

Regulacija vertikalnog pomaka razdjelnika u procesu kontinuiranog lijevanja čelika

Pešut, Josip

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:200:688463>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-20**

Repository / Repozitorij:

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



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

Sveučilišni studij

**Regulacija vertikalnog pomaka razdjelnika u procesu
kontinuiranog lijevanja čelika**

Diplomski rad

Josip Pešut

Osijek, 2022.

SADRŽAJ

1. UVOD	3
1.1. Zadatak	3
2. PROCES KONTINUIRANOG LIJEVANJA ČELIKA	4
2.1. Način rada zakrivljenog kontinuiranog lijevanja čelika i osnovni dijelovi	7
2.2. Razdjelnik	8
2.3. Hidraulički cilindri	9
2.4. Vertikalni pomak razdjelnika	10
2.5. Sustav upravljanja	11
3. REGULACIJSKI ALGORITAM, IZRADA SIMULACIJE I PROVJERA RADA SUSTAVA	13
3.1. PID regulacija.....	14
3.2. Sklopovska konfiguracija	20
3.3. Izrada upravljačkog algoritma	21
3.4. Ručni način rada	22
3.5. Polu-automatski način rada	23
3.6. Automatski način rada	24
3.7. Sučelje čovjek-stroj	26
3.8. Ograničenja i dojava greške.....	28
4. TESTIRANJE UPRAVLJAČKOG ALGORITMA	30
4.1. Simulacija	30
4.2. Rezultati simulacije ručnog načina rada.....	31
4.3. Rezultati simulacije polu-automatskog načina rada.....	33
4.4. Podešavanje parametara PID regulatora	35
4.5. Rezultati simulacije automatskog načina rada.....	36
5. ZAKLJUČAK.....	39
LITERATURA	40
SAŽETAK.....	41
ABSTRACT	42
ŽIVOTOPIS.....	43
PRILOZI	44
P.1.	44

1. UVOD

Proces kontinuiranog lijevanja čelika trenutno je najkorištenija metoda lijevanja čelika u metalurškoj industriji [1]. Zaustavljanje procesa kontinuiranog lijevanja čelika dovodi do velikih materijalnih gubitaka. Jedan od čestih razloga zaustavljanja procesa je pucanje uranjajućeg izljevnika. Pucanje uranjajućeg izljevnika može prouzročiti dugotrajan zastoje procesa i zbog toga je osmišljena nova metoda, vertikalnog pomaka razdjelnika, čija je svrha sprječavanje pucanja uranjajućeg izljevnika.

U ovome diplomskom radu cilj je napraviti upravljački algoritam za upravljanje vertikalnim pomakom razdjelnika i sučelje čovjek-stroj pomoću kojih će se upravljati procesom. Za izradu upravljačkog algoritma i sučelja čovjek-stroj korišten je programski paket *Tia portal*.

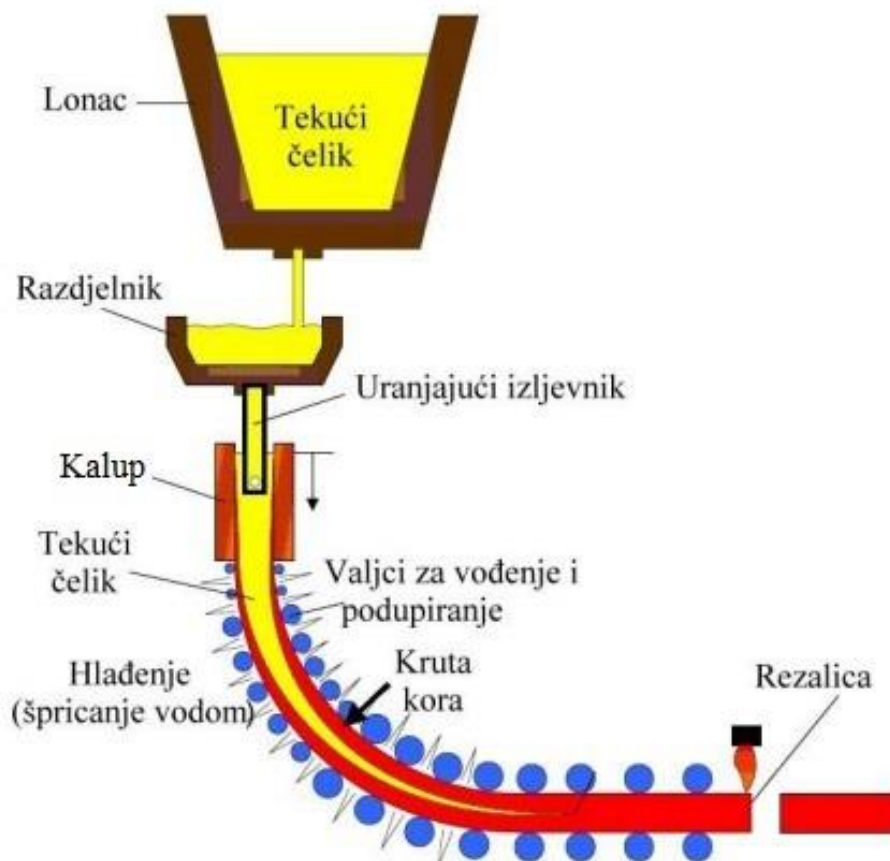
Drugo poglavlje sadrži teorijski opis procesa kontinuiranog lijevanja čelika, kao i dijelova koji su potrebni za vertikalni pomak razdjelnika. U trećem poglavlju prikazan je slijed izrade upravljačkog algoritma i sučelja čovjek-stroj. Četvrto poglavlje prikazuje rezultate simulacije različitih načina rada upravljačkog algoritma te rad sa sučeljem čovjek-stroj. Posljednje poglavlje je zaključak u kojem se opisuje što je postignuto izradom ovoga diplomskog rada.

1.1. Zadatak

Potrebno je izraditi upravljački sustav za podizanje/spuštanje razdjelnika u procesu kontinuiranog lijevanja. Sustav se sastoji od četiri međusobno spregnuta hidraulička cilindra upravljana proporcionalnim ventilima. Upravljački algoritam treba osigurati neusklađenost (misalignment) između cilindara uzrokovanu nesavršenošću ventila unutar željene tolerancije. Nadalje, potrebno je izraditi automatsku sekvencu za pomicanje razdjelnika (Autoshifting sequence) koja optimizira potrošnju uranjajućeg izljevnika (Submerged entry nozzle). Osim programskog rješenja potrebno je izraditi korisničko sučelje i vizualizaciju.

2. PROCES KONTINUIRANOG LIJEVANJA ČELIKA

U čeličanicama završna faza procesa proizvodnje čelika je stvrdnjavanje tekućeg čelika, a taj proces se naziva kontinuirano lijevanje čelika (*engl. Steel Continuous Casting*) [1]. Ovaj proces ima zadatak otopljeni čelik pretvoriti u poluproizvod određenog oblika i veličine koji se kasnije dodatno obrađuje. Naziv „kontinuirano“ dolazi od činjenice da se lijevanje provodi neprekidno dokle god ima tekućeg čelika ili dok to oprema dozvoljava. Tijek procesa je takav da se čelik iz kotla lijeva u razdjelnik, a iz kojeg ide u vodom hlađeni kalup koji ima neodređenu duljinu. Prolaskom kroz kalup rastaljeni čelik se hladi vodenim prskalicama kako bi se mogao oblikovati. Proces jednog tipa kontinuiranog lijevanja čelika prikazan je na slici 2.1. sa svim označenim dijelovima. Proces započinje u loncu gdje se ulijeva tekući čelik, a zatim se prelijeva u razdjelnik iz kojeg dalje ide u kalup, a nakon kalupa valjcima se odvodi do rezalice [1].



Slika 2.1. Načelna shema postrojenja za kontinuirano lijevanje čelika.

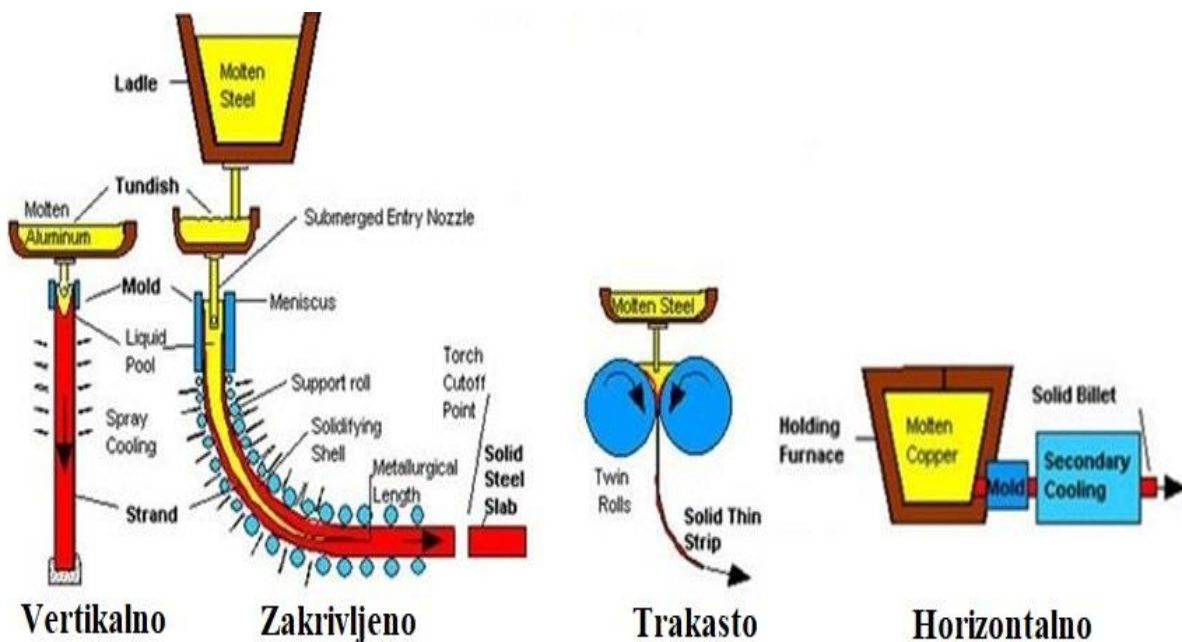
U procesu kontinuiranog lijevanja se razlikuju četiri tipa postrojenja za lijevanje, a tipovi postrojenja ovise o vrsti materijala koji se lijeva. To su [1]:

1. vertikalno lijevanje,
2. horizontalno lijevanje,
3. trakasto lijevanje,
4. zakrivljeno lijevanje.

Vertikalno lijevanje vrlo je praktično jer nema savijanja niti naprezanja poluproizvoda te također omogućuje simetrično skrućivanje poluproizvoda, a najčešće je namijenjeno za lijevanje aluminija. Iako je vrlo praktično, rijetko se gradi zbog velike visine postrojenja, što nije ekonomski ni tehnološki opravdano [1].

Horizontalno lijevanje ima prednost jer nije potrebna velika visina postrojenja, ali brzina lijevanja mu je manja nego kod ostalih tipova postrojenja za lijevanje. Horizontalno lijevanje se koristi za lijevanje bakra te legura koje ne sadrže željezo [1].

Trakasto i zakrivljeno lijevanje služi za lijevanje čelika. Razlika između ova dva tipa je u količini lijevanog čelika, zakrivljeno služi za veće količine, dok je trakasto namijenjeno za manje količine čelika [1]. Kod ova dva tipa postrojenja poluproizvod je zakrivljen te se na kraju izravnavaju pomoću valjaka. Slika 2.2. prikazuje načelnu shemu sva četiri tipa postrojenja.

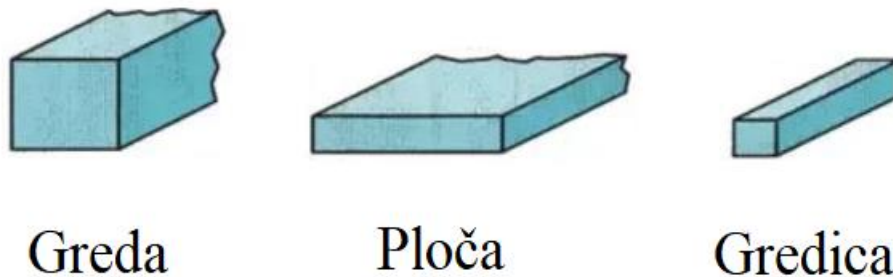


Slika 2.2. Načelna shema četiri tipa postrojenja za kontinuirano lijevanje čelika.

Postoje četiri vrste odlijeva čelika koje se danas koriste u industriji, a razlikuju se prema promjeru lijevanog poluproizvoda. To su [1]:

1. grede (*engl. Bloom*),
2. gredice (*engl. Billet*),
3. ploče (*engl. Slab*),
4. ingoti.

Greda može biti kvadratnog i pravokutnog oblika, a u pravilu ima poprečni presjek uvijek veći od 230 cm^2 [2]. Gredica je kvadratnog ili kružnog poprečnog presjeka manjeg od 230 cm^2 [2]. Ploča je uvijek pravokutnog poprečnog presjeka debljine do 250 mm, a odnos debljine naspram širine uvijek većim od 1:1,3 [1]. Ingoti su najčešće kvadratnog ili pravokutnog poprečnog presjeka te nemaju definirane dimenzije, a namijenjeni su za transport ili skladištenje te se kasnije koristi za dobivanje greda, gredica ili ploča [2]. Slika 2.3. prikazuje razliku između grede, ploče i gredice.

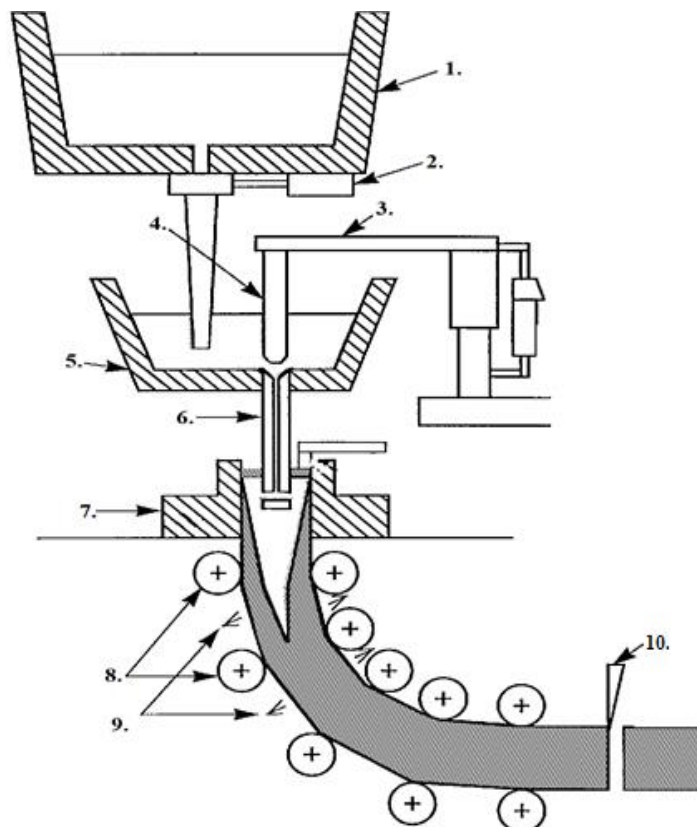


Slika 2.3. Prikaz oblika grede, ploče i gredice.

