

UNIVERZA V LJUBLJANI  
FAKULTETA ZA RAČUNALNIŠTVO IN INFORMATIKO

Zahir Mujanović

AVTOMATSKA REGULACIJA ŽARILNE PEČI  
DIPLOMSKO DELO NA UNIVERZITETNEM ŠTUDIJU

Mentor prof. dr. Uroš Lotrič

Ljubljana, 2011



Št. naloge: 01723/2010

Datum: 01.12.2010

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za računalništvo in informatiko izdaja naslednjo nalogo:

Kandidat: **ZAHIR MUJANOVIĆ**

Naslov: **AVTOMATSKA REGULACIJA ŽARILNE PEČI**  
**AUTOMATED CONTROL OF MUFFLE FURNACE**

Vrsta naloge: Diplomsko delo univerzitetnega študija

Tematika naloge:

Izdelajte celostno rešitev za avtomatsko regulacijo žarilne peči, ki vključuje električne vezalne sheme, stikalno omaro z vsemi potrebnimi elementi in vso programsko opremo. V sistem vključite digitalni modul za proporcionalno-integrirno-diferencialno regulacijo. Zaradi omejitev procesa žarjenja za lažjo nastavitve parametrov regulirnega modula izdelajte vereniški model procesa žarjenja. S poskusi na realnem sistemu ocenite uspešnost predlaganega sistema.

Mentor:

  
prof. dr. Uroš Lotrič

Dekan:

  
prof. dr. Nikolaj Zimic



## **Zahvala**

Zahvaljujem se mentorju dr. Urošu Lotriču za napotke, hitre odgovore in zdravo kritiko pri izdelavi diplomskega dela.

Zahvaljujem se tudi družini, ki je imela dobro mero potrpljenja ob izdelavi tega diplomskega dela.

## Kazalo

Povzetek .....	1
Abstract.....	2
1. Uvod .....	3
2. Teorija vodenja procesov.....	5
2.1. Sistemi in procesi.....	5
2.2. Principi in teorija vodenja.....	7
2.3. Regulacije .....	11
2.4. Regulacija PID .....	14
3. Opis problema .....	18
4. Izdelava.....	22
4.1. Krmilna omara .....	22
4.1.1. Programirljiv logični krmilnik.....	25
4.1.2. Funkcijski modul FM 355 S .....	27
4.1.3. Varnostni elementi.....	30
4.2. Krmilni program .....	32
4.2.1. Siemensovo razvojno okolje Step 7 .....	32
4.2.2. Struktura programa .....	34
4.2.3. Funkcija regulacije temperature .....	36
4.2.4. Nastavitve funkcijskega modula FM 355 S.....	38
4.2.5. Uporabniški vmesnik.....	43
4.3. Testni program.....	45
4.3.1. Model peči .....	45
4.3.2. Določanje parametrov PID .....	47
5. Zaključek .....	52
6. Seznam slik.....	54
7. Reference .....	56

## Seznam uporabljenih kratic in simbolov

- PLK – programirljiv logični krmilnik
- PID – proporcionalno-integrirno-diferencirno
- FM – funkcijski modul
- FB – funkcijski blok
- FC – funkcija
- OB – organizacijski blok
- DB – podatkovni blok

## Povzetek

Namen diplomskega dela je predstaviti rešitev za avtomatsko regulacijo žarilne peči. Ta vsebuje krmilno omaro, v kateri so fizični elementi, potrebni za krmilje in regulacijo, krmilni program, ki je programski element krmilja in nadzoruje in regulira peč, ter uporabniški vmesnik, s katerim uporabnik določa delovanje peči. Regulacija sodi v področje vodenja sistemov, uporabljen pa je proporcionalno-integrirno-diferencirni regulator oziroma regulator PID. Ta tip regulacije je pogost na področju avtomatizacije. Regulator PID je treba pravilno parametrizirati, parametrizacija pa je bila izvedena z nihajnim poskusom Zieglerja in Nicholisa na modelu peči. Krmilna omara vsebuje elemente, ki omogočajo njeno delovanje in jo varujejo, ter izvršne elemente za nepredvideno uporabo, kot so varovalke, mehki zagon in podobno. Krmilni program teče na Siemensovem programirljivem logičnem krmilniku. Napisan je v okolju Step 7 z lestvičnimi diagrami. Program izkorišča signale senzorjev za zaščito peči in okolice, omogoča dinamično pisanje programov žarjenja in komunicira z regulatorjem PID. Uporabniški vmesnik je robusten in enostaven za uporabo. Parametri regulatorja PID in dodatni algoritmi za regulacijo so nastavljeni tako dobro, da je odstopanje regulirane količine od reference v večini primerov manjše od 1 °C.

