

# Regulacija protoka pomoću proporcionalnog ventila

---

**Pavrišek, Ivan**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*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:200:589861>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-25**

*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**

**REGULACIJA PROTOKA POMOĆU  
PROPORCIONALNOG VENTILA**

**Diplomski rad**

**Ivan Pavrišek**

**Osijek, 2020.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit

Osijek, 15.09.2020.

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

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Ivan Pavrlišek
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Računarstvo
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	D-1006R, 23.09.2019.
<b>OIB studenta:</b>	82080011488
<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>	Prof.dr.sc. Robert Cupec
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Regulacija protoka pomoću proporcionalnog ventila
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Automatizacija i robotika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	sumentori: Robert Sabljo i Igor Pavlović, Danieli-Systec d.o.o.
<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: 3 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	15.09.2020.
Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:	Potpis:
	Datum:



**FERIT**

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

## IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA

Osijek, 21.09.2020.

Ime i prezime studenta:

Ivan Pavrišek

Studij:

Diplomski sveučilišni studij Računarstvo

Mat. br. studenta, godina upisa:

D-1006R, 23.09.2019.

Turnitin podudaranje [%]:

7

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Regulacija protoka pomoću proporcionalnog ventila**

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

i sumentora

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:

1. UVOD: .....	1
2. UPRAVLJANJE PROTOKOM .....	3
2.1. Proporcionalni ventil s regulacijom protoka .....	4
2.2. Primjena proporcionalnih ventila .....	7
2.2.1. Primarno hlađenje čelika .....	8
2.2.2. Sekundarno hlađenje čelika .....	9
2.3. Nelinearnost proporcionalnog ventila .....	10
2.4. Transportno kašnjenje .....	13
2.5. Ostali dijelovi sustava za upravljanje .....	16
2.5.1. Spremnici u sustavu .....	17
2.5.2. Crpka u sustavu .....	17
2.5.3. PLC.....	19
3. MODELIRANJE SUSTAVA I IZRADA PROGRAMSKOG RJEŠENJA .....	21
3.1. Matematički model sustava .....	21
3.2. Projektiranje regulatora.....	24
3.2.1. Linearizacija proporcionalnog ventila .....	24
3.2.2. Podešavanje parametara regulatora .....	26
3.3. Projektiranje računalnog simulatora .....	29
3.3.1. Struktura programskog koda .....	30
3.3.2. Opis programskog rješenja zadatka.....	32
3.4. Projektiranje korisničkog sučelja .....	39
3.4.1. Početni zaslon .....	40
3.4.2. Konfiguracijski zaslon .....	41
3.4.3. Regulacijski zaslon.....	42
3.4.4. Simulacijski zaslon.....	43
3.5. Testiranje simuliranog sustava .....	44
3.5.1. Rad simuliranog sustava s utjecajem transportnog kašnjenja .....	45
3.5.2. Rezultati simulacije.....	47
4. ZAKLJUČAK .....	50
LITERATURA .....	51
SAŽETAK .....	53
ABSTRACT.....	54

<b>ŽIVOTOPIS</b> .....	55
<b>PRILOZI</b> .....	56

## 1. UVOD:

U današnjoj industriji vrlo je visok stupanj primjene proporcionalnih ventila u odnosu na ostale tipove ventila, zbog toga što proporcionalni ventili u usporedbi s ostalim tipovima ventila imaju najbolji omjer cijene i performanse u procesima regulacije protoka. Konkretno, industrija se svela na upotrebu proporcionalnih i servo ventila u sustavima gdje je potrebno regulirati protok. Motivacija za izradu ovog diplomskog rada proizlazi iz velike razlike u broju znanstvenih radova na temu servo ventila u odnosu na broj radova o proporcionalnim ventilima. Područje proporcionalnih ventila u usporedbi s područjem servo ventila je puno slabije pokriveno. Ideja rada je razvoj regulacijskog sustava, čiji je centralni dio proporcionalni ventil, čijim se upravljanjem postiže regulacija protoka tekućine u sustavu.

Proporcionalni ventili imaju u regulacijskim sustavima bitnu ulogu izvršnog člana regulacije unutar sustava. Simulirani sustav se temelji na matematičkom modelu koji obuhvaća dva spremnika između kojih se nalaze crpka, proporcionalni ventil koji je ujedno i središnji element sustava te cijevi kojima su pojedini elementi povezani. Na temelju računalne simulacije moguće je odrediti parametre sustava i parametre regulatora potrebne za izradu što boljeg stvarnog hidrauličkog sustava prema nekim određenim zahtjevima koji su zadani. Time se postižu vrlo visoke uštede kod odabira ventila i ostalih dijelova sustava jer se postiže stvaran i detaljan uvid u rad pojedinačnih elemenata u simuliranom sustavu. Simulacijom rada sustava upravljanja se dobije jasan prikaz regulacije protoka pri zadanim parametrima, koje je moguće mijenjati kako bi se sustav mogao ispitati u različitim uvjetima. Kako se ne raspolaže s fizičkom maketom sustava, zbog izrade programskog rješenja bilo je potrebno izraditi matematički model procesa regulacije protoka u sustavu. Rad obuhvaća izradu programskog rješenja sustava u razvojnom okruženju Siemens TIA portal te izradu računalnog simulatora i korisničkog sučelja, koje je razvijeno u SIMATIC WinCC okruženju.

U drugom poglavlju prikazani su teorijski opisi proporcionalnog ventila te ostalih dijelova sustava upravljanja. U trećem poglavlju opisano je matematičko modeliranje sustava, projektiranje regulatora koji se koristi te izrada programske podrške i računalne simulacije u TIA portalu. Također, izloženi su rezultati simulacije pri podešenim parametrima regulatora te je prikazan utjecaj transportnog kašnjenja na kakvoću regulacije protoka.



## **Zadatak**

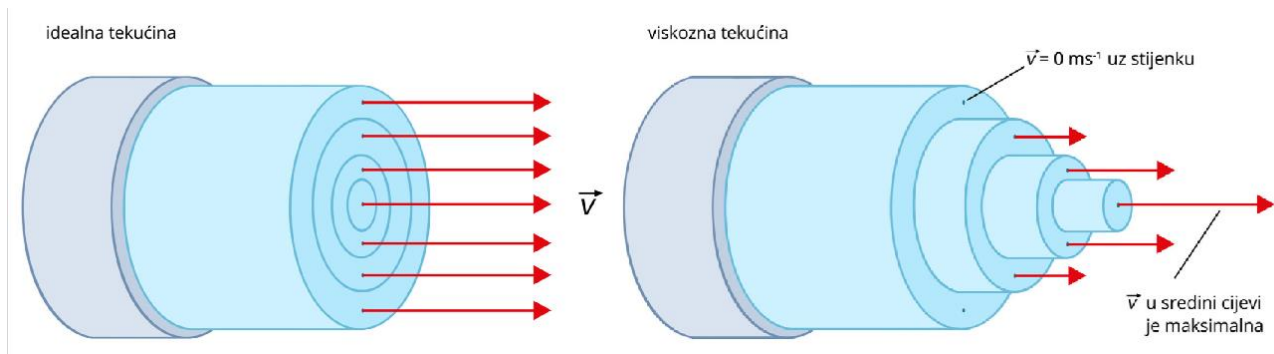
Treba izraditi sustav za upravljanje protokom tekućine pomoću proporcionalnog ventila. Sustav treba uzeti u obzir transportno kašnjenje, nelinearnu karakteristiku ventila, te regulaciju protoka u otvorenoj i zatvorenoj petlji. Diplomski rad uključuje razvoj softvera i simulaciju u alatu Tia Portal, te vizualizaciju u alatu TIA Portal.

## 2. UPRAVLJANJE PROTOKOM

Upravljanje protokom jedna je od najbitnijih funkcionalnosti u industriji koja pripada u područje hidraulike. Upravljanjem protoka u hidrauličkom sustavu zapravo se ostvaruje upravljanje brzinom protoka fluida. Treba razlikovati 2 različita načina za prikaz i mjerenje protoka:

- volumni protok,
- maseni protok.

Volumni protok definira se kao volumen fluida koji prolazi kroz neko područje u jedinici vremena, a mjerna jedinica mu je  $m^3/s$ , dok je maseni protok definiran kao masa fluida koja prolazi kroz neko područje u jedinici vremena i mjerna jedinica za maseni protok je  $kg/s$ . Odnosno, volumni i maseni protok se razlikuju samo po mjernim jedinicama. Također, bitno je naglasiti da postoje idealni i realni fluidi, a razlikuju se po tome što se kod realnih fluida pojavljuje svojstvo viskoznosti, odnosno pojava da se fluid ne giba jednakom brzinom po cijelom poprečnom presjeku. Prema tome brzina gibanja viskozne tekućine najveća je u sredini cijevi, što je prikazano na slici 2.1.



**Slika 2.1.** Idealni fluid i realni fluid [1].

Ventili su u hidrauličkim krugovima glavne komponente za upravljanje protokom fluida u sustavu, ali se upravljanje protokom može obavljati i pomoću regulacije vrtnje crpke. Kako je u ovome radu naglasak na regulaciji proporcionalnim ventilom, upravljanje pomoću regulacije vrtnje crpke neće biti obrađeno. Protok može biti reguliran u pogledu smjera protoka, brzine protoka i tlaka pa se sukladno tome biraju različiti ventili za različite primjene u regulaciji. Kao izvršni član u regulaciji protoka najčešće se koristi ventil.

## 2.1. Proporcionalni ventil s regulacijom protoka

U upravljačkim sustavima kao upravljački element unutar cjevovoda koristi se ventil. Za mjerenje protoka u takvim sustavima koriste se mjerna osjetila protoka (engl. *flow sensor*). Na temelju razlike između željene vrijednosti protoka i povratne informacije odnosno stvarne vrijednosti protoka, upravlja se cjelokupnim sustavom. Ako je izmjerena vrijednost protoka prevelika, otvorenost ventila se smanjuje kako bi se iznos protoka smanjio i postigao željenu vrijednost. Ako je izmjerena vrijednost protoka manja od željene vrijednosti protoka, tada se otvorenost ventila povećava.

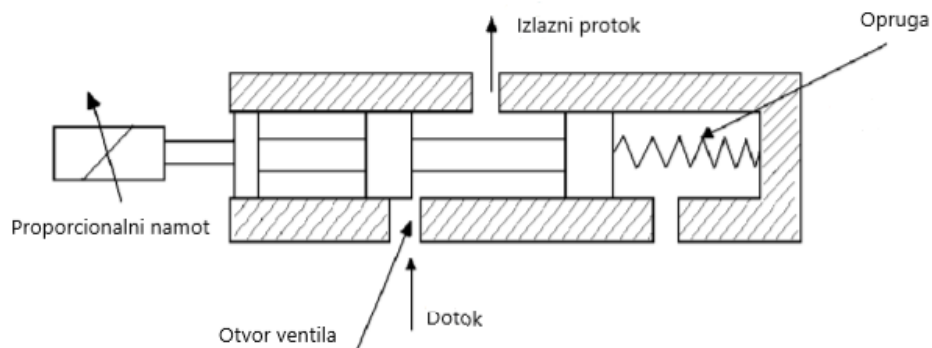
Za sustave u kojima su potrebni kontinuirani ili stepenasti prijelazi potreban je ventil kojemu se može regulirati otvorenost. Kod ventila s kontinuiranim prijelazom postoji beskonačno mnogo pozicija u kojima se klip ventila može pozicionirati dok kod ventila sa stepenastim prijelazom broj pozicija klipa je ograničen. U ovome radu objašnjeni su samo ventili s kontinuiranim prijelazima. U takvim sustavima se onda najčešće koriste proporcionalni ili servo ventili.

Proporcionalni ventili razvili su se iz elektromagnetskih ventila tako što je postignuto je to da se klip ventila može zaustavljati na beskonačno mnogo pozicija, a ne samo na kraju poteza klipa kao što je to bio slučaj kod elektromagnetskih ventila [2]. Samim time proporcionalni ventili nalaze se između elektromagnetskih i servo ventila po cijeni, performansama, složenosti te funkciji. Servo ventili su puno bolji zbog bržeg postizanja tražene vrijednosti protoka te bolje izrade, ali su cjenovno puno skuplji od proporcionalnih ventila. Proporcionalni ventil je ventil kojemu je izlazna veličina (smjer, protok ili tlak) proporcionalna upravljačkoj ulaznoj električnoj veličini. Većina proporcionalnih ventila dizajnirana je tako da im je protok proporcionalan pomaku klipa ventila pod konstantnim padom tlaka na ventilu.

Kod opisa rada proporcionalnog ventila potrebno je poznavati električne i magnetske pojave kao i zakone mehanike i hidraulike kako bi rad proporcionalnog ventila bio jasan. Kada električna struja proteče zavojnicom, generira se elektromagnetska sila proporcionalna struji i tako pomiče klip ventila, čijim se pomicanjem mijenja površina otvora za protjecanje ventila te se tako povećava ili smanjuje protok ventila, sukladno promjeni površine otvora za protjecanje.

U teoriji, otvorenost na izlazu ventila proporcionalna je jakosti struje u namotima na ulazu ventila, no u praksi ovisnost otvorenosti ventila o jakosti struje u namotima nije posve linearno proporcionalna. Nelinearnost se pojavljuje zbog pojave mrtve zone što je objašnjeno u daljnjem tekstu.

Na slici 2.2. prikazan je presjek proporcionalnog ventila gdje su prikazani otvori ventila kroz koje tekućina prolazi te opruga koja pomiče klip na osnovu čega se mijenja površina otvora za dotok tekućine.



**Slika 2.2.** Presjek proporcionalnog ventila [2].

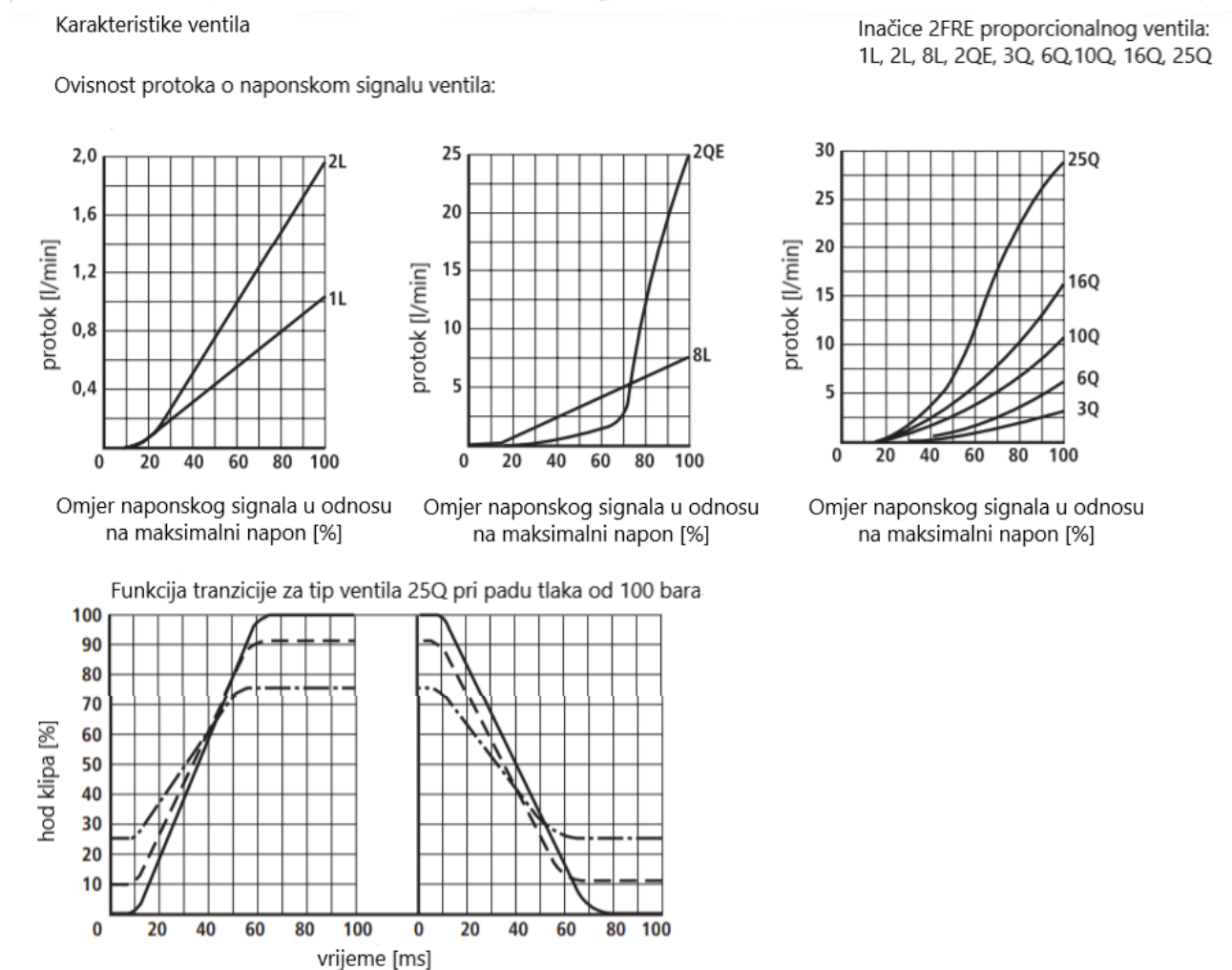
Upravljanje ventilom provodi se slanjem strujnog signala na zavojnicu koja ovisno o vrijednosti strujnog signala, otklanja oprugu čija je uloga osiguravanje protusile te tako mijenja veličinu otvora, odnosno otvorenost ventila [2]. Signal ne mora nužno biti strujni, također postoje i izvedbe ventila koje primaju naponski signal umjesto strujnog signala. Ukoliko je signal strujni najčešće se uzima signal u rasponu od 4 miliampera do 20 miliampera dok se za naponski signal najčešće uzima raspon od 0 volta do 10 volta [3, str. 486].

Proporcionalni ventili mogu se kategorizirati prema sljedećim načelima [3]:

1. broj otvora ventila,
2. broj diskretnih pozicija klipa ventila,
3. stanje protoka ventila u središnjoj poziciji,
4. način aktiviranja ventila,
5. vrsta klipa,
6. glavna svrha upravljanja ventila,
7. način ugradnje ventila u hidraulički krug.

