

# Simulator sustava upravljanja vođilicom za regulaciju napetosti trake u toplom valjanju

---

Lazor, Denis

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*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:200:402471>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-11-05**

*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**

**SIMULATOR SUSTAVA UPRAVLJANJA**  
**VODILICOM ZA REGULACIJU NAPETOSTI**  
**TRAKE U TOPLOM VALJANJU**

**Diplomski rad**

**Denis Lazor**

**Osijek, 2021.**

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 1.1. Zadatak .....                                   | 1  |
| 2. PROCES TOPLOG VALJANJA .....                      | 2  |
| 2.1. Postrojenje za proizvodnju i obradu čelika..... | 2  |
| 2.1.1. Pogon za toplo valjanje.....                  | 3  |
| 2.2. Automatsko upravljanje procesom .....           | 5  |
| 2.2.1 Upravljanje vodilicom .....                    | 6  |
| 2.2.2. Regulacija napetosti trake.....               | 9  |
| 2.3. Dinamički model procesa .....                   | 11 |
| 3. PROGRAMSKA PODRŠKA.....                           | 14 |
| 3.1. Sklopovska konfiguracija .....                  | 16 |
| 3.2. Simulacija.....                                 | 16 |
| 3.3. Upravljački algoritam.....                      | 18 |
| 3.3.1. Kalibracija .....                             | 21 |
| 3.3.2. Ručni način rada .....                        | 23 |
| 3.3.3. Automatski način rada .....                   | 25 |
| 3.3.4. Opća uzbuna .....                             | 26 |
| 3.4. Sučelje čovjek-stroj .....                      | 26 |
| 3.5. Tijek programske podrške .....                  | 28 |
| 3.6. Testiranje .....                                | 30 |
| 4. ZAKLJUČAK.....                                    | 38 |
| LITERATURA .....                                     | 39 |
| SAŽETAK.....   | 40 |
| ABSTRACT .....                                       | 41 |
| ŽIVOTOPIS .....                                      | 42 |
| PRILOZI.....   | 43 |
| P.1. Hidraulička shema upravljanja cilindrom .....   | 43 |
| P.2. Dopunske jednadžbe.....                         | 44 |
| P.3. Projekt u Tia Portal-u .....                    | 45 |

# 1. UVOD

Odabir teme diplomskog rada proveden je u suradnji s osječkim uredom tvrtke Danieli Systec sa sjedištem u Labinu. Korištenje vodilice u svrhu smanjenja varijacija u vrijednosti napetosti trake u procesu toplog valjanja značajno pridonosi kvaliteti proizvoda. Izrada programske podrške za upravljanje zahtjeva višestruka testiranja pri kojima se proces mora puštati u pogon čime nastaju financijski gubici. Korištenje simulatora koji dobro predstavlja proces za koji se izrađuje programska podrška smanjuje troškove i vrijeme puštanja pogona u rad.

Cilj diplomskog rada je izraditi programsku podršku koja će se sastojati od simulacije procesa toplog valjanja, algoritma za upravljanje vodicom te grafičkog korisničkog sučelja na tako da se ista može implementirati na programibilni logički kontroler. Za izradu zadatka korišten je Tia Portal programski paket.

Drugo poglavlje sadrži opis postrojenja i pogona, detaljan opis procesa te matematički model procesa. U trećem poglavlju prikazan je detaljan slijed izrade programske podrške za simulator uključujući i testiranje iste.

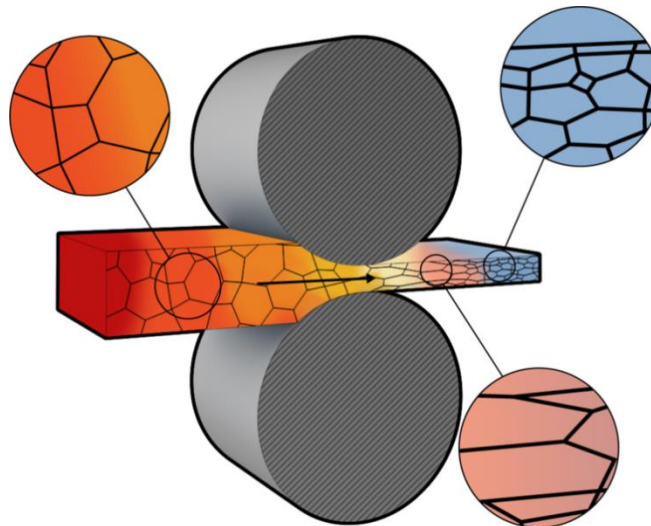
## 1.1. Zadatak

Potrebno je izraditi simulator sustava upravljanja vodicom za regulaciju napetosti trake u toplom valjanju. Sustav se sastoji od jednog cilindra i jednog servo ventila, te je opremljen mjeračima tlaka i mjeračem pozicije cilindra. Vodilica za regulaciju napetosti se nalazi između dva valjaonička stana. Upravljački algoritam treba osigurati regulaciju napetosti trake. Potrebno je izraditi simulator koji će simulirati vrijednosti na mjeračima tlaka i mjernim ćelijama na temelju definiranih uvjeta valjanja. Uz to, potrebno je izraditi automatsku sekvencu za kalibraciju vodilice. Osim programskog rješenja za simulator potrebno je izraditi pripadno korisničko sučelje s vizualizacijom stanja procesa.

## 2. PROCES TOPLOG VALJANJA

Toplo valjanje (engl. *Hot rolling*) je metalurški postupak oblikovanja metala u toplom stanju gdje se propuštanjem između okrećućih valjaka smanjuje njegova debljina i daje željeni oblik. Zagrijanom metalu je lakše mijenjati oblik i debljinu. Postupak toplog valjanja se najčešće primjenjuje nad čelikom pri čemu se čelik zagrijava do 926 °C. Čelik se nakon provedenog postupka toplog valjanja hladi, što može uzrokovati promjenu željenog završnog oblika. Toplo valjanje se najčešće koristi u slučajevima gdje preciznost završnog oblika nije od prevelike važnosti[1].

Proces oblikovanja metala se izvodi pomoću okrećućih valjaka između kojih prolazi zagrijani metal (Sl.2.1.)



Sl 2.1. Proces oblikovanja metala[2].

### 2.1. Postrojenje za proizvodnju i obradu čelika

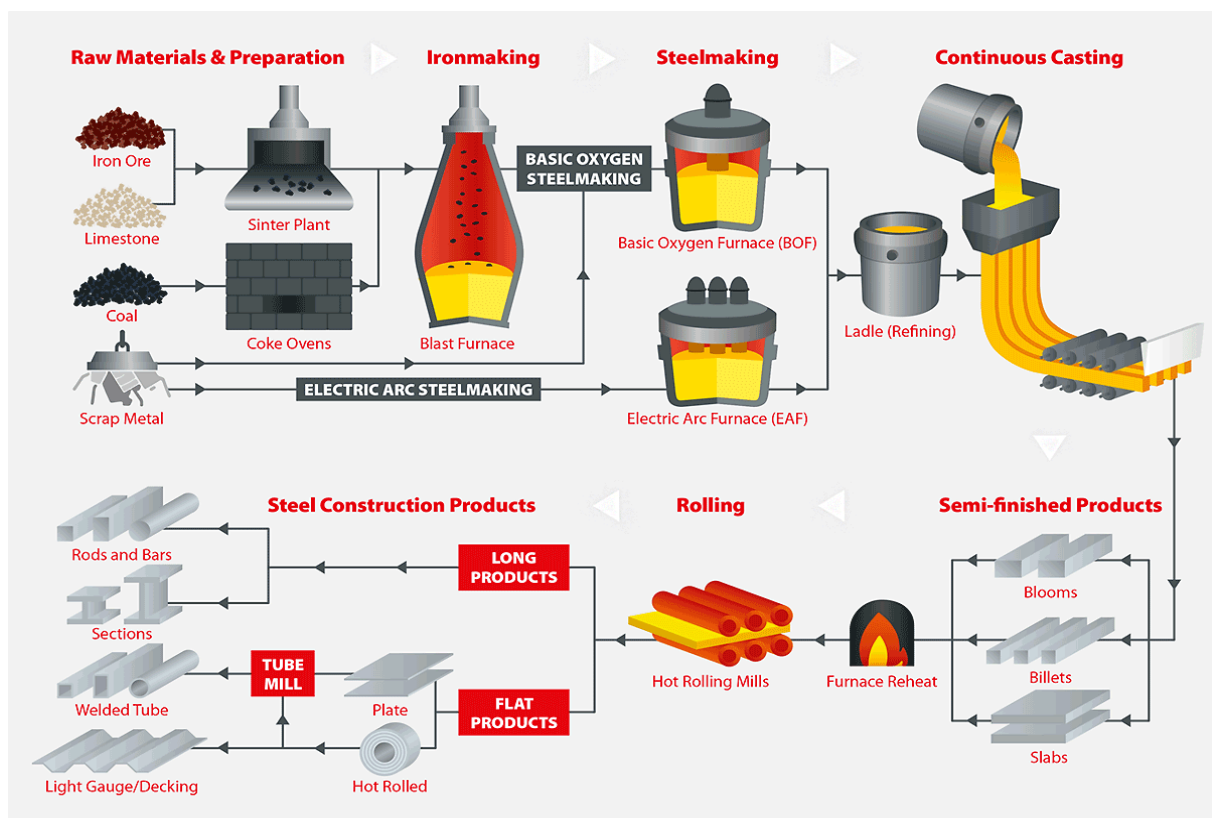
Proces proizvodnje i obrade čelika se načelno može podijeliti u 5 koraka:

- 1) Izrada željeza,
- 2) Izrada čelika,
- 3) Lijevanje čelika,
- 4) Primarno oblikovanje čelika,
- 5) Sekundarno oblikovanje čelika.

Pri izradi željeza željezna ruda, koks i vapno se tope u visokoj peći te stvaraju rastaljeno željezo. Rastaljeno željezo sadrži razne nečistoće koje se uklanjaju pri izradi čelika

Postoje dvije glavne metode izrade čelika. Osnovna proizvodnja kisikovog čelika(engl. *Basic Oxygen Steelmaking*) uključuje dodavanje reciklažnog željeza rastaljenom u peći pri čemu se kisik prisilno tjera kroz novonastalu tekućinu te tako snižava postotak prisutnih nečistoća na 0.5 do 1.5, posto dok se kod metode elektrolučne peći (engl. *Electric Ark Furnaces*) ta ista mješavina zagrijava u elektrolučnoj peći do 1650 °C pri čemu nastaje visokokvalitetni čelik. Nakon izrade čelika isti se lijeva u hladne kalupe. Pri lijevanju u kalupe čelik se naglo hladi te se zatim reže u željene oblike čime nastaju polugotovi proizvodi.

Tijekom primarnog oblikovanja polugotovi proizvodi se formiraju u razne oblike, najčešće koristeći postupak toplog valjanja.Usavršavanje oblika i karakteristika novonastalih proizvoda se izvodi tijekom sekundarnog oblikovanja čelika. Sekundarno oblikovanje čelika uključuje oblikovanje, spajanje, obradu površine, toplinsku obradu i premazivanje. Grafički prikaz opisanog procesa se nalazi na slici 2.2.[3].



Sl. 2.2. Proces proizvodnje i obrade čelika[4].

### 2.1.1. Pogon za toplo valjanje

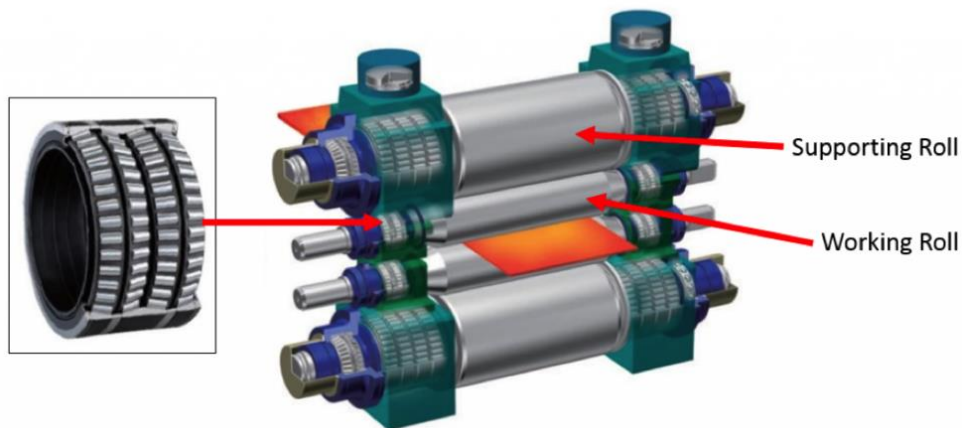
Pogon za toplo valjanje (Sl.2.3.) se nalazi u završnom dijelu postrojenja za proizvodnju i

obradu čelika. U ovom dijelu postrojenja se odvija primarno oblikovanje čelika.



Sl. 2.3. Pogon za toplo valjanje[5].

Pogon se sastoji od postolja gdje se svako postolje sastoji od kućišta i vertikalnog sklopa kojeg čine dva radna i dva pomoćna valjka (Sl.2.4.).



Sl. 2.4. Radni i pomoćni valjci[6].

Prolaskom kroz valjke, koristeći razmak između radnih valjaka, regulira se debljina čelika. Na svakom sljedećem postolju razmak između valjaka je sve manji, čime se i debljina čelika sve više smanjuje. Razmak radnih valjaka na zadnjem postolju određuje konačnu debljinu čelične trake.

Kako bi proces toplog valjanja bio uspješan, čelična traka mora biti pod konstantnom napetošću, a u tu svrhu koristi se vodilica. Vodilica (Sl.2.5.) se nalazi između dva susjedna postolja. Promjenom kuta vodilice, pri čemu je vodilica u kontaktu s materijalom, provodi se

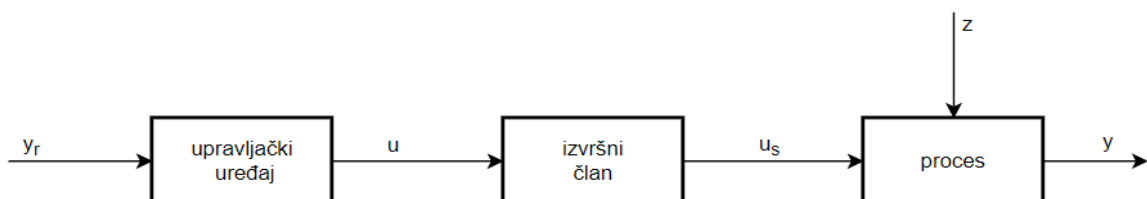
regulacija napetosti trake.



Sl. 2.5. Vodicica u radu[7].

## 2.2. Automatsko upravljanje procesom

Automatsko upravljanje procesom predstavlja kontinuirani proces održavanja procesa u zadanom režimu rada. Postoje dvije vrste sustava za automatsko upravljanje procesom, a to su sustav upravljanja u otvorenoj petlji i sustav upravljanja u zatvorenoj petlji.



Sl. 2.6. Otvorena petlja.

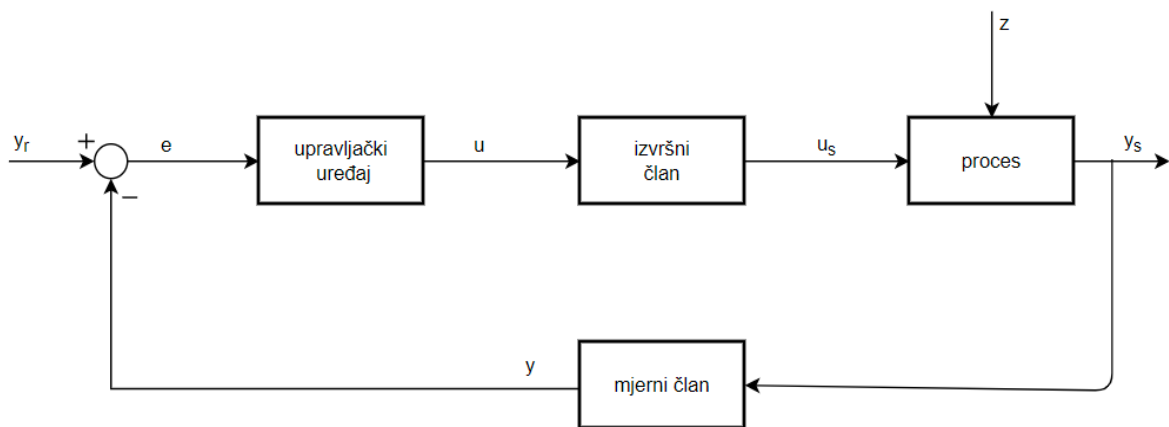
Na slici 2.6. je prikazana načelna shema upravljanja u otvorenoj petlji, gdje je:  $y_r$  - referentna veličina,  $u$  - upravljačka veličina,  $u_s$  - izvršna veličina,  $y$  - upravljana veličina, a  $z$  - smetnja.

Otvorena petlja ne sadrži povratnu vezu već se rad ovakvog sustava u potpunosti zasniva na slijedenju referentne veličine. Pri tomu se referentna veličina obično daje kao sekvenca koju sustav povremeno ili stalno izvršava. Ovaj sustav je brz i stabilan te je njegova izvedba relativno



jednostavna, ali njegova točnost uvelike ovisi o kalibraciji te nije otporan na vanjske smetnje.

