Upravljanje žičnom prugom u postupku vrućeg valjanja

Mrvčić, Matija

Master's thesis / Diplomski rad

2025

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:857121

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-24**

Repository / Repozitorij:

FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repozitory

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 105

UPRAVLJANJE ŽIČNOM PRUGOM U POSTUPKU VRUĆEG VALJANJA

Matija Mrvčić

Zagreb, veljača 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 105

UPRAVLJANJE ŽIČNOM PRUGOM U POSTUPKU VRUĆEG VALJANJA

Matija Mrvčić

Zagreb, veljača 2025.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

Zagreb, 30. rujna 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 105

Pristupnik:	**Matija Mrvčić (0036524136)**
Studij:	Informacijska i komunikacijska tehnologija
Profil:	Automatika i robotika
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Vinko Lešić

Zadatak: **Upravljanje žičnom prugom u postupku vrućeg valjanja**

Opis zadatka:

Vruće valjanje žice složen je industrijski proces koji zahtijeva preciznu koordinaciju različitih podsustava kako bi se osigurala kvaliteta konačnog proizvoda. Žična pruga sastoji se od niza valjaka kroz koje prolazi metal na visokim temperaturama. U radu je potrebno sintetizirati upravljački sustav za međustupanjsku regulaciju i smanjenje sile napetosti između različitih dijelova pruge uz postizanje stabilnosti procesa i minimizaciju gubitaka materijala. Potrebno je također uspostaviti sustav za nadzor, prikupljanje, pohranu i prikaz podataka te komunikaciju sa senzorima i aktuatorima putem standardiziranih protokola i baze podataka. Implementaciju opisanog zadatka potrebno je provesti na odabranoj stvarnoj komercijalnoj platformi i odabranom segmentu za obradu sirovina kao dijela procesa proizvodnje.

Rok za predaju rada: 14. veljače 2025.

Zahvaljujem se profesoru Vinku Lešiću i tvrtki ABB d.o.o. na pomoći pri izradi diplomskog rada.

Sadržaj

1. Uvod **4**

2. Proces i postrojenje **5**

2.1. Valjanje 5

2.1.1. Vruće valjanje 5

2.2. Vrste valjaonica 7

2.3. Sustav za automatizaciju 8

3. Upravljanje procesom **9**

3.1. Protok mase 9

3.2. Konfiguracija valjaonice 11

3.3. Praćenja glave materijala 12

3.3.1. Korištenje senzora 13

3.3.2. Nadzor senzora 14

3.3.3. Praćenje 15

3.3.4. Otkrivanje oštećenja materijala (engl. *cobble*) 16

3.3.5. Brzina materijala 17

3.4. Kontrola minimalne napetosti 18

3.4.1. Mjerenje momenta 20

3.4.2. Kontrola napetosti 21

3.5. Automatska kontrola petlje 22

3.5.1. Mjerenje položaja petlje 23

3.5.2. Sekvenca kontrole petlje 24

3.5.3. Pred formiranje petlje 25

3.5.4. Oblikovanje petlje 26

3.5.5. Kontrola petlje 26
3.5.6. Izlazak repa gredice 27
3.5.7. Alarmi 27
3.5.8. Prilagodba pojačanja kontrole 28
3.6. Kaskadno upravljanje 30
3.6.1. Način rada električnih pogona 31
3.6.2. Odabir brzine proizvodnje 31

4. Konfiguracija projekta 32
4.1. Komunikacijski protokoli 33
4.1.1. TCP/IP 33
4.1.2. Profibus 33
4.1.3. DDCS 34
4.1.4. CEX Bus 34
4.2. Hardver 35
4.2.1. ABB AC 800PEC 35
4.2.2. PLC moduli 36
4.2.3. HMI PP881 38
4.2.4. Električni pogoni 39
4.3. Softver 41
4.3.1. Compact Control Builder M 41
4.3.2. Panel Builder 800 42
4.3.3. Plant Explorer 43
4.3.4. EPLAN 44

5. Rezultati i rasprava 45
5.1. Stvarni sustav upravljanja 45
5.2. Električne sheme 47
5.3. HMI 48
5.4. SCADA 51
5.5. Programski kod 53
5.5.1. Struktura koda 53
5.5.2. Implementacija praćenja glave materijala 55

5.5.3. Implementacija kontrole minimalne napetosti 56
5.5.4. Implementacija automatske kontrole petlje 57
5.5.5. Implementacija zadavanja reference brzine 58
5.6. Simulacijski odzivi upravljanja 59

6. Zaključak 65

Literatura 66

Sažetak 67

Abstract 68

1. Uvod

Automatizacija u industriji predstavlja ključnu komponentu u modernizaciji proizvodnih sustava, omogućujući povećanje produktivnosti, smanjenje troškova, poboljšanje kvalitete proizvoda i povećanje sigurnosti radnih okruženja. Sustav automatizacije valjaonice za proizvodnju bakrene žice (engl. *wire rod mill*) predstavlja složen inženjerski izazov koji zahtijeva integraciju različitih tehnologija i komponenti kako bi se osigurala spomenuta visoka kvaliteta proizvoda i efikasnost procesa. Glavni cilj ovoga rada je implementacija sustava upravljanja valjaonice za proizvodnju bakrene žice (WRM) temeljenog na ABB AC 800PEC kontroleru koji koordinira rad S800 I/O i S100 I/O modula te DCS880 električnih pogona. Rad obrađuje proces vrućeg valjanja koji omogućuje plastičnu deformaciju metala radi izrade različitih metalnih proizvoda, uključujući žice, šipke i profile. Razvoj sustava upravljanja temelji se na međustupanjskoj regulaciji napetosti žice tijekom vrućeg valjanja, optimizaciji protoka materijala i prevenciji oštećenja uz primjenu naprednih algoritama kontrole. Ključni tehnički izazovi uključuju sinkronizaciju brzine valjaka u realnom vremenu, minimalnu napetost materijala tijekom valjanja i implementaciju sigurnosnih funkcija poput detekcije anomalija kao što su oštećenja glave materijala. Implementacija integrira razne senzorske sustave, komunikacijske protokole kao i SCADA sučelje na ABB 800xA platformi s tri HMI uređaja. Automatizacija u industriji nije samo stvar tehnologije, već i sustavnog pristupa koji uključuje ljude, procese i tehnologiju. Integracija svih ovih elemenata u jedan koherentan sustav omogućuje optimizaciju proizvodnje, smanjenje grešaka i povećanje učinkovitosti, a sve u svrhu postizanja visoke kvalitete i konkurentnosti na tržištu.

2. Proces i postrojenje

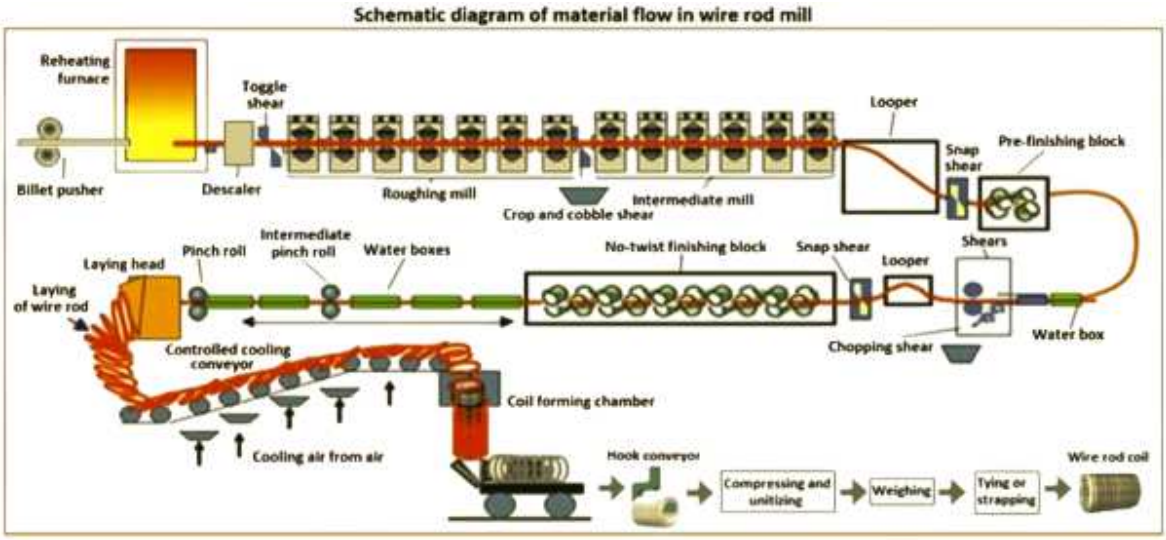
2.1. Valjanje

Valjanje je složen industrijski proces koji se koristi u metalurgiji i proizvodnji materijala za smanjivanje debljine ili promjenu poprečnog presjeka različitih materijala, najčešće metala. Ovaj proces ostvaruje se primjenom sila pritiska kroz skup valjaka, koji su postavljeni u seriji. Osnovni princip valjanja temelji se na prolasku metalnog materijala između dva ili više valjaka koji se rotiraju. Kada se materijal pomiče kroz ove valjke, sila koja se primjenjuje na njega dovodi do deformacije, čime se smanjuje njegov poprečni presjek. Ovaj proces ne samo da mijenja dimenzije materijala, već također može značajno poboljšati njegova mehanička svojstva. Proces valjanja može povećati čvrstoću i otpornost materijala na oštećenja i omogućiti stvaranje različitih oblika i dimenzija, što ga čini izuzetno korisnim u industriji. Prema različitim svojstvima procesa razlikujemo vruće i hladno valjanje.

2.1.1. Vruće valjanje

Vruće valjanje složen je industrijski proces obrade metala koji se odvija na temperaturama iznad točke rekristalizacije materijala, obično između 800°C i 1200°C za bakar. Vruće valjanje koristi se za proizvodnju različitih metalnih proizvoda, uključujući žice, šipke i profile. Na slici 2.1. prikazan je dijagram protoka materijala iz kojeg su vidljivi svi koraci kroz koje prolazi materijal u procesu. Ulazni materijal je metalna gredica koja se najprije zagrijava u peći, a zatim se transportira do valjaonice gdje prolazi kroz više radnih stanova. Svaki valjak smanjuje debljinu materijala dok ga oblikuje u željeni oblik. Postoji nekoliko ključnih faza procesa. U prvoj fazi materijal se zagrijava na potrebnu temperaturu kako bi se postigla plastičnost. U drugoj fazi materijal se valja, odnosno prolazi kroz seriju valjaka koji smanjuju debljinu i oblikuju materijal. Zbog velike brzine

valjanja žičanih šipki, pad temperature tijekom valjanja je mali ili čak dolazi do povećanja temperature. Kako bi se osigurala kvaliteta proizvoda, potrebno je provesti hlađenje materijala. Nakon izlaska iz valjaonice, materijal se često hladi kako bi se stabilizirale njegove karakteristike.



Slika 2.1. Dijagram protoka materijala [1]

Jedna od prednosti vrućeg valjanja je povećana plastičnost. Materijal je lakše oblikovati pri visokim temperaturama. Druga prednost je smanjenje napetosti. Vruće valjanje smanjuje unutarnje napetosti u metalu, čime se poboljšavaju mehanička svojstva. Također, dobiva se na produktivnosti jer sam proces omogućuje bržu proizvodnju velikih količina materijala. Unatoč prednostima, vruće valjanje nosi i određene izazove kao što su kontrola temperature koja je ključna za kvalitetu proizvoda, smanjenje gubitaka materijala i detekcija oštećenja materijala (engl. *cobble*) koje može uzrokovati oštećenja valjačkih stanova.

2.2. Vrste valjaonica

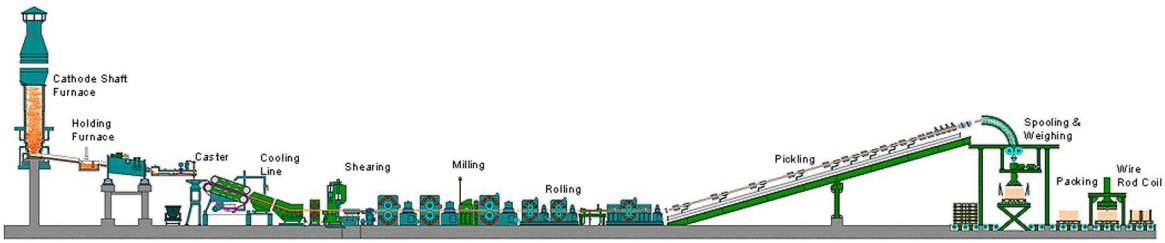
U industriji metalurgije, različiti tipovi valjaonica koriste se za obradu metala kroz proces vrućeg valjanja. Svaki tip valjaonice ima specifične karakteristike i primjene, ovisno o vrsti materijala koji se obrađuje i konačnom proizvodu koji se želi postići. Grube valjaonice (engl. *roughing mills*) koriste se u prvoj fazi procesa gdje se materijal značajno reducira. Završne valjaonice (engl. *finishing mills*) koriste se za postizanje konačnih dimenzija i kvalitete površine proizvoda.

Ovisno o vrsti proizvoda koriste se valjaonice za proizvodnju tankih traka (engl. *thin slab hot strip mills*) , valjaonice za proizvodnju šipki (engl. *bar mills*) i valjaonice za proizvodnju žice (engl. *wire rode mills*) koje se obrađuju u ovome radu. Ulazni materijal su metalne gredice (engl. *billets*) koje se koriste kao sirovina za daljnju obradu, dok je konačni produkt žičana šipka (engl. *wire rods*) promjera od 5 do 20 mm.

Razumijevanje različitih tipova valjaonica i njihovih funkcija ključno je za optimizaciju procesa vrućeg valjanja i postizanje visokokvalitetnih proizvoda. Odabir valjaonice ovisi o specifičnim potrebama proizvodnje, vrsti materijala i konačnom obliku proizvoda. U budućnosti, integracija naprednih tehnologija automatizacije može dodatno poboljšati efikasnost ovih sustava.

2.3. Sustav za automatizaciju

Na slici 2.2. prikazan je stvarni sustav koji je potrebno automatizirati. Sustav se sastoji od tri dijela: ulazni dio gdje materijal ulazi na traku, procesna linija na kojoj dolazi do stanjivanja i obrade žice, i završni dio u kojem se obavlja završna obrada i namatanje žice.



Slika 2.2. Shema postrojenja

Ulazni dio sustava omogućuje pravilno doziranje i transport materijala do procesne linije. Ovdje se materijal, obično u obliku metalnih gredica, unosi na transportnu traku koja ga vodi prema valjaonicama.

Procesna linija glavni je dio valjaonice gdje se odvija stvarno vruće valjanje. Ovdje materijal prolazi kroz niz valjaka koji ga oblikuju i smanjuju njegov presjek. Ključne komponente ovog dijela su valjački stanovi, odnosno serija valjaka koji su postavljeni tako da omogućuju višekratnu obradu materijala. Svaki valjak ima specifičnu funkciju i način upravljanja, od grube obrade do završnog oblikovanja. Ovaj sustav koristi razne senzore i PID regulatore za automatsko podešavanje. Senzori za praćenje glave i repa materijala omogućuju precizno praćenje položaja materijala unutar valjaonice, što je ključno za kontrolu procesa i sprječavanje oštećenja materijala (engl. *cobble*).

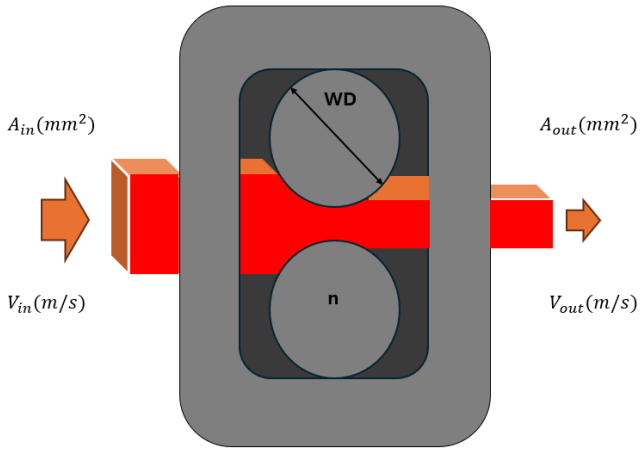
Završni dio sustava odgovoran je za završnu obradu i pakiranje proizvoda nakon što je proizvod prošao kroz procesnu liniju. Nakon vrućeg valjanja, žica se mora brzo ohladiti kako bi se stabilizirala njezina svojstva. Nakon hlađenja, žica se reže na željene duljine pomoću automatskih rezača i namata u kolutove ili pakira u šipke, ovisno o specifičnim zahtjevima kupca.

3. Upravljanje procesom

3.1. Protok mase

Polazna jednadžba 3.1 je jednadžba protoka mase. Masa koja uđe u valjački stan jednaka je masi koja izađe iz valjačkog stana.

$$M_{in} = M_{out} \tag{3.1}$$



Slika 3.1. Protoka mase kroz valjački stan

Primjer valjačkog stana i oznake prikazane su na slici 3.1., a relacije su opisane sljedećim jednadžbama:

1. *zakon očuvanja količine gibanja:*

$$M_{\text{in}} \cdot V_{\text{in}} = M_{\text{out}} \cdot V_{\text{out}}, \tag{3.2}$$

2. *zakon očuvanja protoka:*

$$A_{\text{in}} \cdot V_{\text{in}} = A_{\text{out}} \cdot V_{\text{out}}. \tag{3.3}$$

Iz jednadžbe 3.3 možemo izvesti:

$$\frac{A_{\text{in}}}{A_{\text{out}}} = \frac{V_{\text{out}}}{V_{\text{in}}} = R\text{-Faktor}. \tag{3.4}$$

Objašnjenje oznaka:

- M - masa (koja se računa kao površina A puta dužina L puta gustoća ρ): $M = A \cdot L \cdot \rho$
- A - površina presjeka materijala
- L - dužina elementa
- ρ - gustoća materijala
- V - brzina materijala
- R-Faktor - faktor koji predstavlja odnos između površina i brzina materijala u dvije različite točke materijala

3.2. Konfiguracija valjaonice

Prilikom postavljanja valjaonice odabire se konfiguracija valjaonice, odnosno radni valjački stanovi i njihovi promjeri, pretvarači, funkcije upravljanja između stanova, način rezanja škara, način detekcije oštećenja materijala (engl. *cobble*), redukcijski faktor (R-faktor) i željena izlazna brzina odabranog zadnjeg valjačkog stana.

Redukcijski faktor je kvocijent površine poprečnog presjeka ulaznog i izlaznog materijala. To je također kvocijent brzine šipke nakon i prije valjačkog stana. Prikladno je koristiti redukcijski faktor kao parametar za postavljanje valjaonice jer korekcija jednog R-faktora ne utječe na vrijednosti ostalih R-faktora. R-faktori mogu se koristiti za procjenu i izolaciju istrošenosti valjka i drugih lokalnih promjena na svakom razmaku valjka pojedinačno. Stvarni promjer bačve valjka postavlja se zasebno nakon promjene valjka, iako se postiže automatska kompenzacija utora valjka, budući da dimenzija utora valjka ostaje nepromijenjena nakon brušenja valjka. Na ovaj način, informacije potrebne za postavljanje valjaonice su pojednostavljene, što zauzvrat rezultira sigurnijim postupcima postavljanja i smanjenjem oštećenja materijala na početku valjanja nove dimenzije proizvoda.

Prikaz broja okretaja u minuti u postotku maksimalne brzine za svaki motorni pogon omogućuje provjeru unaprijed postavljenih referenci brzine za svaki stan kako bi se osiguralo da postoji dovoljna razlika između postavljene brzine i maksimalne brzine pogona.

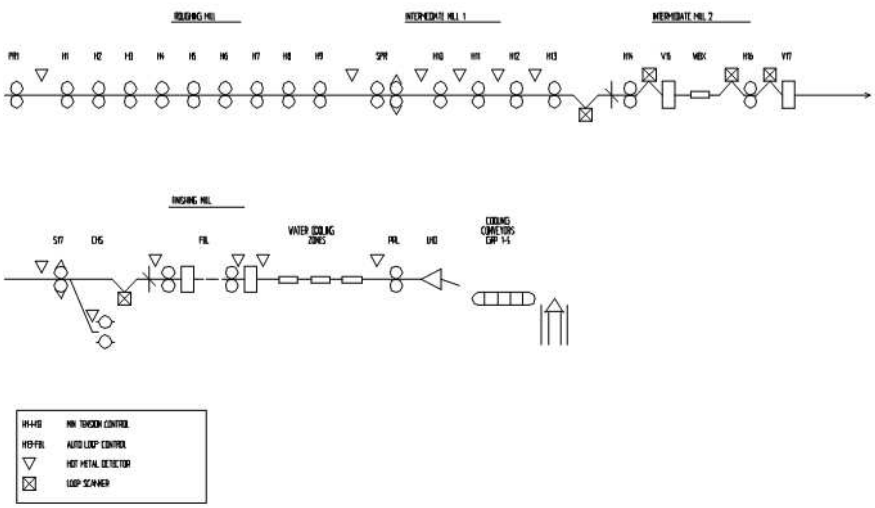
3.3. Praćenja glave materijala

Funkcija preciznog praćenja glave materijala (engl. *tracking*) pruža točne informacije o trenutnoj lokaciji glave i zadnjeg dijela trupca koji prolaze kroz valjaonicu. Informacije o točnom položaju potrebne su za točnu kontrolu vremena i redoslijeda funkcija automatske kontrole glavnih i pomoćnih pogona, kao što su referentna raspodjela brzine, automatska kontrola petlje, kontrola minimalne napetosti i iznimno precizna kontrola škara. Praćenje se temelji na numeričkoj integraciji brzine materijala tijekom vremena. Detektori vrućeg materijala, skeneri petlje i indikacije valjajućeg opterećenja koriste se za pokretanje i ažuriranje funkcije praćenja. Praćenje se automatski prilagođava novim brzinama i konfiguracijama valjaonice, bez potrebe za podešavanjem prilikom valjanja novog materijala.

