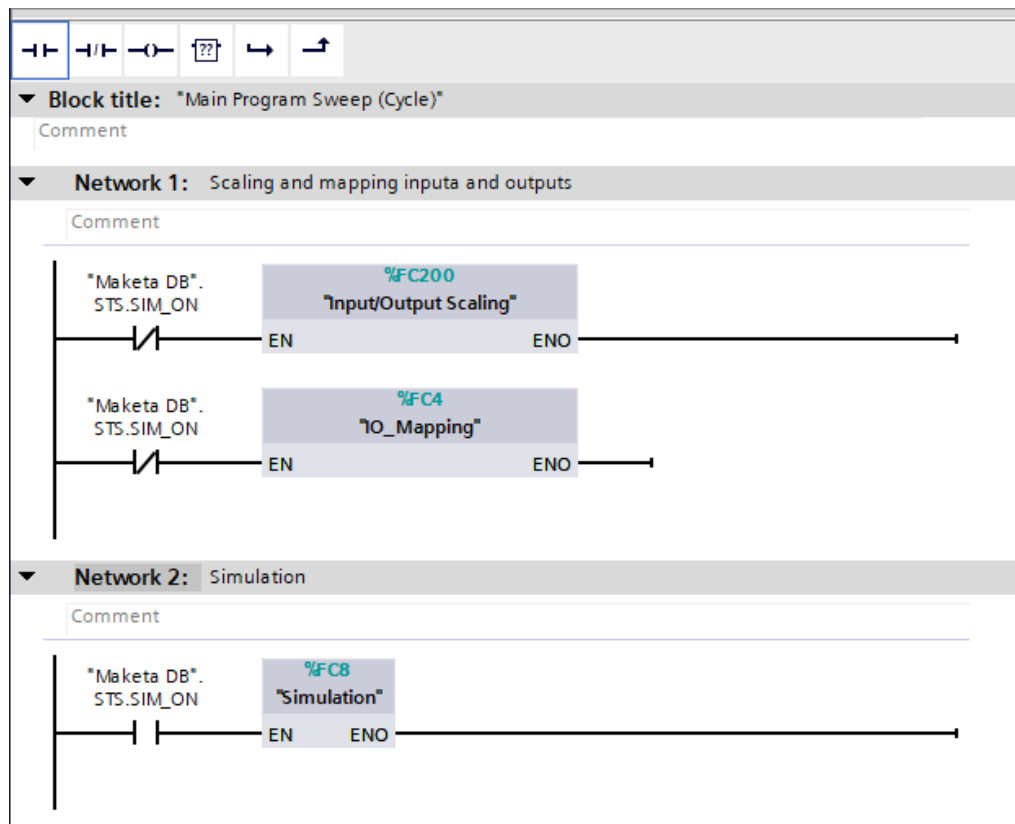
Slika 3.11.a) Izgled jednog podatkovnog bloka (engl. Data Block)



Slika 3.11.b) Izgled funkcije (engl. Function)

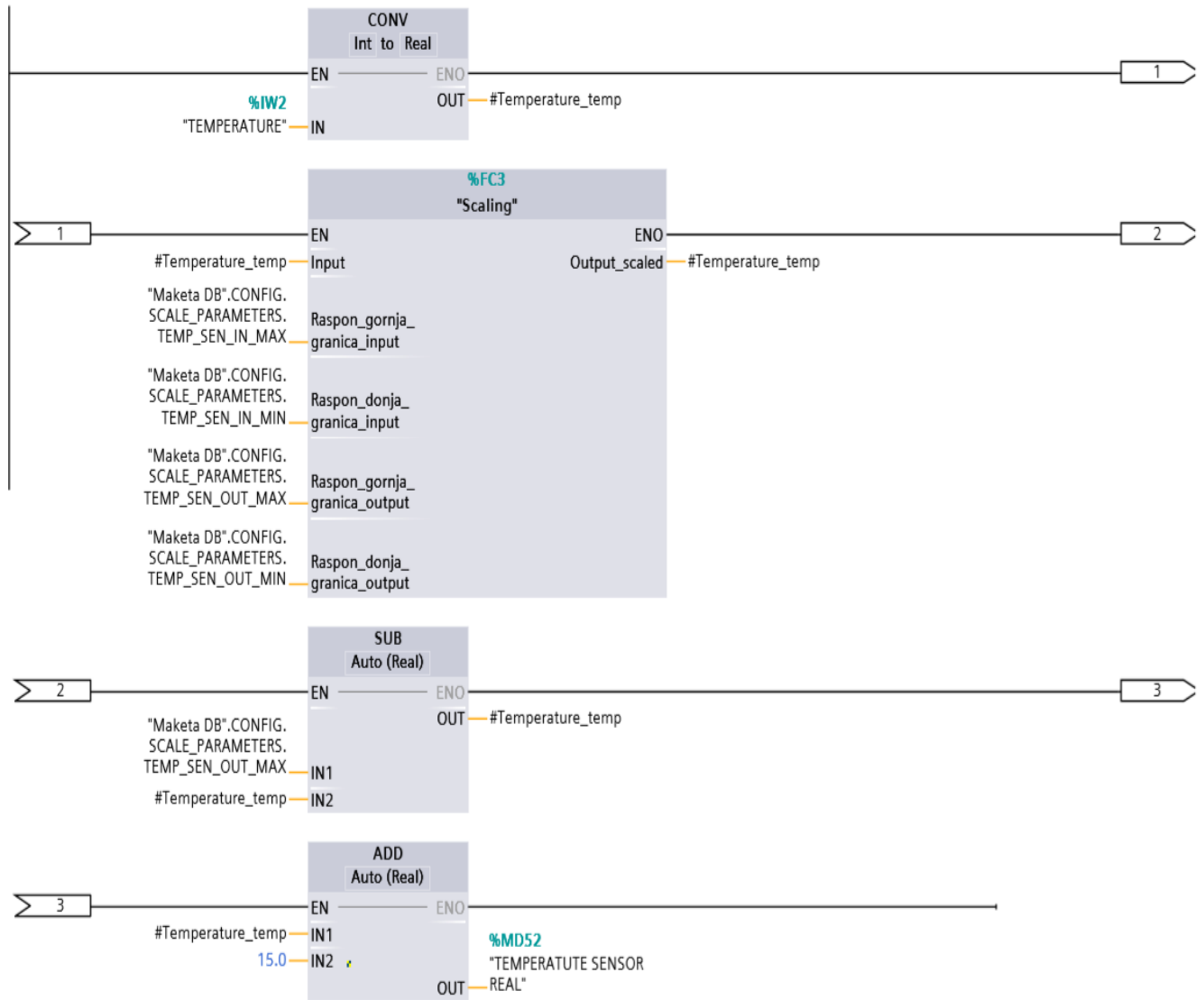
### 3.3.1. Opis programskog rješenja

Funkcije koje se koriste u programu pozivaju se i izvršavaju se u OB1 su: Input/Output Scaling, IO\_Mapping, Simulation, MAN\_MODE, AUTO\_MODE, AUTO\_MODE\_INIT, HMI\_IN\_OUT, VALVE\_CALIBRATION te TIM\_FB\_OB\_RTC. Blok TIM\_FB\_OB\_RTC vrlo je važan te je napravljen od strane tvrtke Danieli Systec. Ovaj funkcijski blok računa vrijeme izvođenja glavnog dijela programa na način da blok računa vrijeme jednog ciklusa PLC-a, što je iznimno važno kako bi se veličine prilagodile radu u ciklusima.



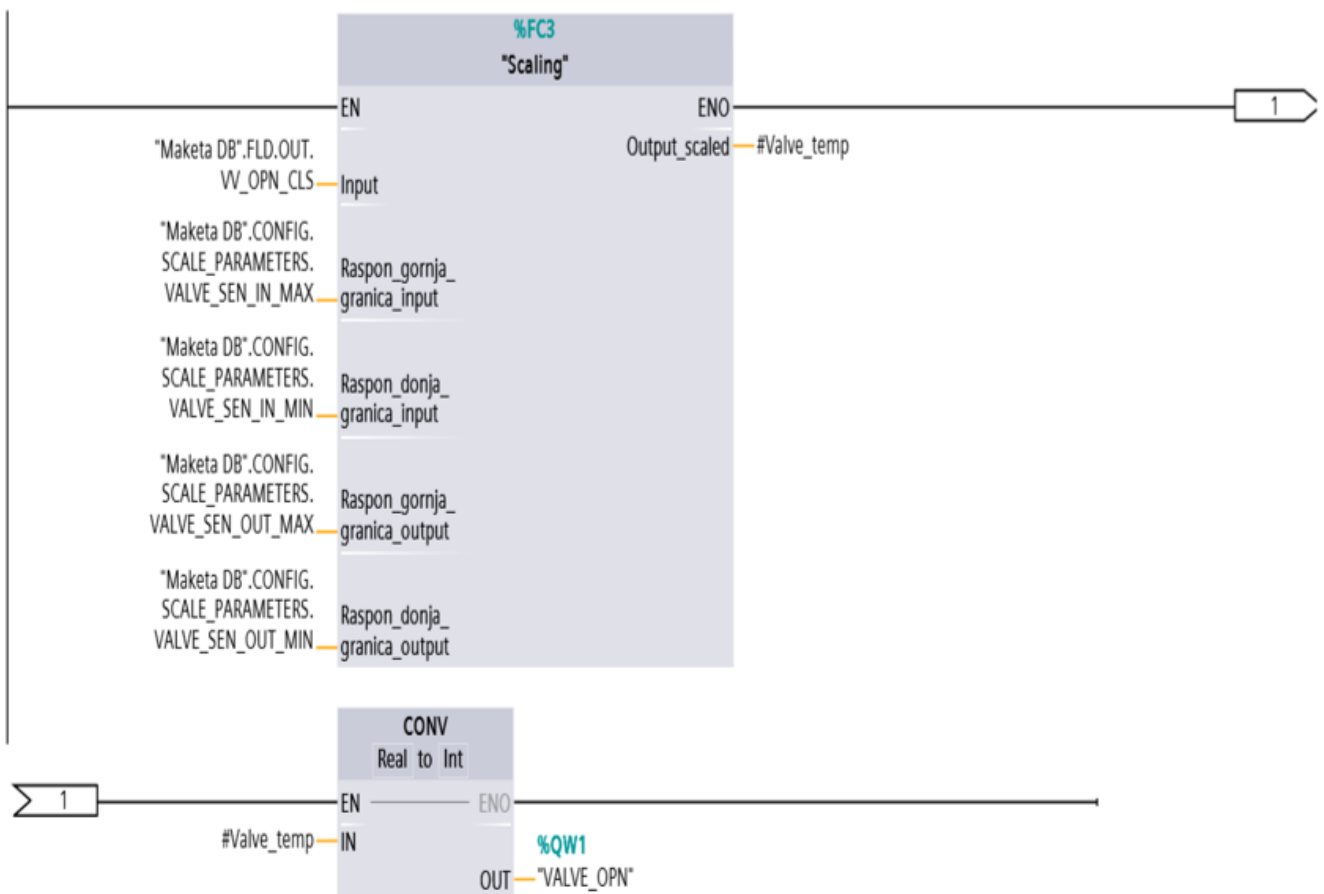
*Slika 3.12. Pozivanje funkcija Input/Output Scaling, IO\_Mapping te Simulation*

Slika 3.12. prikazuje pozivanje tri funkcije korištene u programu. Funkcija FC200 odnosno Input/Output Scaling koristi se za čitanje vrijednosti mjerača (protok, temperatura, razina vode) te za pisanje vrijednosti, odnosno slanje upravljačke veličine na proporcionalni ventil. Vrijednosti protoka dobivenih mjeračem protoka dobivaju se preko ulazne analogne kartice PLC-a, dok se upravljačka veličina na ventil šalje preko izlazne analogne kartice PLC-a. Na slici 3.13 te 3.14. prikazani su primjeri za pisanje (odnosno čitanje) vrijednosti na PLC kartice, samim time i na aktuator (proporcionalni ventil).