Za razliku od sustava upravljanja u otvorenoj petlji, kod sustava upravljanja u zatvorenoj petlji (Sl.2.7.) koristi se povratna veza koja mora imati mjerni član koji daje informaciju o trenutnom iznosu upravljane veličine, što omogućuje kontinuiranu prilagodbu upravljačke veličine tijekom rada sustava. Korekcija upravljačke veličine tijekom rada sustava provodi se na temelju regulacijskog odstupanja koje predstavlja razliku između referentne i mjerene vrijednosti upravljane veličine. Budući da sustav upravljanja kontinuirano raspolaže informacijom o reguliranoj veličini, ovaj sustav ima mogućnost kompenzacije utjecaja poremećaja.

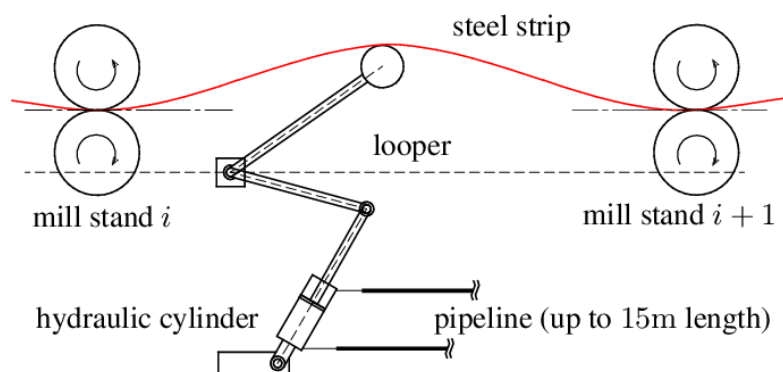


Sl. 2.7. Zatvorena petlja

Ovakav sustav je točniji od sustava upravljanja u otvorenoj petlji i otporan je na smetnje, ali je sporiji i složeniji za izvesti.

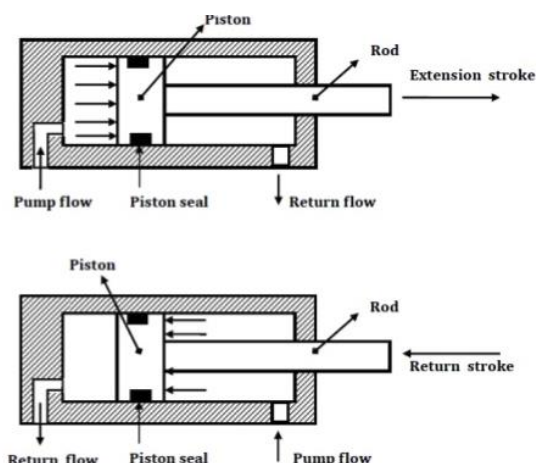
### 2.2.1 Upravljanje vodicom

Sustav upravljanja vodicom (Sl.2.8.) se sastoji od hidrauličkog cilindra(engl. *Hydraulic cylinder*), sustava poluga i vodilice(engl. *Looper*). Na slici su također prikazana postolja(engl. *Mill stand*), čelična traka(engl. *Steel strip*) te cjevovodi(engl. *Pipeline*)



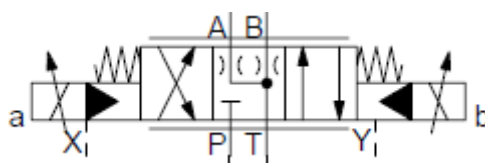
Sl. 2.8. Sustav upravljanja vodicom[8].

Dvoradni hidraulički cilindar se sastoji od dvije komore, klipa (engl. *Piston*) i klipnjače (engl. *Rod*) (Sl.2.9.). Svaka komora je preko cjevovoda spojena na ventil. Utiskivanje ulja u donju komoru pomoću servo ventila uzrokuje povećanje tlaka u toj komori. Posljedica toga je podizanje klipa zajedno sa klipnjačom. Obrnuti proces uzrokuje pomak klipa s klipnjačom prema dolje. Tlak u gornjoj komori se u ovom slučaju održava pomoću ventila za regulaciju tlaka.



Sl. 2.9. Dvoradni hidraulički cilindar[9].

Postoji više izvedbi servo ventila, a u ovom slučaju je to servo ventil s tri pozicije i dva priključka.



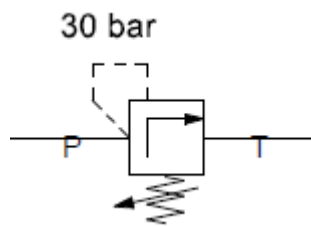
Sl. 2.10. Simbol servo ventila.

Na slici 2.10. se nalazi simbol navedenog servo ventila. Priključak 'A' je u ovom slučaju

blokiran i ne koristi se. U neutralnoj poziciji nema nikakvog protoka unutar ventila. Ako se kalem unutar ventila pomakne u desno tada se priključak 'B' spaja na tlačni vod čime propušta tekućinu prema cilindru, a ako se pomakne u lijevo tada se priključak 'B' spaja na vod prema spremniku, čime se tekućina propušta iz cilindra prema tom spremniku.

Stanje servo ventila se može predstaviti pomoću postotka, gdje negativne vrijednosti predstavljaju takvo stanje ventila gdje se tekućina vraća nazad u spremnik, a pozitivne vrijednosti predstavljaju slučaj kada se tekućina iz spremnika propušta dalje. Te vrijednosti se najčešće izražavaju u postocima od -100 do 100 posto, gdje 0 predstavlja stanje u kojem nema protoka tekućine ni u jednom smjeru.

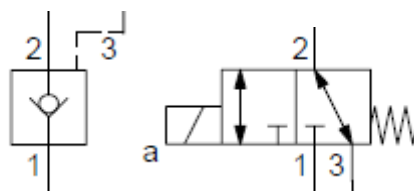
Ventil za regulaciju tlaka se ručno namješta na željenu vrijednost koja se automatski održava. Simbol ventila namještenog na 30 bara je prikazan na slici 2.11.



**Sl. 2.11.** Simbol ventila za regulaciju tlaka.

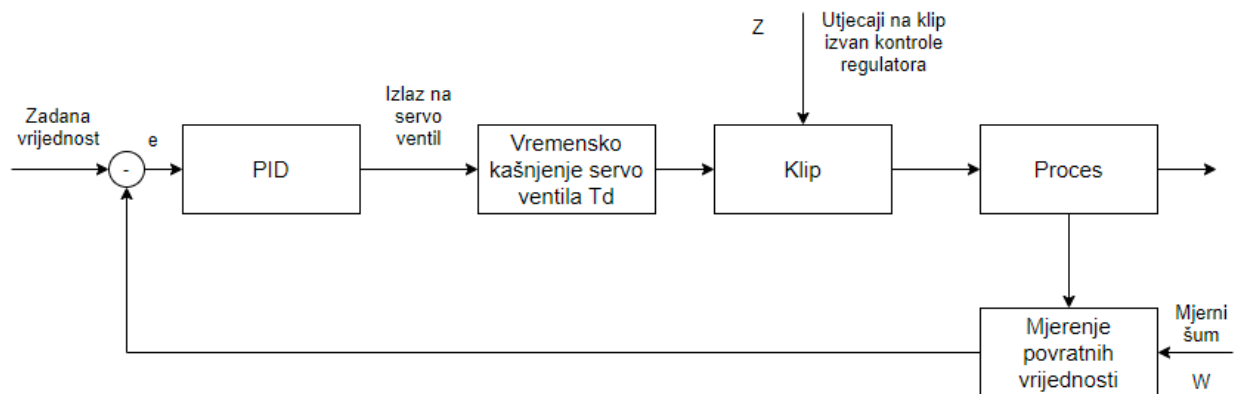
Osim ventila koji se koriste u svrhu upravljanja procesom postoje i sigurnosni ventili. Jedan od tih ventila je ventil koji sprječava protok tekućine kroz cjevovode koristeći neki od mehanizma zaključavanja. Kada se na ulazu ventila pojavi pozitivan signal tada ventil omogućava danji protok tekućine kroz cjevovode. U ovom slučaju sprječava dovod i odvod ulja u i iz cilindra. Time se cilindar nalazi u nepomičnom stanju.

Simboli koji se koriste za ovakav sustav prikazani su na slici 2.12.



**Sl. 2.12.** Simboli sustava za blokiranje protoka.

Upravljanje vodilicom se svodi na regulaciju pozicije klipa unutar cilindra koristeći servo ventil. Regulator tvori upravljačku veličinu na koju ventil reagira s određenim vremenom kašnjenja, tako da propušta ulje u cilindar ili ga iz cilindra vraća u spremnik, čime uzrokuje promjenu položaja klipa unutar cilindra. Promjenom položaja klipa koji je pod utjecajem smetnji se preko sustava poluga upravlja kutom vodilice. U sustavu postoje dva mjerna člana, a to su senzor pozicije cilindra i senzori tlaka u komorama cilindra. Na slici 2.13. je prikazan osnovni regulacijski krug upravljanja vodilicom.



Sl. 2.13 Regulacijski krug upravljanja vodilicom.

## 2.2.2. Regulacija napetosti trake

Regulacija napetosti trake je način upravljanja vodilicom u kojem je napetost trake upravljana veličina. Ne postoji mjerni član za mjerenje napetosti već se napetost mora estimirati iz veličina koje se mogu mjeriti.

Kada je vodilica u kontaktu s trakom na cilindar djeluju različite sile. Jedna od tih je sila uzrokovana napetošću trake, a budući da se sila koja djeluje na cilindar može izračunati iz tlaka u komorama koji se može izravno mjeriti pomoć senzora, u svrhu regulacije napetosti trake koristi se informacija o ukupnoj sili koja djeluje na cilindar.

Sila dobivena iz tlakova u komorama cilindra se pretvara u moment sile koji djeluje na bazu vodilice prema izrazu:

$$C_{pt} = F_c * \cos \omega * BC - C_{la}, \quad (2 - 1)$$

gdje je:

$C_{pt}$  – moment sile na bazi vodilice [Nm],

$F_c$  – ukupna sila na cilindru [N],

$\omega$  – kut djelovanja cilindra na polugu spojenu na bazu vodilice [rad],

$BC$  – duljina poluge vodilice [m],

$C_{la}$  – moment sile uzrokovan težinom vodilice [Nm].

Osim momenta sile koji je uzrokovan težinom vodilice, na sustav utječu i moment sile uzrokovan težinom trake te moment sile uzrokovan savijanjem trake. Oba momenta ne pridonose napetosti trake pa ih je potrebno oduzeti od trenutnog momenta  $C_{pt}$ .

Moment sile uzrokovan težinom trake se računa prema sljedećem izrazu:

$$C_w = g * w * h * \rho * (l_1 + l_2) * l_a * \cos \theta * fraction, \quad (2 - 2)$$

gdje je:

$g$  – ubrzanje gravitacije [ $m/s^2$ ],

$w$  – širina materijala [m],

$h$  – debljina materijala [m],

$\rho$  – gustoća materijala [ $kg/m^3$ ],

$l_1$  – duljina trake od prethodnog postolja do mjesta kontakta vodilice i trake [m],

$l_2$  – duljina trake od mjesta kontakta vodilice i trake do sljedećeg postolja [m],

$l_a$  – duljina poluge vodilice [m],

$\theta$  – kut vodilice [rad],

*fraction* – postotak težine trake koji se osjeti na vodilici.

Duljine trake do prethodnog i sljedećeg postolja se računaju prema sljedećim izrazima:

$$l_1 = \sqrt{(r - y + l_a * \sin \theta)^2 + (L - (a + l_a * \cos \theta))^2}, \quad (2 - 3)$$

$$l_2 = \sqrt{(r - y + l_a * \sin \theta)^2 + (a + l_a * \cos \theta)^2}, \quad (2 - 4)$$

gdje je:

$r$  – polumjer koluta vodilice [m],

$y$  – vertikalna udaljenost baze vodilice od teoretske prolazne linije [m],

$L$  – udaljenost između postolja [m],

$a$  – vodoravna udaljenost baze vodilice od prethodnog postolja [m].

Moment sile potreban kako bi se traka savila računa se prema sljedećem izrazu:

$$C_b = l_a * \cos \theta * BendingTorque * \left( \frac{1}{l_1} + \frac{1}{l_2} \right) * 10^6, \quad (2 - 5)$$

gdje *BendingTorque* predstavlja moment savijanja materijala koji ovisi o debljini i širini materijala te dopuštenom naprezanju materijala  $Y_S$  koji se mjeri u  $N/mm^2$ . *BendingTorque* se računa na sljedeći način:

$$BendingTorque = \frac{Y_S * h^2 * w}{4}. \quad (2 - 6)$$

Tada se se napetost trake  $F_t$  može dobiti oduzimanjem dobivenih momenta od ukupnog momenta koji djeluje na bazu vodilice prema sljedećem izrazu:

$$F_t = \frac{C_{pt} - C_b - C_w}{UnitTension}, \quad (2 - 7)$$

gdje se *UnitTension* koristi za pretvorbu momenta u napetost i računa se na sljedeći način:

$$UnitTension = \left( l_a * \cos \theta * (r - Y + l_a * \sin \theta) * \left( \frac{1}{l_1} - \frac{1}{l_2} \right) \right) + \left( l_a * \sin \theta * \left( \frac{L - a - l_a * \cos \theta}{l_2} - \frac{a + l_a * \cos \theta}{l_1} \right) \right). \quad (2 - 8)$$

Jednadžbe prikazane u ovom potpoglavlju su preuzete iz funkcionalnog opisa pogona za toplo valjanje tvrtke Danieli Automation[11].

### 2.3. Dinamički model procesa

Dinamički model procesa upravljanja napetošću trake koristeći regulaciju sile prikazan je diferencijalnom jednadžbom:

$$\frac{dP_b(t)}{dt} = \frac{B}{V_b(t - T_d)} * \left[ Q(t - T_d) - A_b * \frac{dh}{dt}(t - T_d) \right]. \quad (2 - 9)$$

Tab. 2.1. Parametri dinamičkog modela upravljanja napetošću trake

|       |   |
|-------|---|
| $P_b$ | Tlak u donjoj komori [MPa]                                  |
| $B$   | Volumni modul elastičnosti [MPa]                            |
| $V_b$ | Volumen nestlačenog ulja u donjoj komori [mm <sup>3</sup> ] |
| $Q$   | Protok ulja servo ventila [mm <sup>3</sup> /s]              |
| $A_b$ | Površina klipa [mm <sup>2</sup> ]                           |
| $h$   | Položaj klipa unutar cilindra [mm]                          |
| $T_d$ | Mrtvo vrijeme [s]   |

Lijeva strana diferencijalne jednadžbe predstavlja promjenu tlaka koji djeluje na klip. Promjena tlaka koji djeluje na klip je razmjerna promjeni sile koja djeluje na cilindar, zato što je tlak u gornjoj komori konstantan što znači da nema promjene sile na klipnjači već promjena ukupne sile ovisi samo o sili koja djeluje na klip.

Desna strana diferencijalne jednadžbe predstavlja promjenu tlaka u donjoj komori u vremenskom trenutku  $t - T_d$  gdje  $T_d$  predstavlja vremensko kašnjenje reakcije izvršnog člana s obzirom na upravljačku veličinu.

Volumni modul elastičnosti  $B$  je promjenjiv s obzirom na volumen tekućine, ali su te promjene neznatne te se stoga ta veličina najčešće uzima kao konstanta. Volumen  $V_b$  je dobiven množenjem trenutnog položaja klipa  $h$  i površine klipa  $A_b$  (vidjeti Prilog P.2., jednadžba P-1).

Povećanje tlaka u donjoj komori je razmjerno količini stlačenog ulja, a smanjenje tlaka je razmjerno količini dekomprimiranog ulja. Promjenu volumena stlačenog i dekomprimiranog ulja predstavlja izraz u zagradi u izrazu (2-9).

Protok  $Q$  predstavlja protok unutar cilindra koji se može dobiti kao umnožak otvorenosti i maksimalnog protoka ventile te koji je negativan kada se ulje izvlači iz komore, a pozitivan kada se utiskuje (vidjeti Prilog P.2., jednadžba P-2). Drugi dio izraza predstavlja promjenu volumena ulja u donjoj komori koja je negativna ako se volumen ulja smanjio, a pozitivna ako se volumen ulja povećao (vidjeti Prilog P.2., jednadžba P-3).

Ako ne postoji kontakt vodilice i materijala tada je promjena sile na cilindru jednaka promjeni sile koju uzrokuje težina vodilice. Tražena sila se može izračunati iz momenta sile za određeni položaj vodilice. Momenti sile su dobiveni postupkom kalibracije. Tada je traženu silu moguće izračunati koristeći sljedeći izraz:

$$F_l = \frac{\tau_l (t - T_d)}{(BC * \omega(t - T_d))}, \quad (2 - 10)$$

gdje  $\tau_l$  predstavlja moment sile u njutn-metrima kojeg uzrokuje težina vodilice. Konstanta  $BC$  predstavlja duljinu poluge vodilice u metrima, a  $\omega$  predstavlja kut u ovisnosti o položaju klipa unutar cilindra.