2.1. Način rada zakrivljenog kontinuiranog lijevanja čelika i osnovni dijelovi

Postrojenje koje koristi zakrivljeno kontinuirano lijevanje čelika prikazano je na slici 2.4. Iz slike je vidljivo da se postrojenje sastoji od:

1. lonca,
2. klizna vratašca,
3. mehanizam čepne motke,
4. čepna motka,
5. razdjelnik,
6. uranjajući izljevnik,
7. kalup,
8. valjaka,
9. vodenih prskalica,
10. rezalice.

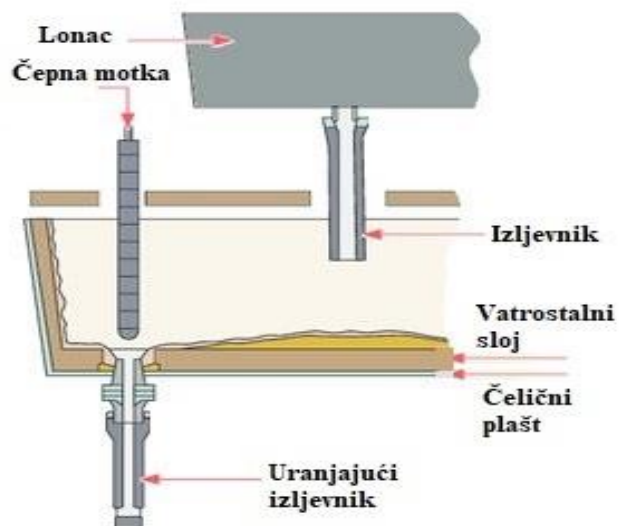


Slika 2.4. Načelna shema procesa zakrivljenog kontinuiranog lijevanja.

Zakrivljeno kontinuirano lijevanje čelika započinje pripremom čelika koji se otapa u peći, a zatim se ulijeva u lonac. U loncu dolazi do otplinjavanja te dodatnog zagrijavanja čelika na unaprijed definiranu idealnu temperaturu. Lonac se dovodi i postavlja na zakretni toranj koji najčešće drži dva lonca kako bi proces lijevanja tekućeg čelika u razdjelnik bio kontinuiran te kako bi se moglo što više čelika lijevati. Proces lijevanja čelika iz lonca u razdjelnik obavlja se pomoću vatrostalne cijevi koja je uronjena u razdjelnik, kako bi se što kvalitetnije lijevao čelik. Razdjelnik je međulonac koji služi za kontroliranje istjecanja čelika pomoću čepne motke koja se nalazi u njemu te se također u njemu na površinu tekućeg čelika podižu nečistoće koje se nalaze u čeliku te se na taj način pročišćava prije ulijevanja u kalup. Na razdjelnik se nastavlja uranjajući izljevnik koji ima svrhu štititi tekući čelik od reoksidacije tijekom istjecanja čelika iz razdjelnika u kalup [1]. Kalup se sastoji od bakrenog kristalizatora oko kojeg struji rashladna voda. Kalup ima mogućnost prilagođavanja dimenzija poluproizvodu koji se proizvodi. Također kalup ima otvoreno dno i tekući čelik prolazi kroz njega gdje mu se hladi vanjski dio pa na taj način poprima oblik. Čelik kojemu je vanjski dio ohlađen i postaje krut, a unutarnji dio je još uvijek u tekućem stanju naziva se žila. Nakon kalupa, žila prolazi kroz setove valjaka gdje se valja i hladi pomoću vodenih prskalica kako bi poprimila konačan oblik. Na kraju procesa žila se reže na unaprijed definirane dimenzije pomoću procesa plinskog rezanja ili letećih škara. Nakon rezanja na određene dimenzije proces je gotov te se dobiveni poluproizvod šalje na daljnju obradu.

2.2. Razdjelnik

Razdjelnik se ranije smatrao poveznicom između lonca i kalupa kako bi se održalo kontinuirano lijevanje čelika dok se lonac puni. Danas se sve više pažnje posvećuje razdjelniku jer ima više bitnih funkcija u kontinuiranom lijevanju. Razdjelnik ima svrhu pročišćavanja čelika na način da se unutar njega sve nečistoće podižu na površinu tekućeg čelika te se po njima posipa prah koji omogućuje njihovo skupljanje. Bitna stvar na koju se mora paziti je predugo zadržavanje taline u razdjelniku jer može doći do prevelikog pada temperature. Mrtve zone, odnosno područja u razdjelniku u kojim nema toka taline, moraju se minimalizirati, a to se postiže promjenom oblika brane u slučaju da ona usporava tok taline. Slika 2.5. prikazuje načelnu shemu izgleda razdjelnika i njegovih komponenata.

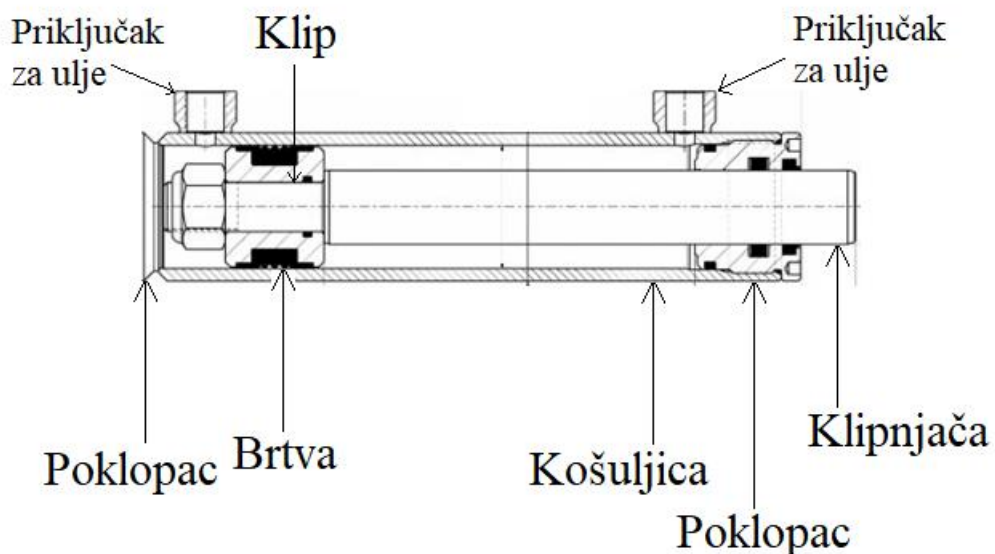


Slika 2.5. Dijelovi razdjelnika.

2.3. Hidraulički cilindri

Hidraulički cilindri služe za jednostavnu pretvorbu hidrauličke energije u linearno gibanje. Mogu postići silu i do nekoliko stotina tisuća kilonjutna, a pomaci koje rade mogu biti od nekoliko milimetara sve do dvadesetak metara [3].

Hidraulički cilindri sastoje se od košuljice, klipa, klipnjače, brtvi, dva priključka za ulje i dva poklopca, a kao radni medij koriste ulje [3]. Slika 2.6. prikazuje presjek jednog hidrauličkog cilindra i njegove dijelove.



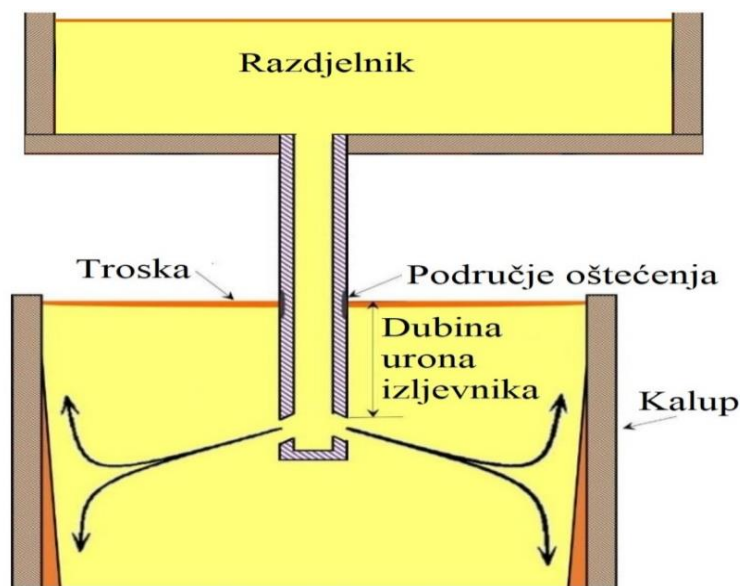
Slika 2.6. Presjek hidrauličkog cilindra.

Prema djelovanju sile hidraulički cilindri se dijele na jednoradne i dvoradne. Jednoradni cilindri obavljaju rad samo u jednome smjeru dok dvoradni obavljaju rad u oba smjera [3]. U ovome radu se koriste jednoradni hidraulički cilindri. Kod jednoradnih cilindara ulje pod tlakom dovodi se samo s jedne strane klipa, a povratno kretanje ostvaruje se pomoću težine tereta ili oprugom.

2.4. Vertikalni pomak razdjelnika

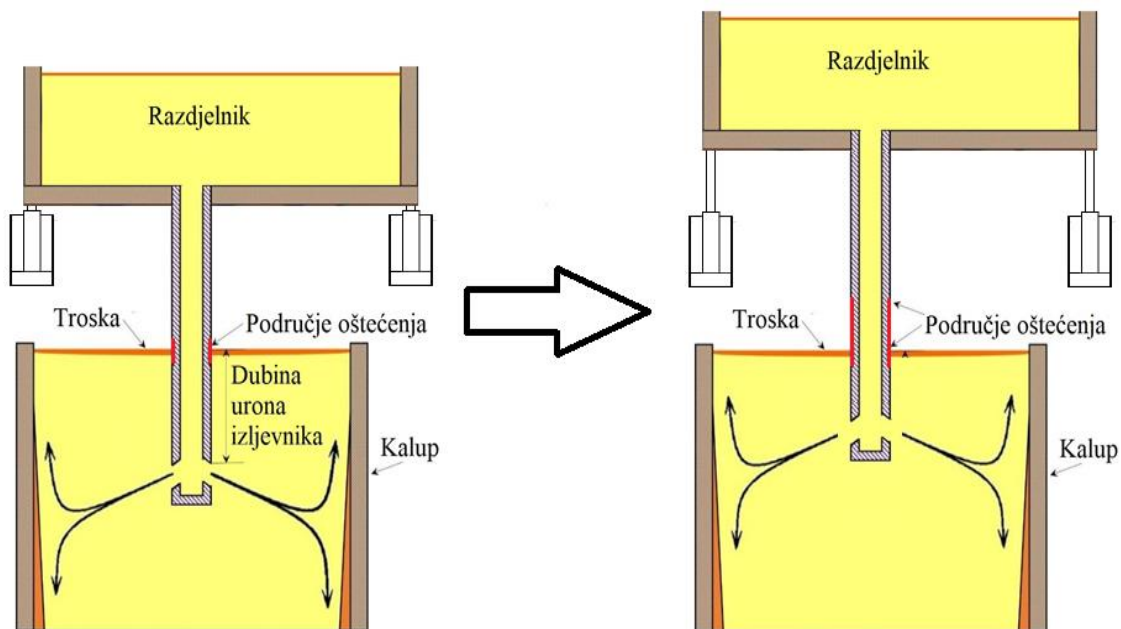
U kontinuiranom procesu lijevanja čelika zastoj zbog kvara stvara velike troškove. Jedan od problema i čestih kvarova koji se događaju je pucanje uranjajućeg izljevnika koji je spojen na razdjelnik te uronjen u kalup kako bi se što efikasnije tekući čelik lijevao u kalup. Uranjajući izljevnik najčešće je keramičke izvedbe i do njegovog pucanja dolazi zbog stvaranja troske. Troska nastaje naglim hlađenjem tekućeg čelika koji je u kontaktu sa vanjskim zrakom. Na slici 2.7. prikazan je dio procesa kontinuiranog lijevanja čelika u kojemu se događa urezivanje troske u keramički uranjajući izljevnik.

Za produžetak životnog vijeka uranjajućeg izljevnika i smanjenje broja zastoja u procesu kontinuiranog lijevanja čelika osmišljen je model u kojemu se pomoću hidrauličkih cilindara vertikalno pomiče cijeli razdjelnik zajedno s uranjajućim izljevnikom. Vertikalnim pomakom uranjajućeg izljevnika dolazi do povećanja površine područja oštećenja. Slika 2.8. prikazuje način na koji se povećava površina područja oštećenja koje je označeno crvenom bojom.



Slika 2.7. Dio procesa kontinuiranog lijevanja čelika.

Razdjelnik najčešće pomiču četiri usklađena hidraulička cilindra, a vrijednost pomaka se izražava u milimetrima. Pomicanje razdjelnika je vrlo opasno ukoliko sva četiri hidraulička cilindra nisu usklađena. Zbog toga se koristi PID regulator, da se što preciznije uskladi pomak cilindara. Najčešće kod korištenja PID regulatora za podešavanje pomaka cilindara zanemaruje se derivacijski član zbog njegove osjetljivosti na šumove i na nagle promjene u sustavu [5]. Bitno je da razlika pomaka sva četiri cilindra nije veća od dopuštene granice jer može doći do naginjanja razdjelnika i izlivanja tekućeg čelika. Povećanjem površine područja oštećenja produžuje se životni vijek uranjajućeg izljevnik i na taj način se sprječavaju zastoji u procesu kontinuiranog lijevanja čelika.

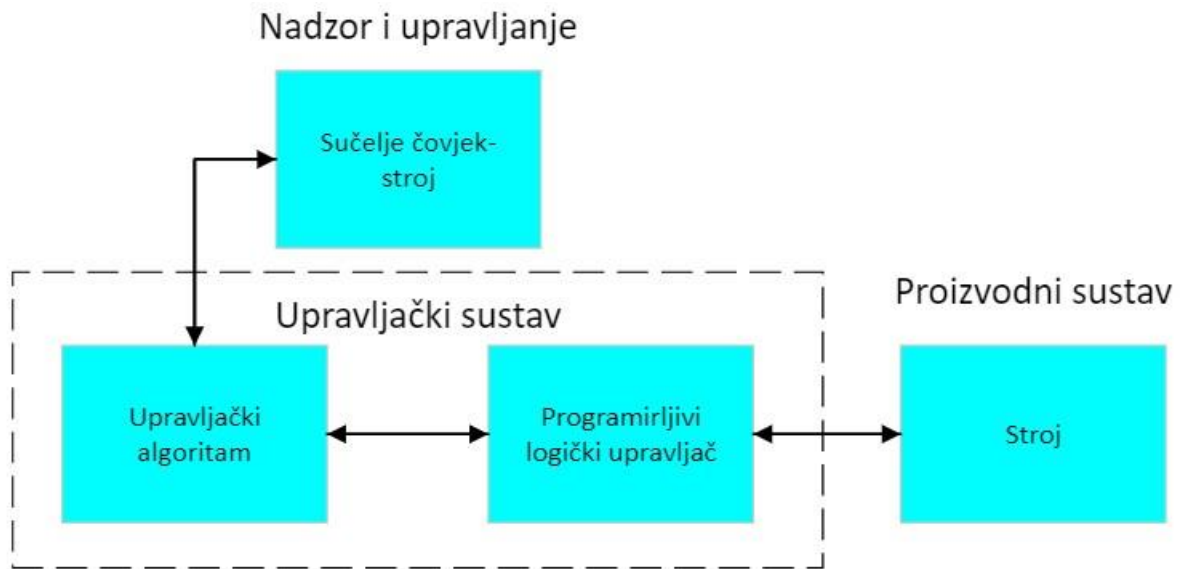


Slika 2.8. Vertikalni pomak razdjelnika i uranjajućeg izljevnik.