Kod regulacije protoka, kriterij za odabir ventila najčešće je vrijednost protoka ventila koju ventil pruža pri maksimalnoj otvorenosti i padu tlaka od 10 bara, no prilikom odabira ventila bitno je

paziti i na stavke iz kategorizacije ventila. Također, kod odabira ventila zna se uzeti u obzir i nelinearnost cjevovoda prema kojoj se odabire ventil s inverznom nelinearnosti u odnosu na cjevovod, čime se linearizira taj dio sustava. U ovome radu zbog smanjenja složenosti matematičkog modela, cjevovod nije modeliran pa se ovaj kriterij odabira ventila ne uzima u obzir. Na slici 2.3. prikazan je dio kataloga ventila s nekim od karakteristika za proporcionalni ventil proizvođača Bosch-Rexroth.



**Slika 2.3.** Karakteristike ventila 2FRE 6 tvrtke Bosch-Rexroth [4].

Na slici 2.3. prikazane su statičke karakteristike ovisnosti protoka o ulaznom naponskom signalu za razne inačice proporcionalnog ventila “2FRE 6”. Također, prikazana je prijelazna funkcija za jednu inačicu ventila u kojoj je prikazana tromost ventila pri mijenjanju hoda klipa, odnosno otvaranju i

zatvaranju ventila. Također, na statičkim karakteristikama ovisnosti protoka o ulaznom signalu vidljiva je pojava mrtve zone ventila kao i nelinearnost ventila.

## **2.2. Primjena proporcionalnih ventila**

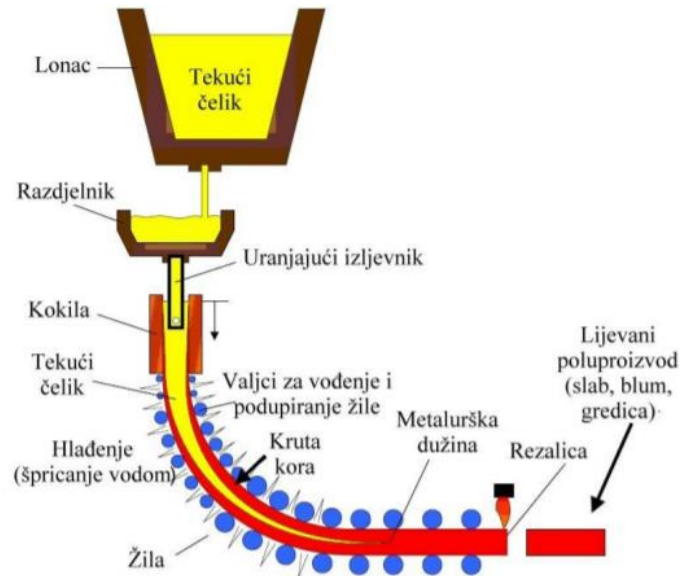
Proporcionalni ventili imaju široku primjenu u industriji zbog svoje cijene i performansi u usporedbi s elektromagnetskim ventilima i servo ventilima. U procesnoj industriji glavni problem je upravljanje protokom između spremnika i praćenje visine tekućine u spremnicima. U petrokemijskoj te industriji proizvodnje papira postoje veliki spremnici s različitim tekućinama, u kojima se odvijaju kemijski procesi i procesi miješanja. Stoga je potrebno upravljati tekućinom unutar spremnika i interakcijom između spremnika, za što se može koristiti proporcionalni ventil kao izvršni član upravljanja tim procesom.

Proporcionalni ventili koriste se tamo gdje su bitni kriteriji izvedbe kao što su:

- smanjenje otpada u tvornicama,
- smanjenje nepotrebnih gubitaka,
- povećana propusnost medija.

Proporcionalni ventili imaju široku primjenu u vozilima kao što su bageri, viličari i kamioni samoistovarivači, gdje su proporcionalni ventili povezani s hidrauličkim cilindrima. Svrha proporcionalnih ventila u takvim sustavima je podizanje iskopne žlice bagera, viljuške kod viljuškara ili u slučaju samoistovarivača iskretanje teretnog sanduka.

U samoj industriji primjena proporcionalnih ventila je od velikog značaja u procesima hlađenja sirovina i materijala, gdje je vrlo bitno precizno upravljanje hlađenjem zbog sprječavanja oštećenja na tim istim materijalima i sirovinama. Konkretno, u metalurgiji koriste se za hlađenje čelika prilikom lijevanja. Kod procesa lijevanja čelika, koji je prikazan na slici 2.4., postoje 2 tipa hlađenja, primarno i sekundarno hlađenje.



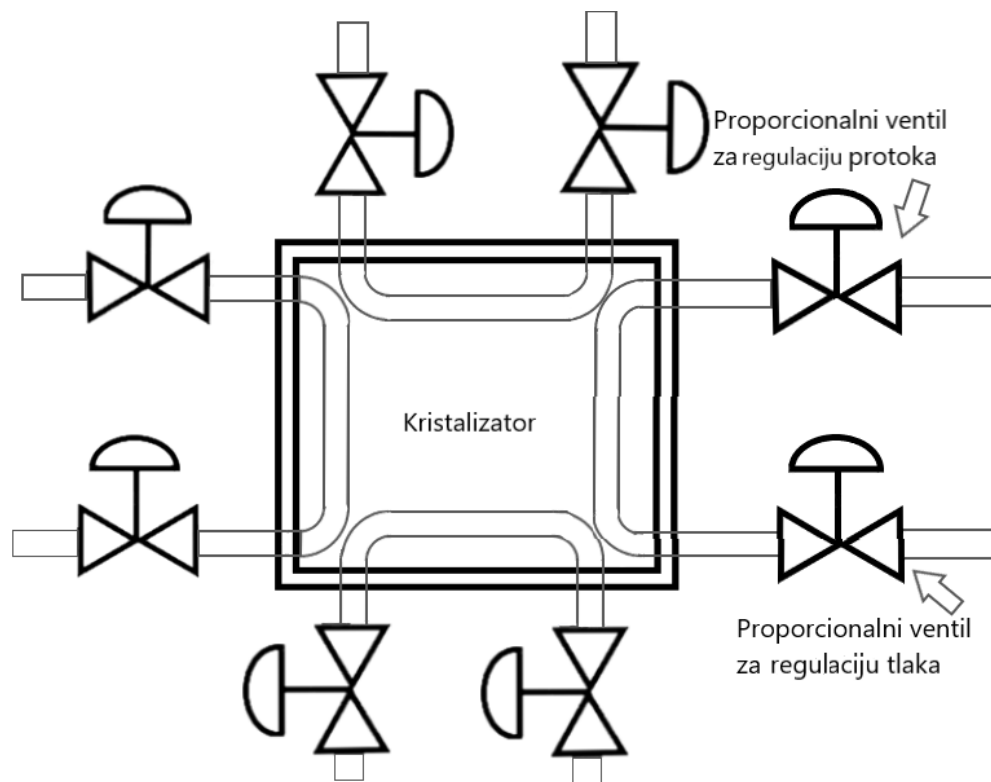
**Slika 2.4.** *Proces lijevanja čelika [5].*

Proces kontinuiranog lijevanja čelika je postupak gdje se metal zagrijava sve dok ne pređe u tekuće stanje. Tako rastaljeni metal se u daljnjem procesu stvrdnjava dok se od metala ne dobiju poluproizvodi. Poluproizvodi se dalje obrađuju nekom od metoda obrade kao što su bušenje, rezanje, valjanje i slično te tako postaju gotov proizvod. Za vrijeme procesa kontinuiranog lijevanja, tekući metal se lijeva u kokilu (bakreni kalup) hlađenu vodom iz koje izlazi dijelomično skrućen te se dalje još skrućuje vodenim prskalicama koje se nalaze između valjaka po kojima se metal kreće [6].

### **2.2.1. Primarno hlađenje čelika**

Primarno hlađenje odvija se na kokili gdje se nalazi kristalizator oko kojeg je komora kroz koju struji voda, koja hladi kristalizator, koji samim time predaje toplinu čelika vodi. Sustav za hlađenje je zatvoren pa voda iz kokile ide na hlađenje i ponovno se kasnije vraća u kokilu [5, str.107]. Zbog toga što je kokila najkritičnija komponenta kod procesa lijevanja, primarno hlađenje mora biti precizno jer o njemu ovisi kvaliteta površine čelika. Promjenom brzine rashladne vode kroz kokilu u određenoj mjeri može se regulirati odvođenje topline u kokili, što je zadatak proporcionalnih ventila i regulacije protoka. Potrebno je regulirati odvođenje topline jer u slučaju pretjeranog hlađenja dolazi

do deformiranja čelika, a u slučaju nedovoljnog hlađenja događa se pucanje čelika zbog toga što se kruta kora čelika ne formira dovoljno dobro te tako uzrokuje havariju. Na slici 2.5. prikazan je princip hlađenja kristalizatora gdje se u komorama regulacija protoka obavlja proporcionalnim ventilima za protok. Proporcionalnim ventilima za regulaciju tlaka regulira se otvorenost proporcionalnih ventila za regulaciju protoka tako što upravljački algoritam regulatora uzima tlak kao veličinu potrebnu za regulaciju otvorenosti proporcionalnog ventila za regulaciju protoka.



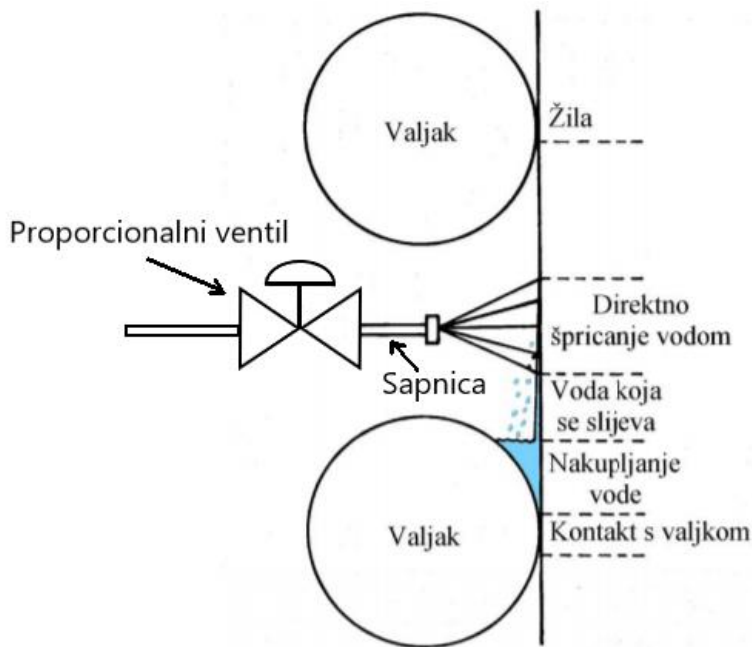
**Slika 2.5.** *Skica primarnog hlađenja kristalizatora.*

### 2.2.2. Sekundarno hlađenje čelika

Ispod kokile, prilikom spuštanja čelika na valjke kreće proces sekundarnog hlađenja gdje se žila čelika hladi direktnim špricanjem vode iz sapnica po površini žile čelika, što se vidi na slici 2.6. Također, kao i kod primarnog hlađenja, ovdje se koriste proporcionalni ventili kako bi se mogao regulirati protok vode do sapnica. Tako se žila postepeno hladi i skrućuje od površine prema unutrašnjosti. Žila je u svojoj unutrašnjosti i dalje tekuća pa kvaliteta unutrašnjosti ovisi o



sekundarnom hlađenju. Sekundarno hlađenje je najčešće podijeljeno u više zona radi lakšeg izvođenja hlađenja [5, str.199].



**Slika 2.6.** Sekundarno hlađenje čelika [5, str.201].

### 2.3. Nelinearnost proporcionalnog ventila

U svim sustavima susreće se nelinearnost u određenom stupnju. Hidraulički sustavi s ventilima su također nelinearni zbog toga što ventili imaju izrazito nelinearne prienosne funkcije. Kod takvih sustava koristi se zatvoreni regulacijski krug jer ima velik učinak kod rješavanja problema nelinearnosti.

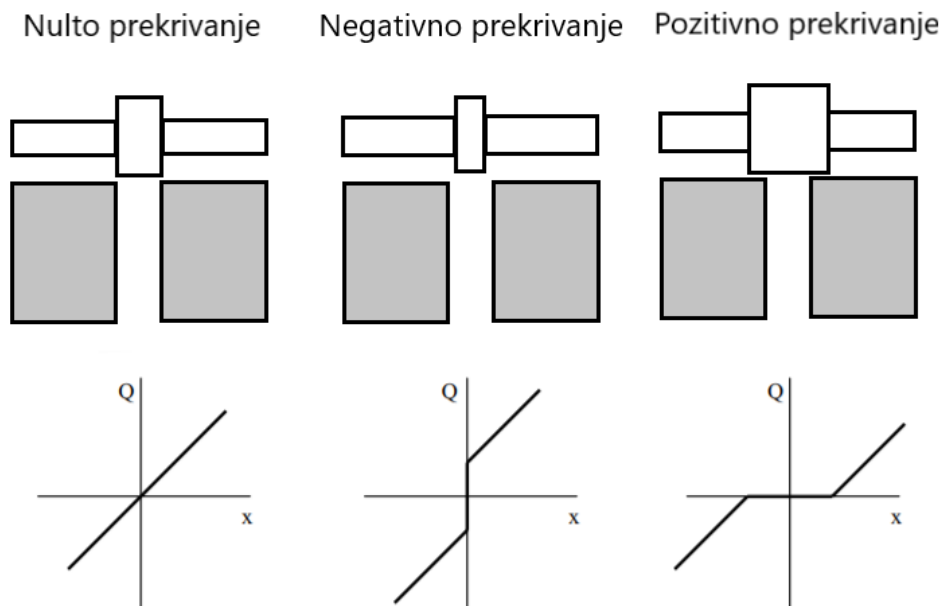
Primjenom zatvorenog regulacijskog kruga većina nelinearnosti i njihov utjecaj na sustav se mogu zanemariti, ako nelinearni element sustava i dalje dominira sustavom tada treba primijeniti neku od ostalih metoda za kompenzaciju utjecaja nelinearnosti. Kao naprimjer korištenje kaskadnog upravljanja ili kompenzacije poremećaja. Unutar zatvorenog regulacijskog kruga provodi se održavanje željenog stanja nekog procesa ili mijenjanje tog stanja po određenom zakonu, bez obzira na djelovanje vanjskih i unutarnjih poremećaja. To se postiže pomoću povratne veze koja omogućava

usporedbu izmjerene vrijednosti neke veličine reguliranog procesa s njenom željenom vrijednosti te se na temelju razlike tih dviju veličina određuje potreban iznos upravljačke veličine.

U otvorenom regulacijskom krugu nema povratne veze koja omogućuje usporedbu željene i stvarne vrijednosti, nego jedna ili više izlaznih veličina nekog procesa utječu na jednu ili više izlaznih veličina nekog procesa prema zakonitostima svojstvenim upravljanoj procesu [7, str.4].

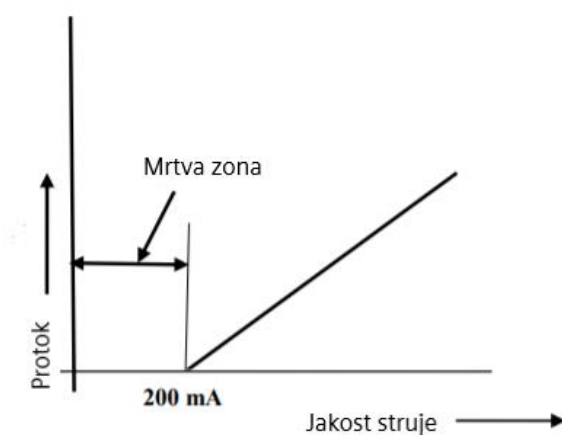
Diplomski rad zamišljen je kao simulator koji sadrži matematički model ventila koji se primjenjuje kao otvorena regulacija protoka gdje se umjesto veličinom sa stvarnog mjernog osjetila protoka regulira pomoću izlaza iz modela. U stvarnosti zatvoreni regulacijski krug koristi stvarno mjerno osjetilo za mjerenje protoka te iznos protoka s mjernog osjetila koristi za povratnu vezu. U slučaju da se regulacija iz simulacije treba provesti na zatvorenom regulacijskom krugu dovoljno je izlaz iz matematičkog modela zamjeniti s vrijednosti sa stvarnog mjernog osjetila za protok koja postaje stvarna vrijednost u regulacijskom algoritmu.

Nelinearnosti proporcionalnog ventila pojavljuju se zbog prirodne funkcionalne povezanosti između tlaka i protoka. U nelinearnosti ventila spadaju mrtva zona ventila, asimetričnost otvora ventila i histereza. U pogledu simetričnosti otvora, ovisno o izradi ventila postoje tri tipa prekrivanja ventila koja su vidljiva na slici 2.7.



**Slika 2.7.** Prekrivanje otvora ventila i klipa ventila.

Kod nultog prekrivanja, odnosno kada se klip i otvor idealno prekrivaju i jednakih su dimenzija, ovisnost protoka o pomaku klipa je linearna. Kod negativnog prekrivanja otvor je znatno veći od dimenzija klipa zbog čega karakteristika protoka u ovisnosti o pomaku klipa postaje nelinearna kao i u slučaju pozitivnog prekrivanja kada je klip znatno većih dimenzija od otvora ventila. Zbog poteškoća u izradi klipa s nultim prekrivanjem, koriste se klipovi s prekrivanjem u proporcionalnim ventilima, zbog čega se javlja pojava mrtve zone, što je vidljivo na slici 2.8.



**Slika 2.8.** *Q/I karakteristika proporcionalnog ventila [2].*

Mrtva zona uobičajena je u hidrauličkim i pneumatskim ventilima jer klip blokira otvore ventila s određenim prekrivanjem, tako da za niz položaja klipa, protok kroz ventil je blokiran. Klipovi sa zarezima daju bolju upravljivost protokom zbog toga što se otvor za protjecanje otvara postepeno.

Proporcionalni ventili dizajnirani su tako da protoci kroz ulazni i izlazni otvor ventila budu jednaki odnosno da su otvori simetrični, ali ipak javlja se jako mala asimetrija između tih otvora zbog dizajna ventila.

Histereza, odnosno pojava da učinci djelovanja kasne u odnosu na to djelovanje, javlja se zbog statičkog trenja koje se pojavljuje između klipa i tijela ventila te tako stvara nelinearnost. Iznos histereze definiran je za svaki ventil u katalogu ventila kojeg daju proizvođači ventila.