Ako postoji kontakt vodilice s materijalom tada se ukupna sila koja djeluje na cilindar može izračunati prema sljedećem izrazu:

$$F_c = A_b * P_b - A_r * P_r, \quad (2 - 11)$$

gdje je:

$F_c$  – Ukupna sila na cilindru [N],

$A_b$  – Površina klipa [mm<sup>2</sup>],

$P_b$  – Tlak u donjoj komori [MPa],

$A_r$  – Površina klipnjače [mm<sup>2</sup>],

$P_r$  – Tlak u gornjoj komori [MPa].



### 3. PROGRAMSKA PODRŠKA

Programska podrška za simulaciju, vizualizaciju i upravljanje je napisana za sustav upravljanja koji je moguće realizirati koristeći PLC uređaje.

PLC (engl. *programmable logic controller*) je programirajući logički upravljač, tj. industrijsko računalo koje se sastoji od memorije, procesora, industrijskih ulaza i izlaza koji predstavljaju tipkala i sklopke, ili razne vrste pretvornika ili senzora [10]. Najčešće se upotrebljava u industriji za procesnu automatizaciju.

Program na PLC-u se izvodi ciklično te se može podijeliti u 3 faze:

- 1) Učitavanje vrijednosti s ulaza,
- 2) Izvršavanje programskog koda,
- 3) Pisanje vrijednosti varijabli na izlaze.

Vrijeme izvođenja jednog ciklusa mora biti malo zbog potrebnih velikih brzina reakcije sustava za upravljanje na promjene stanja unutar procesa te se zato to vrijeme mjeri u milisekundama.

Pisanje programskog koda je obavljeno koristeći programski alat Tia Portal. Tia Portal (engl. *Totally Integrated Automation Portal*) je programski paket razvijen od strane tvrtke Siemens AG koji integrira alate za izradu programske podrške u automatizaciji, izradu SCADA sustava i HMI sučelja u zajedničko razvojno okruženje. V16 verzija Tia Portala nudi razvoj programske podrške pomoću sljedećih programskih jezika:

- 1) LAD (engl. *Ladder diagram*),
- 2) FBD (engl. *Function block diagram*),
- 3) SCL (engl. *Structured control language*),
- 4) STL (engl. *Statement list*),
- 5) GRAPH .

Od spomenutih programskih jezika za izradu programske podrške korišteni su ljestvičasti dijagram (tzv. LAD), strukturirani upravljački jezik (tzv. SCL) te programski jezik za razvoj sekvencijalnih funkcija u obliku grafa (tzv. GRAPH) .

Ljestvičasti dijagram je jedan od najstarijih programskih jezika korištenih za izradu programske podrške prilagođene za PLC uređaje i automatizaciju procesa. Temelji se na relejnim shemama, a ime dolazi od izgleda programa koji podsjeća na ljestve jer se sastoji od horizontalnih

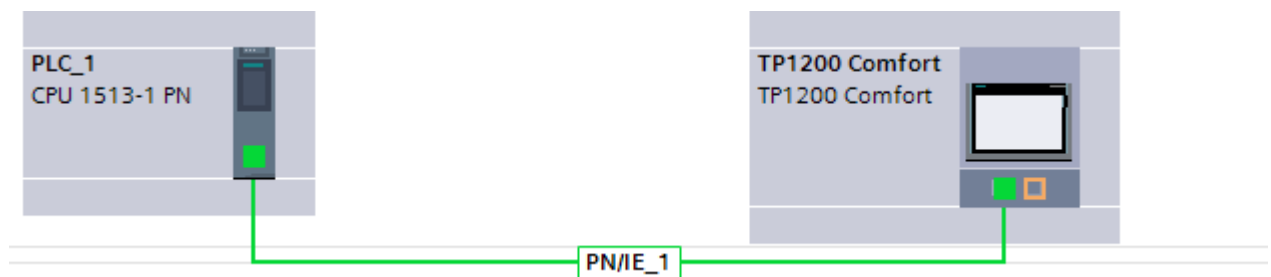
linije poslaganih jedna ispod druge. Zbog programskog koda koji je izgledom sličan relejnim shemama i na kojem se može vidjeti točna putanja prolaska signala, odličan je izbor za pisanje logike upravljanja.

Strukturirani upravljački jezik je programski jezik baziran na objektno-orijentiranim jezicima poput C-a. Omogućuje pisanje FOR/WHILE petlji koje je nemoguće izvesti u jezicima poput ljestvičastog dijagrama. Zbog svoje preglednosti i zbog velikog spektra mogućnosti najpogodniji je za pisanje funkcija koje sadrže veći broj aritmetičkih funkcija.

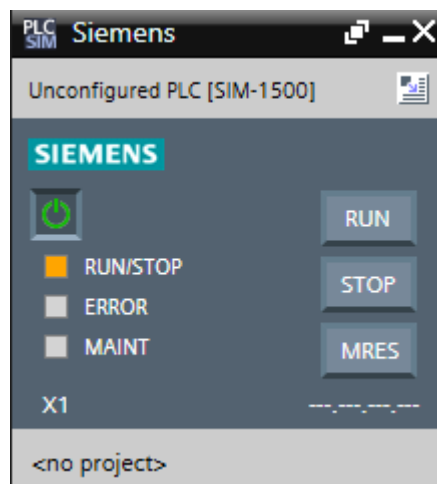
Graf je grafički programski jezik koji se koristi za izradu sekvencijalnih funkcija u području automatizacije. Mnoge primjene u automatizaciji procesa zahtijevaju sekvencijalni način upravljanja, a graf nudi brz, pregledan i efikasan način izrade programske podrške za takve primjene.

### 3.1. Sklopovska konfiguracija

Konfiguriranje uređaja i komunikacijskih protokola prvi je korak pri izradi programske podrške. Uslijed nedostupnosti stvarne opreme korišteni su simulatori. Simuliran je PLC uređaj serije S7-1500 te upravljačka ploča serije TP1200 Comfort. Uređajima su dodijeljene IP adrese iste pod mreže te su isti povezani preko virtualne PROFINET mreže. Izgled umreženog sklopovlja unutar Tia Portal-a se može vidjeti na slici 3.1., a izgled PLC simulatora na slici 3.2.



Sl. 3.1. Umreženo sklopovlje.



Sl. 3.2. PLC simulator.

### 3.2. Simulacija

Sljedeći korak pri izradi programske podrške je izrada simulatora procesa ako nije dostupno fizičko postrojenje ili se želi izraditi kvalitetan upravljački algoritam prije puštanja procesa u pogon. U svrhu ovog rada simuliran je proces toplog valjanja čelika. Od mjernih članova su simulirani mjerni članovi tlaka u komorama cilindra, mjerni član položaja klipa unutar cilindra

te senzor vrućeg materijala. Od izvršnih članova je simuliran servo ventil te izvršni član za blokiranje protoka.

Servo ventil je simuliran tako da upravljačka veličina mijenja otvorenost ventila i smjer protoka ulja. Trenutni protok je tada otvorenost ventila pomnožena s maksimalnim protokom gdje smjer protoka određuje predznak.

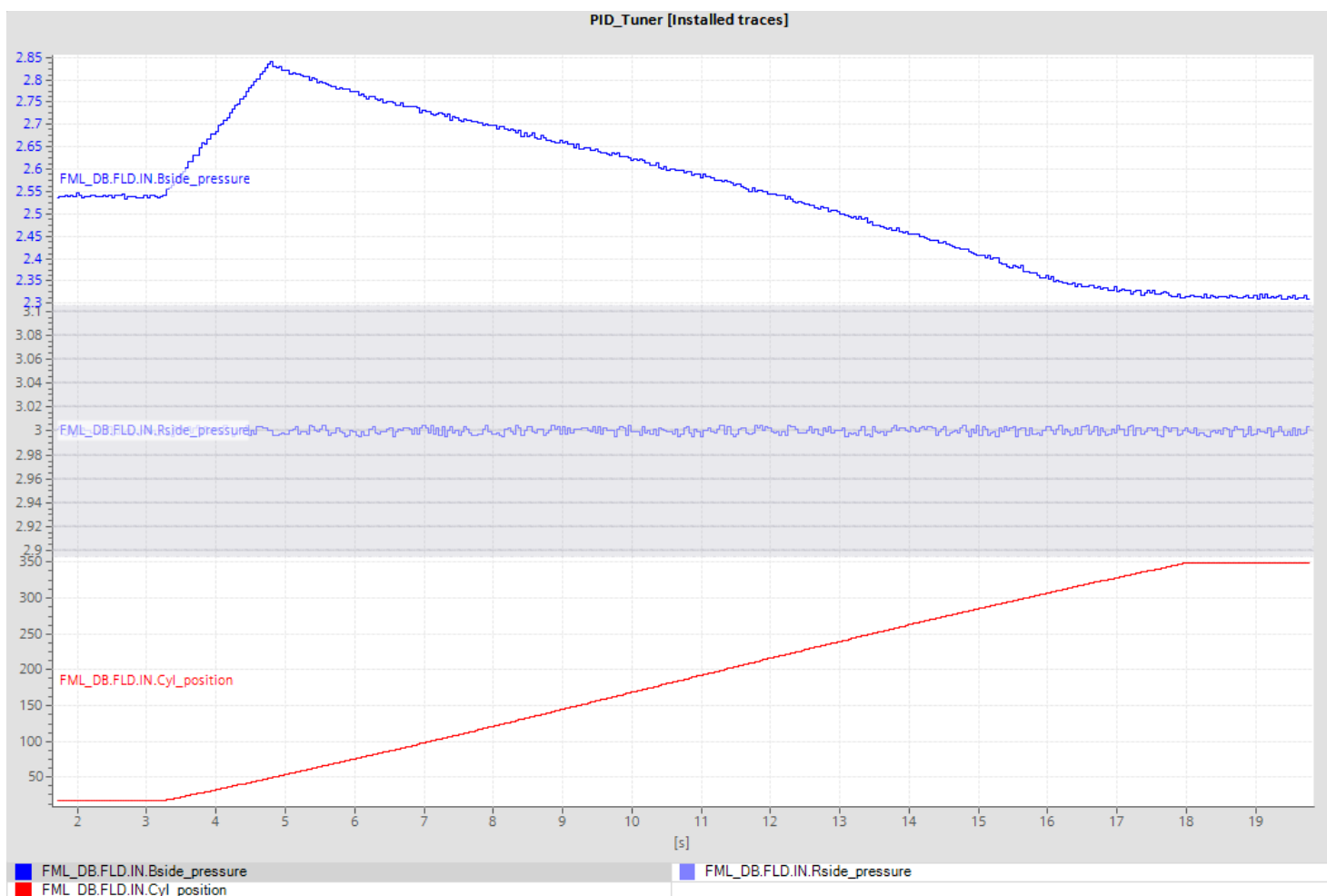
Nakon što je simuliran servo ventil moguće je simulirati i položaj klipa. Položaj klipa je simuliran ovisno o tome postoji li čelična traka na vodilici ili ne. Kada nema trake tada se položaj cilindra mijenja proporcionalno s promjenom količine ulja u cilindru. Promjena položaja klipa jednaka je promjeni visine ulja u cilindru. Kada se na vodilici nalazi traka tada se dovedeno ulje počne stlačivati, a vodilica ostaje u mjestu te nema promjene položaja klipa.

Znajući položaj klipa i geometriju sustava vodilice moguće je simulirati tlakove u komorama cilindra. Tlak također ovisi o tome postoji li čelična traka na vodilici ili ne. Tlak u gornjoj komori cilindra je automatski održavan na 3 MPa. Kada nema čelične trake tada je tlak u donjoj komori cilindra jednak tlaku uzrokovanom momentom sile sustava vodilice u određenom položaj. Momenti sile za određeni položaj vodilice računaju se pri kalibraciji te se spremaju. Kada se čelična traka nalazi na vodilici tada se stvara dodatni tlak uzrokovan kompresijom ulja te tada ukupni tlak u donjoj komori cilindra jednak zbroju tih dvaju tlakova.

Ako se blokira protok preko izvršnog člana tada je protok jednak nuli te se onemogućava slanje upravljačke veličine na ventil.

Kako bi simulacija procesa bila što bliža stvarnom procesu na senzore su dodane smetnje, a na servo ventil vremensko kašnjenje.

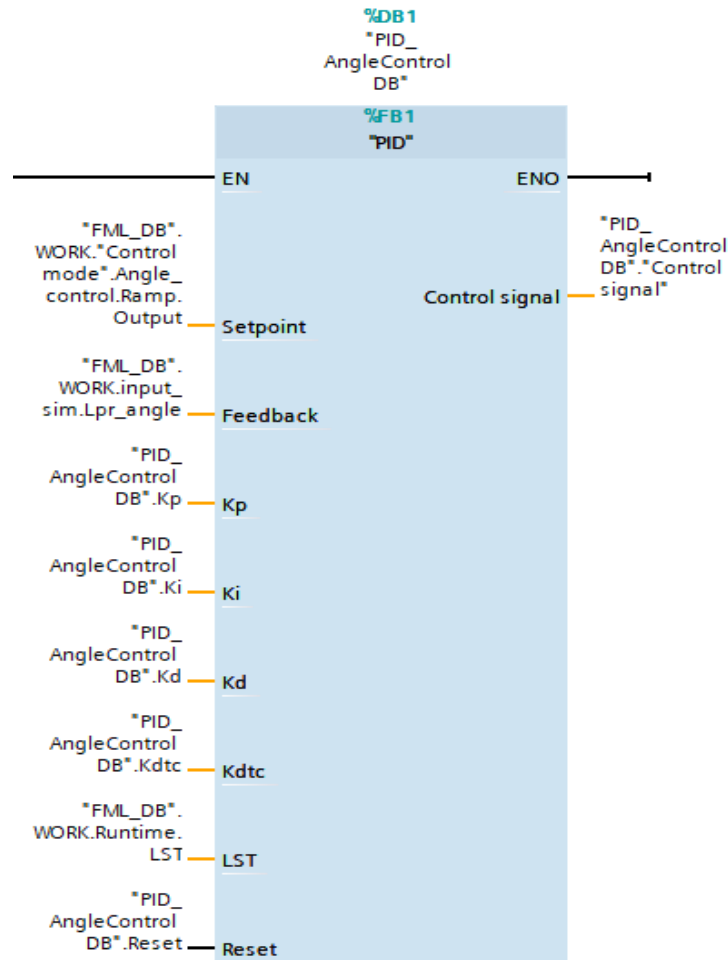
Ovisnost tlaka u komorama o položaju cilindra je prikazana na slici 3.3. gdje je crvenom bojom prikazan položaj klipa, a plavim bojama tlakovi u komorama cilindra.



SI. 3.3. Ovisnost tlakova u cilindru o položaju klipa.

### 3.3. Upravljački algoritam

Upravljački algoritam je dio programske podrške napravljen u svrhu upravljanja položajem vodilice pri čemu se regulira napetost čelične trake. Upravljanje se vrši nad simuliranim procesom. Upravljački algoritam se sastoji od 4 načina rada, a to su kalibracija, ručni način rada, automatski način rada i opća uzbuna. Također program sadrži i dva načina rada regulacije ovisno o reguliranoj veličini. Prvi način rada je regulacija pozicija vodilice. Ovaj način rada koristi se sve dok vodilice ne dođe u dodir s čeličnom trakom. Drugi način je regulacija napetosti trake. Ovaj način rada se koristi kada vodilica dođe u dodir s materijalom. Za svrhu regulacije izrađen je regulator s proporcionalnim i integralnim djelovanjem. Regulator je realiziran u obliku funkcijskog bloka koji je napisan u SCL jeziku.

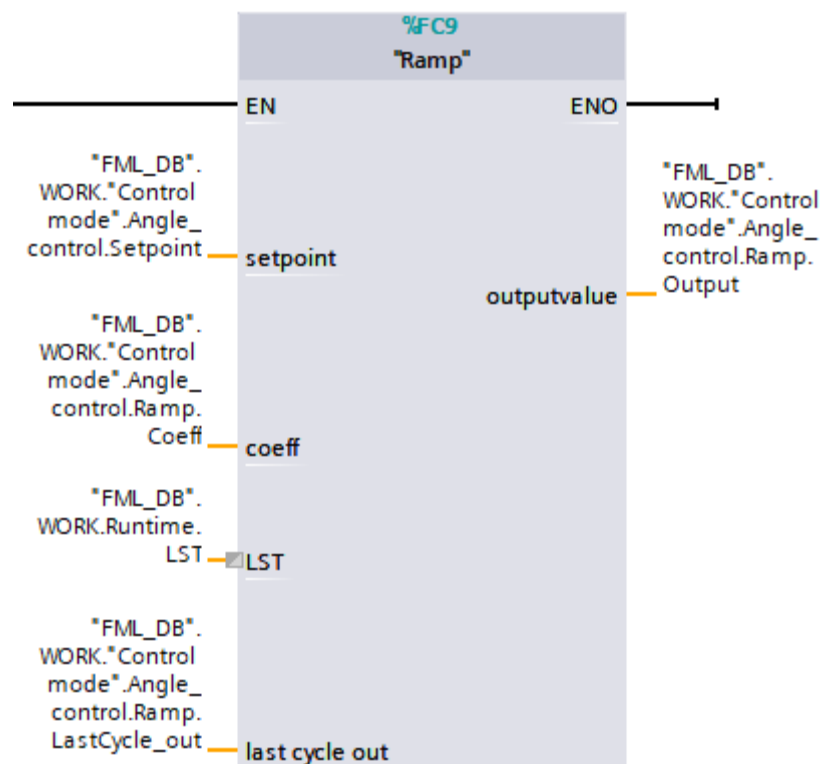


Sl. 3.4. PID regulator.