*Slika 3.13. Prikaz dijela funkcije Input/Output Scaling, prikaz očitavanja temperature*



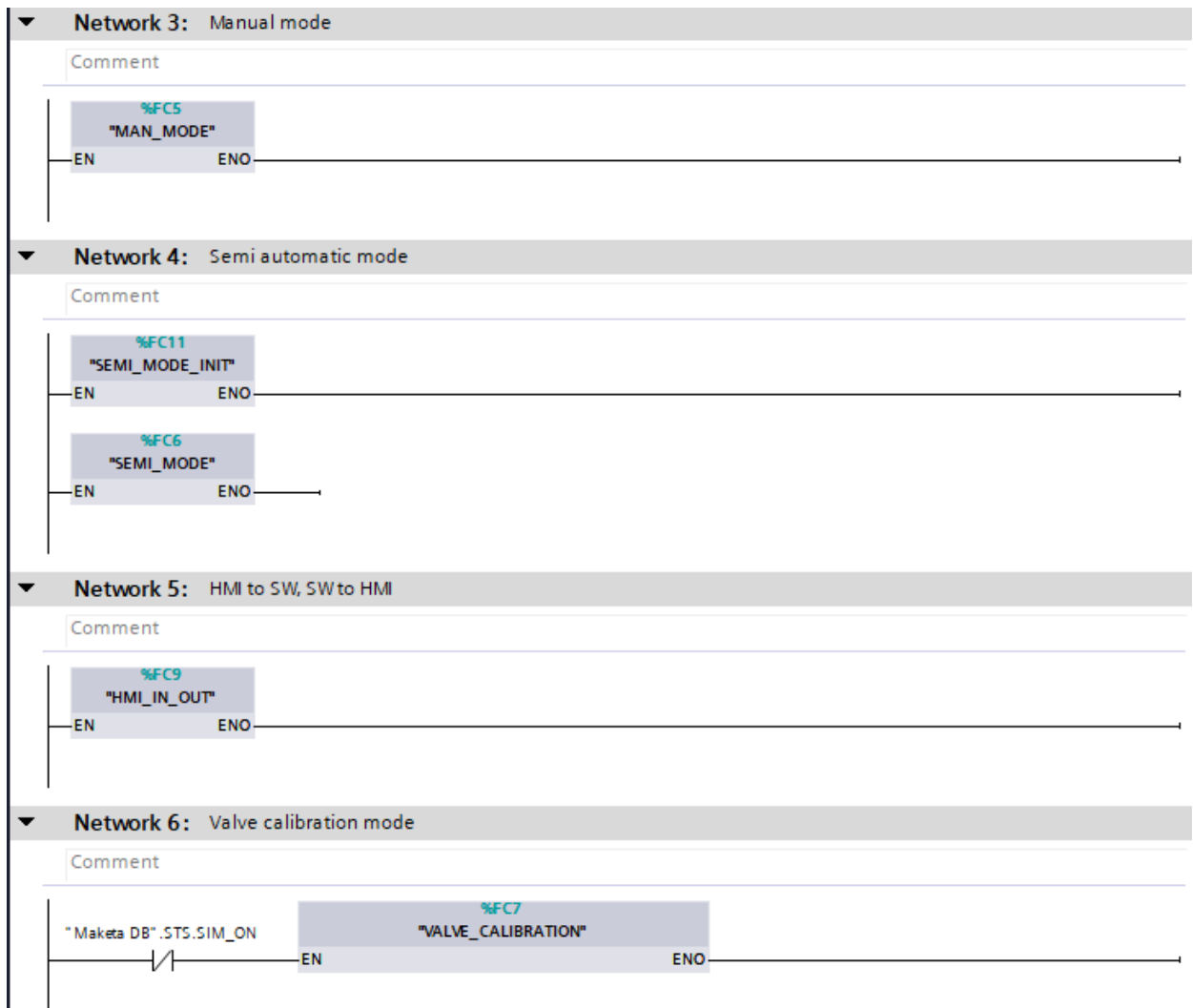


**Slika 3.14.** Prikaz dijela funkcije Input/Output Scaling, prikaz pisanja vrijednosti otvorenosti proporcionalnog ventila

Na slici 3.12. vidljiva je i funkcija pod nazivom IO\_Mapping. Ta funkcija služi za očitavanje vrijednosti sklopke razine (*engl.level switch*). Sklopka razine je normalno otvoren kontakt te kada je razina fluida zadovoljavajuća PLC očitava vrijednost 1. Kada razina fluida padne ispod minimalne vrijednosti PLC očitava vrijednost 0. Sklopka razine služi za prekid rada crpke prilikom niske razine u donjem spremniku.

Osim dvije navedene funkcije bitna je i funkcija Simulation prikazana na slici 3.12. Simulation funkcija služi za simulaciju sustava bez makete odnosno bez mjerača i aktuatora. Ova se funkcija koristila prilikom pisanja programskog rješenja dok maketa još nije bila operativna. Koristeći Simulation funkciju simuliran je protok na temelju otvorenosti ventila. Unutar Simulation funkcije koristi se funkcija za simulaciju protoka kojoj su ulazne varijable najveći mogući protok i otvorenost ventila. Na temelju te dvije vrijednosti blok kao izlaznu vrijednost daje vrijednost protoka.

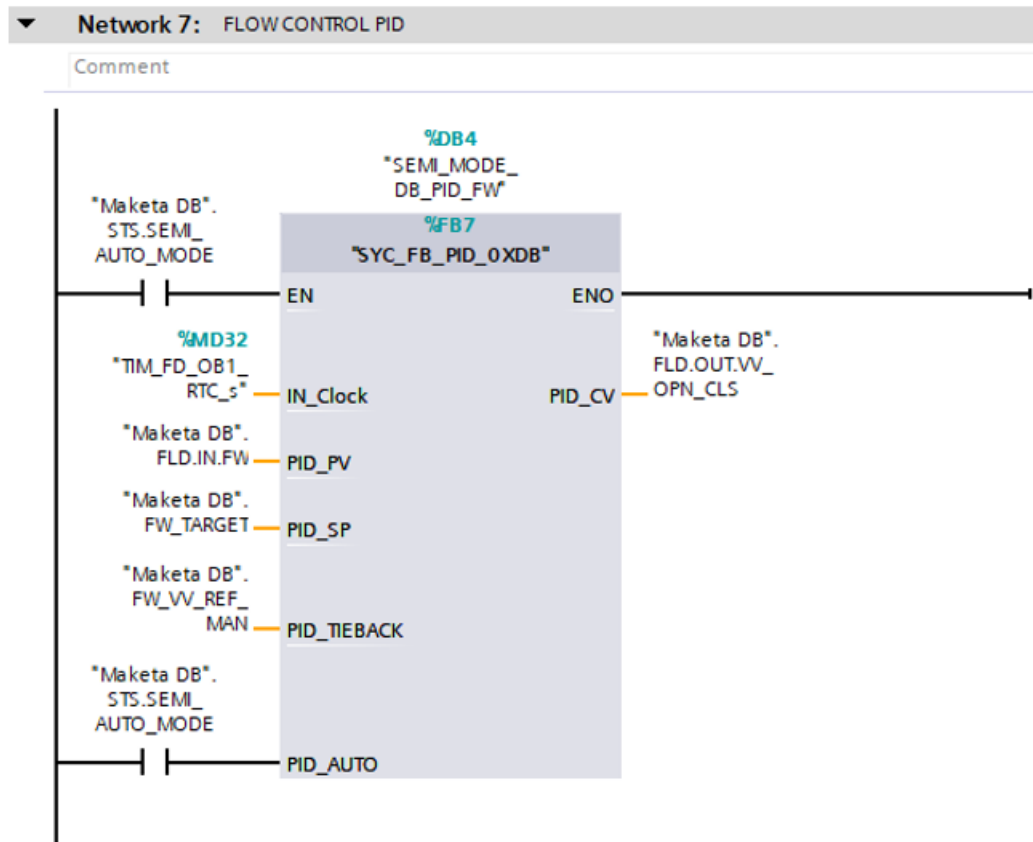
Na slici 3.15. prikazano je pozivanje funkcija MAN\_MODE, AUTO\_MODE, AUTO\_MODE\_INIT, HMI\_IN\_OUT te VALVE\_CALIBRATION. Ove funkcije predstavljaju temelj programskog rješenja te svaka od njih ima zasebnu i specifičnu funkciju koju obavlja kako bi se izvršila regulacija protoka.



*Slika 3.15. Pozivanje funkcija u OBI*

Funkcija MAN\_MODE dio je programskog rješenja koji predstavlja ručni režim rada promatranog sustava, odnosno makete. U ručnom režimu rada korisnik otvara ventil na željenu vrijednost te uključuje crpku. U ručnom režimu rada moguća je tek djelomična regulacija protoka jer korisnik otvara ventil dok ne postigne željeni protok no pojavom određenih poremećaja (puknuće cijevi) taj protok se ne bi mogao održati.

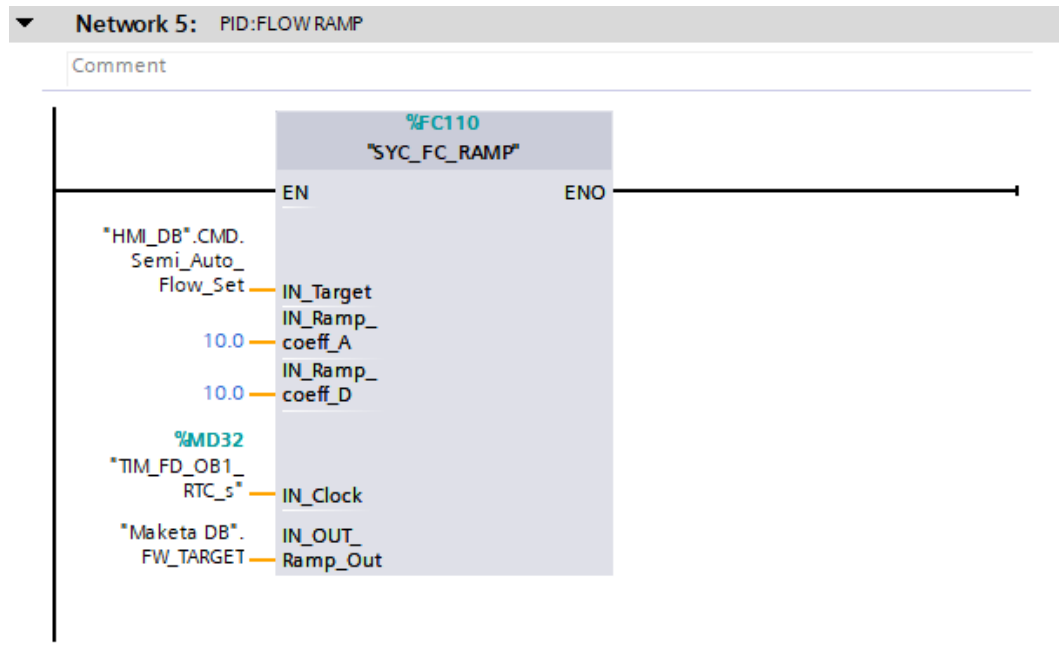
Funkcija AUTO\_MODE predstavlja dio programskog rješenja u kojemu promatrani sustav radi u automatskom režimu rada gdje korisnik unosi željeni protok te se izvršavanjem funkcijskog bloka AUTO\_MODE sustav regulira pomoću PID regulacije. U automatskom režimu rada korisnik ne može mijenjati otvorenost proporcionalnog ventila te je otvorenost ventila određena upravljačkom veličinom s izlaza iz PID funkcijskog bloka. Na slici 3.16. prikazan je PID funkcijski blok.