Ključne besede: avtomatska regulacija, regulator PID, programirljiv logični krmilnik, metoda Ziegler-Nicholisa

## Abstract

The thesis presents a solution for controlling the heating process of a muffle furnace. The solution consists of a control cabinet, which houses the physical elements required for controlling the furnace, a program which controls the heating process and a user interface for interaction. The thesis primarily focuses on the field of control theory, as it uses a PID controller, a common controller in the field of automation. For the purpose of determining the correct parameters of the controller I used the Ziegler-Nichols method on a model of the furnace. The control cabinet includes fuses, soft starters and similiar elements to allow the furnace and it's actuators to function safely and to protect them from unintended use. The control program runs on a Siemens programmable logic controller. It is written in Step 7 using ladder diagrams, and uses sensors to protect the furnace and it's environment, allows users to dynamically change the heating program and communicates with the PID controller. The user interface is robust and easy to use. The PID parameters and additional control algorithms are tuned in such a way that the difference between the setpoint and process value is generally less than 1 °C.

Keywords: process control, PID controller, programmable logic controller, Ziegler-Nichols method

## 1. Uvod

Diplomsko delo je nastalo na podlagi projekta, katerega namen je obnova sistema regulacije žarilne peči. Žarilna peč žari jeklene proizvode na tak način, da jeklo dobi potrebne lastnosti. Za njeno pravilno delovanje je potrebno, da temperatura žarjenca sledi žarilnemu programu, ki ga določi uporabnik. Cilj projekta je narediti program, ki z regulatorjem skrbi za pravilno delovanje peči. Temperatura žarjenca ne sme od želene vrednosti odstopati za več kot 10 °C. Čeprav je regulator srce projekta, je treba izdelati še vse, kar peč potrebuje za delovanje. Med dodatne naloge spada izdelava krmilne omare, programa, ki nadzoruje peč in regulator ter uporabniški vmesnik, s katerim bo uporabnik upravljal peč.

Program bo regulacijo izvajal s proporcionalno-integrirno-diferencirnim regulatorjem oziroma regulatorjem PID, ki je v svetu zelo razširjen. Pri regulaciji PID gre za zaprtzančno vodenje dinamičnega sistema, kot je žarilna peč. Problemi tega tipa se pogosto pojavljajo in so prisotni povsod, od težke industrije do avtomobilov in bele tehnike. Avtomatske klimatske naprave ohranjajo želeno temperaturo z regulatorjem. Bolj kompleksna bela tehnika ima natančne programe gretja ali hlajenja, ki jih izvaja v čipu skrit regulator. Z vse večjo močjo in nižjo ceno mikroročunalnikov se proizvajalcem ponuja vse več možnosti za uporabo regulacije za vse bolj vsakdanje probleme. Pri regulatorju PID je osnovna naloga določiti njegove parametre. Glavni problemi pri izdelavi krmilne omare so povezani z izbiro pravih elementov tako v smislu računalnika, ki bo izvajal program, kot tudi ostalih elektronskih komponent, kot so transformatorji, motorne zaščite in varovalke. Tu smo se zanašali predvsem na lastno znanje, saj poznamo polje elektrotehnike. Na izdelavo krmilnega programa vpliva konstrukcija peči, kako je izdelana krmilna omara in kako so nameščena tipala. Program mora skrbeti za pravilno in varno delovanje peči ter izvajanje programov gretja oziroma delovnih ciklov.

Delovni cikel lahko traja več dni, neprestano gretje in hlajenje lahko žarjenec uničita ter povzročita dodatno škodo podjetju. Ker je bil poleg tega z naročnikom sklenjen dogovor, da bo zamenjava krmilnega sistema trajala največ en teden, smo se odločili, da bomo naredili simulator modela peči, ki spremlja temperaturo zraka v peči, temperaturo površine žarjenca in temperaturo notranjosti žarjenca. Simulator uporablja enačbe prenosa toplote, predvsem zakon o prevajanju toplote oziroma Fourierov zakon, konstante v enačbah pa so bile določene na podlagi obstoječih meritev. Prednost uporabe modela je tudi ta, da simulacije lahko izvajamo večkrat in veliko hitreje kot v realnem sistemu, kar nam omogoča boljše prilagoditev programske opreme.