Na slici 3.4. prikazan je izgled bloka PID regulatora unutar Tia Portala-a. Uloga regulatora u regulacijskom krugu se može vidjeti na slici 2.13. Ulazni signali redom predstavljaju zadanu vrijednost, povratnu vrijednost, proporcionalno pojačanje, integralno pojačanje, derivativno pojačanje, derivativnu vremensku konstantu, vrijeme izvođenja zadnjeg ciklusa te resetiranje regulatora. Izlaz je upravljački signal. Derivativno pojačanje nije korišteno.

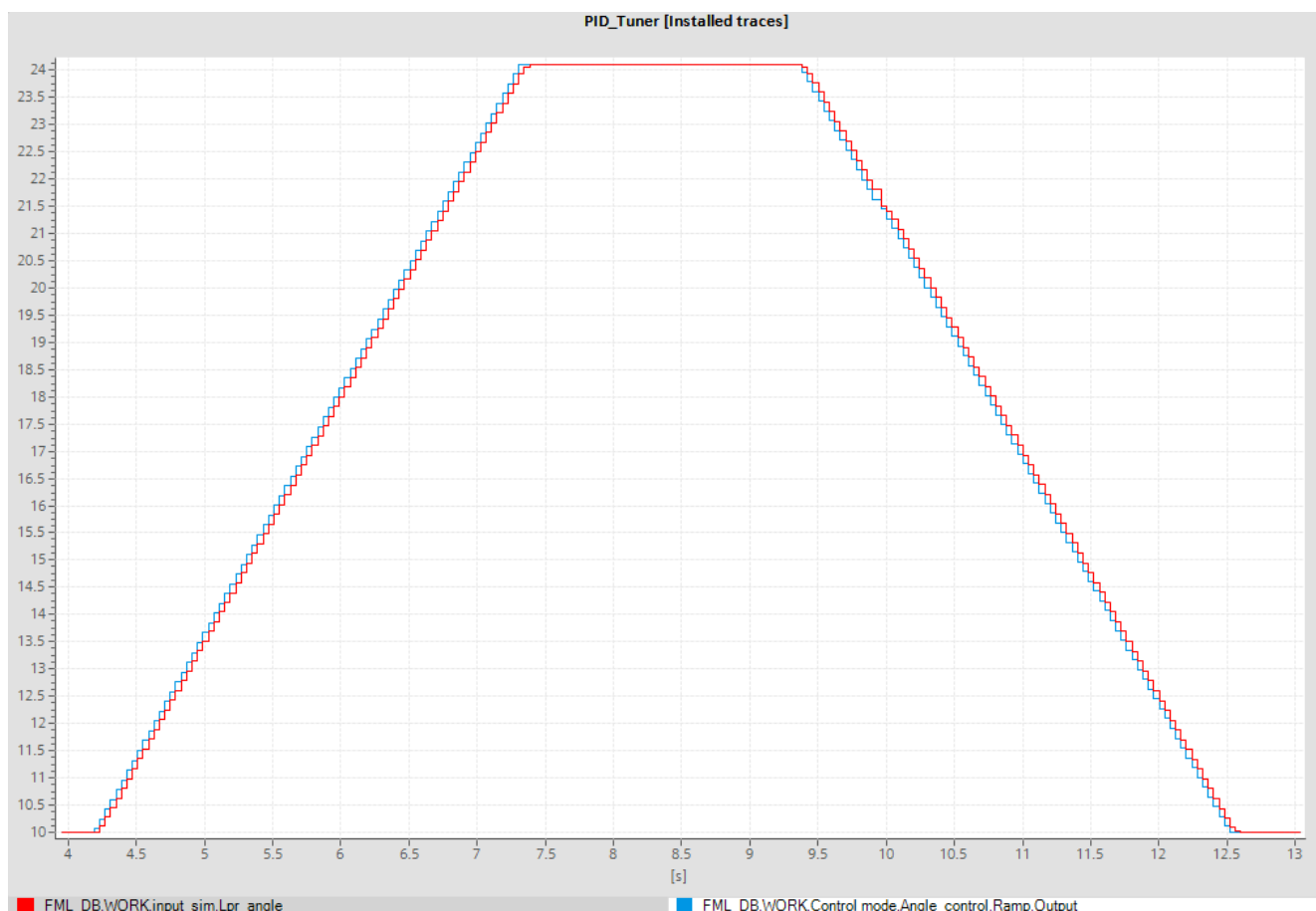
Vrijednosti pojačanja regulatora su dobivena eksperimentalnom metodom proučavajući ponašanje ventila i kuta vodilice s obzirom na pojačanja. Zadovoljavajuće vrijednosti pojačanja su 50 za proporcionalni dio i 0.00001 za integralni dio.

Zadana vrijednost na ulazu regulatora u najvećem broju slučajeva ne smije biti odskočna funkcija već se vrijednost mora dovesti do željene u određenom broju ciklusa. U tu svrhu izrađena je funkcija koje predstavlja rampu po kojoj se ulazna vrijednost penje.



SI. 3.4. Funkcija rampiranja.

Na slici 3.4 je prikazan blok koji predstavlja funkciju rampe. Ulazi su redom zadana vrijednost, koeficijent porasta rampe, vrijeme izvođenja zadnjeg ciklus te zadnji izlaz iz funkcije koji je ujedno i ulaz i izlaz. Izlaz je trenutna pozicija ulazne vrijednosti na rampi.



**Sl. 3.5.** Kut vodilice i rampa zadane vrijednosti.

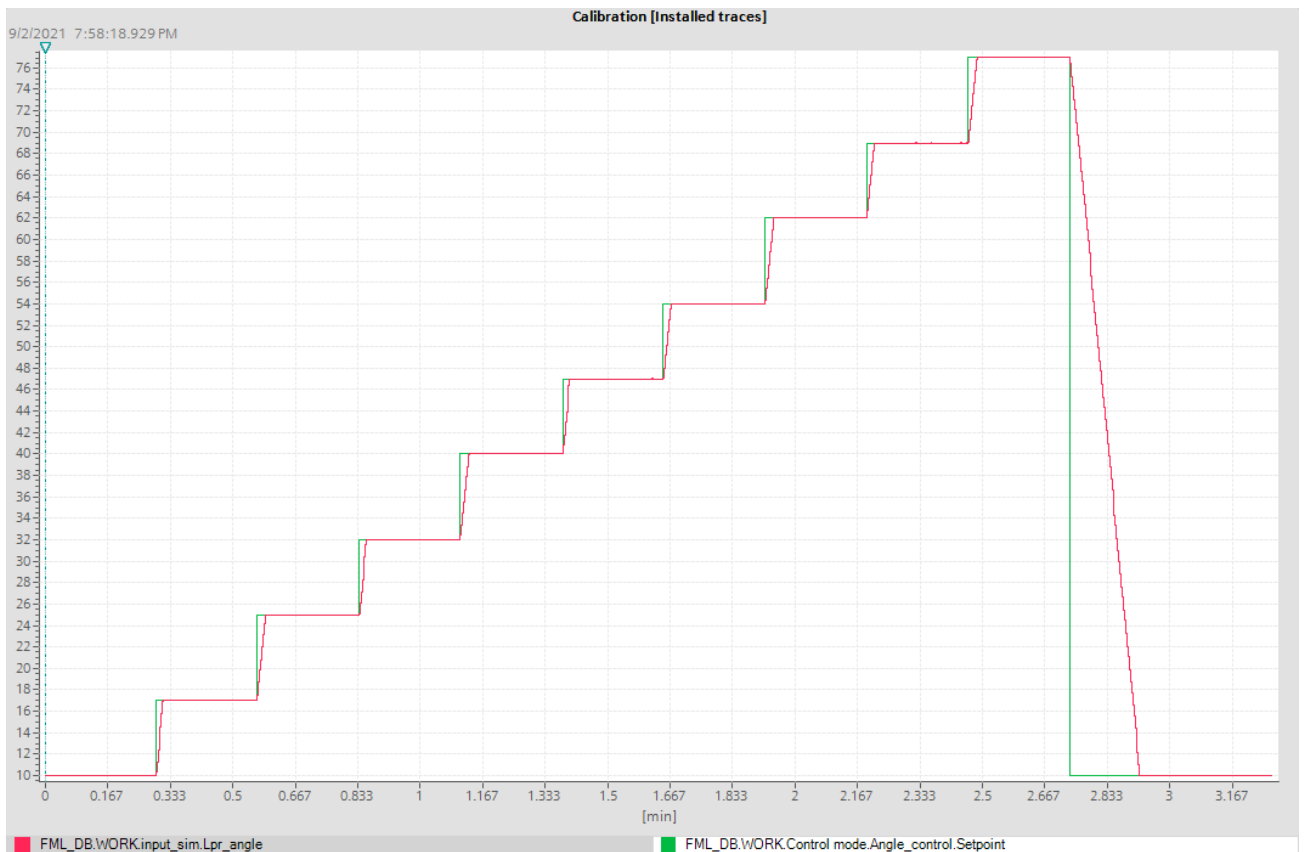
Slika 3.5. prikazuje kako kut vodilice prati zadanu vrijednost koja je izlaz iz funkcije rampe. Crvena boja predstavlja kut vodilice dok plava boja predstavlja izlaz zadane vrijednosti iz rampe gdje je kut vodilice prikazan u stupnjevima.

### 3.3.1. Kalibracija

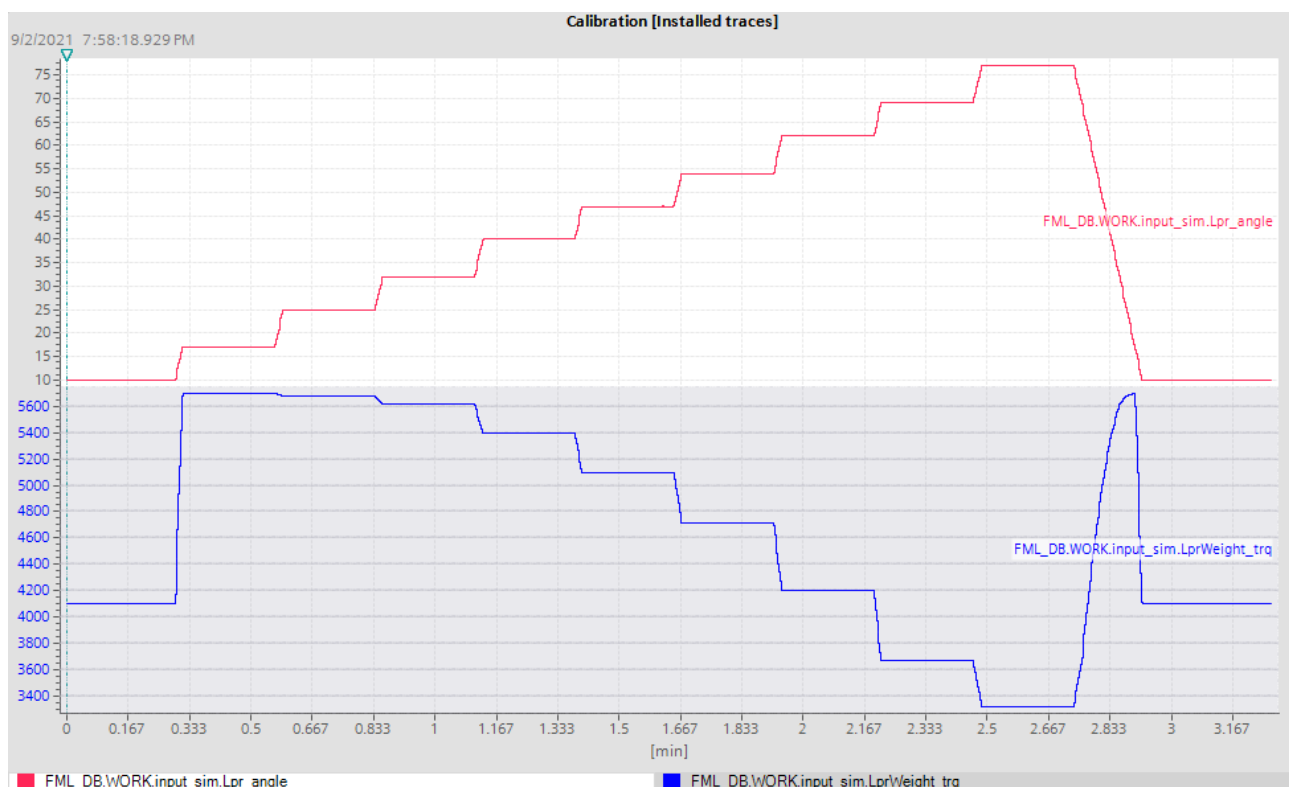
Kako bi regulacija napetosti trake bila što preciznija potrebni su što precizniji podatci o utjecajima svih momenata sustava jer od ukupnog momenta koji djeluje na cilindar samo jedan dio stvara napetost na traci. Moment sile koju uzrokuje težina sustava vodilice je veličina koja se može precizno izmjeriti tijekom postupka kalibracije. Moguće je i računati spomenuti moment svaki ciklus, ali podatci dobiveni na stvarnom postrojenju su mnogo bolji za izradu što realističnije simulacije. Algoritam je izrađen tako da se prilikom kalibracije koriste podatci o momentu na određenim kutovima vodilice dobiveni sa stvarnog postrojenja. Vodilica se dovodi na što bliže zadanoj poziciji te se pomoću linearne interpolacije iz pripremljenih podataka dobiva moment te



se tijekom vremena od 5 sekundi računa prosječna vrijednost tijekom toga vremena i sprema u obliku polja za kasnije korištenje. Funkcija kalibracije je napisana koristeći ljestvičasti dijagram u obliku sekvence. Promjena kuta vodilice na zadane kutove sekvence tijekom kalibracije prikazan je na slici 3.6., dok je na slici 3.7. prikazana promjena momenta sile tijekom kalibracije u ovisnosti o kutu.



**Sl. 3.6.** Promjena kuta vodilice tijekom kalibracije.



**Sl. 3.7.** Ovisnost momenta sile o kutu tijekom kalibracije.

Usljed djelovanja šuma na senzor pozicije cilindra dobiveni momenti sile nisu isti jednaki momentima dobivenih sa stvarnog postrojenja, što se može i vidjeti na slici 3.8., gdje su lijevo prikazani momenti dobiveni sa stvarnog postrojenja, a desno momenti dobiveni simuliranom kalibracijom.

|        |          |
|--------|----------|
| 4105.0 | 4105.0   |
| 5699.0 | 5699.0   |
| 5681.0 | 5681.0   |
| 5619.0 | 5618.773 |
| 5395.0 | 5394.701 |
| 5099.0 | 5098.321 |
| 4716.0 | 4715.281 |
| 4198.0 | 4197.091 |
| 3672.0 | 3671.99  |
| 3316.0 | 3316.0   |

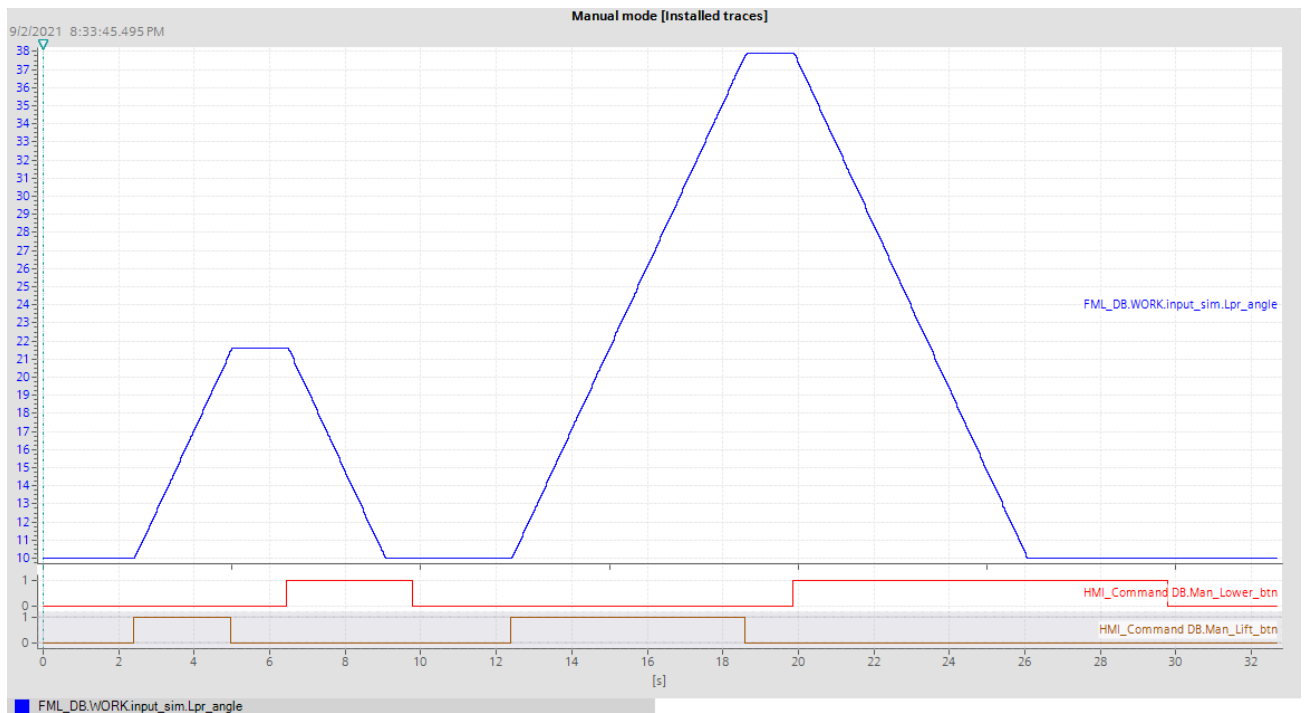
**Sl. 3.8.** Usporedba momenata sile.