*Slika 3.16. Prikaz PID funkcijskog bloka korištenog za regulaciju protoka*

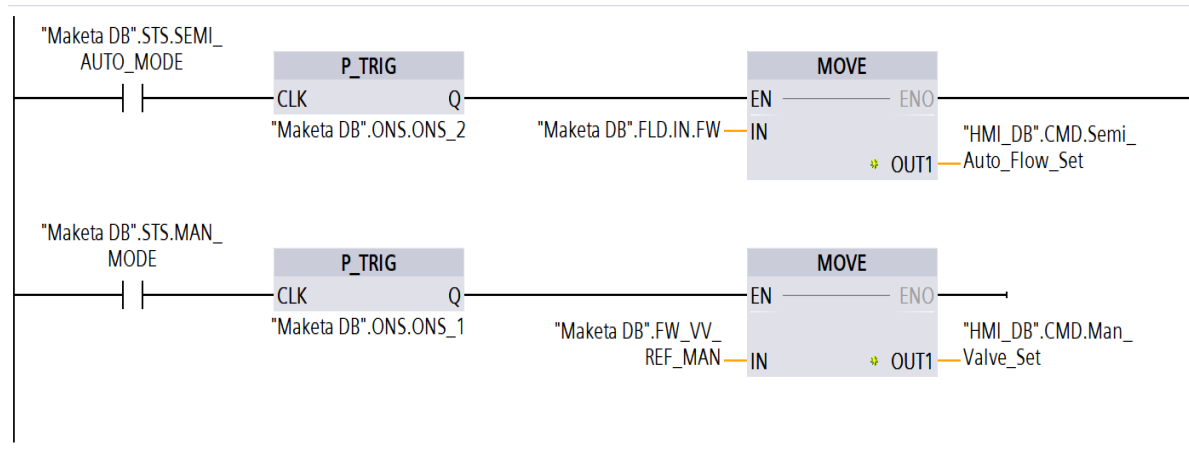
PID funkcijski blok sastoji se od 4 ulazne varijable te jednom izlaznom varijablom. PID\_PV predstavlja reguliranu veličinu što je u ovom slučaju protok fluida. PID\_SP predstavlja željenu vrijednost regulirane veličine, dok PID\_TIEBACK predstavlja vrijednost otvorenosti ventila kada se isključi automatski režim rada tj. ta vrijednost koristi se prilikom prebacivanja iz automatskog režima u ručni režim te vrijednost otvorenosti ventila u ručnom režimu rada postaje jednak vrijednosti otvorenosti ventila u trenutku prebacivanja iz automatskog režima u ručni režim. PID\_CV predstavlja upravljačku veličinu koja određuje otvorenost ventila kako bi se postigla željena vrijednost promatrane veličine, odnosno protoka.

Osim PID funkcijskog bloka koristi se i SYC\_FC\_RAMP funkcija napravljena od strane Daniela Systec tvrtke koji se koristi za linearnu porast vrijednosti. U ovom slučaju funkcijom linearnog porasta se obrađuje vrijednost željenog protoka, bez korištenja ovog bloka prilikom unosa željene vrijednosti protoka fluida vrijednost bi bila očitana trenutno dok se linearnim porastom vrijednost postupno linearno povećava ili smanjuje (kroz određeni vremenski interval) do željene vrijednosti. Na slici 3.17. prikazan je izgled SYC\_FC\_RAMP funkcije.



*Slika 3.17. Prikaz SYC\_FC\_RAMP funkcije korištene za rampiranje vrijednosti protoka*

Prilikom prelaska iz automatskog u ručni režim rada vrijednost otvorenosti ventila u trenutku odabira ručnog režima rada prepisuje se u vrijednost otvorenosti ventila u ručnom režimu rada. Ovakav pristup odabran je kako iznos protoka fluida ne bi imao propade tijekom prebacivanja iz jednog u drugi režim rada već vrijednost protoka ostaje na približno jednakoj vrijednosti. Prebacivanjem iz ručnog u automatski režim rada, vrijednost protoka u ručnom režimu prepisuje se u vrijednost protoka u automatskom režimu rada te se iz ručnog upravljanja protokom prelazi u upravljanje protokom pomoću PID regulatora. Na slici 3.18. prikazan je dio programskog rješenja koji odrađuje upisivanje protoka, odnosno otvorenosti ventila ovisno o prebacivanju iz jednog režima rada u drugi.



**Slika 3.18.** Prikaz dijela programskog rješenja koji odrađuje upisivanje protoka, odnosno otvorenosti ventila ovisno o prebacivanju iz jednog režima rada u drugi

Funkcija VALVE\_CALIBRATION koja je prikazana na slici 3.15. služi za određivanje statičke karakteristike proporcionalnog ventila. Prilikom uključanja kalibracije ventila u HMI-u, proporcionalni ventil otvori se na vrijednost 20 [%] te podiže vrijednost otvorenosti za 10 [%] do otvorenosti ventila od 100 [%]. Na svakoj vrijednosti otvorenosti ventila očita se iznos protoka te se upisuje u programu. Prilikom kalibracije ventila na HMI korisničkom sučelju vidljive su točke na x-y grafu gdje x-os predstavlja otvorenost ventila, a y-os predstavlja protok. Na temelju ovih točaka dobiva se funkcija ovisnosti protoka o otvorenosti ventila te se može iskoristiti za korištenje BIAS-a unutar PID regulacije. BIAS predstavlja dovođenje u radnu točku, u ovom slučaju BIAS bi predstavljao vrijednost otvorenosti ventila za željeni protok. Uz korištenje BIAS-a najčešće se koristi integralni dio PID regulatora jer koristeći BIAS, ventil se otvara prema iznosu dobivenom iz statičke karakteristike ventila. Protok fluida bude približno jednak željenom protoku te se integralni dio regulatora koristi za finu regulaciju, tj. za uklanjanje greške koja je iznosom vrlo mala.

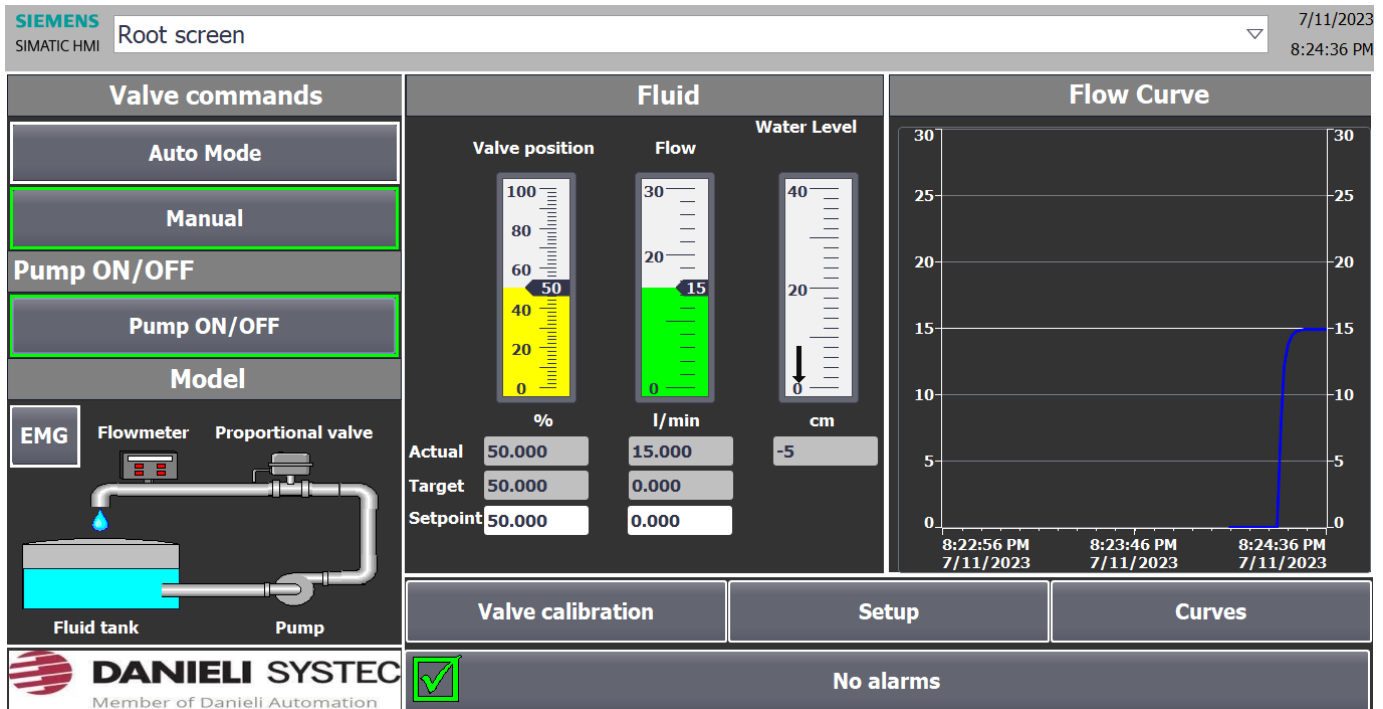
Osim regulacije koja se odvija u programu izrađeno je i korisničko sučelje s vizualizacijom procesa te prikupljanjem podataka u stvarnom vremenu, te se za razmjenu podataka između HMI i programa koristi funkcija HMI\_IN\_OUT.

### 3.4. Projektiranje korisničkog sučelja

U ovom potpoglavlju predstavljeno je korisničko sučelje kojim se upravlja sustavom regulacije fluida. Korisničko sučelje sastoji se od 4 zaslona, svaki od zaslona ima posebnu namjenu. U ovom potpoglavlju prikazani su svaki od zaslona te je objašnjen način korištenja.

### 3.4.1. Nadzorno-upravljački zaslon

Nadzorno-upravljački zaslon (na HMI: Main menu) predstavlja temeljni dio cjelokupnog HMI, na kojem uz upravljanje sustavom postoji i vizualizacija promatranih podataka. Na slici 3.19. prikazan je upravljački zaslon.



Slika 3.19. Prikaz upravljačkog zaslona

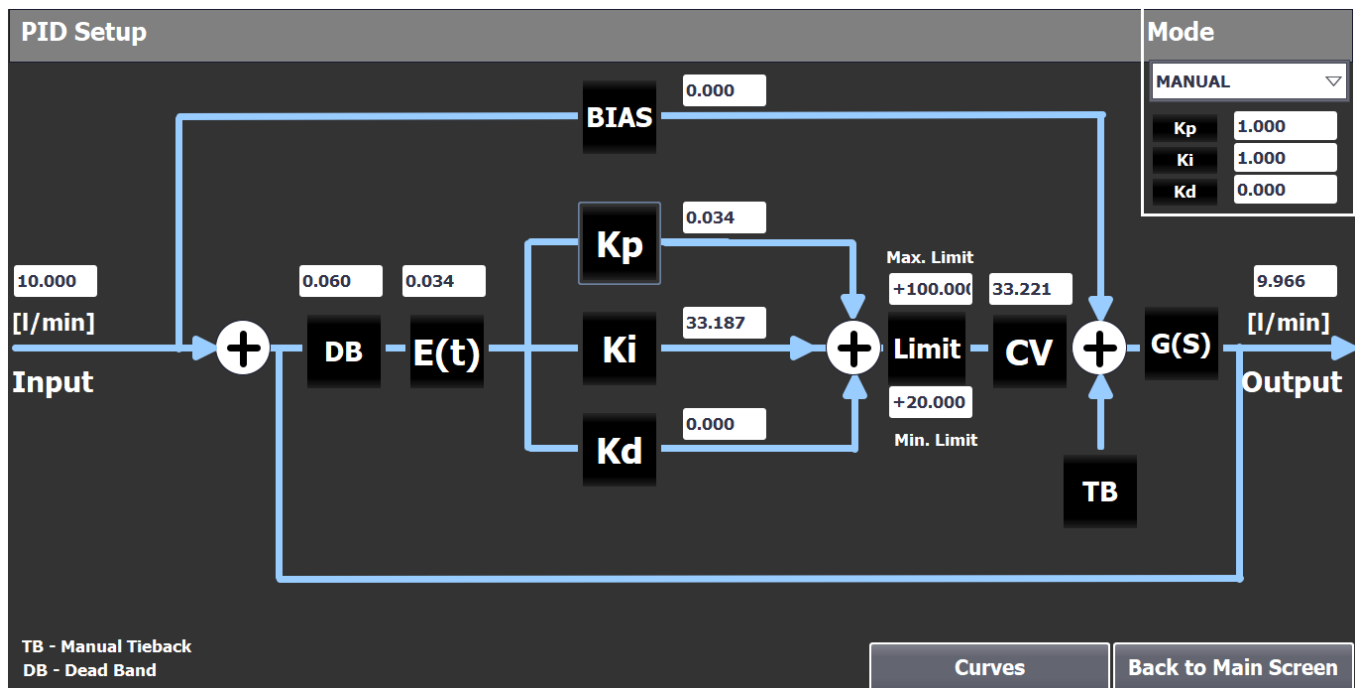
Nadzorno-upravljački zaslon koristi se za odabir načina upravljanja (ručni ili automatski), uključivanje crpke, praćenje vrijednosti protoka na grafu i klizaču te vrijednosti otvorenosti ventila i razine vode u gornjem spremniku na klizaču. U ručnom režimu rada korisnik upisuje vrijednost otvorenosti ventila te upravlja s crpkom dok u automatskom režimu rada korisnik upisuje željenu vrijednost protoka te upravlja crpkom.