Pravi položaj glave i repa materijala očitan je detektorima vrućeg materijala (engl. *hot metal detector* (HMD)) koji se nalaze u odjeljku između valjačkih stanova prije svakog stana. Položaj napredujućih krajeva gredica se tako kontinuirano ažurira unutar svakog međustančanog odjeljka. Praćenje se temelji na numeričkoj integraciji brzine proizvodnje razmaka uzvodnog valjka. Funkcija praćenja generira signal In Roll Gap, koji pokazuje da je trupac ušao u nizvodni razmak valjaka. Signali upozorenja ($W1, W2\ i\ W3$) generiraju se kako bi pokazali da se trupac približava unutar duljine upozorenja ili vremena upozorenja, od prolaska nizvodnog razmaka valjaka. Ako praćenje, ali ne i senzor, pokaže da je materijal prošao razmak valjaka, praćenje generira COBBLE alarm (alarm greške). Smatra se da funkcija praćenja, koja prati gredicu od gornjeg stana do nizvodnog stana, pripada nizvodnom stanu, bez obzira jesu li stanovi odabrani za valjanje u trenutačnoj konfiguraciji valjaonice. Za nadzor signala senzora potreban je signal detekcije materijala (MD), trenutačno uzvodno lociranog razmaka valjka. Kako se položaj, a time i naziv ovog razmaka valjka, mijenja s trenutačnom konfiguracijom valjaonice, izvor signala senzora varira.

3.3.1. Korištenje senzora

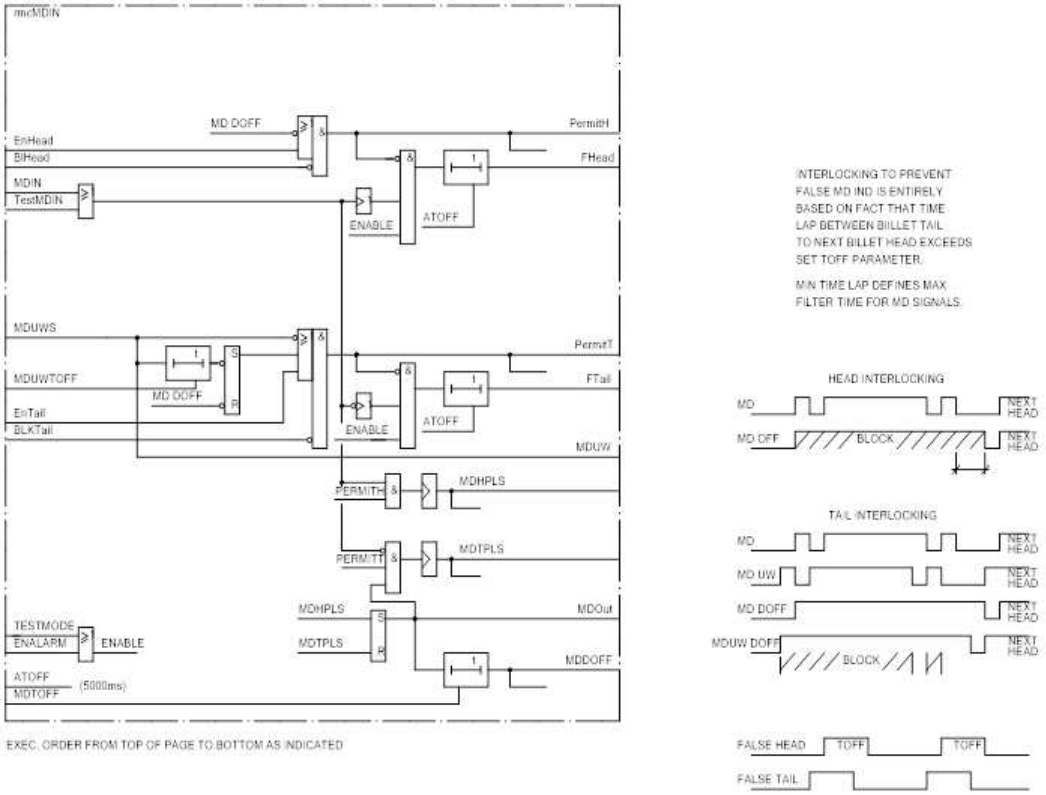
Vrsta senzora ovisi o rasporedu i položaju duž valjaonice. Senzori sile materijala (engl. *load material detection* (LMD)) koriste se u grubim dijelovima valjaonice. LMD signal generira se iz detektora razine, očitavajući zakretni moment potreban glavnom pogonu za smanjenje materijala. Da bi bila pouzdana, razina momenta valjanja mora premašiti 25 posto nazivnog momenta za sve proizvode koji se valjaju. Detekcija opterećenja ne može se koristiti u sekcijama između stanova koje se nalaze neposredno uzvodno ili nizvodno od sekcije kontrolirane automatskom petljom jer se okretni moment susjednih glavnih pogona povremeno remeti promjenama brzine koje generira kontrola petlje. Za provjeru valjanosti, otkrivanje opterećenja mora biti dopunjeno jednim detektorom vrućeg materijala (HMD). Ovaj detektor trebao bi se nalaziti na početku istog dijela valjaonice kako bi se osiguralo da pokazatelj opterećenja odražava okretni moment, a ne okretni moment potreban za povremenu promjenu brzine ili nizove pokretanja i zaustavljanja. Za praćenje koje vodi do stana N, LMD indikacija djeluje kao detektor vrućeg materijala, smješten u razmaku valjaka istog stana. Detektori vrućeg materijala koriste se u dijelovima gdje nije primjenjiva indikacija opterećenja i skener petlje nije dostupan. U dijelovima kontroliranim petljom, skener petlje djeluje kao HMD, bez obzira na to je li dio između stanova odabran za automatsku kontrolu petlje. Da bi se nadgledalo da je kraj glave gredice prošao kroz razmak valjaka i da glava materijala nije oštećena, potreban je *cobble* senzor. Ovaj senzor je najčešće identičan senzoru koji se koristi za ažuriranje praćenja. Primjer rasporeda senzora prikazan je na slici 3.2.



Slika 3.2. Lokacije senzora za praćenje

3.3.2. Nadzor senzora

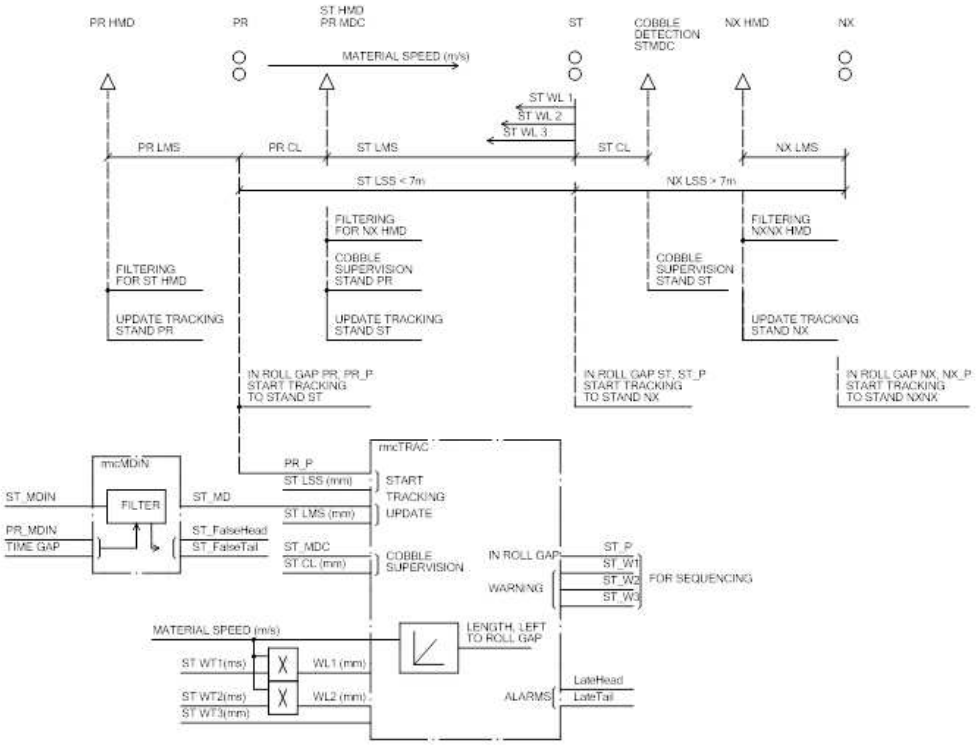
Ulazni signali detekcije materijala (MDIN) generirani od HMD senzora, skenera petlje ili indikacija opterećenja, moraju se međusobno zaključati. Svi digitalni ulazni MDIN signali prolaze funkciju filtriranja. Filtriranje se vrši pomoću funkcijskog bloka rmcMDIN, zasebno za svaki ulazni signal. Alarmi povezani s funkcijom praćenja su: indikacija lažne glave (engl. *false head*), indikacija lažnog repa (engl. *false tail*), indikacija kasne glave, indikacija kasnog repa i otkriveno oštećenje. Slika 3.3. prikazuje sekvencijski dijagram filtriranja i generiranja alarma.



Slika 3.3. Sekvencijski dijagram filtriranja i generiranja alarma

3.3.3. Praćenje

Slika 3.4. prikazuje funkciju kontrole praćenja. Funkcija praćenja integrira brzinu materijala (m/s) tijekom vremena kako bi izlazni signali In Roll Gap, P i upozorenja W1, W2 i W3 bili neovisni o promjenama u brzini materijala. Praćenje se vrši korištenjem funkcijskog bloka rmcTRAC, pojedinačno za svaku sekciju između stanova u valjaonici. Funkcija praćenja stanova prati glavu i kraj trupca od središnje linije uzvodno smještenog valjka do središnje linije nizvodnog valjka. Funkcija generira izlazne signale za označavanje da se kraj glave i rep približavaju valjku unutar postavljenog vremena upozorenja, od prolaska razmaka valjaka N. Vrijeme upozorenja prilagođeno je potrebama automatske kontrole petlje i kontrole minimalne napetosti odjeljaka.



Slika 3.4. Funkcija praćenja

Kada kraj glave gredice uđe u uzvodni razmak valjaka PR, funkcija praćenja ovog razmaka valjanja generira signal unutarnjeg razmaka valjaka PR_P. Time se pokreće funkcija praćenja nizvodnog stana ST. Integrator praćenja unaprijed je postavljen s udaljenošću između stanova PR i ST. Integrator počinje pratiti čelni kraj koji se nastavlja gibati integrirajući signal brzine materijala tijekom vremena prema nuli od unaprijed postavljene duljine. Pročišćeni MD signal iz detektora materijala koristi se za ažuriranje praćenja s pravim položajem senzora i za početak praćenja, ako još nije pokrenuto signalom *In Roll Gap* uzvodnog stana. *Cobble* detektor (MDC) koji se nalazi nizvodno od razmaka valjaka, koristi se za označavanje da je materijal prošao razmak valjaka i prekida funkciju praćenja. Funkcija praćenja može istovremeno pratiti rep i glavu kroz odjeljak između stanova.

3.3.4. Otkrivanje oštećenja materijala (engl. *cobble*)

Praćenje prednjeg dijela nadzire da prednji kraj prolazi razmak valjaka. Kada izlaz integratora pokazuje da bi kraj glave trebao biti u položaju detektora oštećenja materijala (MDC senzora) lociranog na udaljenosti prema duljini oštećenja materijala CL nizvodno od razmaka valjanja, promatra se MDC signal senzora. Ako senzor ne pokazuje glavu materijala unutar vremenskog odgađanja indikacije Head Cobble (HCIndTOn) smatra se da je glava materijala zaglavljen u razmaku valjaka. Situacija rezultira indikacijom Head Cobble (ST_HCInd) iz nadzorne funkcije. Indikacija oštećenja materijala rezultira poništavanjem signala In Roll Gap i prekidom praćenja.

3.3.5. Brzina materijala

Kako linearna informacija o brzini materijala daje osnovu za funkciju praćenja, od iznimne je važnosti da informacija o brzini unutar kontrole bude u skladu sa stvarnom brzinom materijala. Korekcija utora potrebna je za pretvorbu promjera valjka u efektivni promjer, a upravljačka jedinica koristi ju za transformaciju informacija o linearnoj brzini u brzinu rotacije valjka. Korekcija se izračunava iz dizajna razmaka valjaka:

$$\text{MaterialSpeed (m/s)} = \frac{\text{Rpm} \times 3.14 \times (\text{Dia} - \text{Groove})}{60 \times Z}. \tag{3.5}$$

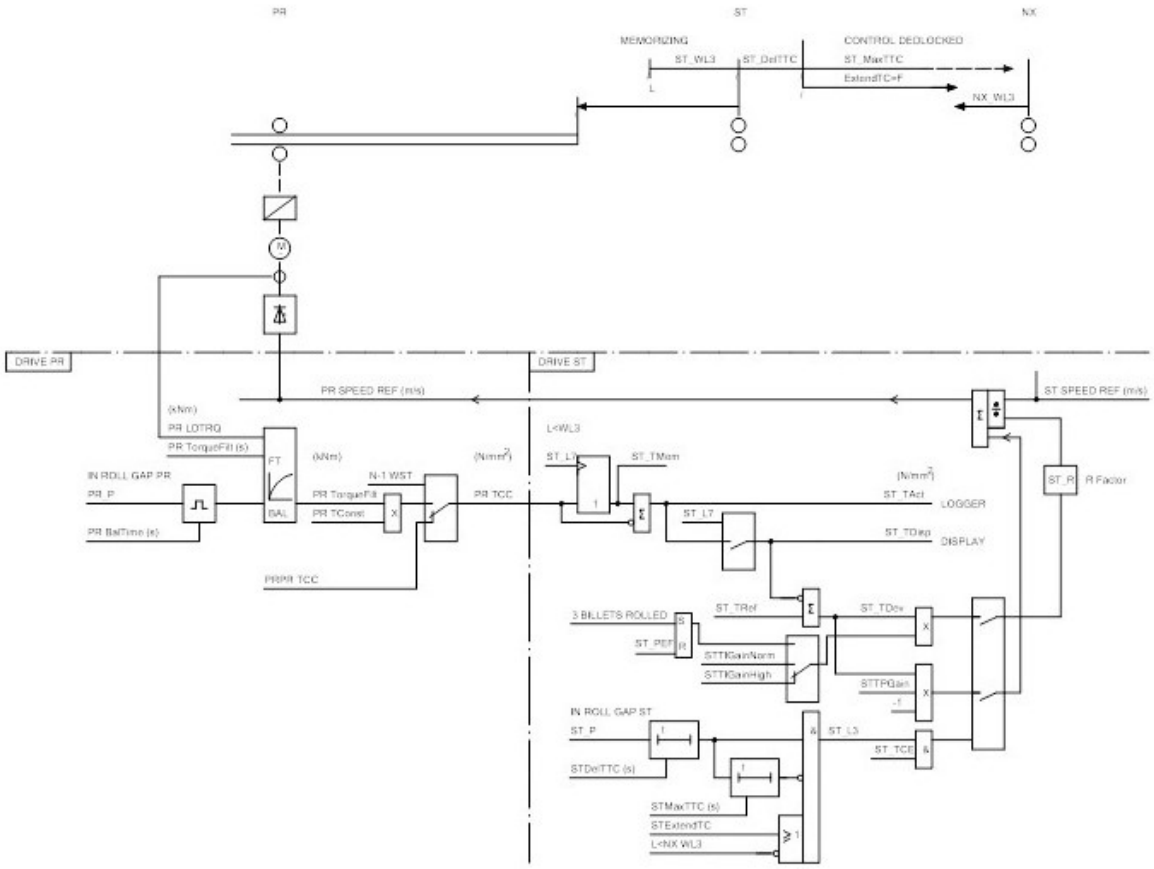
Objašnjenje oznaka:

- Z - prijenosni omjer motora i valjka
- Rpm - broj okretaja motora
- $(Dia - Groove)$ - efektivni promjer

Ako postavljeni efektivni promjer nije u skladu sa stvarnom vrijednošću, zadanom procesom valjanja, brzina rotacije valjka, a time i prava potrošnja i brzina isporuke do i od razmaka valjka razlikovat će se od informacija unutar kontrole. Da bi se postiglo ispravno valjanje u dijelovima između stanova, faktor redukcije ovog razmaka valjaka mora se povećati i faktor redukcije nizvodnog razmaka valjaka mora se smanjiti s istim odnosom.

3.4. Kontrola minimalne napetosti

Glavna svrha sustava kontrole minimalne napetosti (engl. *minimum tension control* (MTC)) je postići minimalnu napetost u valjanom materijalu gdje se ne mogu formirati petlje zbog prevelikih dimenzija materijala ili prekratkih udaljenosti između valjačkih stanova. Sustav će automatski kompenzirati dugoročne promjene u valjaonici i proizvodu, kao i početne pogreške u podešavanju koje unese operater. Kontrola minimalne napetosti temelji se na automatskom promatranju i analizi malih varijacija momenta valjanja. Kontrolni sustav procjenjuje promjene zakretnog momenta, tijekom provlačenja gredice kroz valjaonicu, kako bi se postigla minimalna napetost u valjanom materijalu putem automatskih korekcija zadanih odnosa brzina. Na slici 3.5. prikazana je MTC funkcija u blok dijagramu.



Slika 3.5. Blokovski dijagram minimalne kontrole napetosti

Algoritam automatske kontrole temelji se na tome da varijacije u stražnjoj napetosti utječu na pogonski moment 2-4 puta manje od varijacija u prednjoj napetosti valjačkog stana. Neposredno prije nego što gredica uđe u nizvodni stan, zakretni moment uzvodnog pogona predstavlja zakretni moment potreban za redukciju materijala u ovom razmaku valjaka, bez utjecaja guranja ili povlačenja u uzvodnom dijelu između stanova ili privremenih smetnji mehaničke opreme. Svaka promjena momenta uzvodnog pogona, nakon što trupac uđe u nizvodni razmak valjaka, uzrokovana je guranjem ili povlačenjem zbog netočnog odnosa brzine. Pretpostavka da promjene zakretnog momenta predstavljaju guranje ili povlačenje vrijedi samo dok drugi uvjeti poput temperature ili trenja ne uzrokuju varijacije zakretnog momenta potrebnog za valjanje materijala. Aktivacija kontrole minimalne napetosti odabire se za rad preko upravljačke stanice.

3.4.1. Mjerenje momenta

Index PR odnosi se na motorni pogon koji generira signal momenta. Zakretni moment (kNm) uzvodnog pogona PR dobiva se iz upravljanja ovim pogonom. Signal zakretnog momenta (`PR_TorqueActMV`) prolazi kroz niskopropusni filtar kako bi se potisnule visokofrekventne smetnje koje stvara kontrola brzine. Vrijeme filtra postavlja se preko parametra `PRTorqueFilt` na vrijednost 0,5 s. Tijekom vremena potrebnog za podizanje razine zakretnog momenta na normalnu radnu razinu (0,4-0,6 s), izlaz filtra (`PR_TorqueFilt`) uravnotežen je s ulazom filtra. Filtrirana vrijednost momenta u kNm transformira se u vrijednost napetosti u N/mm^2, množenjem s faktorom `PR_TConst` koji se računa prema 3.6 :

$$\text{PR_TConst} = \frac{Z \cdot 2000000}{D_w \cdot \text{Area}}. \tag{3.6}$$

Objašnjenje oznaka:

- Z - prijenosni omjer motora i valjka
- D_w - površina presjeka
- $Area$ - prosječna površina presjeka materijala

Transformirana vrijednost ne predstavlja stvarnu napetost u materijalu, već samo razinu zakretnog momenta prilagođenu algoritmu kontrole napetosti. Transformirana vrijednost tvori kaskadni tok signala PR_TCC, koji osigurava da se vrijednost koju daje trenutno uzvodno smješteni radni stan proslijedi algoritmu za kontrolu napetosti. Kontrolni algoritam između stanova smatra se da pripada nizvodnom stanu. Uzvodni pogon *PR* djeluje kao pretvornik napetosti za kontrolu koja pripada nizvodnom pogonu ST.