### 3.3.2. Ručni način rada

Operaterima je potrebno omogućiti ručno upravljanje strojevima. U tu svrhu uvijek je

potrebno izraditi algoritam te korisničko sučelje koje im omogućuje ručno upravljanje putem različitih tipki, sklopki i potencijometara.

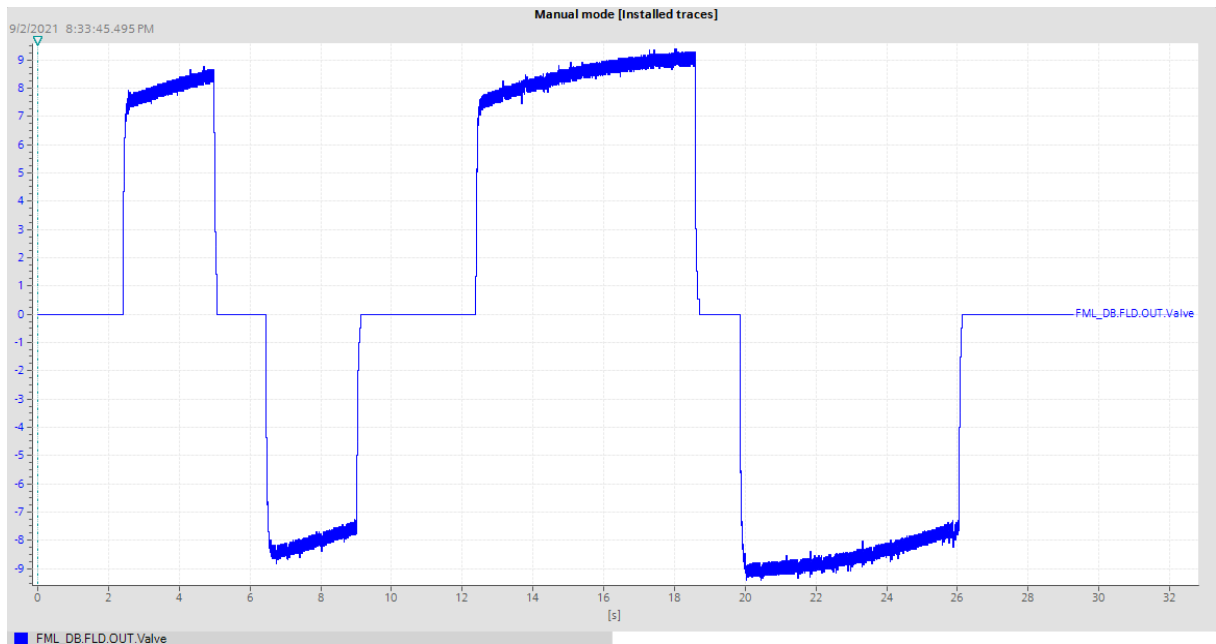
Algoritam za ručni način rada u trenutnoj programskoj podršci omogućava operateru ručno dizanje i spuštanje vodilice pomoću 2 tipkala. Ovaj način rada je moguć samo ako ne postoji materijal na vodilici.



**Sl. 3.9.** Ručno upravljanje vodilicom.

Na slici 3.9. je prikazana promjena kuta vodilice (plava boja) o pritisnutim tipkalima za podizanje (smeđa boja) i spuštanje vodilice (crvena boja) na sučelju čovjek-stroj. Iz grafa je vidljivo da se kut vodilice prestaje mijenjati na svojim krajnjim vrijednostima bez obzira na pritisnuto tipkalo.

Otvorenost ventila prikazana na slici 3.10. u ručnom načinu rada je u razmaku  $\pm 8\%$ , kako bi se održala konstantna promjena od otprilike  $5\%$ .



Sl. 3.10. Otvorenost ventila tijekom ručnog načina rada.

### 3.3.3. Automatski način rada

Automatski način rada se sastoji od dva dijela. Prvi dio uključuje dizanje vodilice pomoću regulacije pozicije dok vrijednost napetosti trake ne prijeđe određeni prag te se tako detektira prisutnost trake na vodilici. Nakon što se detektira traka na vodilici prelazi se u drugi način rada to jest u regulaciju napetosti trake.

Kako bi se regulirala napetost prvo je potrebno izračunati referentnu vrijednost tenzije iz postavki procesa. Postavke procesa uključuju ulaznu i izlaznu brzinu i debljinu trake, širinu trake te željena naprezanja materijala. Iz postavki procesa se također može izračunati točka kontakta vodilice s materijalom. Točka kontakta predstavlja informaciju o željenoj poziciji vodilice za određene vrijednosti duljine trake između dva susjedna postolja. Postavke procesa su promjenjive što uzrokuje i promjene vrijednosti duljine trake između postolja i same kontakt točke te tako dodatno otežava regulaciju.

Promjena kontakt točke može biti pozitivna i u tom slučaju se dio stlačenog ulja dekomprimira te se vodilica počne podizati i pratiti traku. Koliko će je dugo pratiti ovisi o količini stlačenog ulja u cilindru. Ako nema dovoljno stlačenog ulja u cilindru vodilica će izgubiti kontakt s trakom i nestat će napetost. U suprotnom slučaju, kada je promjena kontakt točke negativna, tada traka počne pritiskati vodilici pri čemu se vodilica počne spuštati, a ulje stlačivati, što uzrokuje porast napetosti trake. Zadatak je na regulatoru da te prijelaze učini što glatkijima i da pritom

održava zadanu napetost.

### **3.3.4. Opća uzbuna**

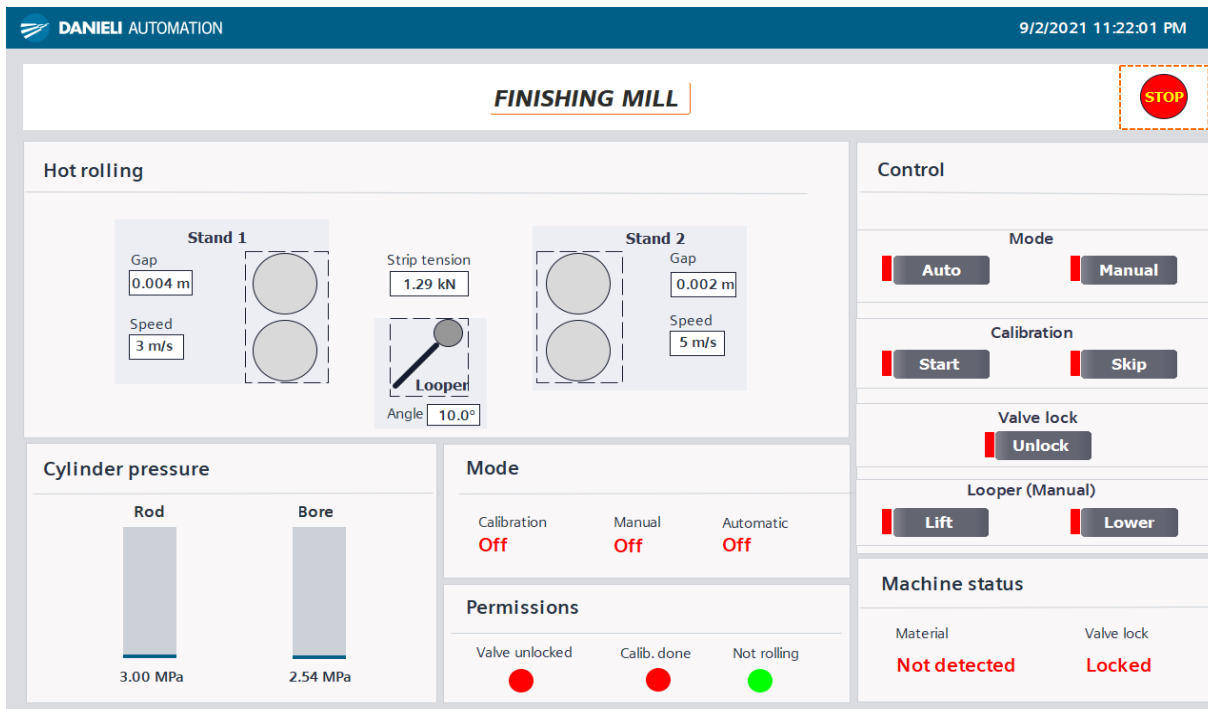
Opća uzbuna je način rada na čiju se aktivaciju blokiraju svi izvršni članovi u postrojenju i oglašava se alarm. Ovaj način rada se aktivira samo u ekstremnim situacijama i situacijama opasnim po život. Nakon što se situacija riješi alarm se resetira, za što je najčešće potreban ključ, te se postrojenje može ponovo pustiti u rad.

Tipkalo za aktivaciju i resetiranje alarma se nalazi na lokalnim kontrolnim stanicama, ali u ovom radu je aktivacija i resetiranje istoga omogućena putem sučelja čovjek-stroj.

## **3.4. Sučelje čovjek-stroj**

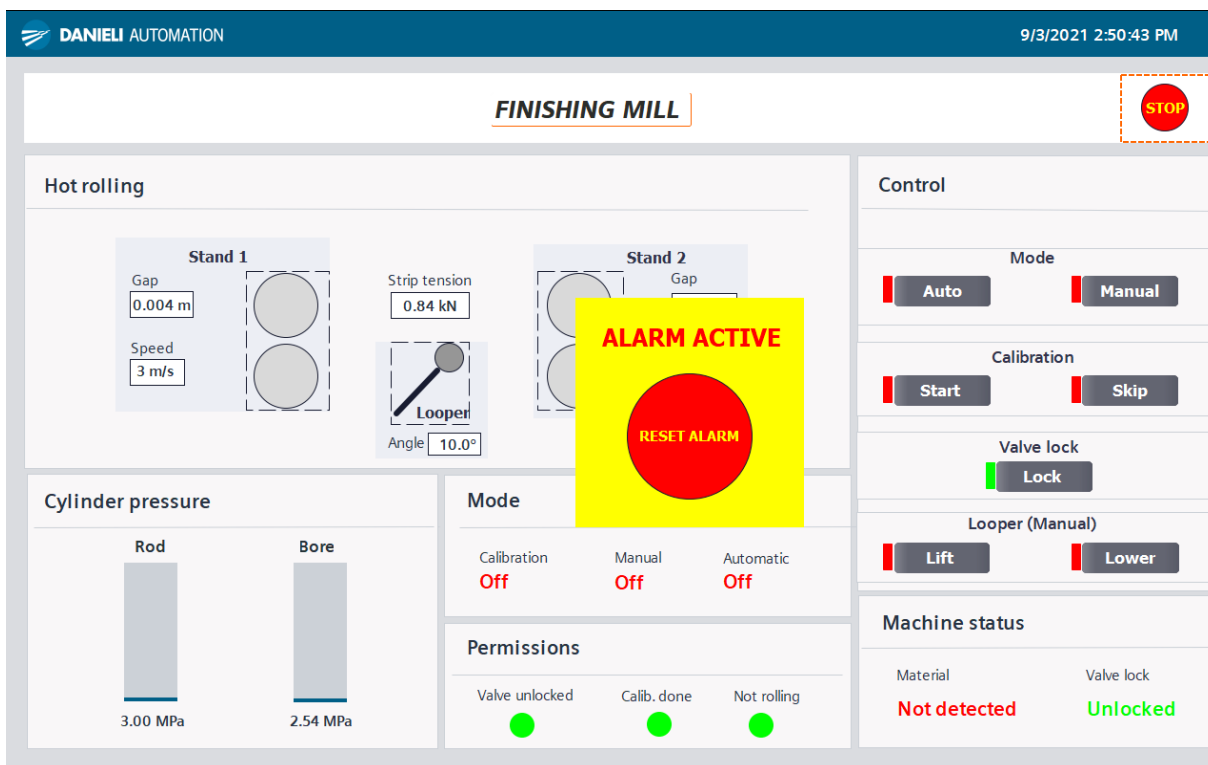
Udaljeni nadzor procesa i procesnih veličina omogućen je pomoću sučelja čovjek-stroj (engl. *Human Machine Interface*). Sučelje omogućava vizualni prikaz digitalnih i analognih ulaza i izlaza, stanja procesa, povijesnih podataka, dijagnostičkih podataka i još mnogo toga. Također, sučelje omogućava i udaljeno upravljanje procesom pomoću tipkala, prekidača i virtualnih potencijometara.

Dok se većina upravljanja najčešće omogućuje preko lokalnih upravljačkih stanica (engl. *Local Control Station*) uslijed nedostatka iste cjelokupno upravljanje je omogućeno koristeći sučelje čovjek-stroj. Takva sučelja se često sastoje od mnoštva različitih prikaza, ali u ovom radu fokus nije na vizualizaciji pa je ista izvedena pomoću jednog prikaza. Prikaz se nalazi na slici 3.11.



Sl. 3.11. Sučelje čovjek-stroj.

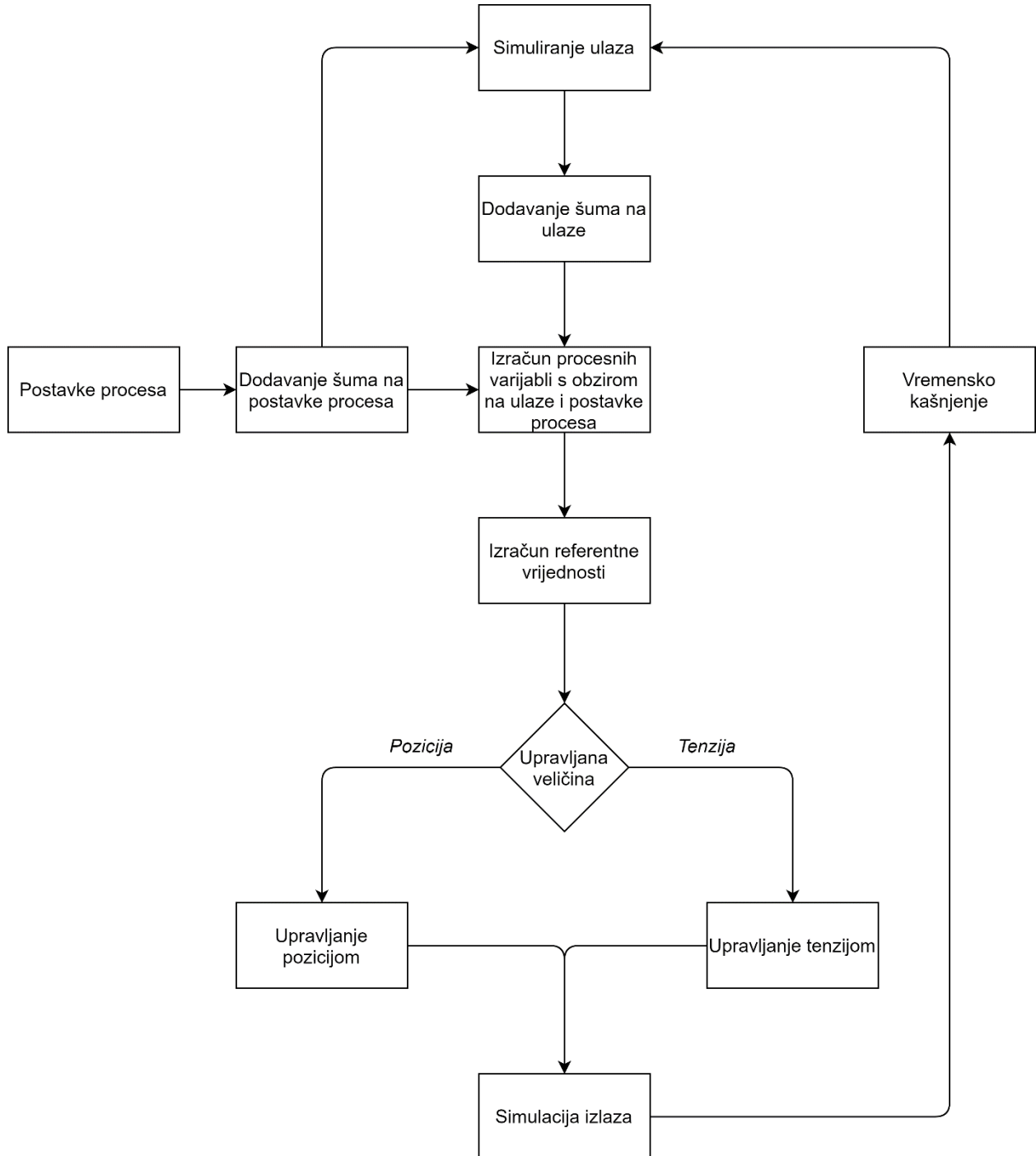
U slučaju aktivacije alarma na ekranu se pojavljuje prozor koji prikazuje informaciju o aktivnom alarmu i nudi mogućnost resetiranja alarma (slika 3. 12.)