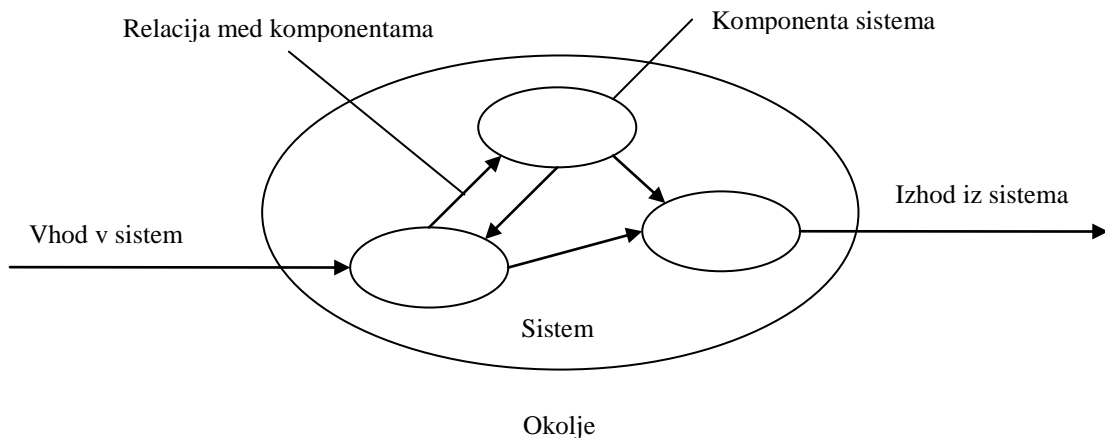
V diplomskem delu so najprej definirani: teorija vodenja procesov, sistem in proces, principi in teorija vodenja, tipi regulacij ter teoretična osnova za regulacijo PID in nastavljanje njenih parametrov. V tretjem poglavju je opisan problem, ki ga je treba rešiti. V četrtem poglavju, ki je razdeljeno na tri podpoglavja, je celostno predstavljena izdelava projekta. V prvem podpoglavju je opisana krmilna omara, ki vsebuje programirljiv logični krmilnik, funkcijski modul, ki izvaja regulacijo, in varnostne elemente, v drugem podpoglavju pa krmilni program, s katerim orodjem je program narejen, njegova struktura, funkcija regulacije

temperature, nastavitve regulatorjev PID in uporabniški vmesnik. Tretje podpoglavje je posvečeno izdelavi testnega programa in modela peči, s katerim so nato določeni parametri regulatorjev PID. Nazadnje so v zaključku podane najpomembnejše ugotovitve.

## 2. Teorija vodenja procesov

### 2.1. Sistemi in procesi

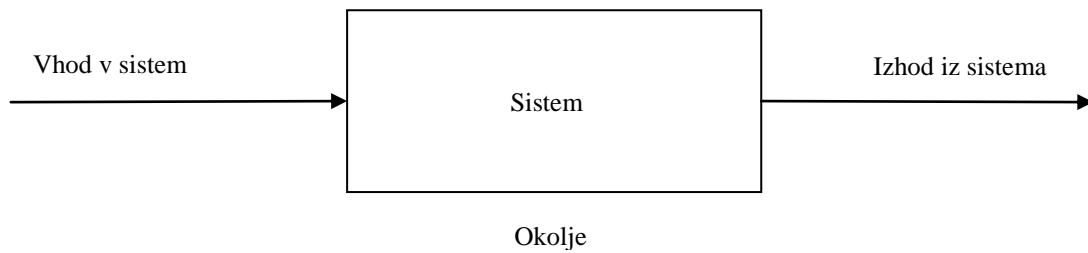
Beseda sistem izhaja iz grščine in pomeni 'povzročati, da stoji skupaj'. Sistem je torej urejena tvorba, ki predstavlja nasprotje naključnosti ali kaosa. Po najbolj splošni definiciji je sistem množica elementov, ki imajo medsebojne relacije in relacije z okoljem. Shema tako razumljenega sistema vidimo na sliki 2.1.