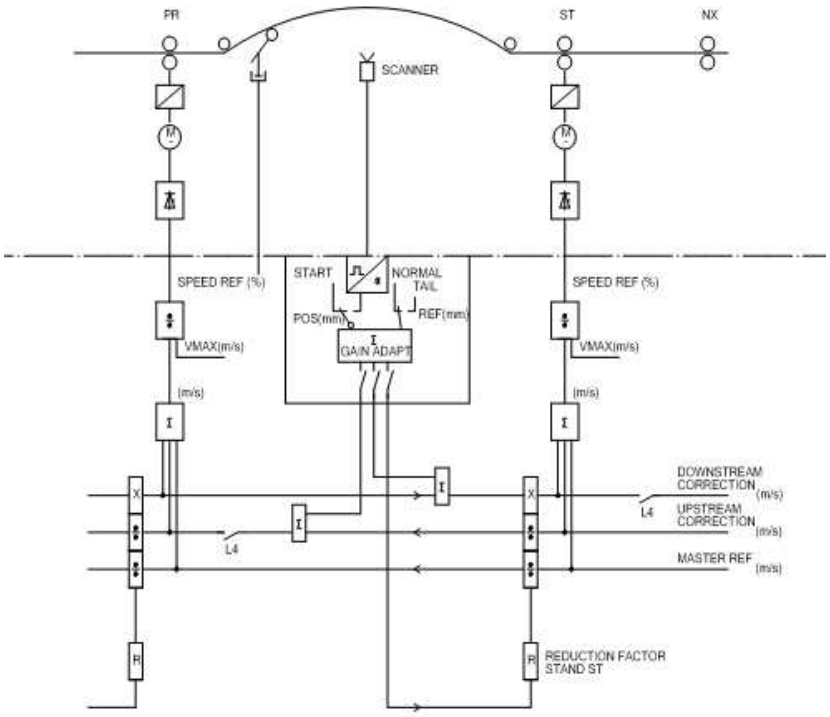
Memoriranje transformiranog signala zakretnog momenta (`PR_TCC`) vrši se na fiksnoj kratkoj udaljenosti upozorenja ($STWL3$) prije nego što kraj glave trupca uđe u nizvodni razmak valjaka. Memorirani zakretni moment pohranjuje se kao ST_TMem (N/mm^2) vrijednost i služi za predstavljanje redukcije materijala.

3.4.2. Kontrola napetosti

Razlika između memoriranog zakretnog momenta ST_TMem i zakretnog momenta koji se razvije nakon što kraj glave trupca uđe u nizvodni razmak valjaka izravno predstavlja mjeru stvarne napetosti u materijalu. Signal napetosti ST_TAct (N/mm^2) ima pozitivan predznak za povlačenje i negativan za guranje koji se razvija u materijalu u presjeku između stana PR i ST. Oduzimanjem ST_TAct od referentne napetosti ST_TRef (N/mm^2) formira se regulacijsko odstupanje ST_TDev. Referencu postavlja operater kako bi se postigao odnos brzine za glavni kraj koji se može koristiti u cijeloj gredici. Normalno je potrebna referentna vrijednost napetosti od $0-2\,\mathrm{N/mm}^2$ kako bi se kompenzirao povećani maseni protok koji nastaje smanjenjem temperature duž gredice. Kontrola se deblokira kratko vrijeme nakon što je kraj glave gredice ušao u stan ST. Vremenska odgoda, definirana parametrom $STDelTTC$ (s), postavljena je da omogući da se napetost potpuno razvije i da spriječi privremene poremećaje zakretnog momenta od ulaznih i izlaznih vodilica koje upravljačka jedinica tumači kao razvijenu situaciju guranja. Regulacijsko odstupanje korigira odnos brzine, trajno integralnom vrstom regulacijske korekcije postavljenog redukcijskog faktora, a privremeno proporcionalnom korekcijom brzine na uzvodno smještene pogone. Proporcionalna korekcija koristi se za stabilizaciju kontrole u dugim međustaništima gdje se mora ukloniti opuštenost od viška materijala prije nego što se napetost potpuno razvije. Tijekom normalnih uvjeta valjanja koristi se pojačanje $STTIGainNorm$ u iznosu od 0,0005. Kada se radi nova postavka valjaonice zbog promjene valjka ili zbog promjene proizvoda, pojačanje $STGainHigh$ koristit će se za sljedeća tri trupca. Veće pojačanje omogućuje bržu prilagodbu novim uvjetima valjanja. Postavke pojačanja su u osnovi konstantne za sve međustanove. Regulacija se blokira kada se memorira redukcijski moment za sljedeću nizvodnu regulaciju ili nakon određenog vremena. Nakon tog vremena, temperaturni gradijent duž gredice je vrlo vjerojatno mogao značajno promijeniti moment redukcije, čineći memoriranu vrijednost zastarjelom. S parametrom $STExtendTC$ postavljenim na jedan, kontrola se blokira nakon postavljenog maksimalnog vremena. Ovaj je parametar obično postavljen na jedan, jer za većinu tipova razmaka valjaka, promijenjena stražnja napetost ima mali učinak na pogonski moment nizvodnog pogona.

3.5. Automatska kontrola petlje

Glavna svrha funkcije automatske kontrole petlje (engl. *automatic loop control* (ALC)) je kontrolirati i održavati valjanje bez napetosti uz pomoć petlje materijala između dva valjačka stana. Automatska kontrola petlje temelji se na mjerenju viška materijala formiranog između dva valjačka stana. Višak materijala vodi se u obliku petlje na stolu petlje, gdje trenutni položaj petlje pruža neizravnu mjeru duljine viška materijala. Upravljački sustav putem automatskih korekcija zadanog odnosa brzine kontinuirano duž gredice održava položaj petlje fiksnim. Odnos brzine se tako automatski ispravlja za početne pogreške u postavljanju i varijacije u procesu valjanja. Slika 3.6. prikazuje funkciju ALC u blok dijagramu.



Slika 3.6. Funkcija automatske kontrole petlje

Položaj petlje mjeri se putem elektrooptičkog skenera, koji se također koristi kao detektor vrućeg materijala (HMD). Prije nego što kraj glave gredice uđe u nizvodni stan, brzina istoga malo je uvećana kako bi se dobio optimalan odnos brzine za brzo i sigurno formiranje petlje. Petlja se formira putem korekcija brzine samo na nizvodnom valjačkom stanu, kako bi se spriječilo širenje poremećaja brzine kroz valjaonicu. Nakon što se formira petlja, korekcije brzine šalju se u osnovnom smjeru raspodjele referentne brzine. Kada se rep približava uzvodnom stanu, visina petlje se smanjuje kako bi se spriječilo

udaranje repa. Smanjenje se postiže točnim vremenskim korekcijama brzine samo na ovom stanu kako bi se spriječilo širenje poremećaja brzine uzvodno u valjaonici, utječući na trupac koji slijedi. Signali potrebni za kontrolu prebacivanja korekcija brzine i aktiviranje opreme za formiranje petlje osiguravaju se funkcijom preciznog praćenja. Regulacija djeluje izravno na postavljeni R-faktor, a time i odnos brzine. Opsežne funkcije alarma koriste se za upozorenje operatera za trenutnu akciju kada kontrola otkrije bilo koji uvjet koji bi mogao dovesti do kvara automatske upravljačke funkcije. Automatsko upravljanje petljom odabire se za rad preko upravljačke stanice. Smatra se da upravljanje pripada nizvodnom stanu ST.

3.5.1. Mjerenje položaja petlje

Kontrola petlje zahtijeva izmjerenu vrijednost koja se povećava kako se petlja pomiče od razine na kojoj materijal ulazi u stol petlje prema razini koja odgovara referentnom položaju normalne petlje. To znači da petlja raste tijekom početnog oblikovanja. Ponašanje izmjerene vrijednosti može se kontrolirati parametrom RepeaterSel. Vrijednost nula znači da vrijednost položaja raste u smjeru skeniranja, a vrijednost jedan znači da se vrijednost položaja smanjuje u smjeru skeniranja. Izmjerena vrijednost šalje se u funkcijski blok rmcCTRL koji sadrži sve funkcije potrebne za generiranje korekcija brzine potrebnih za formiranje petlje i održavanje petlje u željenom položaju. Izmjerena vrijednost se transformira u vrijednost visine petlje u mm, koja se odnosi na položaj gdje materijal ulazi u stol petlje. Transformacija na kojoj se temelje svi kasniji izračuni dana je sljedećim izrazom 3.7:

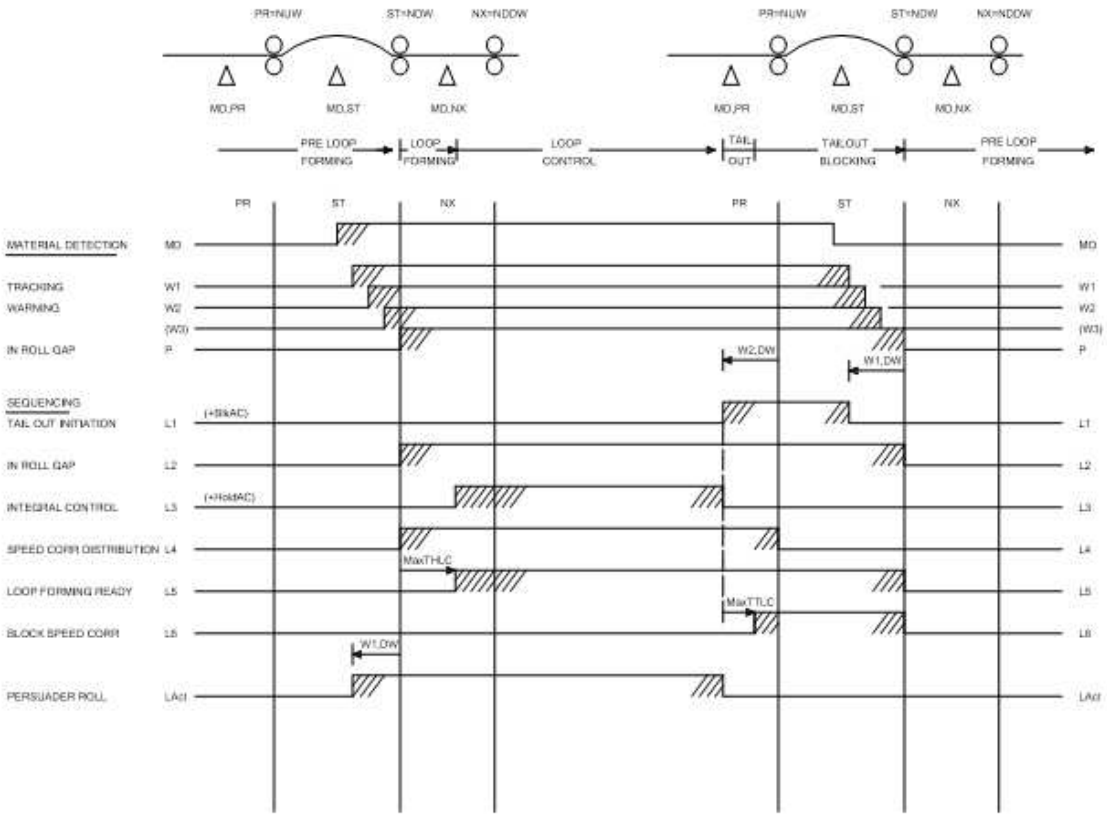
$$LoopPos\,(mm) = LP\,(mm) - ELP\,(mm). \tag{3.7}$$

Objašnjenje oznaka:

- $LP\,(mm)$ - izmjerena vrijednost sa senzora
- $ELP\,(mm)$ - parametar *Entry Loop Position* postavljen tako da daje položaj petlje od 0 mm na mjestu gdje materijal ulazi u stol petlje
- $LoopPos\,(mm)$ - transformirana vrijednost položaja petlje

3.5.2. Sekvenca kontrole petlje

Signali praćenja W1-3 i P obrađuju se u funkcijskom bloku rmcSEQ. Ovaj funkcijski blok, individualan za svaki valjački stan, procjenjuje signale praćenja i generira signale za aktivaciju dijela sekvence. Redoslijed petlje kontrolira uglavnom 6 logičkih signala L1-L6, sastavljenih od signala upozorenja i In Roll Gap, generiranih funkcijama praćenja stanova koji se trenutno nalaze uz dionicu kontroliranu petljom. Slika 3.6. prikazuje sekvencu automatske kontrole petlje.



Slika 3.7. ALC sekvenca

L1 pokreće *tail out* sekvencu kontrole petlje. L1 je postavljen tako da pokazuje da je zadnji kraj unutar vremena upozorenja (WT2) od prolaska središnje crte razmaka uzvodnog valjka. L1 se poništava kada je stražnji kraj unutar vremena upozorenja (WT1) od prolaska središnje linije razmaka nizvodnog valjka. L1 spušta valjak za uvjeravanje (engl. *persuader roll*) i prebacuje referentni položaj petlje s normalne reference na niži položaj prikladan za glatko izbacivanje repa bez trzanja petlje. L2 označava da je gredica u nizvodnom razmaku valjka. Poništavanjem L2, izmjerena vrijednost položaja petlje se poništava. L3 deblokira djelovanje integralne kontrole, ispravljajući trenutnu vrijednost

R-faktora nizvodnog razmaka valjka. L3 je postavljen, bilo vrijeme nakon što je kraj glave gredice ušao u nizvodni stan, ili kada je kraj glave dosegnuo sljedeći nizvodni razmak valjaka. L3 se poništava tijekom sekvence izlaznog repa. L4 zatvara uzvodno i nizvodno usmjerene tokove signala distribuirajući proporcionalne korekcije brzine na pogone valjaonice. L4 se postavlja od trenutka kada kraj glave gredice uđe u nizvodni stan dok se zadnji kraj ne pokaže u uzvodnom stanu. L5 prekida kontrolnu sekvencu formiranja petlje. Time se proporcionalna korekcija brzine koja tvori petlju prebacuje s nizvodnog stana na stan smješteno u smjeru glavne referentne distribucije brzine. L5 se postavlja nakon što je kraj glave gredice ušao u nizvodno ležište ili je dosegao položaj sljedećeg nizvodnog ležišta. L5 se poništava kada zadnji kraj napusti nizvodni razmak valjaka. L6 blokira korekcije brzine dok stražnji kraj gredice prolazi između susjednih razmaka valjka koji se nalaze uzvodno i nizvodno. L6 je također postavljen da blokira automatske korekcije brzine tijekom nenormalnih uvjeta.

3.5.3. Pred formiranje petlje

Kontrolni slijed prije formiranja petlje vrijedi sve dok kraj glave gredice ne uđe u nizvodni razmak valjaka. Svi sekvencijski signali L1-L6 su poništeni. Tijekom sekvence prije formiranja petlje, kontrola petlje osigurava početnu korekciju brzine nizvodnom stanu, prikladnu za brzo i sigurno formiranje petlje. Korekcija brzine formira se iz razlike između parametra početne pozicije petlje (SLP) i reference normalne pozicije petlje (NLP). SLP vrijednost je postavljena na vrijednost između nule i normalnog položaja petlje. Formirana korekcija brzine tada je identična korekciji brzine koju bi kontrola petlje generirala s petljom u početnom položaju petlje, pokušavajući je kontrolirati do normalnog položaja petlje. Formiranje početne korekcije brzine iz razlike u položaju petlje, umjesto jednostavnog dodavanja podesive brzine plus/minus na stan nizvodno, osigurava da je količina korekcije ispravna za sigurno i brzo formiranje petlje. Kontrola će generirati malo manju brzinu prema nizvodnom stanu. Početna korekcija brzine ne utječe na stanove dalje nizvodno od najbližeg stana, stoga se korekcije brzine samo na ovom stanu koriste za formiranje petlje. Time se u velikoj mjeri minimiziraju smetnje u brzini formiranja petlje koje se šire kroz valjaonicu.

3.5.4. Oblikovanje petlje

Kontrolni slijed formiranja petlje aktivan je od trenutka kada kraj glave gredice uđe u nizvodni razmak valjaka i ne dosegne sljedeći nizvodni razmak valjaka ili dok ne prođe podesivo vrijeme (STMaxTHLC = 4s). Postavljanje signala sekvence L5 prekida sekvencu oblikovanja petlje. Kako materijal ulazi u poziciju ulazne petlje, ograničenje će učiniti da formirana korekcija brzine prema nizvodnom stanu u početku ostane kao tijekom slijeda formiranja prije petlje. Kako se petlja pomiče prema normalnom položaju petlje, prolazeći granični položaj koji odgovara početnom položaju petlje, korekcija brzine se glatko smanjuje od početne vrijednosti zbog sve manje razlike u položaju petlje. Ako bi položaj petlje, tijekom niza formiranja petlje, trebao premašiti opasno visok položaj zbog početne pogreške u postavljenom odnosu brzine, radnja integralne kontrole se odmah deblokira kako bi se ubrzala korekcija odnosa brzine.

3.5.5. Kontrola petlje

Kontrolna sekvenca petlje, koja pokriva valjanje tijela gredice, aktivna je od trenutka kada je sekvenca formiranja petlje dovršena sve dok kraj repa ne bude unutar vremena upozorenja PR WT2. Korekcija brzine formiranja petlje prema nizvodnom stanu sada se prebacuje na stan u smjeru protoka signala glavne distribucije referentne brzine. Korekcije brzine raspodjeljuju se na sve stanove koji valjaju istu gredicu. Referentna distribucija brzine je tako raspoređena da održava točne odnose brzine za sve druge sekcije između stanova osim sekcije kontrolirane petljom odakle dolazi korekcija. Ispravci za sljedeće gredice se odvajaju zbog prekida distribucije preko signala poništavanja sekvence L4, prateći razmak između gredica kroz valjaonicu. Ovo u velikoj mjeri smanjuje preklapanja između sljedećih gredica. Tijekom ove sekvence, integralni dio kontrole petlje se deblokira kako bi se kontinuirano ažurirao postavljeni R-faktor nizvodnog stana. Promjena R-faktora prati promjenu kapaciteta potrošnje nizvodnog razmaka valjka. Ova promjena je pak uzrokovana promjenom u dimenziji materijala ili temperaturi koju isporučuje razmak valjka uzvodno. Proučavanje malih promjena R-faktora nizvodnog valjka daje točnu mjeru promjene dimenzija. Budući da se temperatura i dimenzija vrha trupca, tijela i repa mijenjaju, uzrokujući promjenu kapaciteta potrošnje, a time i točnog odnosa brzine, bitno je zapamtiti optimalni odnos brzine tijekom valjanja vrha kako bi se osiguralo sigurno navlačenje navoja naknadnih gredica.

3.5.6. Izlazak repa gredice

Kontrolna sekvenca izlaska repa aktivna je od trenutka kada je zadnji kraj trupca unutar vremena upozorenja PR WT2 odnosno prije prolaska uzvodnog razmaka valjaka, sve dok rep materijala ne prođe nizvodni razmak valjaka. Vrijeme upozorenja je prilagođeno kako bi omogućilo petlji da promijeni svoj položaj, iz normalnog položaja u niži položaj prikladan za izbjegavanje trzanja repa materijala prilikom napuštanja uzvodnog razmaka. U završnim dijelovima valjaonice brzina materijala može biti toliko visoka da je vrijeme prijelaza od sljedeće uzvodne sekcije do uzvodnog stana kraće od podešenog vremena. Slijed izlaska repa tada se može podesiti da započne ranije nego inače postavljanjem parametra Start Tail Loop Control (StartTLC). Ažuriranje R-faktora nizvodnog stana blokirano je tijekom sekvence izlaska repa. Tijekom sekvence, korekcije brzine samo uzvodnog stana koriste se za promjenu položaja petlje, bez obzira na smjer distribucije glavne referentne brzine. Daljnja distribucija do stanova uzvodno od ovog stana spriječena je prekidom distribucije zbog izlaska repa. Korekcije brzine uzvodnog stana blokiraju se nakon nekog vremena. S tim protekom vremena, upravljanje je potpuno blokirano, bez generiranja korekcija brzine, sve dok rep materija ne prođe nizvodni razmak valjaka. Zadnji kraj koji prolazi nizvodni razmak valjaka vraća kontrolu na sekvencu formiranja petlje.

3.5.7. Alarmi

False, *Late*, *Head* i *Tail* kombinacije alarma tvore signal $ST_LPError1$ i ako ovaj signal traje dulje od 1.5 s, automatska korekcija brzine koju generira kontrola petlje blokira se za preostali dio trupca, ostavljajući petlju da ju ručno kontrolira operater. Još neki od alarma koji se odnose na kontrolu petlje su: Lp_Transd koji pokazuje da skener petlje nije mogao otkriti materijal tijekom valjanja glave ili je izgubio pogled na materijal tijekom valjanja tijela i repa materijala, upozorenje o visokoj petlji koje označava da je položaj petlje bio u opasno visokom položaju tijekom vremena, prekoračujući vrijeme koje je normalno potrebno kontroli petlje da dovede petlju u siguran položaj i upozorenje za veliku brzinu koji kaže da je motorni pogon postigao maksimalnu brzinu.

3.5.8. Prilagodba pojačanja kontrole

Prijenosna funkcija regulacije petlje pokazuje linearnu ovisnost prirasta visine prema odnosu prirasta viška duljine materijala ($\frac{dH}{dS}$). Dugačak stol petlje čini promjenu položaja petlje više osjetljivom nego kratki stol na promjene prekomjerne duljine petlje. Ako se ne prilagodi, to bi uzrokovalo velike varijacije u dinamičkom odzivu kontrole. Nelinearna funkcija $\frac{dH}{dS}$ može se aproksimirati kao:

$$\frac{dH}{dS} = 0.19 \cdot \frac{L}{H}. \tag{3.8}$$

Objašnjenje oznaka:

- L - duljina stola petlje
- H - visina petlje

Prilagođavanje proporcionalnog pojačanja, $PGain$, odstupanja položaja petlje s faktorom $\frac{H}{Raspon}$ čini pojačanje otvorene petlje prijenosne funkcije neovisnim o trenutnoj visini petlje, čime se osigurava konstantan dinamički odziv. Gornja prilagodba čini izračun odgovarajuće postavke proporcionalnog pojačanja, ovisan samo o duljini L stola petlje i mjernom rasponu za trenutnu lokaciju skenera. Za istu geometriju petlje u cijeloj valjaonici, postavke pojačanja trebale bi biti identične. Proporcionalno pojačanje izračunava se na sljedeći način:

$$PGain < 0.025 \cdot \frac{Range}{L}. \tag{3.9}$$

Objašnjenje oznaka:

- $Range$ - mjerni raspon skenera (0.83 · skener udaljenosti do petlje)
- L - duljina stola petlje

Pri kaskadnom spajanju nekoliko kontrola petlje stvarna postavka proporcionalnog pojačanja treba gore izračunatu vrijednost podijeliti s dva. Gornja prilagodba ograničena je na radni raspon, unutar postavki parametara za minimalni položaj petlje ($MinALP$) i maksimalni položaj petlje ($MaxALP$).