Postoji i tipka za hitne slučajeve koja se koristi u slučaju opasnosti te se njenim pritiskom crpka isključuje. Osim toga, postoji zaštita rada crpke koja se uključuje kada je razina fluida u donjem spremniku niža od dozvoljene što regulira sklopka razine (zaštita od rada na suho). Zaštita se uključuje i kada je razina fluida u gornjem spremniku veća od dozvoljene (zaštita od istjecanja vode iz gornjeg spremnika). Uključenjem zaštite, crpka se isključuje. Razina vode u gornjem spremniku očitava se pomoću mjerača za razinu fluida.

U donjem dijelu zaslona nalazi se traka na kojoj se ispisuju alarmi, ovisno o tome o kojem se alarmu radi. Traka alarma uključuje se pritiskom EMG tipke, niskom razinom fluida u donjem spremniku te visokom razinom fluida u gornjem spremniku. Alarm se resetira pritiskom na tipku EMG. Na nadzorno-upravljačkom zaslonu nalazi se i shema sustava te graf koji opisuje ovisnost protoka o vremenu. Iz upravljačkog zaslona može se pristupiti ostalim zaslonima.

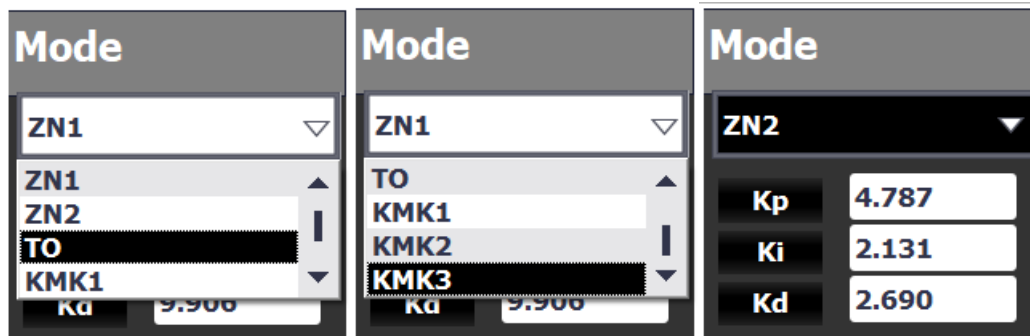
### 3.4.2. Regulacijski zaslon

Regulacijski zaslon (u HMI-u naziv je *PID Setup*) vezan je za PID regulaciju te se u regulacijskom zaslonu namještaju i vizualiziraju svi parametri bitni za PID regulaciju. Na slici 3.20. prikazan je regulacijski zaslon.



Slika 3.20. Prikaz regulacijskog zaslona

Regulacijski zaslon koristi se za postavljanje parametara PID regulatora te za njihovu vizualizaciju. Unutar regulacijskog zaslona nalazi se padajući izbornik gdje je moguć izbor parametara PID regulatora određenih bilo kojom metodom. Moguć je ručni unos parametara odabirom na tipku *Manual*.(Slika 3.21.)



Slika 3.21. Izgled padajućeg izbornika te izbor jedne od metoda

Na regulacijskom zaslonu nalazi se blok dijagram PID regulatora sa svim pripadajućim parametrima. Prikazan je izlaz i ulaz PID regulatora, moguć je upis vrijednosti zone neosjetljivosti (*engl. Dead Band*) koja predstavlja vrijednost raspona unutar kojeg je regulator isključen (blokiran). No, u slučaju PID funkcijskog bloka korištenog za promatrani sustav zona neosjetljivosti predstavlja raspon vrijednosti u kojoj se vrijednosti  $K_p$  i  $K_d$  jednaki nuli dok integralni dio regulatora ovisi o  $K_i$  i različit je od nula.

Osim toga, moguć je unos parametra  $K$  koji predstavlja vrijednost koja se množi sa svakim od parametara PID regulatora no vrijednost  $K$  u većini slučajeva jednak je jedan. Moguće je postaviti i parametar pod nazivom BIAS (radna točka procesa), čija je funkcija objašnjena u odjeljku 3.3.1. Trenutne vrijednosti utjecaja parametara regulatora na otvorenost ventila prikazane su za svaki pojedini parametar regulatora te se može očitati trenutna vrijednost, odnosno udjel u otvorenosti proporcionalnog ventila. Iz regulacijskog zaslona moguće je pristupiti upravljačkom zaslonu te analitičkom zaslonu.



### 3.4.3. Analitički zason

Analitički zaslon (u HMI-u naziv je *Curves*) vezan je za grafički prikaz utjecaja parametara regulatora ( $K_p$ ,  $K_i$  i  $K_d$ ) te za grafički prikaz ovisnosti protoka i otvorenosti ventila o vremenu. Analitički zaslon prikazan je na slici 3.22.

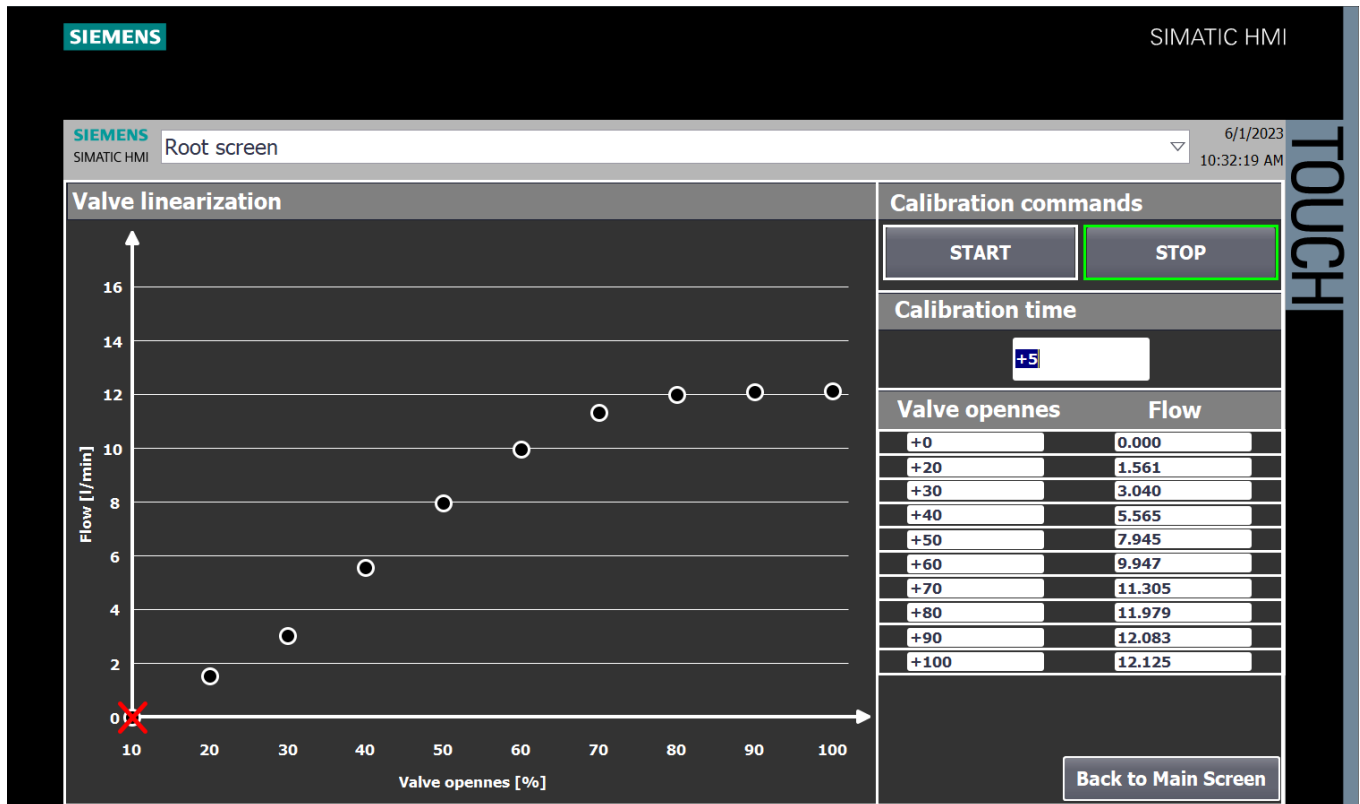


*Slika 3.22. Prikaz analitičkog zaslona (metoda tehničkog optimuma)*

Tri grafa s lijeve strane zaslona prikazuju trenutni utjecaj parametara regulacije na otvorenost ventila dok dva grafa s desne strane opisuju ovisnost protoka fluida o vremenu te ovisnost otvorenosti ventila te parametara regulacije o vremenu.

### 3.4.4. Zaslona za kalibraciju ventila

Zaslona za kalibraciju ventila (u HMI naziv je *Valve calibration*) ključan je za određivanje statičke karakteristike ventila te za grafički prikaz te karakteristike. Iz ovog zaslona pokreće se izvršavanje funkcije VALVE\_CALIBRATION (vidi odjeljak 3.4.1.). Osim pokretanja kalibracije korisnik upisuje koliko će vremena ventil ostati otvoren na svakoj od vrijednosti prije upisivanja vrijednosti protoka fluida u samu tablicu koja se zajedno s cijelim zaslonom kalibracije ventila nalazi na slici 3.23.



Slika 3.23. Prikaz zaslona za kalibraciju ventila

## 4. ANALIZA SUSTAVA REGULACIJE PROTOKA FLUIDA

U ovom poglavlju prikazani su rezultati i provedena je analiza kakvoće regulacije protoka vode i rashladne tekućine (*engl. antifreeze*). Analiza kakvoće regulacije temelji se na promatranju pokazatelja kakvoće regulacije (vidi odjeljak 2.4.4). Za svaki skup parametara regulatora dobivenih pojedinom metodom sinteze (vidi potpoglavlje 3.2) provedeno je 10 testova. Testovi obuhvaćaju promjene radnih točaka procesa skokovitom pobudom. Skokovite pobude razlikuju se po iznosu.

### 4.1. Regulacija protoka vode

U ovom potpoglavlju analizira se regulacija protoka vode pri temperaturi od 25 [°C] i gustoći od 997 [kg/m<sup>3</sup>]. Za svaki skup parametara regulatora dobivenih pojedinom metodom sinteze (vidi poglavlje 3.2) provedeno je 10 testova. Postignuta su četiri parametra kakvoće regulacije (vidi odjeljak 2.4.4), određen je prosjek vrijednosti pokazatelja kakvoće regulacije za svaki skup parametara regulatora.

#### 4.1.1. Eksperimentale metode

Odjeljak 4.1.1. sadrži tablice i analizu rezultata dobivenih testiranjem Ziegler-Nicholsove metode prijelazne funkcije i metode ruba stabilnosti.