2.5. Sustav upravljanja

U procesu kontinuiranog lijevanja čelika kao sustav upravljanja najčešće se koristi programirajući logički upravljač (*engl. Programmable Logic Controller*) i programski paket *Tia portal* (*engl. Totally Integrated Automation Portal*). Programski paket *Tia portal* napravila je tvrtka Siemens, a svrha mu je integriranje alata za izradu programske podrške u automatizaciji, izrada HMI sučelja i SCADA sustava [4]. Upravljanje strojevima obavlja se pomoću PLC-ova, a *Tia portal* služi za konfiguraciju cijelog upravljačkog sustava te za izradu upravljačkog programa za pojedini PLC. Upravljački algoritam, koji je dio upravljačkog programa, učitava

se na PLC koji izmjenjuje informacije sa strojem. Načelna shema načina upravljanja strojem prikazan je na slici 2.9.



Slika 2.9. Načelna shema upravljanja strojem.

Upravljački sustav sastoji se od upravljačkog algoritma i PLC-a, koji su nedjeljiva cjelina, a služi za upravljanje proizvodnim sustavom. U upravljačkom sustavu PLC služi za primanje parametara procesa, od mjernih članova i za davanje naredbi izvršnim članovima. U upravljačkom algoritmu omogućeno je spajanje sučelja čovjek-stroj s upravljačkim sustavom, kako bi operater mogao mijenjati način rada upravljačkog sustava i podešavati parametre regulatora.

Mjerni član pomoću kojeg PLC dobiva parametre procesa je pretvornik pomaka. U ovome procesu postoje četiri pretvornika pomaka iz razloga što proces vertikalnog pomaka razdjelnika ima četiri hidraulička cilindra. Svaki pretvornik pomaka prati trenutnu poziciju jednog hidrauličkog cilindra te fizikalnu veličinu koja je zabilježena pretvara u električni signal, a zatim ga prosljeđuje PLC-u.

Izvršni član kojem PLC daje naredbu je servo-ventil. U procesu vertikalnog pomaka razdjelnika nalaze se četiri servo-ventila, a svaki od njih upravlja pomakom jednog hidrauličkog cilindra. PLC servo-ventilima šalje naredbu koja sadrži smjer kretanja hidrauličkog cilindra i otvorenost servo-ventila, odnosno, brzina pomaka hidrauličkog cilindra.

3. REGULACIJSKI ALGORITAM, IZRADA SIMULACIJE I PROVJERA RADA SUSTAVA

Upravljački algoritam za vizualizaciju, simulaciju i upravljanje napisan je za sustav upravljanja koji se koristiti za upravljanje proizvodnim sustavom, odnosno strojem, a glavna osnova upravljačkog sustava je PLC uređaj.

Programirajući logički upravljač, odnosno skraćeno iz engleskog PLC, je industrijsko računalo koje se sastoji od procesora, memorije i industrijskih ulaza i izlaza [6]. Njegova najčešća uporaba je u industriji za procesnu automatizaciju. PLC izvršava radnje u ciklusima, a zbog potreba za velikom brzinom reakcije sustava za upravljanje na promjene stanja unutar procesa vrijeme jednog ciklusa iznosi oko desetak milisekundi. Unutar jednog ciklusa PLC mora odraditi sljedeće radnje: učitavanje vrijednosti s ulaza, izvršavanje upravljačkog algoritma i pisanje vrijednosti varijabli na izlaze.

Za potrebe realizacije upravljačkog algoritma korišten je programski paket *Tia portal*. Za izradu upravljačkog algoritma korištena je verzija 13 Tia portala, a upravljački algoritam je pisan u programskom jeziku *Ladder diagram* (tzv. LAD), odnosno, na hrvatskom, ljestvičasti dijagram.

Ljestvičasti dijagram je jedan od najčešće korištenih programskih jezika u svrhu izrade upravljačkog algoritma za PLC uređaje i automatizaciju procesa [4]. Izgled programa podsjeća na ljestve jer se sastoji od horizontalnih linija koje se nalaze jedan ispod druge, na taj način je i proizašlo njegovo ime. Koristi se jer upravljački algoritam u njemu slični na relejne sheme te se jednostavno može vidjeti tok obavljanja procesa.

Funkcijski blokovi koji se koriste u programskom paketu *Tia portal* prikazani su u tablici 3.1. u kojoj je pored svakog funkcijskog bloka naveden njegov opis. Tablica 3.1. preuzeta je iz diplomskog rada [7].

Projektiranje sustava upravljanja, njegovo testiranje i podešavanje parametara regulatora napravljeno je simulacijski. Testiranje sustava upravljanja u stvarnom postrojenju može biti opasno i u slučaju grešaka može prouzročiti veliku materijalnu štetu te ugroziti ljudske živote. Iz tog razloga sustav upravljanja prije implementiranja u stvarno postrojenje potrebno je testirati pomoću simulacije stvarnog postrojenja kako bi se provjerio njegov rad i otklonile moguće greške. Podešavanje parametara regulatora može se napraviti dovoljno

precizno pomoću simulacije stvarnog postrojenja, a sigurnije je nego podešavati parametre regulatora u stvarnom postrojenju, pa se zbog toga obavlja pomoću simulacije.

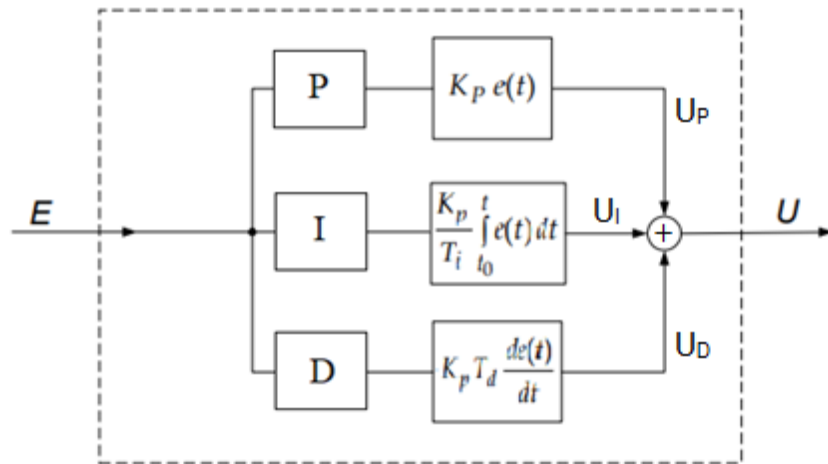
Tablica 3.1. Opis funkcijskih blokova u *Tia portal*-u [7].

Tip bloka	Opis
Organizacijski blok	Pod organizacijske blokove spadaju razni sistemski blokovi vezani uz rad PLC-a. Najvažniji blok je blok programskog ciklusa (engl. <i>Program cycle</i>) koji ciklički izvršava upravljački algoritam koji definira programer. Blok programskog ciklusa još se i naziva <i>Main</i> blok i ima oznaku OB1. PLC radi na način da na početku izvođenja bloka učita sve ulazne vrijednosti iz polja (signali sa senzora), izvede programsku logiku te na kraju postavi sve izlazne vrijednosti (upravljački signali za izvršne članove). Prema standardu upravljački algoritam se nikada ne koristi izravno u bloku programskog ciklusa, već se piše u funkcijama ili funkcijskim blokovima, dok su u bloku sadržani samo funkcijski pozivi. Ostali organizacijski blokovi vezani su uz razne funkcije PLC-a poput hardverskih prekidnih rutina, cikličkih prekidnih rutina, <i>startup</i> rutina , blokova za izvođenje iznimki i sl.
Funkcija	Funkcije su blokovi koda ili programskih rutina bez pridodijeljenog memorijskog prostora. U funkciji vrijednosti mogu postojati samo lokalno unutar te funkcije (privremene varijable). Kako bi se funkcija izvršila na PLC u mora biti pozvana u organizacijskom bloku. Struktura funkcije podijeljena je na ulaze, izlaze, ulazno-izlazne, privremene i konstantne varijable te povratnu vrijednost.
Funkcijski blok	Funkcijski blokovi su blokovi programa koji svoje vrijednosti pohranjuju trajno u instancu pripadajućeg data bloka (engl. <i>Instance Datablock</i> , skraćeno IDB) u svrhu očuvanja vrijednosti u sljedećem ciklusu izvođenja funkcijskog bloka.
Podatkovni blok	Podatkovni blokovi (engl. <i>Datablock</i>) su blokovi memorije u koji se spremaju programski podatci.

3.1. PID regulacija

Proporcionalno-integralno-derivacijski (PID) regulator prisutan je svugdje u svijetu automatizacije. Ova kombinacija regulacijskih djelovanja može dati prihvatljivu kvalitetu odziva, to jest, odziv će biti dovoljno točan i brz, s dopustivim odstupanjima.

U pogledu strukture algoritma, PID regulator može se izvesti na više načina. Najjednostavnija za uvodno razmatranje je paralelna struktura, koja je prikazana na slici 3.1.



Slika 3.1. Paralelni PID regulator.

PID regulator zbroj je proporcionalnog, integralnog i derivacijskog djelovanja [8]. Naredni izraz prikazuje zbroj sva tri djelovanja:

$$u(t) = U_P + U_I + U_D = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_{t_0}^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.1.)$$

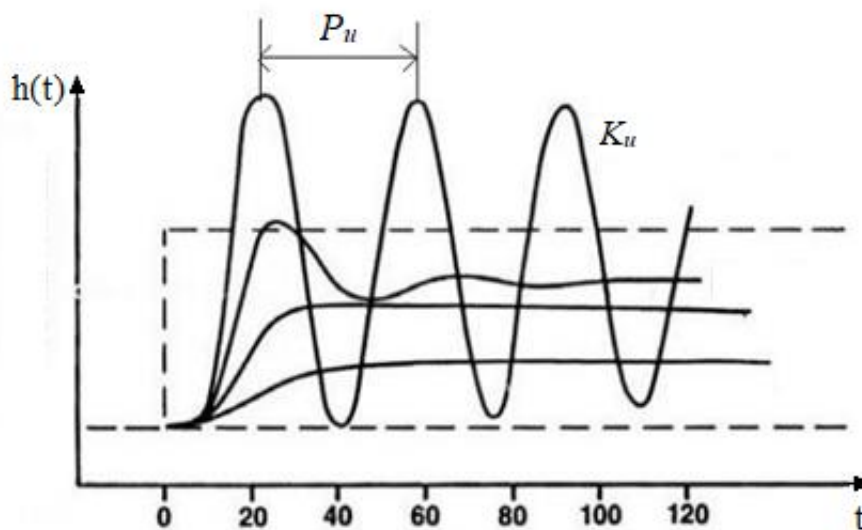
gdje K_p predstavlja pojačanje proporcionalnog djelovanja, T_i je vremenska konstanta integracije, dok je T_d vremenska konstanta derivacije. Razlomak $\frac{K_p}{T_i}$ može se označiti i kao K_i što predstavlja pojačanje integralnog djelovanja, a umnožak $K_p T_d$ se može označiti s K_d i predstavlja pojačanje derivacijskog djelovanja.

U praksi je česta situacija da se ne raspolože matematičkim modelom procesa, pa se za sintezu regulatora mogu koristiti jedino iskustvene metode podešavanja parametara regulatora. Jedna od ovakvih metoda za podešavanje parametara regulatora je Ziegler-Nichols metoda. Postoji više iskustvenih postupaka za podešavanje parametara regulatora, ali ova prema Ziegler-Nichols je najvažnija. Metoda služi za lakše podešavanje parametara regulatora, a nastala je četrdesetih godina 20. stoljeća. Ziegler-Nichols metoda ima dvije varijante. Prva varijanta podešavanja parametara je po metodi ruba stabilnosti prijenosne funkcije dok je druga varijanta podešavanja parametara po metodi prijenosne funkcije [5].

Podešavanju parametara regulatora prethodi provedba eksperimenta kojim se određuju određene značajke (koje su definirali autori), a zatim se na temelju tih značajki iz matematičkih

izraza (koje su definirali autori) određuju pojačanje proporcionalnog djelovanja, vremenska konstanta integracije i vremenska konstanta derivacije [5].

U metodi ruba stabilnosti povećanjem pojačanja regulatora K_p zatvoreni regulacijski krug standardne strukture, uz P regulator, dovodi se do ruba stabilnosti. Kritično pojačanje regulatora označeno s K_u (*ultimate gain*) do kojeg se dođe dovođenjem sustava do ruba stabilnosti i njegova perioda neprigušenog titranja P_u (*ultimate period*) su značajke po kojima se podešava regulator [8]. Način određivanja kritičnog pojačanja i perioda neprigušenih oscilacija dan je na slici 3.2.



Slika 3.2. Grafički prikaz procesa povećavanja pojačanja regulatora [9].

Postupak podešavanja regulatora metodom ruba stabilnosti sastoji se od dva koraka. U ovome eksperimentu koristi se samo P regulator. Prvi korak je postupno povećavanje pojačanja regulatora u malim koracima dok regulacijski krug ne počne neprigušeno oscilirati. Drugi korak je zabilježba kritičnog pojačanja regulatora K_u i izračunavanje perioda neprigušenog titranja P_u [9]. Period neprigušenog titranja računa se po izrazu:

$$P_u = \frac{2\pi}{\omega}, \quad (3.2.)$$

gdje P_u predstavlja periodu neprigušenog titranja.

Određivanje parametara P, PI i PID regulatora prema Ziegler-Nichols-ovoj metodi ruba stabilnosti provodi se prema izrazima danim u tablici 3.2.

Tablica 3.2. Parametri regulatora Ziegler-Nichols metode po metodi ruba stabilnosti [8].