Potpuni izračun korekcije brzine proporcionalna odstupanju u položaju petlje dan je izrazom:

$$\text{SpeedCorr} = \frac{\text{Diff} \cdot H \cdot PGain}{Range}. \tag{3.10}$$

Objašnjenje oznaka:

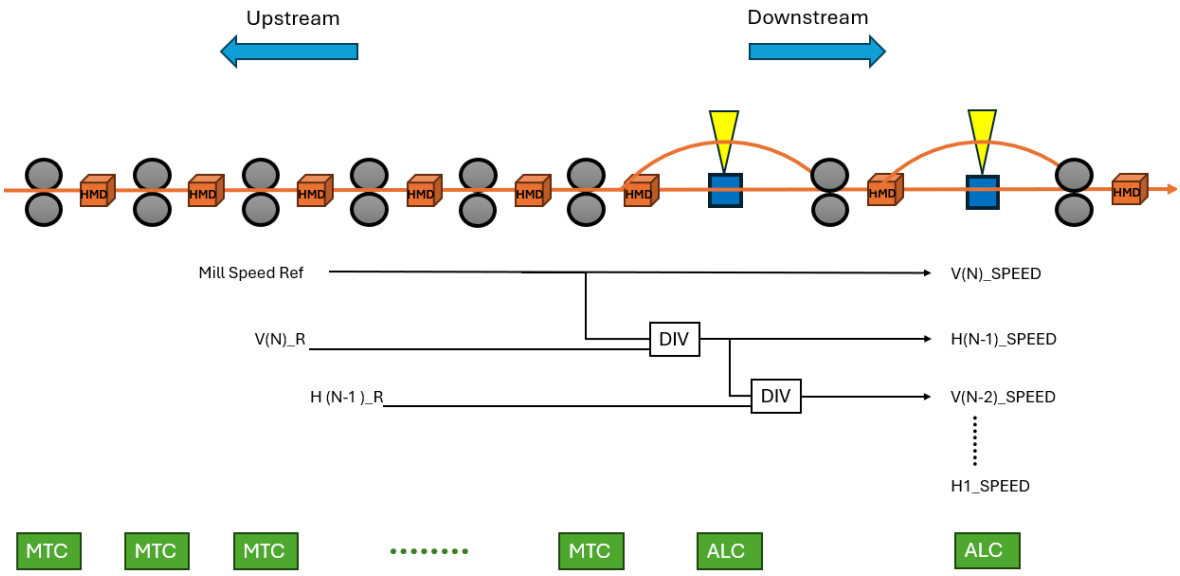
- H - stvarna visina petlje ograničena minimalnim i maksimalnim granicama prilagodbe
- Diff - razlika visine petlje i zadane vrijednosti visine petlje

Integralno pojačanje $IGain$ je konstanta neovisna o vrsti ili geometriji:

$$IGain = 1.5. \tag{3.11}$$

3.6. Kaskadno upravljanje

Na slici 3.8. prikazana je shema cjelokupnog upravljanja valjaonicom.



Slika 3.8. Shema upravljanja valjaonicom

Na shemi su naznačene reference brzina dobivenih iz R-faktora svih valjačkih stanova. Prikazani su senzori (HMD) za funkciju praćenja glave i repa materijala, korištene funkcije upravljanja kontrole minimalne napetosti (MTC) i automatske kontrole petlje (ALC). Brzina valjačkog stana može se dobiti prema jednadžbi 3.12:

$$V(n) = \frac{V(n+1)}{R(n)[1+K(n)]}. \tag{3.12}$$

Objašnjenje oznaka:

- $V(n)$ - brzina n-tog valjačkog stana
- $V(n+1)$ - brzina (n+1) valjačkog stana
- $R(n)$ - R-faktor n-tog valjačkog stana
- $K(n)$ - korekcijski faktor utjecaja funkcija MTC i ALC

3.6.1. Način rada električnih pogona

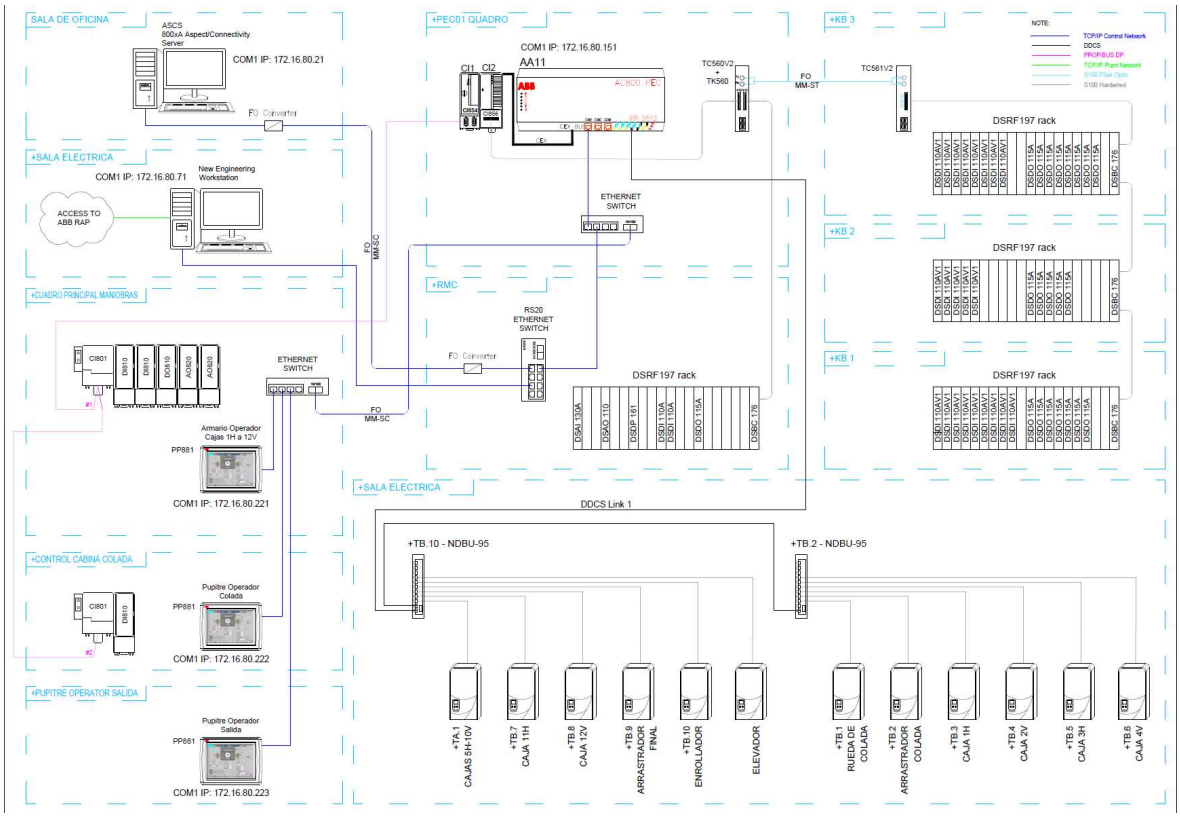
Električni pogoni mogu biti u jednom od tri stanja rada ovisno o konfiguraciji valjaonice. Ako je električni pogon, odnosno valjački stan kojim pogon upravlja, odabran kao radni, znači da pogon treba raditi u koordiniranom radu s valjaonicom, smanjujući valjani materijal. Pogon je uključen u rad valjaonice i prati uobičajene operacije valjaonice. Brzina je postavljena tako da odražava smanjenje razmaka valjanja. Ako je pogon odabran, ali nije radni, znači da pogon treba raditi u koordiniranom radu s valjaonicom, djelujući kao pomoćni pogon, ne smanjujući valjani materijal. Pogon je uključen u rad valjaonice i prati uobičajene operacije valjaonice. Treće stanje je kada pogon nije odabran. Pogon se može pokrenuti samo u lokalnim operacijama. Budući da promjena načina pogona utječe na raspodjelu referentne brzine na okolne pogone, promjena je dopuštena samo kada je uzvodni dio valjaonice i pogona isključen.

3.6.2. Odabir brzine proizvodnje

Brzina proizvodnje definira razinu brzine valjaonice. Brzina proizvodnje zadana je kao brzina materijala na kraju trenutno zadnjeg odabranog stana valjaonice (engl. *pivoting stand*) i ne mijenja se tijekom regulacije rada. Promjena brzine proizvodnje znači da svi pogoni uključeni u sustav distribucije referentne brzine valjaonice mijenjaju brzinu u skladu s tim. Kako bi se postiglo glatko ubrzanje, referentna brzina se generira pojedinačno za svaki pogon putem funkcije linearne rampe. Kada se referentna brzina prethodnog valjka izračunava dijeljenjem linearne brzine sljedećeg valjka s R faktorom sljedećeg valjka, ova se kaskada naziva uzvodna kaskada.

4. Konfiguracija projekta

Na slici 4.1. prikazan je izgled konfiguracije projekta, vidljiva je korištena hardverska oprema kao i način međusobnog povezivanja opreme putem raznih komunikacijskih protokola. Detaljniji prikaz dan je u idućim poglavljima ovoga rada.



Slika 4.1. Konfiguracija projekta

4.1. Komunikacijski protokoli

4.1.1. TCP/IP

TCP/IP (engl. *transmission control protocol/Internet protocol*) je skup komunikacijskih protokola koji omogućava povezivanje različitih mreža i uređaja. TCP je odgovoran za prijenos podataka osiguravajući da paketi koji se šalju ispravno stignu do odredišta. IP zadužen je za adresiranje i usmjeravanje paketa. Svaki uređaj na mreži ima jedinstvenu IP adresu koja služi kao identifikator za komunikaciju. Model TCP/IP sastoji se od četiri sloja. Aplikacijski sloj upravlja korisničkim zahtjevima i podacima. Transportni sloj osigurava pouzdanu (TCP) ili nepouzdanu (UDP) isporuku podataka između krajnjih točaka. Mrežni sloj upravlja usmjeravanjem podataka kroz mrežu pomoću IP adresa. Sloj pristupa mreži obavlja fizičku i logičku vezu između uređaja na mreži.

4.1.2. Profibus

Profibus (engl. *process field bus*) je komunikacijski protokol koji se koristi u industrijskoj automatizaciji. Ovaj protokol omogućava razmjenu podataka između različitih uređaja kao što su senzori, aktuatori i kontroleri. Protokol funkcionira na principu "*master*"-a (kontroleri koji šalju komande) i "*slave*"-a (uređaji koji odgovaraju na komande). Podržava različite brzine prijenosa (9.6 kbit/s do 12 Mbit/s), ovisno o aplikaciji, može se koristiti u različitim topologijama poput linije, stabla ili prstena. Omogućuje povezivanje velikog broja uređaja na istu mrežu, čime se olakšava integracija u kompleksne sustave. Razmjena podataka između *master* i *slave* uređaja obavlja se u ciklusima, gdje *master* uređaj posjeduje "*token*" koji mu omogućava slanje podataka. Profibus DP korišten je za komunikaciju sa S800 I/O modulima.

4.1.3. DDCS

DDCS (engl. *distributed drive communication system*) je komunikacijski protokol koji se koristi za komunikaciju između kontrolera i pogonskih uređaja u industrijskim aplikacijama. Ovaj protokol omogućava povezivanje i razmjenu podataka između različitih uređaja u industrijskom okruženju, kao što su frekvencijski pogoni (engl. *variable frequency drives* (VFD)), PLC uređaji i senzori. DDCS je dizajniran za brzu razmjenu podataka između kontrolera i pogona, što omogućuje pravovremeno reagiranje na promjene u procesu. DDCS se može lako integrirati s različitim tipovima pogonskih uređaja. DDCS omogućava korištenje više komunikacijskih kanala, što povećava kapacitet sustava za upravljanje višestrukim pogonima istovremeno. U projektu korišten je za komunikaciju između PLC-a i električnih pogona iz ABB-ove serije DC880.

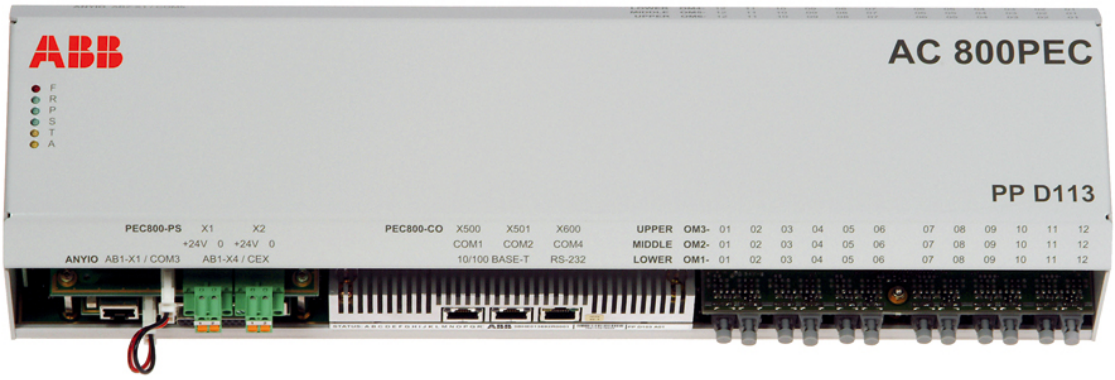
4.1.4. CEX Bus

CEX Bus je komunikacijski protokol koji se koristi za povezivanje i komunikaciju između uređaja unutar ABB sustava. CEX Bus dizajniran je kao fleksibilan, skalabilan i učinkovit protokol koji omogućuje jednostavnu integraciju različitih uređaja. Ovaj protokol omogućuje prenošenje podataka putem digitalnih signala između različitih uređaja koji koriste CEX Bus standard. CEX Bus komunikacija temelji se na *master-slave* arhitekturi, gdje jedan uređaj, obično *master* uređaj, inicira komunikaciju i upravlja prijenosom podataka sa *slave* uređaja. Dizajniran je da omogućava visoko učinkovitu razmjenu podataka s minimalnim kašnjenjima, što je ključno za industrijske aplikacije koje zahtijevaju preciznu i brzu kontrolu. U projektu je korišten za povezivanje PLC-a s komunikacijskim modulima.

4.2. Hardver

4.2.1. ABB AC 800PEC

ABB AC 800PEC napredni je kontroler koji se koristi za upravljanje procesima u industrijskim aplikacijama. Sastoji se od glavnog procesora, ulazno-izlaznih modula, komunikacijskih modula i drugih dodatnih komponenti koje omogućuju prilagodbu specifičnim potrebama korisnika. Kontroler koristi EtherCAT komunikacijsku mrežu, koja pruža visoku brzinu prijenosa podataka i nisku latenciju, što je ključno za koordinaciju velikog broja uređaja u realnom vremenu. Ovaj uređaj omogućava visoku razinu fleksibilnosti i prilagodljivosti te podržava različite komunikacijske protokole, uključujući TCP/IP i Profibus. AC 800PEC je dizajniran za rad u zahtjevnim okruženjima (temperatura od -40 do +70 °C) i može se lako integrirati s drugim ABB uređajima, što ga čini idealnim rješenjem za automatizaciju. Ovaj kontroler omogućava cikluse kontrole od 100 mikrosekundi do nekoliko sekundi, što ga čini idealnim za primjene kao što su energetika i procesna automatizacija. Jedna procesorska jedinica kombinira kontrole velikih brzina s kontrolama niskih brzina upravljanja procesom koje obično obavljaju zasebne PLC jedinice. Visoka snaga obrade, brza komunikacija s I/O, potpuna integracija u ABB-ov sustav 800xA, inovativna i fleksibilna uporaba FPGA za uključivanje protokola i funkcionalnosti aplikacije u uređajima bez stvaranja dodatnog opterećenja procesora, optička komunikacija, dug životni ciklus i jednostavna nadogradnja neke su od prednosti ovog kontrolera. Osim toga, modularna arhitektura pruža visoku pouzdanost kroz redundantne sustave koji osiguravaju kontinuirani rad u slučaju kvara jednog od sustava. Na slici 4.2. prikazan je korišteni PLC.



Slika 4.2. ABB AC 800PEC [2]

4.2.2. PLC moduli

ABB CI856

ABB CI856 modul je komunikacijski modul koji omogućava komunikaciju sa sustavima baziranim na S100 komunikaciji. Ovaj modul omogućava povezivanje PLC-a s različitim uređajima u mreži, omogućavajući brzu i pouzdanu razmjenu podataka između sustava. Povezan je putem CEX komunikacije s kontrolerom. Korišten je za povezivanje kontrolera s ulazno-izlaznim karticama DSRF197 *rack* sustava.

ABB CI854

ABB CI854 modul je komunikacijski modul koji koristi Profibus DP protokol i služi za povezivanje s različitim perifernim uređajima. Ovaj modul omogućava jednostavno upravljanje i nadzor procesa, čime se povećava efikasnost sustava. Korišten je za povezivanje PLC uređaja sa S800 serijom modula (DI810, DO810 i AO820) uz pomoć CI801 komunikacijskog modula.

ABB CI801

ABB CI801 modul je konfigurabilno komunikacijsko sučelje koje izvodi operacije kao što su obrada signala, prikupljanje nadzornih informacija, OSP rukovanje i konfiguracija I/O modula. U projektu je korišten za povezivanje s PLC-om putem Profibus DP protokola.

ABB DI810

ABB DI810 modul je digitalni ulazni modul koji se koristi za primanje digitalnih signala iz vanjskih izvora. Ovaj modul je ključan za praćenje stanja procesa i osiguranje pravovremenog odgovora sustava kroz 16 digitalnih ulaza.

ABB DO810

ABB DO810 modul je digitalni izlazni modul koji se koristi za slanje digitalnih signala prema vanjskim uređajima. Ovaj modul je ključan za osiguranje pravovremenog odgovora sustava putem svojih 16 digitalnih izlaza.

ABB AO820

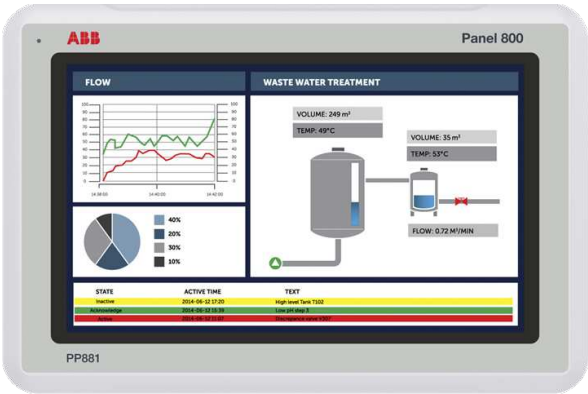
ABB AO820 modul je analogni izlazni modul koji omogućuje praćenje analognih signala. Ovaj modul koristi se za upravljanje varijablama kao što su tlak, temperatura ili protok, čime se osigurava precizno upravljanje procesima. Analogni izlazni modul AO820 ima 4 bipolarna analogna izlazna kanala. Izbor strujnog ili naponskog izlaza može se konfigurirati za svaki kanal.

Na slici 4.1. prikazani su korišteni moduli.

Tablica 4.1. PLC moduli [3] [4] [5] [6] [7]

4.2.3. HMI PP881

Za prikaz procesa u postrojenju korištena su tri HMI (engl. *Human Machine Interface*) uređaja. HMI predstavlja ključni koncept u interakciji između ljudi i strojeva, omogućavajući korisnicima da komuniciraju s različitim sustavima i uređajima. HMI se može definirati kao korisničko sučelje koje povezuje osobu sa strojem, sustavom ili uređajem, a koristi se u raznim industrijskim primjenama. Osnovne funkcije HMI su kontrola procesa putem tipki, dodirnih ekrana i tipkovnica, nadzor i kontrola putem ekrana te zvučni signali i alarmi. HMI omogućava korisnicima da prate i kontroliraju rad strojeva i sustava. To uključuje postavljanje parametara rada, aktiviranje ili deaktiviranje funkcija i upravljanje procesima. HMI sustavi često imaju mogućnost pohrane podataka o radu, što omogućava analizu performansi i otkrivanje potencijalnih problema. Na slici 4.3. prikazan je izgled jednog takvog korištenog uređaja.