*Tablica 4.1. Prikaz iznosa pokazatelja kakvoće regulacije metodom ruba stabilnosti*

Radna točka [l/min]	2-3	3-5	5-8	2-7	7-13	13-14	14-2	2-9	9-14	14-10
$\sigma_m$ [%]	68.7	111.35	67.2	55.8	7.16	17.2	0	16	5.56	37.755
$t_m$ [s]	2.596	3.944	4.397	5.31	8.675	9.324	0	5.61	15.411	4.707
$t_r$ [s]	0.715	0.988	1.314	1.44	3.83	3.47	6.193	2.39	5.28	1.5
$t_{3\%}$ [s]	5.04	63.2	9.62	11.061	9.816	3.011	20.56	8.43	7.117	5.993

Prosječne vrijednosti pokazatelja kakvoće regulacije metodom ruba stabilnosti:

$$\sigma_m - \text{prosjeak: } 38.6725 \text{ [\%]}$$

$$t_m - \text{prosjeak: } 5.443 \text{ [s]}$$

$$t_r - \text{prosjeak: } 5.997 \text{ [s]}$$

$$t_{3\%} - \text{prosjeak: } 14.3848 \text{ [s]}$$

**Tablica 4.2** Prikaz iznosa pokazatelja kakvoće regulacije metodom prijelazne funkcije

Radna točka [l/min]	2-3	3-5	5-8	2-7	7-13	13-14	14-2	2-9	9-14	14-10
$\sigma_m$ [%]	25.6	20.7	15.93	17.8	12.667	0	1.858	18.43	5.6	10.25
$t_m$ [s]	14.593	6.987	6.88	5.898	11.65	0	19.00	7.09	18.65	8.24
$t_r$ [s]	5.27	2.81	3	2.15	4.112	9.912	6.21	2.59	5.813	3.18
$t_{3\%}$ [s]	Oscilacije između 2.9 i 3.1.	Oscilacije između 5.180 i 4.870.	8.89	10.9	17.91	6.11	Oscilacije između 2.19 i 1.8	12.26	7.74	10.74

Prosječne vrijednosti pokazatelja kakvoće regulacije metodom prijelazne funkcije:

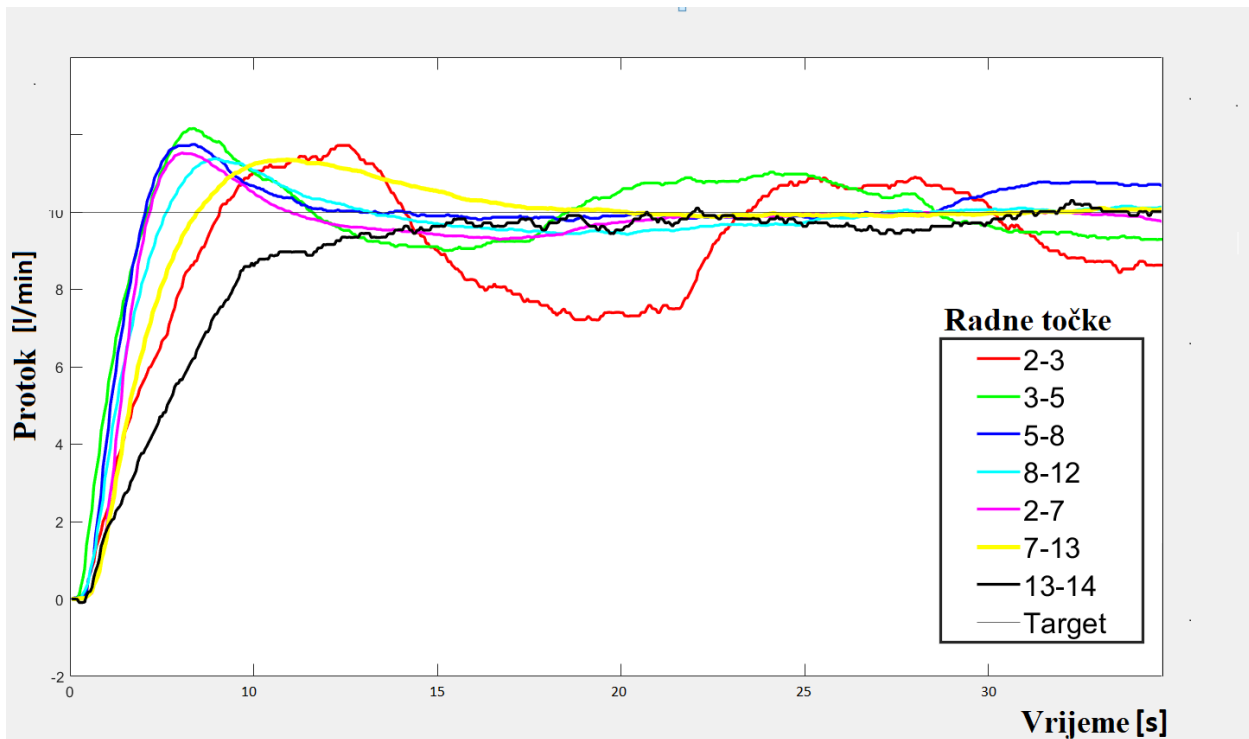
$$\sigma_m - \text{prosjeak: } 12.883 \text{ [\%]}$$

$$t_m - \text{prosjeak: } 9.9348 \text{ [s]}$$

$$t_r - \text{prosjeak: } 4.5047 \text{ [s]}$$

$$t_{3\%} - \text{prosjeak: } 10.65 \text{ [s]}$$

Budući da su testiranja provedena u različitim radnim točkama ubačen je pomak kako bi svi odzivi započinjali od iste vrijednosti, a budući da regulacijski krug pobuđivan skokovitom pobudom različitih amplituda provedeno je i skaliranje kakobi promjena izlazne veličine bila ista. Na ovaj način puno je lakše vizualno usporediti ove odzive.



*Slika 4.1. Prikaz odziva protoka vode sa skaliranim vrijednostima skokovitih pobuda*

Promatrajući postignute pokazatelje kakvoće regulacije uočava se razlika između kvalitete regulacije metodom ruba stabilnosti i metodom prijelazne funkcije. Iznosi nadvišenja i vremena ustaljivanja bitno su veći korištenjem metode ruba stabilnosti. S većim iznosom nadvišenja i vremena ustaljivanja manja je prigušenost sustava, tj. potrebno je više vremena da se regulacijski krug ustali na željenu vrijednost protoka. Bitno je uočiti kako korištenjem parametara regulatora dobivenih metodom prijelazne funkcije u tri radne točke nije bilo moguće postići regulacijsko odstupanje manje od 3 [%] željene vrijednosti, tj. vrijeme ustaljivanja nije uspješno određeno. Razlog tome je što su parametri regulatora metodom prijelazne funkcije određeni na temelju rezultata eksperimenata u kojima su radne točke iznosile od 9 do 14 [l/min] i za vrijednosti radnih točaka izvan tog opsega pokazatelji kakvoće regulacije su iznosom lošiji (iznosom veće nadvišenje i vrijeme ustaljivanja). U dva testa željena vrijednost protoka iznosila je 2 [l/min] i nije se postiglo ustaljeno stanje upravo zbog toga što se iznos od 2 [l/min] nalazi izvan gore navedenog opsega na temelju kojeg su određeni parametri regulatora. Pokazatelji kakvoće regulacije bolji su primjenom metode prijelazne funkcije što se naročito uočava kod vrijednosti radnih točaka unutar opsega od 9 do 14 [l/min].

#### 4.1.2. Grafo-analiitičke metode

Odjeljak sadrži tablice i analizu kakvoće regulacije uz parametre regulatora određene metodom krivulje mjesta korijena (vidi odjeljak 3.2.4.) i metodom Tehničkog optimuma (vidi odjeljak 3.2.3.). Prikazane su 4 tablice koje sadrže pokazatelje kakvoće regulacije.

*Tablica 4.3 Prikaz iznosa pokazatelja kakvoće regulacije metodom tehničkog optimuma*

Radna točka [l/min]	2-3	3-5	5-8	2-7	7-13	13-14	14-2	2-9	9-14	14-10
$\sigma_m$ [%]	17.1	0	0	0	0	0	1.56	0	0	0
$t_m$ [s]	27.22	6.670	0	0	0	0	56.0	0	0	0
$t_r$ [s]	12.780	3.60	3.853	3.18	5.521	26.0	12	3.7	9.506	10.77
$t_{3\%}$ [s]	37.66	5.397	5.7	5.52	8	9.2	Oscilacija između 1.8 i 2.2	7.7	9.053	16.46

Prosječne vrijednosti pokazatelja kakvoće regulacije metodom tehničkog optimuma:

$\sigma_m$  – prosjek: 1.886 [%]

$t_m$  – prosjek: 8.989 [s]

$t_r$  – prosjek: 9.1003 [s]

$t_{3\%}$  – prosjek: 11.632 [s]

Računanjem parametara regulatora metodom Tehničkog optimuma zadan je relativni koeficijent prigušenja uz koji nadvišenje može iznositi do 4.3 [%]. Promatrajući parametre regulatora (tablica 4.3), iznos nadvišenja je u 9 od 10 testova manji od 4.3 [%] te je prosječna vrijednost nadvišenja jednaka 1.886 [%]. Razlog tomu je matematički model sustava tj. dominantna vremenska konstanta bi trebala biti nešto veća od 4.48, odnosno nedominantna vremenska konstanta nešto niža od 0.3, kako bi se dobila veća vrijednost proporcionalnog i integralnog dijela regulatora. Porastom proporcionalnog i integralnog dijela poraslo bi i nadvišenje sustava (3-29). Dominantna vremenska konstanta jednaka je vremenskoj konstanti ventila koja se određivala na eksperimentalan način (3-18), vjerojatno je došlo do malog odstupanja od stvarne vrijednosti. Primjetno je da se radnoj točki od 2 [l/min] događaju oscilacije ili je vrijeme ustaljivanja vrlo visoko što je vidljivo u tablici 4.3. Uzrok tomu nalazi se u većem otporu protoku i promjenama koje nastaju pri niskoj otvorenosti ventila (oko 20 [%]).

**Tablica 4.4.** Prikaz iznosa pokazatelja kakvoće regulacije metodom KMK kada je nula regulatora u -1

Radna točka [l/min]	2-3	3-5	5-8	2-7	7-13	13-14	14-2	2-9	9-14	14-10
$\sigma_m$ [%]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$t_m$ [s]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$t_r$ [s]	17.6	2.84	3.86	3.29	5.1	27.97	14.1	3.35	7.552	8.81
$t_{3\%}$ [s]	19.0	4.47	6.031	6.82	7.5	8.82	34.2	7.0	9.9	25.49

Prosječne vrijednosti pokazatelja kakvoće regulacije metodom KMK kada je nula regulatora u točki -1:

$\sigma_m$  – prosjek: 0 [%]

$t_m$  – prosjek: 0 [s]

$t_r$  – prosjek: 9.4472 [s]

$t_{3\%}$  – prosjek: 12.921[s]

Korištenjem metode KMK parametri kakvoće su iznimno dobri. Iznimno dobre parametre kakvoće regulacije odlikuje nizak iznos nadvišenja te mogućnost regulacije u svim radnim točkama. Nizak iznos nadvišenja iznimno je bitan jer porastom nadvišenja crpki i proporcionalnom ventilu smanjuje se životni vijek. Porastom nadvišenja dolazi do brze promjene iznosa protoka u vremenu te se povećava opterećenje na lopaticama crpke.

**Tablica 4.5** Prikaz iznosa pokazatelja kakvoće regulacije metodom KMK kada je nula regulatora u -2

Radna točka [l/min]	2-3	3-5	5-8	2-7	7-13	13-14	14-2	2-9	9-14	14-10
$\sigma_m$ [%]	8.2	11.45	6.967	2.667	2.67	0	0	9.86	0	0
$t_m$ [s]	9.476	3.28	3.87	4.42	10.21	0	0	5.446	0	0
$t_r$ [s]	1.229	1.19	1.57	1.825	4.147	19.46	10.6	2.42	5.76	1.567
$t_{3\%}$ [s]	2.450	4.05	2.95	5.88	6.09	4.81	28.0	7.318	7.74	13.99

Prosječne vrijednosti pokazatelja kakvoće regulacije metodom KMK kada je nula regulatora u točki -2:

$\sigma_m$  – prosjek: 4.184[%]

$t_m$  – prosjek: 3.6702 [s]

$t_r$  – prosjek: 4.9805 [s]

$t_{3\%}$  – prosjek: 8.3244[s]

**Tablica 4.6** Prikaz iznosa pokazatelja kakvoće regulacije metodom KMK kada je nula regulatora u -3

Radna točka	2-3	3-5	5-8	2-7	7-13	13-14	14-2	2-9	9-14	14-10
$\sigma_m$ [%]	27.6	62.45	50.466	34.8	0	0	0	15.00	0	9.3
$t_m$ [s]	2.52	3.6	4.1	4.85	0	0	0	5.76	0	4.29
$t_r$ [s]	0.77	1.02	1.38	1.795	4.114	4.867	8.934	2.43	5.79	1.45
$t_{3\%}$ [s]	63.0	59.3	7.0	9.56	6.4	3.37	Osc. 1.15 i 1.85	14.04	7.83	9.77

Prosječne vrijednosti pokazatelja kakvoće regulacije metodom KMK kada je nula regulatora u točki -2:

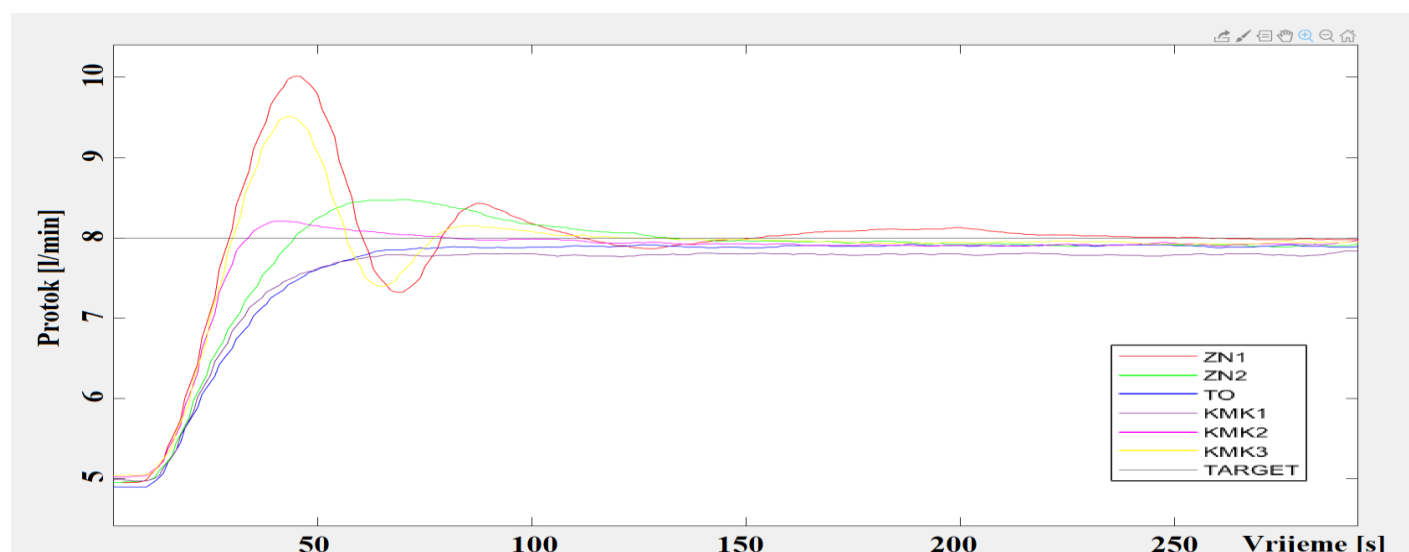
$\sigma_m$  – prosjek: 19.962[%]

$t_m$  – prosjek: 2.512 [s]

$t_r$  – prosjek: 3.255[s]

$t_{3\%}$  – prosjek: 20.03[s]

Postavljanjem nule regulatora (vidi odjeljak 3.2.4.) u točke -1, točku -2 i točku -3 vidljivo je kako odmicanjem nule od ishodišta dolaze više do izražaja proporcionalni i integralni dio regulatora. Smanjenjem derivacijskog dijela vrijeme ustaljivanja i nadvišenje se povećavaju, dok se vrijeme porasta smanjuje. Na slici 4.2. prikazani su odzivi protoka od radne točke 5 [l/min] do radne točke 8 [l/min] za sve metode.



**Slika 4.2.** Prikaz odziva protoka vode od radne točke 5 [l/min] do radne točke 8 [l/min] za sve metode



**Tablica 4.7** Prikaz iznosa prosjeka pokazatelja kakvoće regulacije i parametara regulatora svih metoda

Parametri	ZN1	ZN2	TO	KMK1	KMK2	KMK3
$K_p$	15.00	4.787	4.843	5.8	10.328	14.203
$K_i$	5.679	2.131	1.081	1.078	2.098	3.013
$K_d$	9.906	2.690	0	4.25	3.707	3.079
<b>Pokazatelji</b>	-	-	-	-	-	-
$\sigma_m$ [%]	38.672	12.883	1.886	0.0	4.184	19.962
$t_m$ [s]	5.443	9.935	8.989	0.0	3.670	2.512
$t_r$ [s]	5.997	4.505	9.100	9.447	4.980	2.255
$t_{3\%}$ [s]	14.385	10.650	11.632	12.923	8.324	20.030

**Tablica 4.8** Prikaz raspona pokazatelja kakvoće regulacije vode (zelenom bojom označeni pokazatelji s najmanjim rasponom vrijednosti)

Pokazatelji	ZN1	ZN2	TO	KMK1	KMK2	KMK3
$\sigma_m$ [%]	0 - 111.35 =111.35	0 - 25.6 = 25.6	0 - 17.1 = 17.1	0.0 - 0.0 = 0.0	0 - 11.450 = 11.450	0 - 62.45 = 62.45
$t_m$ [s]	0 - 15.411 =15.411	0 - 19.00 = 19.00	0 - 56.0 = 56.0	0.0 - 0.0 =0.0	0 - 10.21 = 10.21	0 - 5.76 = 5.76
$t_r$ [s]	0.715 - 6.193 = 5.478	2.15 - 9.912 = 7.762	3.18 - 26.0 = 22.82	2.84 - 27.97 = 25.13	1.19 - 19.46 = 18.27	0.77 - 8.934 = 8.164
$t_{3\%}$ [s]	5.04 - 63.2 = 58.6	6.11 - 17.91 = 11.8	5.397 - 37.66 = 32.263	4.47 - 34.2 = 29.73	2.45 - 28.0 = 25.55	3.37 - 63.0 = 59.63

Kvalitetna regulacija u promatranom laboratorijskom postrojenju zahtjeva što manje moguće nadvišenje i što kraće vrijeme porasta i vrijeme ustaljivanja. Usporedbom šest grupa parametara regulatora crvenom bojom označeni su najlošiji rezultati po određenom pokazatelju, a zelenom bojom najbolji rezultati po određenom pokazatelju. Iako je i vrijeme ustaljivanja i vrijeme porasta bitan pokazatelj kakvoće regulacije iznos nadvišenja je odlučujući u izboru grupe parametara regulatora s najkvalitetnijom regulacijom. Promatrajući tablicu 4.7 metoda KMK1 (nula regulatora u točki -1) odabrana je za metodu s najboljom kakvoćom regulacije upravo jer je iznos nadvišenja jednak nuli. Vrijeme porasta regulirane veličine u slučaju regulacije protoka fluida nije toliko važno kao iznos nadvišenja pa bez obzira na najveće vrijeme porasta KMK1 i dalje se smatra najboljom metodom sinteze u ovom slučaju. Osim toga, postoje

dvije vrste pokazatelja kakvoće regulacije za koje KMK1 odlikuje najmanji raspon vrijednosti (Tablica 4.8). Najmanji raspon vrijednosti pokazatelja označava robusniji regulator odnosno regulator koji se unatoč promjenama radnih točaka opire naglim promjenama. Također, metoda Tehničkog optimuma po parametrima vrlo je slična metodi KMK1 te se i u tom slučaju radi o kvalitetnoj regulaciji. Metodama KMK2 (nula regulatora u točki -2) i KMK3 (nula regulatora u točki -3) ideja je prikazati pokazatelje kakvoće regulacije pomicanjem nule regulatora dalje od ishodišta. KMK3 metoda ima daleko kraće vrijeme porasta, ali visoki iznos nadvišenja te dugo vrijeme ustaljivanja pa u ovom slučaju ne predstavlja grupu parametara koju odlikuje kvalitetna regulacija. KMK2 metoda ima iznimno nisku vrijednost nadvišenja (manje od 4.3 [%], zahtjev tehničkog optimuma) što znači regulacijski krug određen KMK2 metodom ima najveće prigušenje. Također, KMK2 metoda ima kraće vrijeme ustaljivanja, dok je vrijeme porasta manje uspoređujući s metodom Tehničkog optimuma i metodom KMK1. Metoda KMK2 se može svrstati uz KMK1 metodu te metodu Tehničkog optimuma među najbolje tri metode za određivanje parametara regulatora s prihvatljivim iznosima pokazatelja kakvoće regulacije.

Nadalje, eksperimentalne metode ne odlikuju najbolji parametri kakvoće regulacije. Eksperimentalne metode opisane su u literaturi kao metode koje dobro otklanjaju utjecaj poremećaja koji mogu djelovati na sustav tijekom rada dok slabo prate promjene regulirane veličine. Ziegler-Nicholsove metode predviđene su za primjenu u industriji gdje je potrebno održanje određene radne točke procesa. S primjenom Ziegler-Nichols metoda kod regulacije protoka laboratorijskog postrojenja uočava se visoko nadvišenje (veće od 10 [%]) te nešto veće vrijeme ustaljivanja (veće od 10 [s]). Ziegler-Nichols metode se ne koriste za česte promjene radnih točaka i brzu stabilizaciju već se koriste za održanje određene radne točke procesa tj. referentna veličina je konstantna, pa je regulatoru glavna zadaća potiskivanje utjecaja smetnji (regulacija na čvrstu vrijednost).

## **4.2. Regulacija protoka rashladnog sredstva**

U ovom potpoglavlju analizira se regulacija protoka rashladnog sredstva pri temperaturi od 25 [°C] i gustoći od 1054 [kg/m<sup>3</sup>]. Za svaku od metoda (vidi potpoglavlje 3.2) provedeno je 10 testova te su promatrana četiri pokazatelja kakvoće regulacije, određen je prosjek vrijednosti svakog pokazatelja kakvoće za svaku od metoda. Iznosi parametara regulatora jednaki su parametrima regulatora kod eksperimenata s vodom.

Promijenjeni su parametri crpke budući da je maksimalni iznos protoka vode pri otvorenosti ventila iznosio oko 14.5 [l/min], dok je maksimalni protok rashladnog sredstva iznosio oko 12.5 [l/min].

Uzrok tomu je veća gustoća ovog fluida, veći otpor na lopaticama crpke te u cijevima. Pet testiranja kakvoće regulacije vode imali su radnu točku veću od 12.5 [l/min] te nije bilo moguće postići te radne točke s rashladnim sredstvom. Stoga, testovi su izmjenjeni ostavljajući skokovitu pobudu jednakom. Naprimjer, ako se radna točka kod regulacije vode kretala od 9 [l/min] do 14 [l/min] kod rashladnog sredstva radna točka kretala se od 7 [l/min] do 12 [l/min]

#### 4.2.1. Eksperimentalne metode

Odjeljak sadrži tablice i analizu rezultata dobivenih testiranjem vladanja regulacijskog kruga s regulatorom čiji su parametri određeni Ziegler-Nicholsovom metodom prijelazne funkcije i metodom ruba stabilnosti.

**Tablica 4.9.** Prikaz iznosa pokazatelja kakvoće regulacije metodom ruba stabilnosti

Radna točka [l/min]	2-3	3-5	5-8	2-7	6-12	11-12	12-4	2-9	7-12	12-8
$\sigma_m$ [%]	60.15	72.75	42.23	33.0	0	19.2	0	9.57	0	6.8
$t_m$ [s]	2.67	3.74	4.66	5.29	0	8.75	0	6.8	0	4.28
$t_r$ [s]	0.72	1.07	1.59	1.98	6.31	3.81	6.14	3.0	6.07	1.49
$t_{3\%}$ [s]	11.12	9.23	7.0	10.46	9.37	8.75	19.3	8.6	8.65	8.56

Prosječne vrijednosti pokazatelja kakvoće regulacije metodom ruba stabilnosti:

$\sigma_m$  – prosjek: 24.37 [%]

$t_m$  – prosjek: 3.619 [s]

$t_r$  – prosjek: 3.217 [s]

$t_{3\%}$  – prosjek: 10.105 [s]

**Tablica 4.10** Prikaz iznosa pokazatelja kakvoće regulacije metodom prijelazne funkcije

Radna točka [l/min]	2-3	3-5	5-8	2-7	6-12	11-12	12-4	2-9	7-12	12-8
$\sigma_m$ [%]	16.12	21.9	15.27	16.16	7.5	4.1	2.8	17.86	7.80	9.9
$t_m$ [s]	13.79	8.6	7.0	6.78	15.25	23.24	17.1	8.59	22.5	11.8
$t_r$ [s]	4.43	3.4	2.8	2.47	5.65	12.08	6.0	3.0	5.70	4.3
$t_{3\%}$ [s]	21.93	12.7	10.9	11.86	15.25	23.24	78.0	14.41	23.0	14.2

Prosječne vrijednosti pokazatelja kakvoće regulacije metodom prijelazne funkcije:

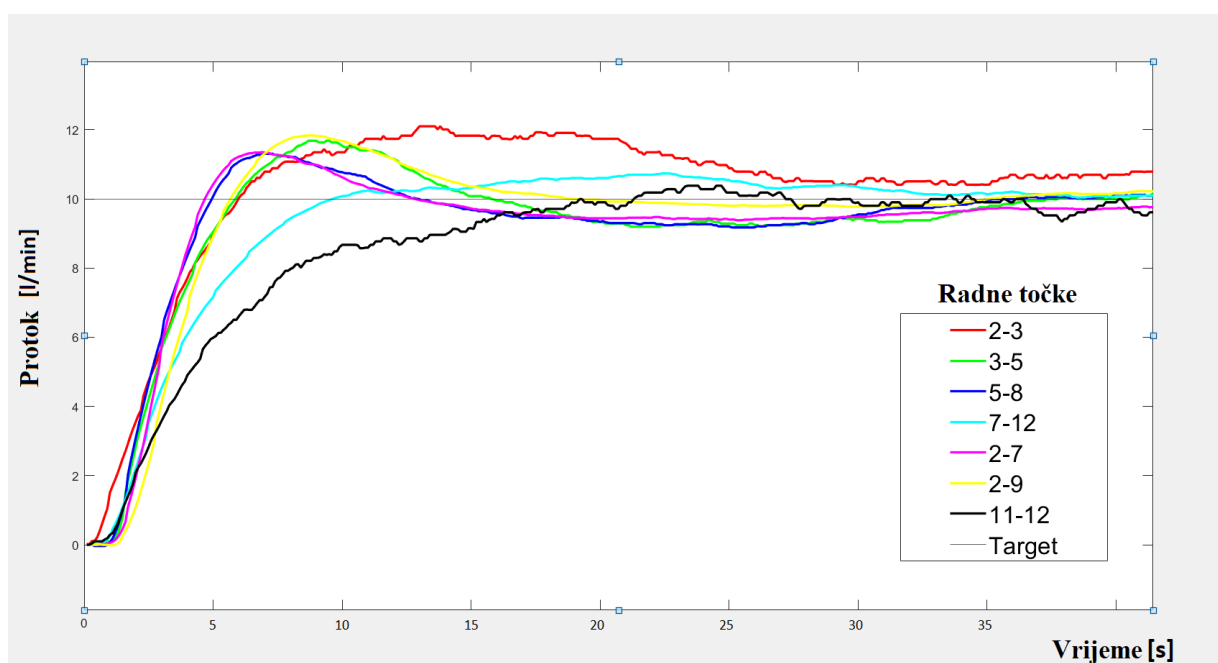
$\sigma_m$  – prosjek: 11.941 [%]

$t_m$  – prosjek: 13.465[s]

$t_r$  – prosjek: 4.983 [s]

$t_{3\%}$  – prosjek: 22.549[s]

Budući da su testiranja rađena u različitim radnim točkama ubačen je pomak kako bi svi odzivi započinjali od iste vrijednosti, a budući da regulacijski krug pobuđivan skokovitim pobudom različitih amplituda provedeno je i skaliranje kako bi promjena izlazne veličine bila ista. Na ovaj način je puno lakše vizualno uspoređivati ove odzive.



**Slika 4.3.** Prikaz odziva protoka rashladnog sredstva sa skaliranim vrijednostima skokovitih pobuda

#### 4.2.2. Grafo-analiitičke metode

Odjeljak sadrži tablice i analizu rezultata dobivenih testiranjem vladanja regulacijskog kruga s regulatorom čiji su parametri određeni metodom krivulje mjesta korijena (vidi odjeljak 3.2.4.) i metodom Tehničkog optimuma (vidi odjeljak 3.2.3). Prikazane su 4 tablice koje sadrže pokazatelje kakvoće regulacije.

**Tablica 4.11** Prikaz iznosa pokazatelja kakvoće regulacije metodom tehničkog optimuma

Radna točka [l/min]	2-3	3-5	5-8	2-7	6-12	11-12	12-4	2-9	7-12	12-8
$\sigma_m$ [%]	19.0	2.82	1.77	0	0	0	0	0	0	0
$t_m$ [s]	24.96	9.3	8.5	0	0	0	0	0	0	0
$t_r$ [s]	14.23	4.4	3.6	4.3	7.9	25.89	11.20	4.62	8.2	12.52
$t_{3\%}$ [s]	38.7	9.3	8.5	9.3	12.4	11.96	31.62	8.28	12.1	17.02

Prosječne vrijednosti pokazatelja kakvoće regulacije metodom tehničkog optimuma:

$$\sigma_m - \text{prosjeak: } 2.359 \text{ [%]}$$

$$t_m - \text{prosjeak: } 4.276 \text{ [%]}$$

$$t_r - \text{prosjeak: } 9.686 \text{ [s]}$$

$$t_{3\%} - \text{prosjeak: } 15.918 \text{ [s]}$$

**Tablica 4.12.** Prikaz iznosa pokazatelja kakvoće regulacije metodom KMK kada je nula regulatora u -1

[l/min]	2-3	3-5	5-8	2-7	6-12	11-12	12-4	2-9	7-12	12-8
$\sigma_m$ [%]	25.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$t_m$ [s]	5.34	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$t_r$ [s]	1.53	2.86	3.15	4.22	8.0	23.53	13.7	3.779	8.0	19.0
$t_{3\%}$ [s]	19.0	4.47	6.031	6.82	7.5	8.82	34.2	7.0	9.9	25.49

Prosječne vrijednosti pokazatelja kakvoće regulacije metodom KMK kada je nula regulatora u točki -1:

$$\sigma_m - \text{prosjeak: } 2.56 \text{ [%]}$$

$$t_m - \text{prosjeak: } 0.534 \text{ [%]}$$

$$t_r - \text{prosjeak: } 8.777 \text{ [s]}$$

$$t_{3\%} - \text{prosjeak: } 12.948 \text{ [s]}$$

**Tablica 4.13** Prikaz iznosa pokazatelja kakvoće regulacije metodom KMK kada je nula regulatora u -2

[l/min]	2-3	3-5	5-8	2-7	6-12	11-12	12-4	2-9	7-12	12-8
$\sigma_m$ [%]	24.53	7.45	6.167	9.8	0	0	0	6.857	4.6	0
$t_m$ [s]	1.966	3.53	5.86	5.09	0	0	0	6.95	19.22	0
$t_r$ [s]	0.908	1.34	1.8	2.12	6.93	11.62	10.57	3.0	5.45	1.91
$t_{3\%}$ [s]	6.240	3.53	5.86	8.80	12.05	5.36	27.91	10.97	19.22	11.97

Prosječne vrijednosti pokazatelja kakvoće regulacije metodom KMK kada je nula regulatora u točki -2:

$\sigma_m$  – prosjek: 5.940 [%]

$t_m$  – prosjek: 4.262 [%]

$t_r$  – prosjek: 4.565 [s]

$t_{3\%}$  – prosjek: 11.191 [s]

**Tablica 4.14** Prikaz iznosa pokazatelja kakvoće regulacije metodom KMK kada je nula regulatora u -3

[l/min]	2-3	3-5	5-8	2-7	6-12	11-12	12-4	2-9	7-12	12-8
$\sigma_m$ [%]	25.43	33.25	18.4	25.4	2.3	0	1.3	0	2.26	0
$t_m$ [s]	2.6	3.2	4.0	1.99	15.6	0	30.07	0	15.74	0
$t_r$ [s]	0.89	1.087	1.6	2.0	6.3	4.11	9.19	3.024	5.81	1.83
$t_{3\%}$ [s]	51.7	58.1	5.2	6.45	15.6	2.99	32.59	5.1	15.74	11.50

Prosječne vrijednosti pokazatelja kakvoće regulacije metodom KMK kada je nula regulatora u točki -3:

$\sigma_m$  – prosjek: 10.834 [%]

$t_m$  – prosjek: 7.320 [%]

$t_r$  – prosjek: 3.584 [s]

$t_{3\%}$  – prosjek: 20.497 [s]

**Tablica 4.15** Prikaz iznosa prosjeka pokazatelja kakvoće regulacije i parametara regulatora svih metoda

Parametri	ZN1	ZN2	TO	KMK1	KMK2	KMK3
$K_p$	15.00	4.787	4.843	5.8	10.328	14.203
$K_i$	5.679	2.131	1.081	1.078	2.098	3.013
$K_d$	9.906	2.690	0	4.25	3.707	3.079
<b>Pokazatelji</b>	-	-	-	-	-	-
$\sigma_m$	24.37	11.941	2.359	2.56	5.940	10.834
$t_m$	3.619	13.465	4.276	0.534	4.262	7.320
$t_r$	3.217	4.983	9.686	8.777	4.565	3.584
$t_{3\%}$	10.105	22.549	15.918	12.948	11.191	20.497

**Tablica 4.16** Prikaz raspona pokazatelja kakvoće regulacije rashladnog sredstva (zelenom bojom označeni pokazatelji s najmanjim rasponom vrijednosti)

Pokazatelji	ZN1	ZN2	TO	KMK1	KMK2	KMK3
$\sigma_m$ [%]	0 – 72.75 = 72.75	2.8 – 16.16 = 13.36	0 – 19.0 = 19.0	0 – 25.6 = 25.6	0 – 24.53 = 24.53	0 – 33.25 = 33.25
$t_m$ [s]	0 – 8.75 = 8.75	6.78 – 23.24 = 16.46	0 – 24.96 = 24.96	0 – 5.34 = 5.34	0 – 19.22 = 19.22	0 – 30.07 = 30.07
$t_r$ [s]	0.72 – 6.31 = 5.59	2.47 – 12.08 = 9.61	3.6 – 25.89 = 22.29	1.53 – 23.53 = 22.0	0.908 – 11.62 = 10.712	0.89 – 9.19 = 8.3
$t_{3\%}$ [s]	7.0 – 11.12 = 4.12	10.9 – 78.0 = 67.1	8.28 – 38.7 = 30.42	4.47 – 25.49 = 21.02	3.53 – 27.91 = 24.38	2.99 – 58.1 = 55.11

Koristeći parametre regulatora jednake kao i kod regulacije vode, dobiveni su iznosi pokazatelja kakvoće regulacije prikazani u tablici 4.15. U tablici 4.16 prikazani su rasponi pokazatelja kakvoće regulacije rashladnog sredstva. Regulacijski krugove čiji su parametri regulatora određeni eksperimentalnim metodama odlikuje visok iznos nadvišenja (veći od 10 [%]), dok je kod grafo-analitičkih metoda iznos nadvišenja niži, osim kod metode KMK3 (zbog većeg iznosa  $K_p - a$  u odnosu na ostale analitičke metode). Metoda ruba stabilnosti ili ZN1 metoda daje najmanje vrijeme ustaljivanja dok metoda prijenosne funkcije ili ZN2 metoda ima najveći iznos vremena ustaljivanja. U najbolje 3 grupe parametara regulatora ulaze metoda Tehničkog optimuma, KMK1 metoda te KMK2 metoda. Metoda Tehničkog optimuma te KMK1 metoda imaju niži iznos nadvišenja (manji od 4.3 [%]) dok je nadvišenje kod metode KMK2 nešto veće od 4.3 [%]. Razlika u iznosu nadvišenja nije velika između KMK1 metode i metode Tehničkog optimuma, dok postoji znatna razlika u vremenu porasta te vremenu ustaljivanja. Stoga, KMK1 metoda odabire se kao metoda koja rezultira parametrima regulatora koji daju najbolju kakvoću regulacije, iako se regulator dobiven ZN1 metodom u ovome slučaju pokazao kao robusniji od ostalih. Regulator dobiven ZN1 metodom smatra se robusnijim jer u dvije grupe pokazatelja kakvoće regulacije pokazuje najmanji raspon vrijednosti, ali ipak je prosječan iznos nadvišenja dosta veći od prosjeka vrijednosti određenih KMK1 metodom.

### 4.3. Analiza rezultata

U ovom potpoglavlju uspoređuju se pokazatelji kakvoće regulacije protoka vode i pokazatelji kakvoće regulacije rashladnog sredstva. Cilj je prikazati razlike u promjeni kakvoće regulacije promjenom fluida uz iste parametre regulatora (određene za slučaj regulacije protoka vode).