Regulator	K_p	T_i	T_d
P	$K_p = 0.5K_u$		
PI	$K_p = 0.45K_u$	$T_i = 0.83P_u$	
PID	$K_p = 0.6K_u$	$T_i = 0.5P_u$	$T_d = 0.125P_u$

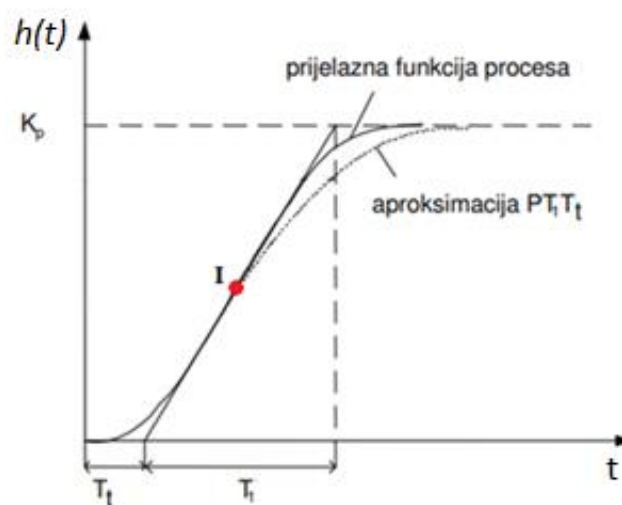
U praksi se često procesi ne smiju dovoditi na rub stabilnosti ili takav eksperiment s postrojenjem nije prihvatljiv (preopterećuje se postrojenje, troši se previše energije i/ili materije i slično). U tu svrhu razvijena je metoda prijelazne funkcije. Ponašanje nekog vrlo prigušenog procesa (npr. toplinski procesi) ili procesa s izraženim mrtvim vremenom može se dovoljno dobro aproksimirati PT_1T_t članom. Model kojim se aproksimira vladanje procesa je:

$$G(s) = \frac{K e^{-T_t s}}{T_1 s + 1}, \quad (3.3.)$$

gdje K predstavlja koeficijent pojačanja procesa, T_t je mrtvo vrijeme i T_1 predstavlja vremensku konstantu PT_1 dijela. U tablici 3.3. nalazi se i parametar R koji predstavlja nagib tangente. Nagib tangente računa se prema izrazu:

$$R = \frac{K}{T_1}. \quad (3.4.)$$

Iz prijelazne funkcije procesa $h(t)$ određuju se koeficijent pojačanja procesa, vrijeme zadržavanja i vrijeme porasta, a određuju se povlačenjem tangente u točki infleksije koja je označena slovom I na slici 3.3.



Slika 3.3. Odziv procesa na skokovitu pobudu.

Relativno dobra aproksimacija odziva procesa $h(t)$ dobije se ako se za vremensku konstantu T_1 da je jednaka vremenu porasta, a za mrtvo vrijeme T_t odabere da je jednako vremenu zadržavanja.

Određivanje parametara P, PI i PID regulatora pomoću Ziegler-Nichols-ove metode prijenosne funkcije provodi se prema izrazima danim u tablici 3.3. Parametri u tablici 3.3. odgovaraju stupnju prigušenja zatvorenog regulacijskog kruga, kako bi se dobio brzi, ali oscilirajući odziv [8].

Tablica 3.3. Parametri regulatora Ziegler-Nichols metode po metodi prijenosne funkcije [8].

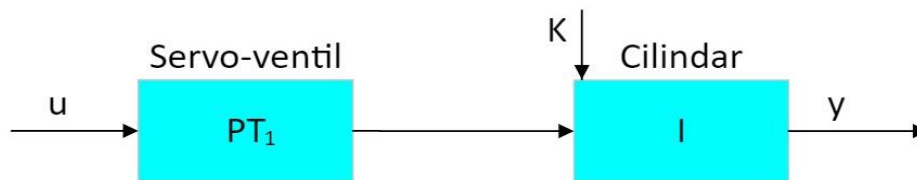
Regulator	K_p	T_i	T_d
P	$K_p = 1 / (R T_t)$		
PI	$K_p = 0.9 / (R T_t)$	$T_i = T_t / 0.3$	
PID	$K_p = 1.2 / (R T_t)$	$T_i = 2 T_t$	$T_d = 0.5 T_t$

Ziegler-Nichols metoda za namještanje parametara PID regulatora daje relativno dobre rezultate, ali ima i svojih nedostatke. Neki od nedostataka Ziegler-Nichols metode su:

- Dugotrajnost jer zahtjeva velik broj pokušaja, što je tipično za eksperimentalne metode,
- Pokušaji mogu biti neprihvatljivi jer se neki procesi ne smiju dovesti do ruba stabilnosti,
- Nije prikladna za jednostavne procese,
- Nije primjenjivo na procese koji su nestabilni u otvorenom krugu.

Za izradu upravljačkog algoritma izabran je PI regulator. Derivacijsko djelovanje se ne koristi jer može izazvati nagle promjene pozicije hidrauličkog cilindra, koje nisu poželjne u procesu vertikalnog pomaka razdjelnika.

Za potrebe izračuna parametara PI regulatora u programskom paketu *Tia portal* napravljen je model procesa pomoću kojeg je simuliran eksperiment metode ruba stabilnosti. Model samog procesa sastoji se od servo-ventila i hidrauličkog cilindra, a shematski prikaz modela procesa nalazi se na slici 3.4.



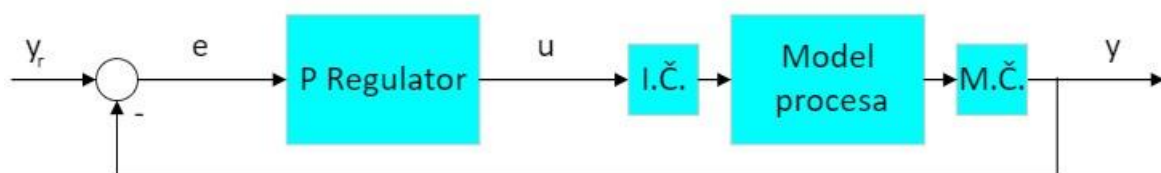
Slika 3.4. Model procesa za podešavanje parametara PI regulatora.

Servo-ventil ima PT_1 vladanje dok hidraulički cilindar ima I vladanje, odnosno, proces ima IT_1 vladanje. Prijenosna funkcija modela procesa prikazana je izrazom:

$$G_s(s) = K_s \frac{1}{1 + sT} \cdot K \frac{1}{sT_I}, \quad (3.5.)$$

gdje K predstavlja konstantu neusklađenosti hidrauličkog cilindra, a ostatak jednadžbe predstavlja prienosnu funkciju IT_1 vladanja.

Načelna shema po kojoj je napravljena simulacija eksperimenta metode ruba stabilnosti nalazi se na slici 3.5.

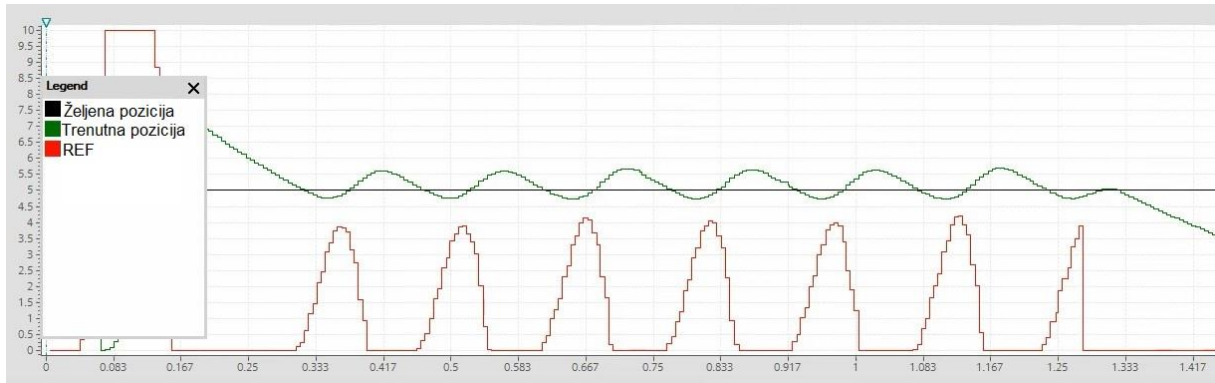


Slika 3.5. Načelna shema simulacije eksperimenta metode ruba stabilnosti

Na slici 3.5. „ y_r “ predstavlja željenu poziciju hidrauličkog cilindra, „ e “ predstavlja električni signal koji ulazi u P regulator, „ u “ predstavlja otvorenost servo-ventila u postocima dok „ y “ predstavlja trenutnu poziciju hidrauličkog cilindra. „I.Č.“ predstavlja izvršni član, a „M.Č.“ predstavlja mjerni član.

Eksperiment je proveden na način da su u funkcijski blok CONT_C upisane vrijednosti trenutne pozicije, koja je iznosila 0 mm, i željene pozicije hidrauličkog cilindra, koja je iznosila 5 mm. Nakon upisivanja ulaznih veličina potrebnih za rad P regulatora podešeno je kritično pojačanje regulatora, koje je na početku iznosilo 1. Nakon podešavanja svih parametara pokrenuta je simulacija procesa i praćen je grafički prikaz rada procesa u funkcijskom bloku CONT_C te je provjeravano da li proces neprigušeno oscilira. Simulacija procesa je napravljena četiri puta, odnosno, kritično pojačanje regulatora je povećavano za 1 sve dok proces nije počeo neprigušeno oscilirati, te je četvrti put zabilježeno kritično pojačanje regulatora, koje je iznosilo

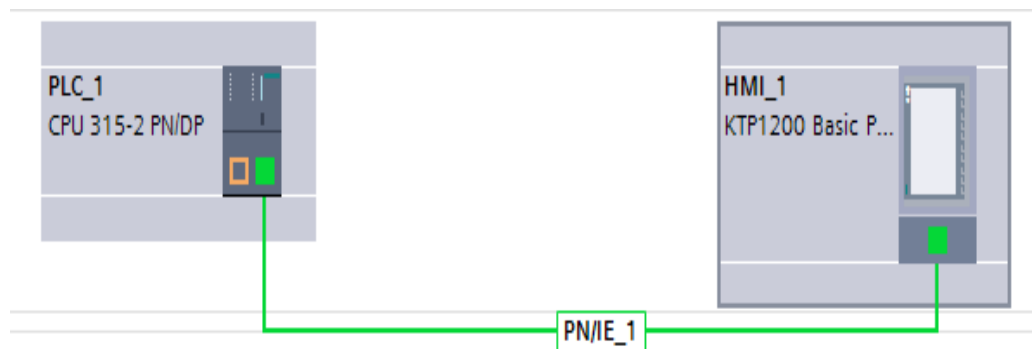
4. Pomoću izraza 3.2. izračunata je perioda neprigušenog titranja te su nakon toga izračunati parametri PI regulatora po tablici 3.2. Eksperiment je proveden na isti način za ostala tri PI regulatora koja se nalaze u upravljačkom algoritmu. Slika 3.6. prikazuje grafički prikaz neprigušenog osciliranja procesa praćenog u funkcijskom bloku CONT_C. U legendi na slici 3.6. crveno označeno REF predstavlja otvorenost servo-ventila u postocima.



Slika 3.6. Grafički prikaz neprigušenog osciliranja procesa

3.2. Sklopovska konfiguracija

Prvi korak u izradi upravljačkog algoritma je konfiguriranje uređaja i komunikacijskih protokola. U ovome diplomskom radu korišteni su simulatori zbog nedostatka stvarne opreme. Odabran je PLC uređaj serije *CPU 315-2 PN/DP* i upravljačka ploča serije *KTP1200 Basic*. Slika 3.7. prikazuje PLC i upravljačku ploču koji su povezani *PROFINET* mrežom.



Slika 3.7. Spoj PLC-a i upravljačke ploče.

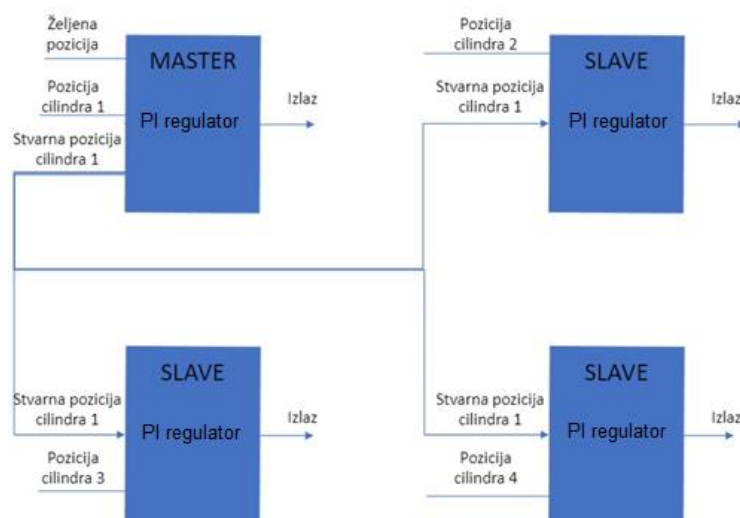
PLC-u i upravljačkoj ploči dodane su IP adrese iz iste podmreže te su spojeni virtualnom *PROFINET* mrežom putem koje komuniciraju.

3.3. Izrada upravljačkog algoritma

Izrada upravljačkog algoritma bazira se na podešavanju položaja četiri hidraulička cilindra pogonjena hidrauličkom pumpom. Cilj upravljačkog algoritma je podizanje i spuštanje razdjelnika pomoću četiri hidraulička cilindra. Sva četiri hidraulička cilindra moraju biti usklađeni i imati što manja odstupanja. Da bi se postigla što manja odstupanja za upravljanje hidrauličkim cilindrima koriste se PID regulatori. PID regulator svojstvom podešavanja njegovih parametara omogućava preciznije pomicanje cilindra do željene pozicije.

Metoda koja se koristi za usklađivanje cilindara naziva se *Master-slave* metoda. Načelna shema metode je prikazan na slici 3.8. Iz slike je vidljivo da je jedan PID regulator *master*, dok su ostala tri *slave*-ovi. Metoda se bazira na tome da se željena pozicija cilindra dodijeli *master*-u, a *slave*-ovima se daje trenutna pozicija *master*-a kao željena pozicija. Kao *master* odabran je cilindar broj 1, dok su ostala tri *slave*-ovi.

Upravljački algoritam sastoji se od tri načina rada, a to su ručni način rada, polu-automatski i automatski način rada. Ručni način rada omogućava unos željene vrijednosti otvorenosti servo-ventila te pomicanje istoga gore ili dolje. Polu-automatski način rada omogućava unos željene pozicije na koju PID regulator sam dovodi hidraulički cilindar. Zadnji način rada je automatski način, a njegova svrha je konstantno podizanje i spuštanje hidrauličkog cilindra po unaprijed odabranim koracima koji se izvršavaju u vremenskim intervalima koje operater odabere. Kod automatskog načina rada operater programa određuje veličinu koraka, vrijeme koraka i željenu poziciju hidrauličkog cilindra, a upravljački algoritam obavlja ostalo.

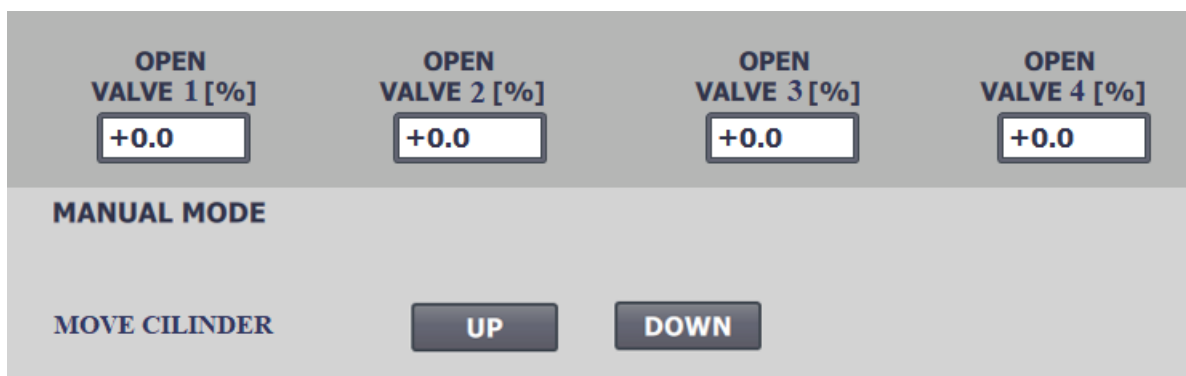


Slika 3.8. Načelna shema prikaza *Master-slave* metode.