Slika 4.3. HMI uređaj [8]

4.2.4. Električni pogoni

Električni pogoni (engl. *drives*) ključne su komponente u industrijskoj automatizaciji jer omogućavaju preciznu kontrolu pokreta motora. Ovi sustavi kontroliraju brzinu, okretni moment i poziciju motora. Električni pogon sastoji se od više komponenti. Prva komponenta je pogon (engl. *drive unit*) koji uključuje uređaj za upravljanje motorom. U modernim pogonima obično se koristi pretvarač (ili frekventni regulator) koji mijenja frekvenciju napajanja motora, čime se kontrolira njegova brzina. Pogoni mogu biti AC ili DC. Druga komponenta je električni motor koji može biti asinkroni, sinkroni ili DC motor. Treća komponenta je kontroler ili regulator koji šalje komande pogonu, određujući parametre kao što su brzina, okretni moment, vrijeme rada ili pozicija. Kontroler se povezuje sa sustavom za automatizaciju (PLC ili SCADA sustav). Posljednja komponenta su senzori koji omogućavaju praćenje parametara poput brzine, pozicije i opterećenja motora. Pri normalnom radu upravljačka jedinica šalje signal pogonu koji konvertira ulazni signal u odgovarajuću kontrolu snage za motor. Motor zatim izvodi željeni pokret (npr. pokretanje valjaka). Senzori prate performanse motora i šalju podatke nazad kontroleru, koji po potrebi podešava parametre za postizanje željenog ponašanja.

U projektu je korišteno 11 DC VSD (engl. *variable speed drive*) pogona iz serije ABB DCS880 različitih snaga ovisno o mjestu primjene. PLC s električnim pogonima komunicira putem DDCS protokola preko optičkog razdjelnika NDBU-95. Neke od podržanih opcija su: sigurno isključivanje momenta (STO) i sigurno ograničene brzine (SLS) radi sigurnosti, skalabilnost i fleksibilnost struja za različite primjene, pristupačno sučelje za puštanje u rad i održavanje kao i PC rješenje za opsežno praćenje pogona i brzi pristup postavkama. Na slici 4.4. prikazan je električni pogon iz ABB-ove serije DC880 Drives

Slika 4.4. Električni pogon iz ABB DC880 serije [9]

4.3. Softver

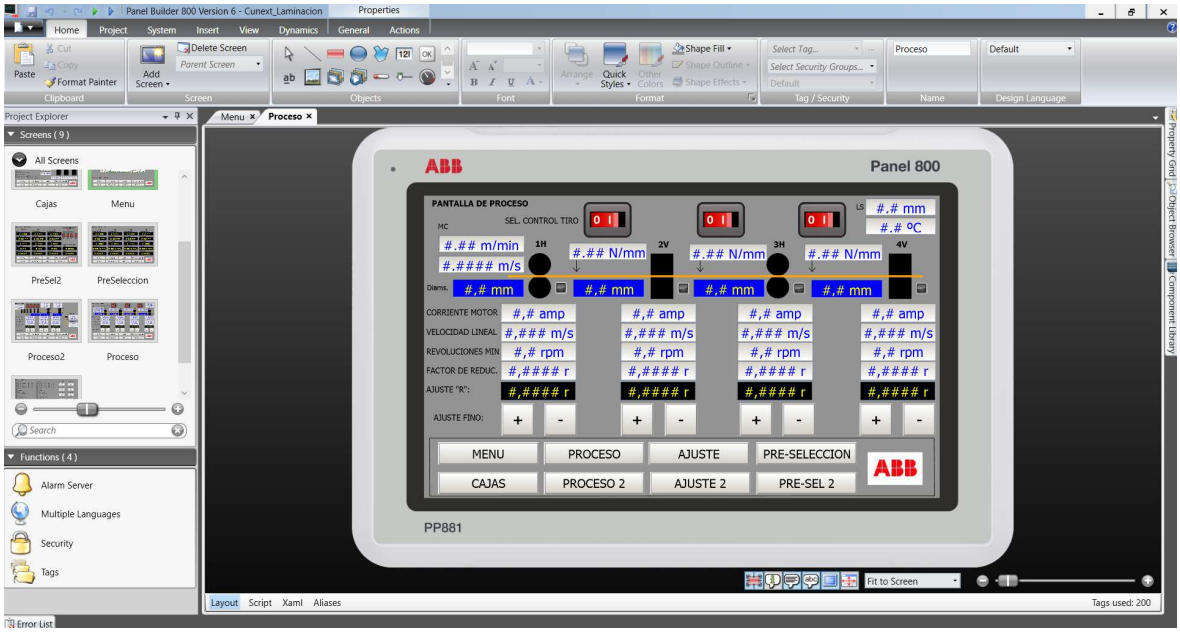
4.3.1. Compact Control Builder M

Compact Control Builder M razvojni je alat koji se koristi za programiranje i konfiguraciju uređaja iz ABB-ove serije automatizacije. Ovaj alat omogućava kreiranje, testiranje i implementiranje automatiziranih sustava u industrijskim aplikacijama. Alat podržava više standarda industrijske automatizacije, uključujući IEC 61131-3, što omogućava programiranje u različitim jezicima, poput ladder logic (LD), function block diagram (FBD), structured text (ST), instruction list (IL) i sequential function chart (SFC). Olakšava konfiguraciju svih povezanih uređaja u sustavu, uključujući PLC module, ulazno-izlazne jedinice, dijagnostičke uređaje i različite komunikacijske module. Također, alat omogućava podešavanje i konfiguraciju mrežnih protokola poput Ethernet/IP, Modbus, Profibus, i drugih standarda industrijske komunikacije. Omogućava i simulaciju programskih rješenja prije nego što se implementiraju na fizičke uređaje. Kroz simulaciju, inženjeri mogu testirati logiku sustava i uočiti potencijalne greške u kodu. Dijagnostički alati omogućuju praćenje statusa sustava u realnom vremenu, detekciju grešaka i analizu performansi. Također, podržava razvoj i integraciju sa sustavima za nadzor i upravljanje (HMI i SCADA). Na slici 4.5. prikazano je sučelje Compact Control Builder M razvojnog alata.

Slika 4.5. Compact Control Builder M sučelje

4.3.2. Panel Builder 800

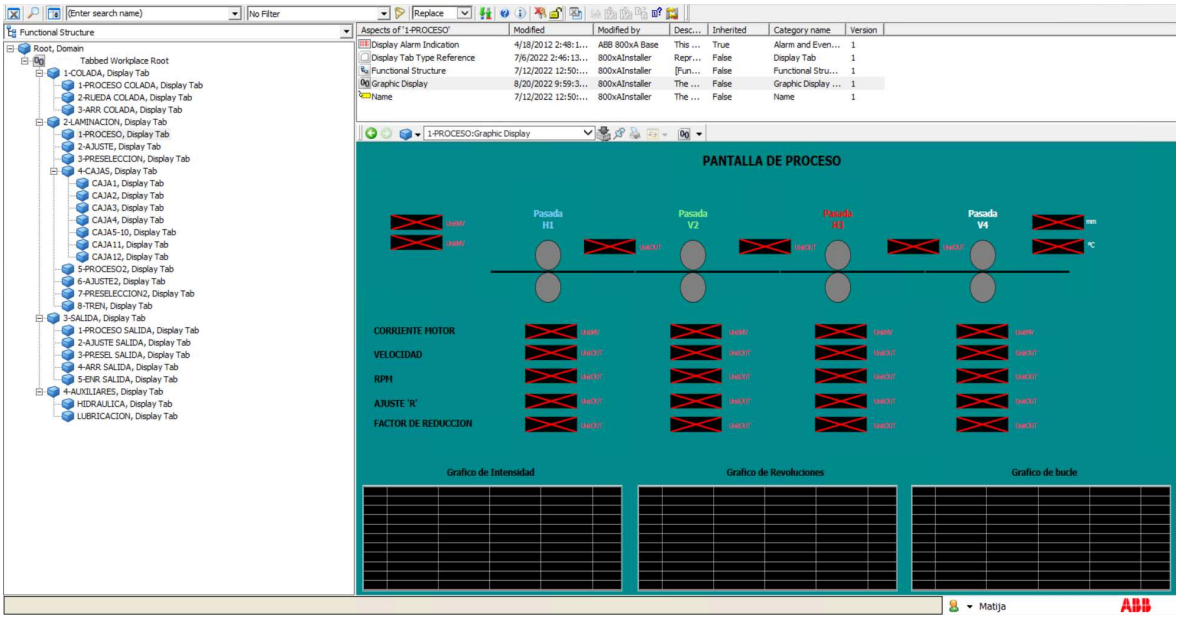
Panel Builder 800 razvojni je alat koji se koristi za dizajn i konfiguraciju korisničkih sučelja (HMI) za ABB-ove uređaje i sustave. Ovaj alat omogućava kreiranje grafičkih sučelja za upravljanje industrijskim procesima, omogućujući jednostavan nadzor i kontrolu sustava putem ekrana. Panel Builder 800 nudi intuitivno sučelje koje omogućava brzu i efikasnu izradu HMI aplikacija za različite aplikacije u industriji. Koristi grafičke elemente, poput ikona, dijagrama, grafikona i tekstualnih prikaza, čime se olakšava vizualizacija složenih industrijskih procesa. Osim toga, alat nudi podršku za razvoj aplikacija u skladu s industrijskim standardima, uključujući IEC 61131-3, što omogućava integraciju sa sustavima za automatizaciju temeljenim na PLC-ima i drugim uređajima. Dijagnostički alati u Panel Builder 800 omogućuju praćenje rada HMI sučelja u stvarnom vremenu, detekciju grešaka i analizu performansi sustava. Alat također omogućava lako povezivanje s drugim sustavima za automatizaciju, uključujući SCADA sustave, čime se omogućava daljinsko praćenje i upravljanje industrijskim procesima. Panel Builder 800 pruža visoku razinu fleksibilnosti i prilagodljivosti, čineći ga pogodnim za širok spektar industrijskih aplikacija. Na slici 4.6. prikazano je sučelje Panel Builder 800 razvojnog alata.



Slika 4.6. Panel Builder sučelje

4.3.3. Plant Explorer

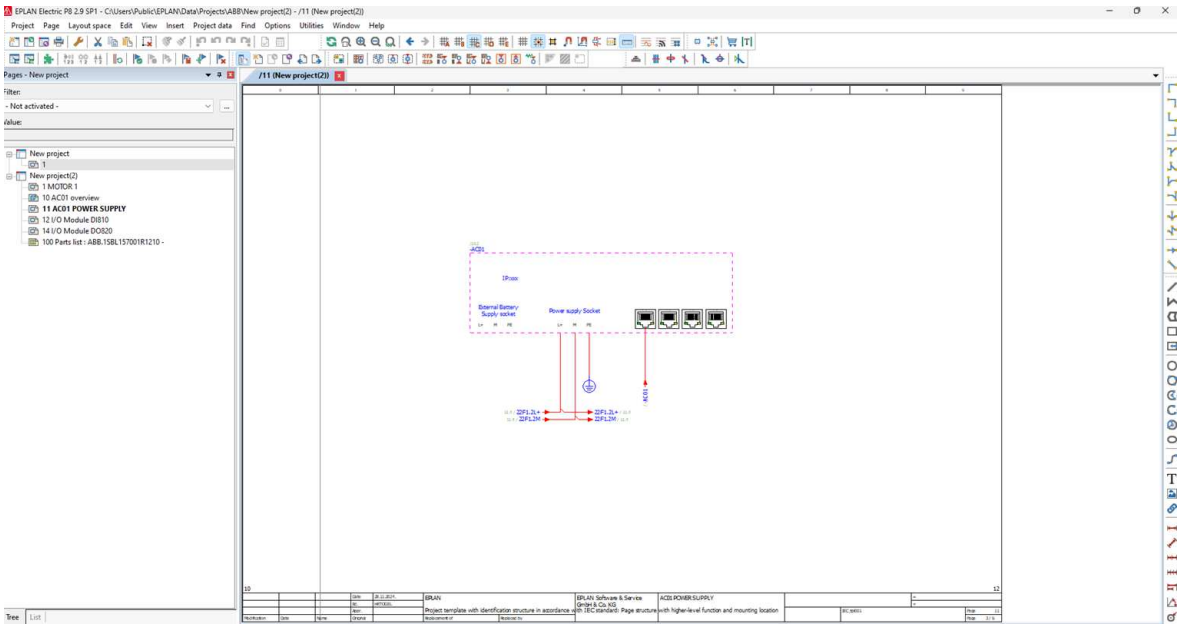
ABB Plant Explorer je alat koji se koristi unutar ABB-ovog sustava 800xA za upravljanje i optimizaciju industrijskih postrojenja. Ovaj program omogućava vizualizaciju podataka u stvarnom vremenu, pruža interaktivne prikaze sustava, omogućavajući korisnicima da vide ponašanje postrojenja u svakom trenutku. Vizualizacija uključuje grafike, dijagrame i mape koje olakšavaju praćenje i analizu. Osim podataka u realnom vremenu, Plant Explorer omogućava pristup povijesnim podacima, što pomaže u analizi dugoročnih trendova i prepoznavanju potencijalnih problema prije nego što se dogode. Koristi napredne algoritme za predviđanje mogućih kvarova i potrebnog održavanja, čime pomaže u smanjenju neplaniranih zastoja i optimizaciji operacija. Plant Explorer je dizajniran da se integrira s različitim sustavima u postrojenju, kao što su SCADA (engl. *supervisory control and data acquisition*) i DCS (engl. *distributed control systems*). Na slici 4.7. prikazano je programsko sučelje za izradu prikaza.



Slika 4.7. Plant Explorer sučelje

4.3.4. EPLAN

EPLAN je napredni softverski paket koji se koristi za projektiranje elektrotehničkih shema i automatizaciju inženjerskih procesa. EPLAN Electric P8, kao jedan od najpoznatijih proizvoda ove tvrtke, omogućava inženjerima brže i učinkovitije kreiranje dokumentacije za razne industrijske aplikacije, uključujući strojarstvo, elektroinženjerstvo i automatizaciju. EPLAN Electric P8 nudi dosljedan i integriran pristup izradi elektrotehničkih shema, omogućuje automatizirano generiranje dokumentacije i pomaže u standardizaciji inženjerskih procesa. Postoji nekoliko faza projektiranja u EPLAN-u. Prva faza je planiranje. U ovoj fazi korisnici definiraju projektne zahtjeve i postavljaju osnovne parametre. Idući korak je izrada shema. EPLAN omogućuje brzo i precizno crtanje elektrotehničkih shema koristeći razne predloške i alate za automatizaciju. Nakon izrade shema, EPLAN automatski generira potrebnu dokumentaciju, uključujući liste materijala i planove ožičenja. Zadnji korak je upravljanje projektom. Na slici 4.8. prikazano je programsko sučelje prilikom izrade električnih shema.



Slika 4.8. EPLAN sučelje

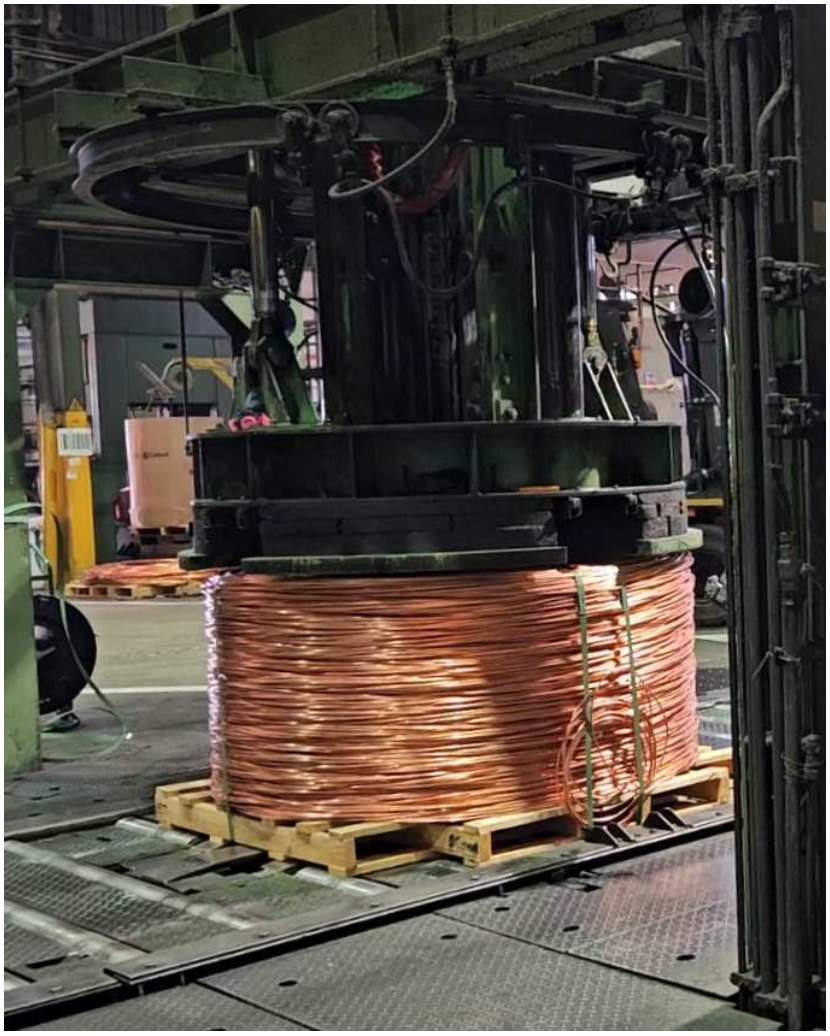
5. Rezultati i rasprava

5.1. Stvarni sustav upravljanja

Na slikama 5.1., 5.2. i 5.3. prikazani su dijelovi stvarnog postrojenja. Na slici 5.1. može se vidjeti ulazak materijala u valjačke stanove koji su također vidljivi na slici 5.2. Nakon prolaska žice kroz valjačke stanove, žica se namata i dobiva se konačni proizvod kao na slici 5.3.

Slika 5.1. Ulaz materijala u valjačke stanove

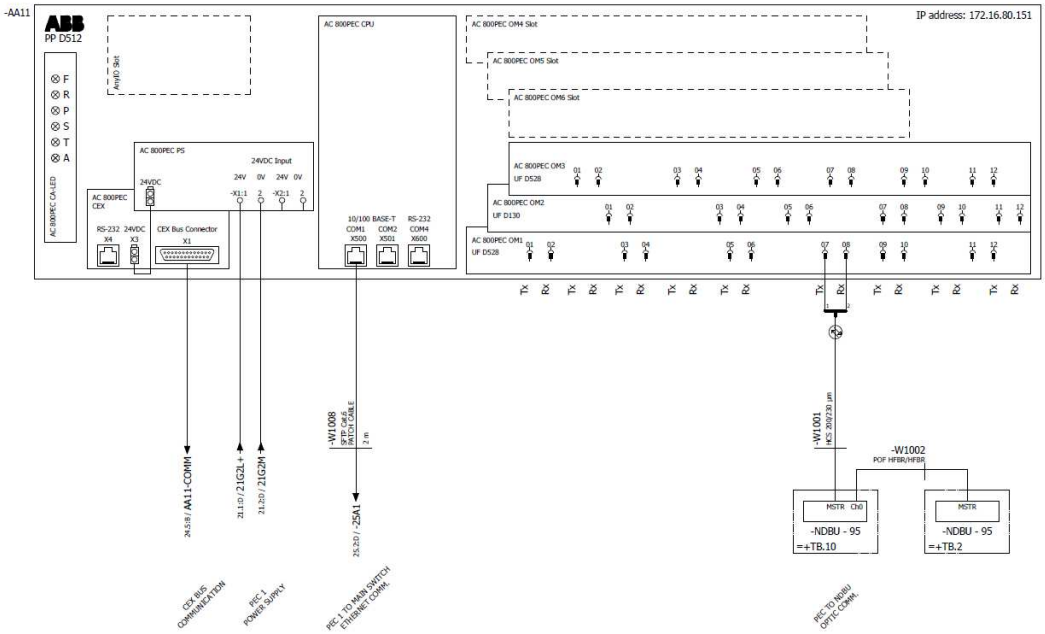
Slika 5.2. Valjački stanovi



Slika 5.3. Završni produkt nakon namatanja

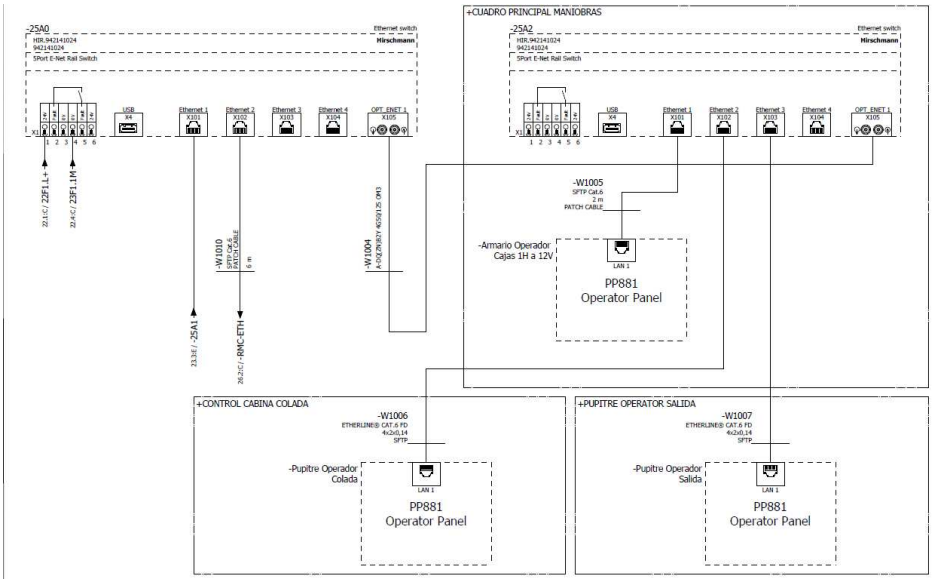
5.2. Električne sheme

Na slikama 5.4. i 5.5. prikazani su dijelovi elektroinstalacijskih shema izrađenih u EPLAN alatu. Na slici 5.4. prikazana je shema PLC-a i vidljivi su komunikacijski ulazi PLC-a koji se povezuju sa sustavom.