Slika 2.1. Shema sistema z notranjo strukturo [1]

Vsaka komponenta sistema ima svoje značilnosti in je običajno sistem nižje kompleksnosti. Komponente so povezane z relacijami, ki običajno pomenijo izmenjavo snovi, energije ali informacij. Pri določenih komponentah nastopajo tudi relacije, ki predstavljajo interakcijo z okoljem. Relacijam iz okolja, ki imajo vpliv na komponente znotraj sistema, pravimo vhodi v sistem, relacijam, ki vplivajo na okolje, pa izhodi iz sistema.

Mnogokrat nas notranja struktura sistema ne zanima, zanimata pa nas medsebojna odvisnost med vhomom v sistem in izhodom iz njega ter njegova povezanost z okoljem. Zato pogosto sistem predstavimo tudi v obliki, ki jo prikazuje slika 2.2.



Slika 2.2. Poenostavljena shema sistema [1]

Sistem predstavlja več kot zgolj vsoto posameznih komponent. To, kar je več, ni rezultat ene posamezne komponente, ampak sinergija, do katere pride zaradi povezav med njimi. Sinergija pomeni novo kvaliteto in kvantiteto.

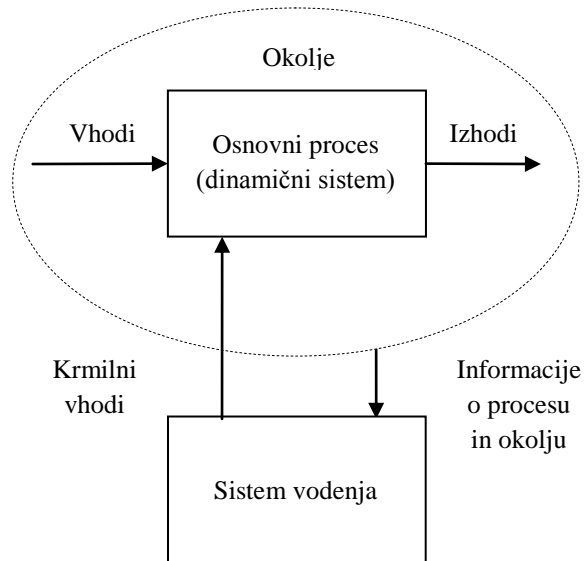
Proces je postopek, ki povzroči spremembo stanja v sistemu. Beseda proces izhaja iz latinske besede *procedere* ('napredovati') in pomeni 'potek, postopek ali dogajanje'. Ko govorimo o procesih, je ključna komponenta čas, saj samo z opazovanjem sistema v različnih časovnih trenutkih lahko opazimo spremembo stanja.

Če je struktura sistema relacija med komponentami ter če relacija pomeni izmenjavo snovi, energije in informacij, potem lahko rečemo, da v sistemu poteka proces, če ta izmenjava povzroči spremembe stanja posameznih komponent.

Sistem, v katerem potekajo procesi, je dinamičen. Primer takega sistema je tovarna, ki iz surovin (vhod) izdeluje izdelke (izhod). Taki dinamični sistemi so ciljno usmerjeni in zato zanimivi s stališča vodenja procesov.

## 2.2. Principi in teorija vodenja

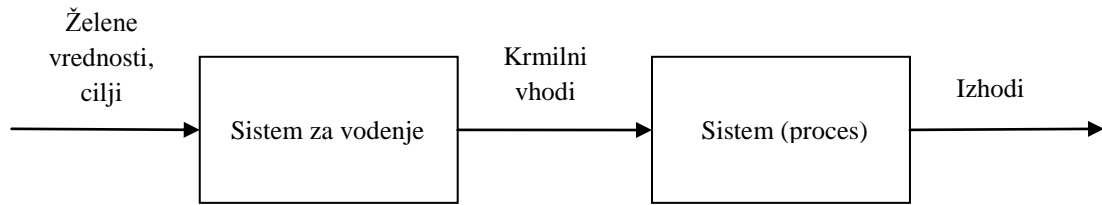
V nadaljevanju se omejimo na dinamične sisteme, v katerih je sedanje stanje odvisno od preteklih stanj, in na ciljno usmerjene sisteme, katerih delovanje ima za človeka neki smisel. V teh primerih lahko rečemo, da je vodenje proces, s katerim vplivamo na delovanje sistema z namenom, da dosežemo zastavljeni cilj [1]. Ravno zato proces vodenja običajno ločimo od osnovnega procesa, kot to prikazuje slika 2.3, oziroma ustrezno temu opredelimo osnovni sistem in sistem za vodenje.