Sl. 3.12. Skočni prozor alarma.

### 3.5. Tijek programske podrške

Tijek izvođenja programske podrške je prikazan na slici 3.13.



Sl. 3.13. Dijagram tijeka programske podrške.

Izvođenje programske podrške kreće simulacijom ulaza, a to su tlakovi u komorama

cilindra te pozicija klipa, te se na iste dodaje nasumični šum, tako da se generira nasumičan broj u određenom rasponu te se isti zbroji s trenutnom vrijednošću signala. Šum nadodan na simulirane tlakove iznosi  $\pm 0.005 \text{ MPa}$ , dok je iznos šuma pozicije klipa jednak  $1 \mu\text{m}$ . Prije simulacije ulaza potrebno je izračunati i kontakt točku. Kontakt točka se računa iz postavki procesa na koje je nadodana smetnja, kako bi se simulirala promjena kontakt točke ovisno o duljini trake između postolja. Nakon što su simulirani ulazi i nakon što je izračunata kontakt točka, iz dobivenih rezultata se računa iznos napetosti po izrazu (2-7). Sljedeći korak je izračun zadane vrijednosti za napetost. Zadana vrijednost se računa iz postavki procesa na koje još nije nadodana smetnja tako da je zadana vrijednost konstantna. Regulator napetosti i regulator pozicije vodilice cijelo vrijeme daju izlaze u obliku upravljačke veličine. Koja upravljačka veličina će biti prosljeđena na izvršni član ovisi u kojem se načinu rada nalazi programska podrška. Funkciju odabira i prosljeđivanja upravljačke veličine odrađuje posebno izgrađena funkcija u ljestvičastom dijagramu. Na samom kraju ciklusa s obzirom na upravljačku veličinu simulira se stanje ventila koje utječe na protok ulja i tako na simulaciju ulaza u sljedećem ciklusu. Djelovanje ventila je odgođeno za odabrano vremensko kašnjenje.

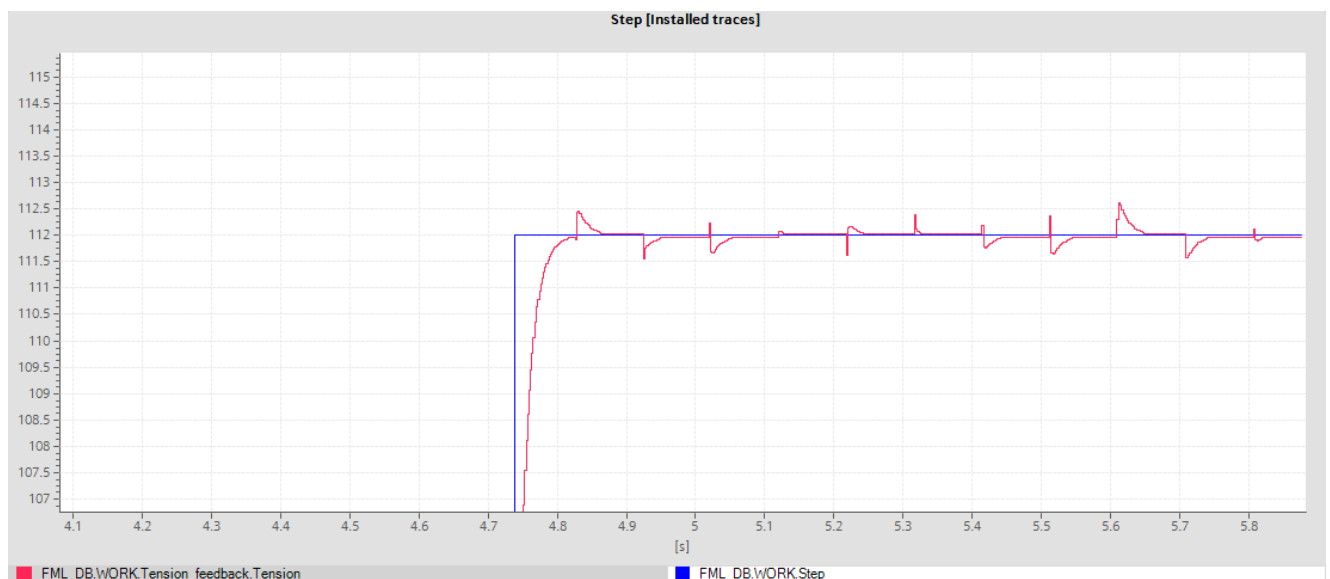


### 3.6. Testiranje

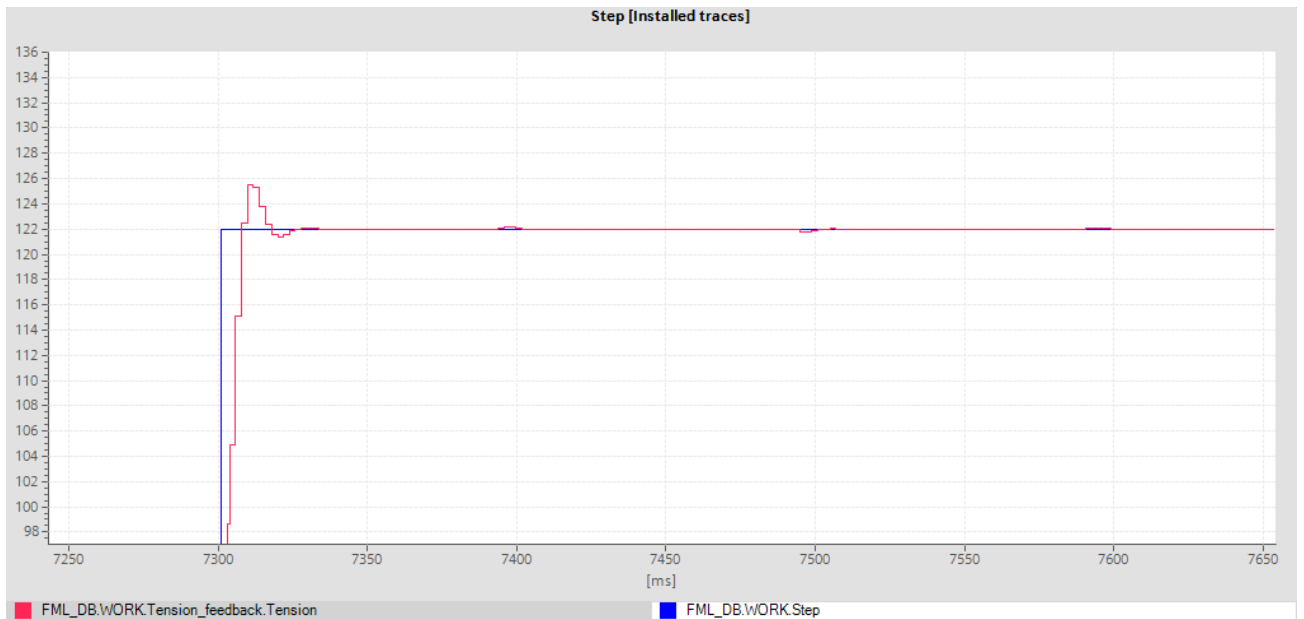
Kako bi regulacija napetosti bila uspješna potrebno je testirati napisanu programsku podršku i podesiti regulator.

Napetost je jako zašumljena i brzo promjenjiva veličina na koju i najmanje smetnje u sustavu mogu imati veliki utjecaj. Jednu od tih smetnji predstavlja vremensko kašnjenje servo ventila. Ventil ne može reagirati trenutno već treba određeno vrijeme da signal dođe do ventila i da se isti otvori na zadani postotak u ovisnosti o veličini poslanoj s regulatora. Stoga je prvo testiran utjecaj kašnjenja na regulaciju.

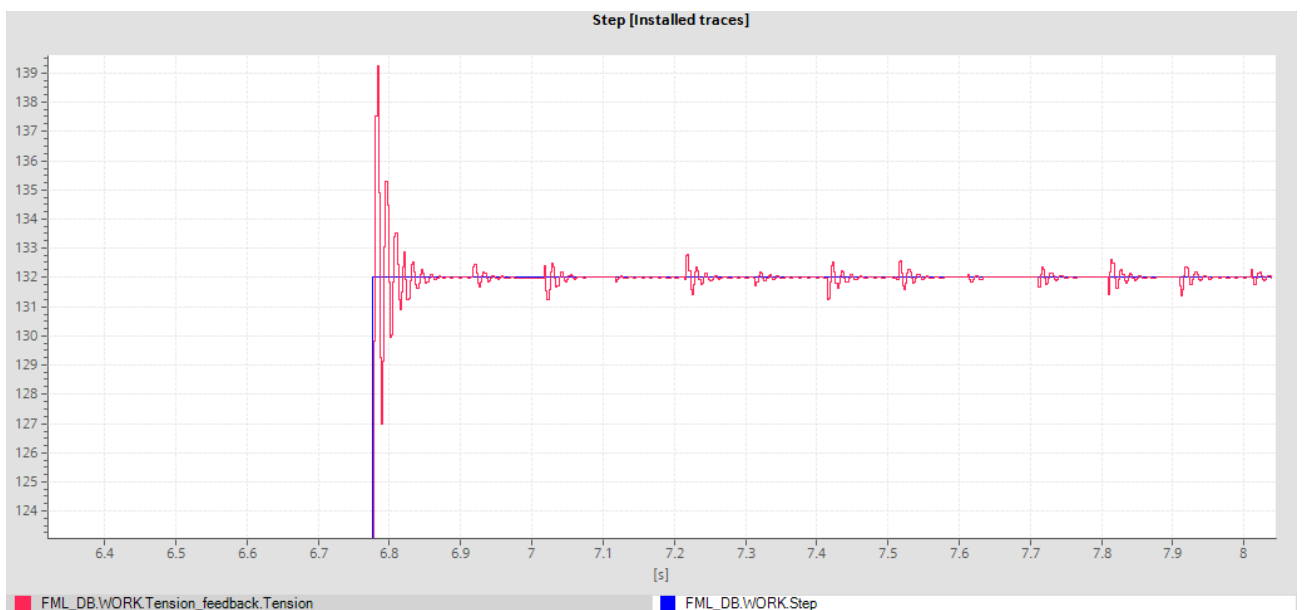
U ovom radu regulacija napetosti je izvršena s kašnjenjem ventila od 1 ciklusa PLC-a stoga je regulator početno podešen da dobro prati skokovitu pobudu s tim istim kašnjenjem, pri čemu je maksimalno dopušteno nadvišenje 3%. Početno proporcionalno pojačanje je odabrano s obzirom na procijenjeni red veličine odstupanja regulacijske veličine te željenog područja rada ventila. Procijenjeno odstupanje je reda veličina  $10^1$  kN, a željeno područje rada ventila  $\pm 5\%$  te je stoga određeno početno proporcionalno pojačanje reda veličina  $10^{-2}$ . Željeni raspon rada ventila je malen zato što je napetost trake osjetljiva i na minimalne pomake u vrijednosti otvorenosti servo ventila. Testovi su provedeni s integralnim pojačanjem postavljenim na 0 jer je isto podešeno nakon pronalaska proporcionalnog pojačanja sa zadovoljavajućom brzinom i nadvišenjem. Tijekom testiranja vrijednost kontakt točke je bila nepromjenjiva i iznosila je 25 stupnjeva.



Sl. 3.14. Odziv napetosti na skokovitu pobudu,  $K_p = 0.013$ ,  $T_d = 1$  ciklus.



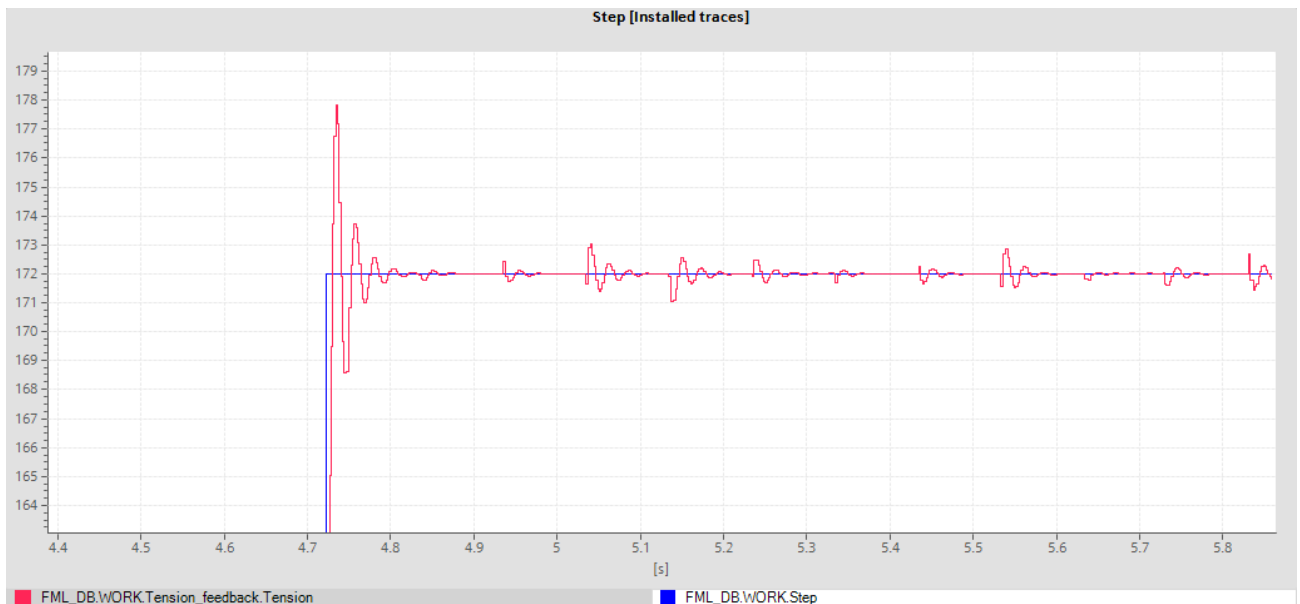
**Sl. 3.15.** Odziv napetosti na skokovitu pobudu,  $K_p = 0.05$ ,  $T_d = 1$  ciklus.



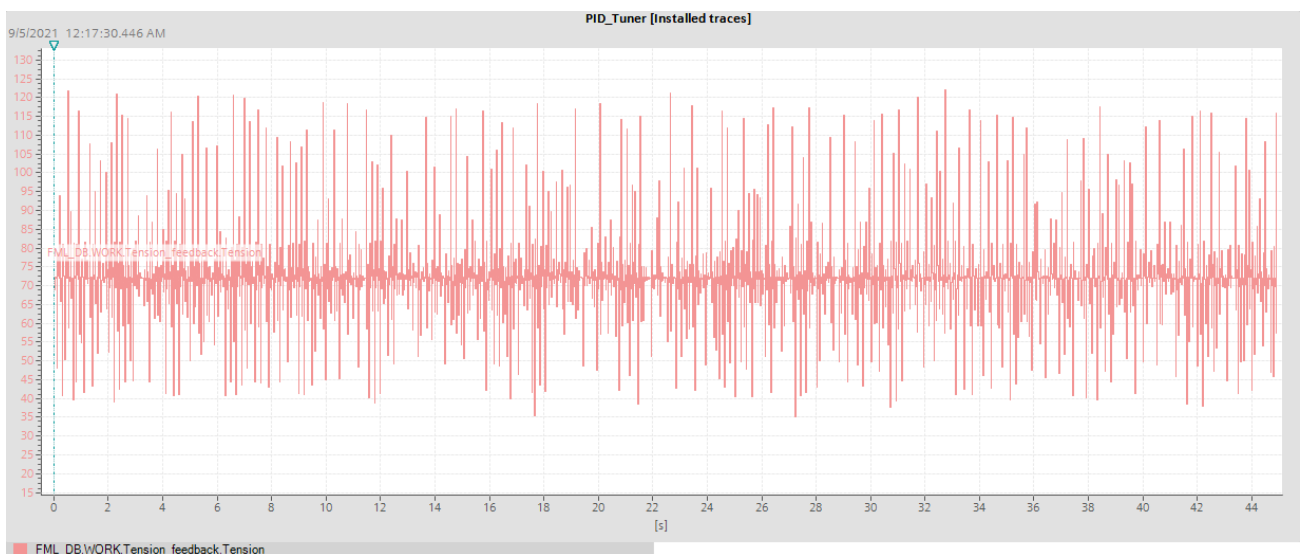
**Sl. 3.16.** Odziv napetosti na skokovitu pobudu,  $K_p = 0.09$ ,  $T_d = 1$  ciklus.

Na slikama 3.14., 3.15., i 3.16. su prikazana rezultati odziva napetosti na skokovitu pobudu s vremenom kašnjenja  $T_d$  jednakim jednom ciklusu. Iz rezultata je vidljivo da je pojačanje  $K_p$  u iznosu 0.0013 premalo jer napetost ne dostiže zadanu vrijednost dovoljno brzo dok pojačanje  $K_p$  u iznosu od 0.09 uzrokuje preveliko nadvišenje. Zadovoljavajući rezultati su dobiveni pri pojačanju  $K_p$  u iznosu od 0.05, odziv je brz s nadvišenjem manjim od 3% nakon čega je utvrđena vrijednost integralnog pojačanja koja iznosi 0.006. Nakon pronalaženja zadovoljavajućeg

početnog proporcionalnog pojačanja, testiran je utjecaj kašnjenja ventila na odziv.