Slika 5.4. Električna shema povezivanja PLC-a

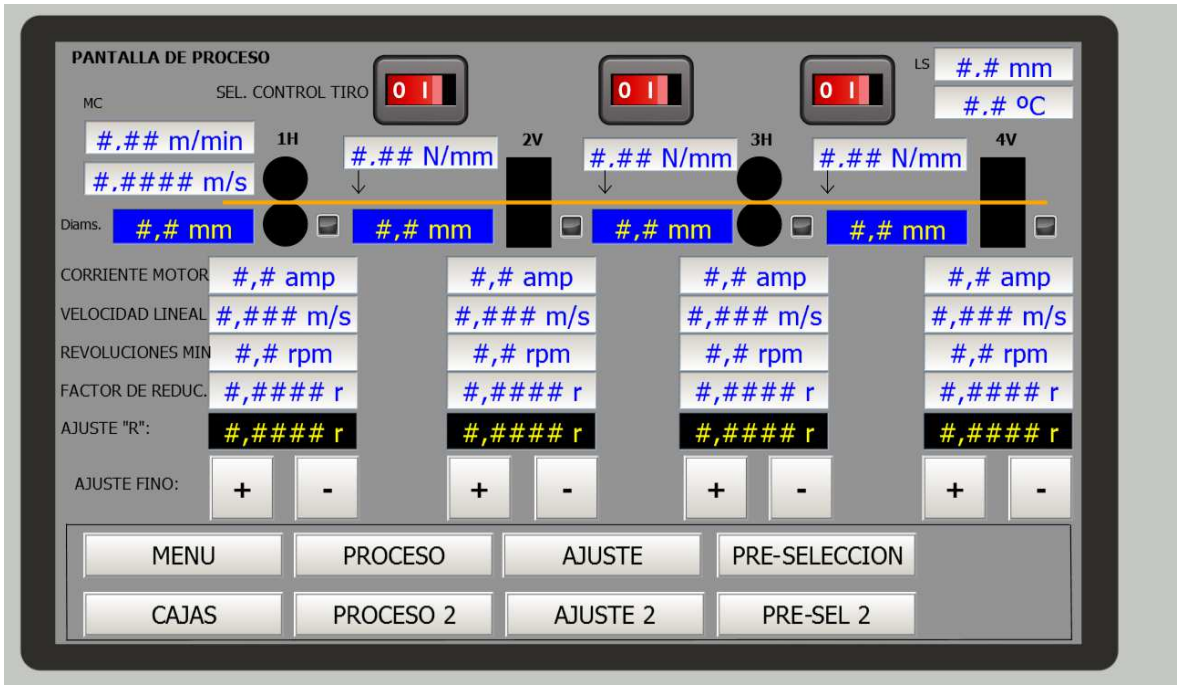
Na slici 5.5. prikazane su električne sheme povezivanja sustava s operatorskim panelima (HMI).



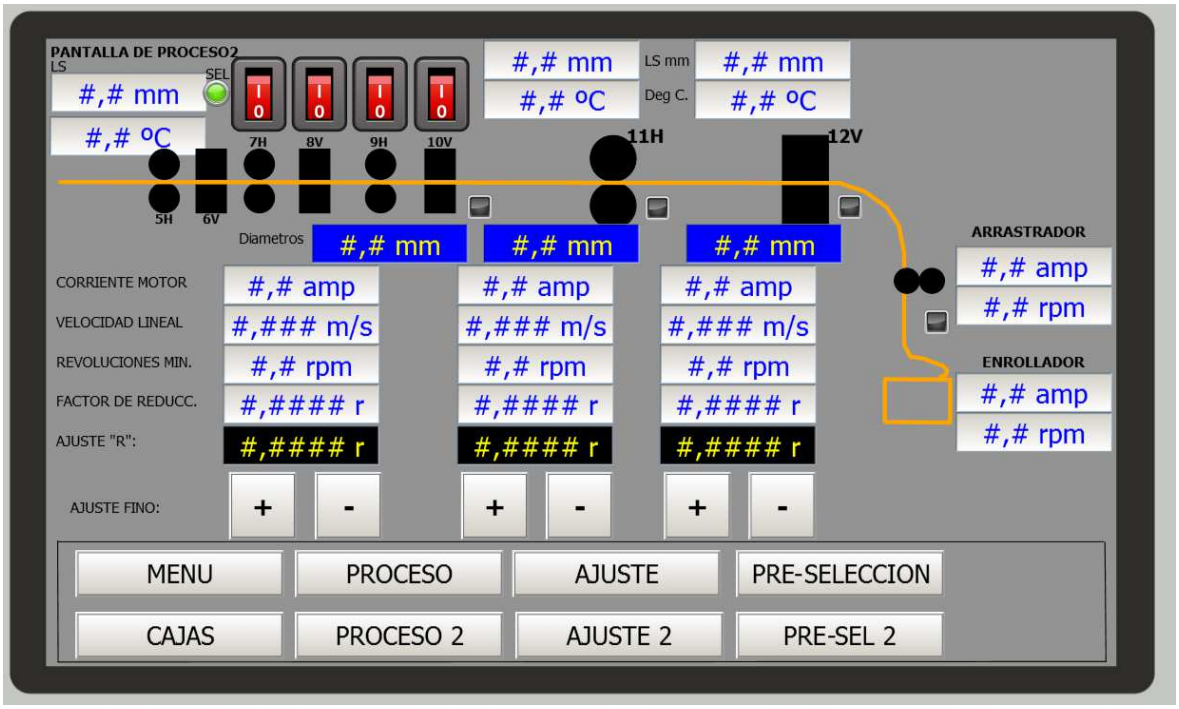
Slika 5.5. Električna shema povezivanja HMI-eva

5.3. HMI

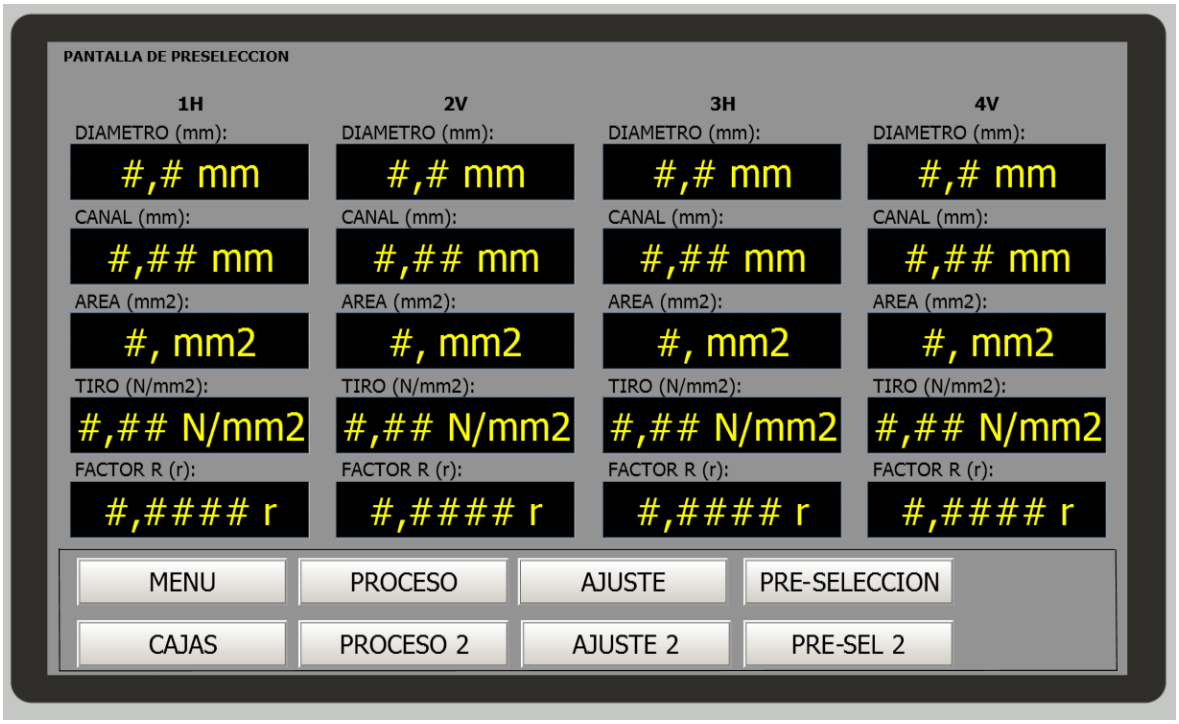
U postrojenju se nalaze tri HMI uređaja. Prvi HMI uređaj nalazi se na početnom dijelu trake gdje materijal ulazi u proces, drugi na sredini trake, a zadnji na kraju trake gdje dolazi do namatanja žice. Na slikama 5.6., 5.7., 5.8., 5.9. i 5.10. prikazani su izrađeni dijelovi prikaza s HMI uređaja. Kao što je vidljivo na slikama, na prikazima HMI-a moguće je pratiti stanje svakoga motora. Prikazana su mjerenja struje, brzine i napona. Na prikazima vidljive su sve indikacije i greške vezane uz stanja motora. Putem HMI uređaja moguće je prilagoditi parametre procesa kao što su R-faktori motora i promjer namatanja žice.



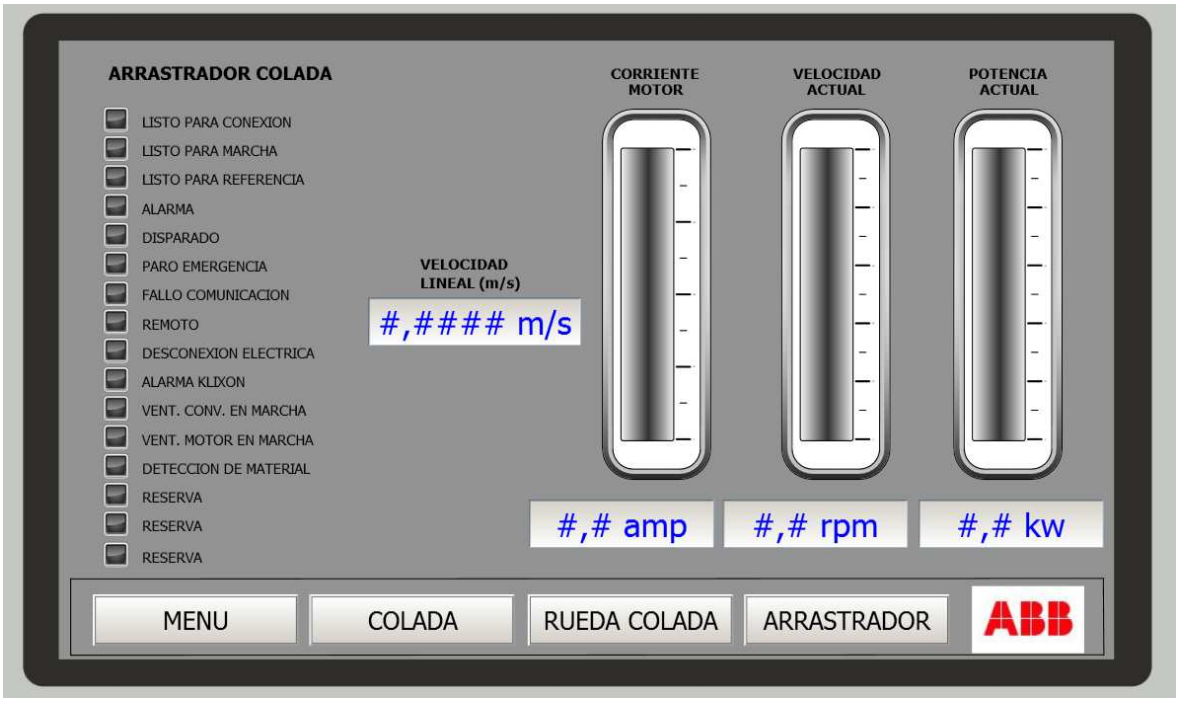
Slika 5.6. Prikaz 1 procesa na HMI-u



Slika 5.7. Prikaz 2 procesa na HMI-u



Slika 5.8. Prikaz 3 procesa na HMI-u

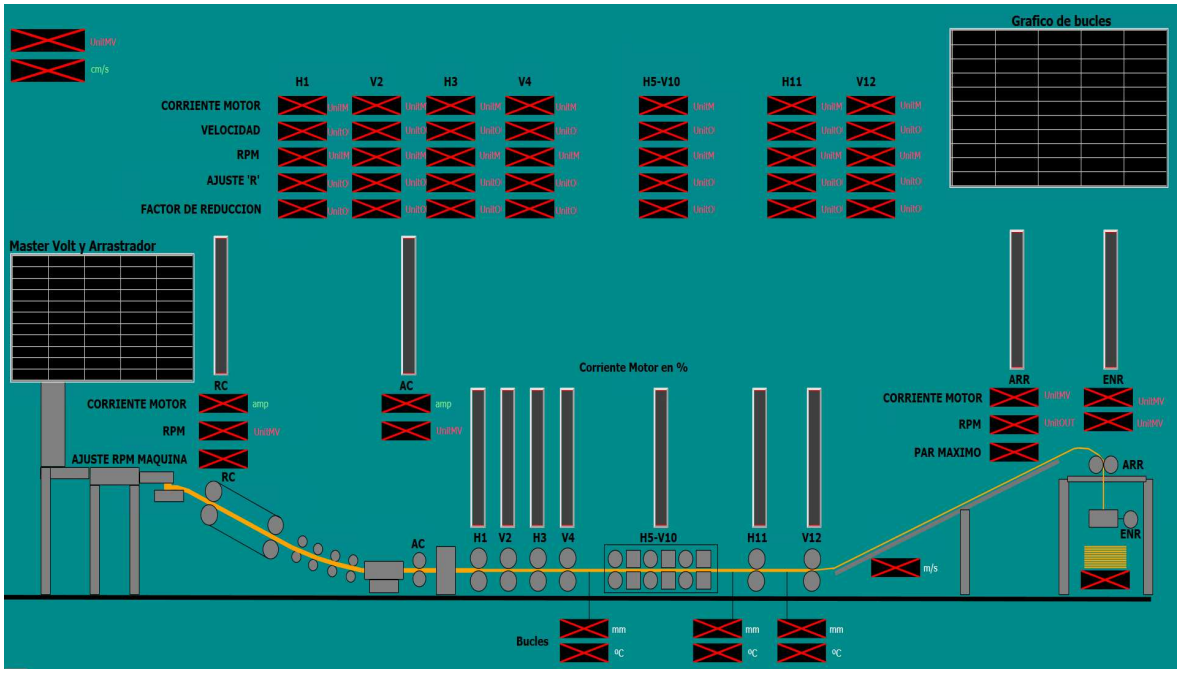


Slika 5.9. Prikaz 4 procesa na HMI-u

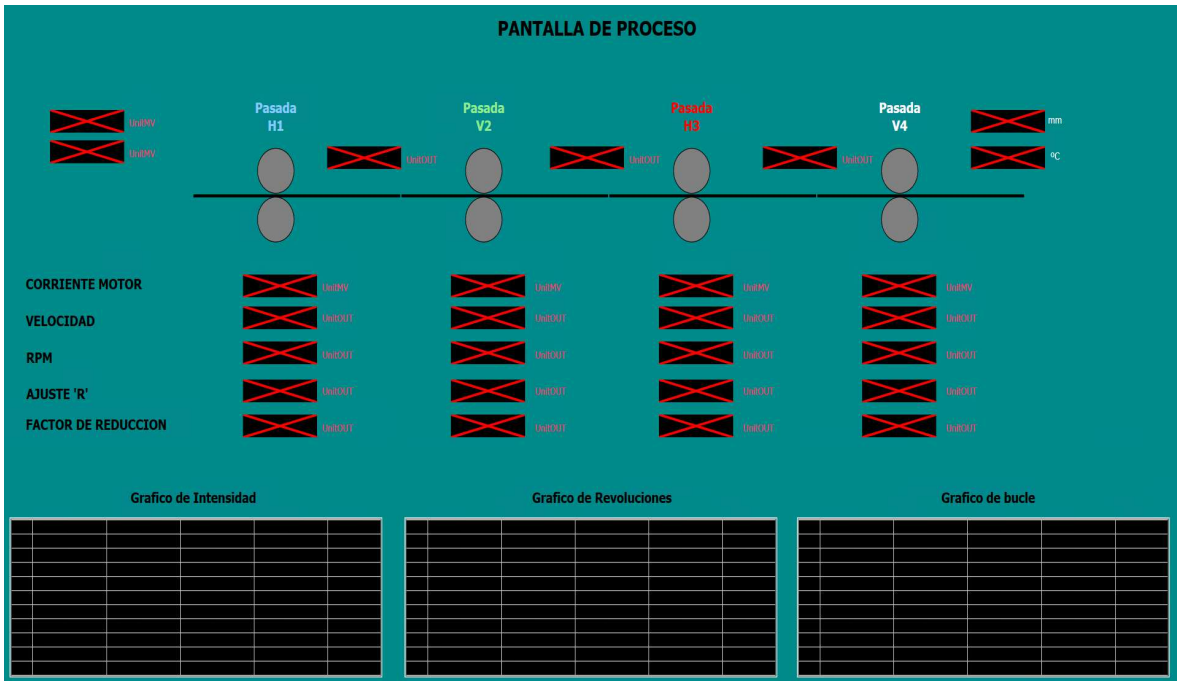
Slika 5.10. Prikaz 5 procesa na HMI-u

5.4. SCADA

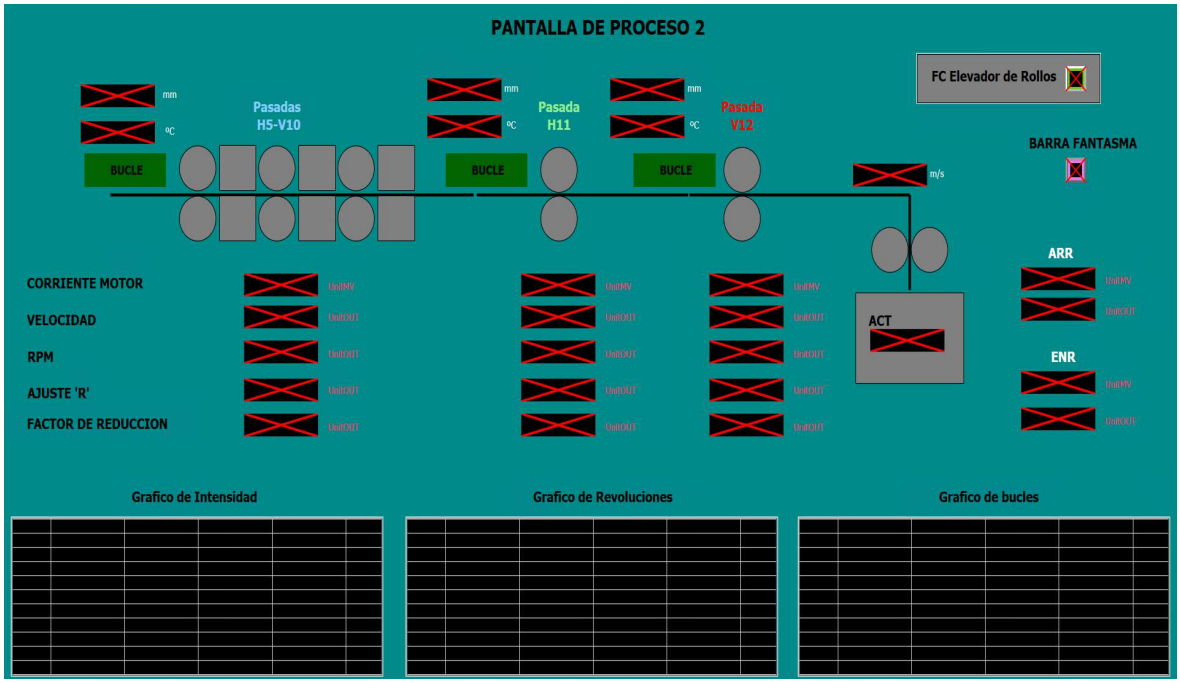
SCADA (engl. *supervisory control and data acquisition*) predstavlja složen sustav koji se koristi za nadzor i upravljanje industrijskim procesima. Ovaj sustav omogućava prikupljanje, analizu i prikazivanje podataka u stvarnom vremenu. SCADA sustavi prikazuju širok spektar informacija koje pomažu u upravljanju industrijskim procesima. Prikazuje trenutno stanje procesa ili opreme, uključujući varijable kao što su struja i brzina motora. Omogućava operaterima da izdaju naredbe za promjenu stanja opreme ili procesa na temelju prikupljenih podataka. Generira alarme i upozorenja tako da može automatski upozoriti operatere na nepravilne uvjete ili kvarove, čime se povećava sigurnost i pouzdanost rada sustava. Može generirati izvještaje i analizirati podatke bilježenjem svih događaja. Omogućuje vizualizaciju podataka kroz grafičke prikaze. Na slikama 5.11., 5.12. i 5.13. prikazani su izrađeni dijelovi prikaza sa SCADA-e. Na slikama su prikazana stanja motora iz kojih je moguće pratiti parametre poput brzine i struje i moguće je prilagoditi parametre kao što je R-faktor. Slike omogućavaju operaterima lakši prikaz cijelog procesa kao na slici 5.11., ali isto tako i detaljnije prikaze dijelova procesa kao na slici 5.13. koja prikazuje krajnji dio trake i namatanje same žice. Također, omogućava praćenje grafičkih trendova vrijednosti procesa.