Slika 2.3. Ločitev procesa vodenja od osnovnega procesa [1]

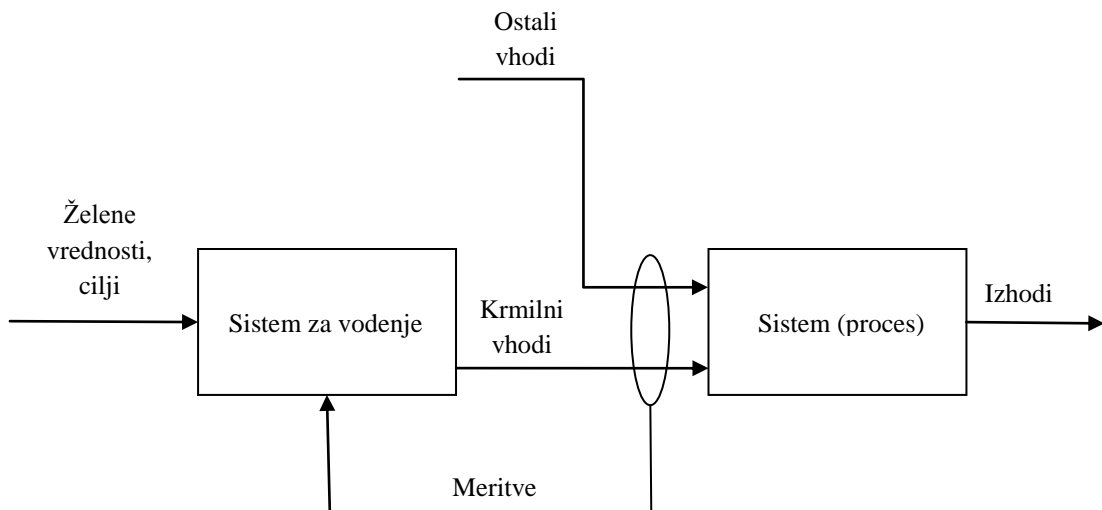
Poznamo več načinov vodenja procesov. Pri odprtozanknem vodenju sistem vodimo, ne da bi preverjali, ali se dejansko obnaša tako, kot smo predvidevali. Primer takega vodenja je vodenje procesa pralnega stroja, ki pere umazano perilo. Programi v pralnem stroju ne preverjajo, ali je perilo čisto, ampak se z uporabo posrednih podatkov v sistemu (nivo vode, temperatura vode) odločajo, ali naj nadaljujejo izvajanje vnaprej predpisanih faz.

Shematski prikaz odprtozančnega vodenja vidimo na sliki 2.4.



Slika 2.4. Odprtozančno vodenje [1]

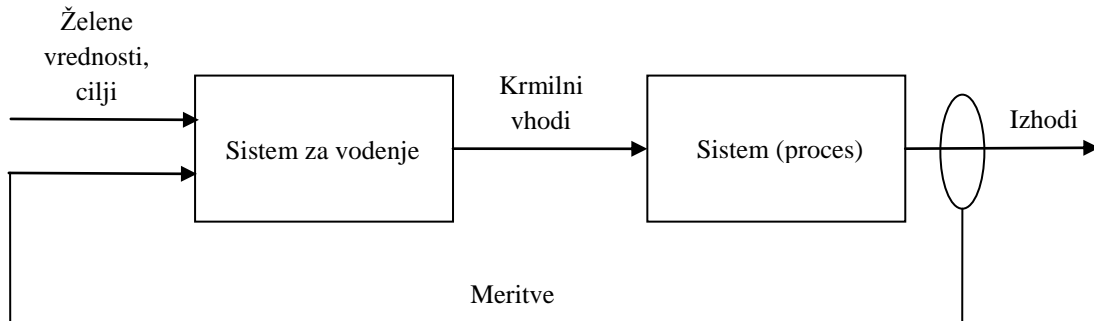
Pri odprtozančnem vodenju z izravnavanjem (kompensacijo) motnje merimo še drug vhod, ki za želeno stanje izhoda predstavlja motnjo. Glede na motnjo lahko prilagodimo vhod. Na ta način lahko uravnavamo izhod, ne da bi ga neposredno merili. Primer takega vodenja je vodenje zgorevanja v kotlu. Merilo kvalitete zgorevanja je ohranjanje nekega konstantnega odstotka kisika v dimnih plinih. Ta odstotek je odvisen od razmerja med gorivom in zrakom, ki ga lahko ohranjamo tako, da preverjamo količino goriva, ki vstopa v kurišče, in temu ustrezno popravljamo pretok zraka. Shematski prikaz vodenja z izravnavanjem motnje vidimo na sliki 2.5.