Zbog smanjenja složenosti matematičkog modela sustava u ovome radu, u obzir se uzima samo mrtva zona ventila dok se asimetrija i histereza zanemaruju. Postoji velik broj poznatih metoda za rješavanje problema nelinearnosti kao na primjer ugađanje ulaznog signala kako bi se smanjila mrtva zona ventila, odabir preciznijih i bolje dizajniranih ventila za smanjenje histereze i asimetričnosti otvora ventila, ubacivanje treperećeg (engl. *dither*) signala u sustav za smanjenje nelinearnosti uzrokovane histerezom i implementacija zatvorenog regulacijskog kruga za upravljanje pomaka klipa ventila.

## 2.4. Transportno kašnjenje

U gotovo svim procesima u industriji javlja se transportno kašnjenje koje može biti uzrokovano na različite načine. Jedan od tih načina je vrijeme koje je potrebno da se prebaci masa, energija ili informacija od jedne do druge točke što otežava regulaciju tih procesa. S obzirom na to da je u ovome radu opisan simulirani sustav koji upravlja protokom tekućine, manifestacija transportnog kašnjenja prikazana je u vidu vremena da tekućina ispunji cijev između dviju točaka odnosno između ventila i senzora. Transportno kašnjenje javlja se samo u slučajevima kada je cijev prethodno potpuno prazna. U slučaju kada je cijev ispunjena vodom po cijelom presjeku, zbog pretpostavljene nestlačivosti fluida, promjena protoka na ventilu automatski uzrokuje u istom trenutku promjenu protoka na senzoru, bez obzira na duljinu cijevi između ventila i senzora. Prema zakonu očuvanja mase i jednadžbama kontinuiteta koristi se izraz:

$$\rho_1 \cdot Q_1 = \rho_2 \cdot Q_2, \quad (2-1)$$

gdje je:

$p_1$  – tlak u prvom dijelu cijevi

$Q_1$  – protok u prvom dijelu cijevi

$p_2$  – tlak u drugom dijelu cijevi

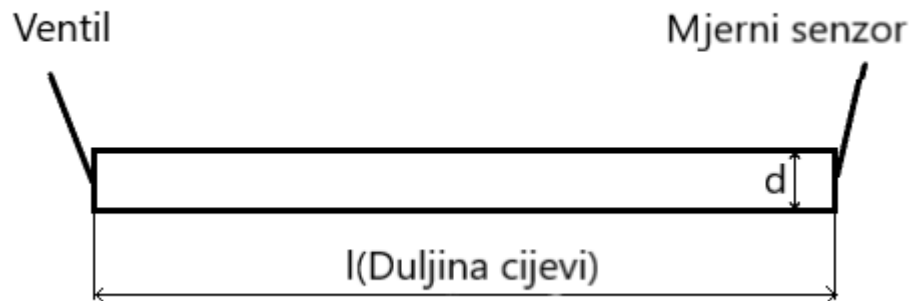
$Q_2$  – protok u drugom dijelu cijevi

S obzirom na to da se rad konkretno odnosi na ventile za regulaciju protoka vode, fluid je nestlačiv u tom slučaju pa mu je gustoća u svakom dijelu cijevi jednaka. Zbog toga jednadžba kontinuiteta ima oblik:

$$Q_1 = Q_2. \quad (2-2)$$

U tom slučaju tekućina se ponaša kao jedna cjelina pa promjena na jednom kraju uzrokuje istu promjenu na drugom kraju te cjeline.

Iako je postojanje transportnog kašnjenja prisutno samo pri pokretanju simuliranog sustava sve dok se cijev ne ispuni, u radu je prikazan utjecaj transportnog kašnjenja na kakvoću regulacije protoka za vrijeme rada simuliranog sustava. Nakon što se uključi način rada simuliranog sustava pod transportnim kašnjenjem, sustav se ponaša kao da je utjecaj transportnog kašnjenja konstantno prisutan za vrijeme rada sustava. Takav pristup napravljen je zbog lakšeg promatranja i praćenja utjecaja transportnog kašnjenja na kakvoću regulacije. Transportno kašnjenje u ovom slučaju promatra se kao vrijeme potrebno da se cijev između ventila i mjernog senzora ispuni tekućinom što je prikazano skicom sa slike 2.9.



**Slika 2.9.** Prikaz za računanje transportnog kašnjenja.

Zamišljeno je da su cijevi okrugle, stoga je formula za volumen valjka korištena i za izračun volumena cijevi:

$$V = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot l, \quad (2-3)$$

gdje je:

$d$  – promjer cijevi [m],

$l$  – duljina cijevi od izlaza iz ventila do mjernog uređaja [m].

Matematički izraz za transportno kašnjenje tekućine od izlaska iz ventila do očitavanja na senzoru dobije se iz sljedećeg izraza za protok:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t}, \quad (2-4)$$

gdje je:

$Q$  – protok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

$V$  – volumen tekućine [ $\text{m}^3$ ],

$t$  – vrijeme [s].

Iz izraza (2-4) se dobije sljedeći izraz za vrijeme:

$$t = \frac{V}{Q}, \quad (2-5)$$

što u ovome konkretnom slučaju daljnjim uvrštavanjem izraza za volumen cijevi (2-3) u izraz za vrijeme (2-5) glasi:

$$t = \frac{\left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot l}{Q}, \quad (2-6)$$

gdje je:

$t$  – vrijeme [s],

$d$  – promjer cijevi [m],

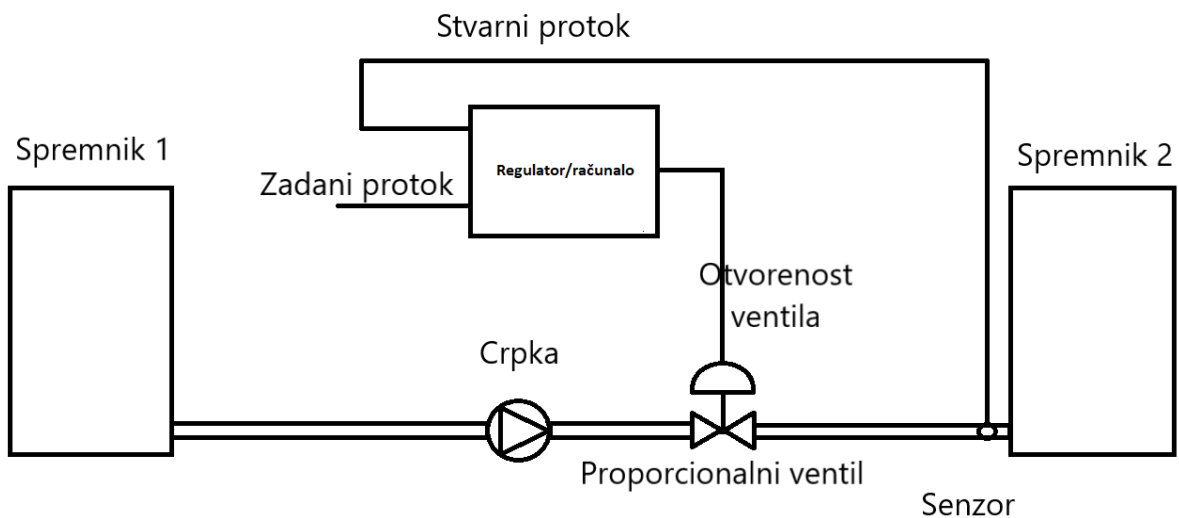
$l$  – duljina cijevi [m],

$Q$  – protok na izlazu ventila [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].

U programu, vrijeme transportnog kašnjenja dobiveno izrazom (2-6) modelirano je kao vrijeme sistemskog brojača te se nadovezuje na regulator tako da se protok izračunat matematičkim modelom šalje povratnom vezom na regulator svaki puta tek nakon što prođe vrijeme transportnog kašnjenja na sistemskom brojaču. U programu postoji opcija za uključivanje ili isključivanje transportnog kašnjenja tako da prikazuje simulaciju s transportnim kašnjenjem i bez transportnog kašnjenja, kako bi se mogao vidjeti utjecaj transportnog kašnjenja na kakvoću regulacije protoka. Unutar korisničkog sučelja postoje opcije za odabir željenog načina rada simulacije.

## 2.5. Ostali dijelovi sustava za upravljanje

Simulirani sustav u TIA portalu (Totally Integrated Automation Portal), složen je od 2 spremnika između kojih se nalazi centrifugalna crpka i proporcionalni ventil, pomoću kojeg se upravlja protokom cijelog hidrauličkog sustava. Cijeli simulirani hidraulički sustav povezan je cijevima i zatvorenog je tipa. U sustavu je zanemareno unutarnje i vanjsko propuštanje ventila i trenje cijevi. Također, fluid unutar sustava je idealni fluid što znači da mu je brzina protoka po cijelom presjeku jednaka. Prikaz sheme simuliranog sustava upravljanja nalazi se na slici 2.10.



**Slika 2.10.** Shema sustava upravljanja protokom.

U računalnom programu moguće je postaviti parametre cijelog sustava upravljanja prema kojima se sustav kasnije simulira. Od velike važnosti je da simulirani sustav bude parametriran prema realnim veličinama kako bi se izbjegle situacije u kojima se sustav ponaša nepredvidivo i u kojima ne može funkcionirati. Parametre sustava upravljanja je moguće izračunati prije unošenja u računalnu simulaciju. Matematičko modeliranje sustava upravljanja objašnjeno je u 3. poglavlju.

### 2.5.1. Spremnici u sustavu

Hidraulički sustav zamišljen je s 2 spremnika, jedan koji je na početku simulacije ispunjen do vrha i drugi koji je potpuno prazan. Simulacijom se tekućina izbacuje iz prvog spremnika i puni se drugi spremnik. Spremnici su zamišljeni u obliku geometrijskog tijela valjka, prema tome koristi se sljedeća jednadžba za izračun volumena spremnika:

$$V = r^2 \cdot \pi \cdot H, \quad (2-7)$$

gdje je:

$V$  – volumen spremnika [ $\text{m}^3$ ],

$r$  – polumjer baze spremnika [m],

$H$  – visina spremnika [m].

Zbog ispunjenosti spremnika tekućinom razvija se hidrostatski tlak, koji je posljedica težine fluida u spremniku i računa se izrazom:

$$p_{hs} = \rho \cdot g \cdot h, \quad (2-8)$$

gdje je:

$p_{hs}$  – hidrostatski tlak [Pa],

$\rho$  – gustoća tekućine u spremniku [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ],

$g$  – ubrzanje sile teže [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],

$h$  – visina tekućine u spremniku [m].

Iznos tlaka dobiven izrazom (2-8) zbraja se s atmosferskim tlakom  $p_{at}$ , koji se nalazi u spremniku, kako bi se dobio ukupni tlak u spremniku  $p_{uk}$ , koji je zbroj ta dva tlaka:

$$p_{uk} = p_{at} + p_{hs}. \quad (2-9)$$

### 2.5.2. Crpka u sustavu

Zadatak crpke u hidrauličkom sustavu pretvorba je energije iz mehaničke u hidrauličku energiju. Konkretno u hidrodinamičkom sustavu uloga crpke je predaja kinetičke energije tekućini koju je potrebno potisnuti dalje u hidraulički sustav. Crpke se dijele prema načinu na koji prenose



fluid pa postoje razne izvedbe crpki. S obzirom na to da je glavni dio regulacijskog sustava proporcionalni ventil pa se ponašanje crpke u simuliranom hidrauličkom sustavu predstavlja kao ponašanje idealnog hidrauličkog stroja. Kod takvog ponašanja stroja, trenje i curenje fluida su zanemareni, svi dijelovi su kruti i prijelazi za vrijeme izmjena su bez kašnjenja [8, str. 62].

Za matematički model sustava potrebno je izraziti snagu crpke, odnosno izvršeni rad crpke u jedinici vremena. Izraz za snagu crpke izveden je na primjeru hidrauličkog stroja, koji se giba linearno pa se dobije da je snaga umnožak tlaka i protoka. Prema tome izraz za snagu crpke glasi:

$$P = Q \cdot \Delta p, \quad (2-10)$$

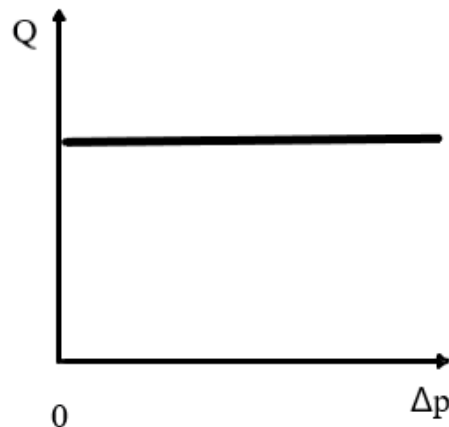
gdje je:

$P$  – snaga [W],

$Q$  - protok [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

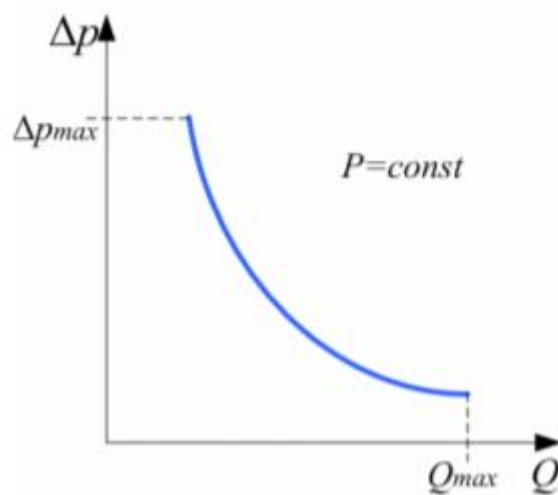
$\Delta p$  - razlika tlakova [Pa].

Kod takve crpke, protok za konstantu brzinu vrtnje crpke ima konstantan iznos, kao što se vidi na karakteristici crpke prikazanoj na slici 2.11.



**Slika 2.11.**  $Q/\Delta p$  karakteristika idealne crpke.

Prema izrazu (2-10) za snagu crpke, karakteristika  $\Delta p/Q$  pri konstantnom iznosu snage ima oblik blage parabole, što je vidljivo na slici 2.12.



**Slika 2.12.**  $\Delta p/Q$  karakteristika idealne crpke [8].

### 2.5.3. PLC

Programirajući logički kontroleri su elektronički uređaji za automatizaciju s funkcijama upravljanja spremljenim u obliku programa u memoriji upravljačke jedinice [9, str. 21]. Kako je TIA portal Siemensov alat, tijekom izrade programskog rješenja korišten je Siemensov PLC iz serije S7-1500 prikazan na slici 2.13. te simulator koji je zamjenjivao stvarni PLC uređaj.



**Slika 2.13.** PLC Siemens S7-1511-1-PN [10].

Primjena računala u vođenju procesa omogućava visok stupanj vizualizacije stanja i tijeka procesa. Budući da procesno računalo treba obavljati operativne zadatke kao što su regulacija, upravljanje i zaštita, to računalo mora biti osposobljeno za rad u stvarnom vremenu. Osnovni način rada procesnog računala je cikličko provođenje programa. PLC je zapravo digitalni regulator, koji je u odnosu na analogni regulator fleksibilniji te omogućava promjenu parametara regulatora i realizaciju daleko složenijih algoritama upravljanja [9, str.19].

### 3. MODELIRANJE SUSTAVA I IZRADA PROGRAMSKOG RJEŠENJA

U ovome poglavlju prikazano je matematičko modeliranje procesa, na temelju kojeg je izrađena računalna simulacija cjelokupnog sustava. Također, prikazan je postupak projektiranja regulatora te postupak linearizacije proporcionalnog ventila. Na kraju poglavlja prikazano je testiranje rada programskog rješenja.

#### 3.1. Matematički model sustava

Kako rad promatra ventil kao regulacijsku komponentu sustava upravljanja pretpostavlja se pojednostavljeni linearni model crpke čija se djelatna snaga računa izrazom:

$$P = \Delta p \cdot Q, \quad (3-1)$$

gdje je:

$P$  – djelatna snaga crpke [W],

$\Delta p$  – razlika tlaka koji crpka treba podići [Pa],

$Q$  – protok kroz crpku [ $\text{m}^3/\text{s}$ ].

Nadalje, za jednadžbu ventila potreban je ulazni tlak ventila, koji je ujedno i izlazni tlak iz crpke, koji se računa sljedećim izrazom:

$$p_{Pump} = p_1 + \Delta p, \quad (3-2)$$

gdje je:

$p_{Pump}$  – izlazni tlak iz crpke [Pa],

$p_1$  – hidrostatski tlak u prvom spremniku [Pa],

$\Delta p$  – razlika tlaka koji crpka treba podići [Pa].

Nakon što je dobiven izraz za tlak na izlazu crpke, odnosno tlak na ulazu u ventil, izraz za protok proporcionalnog ventila glasi:

$$Q = C_d \cdot x_v \cdot d_v \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_{Pump} - p_2)}{\rho}}, \quad (3-3)$$

gdje je:

$Q$  – protok ventila [ $\text{m}^3/\text{s}$ ],

$C_d$  – koeficijent pražnjenja ventila,

$x_v$  – otvorenost ventila [%],

$d_v$  – promjer prigušnog mjesta ventila [m],

$p_{Pump}$  – izlazni tlak iz crpke [Pa],

$p_2$  – hidrostatski tlak u drugom spremniku [Pa],

$\rho$  – gustoća tekućine u hidrauličkom sustavu [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ].

Otvorenost ventila izražava se kao:

$$x_v = K_v \cdot u, \quad (3-4)$$

gdje je:

$K_v$  – konstanta ventila,

$u$  – omjer naponskog signala u odnosu na maksimalni napon.

Konstantu ventila računa se prema izrazu:

$$K_v = Q \cdot \sqrt{\frac{\rho}{1000 \Delta p}}, \quad (3-5)$$

gdje je:

$Q$  – protok na izlazu iz ventila [ $\text{m}^3/\text{h}$ ],

$\rho$  – gustoća fluida u hidrauličkom sustavu [ $\text{kg}/\text{dm}^3$ ],

$\Delta p$  – razlika tlakova na ulazu i izlazu ventila [bar].

Vrijednost konstante ventila obično se dobije u katalogu pri kupnji ventila, no moguće ju je i odrediti primjenom izraza (3-5) iz  $q/\Delta p$  karakteristike u katalogu ventila.