Slika 5.11. Prikaz 1 procesa na SCADA-i



Slika 5.12. Prikaz 2 procesa na SCADA-i

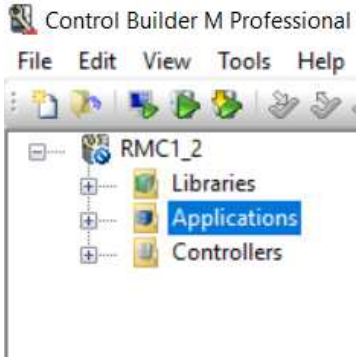


Slika 5.13. Prikaz 3 procesa na SCADA-i

5.5. Programski kod

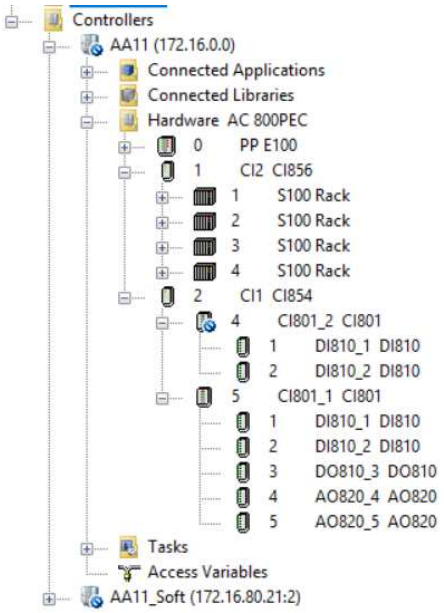
5.5.1. Struktura koda

Na slici 5.14. prikazana je struktura programskog koda u Control Builder alatu.



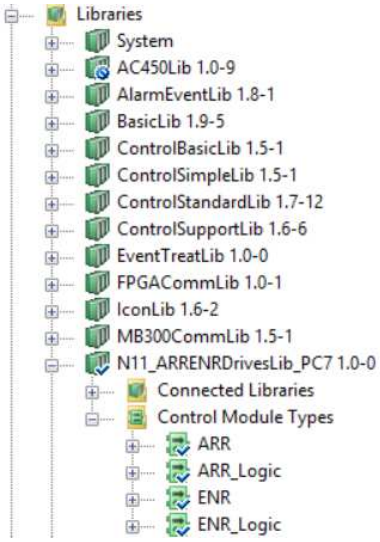
Slika 5.14. Struktura programskog koda

U programu su korišteni fizički PLC uređaj i simulator za testiranje što je vidljivo na slici 5.15. Također, prikazana je konfigurirana hardverska struktura.



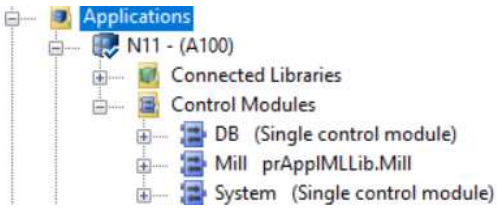
Slika 5.15. Struktura hardverske konfiguracije

Za potrebe programiranja napravljene su prikladne programske knjižice (engl. *libraries*). Unutar svake definirani su tipovi podataka i strukture podataka kao i kontrolni moduli koji sadrže sav programski kod za određeni dio sustava kao na slici 5.16.



Slika 5.16. Programske knjižice

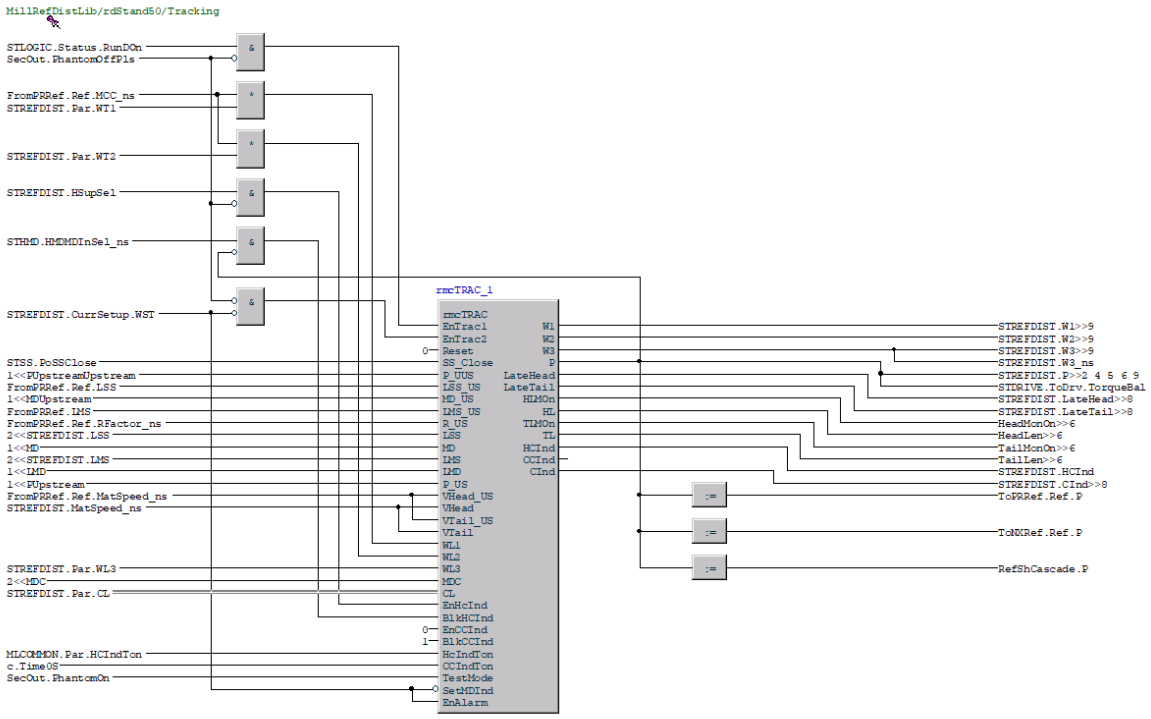
Na kraju su instancirani kontrolni moduli unutar aplikacije i povezani su svi ulazi i izlazi kontrolnih modula s pripadajućim varijablama kao na slici 5.17.



Slika 5.17. Programska aplikacija

5.5.2. Implementacija praćenja glave materijala

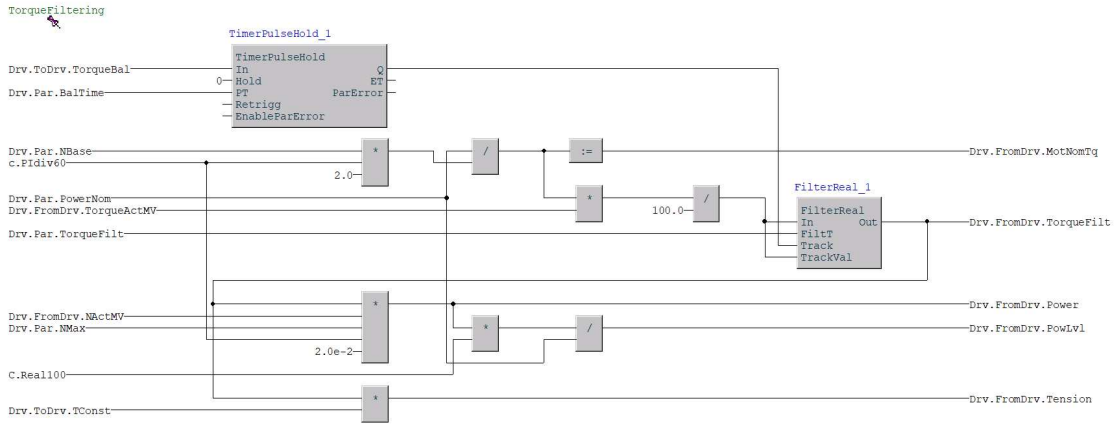
Funkcija praćenja glave materijala opisana u poglavlju 3.3. implementirana je u programskom alatu Control Builder M i prikazana slikom 5.18.



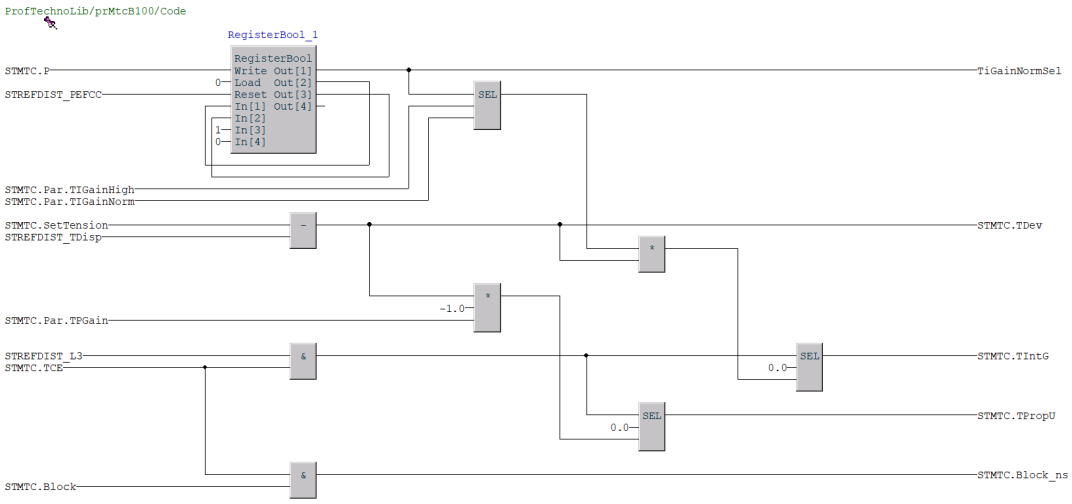
Slika 5.18. Implementacija praćenja glave materijala

5.5.3. Implementacija kontrole minimalne napetosti

Funkcija kontrole minimalne napetosti opisana u poglavlju 3.4. implementirana je u programskom alatu Control Builder M i prikazana slikama 5.19. i 5.20.



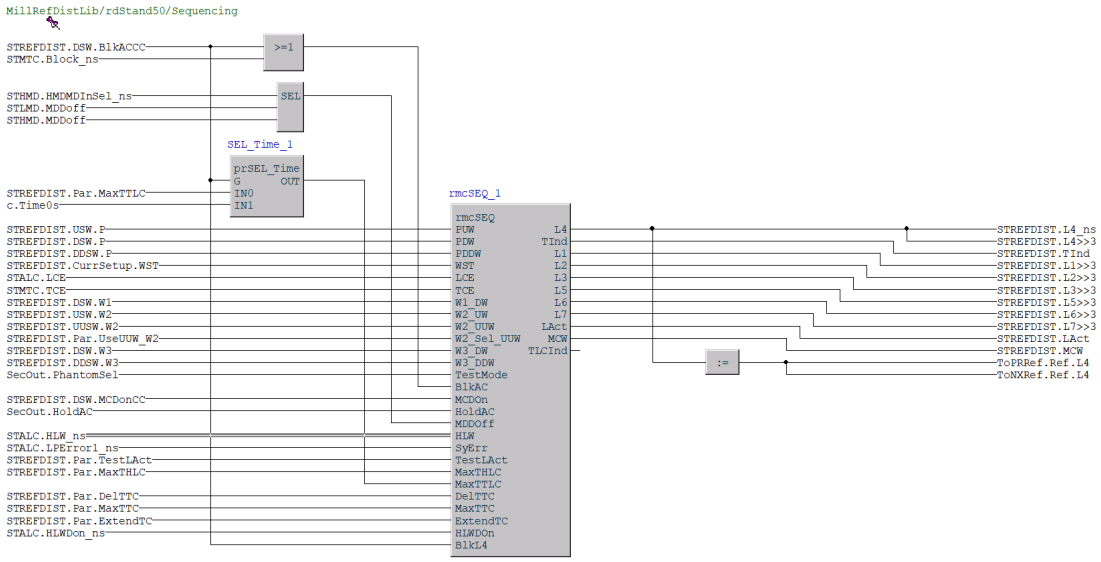
Slika 5.19. Implementacija kontrole minimalne napetosti 1



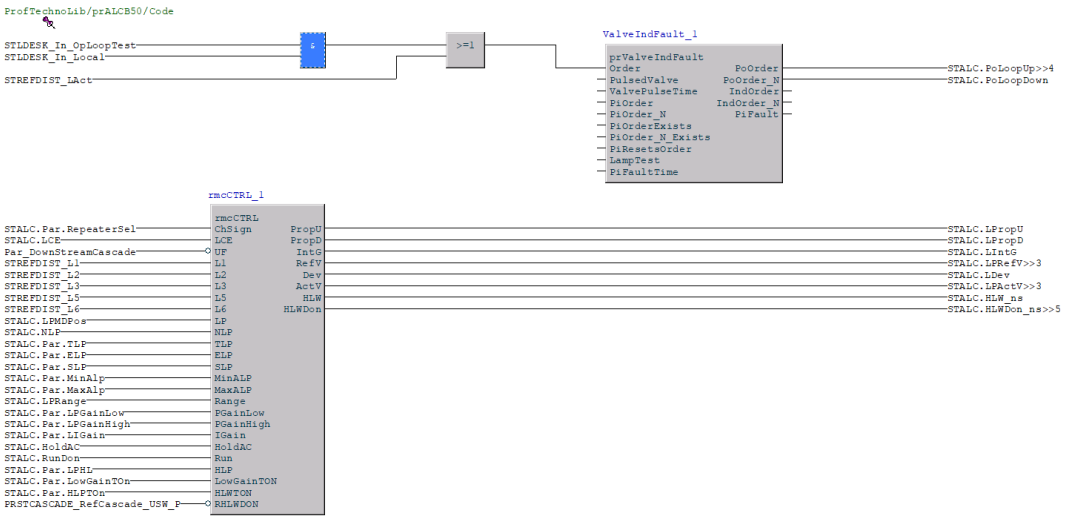
Slika 5.20. Implementacija kontrole minimalne napetosti 2

5.5.4. Implementacija automatske kontrole petlje

Funkcija automatske kontrole petlje opisana u poglavlju 3.5. implementirana je u programskom alatu Control Builder M i prikazana slikama 5.21. i 5.22.



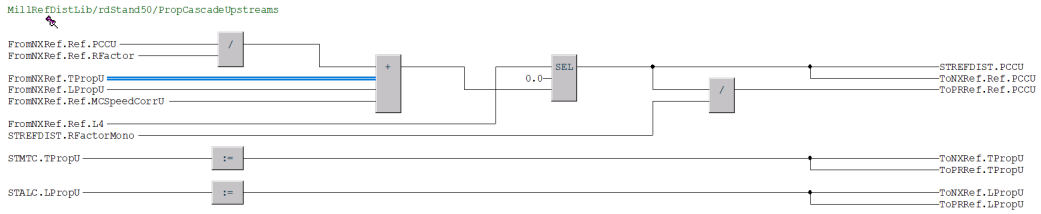
Slika 5.21. Implementacija automatske kontrole petlje 1



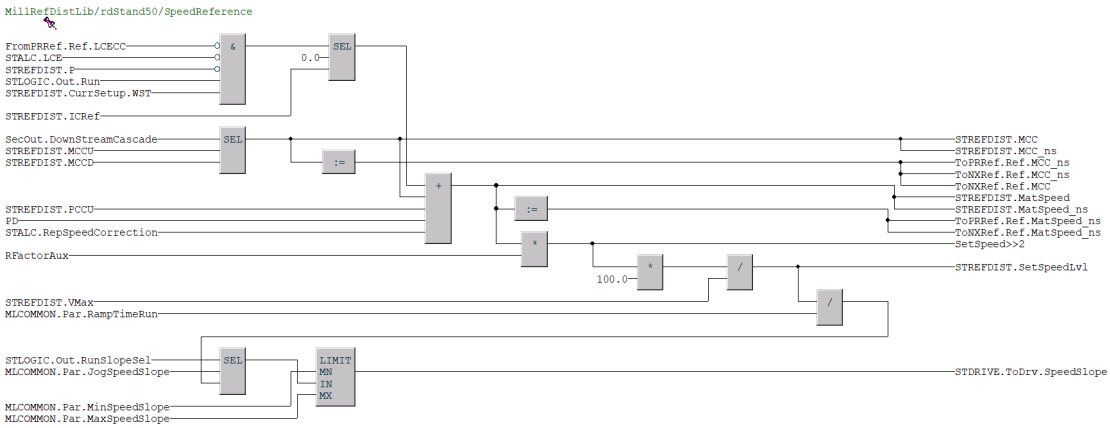
Slika 5.22. Implementacija automatske kontrole petlje 2

5.5.5. Implementacija zadavanja reference brzine

Zadavanje reference brzine implementirano je u programskom alatu Control Builder M i dijelovi programskog koda prikazani su slikama 5.23. i 5.24.



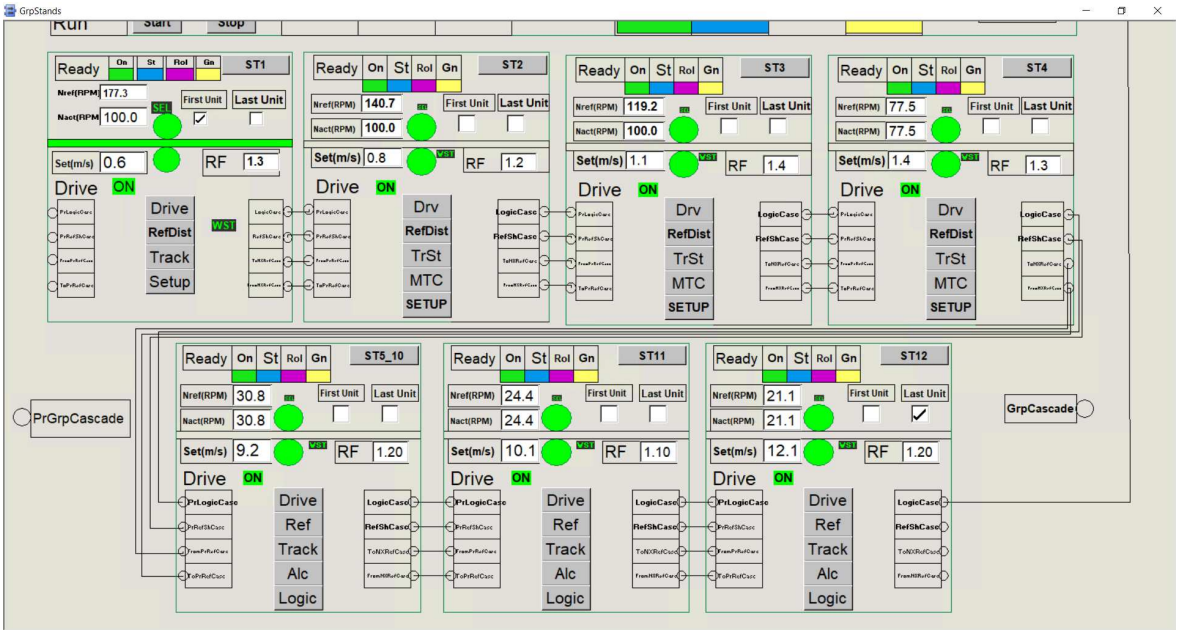
Slika 5.23. Implementacija zadavanja reference brzine 1



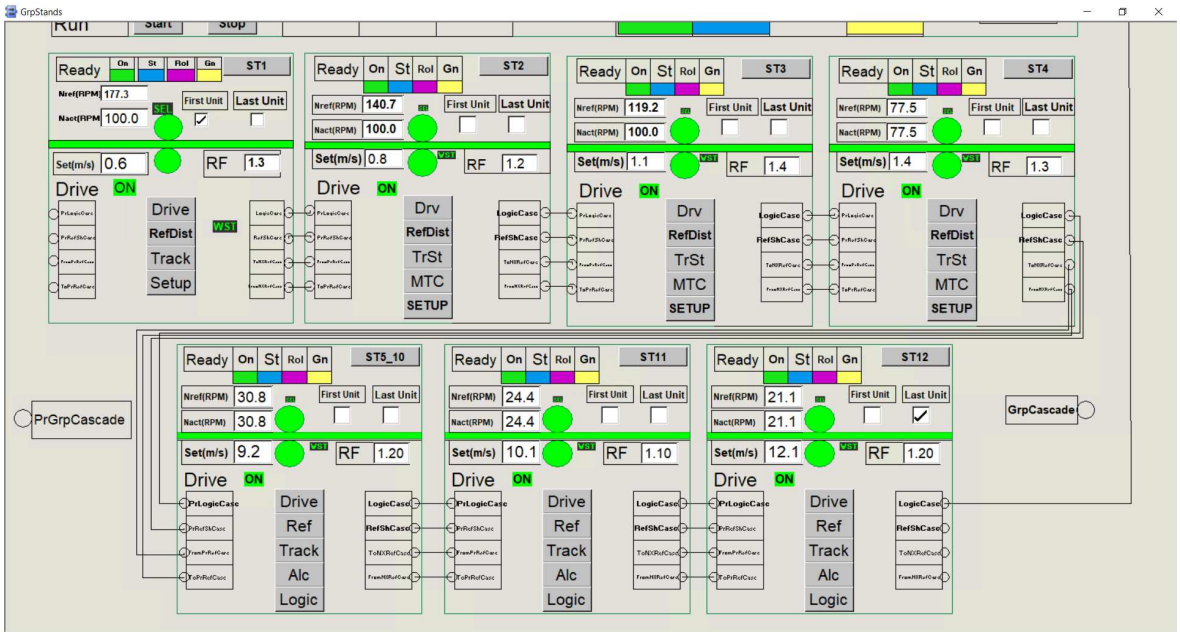
Slika 5.24. Implementacija zadavanja reference brzine 2