Izlazi iz svakog PI regulatora je otvorenost servo-ventila u postotcima i smjer kretanja hidrauličkog cilindra, a te dvije veličine se pomoću PLC-a kao naredba zadaju servo-ventilu.

3.4. Ručni način rada

Ručni način rada (*engl. manual mode*) služi za brzo namještanje visine razdjelnika na što jednostavniji način. Operator odabire koliko želi otvoriti servo-ventil za svaki hidraulički cilindar (u postotcima) te želi li podići razdjelnik gore ili spustiti dolje. Ako je servo-ventil hidrauličkog cilindra otvoren, cilindar će konstanto ići u određenom smjeru sve dok se servo-ventil ne zatvori, a postotak otvorenosti servo-ventila utječe na brzinu kretanja cilindra. Iz slike 3.9. vidljiv je izgled sučelja čovjek-stroj (odnosno HMI sučelja) za ručni način rada. Na slici 3.9. nalaze se dva tipkala i prostori za unos željenog postotka otvorenosti servo-ventila hidrauličkog cilindra. Prvo tipkalo označeno s „UP“ služi za podizanje razdjelnika gore, dok drugo tipkalo označeno s „DOWN“ služi za spuštanje razdjelnika.



Slika 3.9. Ručni način rada u sučelju čovjek-stroj.

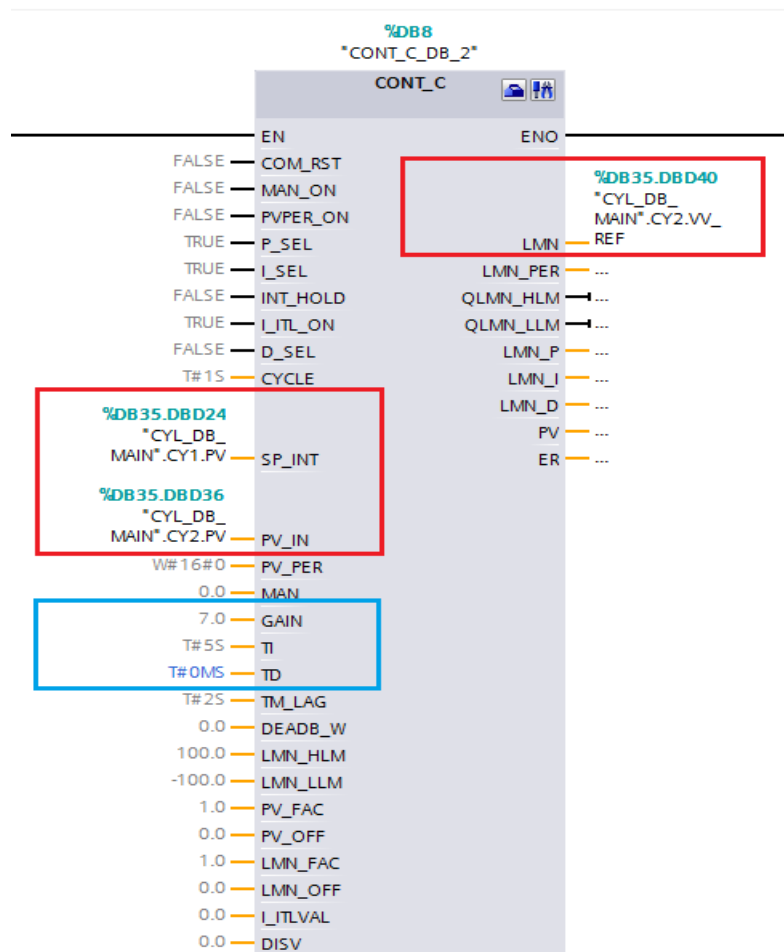
Hidraulički cilindri se mogu pomicati 700 mm od početnog položaja, iz tog razloga bitno je u upravljačkom algoritmu ograničiti vrijednost do koje se razdjelnik može podići ili spustiti. Kod promjene položaja razdjelnika sva četiri cilindra se dodaje ista veličina koraka, odnosno u ovome slučaju ne koristi se *Master-slave* metoda.

Zbog sigurnosti procesa u upravljačkom algoritmu podešeno je da se prilikom uključivanja ručnog načina rada prvo mora uključiti cijeli proces pomoću posebnog tipkala, a zatim ručni način rada pomoću drugog tipkala. Također u slučaju neusklađenosti (*engl.*

misalignment) hidrauličkih cilindara ručni način rada se isključuje iz razloga da ne bi došlo do naginjanja razdjelnika ili nekog drugog kvara.

3.5. Polu-automatski način rada

Polu-automatski način rada (*engl. semi-automatic mode*) radi pomoću PID regulatora koji dobiva željenu poziciju cilindra od operatera, a ostatak odrađuje sam. U upravljačkom algoritmu kao PID regulator koristi se funkcijski blok *CONT_C* koji je prikazan na slici 3.10.



Slika 3.10. Prikaz funkcijski bloka *CONT_C*.

Na slici 3.10. crvenom bojom su označeni parametri koji su potrebni za rad procesa, odnosno SP_INT predstavlja željenu poziciju cilindra. PV_IN je stvarna pozicija cilindra, a LMN je referentna vrijednost cilindra. Plavom bojom označeni su parametri PID regulatora, gdje GAIN predstavlja proporcionalno pojačanje, TI je vremenska konstanta integracije, a TD

je vremenska konstanta derivacije. U ovome diplomskom radu korišteni su samo proporcionalni i integralni dio, dok se derivacijski dio ne koristi zbog brzih pomicanja cilindra pri postizanju željene pozicije.

Izgled operaterskog sučelja za polu-automatski način rada prikazan je na slici 3.11. U operaterskom sučelju operater odabire željenu poziciju označenu sa „TARGET POSITION“ te nakon toga pokreće PID regulator pomoću tipkala označenog sa „START“, a zatim PID regulator dovede cilindre do željene pozicije.

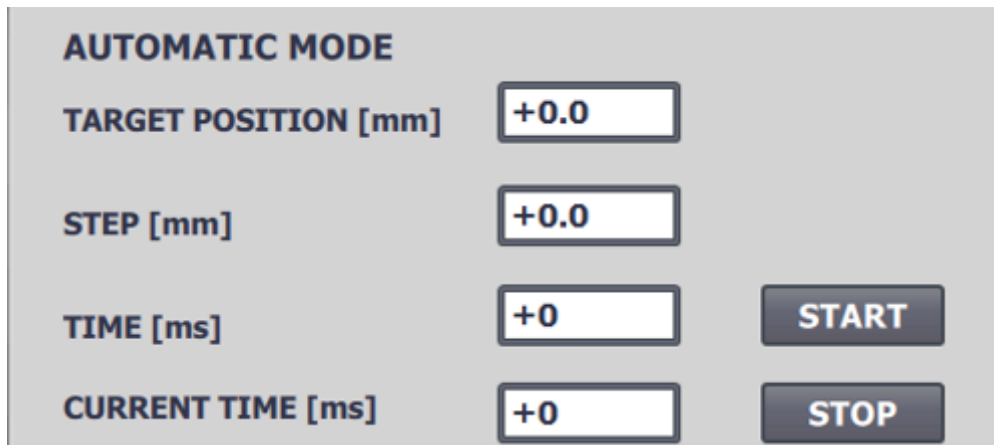


Slika 3.11. Polu-automatski način rada.

U polu-automatskom načinu rada koristi se *Master-slave* metoda. Željena pozicija, zbog ograničenja cilindra, ograničena je do 700 mm od početnog položaja, u slučaju prelaska granice polu-automatski način rada se isključuje. Kao i kod ručnog načina rada zbog sigurnosti procesa u upravljačkom algoritmu podešeno je da se prilikom uključivanja polu-automatskog načina rada prvo mora uključiti cijeli proces pomoću posebnog tipkala, a zatim polu-automatski način rada putem drugog tipkala. U slučaju neusklađenosti hidrauličkih cilindara polu-automatski način rada se isključuje.

3.6. Automatski način rada

Automatski način rada (*engl. automatic mode*) je znatno složeniji od prethodna dva načina rada jer sustav mora kroz određeno vrijeme doći do željene pozicije, a dok dolazi do željene pozicije mora se pomicati po unaprijed zadanim koracima. Izgled operaterskog sučelja za automatski način rada prikazan je na slici 3.12.

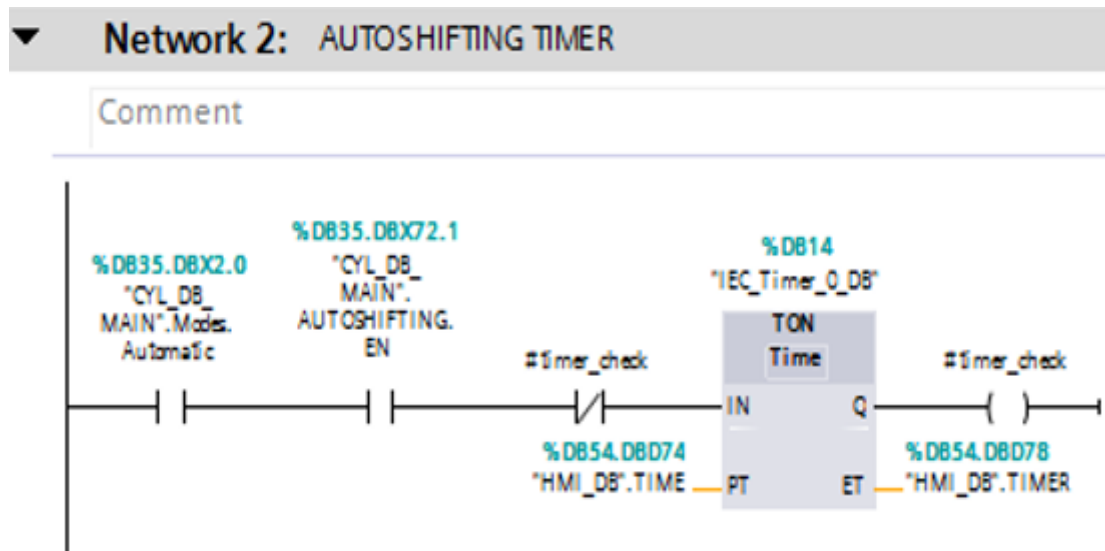


Slika 3.12. Automatski način rada.

Iz slike 3.12. vidljiva su četiri područja za unos i očitavanje vrijednosti i dva tipkala. Tipkalo označeno sa „START“ služi za pokretanje upravljačkog algoritma za automatski način rada, a tipkalo označeno sa „STOP“ služi za zaustavljanje automatskog načina rada. „TARGET POSITION“ je oznaka za željenu poziciju cilindra, „STEP“ je veličina koraka koji će cilindar napraviti, „TIME“ predstavlja vrijeme nakon kojeg će cilindar napraviti korak, a „CURRENT TIME“ prikazuje koliko još vremena treba proći do sljedećeg koraka.

Operater odabire željenu poziciju do koje cilindar mora doći, zatim odabire veličinu koraka koji će cilindar napraviti, a zatim određuje vrijeme koje predstavlja svakih koliko će se korak dogoditi. Nakon što odabere sve željene vrijednosti pokreće automatski način rada pomoću tipkala označenog sa „START“. Tipkalo „STOP“ služi za zaustavljanje procesa u slučaju kvara ili nekih drugih poteškoća. Automatski način rada funkcionira na način da upravljački algoritam konstantno podiže i spušta cilindar između početnog položaja i željene pozicije. Podizanje i spuštanje hidrauličkog cilindra obavlja se u koracima čiju vrijednost operater odabire, a korak se obavlja nakon što prođe vrijeme koje je također operater odabrao. Na taj način dobije se stepenasto podizanje hidrauličkog cilindra između početnog položaja i željene pozicije.

Upravljački algoritam napravljen je pomoću funkcijskog blokova CONT_C koji predstavlja PID regulator, funkcijskog bloka TON koji predstavlja mjerac vremena i funkcijskih blokova ADD i SUB koji nakon što mjerac vremena postigne postavljeno vrijeme koraka dodaju ili oduzimaju jedan korak PID regulatoru. Mreža u kojoj su postavljeni uvjeti za rad funkcijskog bloka TON prikazan je na slici 3.13.

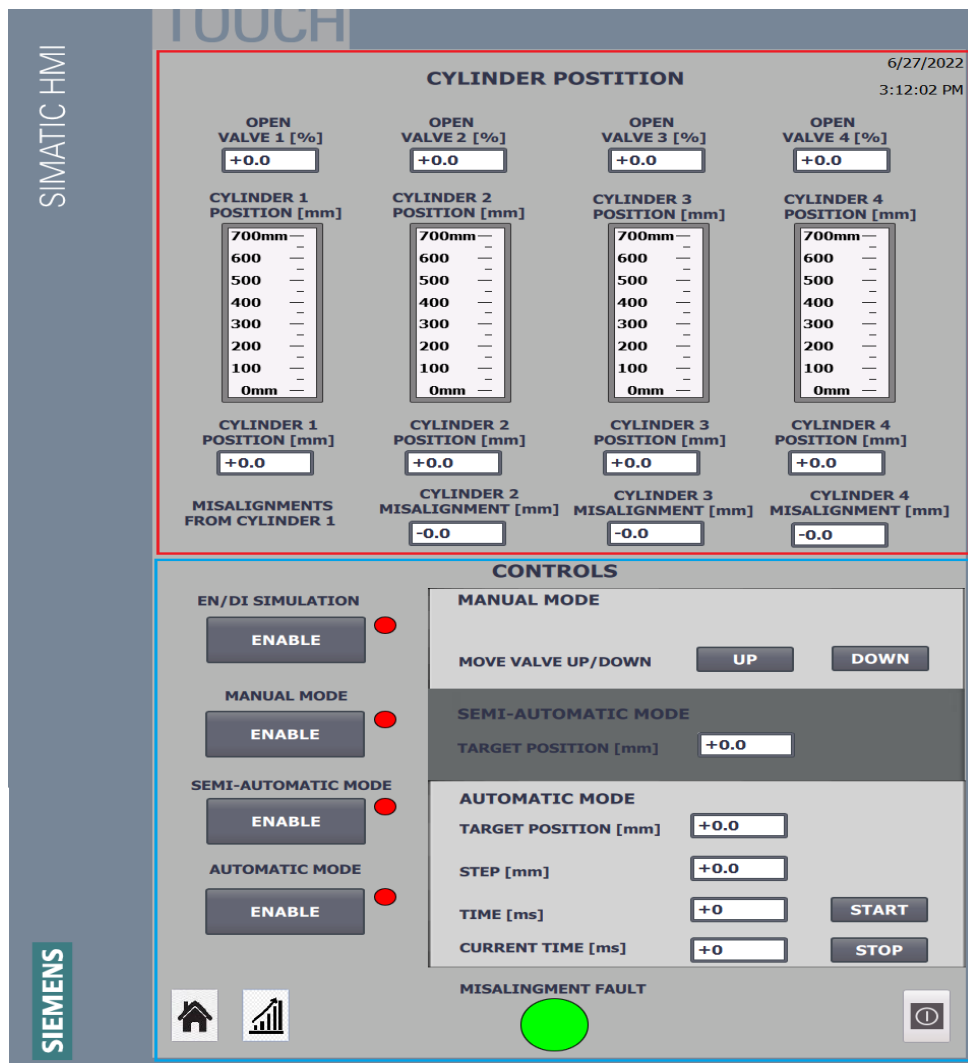


Slika 3.13. Funkcijski blok TON.