Kako se radi o zatvorenom hidrauličkom sustavu sa stacionarnim strujanjem nestlačivog fluida bez trenja, iznos protoka je jednak kroz sve cijevi između dva spremnika. Dobije se sustav 3 jednadžbe s 3 nepoznanice. Ubacivanjem izraza (3-1) u izraz (3-2) dobije se sljedeći izraz:

$$p_{Pump} = p_1 + \frac{P}{Q}, \quad (3-6)$$

koji se dalje uvrsti u izraz (3-3) i dobije se izraz:

$$Q = Cd \cdot x_v \cdot d_v \cdot \pi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \left(p_1 + \frac{P}{Q} - p_2\right)}{\rho}}, \quad (3-7)$$

Nakon toga je potrebno kvadrirati obje strane jednadžbe i prebaciti sve na jednu stranu:

$$Q^3 - (Cd \cdot x_v \cdot d_v \cdot \pi)^2 \cdot \frac{2(p_1 - p_2) \cdot Q + P}{\rho} = 0, \quad (3-8)$$

što se može još zapisati i kao:

$$Q^3 + a_1 \cdot Q + a_0 = 0, \quad (3-9)$$

gdje su:

$$a_0 = -(Cd \cdot x_v \cdot d_v \cdot \pi)^2 \cdot \frac{2P}{\rho}, \quad (3-10)$$

$$a_1 = -(Cd \cdot x_v \cdot d_v \cdot \pi)^2 \cdot \frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}. \quad (3-11)$$

Za dobivanje realnog rješenja kubne jednadžbe oblika:

$$x^3 + px + q = 0, \quad (3-12)$$

ako su p i q realni brojevi takvi da je zadovoljen idući izraz:

$$4p^3 + 27q^2 > 0, \quad (3-13)$$

tada se realno rješenje kubne jednadžbe dobije se Cardanovom formulom prema [11]:

$$x = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}, \quad (3-14)$$

što je u ovom slučaju protok ventila u ovisnosti o otvorenosti ventila, hidrostatskim tlakovima u spremnicima i snazi crpke.

## 3.2. Projektiranje regulatora

Postupkom linearizacije oko radne točke dobiva se linearnost proporcionalnog ventila na temelju koje se mogu primijeniti poznate metode za sintezu regulatora [12]. Za projektiranje regulatora u ovome radu korištena je empirijska odnosno eksperimentalna Ziegler-Nichols metoda na simulatoru. Postoje dvije vrste Ziegler-Nicholsove metode, a to su metoda ruba stabilnosti koja je poznatija kao ZN1 metoda i metoda prijelazne funkcije poznatija kao ZN2 metoda [13]. Linearizacija se radi kako bi se nelinearna komponenta svela na linearnu aproksimaciju u okolišu neke radne točke oko koje je sustav upravljanja približno linearan pa se mogu koristiti poznate metode upravljanja. Razvijanje funkcije u Taylorov red oko radne točke, matematički je postupak linearizacije sustava gdje se odbacuju članovi iznad 2. reda.

### 3.2.1. Linearizacija proporcionalnog ventila

Određivanje radne točke odnosno ravnotežnog položaja nekog nelinearnog sustava je neophodno prilikom postupka linearizacije. Koristi se matematički model dijela sustava ili sustava u cijelini, odnosno njegova algebarska jednadžba koja se dalje razvija u Taylorov red oko neke proizvoljno odabrane radne točke. U radnoj točki se krivulja statičke karakteristike aproksimira pravcem koji prolazi kroz tu radnu točku.

Ako se sustav upravljanja sastoji samo od proporcionalnoga ventila, sustav s ventilom se linearizira na sljedeći način:

$$T \cdot \dot{x} + x = K_v \cdot \frac{u}{u_{max}}. \quad (3-15)$$

Izraz (3-15) treba parcijalno derivirati prema izrazu:

$$\dot{x} = \dot{x}(\bar{x}, \bar{u}) + \left. \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} \right|_{x=\bar{x}} (x - \bar{x}) + \left. \frac{\partial \dot{x}}{\partial u} \right|_{u=\bar{u}} (u - \bar{u}). \quad (3-16)$$

Nakon parcijalnih derivacija dobije se izraz:

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{1}{T}x_0 + \frac{K_v}{T}u_0. \quad (3-17)$$

S obzirom na to da je potrebno projektirati regulator za cijeli sustav upravljanja, a ne samo za ventil, potrebno je obuhvatiti cijelu regulacijsku stazu. Pa je izraz (3-18):

$$T \frac{dQ}{dt} + Q = C_d \cdot d_v \cdot \pi \cdot K_v \cdot u \cdot \sqrt{\frac{2 \left( p_1 + \frac{P}{Q} - p_2 \right)}{\rho}}, \quad (3-18)$$

potrebno je linearizirati oko radne točke. Cijeli izraz dijeli se s T, kako bi derivacija ostala sama na lijevoj strani, pa se dobije izraz (3-19):

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{C_d \cdot d_v \cdot \pi \cdot K_v \cdot u \cdot \sqrt{\frac{2 \left( p_1 + \frac{P}{Q} - p_2 \right)}{\rho}}}{T} - \frac{Q}{T}. \quad (3-19)$$

Izraz (3-19) potrebno je razviti u Taylorov red prema izrazu (3-20):

$$\dot{Q} = \dot{Q}(\bar{Q}, \bar{u}) + \left. \frac{\partial \dot{Q}}{\partial Q} \right|_{Q=\bar{Q}} (Q - \bar{Q}) + \left. \frac{\partial \dot{Q}}{\partial u} \right|_{u=\bar{u}} (u - \bar{u}), \quad (3-20)$$

nakon čega se dobije izraz (3-21):

$$\dot{Q} = \left[ \frac{C_d \cdot d_v \cdot \pi \cdot K_v \cdot u_0}{T} \cdot \frac{1}{2 \sqrt{\frac{2 \left( p_1 + \frac{P}{Q_0} - p_2 \right)}{\rho}}} \cdot \left( -\frac{2P}{\rho} \cdot Q_0^{-2} \right) - \frac{1}{T} \right] Q_0 + \frac{C_d \cdot d_v \cdot \pi \cdot K_v \cdot \sqrt{\frac{2 \left( p_1 + \frac{P}{Q_0} - p_2 \right)}{\rho}}}{T} u_0, \quad (3-21)$$

koji predstavlja derivirani izraz za protok sustava upravljanja, koji je potreban za određivanje radne točke. Prilikom izračunavanja stacionarnog stanja vrijedi izraz (3-22):

$$\dot{Q}(t) = 0, \quad (3-22)$$

pa se prema tome stacionarno stanje računa sljedećim izrazom (3-23):



$$0 = \left[ - \left( \frac{Cd \cdot dv \cdot \pi \cdot Kv \cdot u_0 \cdot 2P \cdot Q_0^{-2}}{2 \cdot T \cdot \rho \cdot \sqrt{\frac{2 \left( p_1 + \frac{P}{Q_0} - p_2 \right)}{\rho}}} \right) - \frac{1}{T} Q_0 \right] + \frac{Cd \cdot dv \cdot \pi \cdot Kv \cdot \sqrt{\frac{2 \left( p_1 + \frac{P}{Q_0} - p_2 \right)}{\rho}}}{T} u_0 . \quad (3-23)$$

Kada se uvrste parametri iz tablice 3.1. u izraz (3-23) za  $Q_0 = 0.6 \text{ m}^3/\text{h}$ .

**Tablica 3.1.** Parametri procesa i vrijednosti procesnih veličina u radnoj točki.

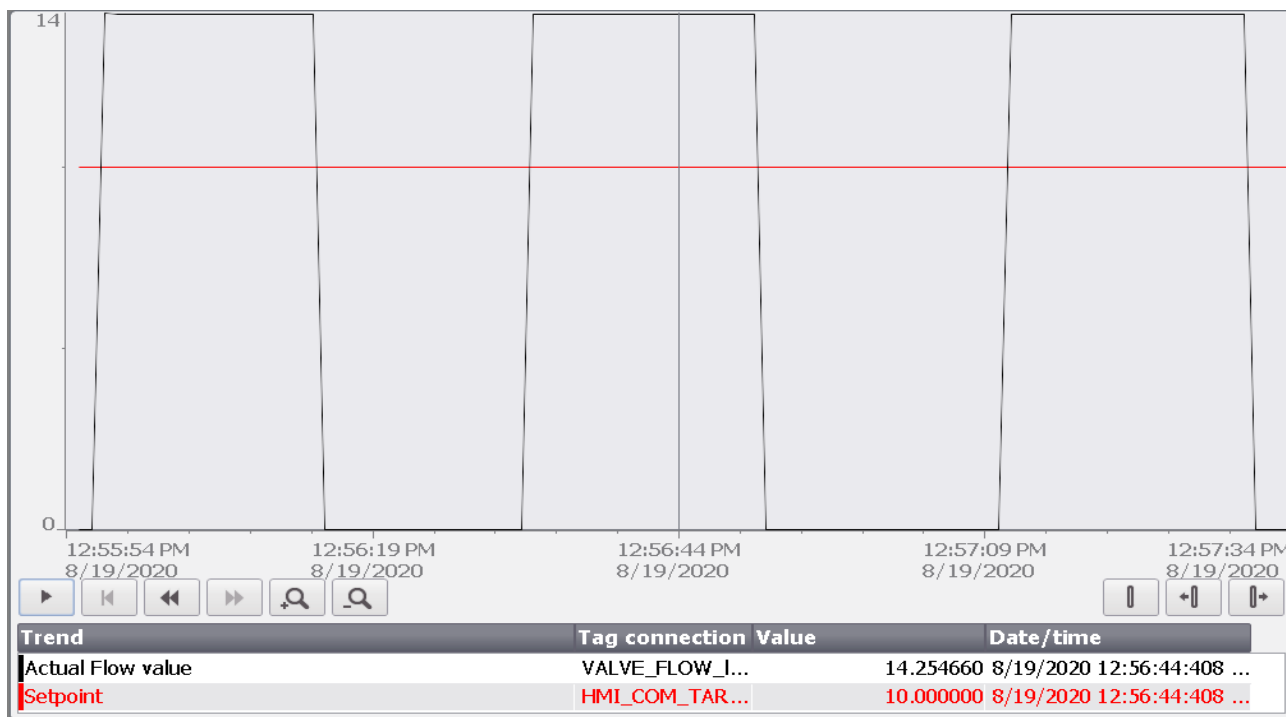
P	1500 W	Snaga crpke u sustavu
Cd	0.63	Koeficijent pražnjenja ventila
dv	0.0275 m	Promjer prigušnog mjesta ventila
p <sub>1</sub>	150000 Pa	Tlak na ulazu u ventil
p <sub>2</sub>	0 Pa	Tlak na izlazu iz ventila
ρ	994 kg/m <sup>3</sup>	Gustoća tekućine unutar sustava
K <sub>v</sub>	2.4421	Konstanta ventila
T	0.06 s	Unutarnja tromost otvaranja i zatvaranja ventila
u <sub>0</sub>	0.2583	Iznos upravljačkog signala u radnoj točki
Q <sub>0</sub>	0.6 m <sup>3</sup> /h	Iznos protoka u radnoj točki

### 3.2.2. Podešavanje parametara regulatora

Prilikom regulacije protoka u sustavu upravljanja dovoljan je PI regulator zbog toga što je promjena protoka relativno spor proces. Derivacijsko djelovanje je opasno u stvarnim sustavima zbog toga što pojačava mjerni šum te tako u slučaju pogrešnog čitanja mjerenja uzrokuje nagle lažne promjene upravljačke veličine. Regulator na osnovi regulacijske pogreške (e) i regulacijskog algoritma tvori upravljačku veličinu (u) kojom, preko izvršnog člana, djeluje na tijek procesa kako bi

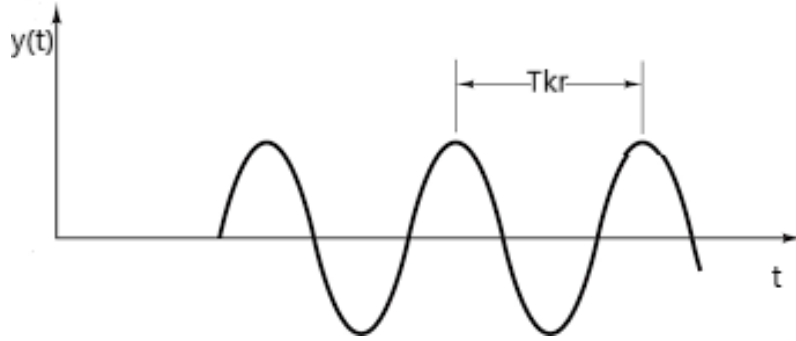
reguliranu veličinu održao na željenoj vrijednosti. Konkretno, u ovome radu regulator na osnovi pogreške između traženog protoka i stvarnog protoka tvori upravljački signal kojime skalira otvorenost ventila, odnosno otvara ventil u određenom postotku, te tako regulira protok u hidrauličkom sustavu.

Za podešavanje parametara regulatora korištena je Ziegler-Nichols metoda ruba stabilnosti, odnosno ZN1 metoda. ZN1 metodom parametri regulatora se određuju empirijski tako da se povećava pojačanje P-regulatora sve dok se u zatvorenom regulacijskom krugu ne proizvedu trajne oscilacije, odnosno dok se sustav upravljanja ne nađe na rubu stabilnosti, što je prikazano na slici 3.2. iz simulatora.



**Slika 3.2.** Izlazni signal regulacijskog kruga doveden na rub stabilnosti.

Vrijednost pojačanja regulatora pri kojem je regulacijski krug doveden na rub stabilnosti označen je s  $K_{Rkr}$ . Nakon što je regulacijski krug doveden na rub stabilnosti potrebno je izmjeriti kritični iznos periode  $T_{kr}$  koji ima iznos perioda između dvije amplitude kao na slici 3.3.



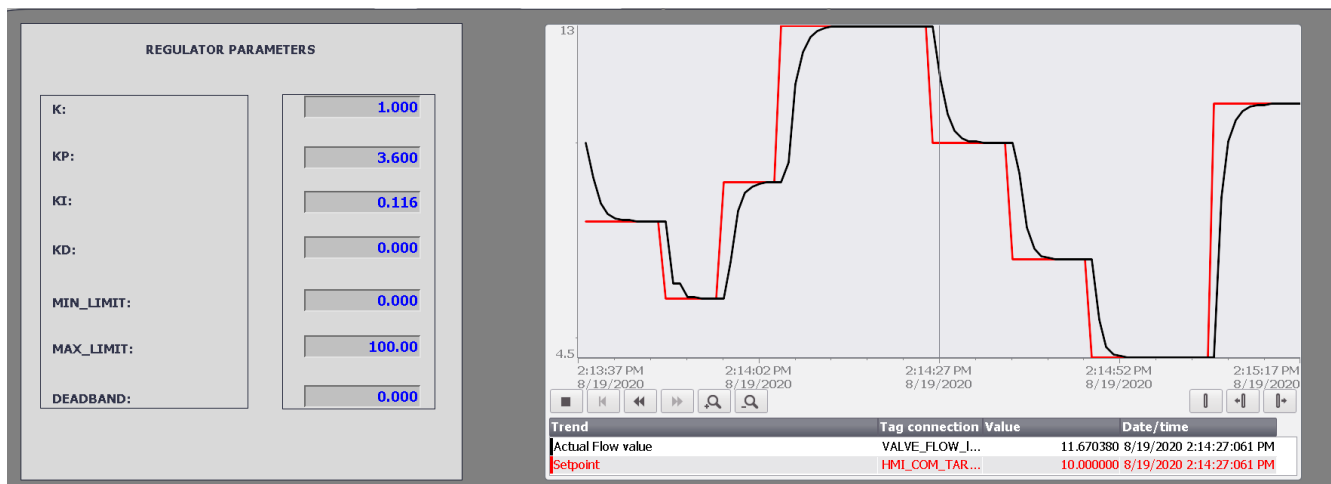
**Slika 3.3.** *Određivanje (kritičnog) iznosa periode oscilacija.*

Na slici 3.3. simbolično je prikazan signal drugačijeg oblika u odnosu na izlazni signal regulacijskog kruga sa slike 3.2. zbog objašnjenja određivanja iznosa periode oscilacija. Na oba oblika signala iznos periode oscilacije se određuje jednako. Na temelju iznosa kritičnog pojačanja i kritičnog iznosa periode, primjenom relacija iz tablice 3.4., određuju se parametri regulatora.

**Tablica 3.4.** *Formule za izračun parametara prema ZN1 metodi.[13]*

	TIP REGULATORA	$K_R$	$T_I$	$T_D$
ZN1 Metoda	P	$0,5 K_{Rkr}$	-	-
	PI	$0,45 K_{Rkr}$	$0,85 T_{kr}$	-
	PID	$0,6 K_{Rkr}$	$0,5 T_{kr}$	$0,12 T_{kr}$

U promatranom primjeru regulacijski krug je doveden na rub stabilnosti pri iznosu kritičnog pojačanja 8, a kritični iznos periode oscilacije pri tom pojačanju iznosio je 31 sekundu, što prema relacijama iz tablice 3.4. daje parametre regulatora koji su prikazani na slici 3.5.



**Slika 3.5.** *Podršeni parametri ZN1 metodom i izlazni signal regulacijskog kruga prema tim parametrima.*

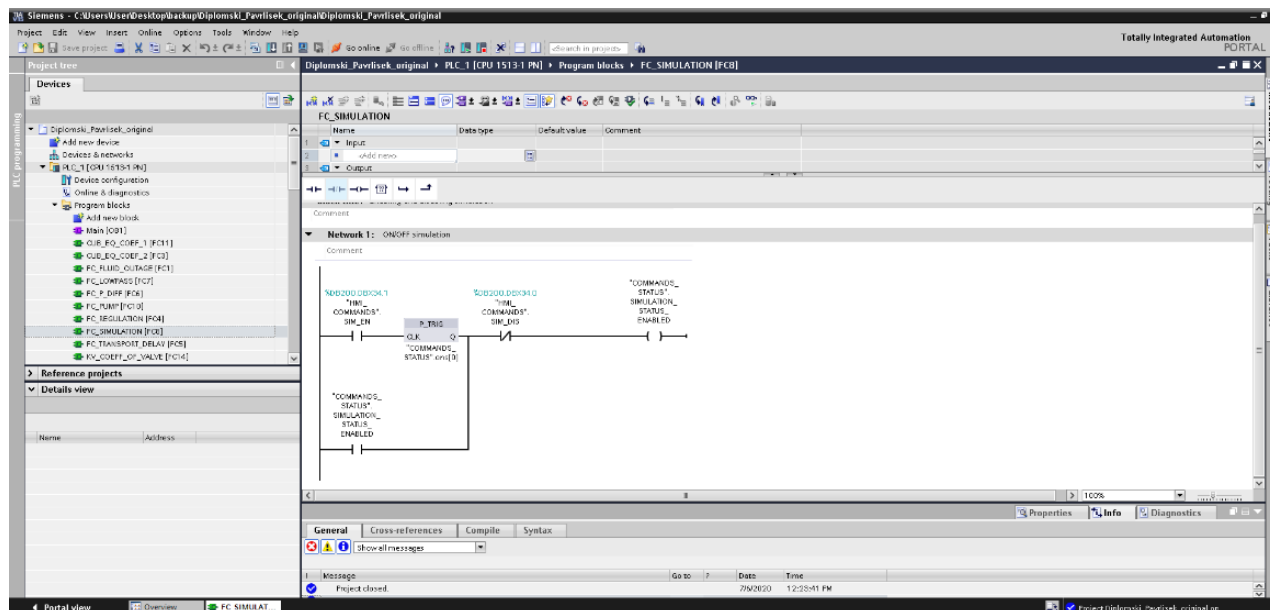
Na slici 3.5. također je prikazan izlazni signal regulacijskog kruga prema parametrima podršenim ZN1 metodom.