**Tablica 4.17** Prikaz iznosa prosjeka pokazatelja kakvoće regulacije i parametara regulatora svih metoda kod regulacije vode i rashladnog sredstva

Parametri	ZN1	ZN2	TO	KMK1	KMK2	KMK3
$K_p$	15.00	4.787	4.843	5.8	10.328	14.203
$K_i$	5.679	2.131	1.081	1.078	2.098	3.013
$K_d$	9.906	2.690	0	4.25	3.707	3.079
<b>Pokazatelji rash. sredstvo</b>	-	-	-	-	-	-
$\sigma_m$	24.37	11.941	2.359	2.56	5.940	10.834
$t_m$	3.619	13.465	4.276	0.534	4.262	7.320



$t_r$	3.217	4.983	9.686	8.777	4.565	3.584
$t_{3\%}$	10.105	22.549	15.918	12.948	11.191	20.497
<b>Pokazatelji voda</b>	-	-	-	-	-	-
$\sigma_m$ [%]	38.672	12.883	1.886	0.0	4.184	19.962
$t_m$ [s]	5.443	9.935	8.989	0.0	3.670	2.512
$t_r$ [s]	5.997	4.505	9.100	9.447	4.980	2.255
$t_{3\%}$ [s]	14.385	10.650	11.632	12.923	8.324	20.030

Uzimajući u obzir korištenje jednakih parametara regulatora za svaku pojedinu metodu za regulaciju protoka oba fluida (voda, rashladno sredstvo), uočava se promjena pokazatelja kakvoće regulacije. Kod metode ruba stabilnosti ili ZN1 metode iznos nadvišenja veći je kod regulacije protoka vode nego kod rashladnog sredstva. Uzrok tome je što matematički model ima drugačije parametre nego kada je fluid voda. Znan utjecaj ima i veća gustoća rashladnog sredstva te veći otpor na lopaticama crpke i u cijevima. S obzirom na manje nadvišenje manji je iznos i vremena ustaljivanja kod regulacije rashladnog sredstva ZN1 metodom. Kod metode prijelazne funkcije ili ZN2 metode iznos nadvišenja nešto je niži kod regulacije rashladnog sredstva dok je vrijeme ustaljivanja i vrijeme porasta nižeg iznosa kod regulacije vode. Uzrok tomu je eksperimentalno određivanje vremenske konstante proporcionalnog ventila provedenih s vodom, a ne s rashladnim sredstvom. Poznavanje vremenske konstante neophodno je za izračun parametara regulatora kod metode prijelazne funkcije (vidi odjeljak 3.2.2.) te bi iznos vremenske konstante bio bitno izmijenjen koristeći rashladno sredstvo umjesto vode. Stoga su pokazatelji kakvoće regulacije bolji kod testova s vodom. Usporedbom metode Tehničkog optimuma kod testova s vodom i testova s rashladnim sredstvom uočava se razlika u pokazateljima kakvoće regulacije u korist pokazatelja kakvoće regulacije vode. Kod testova s vodom iznos nadvišenja je niži te je vrijeme porasta i vrijeme ustaljivanja manje. Razlog tomu korištenje je matematičkog modela procesa u kojemu je fluid voda. Vremenska konstanta ventila te pojačanje procesa (vidi potpoglavlje 3.1) bili bi bitno izmijenjeni koristeći rashladno sredstvo kao fluid. Maksimalni iznos protoka izravno utječe na pojačanje procesa te je gore navedeno kako je maksimalni iznos protoka vode kod otvorenosti ventila od 100 [%] jednak oko 14.5 [l/min], dok je maksimalni iznos protoka rashladnog sredstva za istu otvorenost ventila jednak oko 12.5 [l/min] (relacija (3-5)). Osim toga, vremenska konstanta ventila bila bi sigurno većeg iznosa kod rashladnog sredstva nego kod vode zbog veće gustoće rashladnog sredstva te s time i većeg otpora te bi ventilu vjerojatno bilo potrebno više vremena za otvaranje pod utjecajem skokovite pobude.

Promatrajući metode KMK1, KMK2 i KMK3 vidljiva je kvalitetnija regulacije kod regulacije vode zbog istih razloga kao i kod metode Tehničkog optimuma. Grafo-analitičke metode zasnivaju se na matematičkom modelu koji u slučaju regulacije rashladnog sredstva nije dovoljno dobar, odnosno nemoguće je postići jednako dobre pokazatelje kakvoće regulacije (dobivenih vodom) promjenom fluida jer se mijenja i matematički model sustava.

## 5. ZAKLJUČAK

Regulacije protoka fluida u laboratorijskom postrojenju koristeći eksperimentalne te grafo-analitičke metode određivanja parametara regulatora uspješno je odrađena. Izrađen je odgovarajući matematički model procesa (regulacijske staze) te su određeni parametri regulatora koristeći vodu kao fluid. Prikazani su načini određivanja parametara regulatora koristeći Ziegler-Nichols metode, metodu Tehničkog optimuma te metodu krivulje mjesta korijena. Izrađeno je programsko rješenje te pripadajuće korisničko sučelje kojim se upravlja cjelokupnim sustavom.

Testiranjem kakvoće regulacije s parametrima regulatora dobivenih različitim metodama dobiveni su rezultati koji ukazuju na bitne razlike u vladanju regulacijskog kruga koje nastaju promjenom fluida u laboratorijskom postrojenju. Koristeći rashladno sredstvo umjesto vode vidljivo je kako su pokazatelji kakvoće regulacije lošiji te kako je potreban ponovan izračun parametara regulatora koristeći rashladno sredstvo kao fluid u cilju dobivanja kvalitetnije regulacije. Također, potrebna je i izmjena matematičkog modela jer su se pojačanje sustava i dominantna vremenska konstanta (vremenska konstanta proporcionalnog ventila) bitno promijenile. Cilj diplomskog rada upravo je prikaz izračuna parametara regulatora eksperimentalnim i analitičkim metodama, bolje razumijevanje i shvaćanje PID regulatora te prikaz rezultata u slučaju regulacije vode odnosno rashladnog sredstva. Iako se radi o sličnim fluidima ipak se primjećuje razlika u pokazateljima kakvoće regulacije zbog utjecaja veće gustoće rashladnog sredstva od vode. Ovakav primjer koristan je za razumijevanje prilika u industriji gdje se osim regulacije vode primjenjuje regulacija ulja, zraka i sl. Ne postoje univerzalni parametri regulatora te je potrebno promjenom fluida ili plina ugađati i parametre regulatora što je prikazano testiranjem vode odnosno rashladnog sredstva u ovom radu.

Rad se može modificirati uvođenjem određene smetnje u vidu začepljenja cijevi te promatranjem ponašanja protoka vode i rashladnog sredstva. Osim toga, moguće je ručno mijenjati brzinu crpke te promatrati utjecaj brzine crpke na pokazatelje kakvoće regulacije. Također, moguće je modificirati i matematički model eksperimentalnim određivanjem nedominantne vremenske konstante. Uz navedeno poboljšanje pokazatelje kakvoće regulacije vjerojatno bi se značajno povećali. Laboratorijsko postrojenje sadrži i mjerač razine tekućine te bi se mogli promatrati pokazatelji kakvoće regulacije razine tekućine korištenjem različitih fluida kao i u ovom radu.

## LITERATURA

1. <https://www.brunel.ac.uk/~emstaam/material/bit/PLC%20programming%20WEEK%201.pdf> – User manual for microprocessors and controllers, 22.02.2023.
2. G.Matančić, Programljivi logički kontroleri, Tehničko veleučilište u Zagrebu, 2012.
3. Zoran Glavaš, Anita Štrkalj, Sekundarna metalurgija i kontinuirano lijevanje, Sveučilište u Zagrebu, Sisak 2015. 06.03.2023.
4. <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/ww/Catalog/Product/> – Siemens katalog, 17.03.2023.
5. Meješ, I. Regulacija hidrauličkog sustava u realnom vremenu pomoću industrijskog PLC-a. Diplomski rad. Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, 2013. 17.03.2023.
6. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/proportional-controller> - ScienceDirect, Proportional Controller, 19.03.2023.
7. [https://www.tutorialspoint.com/control\\_systems/control\\_systems\\_controllers.htm](https://www.tutorialspoint.com/control_systems/control_systems_controllers.htm) - Tutorialspoint, Control Systems, 19.03.2023.
8. Temel, S., Yagli S., Gorem S., Discrete time control systems, P, PD, PI, PID Controllers, Middle East Technical University, 04.03.2023
9. <https://www.circuitbread.com/tutorials/proportional-integral-and-derivative-control-4-2> - CircuitBread, PID Control, 21.04.2023
10. Perković, L., Projektiranje sustava automatske regulacije brzine vrtnje glavnog stroja temeljem simulacijskog modela, Sveučilište u Splitu, Pomorski fakultet, Split, 2018.,
11. Z. Vukić, Lj. Kuljača, Automatsko upravljanje, Kigen, Zagreb, 2005., 21.04.2023
12. N.Perić., Automatsko upravljanje, Predavanja, Zagreb, 2005, 27.04.2023
13. S.Žak., An introduction to PID Controllers, Purdue University, 2016. 28.04.2023
14. Dražen Slišković, Procesna automatizacija, fakultetska skripta FERIT, Sveučilište J.J.

Strossmayera u Osijeku, Osijek 2013.

15. <https://www.crystallinstruments.com/pid-control-theory>, Crystal Instruments, PID Control Theory, 17.05.2023

## SAŽETAK

Regulacija protoka je vrlo česta zadaća u industrijskim postrojenjima pa joj se često pridaje veće značenje. U radu je modeliran proces protoka fluida na maketi postrojenja za pripremu fluida te projektiran PID regulator. Pri projektiranju sustava upravljanja korištena je simulacije i mjerenje na postrojenju. Za određivanje parametara regulatora korišteno je više metoda sinteze. Napravljena je sinteza regulatora korištenjem Ziegler-Nichols metoda, metode krivulje mjesta korijena te metode Tehničkog optimuma. Na postojećem laboratorijskom postrojenju implementiran je regulator na PLC te su provedena testiranja kakvoće regulacije na različitim radnim točkama i uz različite skokovite pobude. Provedeno je testiranje kakvoće regulacije protoka vode i rashladnog sredstva uz regulatore projektirane na modelu procesa s vodom kao fluidom. Izrađeno je programsko rješenje te pripadajuće korisničko sučelje kojim se upravlja cjelokupnim sustavom pri čemu je omogućeno i ručno i automatsko upravljanje.

**Ključne riječi: regulacija protoka, proporcionalni ventil, matematički model sustava PID regulator, Ziegler-Nichols, tehnički optimum, krivulja mjesta korijena,**

## **ABSTRACT**

### **Flow regulation system for fluid preparation in the laboratory plant**

The aim of the paper is to determine the parameters of the regulator and to show the quality parameters of the regulation of the fluid or coolant. A mathematical model of the system was determined, where the flow meter represents the measuring member, the proportional valve the executive member, and the flow is the regulated quantity. At the existing laboratory plant, the flow responses for different step impulse were recorded and the quality parameters of the regulation were determined. The regulator was synthesized using the Ziegler-Nichols method, the root locus method and the technical optimum method. Tests were conducted to record the response of water to step impulse and the response of the coolant. A software solution was created with belonging user interface that manages the entire system. The influence of the fluid density change on the regulation quality parameter is presented.

**Key words : flow control , PID controller, Ziegler-Nichols, technical optimum, root locus, proportional valve, mathematical model of the system**

## ŽIVOTOPIS

Luka Žuljević, rođen je 2000. godine u Osijeku. Živi u Koritni u kojoj pohađa niže razrede osnovne škole, dok više razrede pohađa i završava u Osnovnoj školi „Josip Kozarac“ u Semeljcima. Nakon završetka osnovne škole školovanje nastavlja u Gimnaziji „A.G.Matoš“ u Đakovu. Maturira 2018. godine i upisuje Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Nakon završenog preddiplomskog studija na istom fakultetu upisuje Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika, smjer Elektroenergetski sustavi. Na prvoj godini diplomskog studija fakulteta odradio je praksu u tvrtki Danieli Systec.



## **PRILOZI**

**P.1. Projekt u TIA Portalu nalazi se na DVD.**

**P.2. Projekt korisničkog sučelja u TIA Portalu nalazi se na DVD.**

**P.3. Matlab skripte nalaze se na DVD.**