Automatski način rada kao i polu-automatski koristi *master-slave* metodu. Zbog složenosti procesa željena pozicija cilindra ograničena je do 90 mm, a korak koji cilindar može napraviti ograničen je na 10 mm. Kao i kod prethodna dva načina rada za uključivanje automatskog načina rada prvo se mora uključiti cijeli proces pomoću tipkala, a zatim automatski način rada pomoću drugog tipkala. I u ovome načinu rada prati se neusklađenost hidrauličkih cilindara kako bi se spriječili kvarovi ili izlivanje tekućeg čelika.

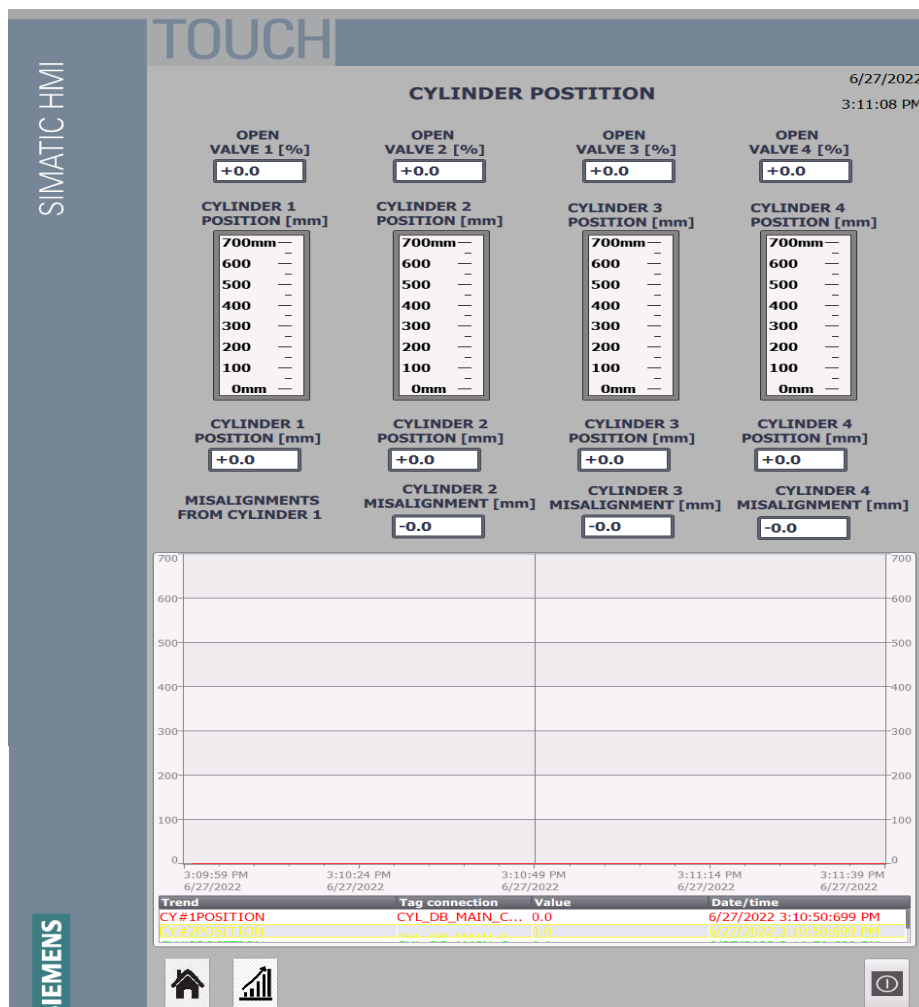
3.7. Sučelje čovjek-stroj

Sučelje čovjek-stroj (*engl. Human Machine Interface*), ili skraćeno iz engleskog HMI, je sučelje koje omogućuje udaljeni nadzor procesa i upravljanje istim. Upravljanje se obavlja pomoću različitih tipkala, potenciometara i prekidača koji su povezani s PLC-om. Izradu sučelja obavlja jedna osoba, a pomoću njega najčešće radi više drugih osoba te je zbog toga za sučelje čovjek-stroj bitna preglednost, jednostavnost i efikasnost. Izgled sučelja čovjek-stroj nalazi se na slici 3.14.



Slika 3.14. Sučelje čovjek-stroj glavna stranica.

Na slici 3.14. crvenom bojom označeno je područje za nadzor željenih veličina poput pozicije cilindra u milimetrima te neusklađenosti hidrauličkih cilindara s usporedbom na prvi cilindar. Plavom bojom označeno je područje u kojemu se nalaze naredbe za sva tri načina rada. Također ispod naredbi nalazi se alarm za neusklađenost cilindara. U lijevom donjem kutu nalaze se dva tipkala, prvo tipkalo s oznakom kuće služi za otvaranje glavne stranice sučelja čovjek-stroj koje je prikazano na slici 3.14., a drugo, odnosno desno tipkalo, predstavlja stranicu na kojoj su promatrane veličine prikazane grafičkim putem. Stranica koja prikazuje veličine grafički prikazana je na slici 3.15.



Slika 3.15. Sučelje čovjek-stroj stranica s grafovima.

Na slici 3.15. nalazi se dio za praćenje pozicija cilindara kao i na glavnoj stranici sučelja čovjek-stroj, a na dnu se nalazi polje na kojemu se grafički prikazuju vrijednosti pozicija cilindara.

3.8. Ograničenja i dojava greške

Prilikom izrade upravljačkog algoritma bitno je predvidjeti moguće greške u radu sustava i pomoć sučelja čovjek-stroj upozoriti operatera. Zbog zaštite opreme i ljudskih života određene su granice unutar kojih je sustav stabilan. U procesu pomicanja razdjelnika najveći problem predstavlja neusklađenost hidrauličkih cilindara.

U ovome upravljačkom algoritmu granice su postavljene uz provjeru svojstava hidrauličkih cilindara. Za ručni način rada i polu-automatski način rada granice su 0 mm i 700

mm, a u automatskom načinu rada granice su 0 mm i 90 mm zbog složenosti procesa. U slučaju probijanja navedenih granica svi načini rada kao i cijeli proces se gase.

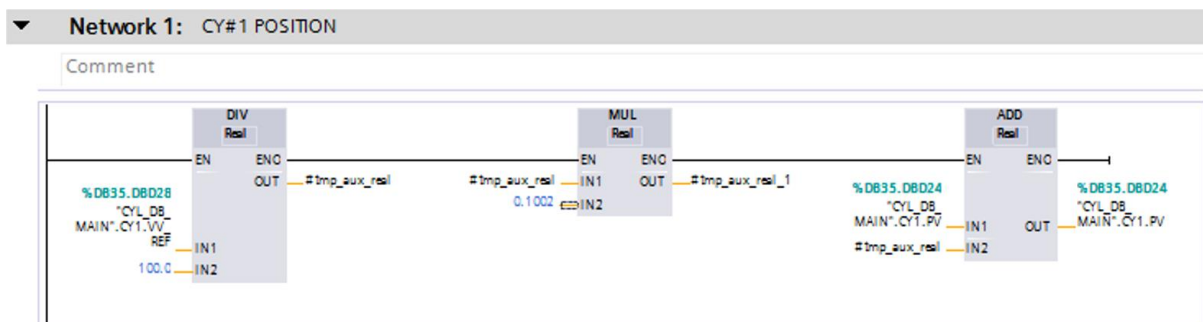
U slučaju da jedan cilindar prethodi ili kasni za prvim cilindrom više od 20 mm proces se automatski isključuje. Na sučelju čovjek-stroj nalazi se lampica koja postaje crvena u slučaju neusklađenosti cilindra, a označena je s „MISALIGNMENT FAULT“ te je vidljiva na slici 3.14. U slučaju neusklađenosti hidrauličkih cilindra operater je zadužen za usklađivanje pozicija hidrauličkih cilindra pomoću ručnog načina rada sustava.

4. TESTIRANJE UPRAVLJAČKOG ALGORITMA

Postavljanjem novo izrađenog upravljačkog algoritma u postrojenje mogu se prouzročiti kvarovi i velike katastrofe ukoliko upravljački algoritam ima grešaka. Kako bi kvarovi i katastrofe bili spriječeni svaki upravljački algoritam mora biti testiran prije uključivanja u pogon. Testiranjem upravljačkog algoritma obavljeno je simulacijom stvarnog procesa. Testiranje obavljeno simulacijom stvarnog procesa omogućuje podešavanje parametara sustava i otkrivanje grešaka u radu.

4.1. Simulacija

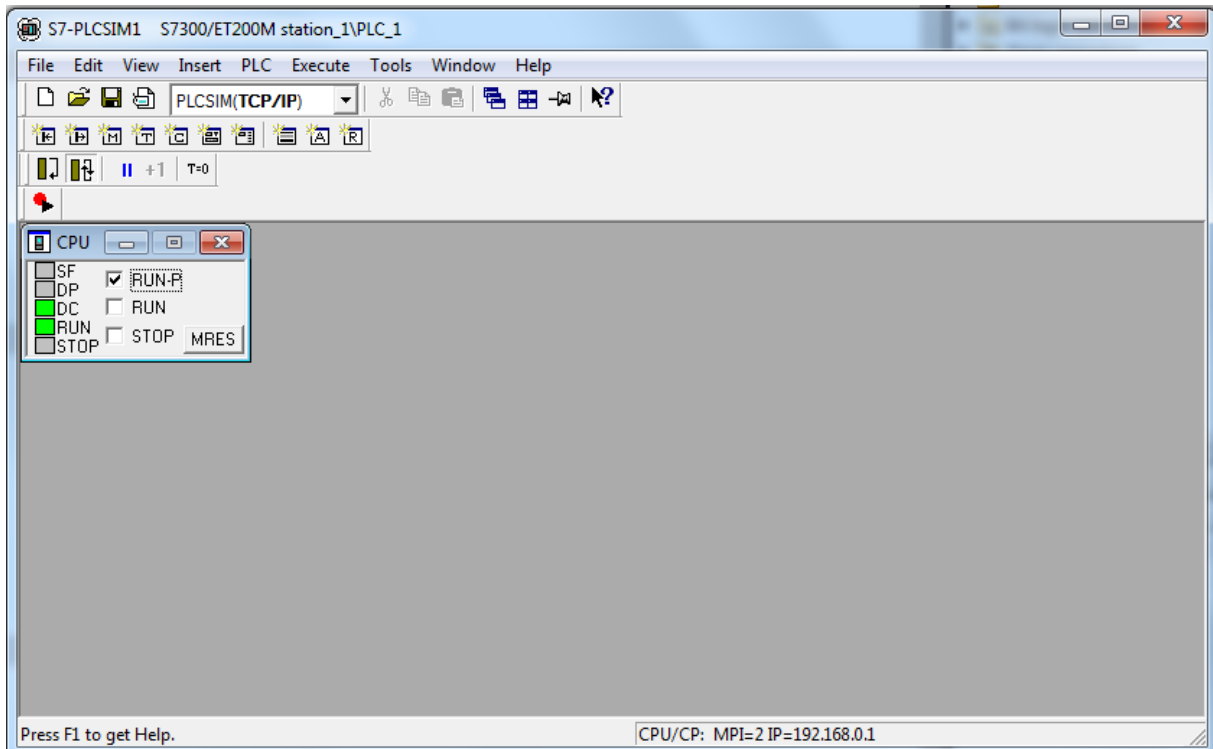
U stvarnom svijetu ništa nije savršeno pa nisu ni hidraulički cilindri. Iako upravljački algoritam daje istu referentnu vrijednost servo-ventilima, oni se ne kreću usklađeno. Iz toga razloga u upravljački algoritam je dodana funkcija koja služi za davanje malih odstupanja, odnosno poremećaja, svakom cilindru kako bi simulacija bila što stvarnije prikazana. Funkcija je napravljena na način da se referentna vrijednost dodijeljena cilindru pretvori u vrijednost odstupanja cilindra, koja iznosi nekoliko mikrometara. Prikaz funkcije u programskom paketu *Tia portal* nalazi se na slici 4.1. Vrijednost odstupanja cilindra se dodaje na stvarnu vrijednost pozicije cilindra u svakom ciklusu PLC-a. Jedan ciklus u prosjeku iznosi 5 ms.



Slika 4.1. Funkcija za davanje poremećaja.

Simulacija stvarnog procesa napravljena je pomoću programskog alata *S7 PLCSIM* koji ima ulogu simulacije PLC-a. Slika 4.2. prikazuje izgled programskog alata *S7 PLCSIM* dok je uključen aktivni način rada. PLC je simuliran zbog nedostatka potrebne opreme prilikom izrade ovoga diplomskog rada. Upravljački algoritam je spojen s programskim alatom *S7 PLCSIM*

pomoću IP adrese. Spajanje preko IP adrese omogućuje skidanje hardverske i softverske konfiguracije u programski alat *S7 PLCSIM*. Nakon povezivanja programskog alata *S7 PLCSIM* i skidanja hardverske i softverske konfiguracije PLC se postavlja u aktivni način rada (*engl. run mode*).



Slika 4.2 Izgled sučelja programskog alata *S7 PLCSIM*.