Pravila za podršavanje regulatora prema Zielgeru i Nicholisu približna su pravila. Njima se može približno postići zahtijevana mjera kakvoće sustava upravljanja. Stoga se često za postizanje kvalitetnijeg upravljanja u praksi koristi simulacija na računalu pri sintezi sustava upravljanja, gdje vrijednosti parametara regulatora dobivene prema Ziegler-Nicholovim pravilima mogu poslužiti kao dobri početni parametri [14, str. 350].

### 3.3. Projektiranje računalnog simulatora

Unutar ovog potpoglavlja opisano je programsko rješenje zadatka koje se implementira na PLC. Programsko rješenje napisano je prema matematičkom modelu sustava koji je objašnjen u prethodnim potpoglavljima. Unutar programa svi programski blokovi kojima ime započinje sa “SYC\_” preuzeti su od tvrtke Danieli Systec i iskorišteni za izradu rješenja određenih dijelova programa. Uporabom PLC-a značajno se smanjuje trajanje faze osmišljavanja sustava upravljanja tako da se od poznatih i postojećih upravljačkih komponenata sustava gradi sklopovska podloga za upravljanje istima. Vrijeme koje je bilo potrebno za osmišljavanje sklopovske podloge specijaliziranih sustava sada postaje raspoloživo za izgradnju i verifikaciju programskoga

upravljačkog algoritma koja je osnova PLC sustava [15, str. 6]. Izrada softvera koja se kasnije implementira na PLC radi se u programskom alatu TIA portal. TIA portal razvojni je programski alat za sve Siemens uređaje za automatizaciju i nadzorno upravljanje novije generacije. Sastoji se od programskog alata STEP 7 Basic, koji služi za izradu i razvoj upravljačkih aplikacija PLC uređaja i alata WINCC za izradu SCADA sučelja [15, str.11]. Prikaz sučelja programskog alata TIA portal prikazan je na slici 3.6.

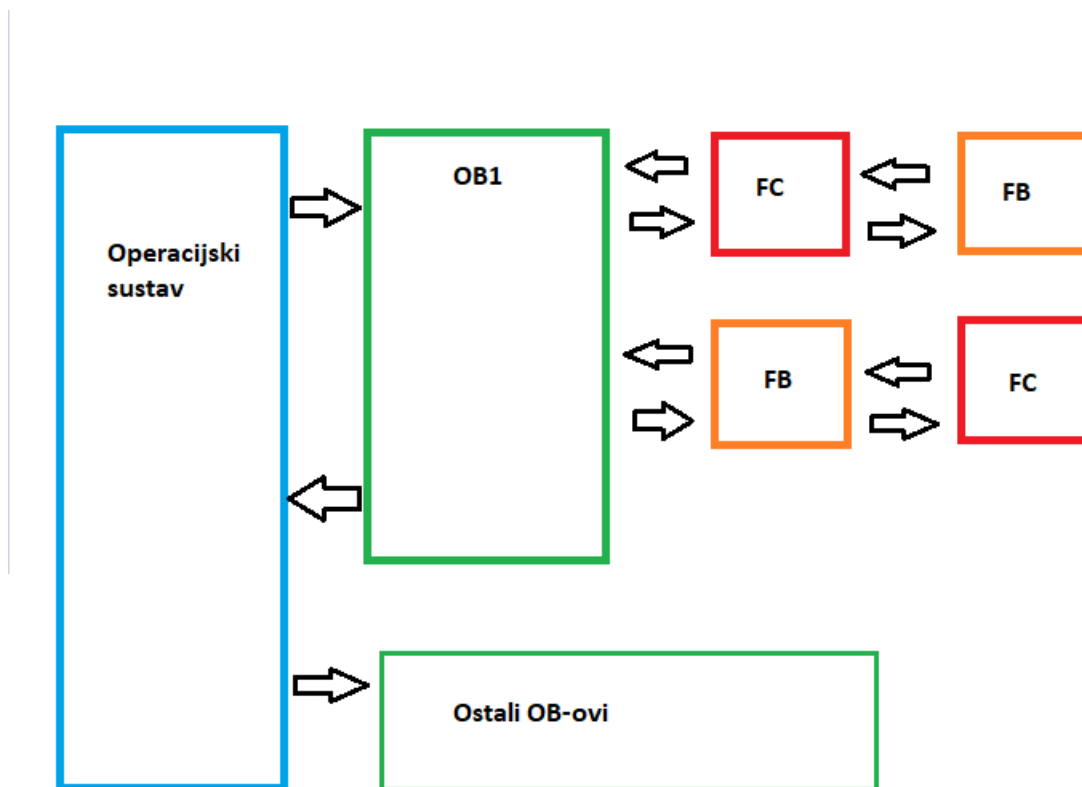


Slika 3.6. TIA portal sučelje.

### 3.3.1. Struktura programskog koda

Prilikom izrade programskog rješenja simulatora korišten je ljestvičasti dijagram LAD (engl. Ladder), programski jezik koji se temelji na relejnim shemama. Također postoje još i STL (engl. *Statement List*) programski jezik i FBD (engl. *Function Block Diagram*) programski jezik. Nomenklatura i struktura softvera, definirani su po standardima tvrtke Daniela Automation kako bi se poboljšala čitljivost koda i omogućilo lakše pronalažanje i ispravljanje grešaka u kodu. Postupak programiranja u STEP7 alatu temelji se na organizacijskim blokovima (engl. *organization blocks*), funkcijskim blokovima (engl. *function blocks*), podatkovnim blokovima (engl. *data blocks*) te funkcijama (engl. *functions*).

Organizacijski blok predstavlja sučelje između korisničkog programa i operacijskog sustava što je prikazano na slici 3.7.



**Slika 3.7.** Prikaz komunikacije između blokova.

Program koji se treba kontinuirano izvršavati mora biti pozvan u organizacijskom bloku OB1. OB1 predstavlja glavni dio (engl. *main*) programskog koda kao što je slučaj i kod nekolicine ostalih programskih jezika. Kako je već navedeno PLC radi ciklički, a vrijeme izvođenja OB1 bloka ovisi o programskom kodu koji se unutar njega izvršava. Najčešće je to vrijeme između 5 i 10 milisekundi, ali kod složenijih sustava može biti i veće. Organizacijski blokovi mogu biti ciklički organizacijski blokovi, blokovi koji se izvršavaju samo jednom ili blokovi prekida (engl. *interrupt blocks*).

Funkcijski blokovi, u daljnjem tekstu FB, omogućavaju izvršenje programskog koda s pripadajućim instanciranim podatkovnim blokom u kojega je moguće pohraniti lokalne varijable za trajno korištenje.

Funkcije, u daljnjem tekstu FC, imaju istu funkcionalnost kao i FB-ovi samo što nemaju mogućnost pohrane lokalnih varijabli, odnosno ne mogu imati svoj instancirani podatkovni blok.

Osim programskih blokova postoje podatkovni blokovi koji se sastoje od podataka koji sadrže informacije o procesnim stanjima, signalima, procesnim veličinama i sličnom, koji se koriste ovisno o naredbama unutar programskog koda. Podaci unutar podatkovnih blokova mogu imati simboličke ili apsolutne adrese. Također, razlikuju se globalni podatkovni blokovi kojima svi logički blokovi mogu pristupiti i instancirani podatkovni blokovi (engl. *instance data blocks*), koji su uvijek vezani za neki određeni FB. Samo logički blokovi unutar tog FB-a mogu pristupiti tom podatkovnom bloku. S obzirom na to kako je riječ o računalnoj simulaciji sustava, umjesto memorijskih adresa i stvarnih ulaza i izlaza sve varijable zapisane su unutar nekoliko različitih podatkovnih blokova. Kao primjer zapisa varijabli prikazan je podatkovni blok s procesnim veličinama na slici 3.8.

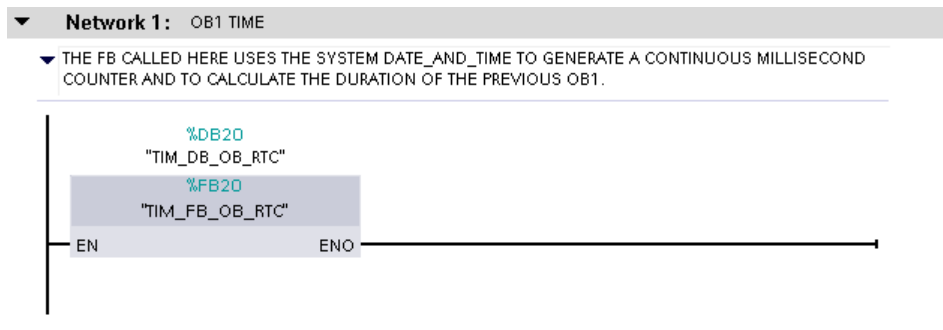
PROCESS_VALUES										
	Name	Data type	Start value	Retain	Accessible ...	Writa...	Visible in ...	Setpoint	Supervi...	Comment
1	Static									
2	SYSTEM_PRESSURE_D...	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Pressure difference between 2 tanks[Pa]
3	TRANSPORT_DELAY_IN...	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Outage of fluid from 1st tank in PLC cycle
4	FLUID_OUTAGE_CON...	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Flow through proportional valve [m3/s]
5	VALVE_FLOW	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
6	CUB_EQ_FIRST_COEF	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
7	CUB_EQ_SECOND_C...	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
8	TANK1_PRESSURE	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		[Pa] for calculation
9	TANK1_PRESSUREInbar	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		[bar] for output
10	TANK2_PRESSURE	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		[Pa] for calculation
11	TANK2_PRESSUREInbar	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		[bar]for output
12	TRANSPORT_DELAY	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Value of transport delay between valve and f...
13	TANK1_VOLUME	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		V1[m3]
14	TANK2_VOLUME	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		V2[m3]
15	LIQ1_HEIGHT	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Height of liquid in first tank
16	LIQ2_HEIGHT	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Height of liquid in second tank
17	VALVE_OPENESS	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Valve openness in range from 0-100%
18	REGULATOR_OUTPUT	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		FID output value
19	Kv_VALVE_COEF	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Valve coeff from valve catalog characteristic
20	Avalve	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		Valve area of opened orifice that gets multip...
21	TD_OUTPUT_ms	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
22	VALVE_FLOW_m3h	Real	0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

Slika 3.8. Prikaz procesnih veličina unutar podatkovnog bloka.

Svi programski blokovi unutar programa podijeljeni su u mreže (engl. Network) koje se izvršavaju sekvencijalno, dok je način rada PLC-a ciklički. Blokovi programskog rješenja sustava upravljanja opisivani su redoslijedom pozivanja unutar OB1 bloka.

### 3.3.2. Opis programskog rješenja zadatka

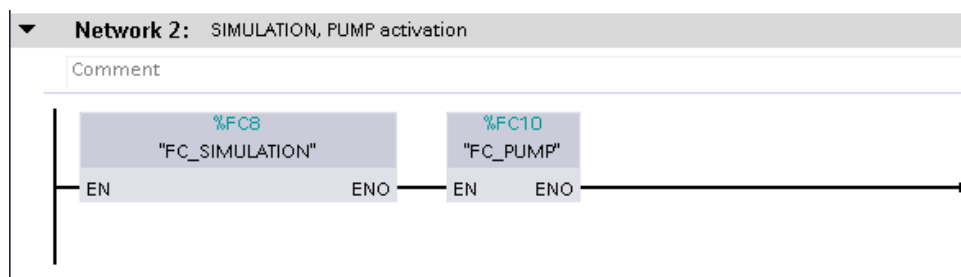
Prvi programski blok po redu pozivanja je TIM\_OB\_FB\_RTC, što je prikazano na slici 3.9.



**Slika 3.9.** *TIM\_FB\_OB\_RTC funkcija.*

Navedeni blok preuzet je od tvrtke Danieli Systec i daje gotovo programsko rješenje za računanje vremena izvođenja glavnog dijela programa. Unutar ovog bloka računa se vrijeme potrebno PLC-u za obavljanje ciklusa kako bi se uskladilo vremensko računanje unutar programa te tako osigurava vremensku točnost. To vrijeme je potrebno za kasnije pretvaranje veličina, odnosno mjernih jedinica za pojedine veličine, kako bi iste bile prilagođene radu simulacije u ciklusima PLC-a.

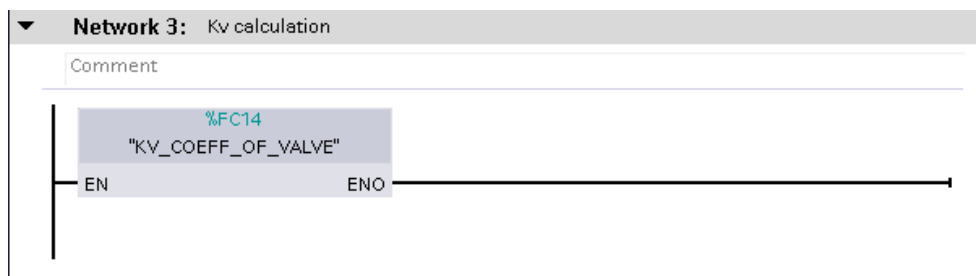
U idućoj mreži OB1 pozvane su funkcije FC\_SIMULATION i FC\_PUMP. FC\_SIMULATION koristi se zbog upravljanja i praćenja simulacije, preko bita te funkcije dobiva se informacija o radnom stanju simulacije. Temelji na logici samoodržavanja, što znači da se nakon prvog pokretanja, simulacija sama održava u radu, sve dok je logički bit statusa funkcije u jedinici i dok ne primi bit za prekid rada. Funkcija FC\_PUMP također je izrađena na isti način kao i FC\_SIMULATION. Njihova aktivacija i deaktivacija samoodržavanja provodi se pritiskom gumbova na korisničkom sučelju. Na slici 3.10. prikazan je poziv gore navedenih funkcija unutar druge mreže OB1.



**Slika 3.10.** *Funkcije FC\_SIMULATION i FC\_PUMP unutar OB1.*



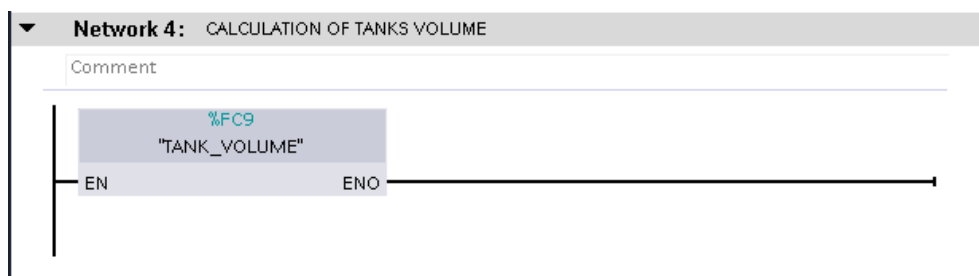
U narednoj mreži OB1 bloka pozvana su funkcija KV\_COEFF\_OF\_VALVE, što je prikazano na slici 3.11.



**Slika 3.11.** Funkcija KV\_COEFF\_OF\_VALVE.

Pomoću navedene funkcije KV\_COEFF\_OF\_VALVE provodi se proračun konstante proporcionalnog ventila prema izrazu (3-5). Dobivena vrijednost tom funkcijom koristi se za daljnje računanje unutar matematičkog modela sustava.

Unutar četvrte mreže pozvana je funkcija TANK\_VOLUME što je prikazano na slici 3.12.

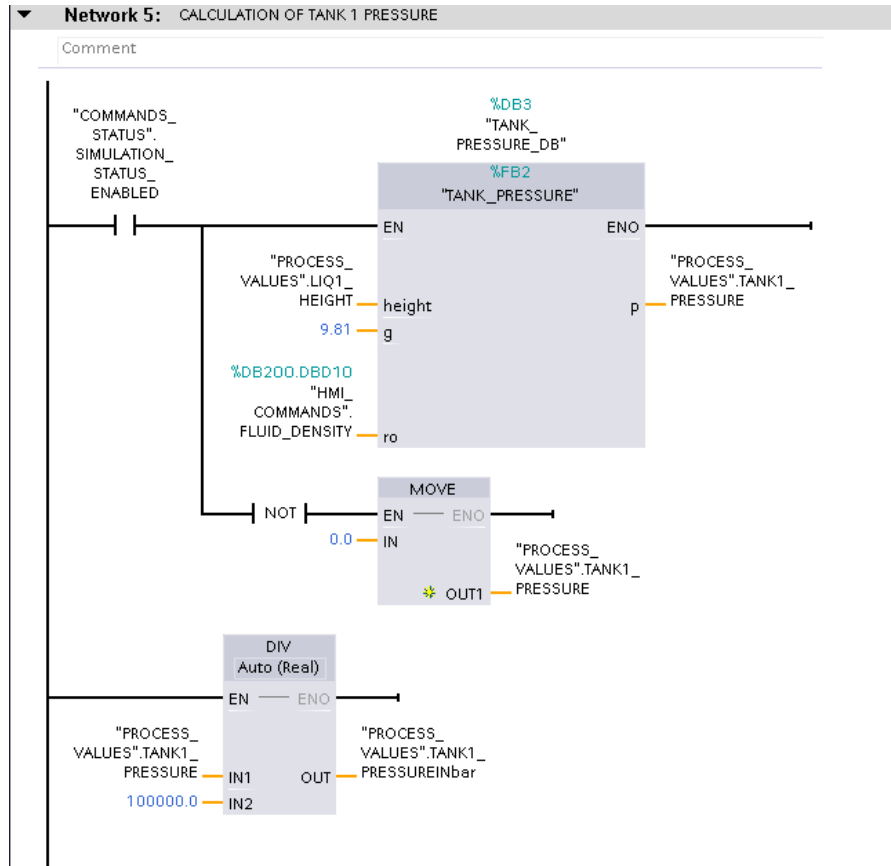


**Slika 3.12.** Funkcija TANK\_VOLUME.

Funkcija TANK\_VOLUME ima svrhu proračuna volumena obaju spremnika unutar simuliranog sustava upravljanja. Također, unutar ove funkcije inicijalizira se početna količina tekućine unutar prvog spremnika tako što je prvi spremnik ispunjen do vrha, odnosno cijelim svojim volumenom. Ista funkcija obavlja istakanje tekućine iz prvog spremnika i pretakanje u drugi spremnik prema ranije prikazanom matematičkom modelu sustava.