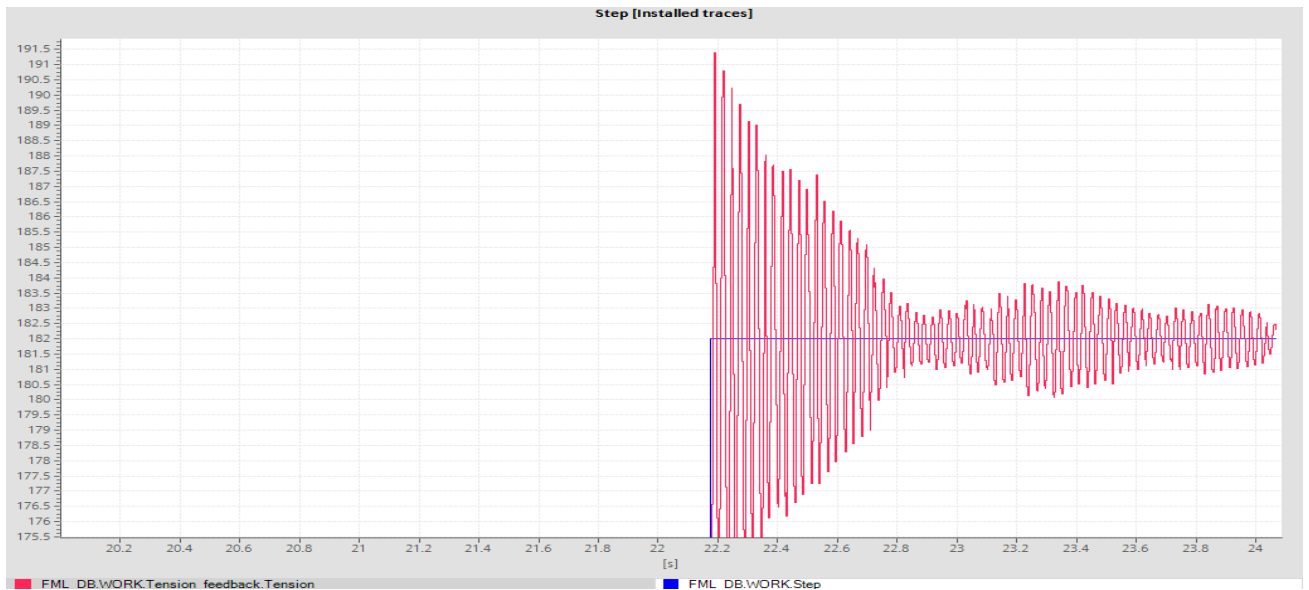


**Sl. 3.17.** Odziv napetosti na skokovitu pobudu,  $K_p = 0.05$ ,  $T_d = 2$  ciklusa.

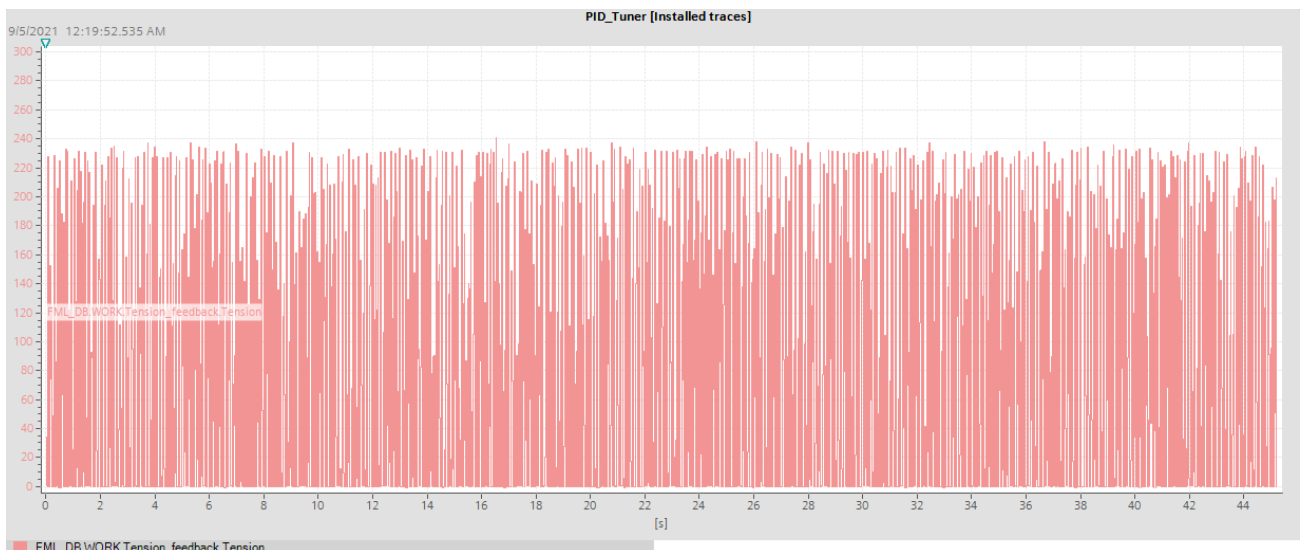


**Sl. 3.18.** Odziv napetosti na skokovitu pobudu,  $K_p = 0.09$ ,  $T_d = 2$  ciklusa.

Na slikama 3.17 i 3.18. su prikazan rezultati odziva napetosti na skokovitu pobudu pri čemu je kašnjenje ventila 2 ciklusa iz čega se može vidjeti da kašnjenje ventila ima veći utjecaj kada regulatori imaju velika pojačanja. Razlog tomu je što je napetost brzo promjenjiva veličina i zaostale velike vrijednosti na izlazu iz regulatora djeluju na trenutni iznos regulirane veličine koji se može jako razlikovati od vrijednosti iz prošlog ciklusa. Isto se može vidjeti i na slikama 3.19. i 3.20.



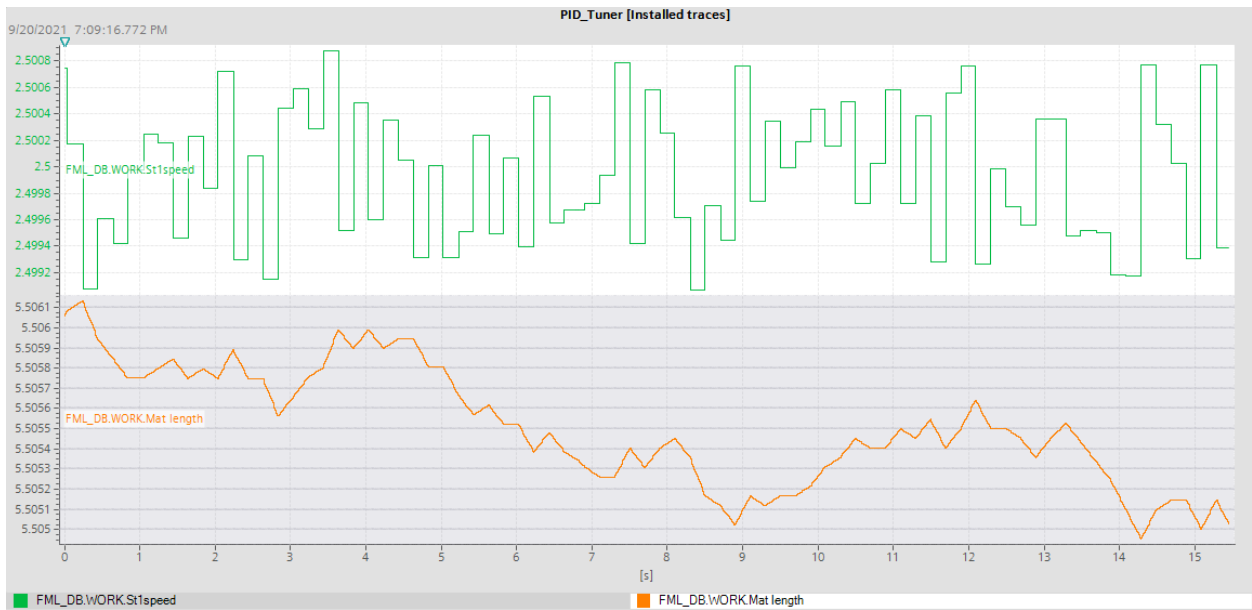
**Sl. 3.19.** *Odziv napetosti na skokovitu pobudu,  $K_p = 0.05$ ,  $T_d = 3$  ciklusa.*



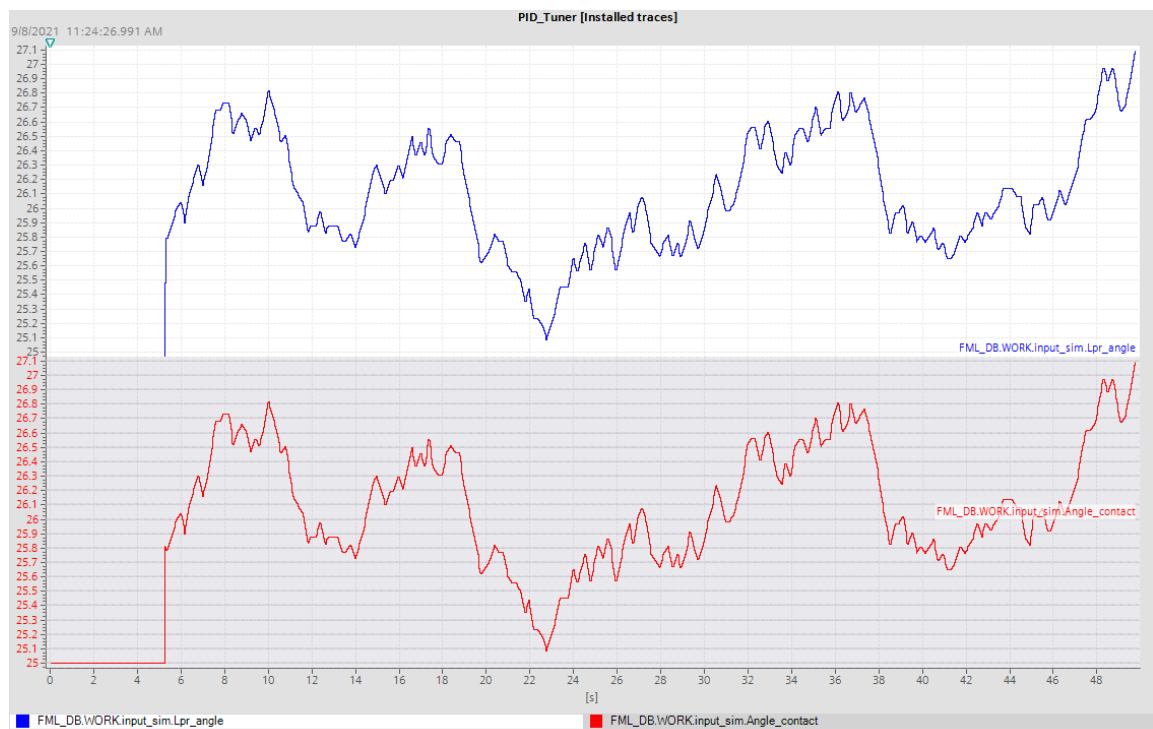
**Sl. 3.20.** *Odziv napetosti na skokovitu pobudu,  $K_p = 0.09$ ,  $T_d = 3$  ciklusa.*

Nakon što su određene vrijednosti PI regulatora za regulaciju napetosti uz kašnjenje ventila od 1 ciklus slijedi testiranje automatskog načina rada tijekom kojeg se mijenja kontakt točka.

Kontakt točke se mijenja ovisno o duljini trake između postolja koja u svakom trenutku ovisi o brzinama valjaka i ulaznoj i izlaznoj debljini materijala. Simulacija promjene kontakt točke je realizirana tako da se je dodala smetnja na postavke prvog postolja što uzrokuje promjenu duljinu trake, a samim time se mijenja kontakt točka. Ovisnost duljine trake (narančasta boja) o brzini prvog postolja (zelena boja) se može vidjeti na slici 3.21.



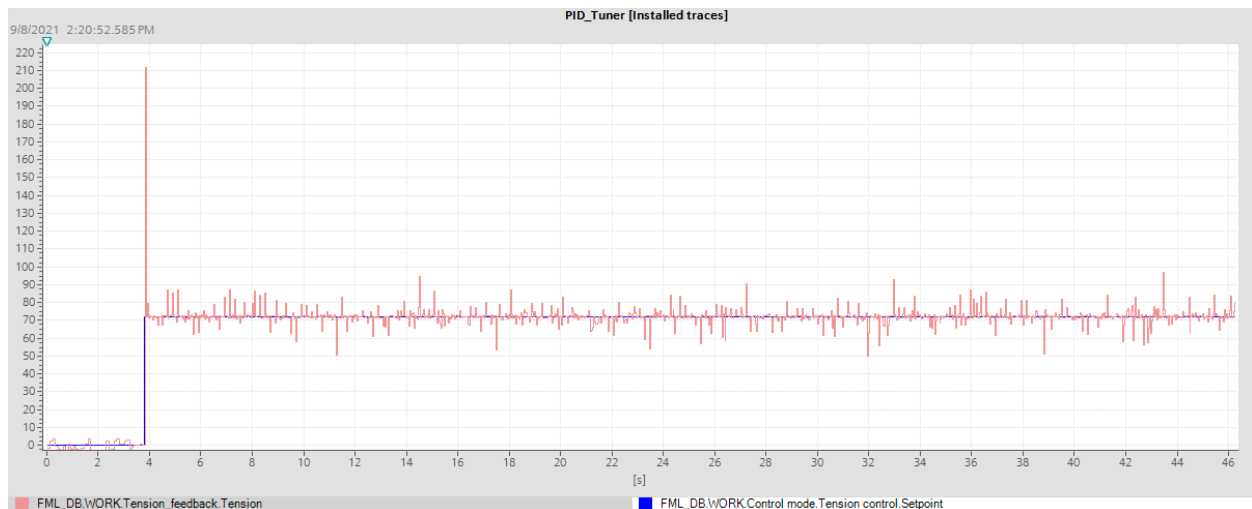
**Sl. 3.21.** Ovisnost duljine trake o brzini prvog postolja



**Sl. 3.22.** Promjena kontakt točke i pozicije vodilice.

Na slici 3.22. crvenom bojom je prikazana promjena kontakt točke, dok je plavom bojom prikazana promjena pozicije vodilice. Iz prikaza je vidljivo da vodilica jako dobro prati kontakt točku. Razlog tome je što se u vodilici često nalazi dovoljno stlačenog ulja da bez pomoći regulatora popratu pozitivnu promjenu kontakt točke, tako da se ulje dekomprimira pri porastu

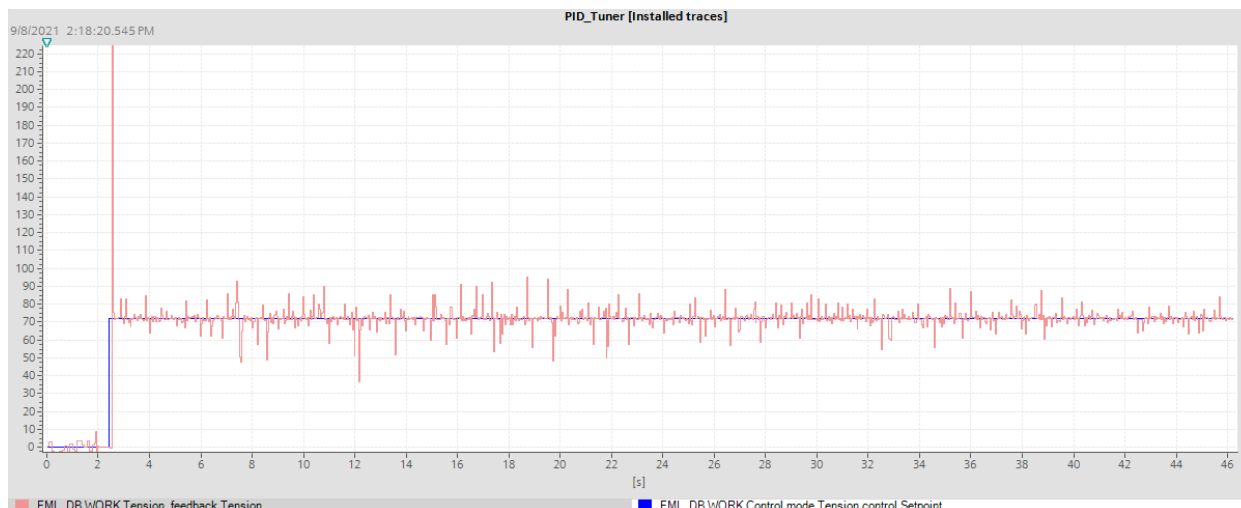
kontakt točke i tako podigne vodilicu. Negativna promjena kontakt točke uzrokuje stlačivanje ulja u cilindru i samim time pozicija vodilice se snižava zajedno s kontakt točkom.