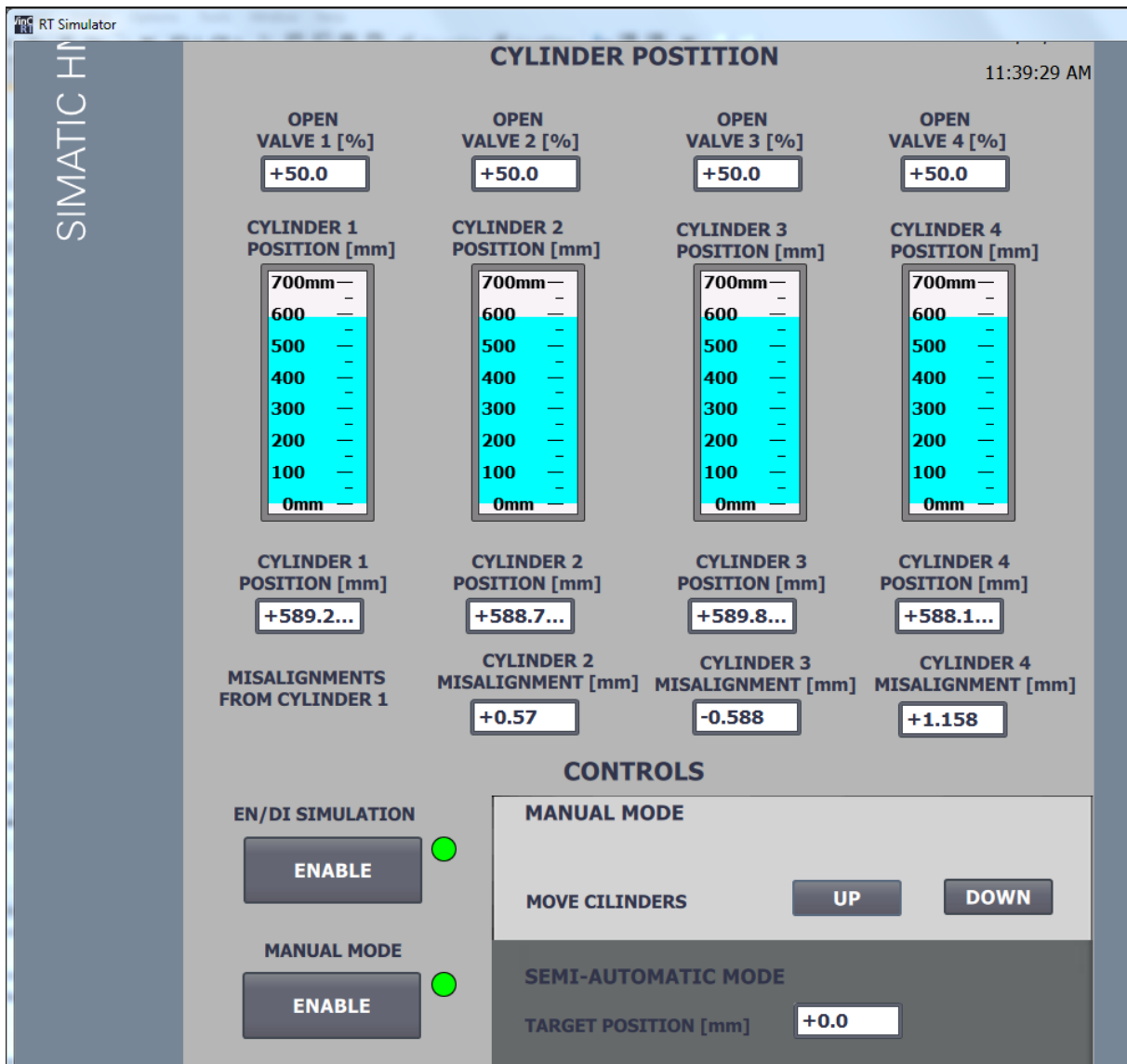
Nakon postavljanja PLC-a u aktivni način rada potrebno je pokrenuti način praćenja (*engl. monitoring mode*) zbog prikaza tijeka procesa i veličina u upravljačkom algoritmu. Uz način praćenja potrebno je pokrenuti simulaciju sučelja čovjek-stroj.

4.2. Rezultati simulacije ručnog načina rada

Ručni način rada ima svrhu brzog i jednostavnog pomicanja hidrauličkih cilindara, a zbog brzine promjene pozicije cilindra može doći do velikih odstupanja. Iz toga razloga bilo je potrebno simulirati ručni način rada i provjeriti dolazi li do odstupanja.

Simulacija je napravljena pomoću programskog alata *S7 PLCSIM* i sučelja čovjek-stroj. PLC je prvo postavljen u aktivni način rada, zatim je u sučelju čovjek-stroj uključen cijeli proces, uključen ručni način rada i nakon toga je unesena željena otvorenost servo-ventila u

postotcima i na kraju je odabran smjer kretanja hidrauličkog cilindra prema gore. Nakon pokretanja simulacije praćene su veličine: brzina kretanja cilindra, pozicija cilindra i odstupanje pozicije tri cilindra od prvoga. Slika 4.3. prikazuje dio sučelja čovjek-stroj na kojemu su praćene spomenute veličine.



Slika 4.3. Dio sučelja čovjek-stroj za praćenje pozicije hidrauličkih cilindara.

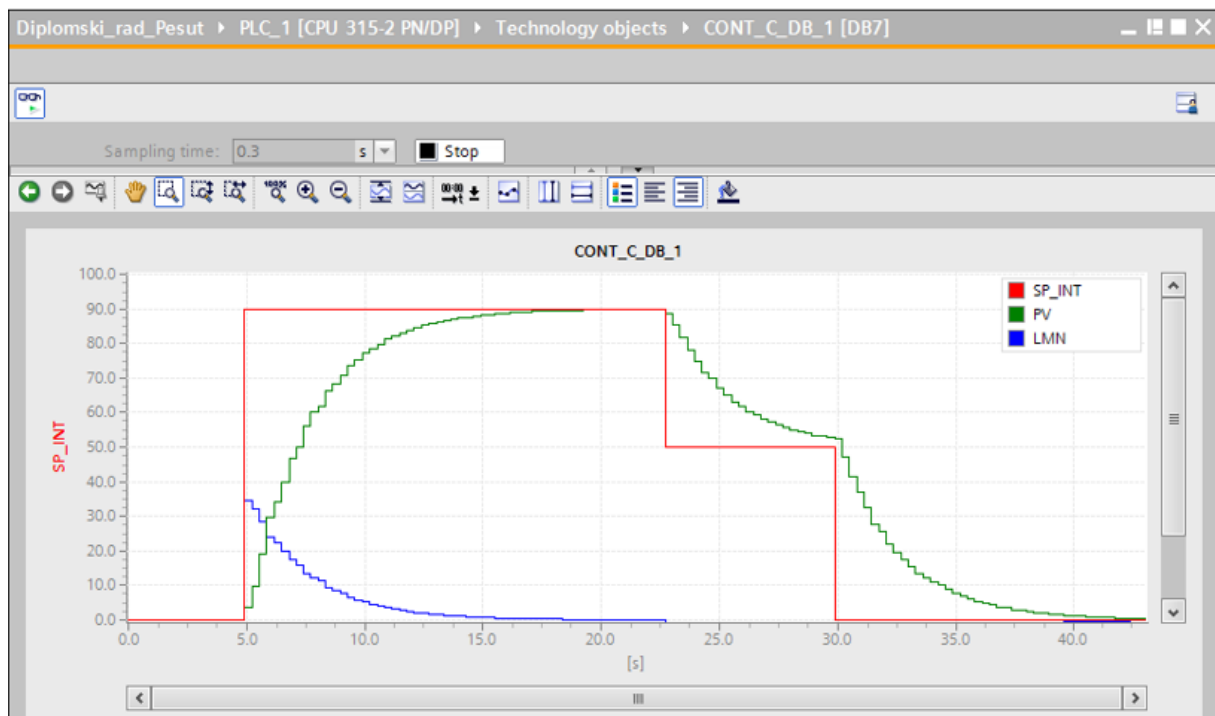
Prvi rezultati koji su dobiveni simulacijom ručnog načina rada pokazivali su da pri otvorenosti servo-ventila do 80% ne dolazi do granice odstupanja pozicija cilindara, ali pri otvorenosti servo-ventila iznad 80% odstupanje pozicije cilindara je prelazilo ranije određenu granicu koja iznosi 20 mm. Iz toga razloga napravljene su promjene u upravljačkom algoritmu

gdje se smanjila dozvoljena otvorenost servo-ventila na 80% i na taj način su spriječene daljnje greške sustava.

4.3. Rezultati simulacije polu-automatskog načina rada

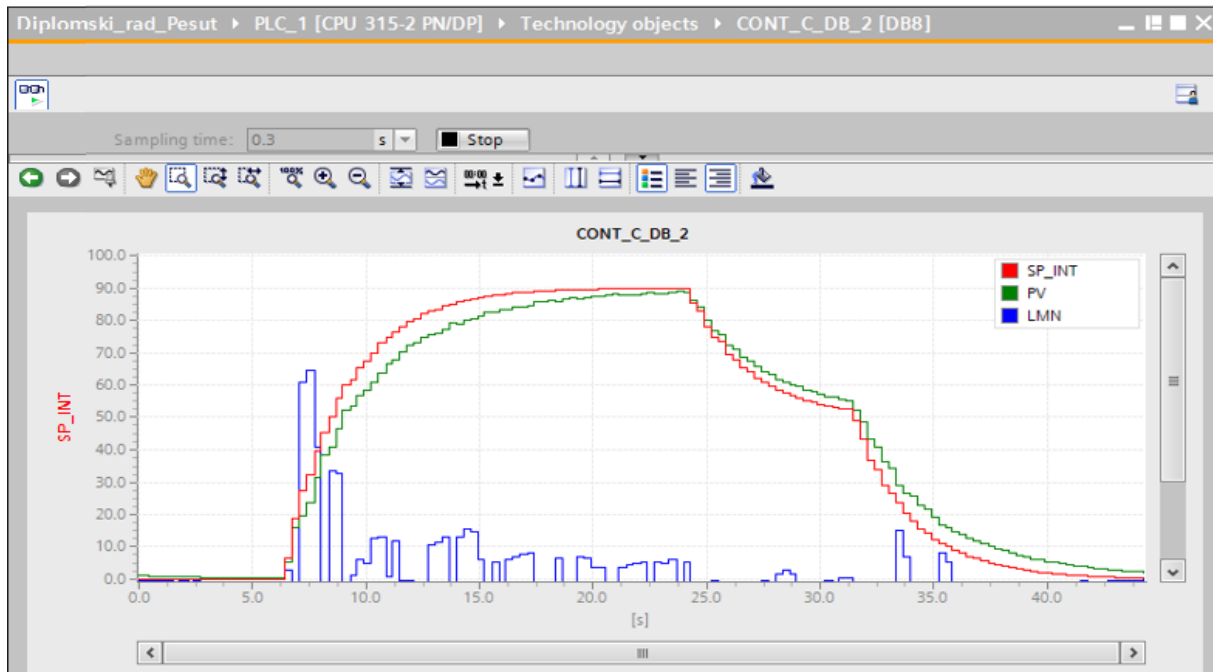
Polu-automatski način rada funkcionira na način da operater treba odabrati željenu poziciju hidrauličkog cilindra, a ostatak napravi PID regulator. Zbog sigurnosti i provjere grešaka u upravljačkom algoritmu napravljena je simulacija pomoću programskog alata *S7 PLCSIM* i sučelja čovjek-stroj. Veličine koje su praćene tijekom simulacije polu-automatskog načina rada su: trenutna pozicija cilindra, odstupanje trenutne pozicije cilindra od željene pozicije i odstupanje pozicije tri hidraulička cilindra od prvoga.

Rezultati simulacije su praćeni pomoću djela sučelja čovjek-stroj i grafičkog prikaza koji se nalazi u funkciji *CONT_C* koja služi kao PID regulator. Grafički prikaz za *master* hidraulički cilindar koji se nalazi u funkciji *CONT_C* prikazan je na slici 4.4., a dio sučelja čovjek-stroj je prikazan na slici 4.3. Slika 4.5. prikazuje grafički prikaz *slave* hidrauličkog cilindra koji se nalazi u funkciji *CONT_C*.



Slika 4.4. Grafički prikaz *master* cilindra unutar funkcije *CONT_C*.

Na slikama 4.4. i 4.5. linija označena crvenom bojom predstavlja željenu poziciju cilindra koja ulazi u PID regulator, linija označena zelenom bojom predstavlja trenutnu poziciju hidrauličkog cilindra, a linija označena plavom bojom predstavlja otvorenost servo-ventila hidrauličkog cilindra.



Slika 4.5 Grafički prikaz *slave* cilindra unutar funkcije CONT_C.

Iz slike 4.4. jasno je vidljivo da unosom željene pozicije hidraulički cilindar odmah ide na upisanu vrijednost, dok na slici 4.5. željene vrijednost pozicije raste sve dok ne dođe do upisane vrijednosti. Razlog toga je što je na slici 4.4. prikazan *master* hidraulički cilindar dok je na slici 4.5. prikazan *slave* cilindar kojemu se za željenu poziciju u PID regulator daje trenutna pozicija *master*-a. Grafički prikaz ostala dva *slave* cilindra imaju gotovo identične krivulje kao i *slave* prikazan na slici 4.5.

Prva željena pozicija bila je 90 mm u kojoj je sustav bio 17,5 s dok je PID regulatoru bilo potrebno 12,5 s da dovede trenutnu poziciju cilindra do željene vrijednosti. Nakon 22,5 s željene pozicija je promijenjena na 50 mm koja je u sustavu bila 7,5 s, a PID regulator nije stigao postaviti trenutnu poziciju cilindra u željenu poziciju. U 30-toj sekundi željena pozicija je promijenjena na 0 mm odnosno potrebno je da se hidraulički cilindar vrati u početni položaj. PID regulatoru za spuštanje hidrauličkog cilindra u početnu poziciju bilo je potrebno 12 s.

Rezultati koji su dobiveni simulacijom polu-automatskog načina rada su pokazivali veliku neusklađenost, odnosno kašnjenje, *slave* cilindra za *master*-om, a razlog su bili loše

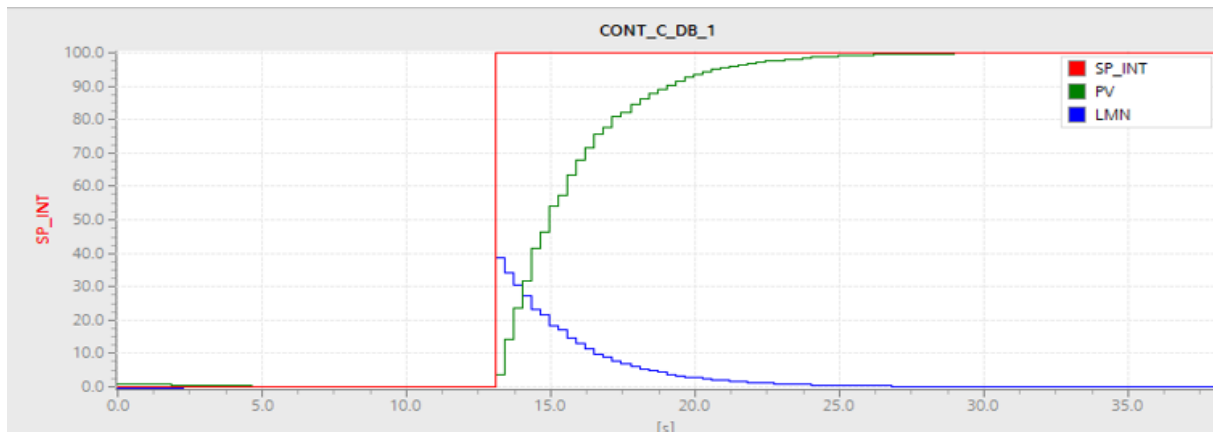
podešeni parametri PID regulatora. Nakon podešavanja parametara PID regulatora sustav nije imao velika odstupanja između *slave* cilindra i *master*-a.