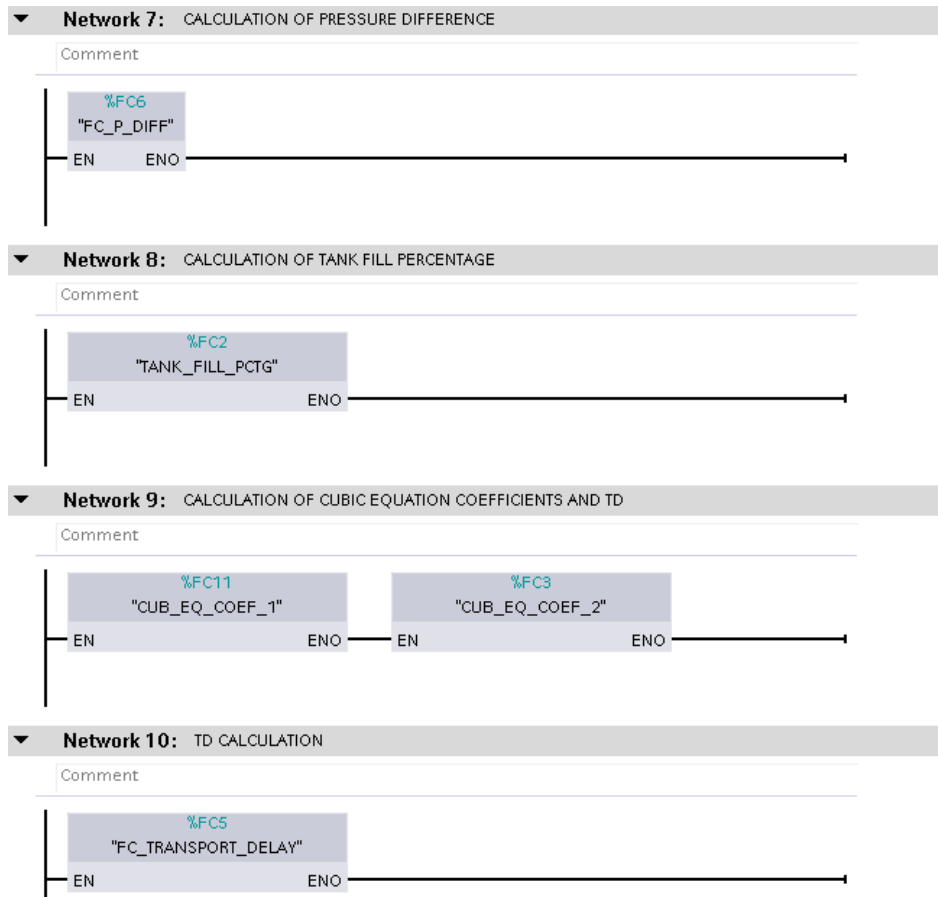
Unutar iduće dvije mreže u programu, iskorišten je funkcijski blok TANK\_PRESSURE s različitim lokalnim varijablama u svakoj od mreža. Odnosno, ista instanca funkcijskog bloka pozvana je s različitim podatkovnim blokovima za pojedini spremnik. U petoj mreži, FB vraća vrijednost tlaka

za prvi spremnik, dok u šestoj mreži vraća vrijednost tlaka u drugom spremniku. Na slici 3.13. prikazan je poziv gore opisanog funkcijskog bloka TANK\_PRESSURE unutar pete mreže.



Slika 3.13. Funkcijski blok TANK\_PRESSURE.

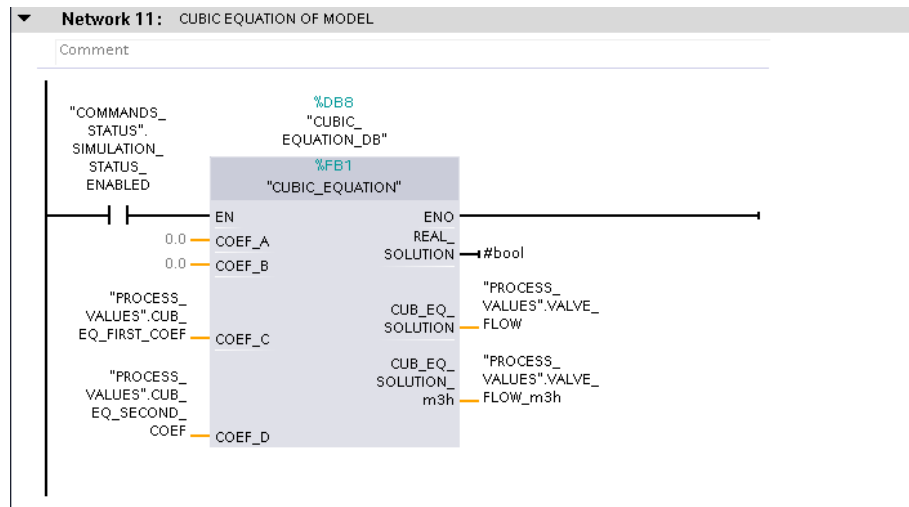
U narednim mrežama prikazanim na slici 3.14. pozvane su funkcije FC\_P\_DIFF, TANK\_FILL\_PCTG, CUB\_EQ\_COEF\_1, CUB\_EQ\_COEF\_2 i FC\_TRANSPORT\_DELAY unutar kojih se izvode ranije spominjani matematički izrazi iz poglavlja 3.1. Pomoću gore navedenih funkcija računaju parametri matematičkog modela sustava upravljanja.



**Slika 3.14.** Poziv funkcija unutar OB1.

Funkcija FC\_P\_DIFF koristi se izračunavanje razlike tlakova između spremnika. Unutar funkcije TANK\_FILL\_PCTG napravljen je izračun ispunjenosti spremnika tekućinom. Funkcije CUB\_EQ\_COEF\_1 i CUB\_EQ\_COEF\_2, napravljene su prema izrazima koeficijenata  $a_0$  (3-10) i  $a_1$  (3-11) za kubnu jednadžbu kojom je sustav upravljanja matematički modeliran. Pozivom funkcije FC\_TRANSPORT\_DELAY računa se transportno kašnjenje simuliranog sustava prema izrazu (2-6). Također, ova funkcija sadrži logiku samoodržavanja ako se funkciji proslijedi signalni bit za aktivaciju transportnog kašnjenja putem korisničkog sučelja.

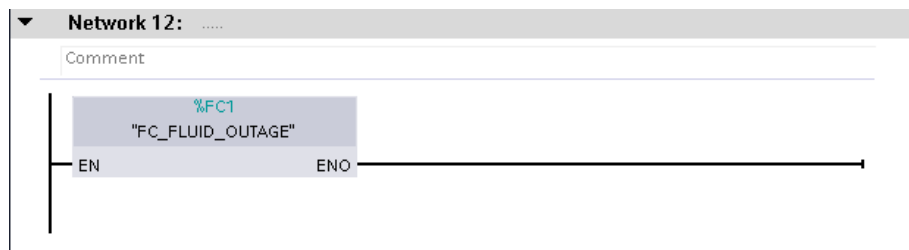
U idućoj mreži poziva se funkcijski blok CUBIC\_EQUATION u kojemu je zapisan izraz (3-9) matematičkog modela sustava koji ima oblik kubne jednadžbe, a kao izlaz daje vrijednost protoka ventila. Na slici 3.15. prikazan je poziv FB-a CUBIC\_EQUATION unutar OB1 bloka.



**Slika 3.15.** Poziv FB-a *CUBIC\_EQUATION* unutar OB1 bloka.

Parametri FB-a dobivaju se pomoću funkcija *CUB\_EQ\_COEF\_1* i *CUB\_EQ\_COEF\_2*, ranije prikazanim na slici 3.14. Funkcijski blok vraća bit za provjeru realnog rješenja matematičkog modela sustava odnosno kubne jednadžbe te protok simuliranog sustava u dvije različite mjerne jedinice.

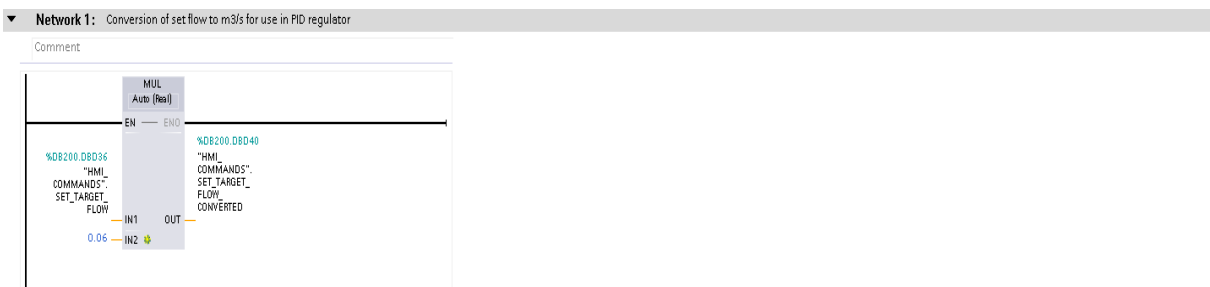
Iduća po redu funkcija unutar OB1 je *FC\_FLUID\_OUTAGE* koja je prikazana na slici 3.16.



**Slika 3.16.** Poziv funkcije *FC\_FLUID\_OUTAGE*.

Funkcija *FC\_FLUID\_OUTAGE* služi za preračunavanje mjernih jedinica kako bi se prilagodile vremenu izvođenja ciklusa PLC-a s obzirom na to da vrijeme izvođenja ciklusa PLC-a nije u sekundama.

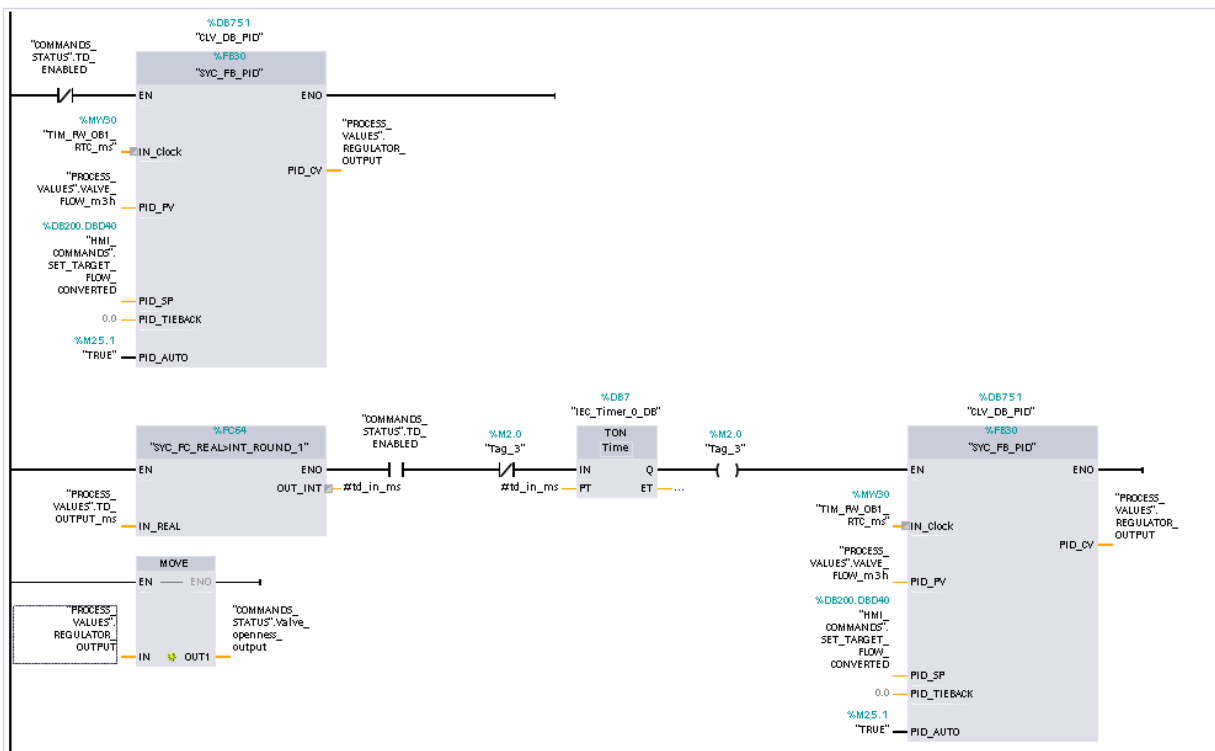
Zatim je pozvana funkcija *FC\_REGULATION* unutar koje je implementiran regulator sustava kao zaseban funkcijski blok *SYC\_FB\_PID*. Na slici 3.17. prikazana je prva mreža (engl. *network*) funkcijskog bloka *FC\_REGULATION*.



**Slika 3.17.** Prva mreža funkcije *FC\_REGULATION*.

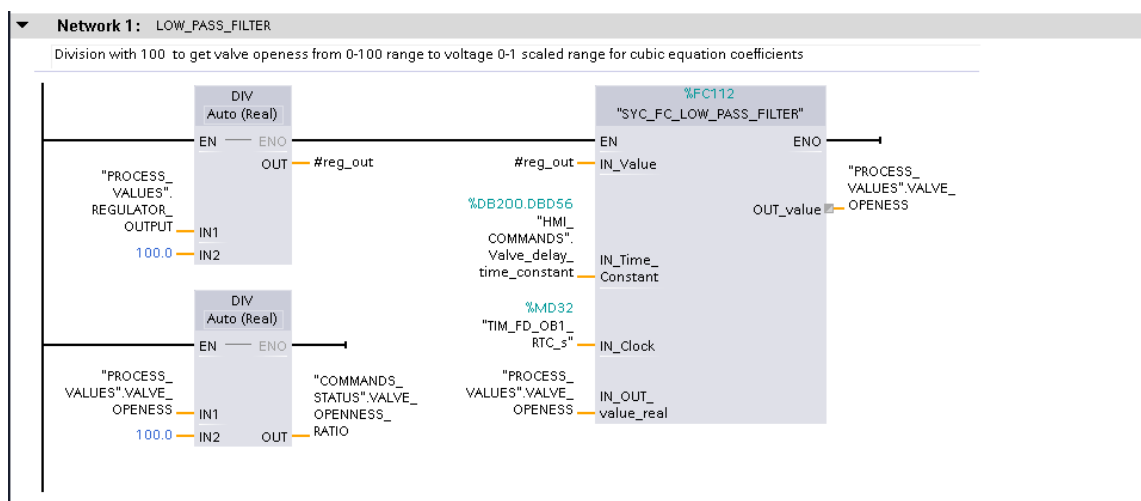
Unutar prve mreže funkcije *FC\_REGULATION* radi se pretvorba veličine protoka kako bi bila pogodna za ulaz u funkcijski blok regulatora *SYC\_FB\_PID*.

Unutar druge mreže funkcije *FC\_REGULATION* prikazana su dva načina regulacije procesa. Na prvi način se regulator aktivira bez transportnog kašnjenja, a na drugi s transportnim kašnjenjem modeliranim prema izrazu (2-6), što je vidljivo na slici 3.18.



**Slika 3.18.** Druga mreža funkcijskog bloka *FC\_REGULATION*.

Na samom kraju programa nalazi se poziv funkcije FC\_LOWPASS u kojemu je implementiran funkcijski blok SYS\_FC\_LOW\_PASS\_FILTER, prikazan na slici 3.19.



Slika 3.19. Mreža s low-pass filtrom ventila.

Pomoću tog bloka implementirana je tromost ventila u proces, kako bi proces bio što bliži stvarnim odnosima u procesu. Najvažnija veličina koja se predaje FC-u je vremenska konstanta koja označava tromost ventila. Ta veličina može se pronaći u katalogu ventila koji daje proizvođač ventila ili se može izračunati iz karakteristika koje se nalaze u tom istom katalogu ventila ako nema brojčane vrijednosti zapisane u katalogu ventila.

### 3.4. Projektiranje korisničkog sučelja

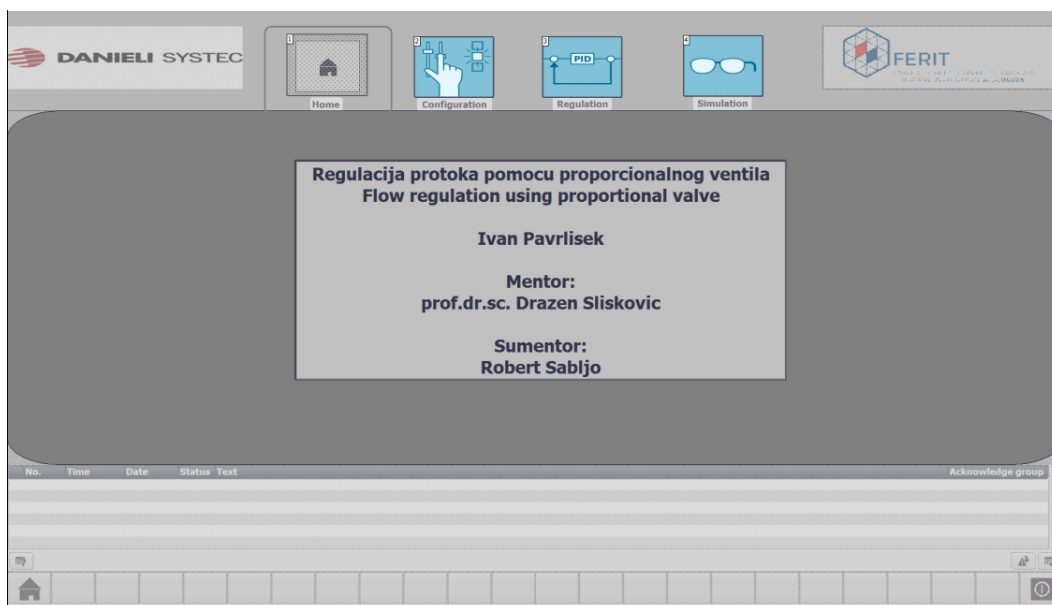
Unutar programskog paketa TIA portal omogućena je vizualizacija pomoću Siemens Simatic WinCC. Simatic WinCC omogućuje izradu korisničkih sučelja od najobičnijih i najjednostavnijih panela do SCADA sustava na višekorisničkim računalnim sustavima. Osnove funkcije korisničkih sučelja su prikaz trenutnog stanja procesa, prikaz povijesti događanja u procesu i kretanja procesnih veličina te prikaz alarma i događaja u procesu prema [9, str.56]. U praksi su korisnička sučelja najčešće odvojena pa se posebno izrađuje korisničko sučelje za operatere i posebno za inženjere s različitim dozvolama za mijenjanje parametara. Prilikom izrade korisničkog sučelja za simulaciju

sustava za regulaciju protoka, ova dva oblika sučelja su kombinirana kako bi se simulirani sustav mogao ujedno konfigurirati i pratiti.