**Sl. 3.23.** *Trenutna i zadana vrijednost napetosti trake,  $K_p = 0.05$ ,  $K_i = 0.0085$ .*

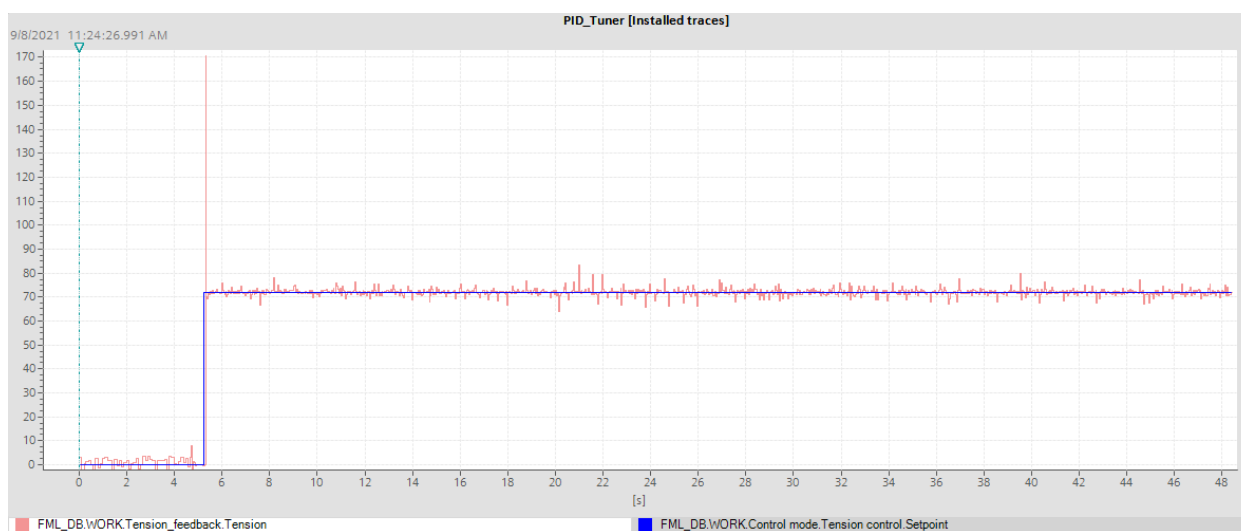
Na slici 3.23. je prikazano kako trenutna vrijednost napetosti prati zadanu. Početni skok u napetosti koji je na prikazu iznosi 210 kN je posljedica traženja trake. U automatskom načinu rada vodilica se diže koristeći regulaciju pozicije sve dok se ne detektira određena napetost tijekom određenog vremena koje je najčešće nekoliko ciklusa i tada se prelazi u regulaciju napetosti. Tijekom tog vremena napetost poprimi veću vrijednost, a nakon prelaska u regulaciju napetosti vodilica se vraća na potrebnu poziciju ovisno o kontakt točki. Na slici se također mogu vidjeti manji skokovi u napetosti koji su uzrok kašnjenja ventila. Kada promjena kontakt točke promijeni smjer ventil bi trebao djelovati u suprotnom smjeru, ali zbog zakašnjele vrijednosti iz prethodnih ciklusa djeluje u pogrešnom smjeru i uzrokuje skokove u napetosti.

Trenutni parametri regulatora ne daju zadovoljavajuću kvalitetu regulacije jer se pojavljuju skokovi u napetosti i kada nema promjene smjera kretanja kontakt točke. Iz tog razloga pristupilo se finom podešavanju regulatora mijenjajući njegove parametra za male iznose.



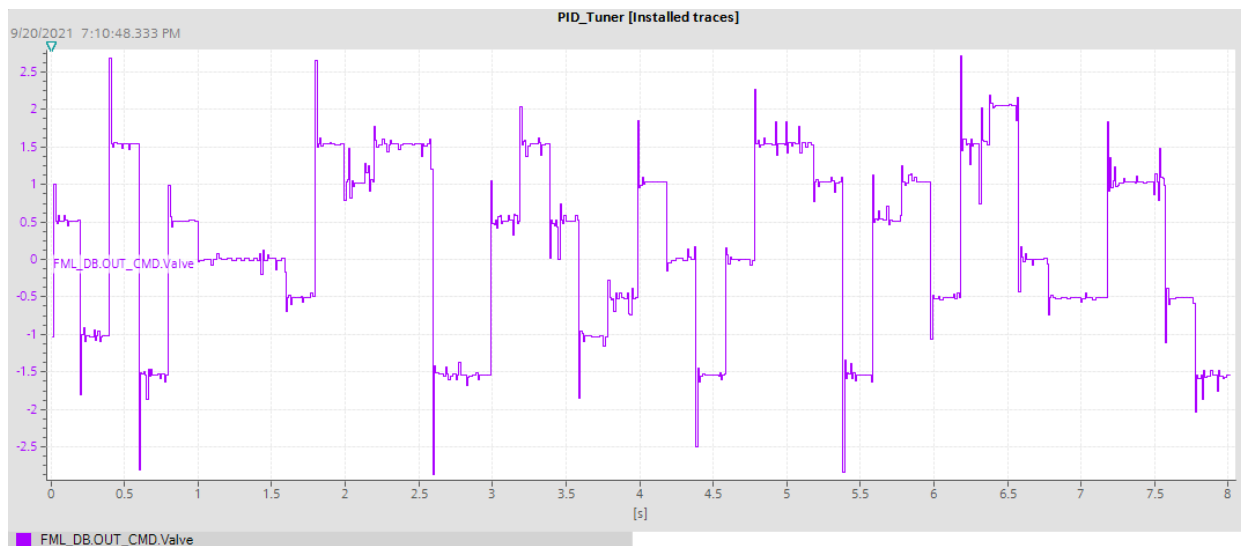
**Sl. 3.24.** *Trenutna i zadana vrijednost napetosti trake,  $K_p = 0.04$ ,  $K_i = 0.0085$ .*

Na slici 3.24. nalaze se rezultati promjene proporcionalnog pojačanja na manji iznos, što je uzrokovalo još veće skokove u napetosti trake.



**Sl. 3.25.** *Trenutna i zadana vrijednost napetosti trake,  $K_p = 0.059$ ,  $K_i = 0.0085$ .*

Na slici 3.25. nalaze se rezultati promjene proporcionalnog pojačanja na veći iznos, što je uzrokovalo poboljšanje kvalitete regulacije i dalo zadovoljavajuće rezultate. Promjena integralnog pojačanja nije pridonijela značajnijem poboljšanju kvalitete regulacije.



**Sl. 3.26.** *Otvorenost ventila tijekom vremena*

Na slici 3.26. je prikazana promjena vrijednosti otvorenosti ventila tijekom vremena, koja se nalazi u željenom rasponu rada ventila od  $\pm 5\%$ .



## 4. ZAKLJUČAK

Zadatak ovog diplomskog rada je izrada simulatora za proces toplog valjanja te regulacija napetosti trake tijekom valjanja. Izrada simulatora je provedena simulirajući senzore tlakova i pozicije te djelovanja servo ventila. Iz matematičkog modela je dobivena ukupna sila na cilindru koja je korištena u svrhu regulacije napetosti. Napravljeno je sučelje čovjek-stroj koje omogućava upravljanje procesom i njegovo nadgledanje putem grafičkog sučelja. Programska podrška je izrađena koristeći programski paket Tia Portal.

Iz dobivenih odziva dobivenih tijekom procesa testiranja vidljivo je da kašnjenje ventila ima velik utjecaj na regulaciju i da parametre regulatora treba odrediti u skladu s ovim kašnjenjem. U ovom slučaju manje proporcionalno pojačanje je dalo bolje rezultate jer smanjuje oscilacije uzrokovane kašnjenjem ventila. Pojačanje ne smije biti niti premalo jer sustav može postati trom.

Nakon što je dodana smetnja na postavke procesa, zaključeno je da trenutni iznosi pojačanja nisu bili zadovoljavajući te se pristupilo finom podešavanju parametara. Tijekom finog podešavanja došlo se do zaključka da je proporcionalno pojačanje bilo premalo što je uzrokovalo preslabu reakciju regulatora na grešku što je uzrokovalo brzo akumuliranje greške tijekom vremena. Integralno pojačanje je ostalo na istoj vrijednosti uslijed zadovoljavajućeg odziva.

Iako su rezultati zadovoljavajući postoji dosta mjesta za povećanje kvalitete regulacije. PI regulator s konstantnim parametrima može postići određenu razinu kvalitete regulacije u slučaju reguliranja zašumljenih veličina poput napetosti. Jedan od načina bi bio korištenje adaptivne regulacije, što predstavlja slučaj gdje se parametri regulatora mijenjaju tijekom regulacije ovisno o stanju u kojem se proces nalazi. Jedno od rješenja koje se u praksi dosta koristi je i održavanje kontakt točke na približno konstantnoj vrijednosti, tako da se regulira duljina trake između postolja.

## LITERATURA

1. [https://en.wikipedia.org/wiki/Rolling\\_\(metalworking\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Rolling_(metalworking)) - Proces toplog valjanja, Lipanj 2021.
2. <https://www.manufacturingguide.com/en/hot-rolling-sheets> - Toplo valjanje, Lipanj 2021.
3. <https://www.metrosteel.com.au/the-6-steps-to-modern-steel-production-explained/> - Proces proizvodnje čelika, Lipanj 2021.
4. <https://www.newsteelconstruction.com/wp/an-introduction-to-steelmaking> - Postrojenje za proizvodnju čelika, Lipanj 2021.
5. [https://www.danieli.com/en/products/products-processes-and-technologies/hot-strip-mills\\_26\\_51.htm](https://www.danieli.com/en/products/products-processes-and-technologies/hot-strip-mills_26_51.htm) - Pogon za toplo valjanje, Lipanj 2021.
6. <https://www.bearing-news.com/inside-the-steel-industry-how-bearings-survive-under-very-harsh-conditions/> - Radni i pomoćni valjci, Lipanj 2021.
7. <https://www.butechbliss.com/our-products/rolling-mill-equipment/> - Vodilica, Lipanj 2021.
8. [https://www.researchgate.net/publication/336332538\\_Optimal\\_feedforward\\_control\\_of\\_hydraulic\\_drive\\_systems\\_with\\_long\\_pipelines](https://www.researchgate.net/publication/336332538_Optimal_feedforward_control_of_hydraulic_drive_systems_with_long_pipelines) - Sustav upravljanja vodilicom, Lipanj 2021.
9. <http://jnhcic.com/index.php/new/index/g/e/id/22.html> - Hidraulički cilindar, Lipanj 2021.
10. [https://hr.wikipedia.org/wiki/PLC\\_\(ra%C4%8Dunalo\)](https://hr.wikipedia.org/wiki/PLC_(ra%C4%8Dunalo)) - PLC, Lipanj 2021.
11. Danieli Automation, Finishing mill functional description, Lipanj 2021.

## SAŽETAK

Cilj je izraditi simulator za potrebe ubrzavanja procesa puštanja čeličane u pogon. Potrebno je simulirati proces toplog valjanja te je u isto vrijeme potrebno regulirati napetost čelične trake. Simulirani proces se sastoji od dva postolja s valjcima, ventila, cilindra i vodilice pomoću koje se regulira napetost. Programska podrška je napisana koristeći Tia Portal te je namijenjena za implementaciju na PLC uređaj. Programska podrška se sastoji od simulacije izvršnih i mjernih članova, algoritma za upravljanje i korisničkog sučelja na kojem se prikazuje trenutno stanje procesa te iz kojega je moguće upravljane procesom. Algoritam za upravljanje se sastoji od dvije vrste regulacije, a to su regulacije pozicije i regulacija napetosti. Korišten je PI regulator.

**Ključne riječi: Toplo valjanje, vodilica, napetost trake, simulator, regulator.**

## **ABSTRACT**

Title: Simulator of looper control system for strip tension control in a hot rolling process.

The goal is to create a simulator for the purpose of speeding up the process of steel plant commissioning. It is necessary to simulate a hot rolling process and at the same time it is necessary to control the tension of the steel strip. The simulated process consists of two stands with rollers, a valve, a cylinder and a looper with the help of which tension is controlled. The software is written using Tia Portal and is intended for implementation on a PLC device. Software consists of a simulation of actuators and sensors, a control algorithm and a user interface that displays the current state of the process and from which the process control is possible. The control algorithm consists of two types of control, which are position control and tension control. PI controller is used.

**Key words: Hot rolling, looper, strip tension, simulator, controller.**

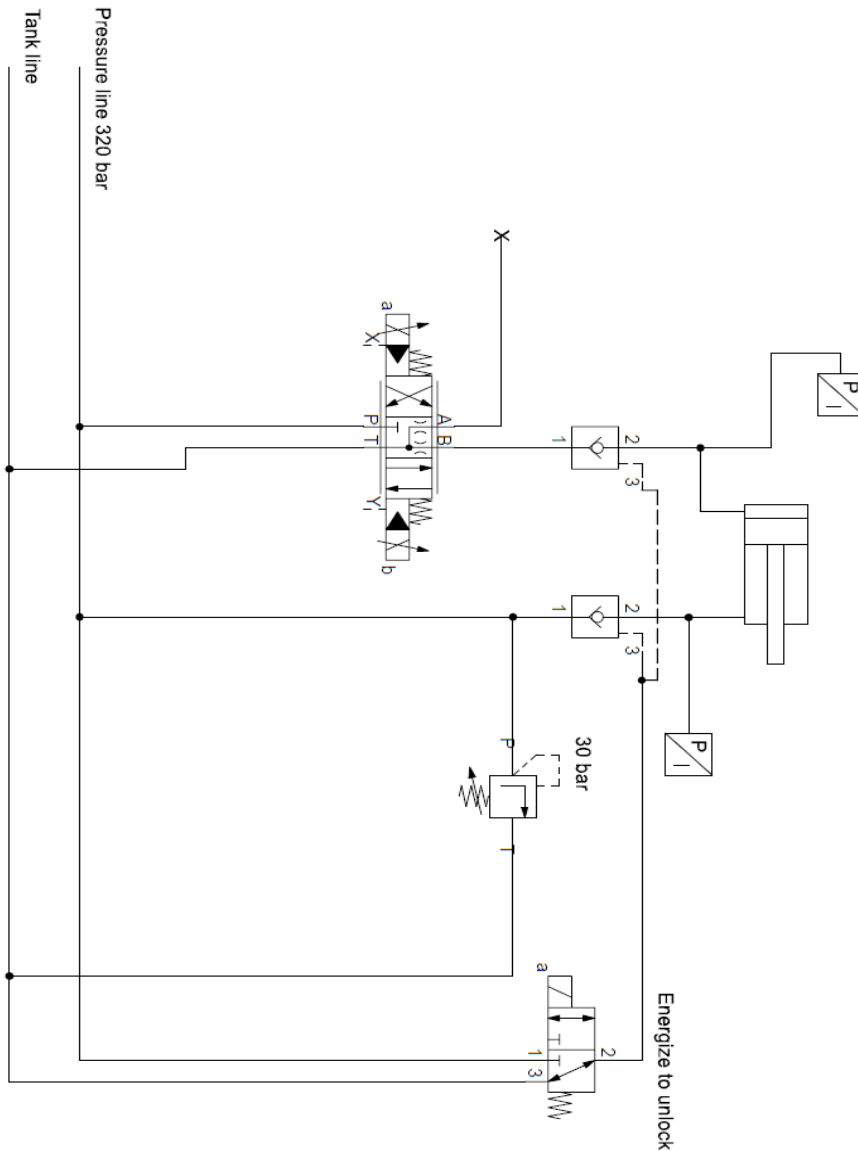
## ŽIVOTOPIS

Denis Lazor rođen je 5. srpnja 1997. u Čupriji. U Slatini je završio osnovnu školu te je nakon toga upisao Opću gimnaziju. Završetkom gimnazije 2016. godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku. Nakon uspješno završenog sveučilišnog preddiplomskog studija računarstva upisuje diplomski studij računarstva, smjer Robotika i umjetna inteligencija na kojem trenutačno završava 2. godinu studija.

# PRILOZI

## P.1. Hidraulička shema upravljanja cilindrom

Schema prikazuje cjelokupan hidraulički sustav upravljanja cilindrom koji je po dijelovima prikazan i objašnjen u poglavlju [2.2.1.](#)



Sl. P.1. Hidraulička shema upravljanja cilindrom

## P.2. Dopunske jednadžbe

Dopunske jednadžbe predstavljaju nadopunu jednadžbi dinamičkog modela procesa (pogledati poglavlje 2.3., jednadžba 2-9).

Volumen ulja u donjoj komori:

$$V_b = h(t - T_d) * A_b. \quad (P - 1)$$

Protok ulja servo ventila:

$$Q(t - T_d) = Q_{max} * \frac{X(t - T_d)}{100}. \quad (P - 2)$$

Položaj klipa unutar cilindra(visina nestlačenog ulja):

$$h(t - T_d) = h_{uk}(t - T_d) - h_{comp}(t - T_d). \quad (P - 3)$$

Tab. P.1. *Popis korištenih oznaka u dopunskim jednadžbama*

|               |  |
|---------------|--|
| $h$           | Položaj klipa unutar cilindra [mm]                   |
| $Q_{max}$     | Maksimalan protok servo ventila [mm <sup>3</sup> /s] |
| $X$           | Otvorenost servo ventila [%]                         |
| $h_{uk}$      | Ukupna visina ulja u cilindru [mm]                   |
| $h_{comp}$    | Visina stlačenog ulja u cilindru [mm]                |
| $LST$         | Vrijeme izvođenja ciklusa PLC-a u prošlom koraku [s] |
| $h_{contact}$ | Položaj klipa u kontakt točki [mm]                   |

### **P.3. Projekt u Tia Portal-u**

Nalazi se na CD-u.