4.4. Podešavanje parametara PID regulatora

PID regulator se korišten je u polu-automatskom i automatskom načinu rada za podizanje ili spuštanje hidrauličkog cilindra do željene pozicije. Kako bi hidraulički cilindar postigao željenu poziciju i održavao istu bilo je potrebno namjestiti parametre regulatora koji označeni plavom bojom na slici 3.4. Derivacijski dio se ne koristi zbog naglih promjena koje može prouzročiti, zato se koriste samo proporcionalni i integralni dio.

Podešavanje parametara PID regulatora obavljeno je tijekom simulacije polu-automatskog načina rada zbog njegove jednostavnosti te kako bi se moglo vidjeti što PID regulator radi. U slučaju da postoje velika odstupanja od željene pozicije hidrauličkog cilindra potrebno je smanjiti ili povećati parametre regulatora.

Kroz nekoliko testiranja, postignuti su željeni rezultati i PID regulator je dobro podesio pozicije hidrauličkih cilindra, bez preskoka preko željene pozicije. Vrijednost pojačanja proporcionalnog djelovanja K_p za *master* hidraulički cilindar iznosi 2, a vremenska konstanta integracija T_i iznosi 5 ms. Vrijednost pojačanja proporcionalnog djelovanja K_p za *slave* hidrauličke cilindre iznosi 7, a vremenska konstanta integracija T_i iznosi 5 ms. Vrijednosti parametara PID regulatora za *master* i *slave* hidrauličke cilindre razlikuju se iz razloga što je *master* bio znatno brži od *slave*-ova i na ovaj način su *slave*-ovi ubrzani kako bi sustigli *master*-a te se na taj način smanjila neusklađenost cilindra. Slika 4.6. prikazuje grafički prikaz rada podešenog PID regulatora, gdje linija označena crvenom bojom predstavlja željenu poziciju cilindra koja ulazi u PID regulator, linija označena zelenom bojom predstavlja trenutnu poziciju hidrauličkog cilindra, a linija označena plavom bojom predstavlja otvorenost servo-ventila hidrauličkog cilindra.

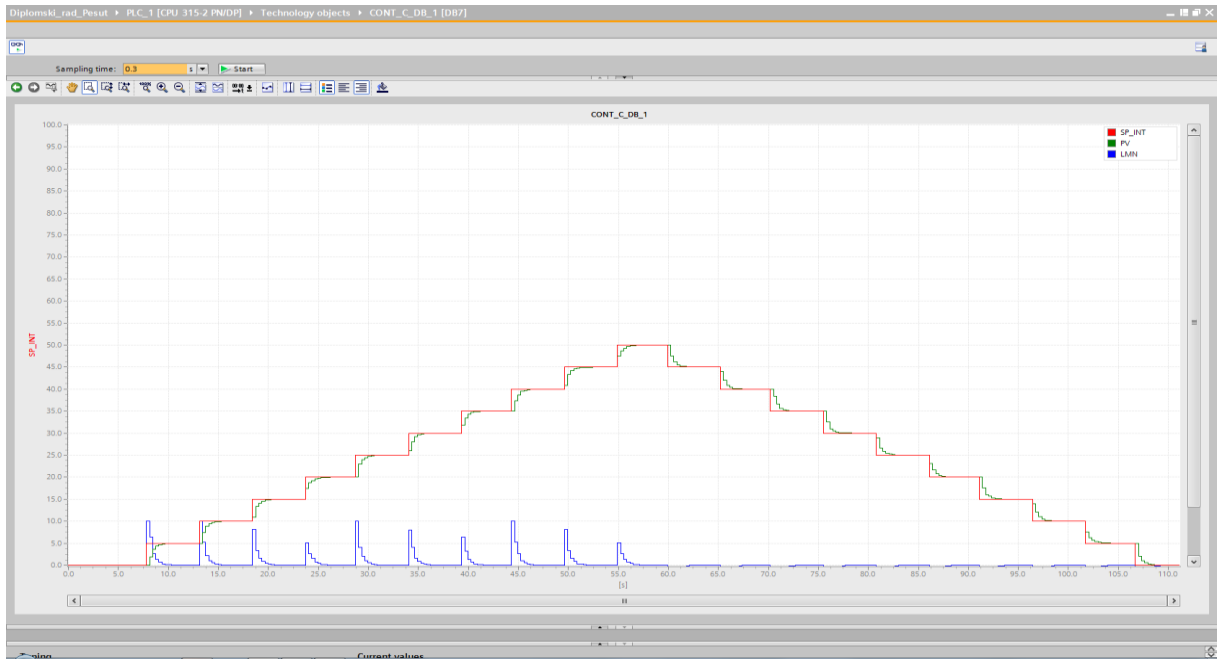


Slika 4.6. Namještanje pozicije cilindra pomoću PID regulatora.

4.5. Rezultati simulacije automatskog načina rada

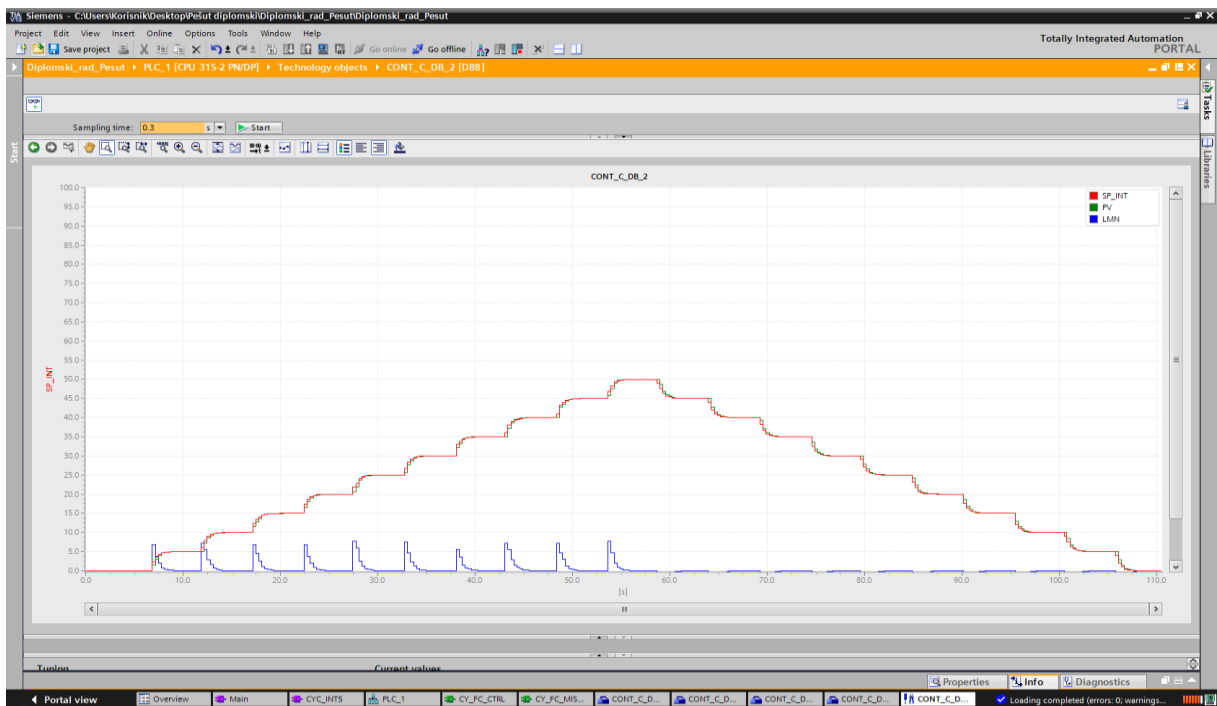
Automatski način rada funkcionira na način da operater odabere željenu poziciju, vrijednost koraka, vrijeme koraka i zatim upravljački algoritam postupno podiže hidraulički cilindar po koracima do željene pozicije, a kada dođe u željenu poziciju promjeni smjer kretanja cilindra i spušta ga do početnog položaja. Proces se kontinuirano ponavlja sve dok ga operater ne zaustavi. U ovom načinu rada ima veliki broj ograničenja koja su se morala postaviti u upravljačkom algoritmu i zbog toga je bilo bitno provesti simulaciju kako bi se ona provjerila.

Simulacija automatskog načina rada napravljena je pomoću programskog alata S7 PLCSIM i sučelja čovjek-stroj. Veličine koje su praćene tijekom simulacije su: trenutna pozicija cilindra, odstupanje trenutne pozicije cilindra od željene pozicije i odstupanje pozicije tri hidraulička cilindra od jednoga. Veličine su praćene pomoću dijela sučelja čovjek-stroj i grafičkog prikaza koji se nalazi u funkciji CONT_C. Grafički prikaz automatskog načina rada za *master* PID regulator nalazi se na slici 4.7.



Slika 4.7. Grafički prikaz automatskog načina rada za *master* PID regulator.

Iz slike 4.7. može se jasno vidjeti da je željena pozicija iznosila 50 mm, korak hidrauličkog cilindra iznosi 5 mm, a vrijeme jednog koraka je 5000 ms, odnosno 5 s. Sustavu je bilo potrebno 50 s kako bi došao u željenu poziciju, a kada dođe u željenu poziciju kreće se spuštati u početni položaj. Slika 4.8. prikazuje grafički prikaz automatskog načina rada za *slave* PID regulator.



Slika 4.8 Grafički prikaz automatskog načina rada za *master* PID regulator.

Parametri PID regulatora su ranije podešeni tijekom simulacije polu-automatskog načina rada, ali simulacija je obavljena zbog provjere rada upravljačkog algoritma. Kroz simulaciju automatskog načina rada utvrđeno je da upravljački algoritam nema grešaka te da se može implementirati u postrojenje.

5. ZAKLJUČAK

Cilj ovoga diplomskog rada bio je izrada upravljačkog algoritma i sučelja čovjek-stroj pomoću kojih će se upravljati vertikalnim pomakom razdjelnika u procesu kontinuiranog lijevanja čelika. Izrada upravljačkog algoritma moguća je na mnogo načina, ali odabrana je metoda *master-slave* koja se pokazala vrlo efikasnom. Izrađeno je sučelje čovjek-stroj čija je svrha praćenje procesa vertikalnog pomaka razdjelnika i davanje naredbi istome. Upravljački algoritam i sučelje čovjek-stroj napravljeni su u programskom paketu *Tia portal*.

Rezultati simulacija obavljenih pomoću programskog alata *S7 PLCSIM* i sučelja čovjek-stroj, pokazali su da uz malu promjenu parametara PI regulatora može doći do velikih promjena prilikom pomaka hidrauličkih cilindara. Kroz simulacije procesa pokazalo se da sustavu više odgovara manje proporcionalno pojačanje, ali ne premalo kako sustav ne bi postao trom. Iako je upravljački algoritam uspješno napravljen i obavlja svoju svrhu kojoj je namijenjen, uvijek se može unaprijediti kako bi što efikasnije obavljao svoj posao.

Usporedbom simulacija različitih načina rada upravljačkog procesa došlo se do zaključka da svaki način ima svoju ulogu. Ručni način rada je dobar ako je potrebna brza promjena pozicije hidrauličkog cilindra, dok je polu-automatski način korisniji ako su potrebne precizne promjene pozicije hidrauličkog cilindra koje omogućava PI regulator. Automatski način rada koristan je jer konstantno pomiče razdjelnik i stalno mijenja površinu oštećenja stjenke uranjajućeg izljevnika.

Kroz simulaciju procesa pokazana je njegova svrha i efikasnost i zbog toga smatram da će se ovakav tip upravljačkog algoritma koristiti u većini procesa kontinuiranog lijevanja čelika u skorijoj budućnosti.

LITERATURA

- [1] Z. Glavaš, A. Štrkalj, Sekundarna metalurgija i kontinuirano lijevanje, Sveučilište u Zagrebu, Sisak 2015.
- [2] Wikipedia, https://en.wikipedia.org/wiki/Semi_finished_casting_products, 15.04.2022.
- [3] J. Petrić, udžbenik Hidraulika i pneumatika, 1. dio, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 2012.
- [4] D. Filko, T. Keser, D. Slišković, Industrijska automatizacija, priručnik za laboratorijske vježbe, Osijek 2019.
- [5] N. Perić, Automatsko upravljanje, Zagreb 2004
- [6] Wikipedija, [https://hr.wikipedia.org/wiki/PLC_\(ra%C4%8Dunalo\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/PLC_(ra%C4%8Dunalo)), 05.05.2022.
- [7] R. Sabljo, diplomski rad, Modeliranje odlijeva čelika u procesu kontinuiranog lijevanja, Osijek 2019.
- [8] J. Petrić, udžbenik Automatska regulacija: uvod u analizu i sintezu, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb 2012.
- [9] M. Čulina, diplomski rad, Određivanje parametara PID regulatora za vođenje temperature u šaržnom reaktoru na temelju podataka simuliranog testa na skok, Split 2020.

SAŽETAK

Cilj ovoga diplomskog rada je izrada upravljačkog algoritma i sučelja čovjek-stroj koji će služiti za vertikalni pomak razdjelnika u procesu kontinuiranog lijevanja čelika. Potrebno je proces vertikalnog pomaka razdjelnika i rezultate simulacije prikazati u sučelju čovjek-stroj. U svrhu poboljšanja simulacije potrebno je izraditi funkciju koja dodaje poremećaj u sustav i stvara realan pomak hidrauličkih cilindara. Upravljački algoritam je napravljen po metodi *master-slave*, a korišteni su PID regulatori za izvedbu istoga. Sučelje čovjek-stroj napravljeno je što jednostavnije kako bi bilo koji operater mogao raditi na njemu. Upravljački algoritam i sučelje čovjek-stroj napravljeni su u programskom paketu *Tia portal* i namijenjeni su za korištenje na PLC uređaju.

Ključne riječi: kontinuirao lijevanje čelika, razdjelnik, PID regulator, upravljački algoritam

Control of vertical shift of a tundish in the process of continuous steel casting

ABSTRACT

The goal of graduate thesis is development of a control algorithm and a human-machine interface that will serve for the vertical displacement of the tundish in the process of continuous casting of steel. It is necessary to simulate the process of vertical displacement of the tundish and display the simulation results in the human-machine interface. In order to improve the simulation, it is necessary to create a function that adds disturbance to the system and creates a realistic displacement of the hydraulic cylinders. The control algorithm and a human-machine interface are made in the Tia portal software package and are intended for use on a PLC device. The control algorithm was made with the master-slave method, and PID controllers were used to design it. The human-machine interface is made as simple as possible so that any operator can work on it.

Key words: continuous steel casting, tundish, PID controller, control algorithm

ŽIVOTOPIS

Josip Pešut rođen je 05.06.1997. u Đakovu, Hrvatska. Osnovnu školu „I. G. Kovačić“ završio je u Đakovu te nakon čega upisuje Gimnaziju „A.G. Matoš“ u Đakovu. Srednju školu završava 2016. i iste godine upisuje preddiplomski studij na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer elektroenergetika. Preddiplomski studij završava 2020. i iste godine upisuje diplomski studije na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer održiva elektroenergetika. Član je mladih gradskog društva Crvenog križa Đakovo sedam godina.

PRILOZI

P.1. Projekt u programskom paketu *Tia portal*

Nalazi se na CD-u.