Korisničko sučelje izrađeno je po principu sučelja koje koristi tvrtka Daniela Systec unutar postrojenja, koje ta tvrtka održava. Korisničko sučelje i PLC uređaj komuniciraju međusobno tako što korisničko sučelje čita putem industrijskog TCP/IP protokola (Ethernet) vrijednosti iz podatkovnih i organizacijskih blokova i ujedno upisuje vrijednosti u te iste blokove čime je omogućena dvosmjerna komunikacija između njih. Na temelju toga korisničko sučelje služi za unos i prikaz parametara simuliranog sustava te procesnih veličina, dok PLC raspolaže s tim parametrima za daljnje računanje pojedinih stavki u matematičkom modelu sustava upravljanja.

### 3.4.1. Početni zaslon

Na početnom zaslonu simulatora dan je opis teme diplomskog rada te su navedena imena mentora i sumentora. Ujedno, preko početnog zaslona omogućeno je pomicanje u jednu od ponuđenih kartica koje su na slici 3.20. označene svijetlo plavom bojom, a nude zaslone za konfiguraciju parametara, praćenje i konfiguriranje regulacije te prikaz same simulacije.



**Slika 3.20.** Početni zaslon simulatora.

Na skroz donjem dijelu početnog zaslona nalazi se prozor u kojemu se ispisuju obavijesti ili alarmi tijekom rada sustava.

### 3.4.2. Konfiguracijski zaslon

Konfiguracijski zaslon služi inženjerima za konfiguraciju parametara sustava prije puštanja sustava u pogon. Konkretno u ovome slučaju kroz konfiguracijski zaslon unose se svi potrebni parametri sustava cjevovoda i njegovih elemenata. Zaslon je razdvojen na 3 dijela po elementima sustava, kako bi bio pregledniji i što lakši za korištenje, kao što je vidljivo na slici 3.21.



**Slika 3.21.** Prikaz konfiguracijskog zaslona simulatora.

Također, kao i kod početnog zaslona, na konfiguracijskom zaslonu omogućeno je kretanje po zaslonima klikom miša na pojedinu karticu željenog zaslona.

Kod unosa parametara cijevi i crpke unose se sljedeći parametri: duljina cijevi nakon ventila, promjer cijevi, gustoća fluida u sustavu i snaga crpke. Svi ovi parametri potrebni su za različite izračune unutar sustava upravljanja. Duljina cijevi od ventila do drugog spremnika i promjer cijevi

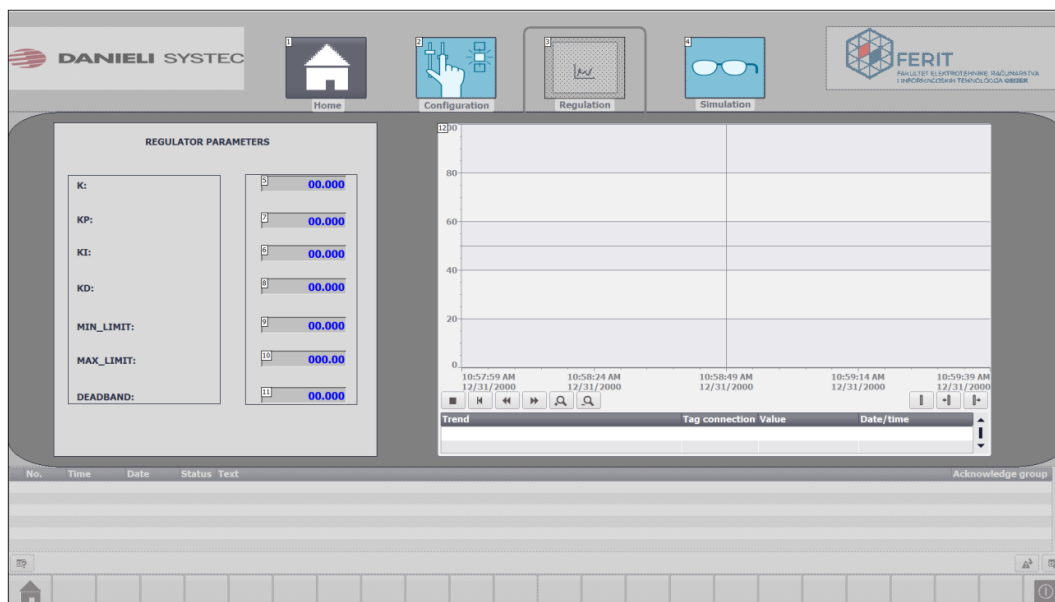


korišteni su kod izračuna transportnog kašnjenja, a gustoća tekućine u sustavu i snaga crpke u samom matematičkom modelu sustava. Kod parametara za ventil, svi se parametri koriste za izračun dijelova matematičkog modela sustava osim skroz donjeg parametra koji služi za “low-pass filter”.

“Low-pass filter” koristi se kako bi se točnije prikazala karakteristika tromosti ventila prilikom mijenjanja otvorenosti ventila, odnosno pomaka klipa ventila. Pomak klipa ventila nije trenutani, nego postoji određeno vrijeme koje je potrebno da klip dođe u zadanu točku pa ga je potrebno tako i definirati u sustavu. U trećem odjeljku unose se parametri spremnika koji se kasnije koriste za izračun tlakova u matematičkom modelu sustava upravljanja. Spremnici na temelju tih izračunatih tlakova imaju utjecaj na matematički model sustava upravljanja, a samim time i na ponašanje ventila.

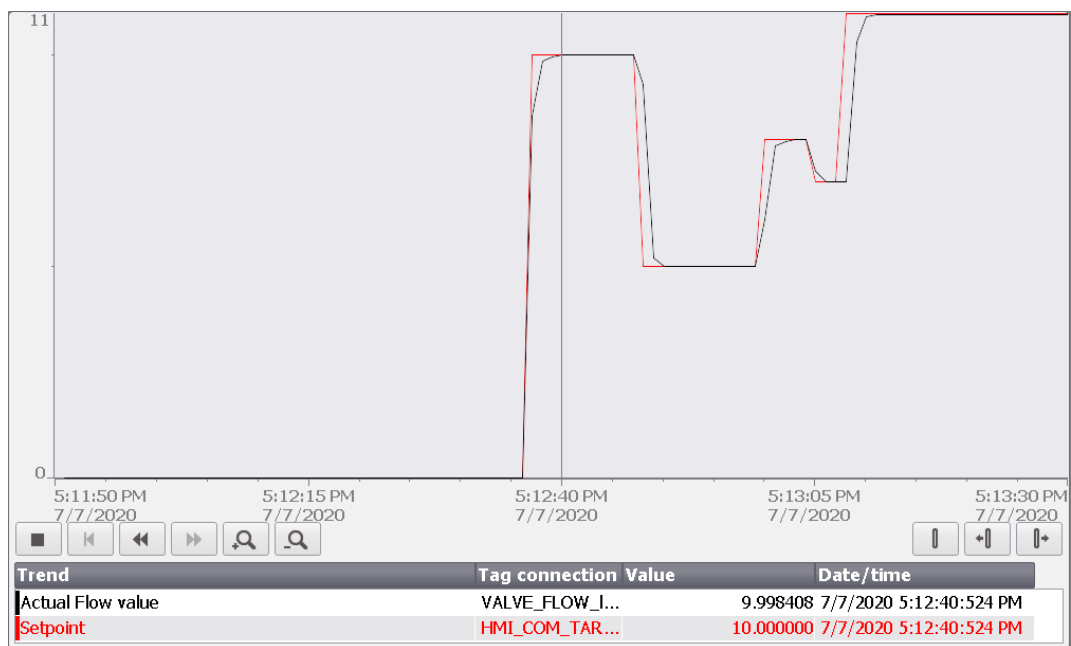
### 3.4.3. Regulacijski zaslon

U regulacijskom sučelju prikazanom na slici 3.22. moguće je konfigurirati parametre regulatora te pratiti odziv simuliranog sustava, odnosno izlazni signal njegove regulirane veličine u odnosu na vodeću veličinu (engl. *setpoint*).



Slika 3.22. Prikaz regulacijskog sučelja simulatora.

Na slici 3.23. prikazan je odziv simuliranog sustava upravljanja pri približno podešenim parametrima regulatora, gdje je regulirana veličina označena crnom bojom, a vodeća veličina crvenom bojom. Također, ispod odziva nalaze se brojučane vrijednosti regulirane i vodeće veličine u određenom trenutku.

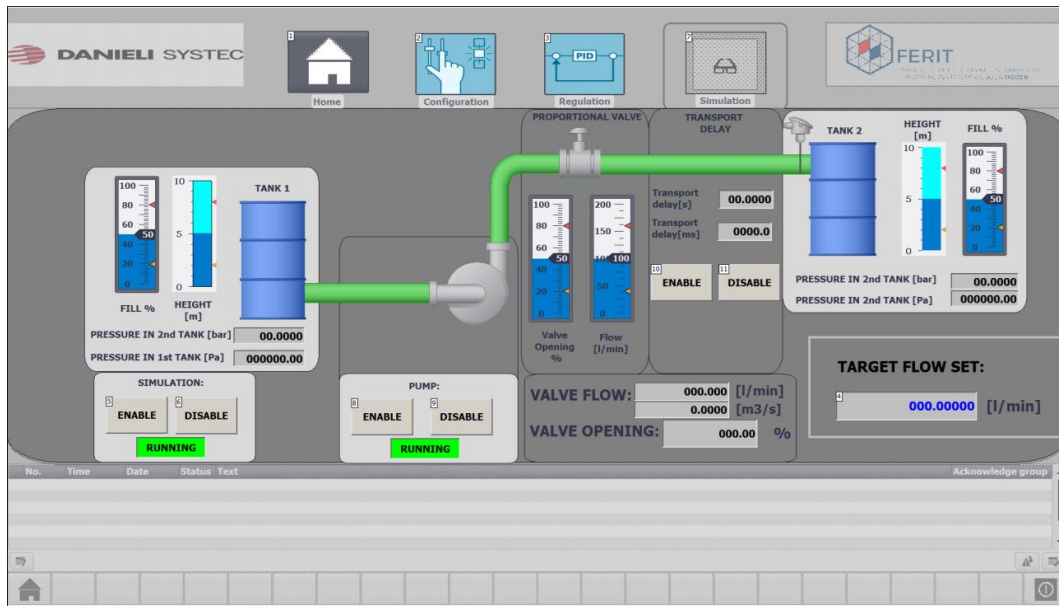


**Slika 3.23.** Prikaz odziva sustava.

Omogućeno je mijenjanje parametara regulatora prilikom rada sustava upravljanja. Time se operatoru omogućuje promjena vrijednosti parametara ako se primijete odstupanja od željene kakvoće regulacije.

#### 3.4.4. Simulacijski zaslon

Na simulacijskom zaslonu prikazane su sve bitne veličine simuliranog sustava, u različitim mjernim jedinicama, koje se mogu pratiti tijekom rada simuliranog sustava. Također, na ovome zaslonu obavlja se unos vodeće veličine simuliranog sustava, što je prikazano u donjem desnom okviru slike 3.24.



**Slika 3.24.** Simulacijski zaslon simulatora.

Na simulacijskom zaslonu nalaze se gumbi za uključivanje i isključivanje određenih dijelova sustava upravljanja, kao što je sama simulacija sustava upravljanja bez koje simulirani sustav ne može raditi, crpke sustava bez koje se također ne odvija protjecanje fluida kroz sustav te utjecaj transportnog kašnjenja na kakvoću regulacije protoka unutar sustava upravljanja. Prikaz ispunjenosti spremnika i visine tekućine u spremnicima napravljen je pomoću stupčastih grafikona zbog lakše predodžbe o stanjima tekućina u spremnicima.

### 3.5. Testiranje simuliranog sustava

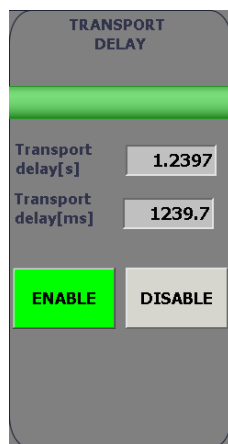
Provjera rada hidrauličkog sustava odvija se kroz testiranje simulacijom na modelu procesa pri unosu različitih parametara sustava upravljanja. S obzirom na to da je sustav upravljanja simuliran, moguće je isprobati različite vrijednosti parametara u različitim varijantama. Simulacija sustava upravljanja zamišljena je na način da se simulacijom provjeri mogućnost implementiranja pojedinačnih dijelova matematički modeliranog sustava upravljanja u stvarni hidraulički sustav pri određenim parametrima, koji se mogu ispitati simulacijom. Također, određivanje parametara za regulaciju pri različitim ulaznim parametrima sustava može se napraviti na simulaciji u velikoj

slobodi, što omogućuje rad bez odgovornosti o stvarnom sustavu i njegovom ponašanju prilikom promjena vrijednosti parametara. Samim time omogućen je veći raspon vrijednosti parametara koje se mogu i smiju isprobati bez pojave štete ili greške na stvarnom sustavu.

Prilikom puštanja sustava upravljanja u rad, sve dok se cijevi ne ispune tekućinom po cijelom presjeku, unutar sustava upravljanja javlja se transportno kašnjenje, što je ranije objašnjeno u poglavlju 2.4. S obzirom na to da je frekvencija pojave transportnog kašnjenja mala, odnosno sustav upravljanja je veliku većinu vremena u režimu rada gdje nema transportnog kašnjenja, regulacija sustava upravljanja s utjecajem transportnog kašnjenja nije prikazana nego je prikazan način na koji transportno kašnjenje utječe na kakvoću regulacije.

### 3.5.1. Rad simuliranog sustava s utjecajem transportnog kašnjenja

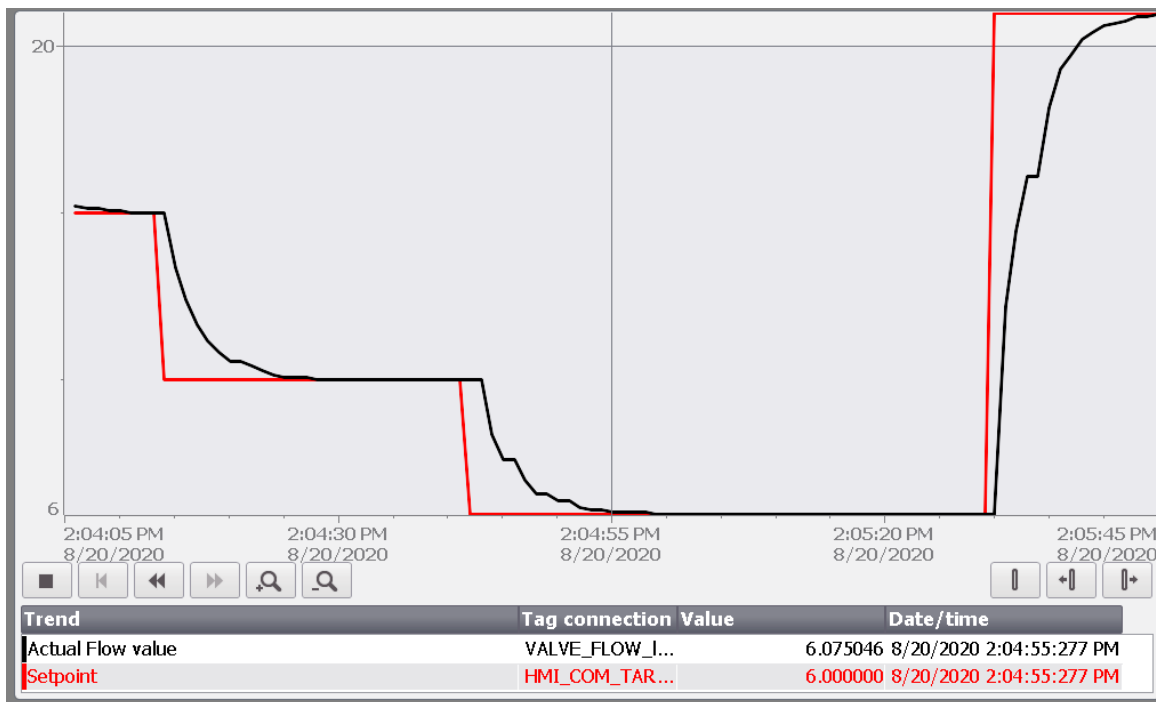
Nakon što je simulacija pokrenuta i nakon što su parametri sustava upravljanja podešeni potrebno je odabrati rad simuliranog sustava s utjecajem transportnog kašnjenja pritiskom na gumb “ENABLE”, koji se nalazi na simulacijskom zaslonu korisničkog sučelja, što je vidljivo na slici 3.25.