5.6. Simulacijski odzivi upravljanja

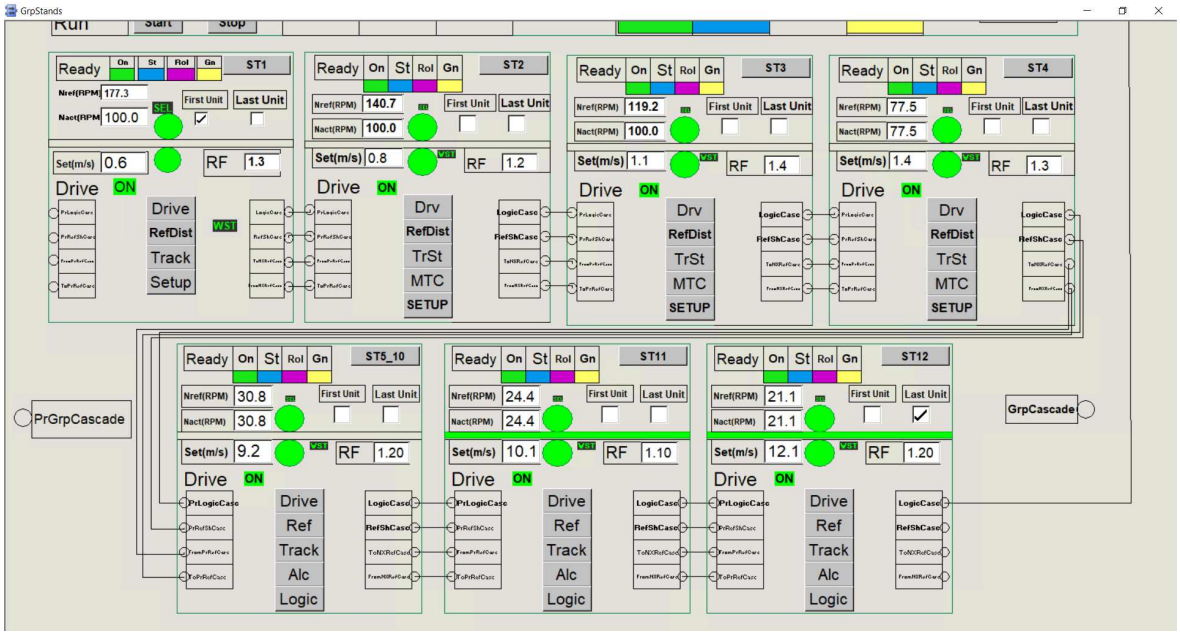
Za potrebe testiranja koristi se grafičko sučelje i simulacijski blokovi. Na slikama 5.25., 5.26. i 5.27. prikazana je simulacija na kojoj je vidljiv prolazak materijala (zelena linija na slici) kroz sustav. Na simulaciji mogu se pratiti funkcije poput kontrole napetosti, praćenja glave i repa materijala, postavljanja parametara i kontrole električnih pogona. Iz same simulacije može se vidjeti ispravnost programa. Vidljivo je da stanjivanjem žice brzina materijala raste, što je očekivano prema jednadžbi 3.2 . Iz toga se može zaključiti da je na kraju trake postignuta željena brzina, što je bio i cilj same regulacije procesa, pa je onda i sama regulacija uspješna.



Slika 5.25. Programska simulacija 1

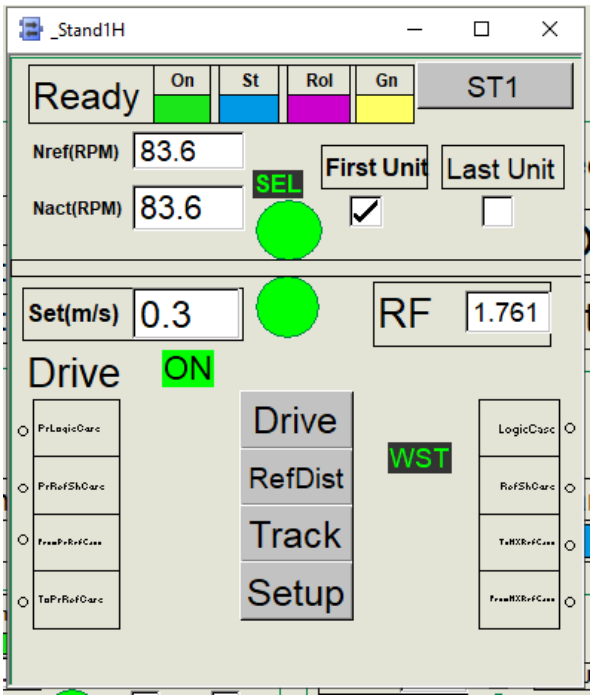


Slika 5.26. Programska simulacija 2

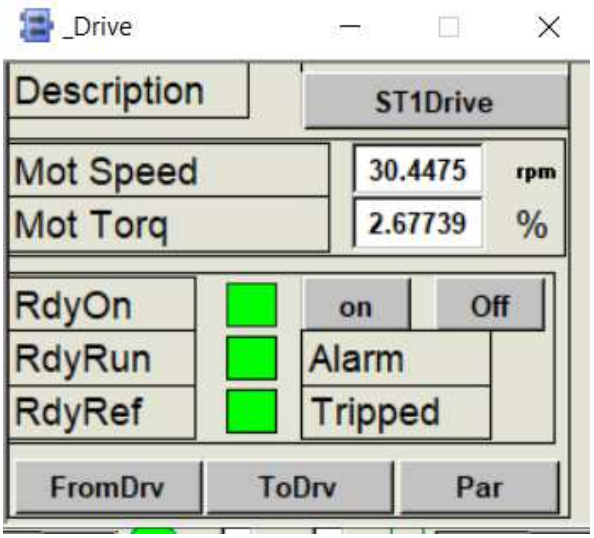


Slika 5.27. Programska simulacija 3

Na slici 5.28. prikazano je sučelje simulacije valjačkog stana na kojem su vidljive informacije o stanu poput postotka stvarne brzine u odnosu na nominalnu brzinu, brzinu materijala kroz stan, kao i stanja samoga stana. Detaljniji prikaz stanja motora vidljiv je na slici 5.29. gdje su vidljiva stanja poput 'motor upaljen' ili 'motor spreman za korištenje'.

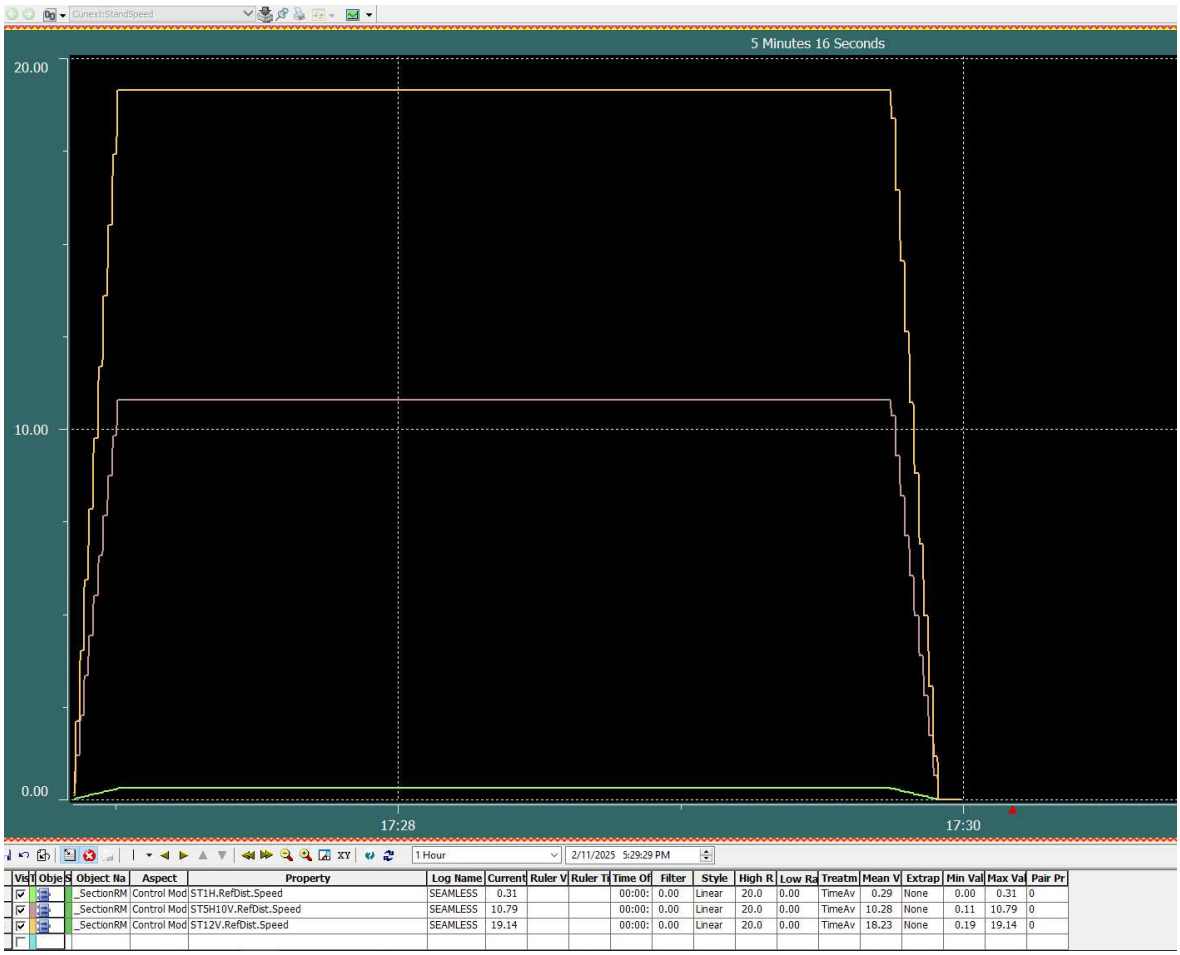


Slika 5.28. Simulacija valjačkog stana ST1



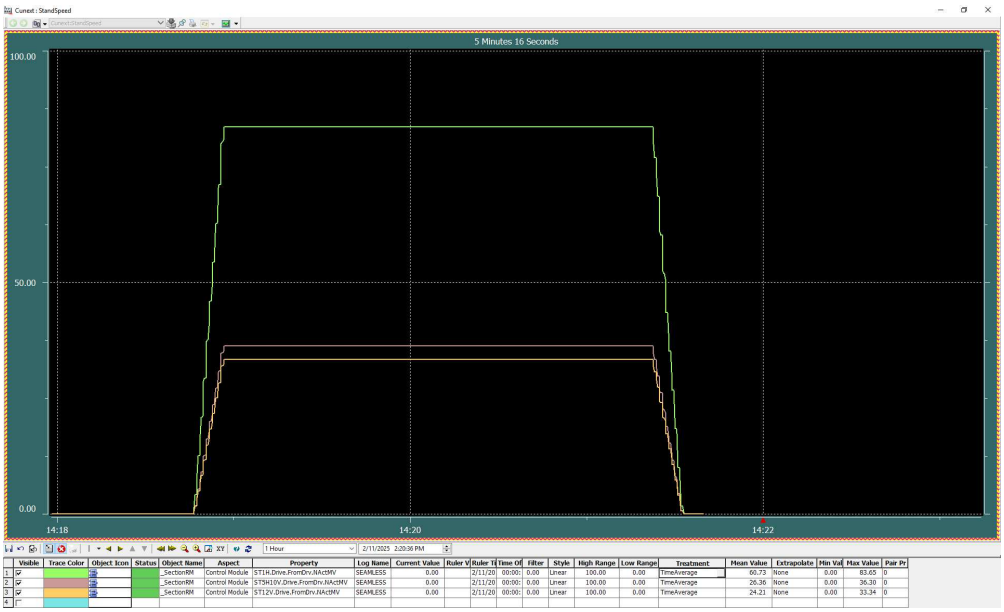
Slika 5.29. Simulacija motora ST1

Slika 5.30. prikazuje trend brzina valjaka i materijala kroz radne stanove prilikom pokretanja i zaustavljanja valjaonice. Zelenom bojom označen je valjački stan na ulazu valjaonice, crvenom onaj u sredini valjaonice i narančastom stan na kraju valjaonice. Iz trenda je isto tako vidljivo povećanje brzine kroz valjaonicu i konstantnost brzine stanova prilikom normalnog rada valjaonice.

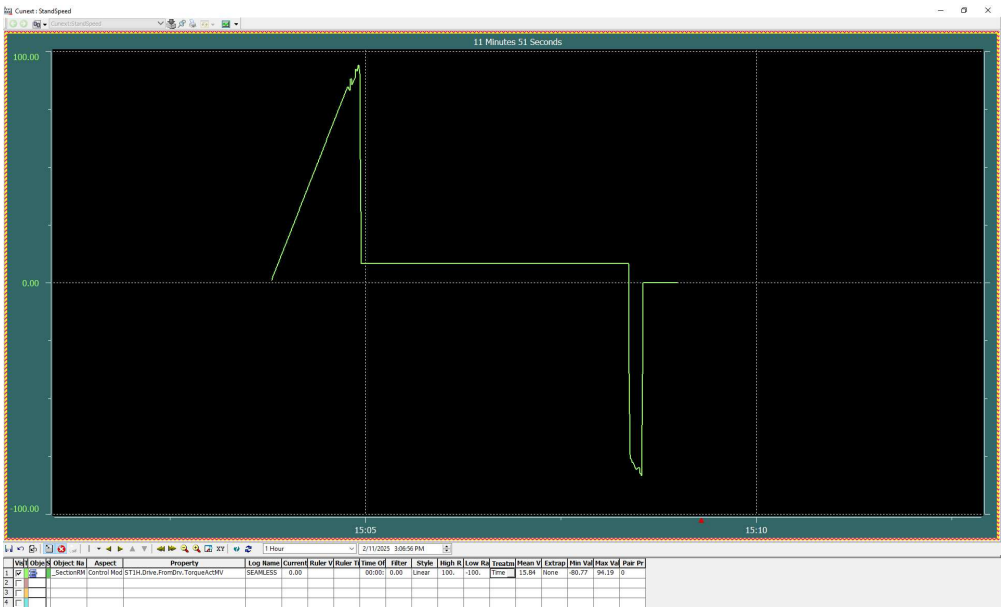


Slika 5.30. Trend brzina motora

Slika 5.31. prikazuje omjere stvarnih i nominalnih brzina triju valjačkih stanova kroz valjaonicu, dok je na slici 5.32. prikazan postotak maksimalnog momenta prvog valjačkog stana prilikom pokretanja i zaustavljanja valjaonice u postotku u odnosu na nominalni moment.

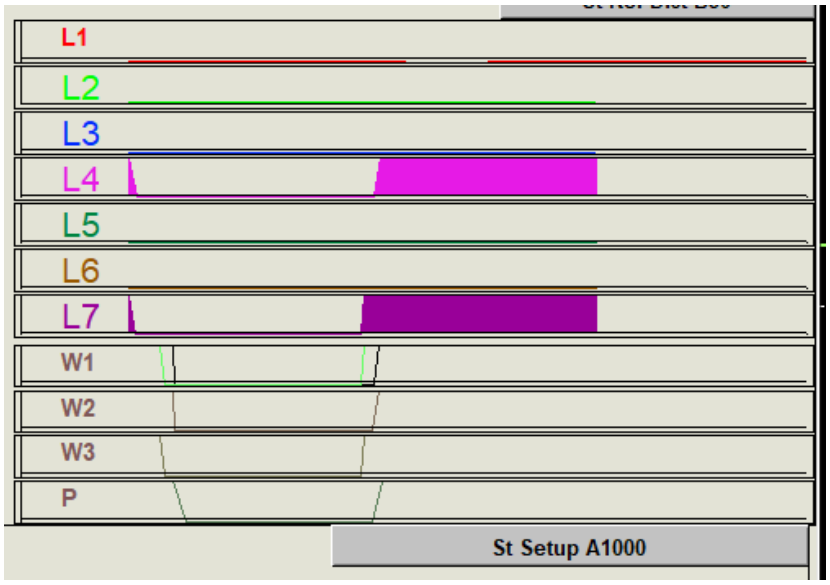


Slika 5.31. Trend omjera brzina motora



Slika 5.32. Trend momenta prvog valjačkog stana

Slika 5.33. prikazuje praćenje signala potrebnih za praćenje glave materijala i odvijanje sekvenci kontrole procesa.



Slika 5.33. Signali praćenje glave materijala

6. Zaključak

U ovome radu detaljno je analiziran i implementiran sustav upravljanja žičnom prugom (engl. *wire rod mill*) u postupku vrućeg valjanja, s posebnim naglaskom na automatizaciju i nadzor industrijskog procesa. Fokus je bio na razvoju automatiziranog sustava temeljenog na ABB AC 800PEC kontroleru, koji omogućuje preciznu međustupanjsku regulaciju napetosti, sinkronizaciju brzine valjaka i optimizaciju protoka materijala. Implementacija uključuje integraciju SCADA sustava, senzora i aktuatora putem standardiziranih komunikacijskih protokola, čime je osigurano kontinuirano praćenje procesa i povećanje efikasnosti sustava. Ključni izazovi, poput detekcije oštećenja (engl. cobble), sinkronizacije brzine valjaka i kontrole napetosti, uspješno su riješeni implementacijom prilagođenih rješenja. Rezultati izrađene simulacije jasno pokazuju ispravno praćenje reference brzine temeljeno na implementiranim funkcijama praćenja, automatske kontrole petlje i kontrole minimalne napetosti materijala. Također, rezultat integracije automatiziranog sustava doprinosi stabilnosti procesa i konkurentnosti na tržištu. U budućnosti, mogle bi se istražiti druge metode upravljanja, a PID regulator zamijeniti efikasnijim načinom upravljanja.

Literatura

[1] https://www.ispatguru.com/automation-and-control-in-wire-rod-mill/, [mrežno; stranica posjećena: veljača 2024.].

[2] https://www.nexinstrument.com/PPD113, [mrežno; stranica posjećena: veljača 2024.].

[3] https://compacthardwareselector.automation.abb.com/product/ci856, [mrežno; stranica posjećena: veljača 2024.].

[4] https://compacthardwareselector.automation.abb.com/product/ao820, [mrežno; stranica posjećena: veljača 2024.].

[5] https://compacthardwareselector.automation.abb.com/product/di810, [mrežno; stranica posjećena: veljača 2024.].

[6] https://compacthardwareselector.automation.abb.com/product/ci801, [mrežno; stranica posjećena: veljača 2024.].

[7] https://compacthardwareselector.automation.abb.com/product/ci854b, [mrežno; stranica posjećena: veljača 2024.].

[8] https://compacthardwareselector.automation.abb.com/product/pp881, [mrežno; stranica posjećena: veljača 2024.].

[9] https://www.automation.com/en-us/products/product01/abb-introduces-dcs880-dc-variable-speed-drives, [mrežno; stranica posjećena: veljača 2024.].

Sažetak

Upravljanje žičnom prugom u postupku vrućeg valjanja

Matija Mrvčić

Sustav upravljanja žičnom prugom (engl. *wire rod mill*) u procesu vrućeg valjanja ključan je za proizvodnju visokokvalitetnih metalnih proizvoda poput bakrene žice. U ovome radu istražen je i implementiran sustav upravljanja žičnom prugom kako bi se omogućila precizna regulacija napetosti između valjaka, sinkronizacija brzine i optimizacija protoka materijala. Implementacija se temelji na ABB AC 800PEC kontroleru, SCADA sustavu i integraciji senzora i aktuatora putem standardiziranih komunikacijskih protokola. Poseban naglasak stavljen je na izazove poput detekcije oštećenja materijala, održavanje stabilnosti procesa i kontrolu napetosti materijala pri visokim brzinama. Implementirani algoritmi kontrole omogućili su ispravan rad sustava, točno praćenje reference brzine i nadzor cijeloga sustava. Rezultati pokazuju kako automatizacija doprinosi optimizaciji procesa, smanjenju troškova i povećanju konkurentnosti industrije. Ovaj rad naglašava važnost automatizacije za rješavanje složenih inženjerskih izazova u industriji.

Ključne riječi: Vruće valjanje; valjaonica za proizvodnju bakrene žice; minimalna kontrola napetosti; programabilni logički kontroleri; HMI; SCADA; kontrola valjaonice; automatizacija

Abstract

Wire rod mill control in a hot rolling process

Matija Mrvčić

The control system for a wire rod mill in the hot rolling process is essential for the production of high-quality metal products such as copper wire. This paper explores and implements a system for a wire rod mill designed to enable precise tension regulation between rollers, speed synchronization, and material flow optimization. The implementation is based on the ABB AC 800PEC controller, SCADA system and the integration of sensors and actuators through standardized communication protocols. Special emphasis is placed on challenges such as defect detection, maintaining process stability, and material tension control at high rolling speeds. The implemented control algorithms have ensured the proper functioning of the system, accurate speed reference tracking and overall system monitoring. The results show that automation contributes to process optimization, cost reduction, and increased industrial competitiveness. This paper emphasizes the importance of automation in solving complex engineering challenges in the industry.

Keywords: Hot rolling process; wire rod mill; minimum tension control; programmable logic controllers; HMI; SCADA; mill control; automation