**Slika 3.25.** Dio korisničkog sučelja za uključivanje i isključivanje utjecaja transportnog kašnjenja.

Nakon što je simulirani sustav stavljen u način rada s transportnim kašnjenjem, regulator radi na principu sa slike 3.18. gdje postoji brojač s vremenom transportnog kašnjenja. Odziv simuliranog

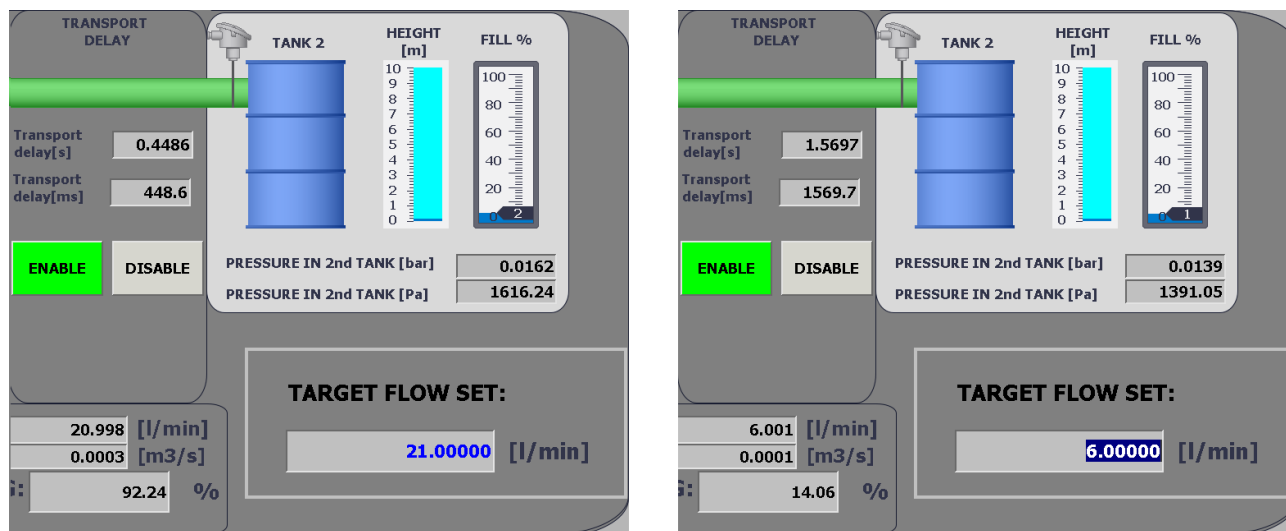
sustava s utjecajem transportnog kašnjenja s parametrima regulatora podešenim kao u potpoglavlju 3.2.2., prikazan je na slici 3.26.



**Slika 3.26.** Odziv simuliranog sustava pri utjecaju transportnog kašnjenja.

Na slici 3.26. vidljivo je kako stvarna vrijednost protoka zbog kašnjenja tekućine do dolaska na senzor, ne prati zadanu vrijednost protoka dovoljno dobro.

Promjenom iznosa protoka analogno se mijenja iznos transportnog kašnjenja tako što se povećanjem iznosa protoka smanjuje iznos transportnog kašnjenja i obrnuto, što se može vidjeti na slici 3.27.

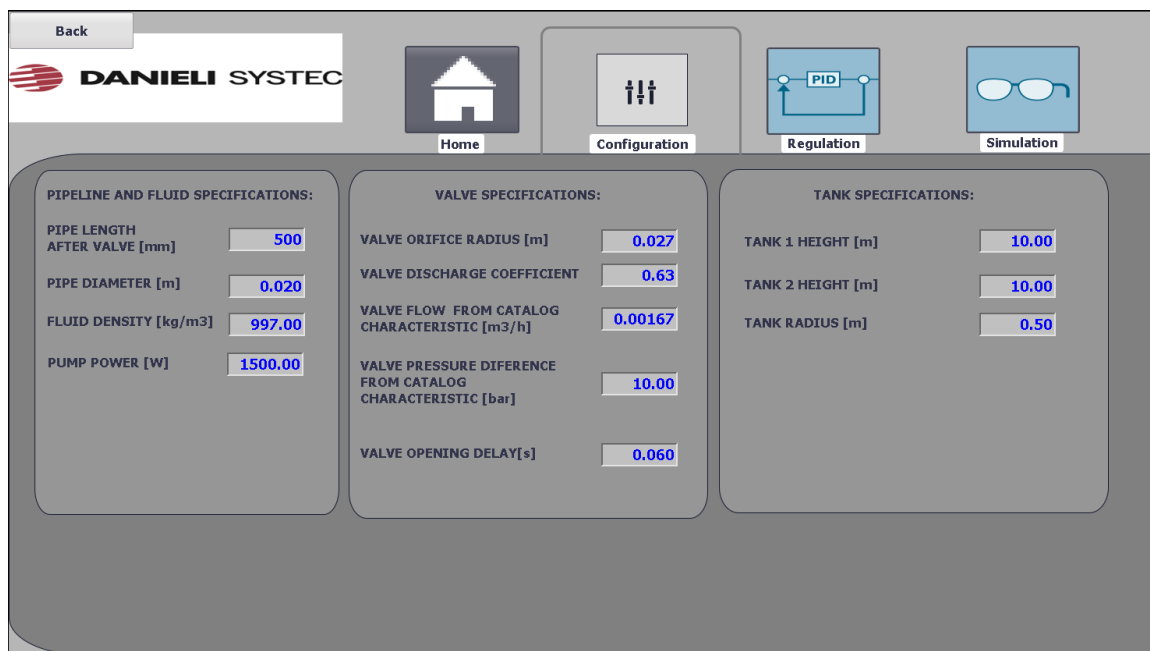


Slika 3.26. Iznosi transportnog kašnjenja za različite protoke.

Što je iznos transportnog kašnjenja manji, odnosno što je iznos protoka veći, transportno kašnjenje slabije utječe na regulaciju pa je i odziv bolji. Odnosno, u obrnutom slučaju za manji protok i veće kašnjenje kakvoća odziva je lošija.

### 3.5.2. Rezultati simulacije

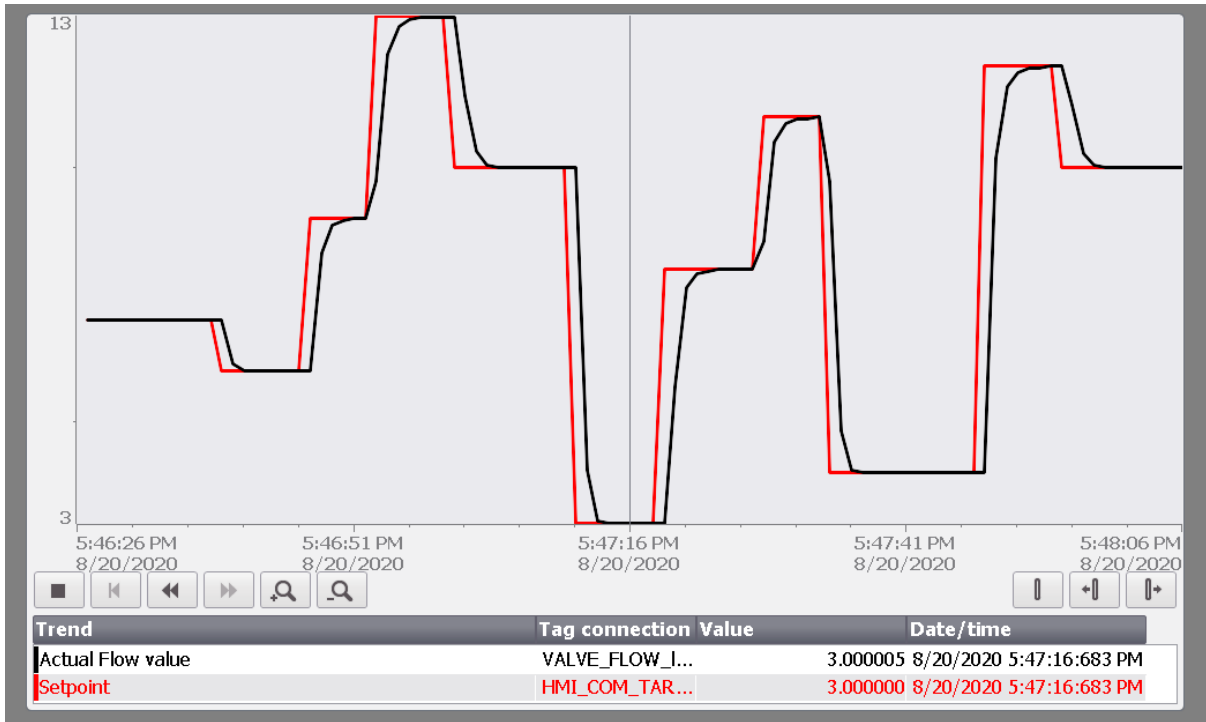
Kod prikaza rezultata simulacije, rezultati su prikazani u stacionarnom stanju zbog jednostavnijeg prikaza. Ako je potrebno pogledati cjelokupnu dinamiku pri testiranju, potrebno je pratiti simulaciju na korisničkom sučelju. Moguć je odabir različitih vrijednosti parametara pa je simulirani sustav simuliran u različitim uvjetima. Simuliran je s izmijenjenim iznosima parametara dijelova simuliranog sustava, kao na primjer većim spremnicima, slabijom crpkom, drugim proporcionalnim ventilom i slično. Simulator je koristan kod podešavanja parametara regulatora i testiranja simuliranog sustava s različitim parametrima regulatora prije puštanja stvarnog hidrauličkog sustava u pogon. Također, simulator daje informaciju kako se sustav upravljanja ponaša pri određenim parametrima simulacije. Prilikom testiranja korišteni su ulazni parametri sustava upravljanja na slici 3.28.



**Slika 3.28.** Parametri sustava upravljanja.

Parametri regulatora ranije su izračunati i podešeni su postupkom opisanim u potpoglavlju 3.2.2. i isti su kao i na slici 3.5. S obzirom na to da je iznos protoka ograničen razlikom ulaznog i izlaznog tlaka proporcionalnog ventila, simulirani proporcionalni ventil unutar simuliranog sustava upravljanja imao je protok u određenom rasponu vrijednosti prema gore zadanim parametrima sustava upravljanja sa slike 3.28. Promjenom parametara sustava upravljanja utječe se na granice protoka unutar simuliranog sustava.

Odziv sustava upravljanja pokazuje kako stvarni protok prati zadani protok u vremenu, što se vidi na slici 3.29., gdje je zadani protok označen crvenom linijom, a stvarni protok označen je crnom linijom.



**Slika 3.29.** Odziv sustava upravljanja za vrijeme testiranja.

Postoji daljnja mogućnost podešavanja parametara regulatora kako bi odziv bio još bolji, ali i ovaj odziv je dovoljan za funkcionalnost procesa. U odzivu je vidljivo kašnjenje regulatora u reakciji na promjenu zadanog protoka, što je posljedica unutarnje tromosti ventila (engl. *valve opening delay*) jer je ventilu potrebno određeno vrijeme da postigne zadanu otvorenost. Izuzev toga, WinCC grafovi nisu pogodni za vrlo brze procese zbog toga što je komunikacija između PLC-a i korisničkog sučelja sporija u odnosu na ciklus PLC-a pa su vidljivi oštriji prijelazi kod linije koja predstavlja stvarnu vrijednost protoka.



## 4. ZAKLJUČAK

Rješenje problematike diplomskog rada na temu regulacije protoka pomoću proporcionalnog ventila uspješno je realizirano. Prilikom izrade matematičkog modela postojala je sloboda pri modeliranju sustava upravljanja. Dobiveni matematički model sustava upravljanja može se primjeniti u praksi ukoliko postoji isti hidraulički sustav u stvarnosti, ali model ima veći značaj u pogledu istraživačkog rada u područjima regulacije i modeliranja sustava upravljanja. Na temelju uspješno izmodeliranog sustava regulacije protoka pomoću proporcionalnog ventila izrađen je simulator te kasnije korisničko sučelje preko kojeg se upravlja simulacijom. Na simulatoru su omogućeni različiti načini rada simuliranog sustava upravljanja, odnosno rad pod različitim uvjetima te je za svaki način rada omogućen prikaz odziva regulacije.

Prilikom simuliranja pod različitim ulaznim parametrima, sva dobivena rješenja bila su smisljena i dovoljno dobra da se iz njih može zaključiti kako je simulator ispravan. Kod matematičkog modeliranja sustava upravljanja, određeni fizikalni uvjeti i pojave nisu uzeti u obzir zbog manje složenosti matematičkog modela. Sukladno tome stvarni hidraulički sustav se jednako ponaša kao i simulirani sustav upravljanja, ali postoje odstupanja kod određenih rezultata. Simulacija je svakako od velikog značaja zbog toga što daje uvid u proces prije puštanja stvarnog hidrauličkog sustava u rad, te na taj način omogućava izbjegavanje kvarova i ostalih situacija koje se ne bi trebale događati. Simulirani sustav upravljanja je zamišljen i modeliran kao jedno rješenje problema regulacije protoka pomoću proporcionalnog ventila no moguće su modifikacije sustava upravljanja preko promjena ulaznih parametara sustava, što znači promjenu pojedinih dijelova sustava. Zbog smanjivanja složenosti matematičkog modela sustava upravljanja i zanemarivanja određenih fizikalnih pojava i utjecaja, sustav upravljanja je moguće unaprijediti na način da se izmodelira tako da se te stvari uzmu u obzir. Uz navedeno poboljšanje matematički model sustava upravljanja bilo bi moguće unaprijediti zamjenom općenitog matematičkog modela proporcionalnog ventila za matematički model dobiven iz statičke karakteristike nekog određenog proporcionalnog ventila.

Snimanjem i praćenjem odziva stvarnog hidrauličkog sustava bilo bi moguće provjeriti točnost simulatora prema više varijabli kao što su razina tekućine unutar spremnika te protok ventila pri određenom padu tlaka.

## LITERATURA

1. [https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/8b109d99-b37e-4aa4-821c-ab1d3c48e3d6/html/18637\\_Strujanje\\_fluida.html](https://edutorij.e-skole.hr/share/proxy/alfresco-noauth/edutorij/api/proxy-guest/8b109d99-b37e-4aa4-821c-ab1d3c48e3d6/html/18637_Strujanje_fluida.html) - Strujanje fluida, 05.07.2020
2. <https://pdfs.semanticscholar.org/7e21/ae0483dd87798578add92cbc4dab82cd261e.pdf> - Proporcionalni ventili članak, 10.05.2020.
3. S. Cetinkunt, Mechatronics with Experiments, University of Illinois at Chicago, 2015.
4. [https://www.boschrexroth.com/en/xc/myrexroth/mediadirectory?language=en-GB&publication=NET&filterMediatype=1584&search\\_query=29188&search\\_action=submit&editon\\_enum=re29188](https://www.boschrexroth.com/en/xc/myrexroth/mediadirectory?language=en-GB&publication=NET&filterMediatype=1584&search_query=29188&search_action=submit&editon_enum=re29188) – Bosch-Rexroth katalog, 15.06.2020.
5. Zoran Glavaš, Anita Štrkalj, Sekundarna metalurgija i kontinuirano lijevanje, Sveučilište u Zagrebu, Sisak 2015.
6. <https://www.calmet.com/basics-of-continuous-casting-of-steel/> - Osnove kontinuiranog lijevanja čelika, 24.08.2020.
7. Joško Petrić, Automatska regulacija: Uvod u analizu i sintezu, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb 2012.
8. Joško Petrić, Hidraulika, Fakultet strojarstva i brodogradnje Zagreb, Zagreb 2012.
9. Dražen Slišković, Procesna automatizacija, fakultetska skripta FERIT, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, Osijek 2013.
10. [https://cache.industry.siemens.com/dl/files/783/109756783/img\\_248229/v1/CPU\\_1511-1\\_PN.jpg](https://cache.industry.siemens.com/dl/files/783/109756783/img_248229/v1/CPU_1511-1_PN.jpg) – Slika Siemens PLC-a, 29.6.2020.
11. <http://e.math.hr/old/povmat/pov1-print.html> – Cardanova formula, 24.05.2020.
12. Mario Lovrić, Utjecaj nelinearnosti procesa na kakvoću regulacije linearnog sustava upravljanja, završni rad, FERIT, Osijek 2018.
13. P. Crnošija, B. Bošnjak, T. Bjažić, Sinteza parametara regulatora slijednih sustava primjenom metoda Ziegler-Nicholsa, Računala u tehničkim sustavima, str. 39-44, Opatija, 30.05.2005.

14. Nedjeljko Perić, Automatsko upravljanje-predavanja, fakultetska skripta, FER, Zagreb 2005.
  
15. Damir Filko, Tomislav Keser, Dražen Slišković, Industrijska informatika: Priručnik za vježbe, Sveučilište J.J. Strossmayera u Osijeku, FERIT, Osijek, 2019.

## SAŽETAK

Cilj diplomskog rada je izraditi simulaciju sustava upravljanja u kojemu će izvršni element u regulaciji protoka biti proporcionalni ventil. Sustav upravljanja i dijelove sustava potrebno je zadovoljavajuće matematički modelirati kako bi simulacija sustava što bolje simulirala rad istog stvarnog sustava. Matematički model sustava upravljanja uključuje regulaciju protoka iz jednog spremnika u drugi između kojih je cjevovod u kojemu se nalaze još crpka i proporcionalni ventil. Za potrebe simulacije sustava upravljanja izrađeno je korisničko sučelje pomoću kojeg se upravlja simulacijom i na kojem se prikazuju rezultati simulacije. Napravljena je sinteza regulatora eksperimentalnom Ziegler-Nichols metodom ruba stabilnosti na simulatoru te je u simulaciju implementiran upravljački PID algoritam. Također, u radu je prikazan utjecaj transportnog kašnjenja na kakvoću regulacije protoka.

**Ključne riječi: Regulacija protoka, proporcionalni ventil, modeliranje sustava, simulator procesa, PID regulator, transportno kašnjenje**

## ABSTRACT

### **Flow control using proportional valve.**

This paper aims to design a system with a proportional valve as an actuator in the flow control. The system and its parts need to be mathematically modelled in order for the system simulation to further simulate the system operation. The system mathematical model involves regulating the flow from one tank to another between which is a pipeline. The pipeline includes a pump and a proportional valve. For the simulation purposes, a user interface that manages the simulation and displays simulation results is developed. The controller synthesis of the experimental Ziegler-Nichols tuning method is made on the simulator and the control PID algorithm is implemented in the simulation. Also, the paper shows the transport delay influence on the regulation quality.

**Key words: flow control, proportional valve, system modeling, process simulator, PID regulator, transport delay**

## **ŽIVOTOPIS**

Ivan Pavrlišek, rođen je 1997. u Osijeku. Živi u Tenji u kojoj završava osnovnu školu „Tenja” nakon koje školovanje nastavlja u II. gimnaziji Osijek. Maturira 2015. godine i upisuje preddiplomski studij računarstva na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Nakon završenog preddiplomskog studija računarstva, na istom fakultetu odlučuje se upisati diplomski studij računarstva, smjer Robotika i umjetna inteligencija. Na posljednjoj godini 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.**