Slika 2.5. Odprtozančno vodenje z izravnavanjem motnje [1]

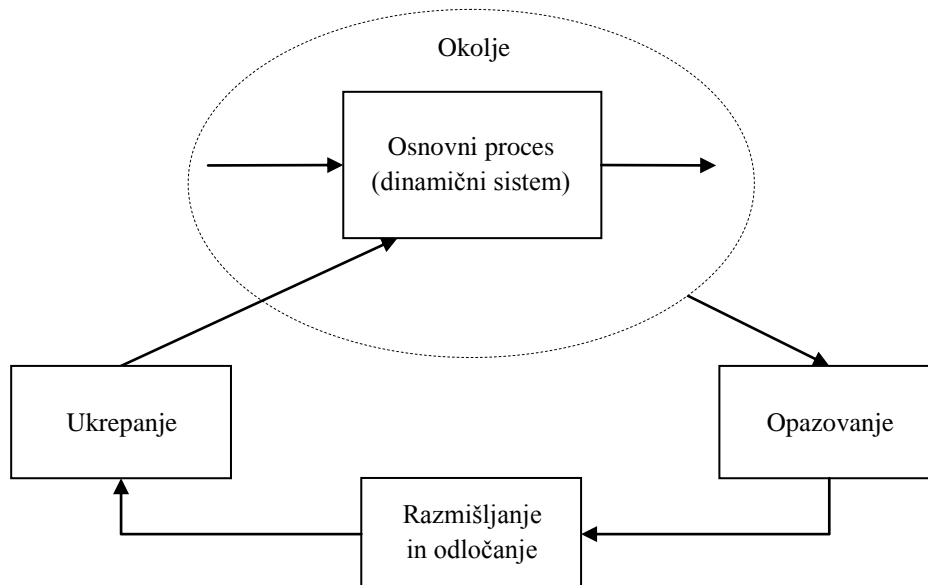
Pri zaprtzančnem vodenju ali vodenju v povratni zanki izhodi iz sistema neposredno vplivajo na proces vodenja. Merimo stanje izhoda, ki nato vpliva na vhod, ki popravlja dejansko stanje. Primer takega vodenja je uravnavanje temperature v peči. S termoelementi merimo

temperaturo v peči in preverjamo, ali je višja ali nižja od želene. Če je višja, zmanjšamo pretok goriva v gorilce, če je nižja, pa povečamo pretok goriva. Zaprtzoančno vodenje je prikazano na sliki 2.6.



Slika 2.6. Zaprtzoančno vodenje [1]

Eden od bistvenih delov procesa vodenja je opazovanje osnovnega sistema in njegovega okolja. Z informacijami, ki smo jih pridobili med opazovanjem, pripravimo ukrepe, ki naj bi sistem pripeljali k želenemu cilju, in odločimo, kateri ukrep bomo uporabili. Da bi odločitve lahko dejansko izpeljali, moramo ustrezno ukrepati. Zato moramo imeti na voljo načine in sredstva, ki vplivajo na procese v sistemu. Priprava in izbira ukrepov je srce vodenja. Kvaliteta vodenja je odvisna od kvalitete in pravočasnosti ukrepa. Oboje pa je odvisno od principa in metode vodenja. Z upoštevanjem naštetih elementov dobimo razširjeno strukturo procesa vodenja, ki je prikazana na sliki 2.7.



Slika 2.7. Univerzalni mehanizem procesa vodenja [1]

Na osnovi te strukture in dodatnih vrst informacij, ki smo jih definirali, lahko zapišemo naslednjo splošno definicijo vodenja: vodenje je proces transformacije informacije o vodenem (osnovnem) procesu in njegovem okolju v odločitve in ukrepe, ki ob upoštevanju kriterijev in omejitev zagotavljajo doseganje postavljenih ciljev [1].

Teorija vodenja je veda, ki se ukvarja s principi, metodami in postopki za vodenje sistemov s ciljem reševanja osnovnih problemov vodenja [1]. Največja težava nastopi pri modeliranju sistema, saj običajno nimamo vseh potrebnih informacij o sistemu ali pa so te preveč kompleksne, da bi jih lahko učinkovito uporabili. Osnovni problemi, s katerimi se teorija vodenja ukvarja, so [1]:

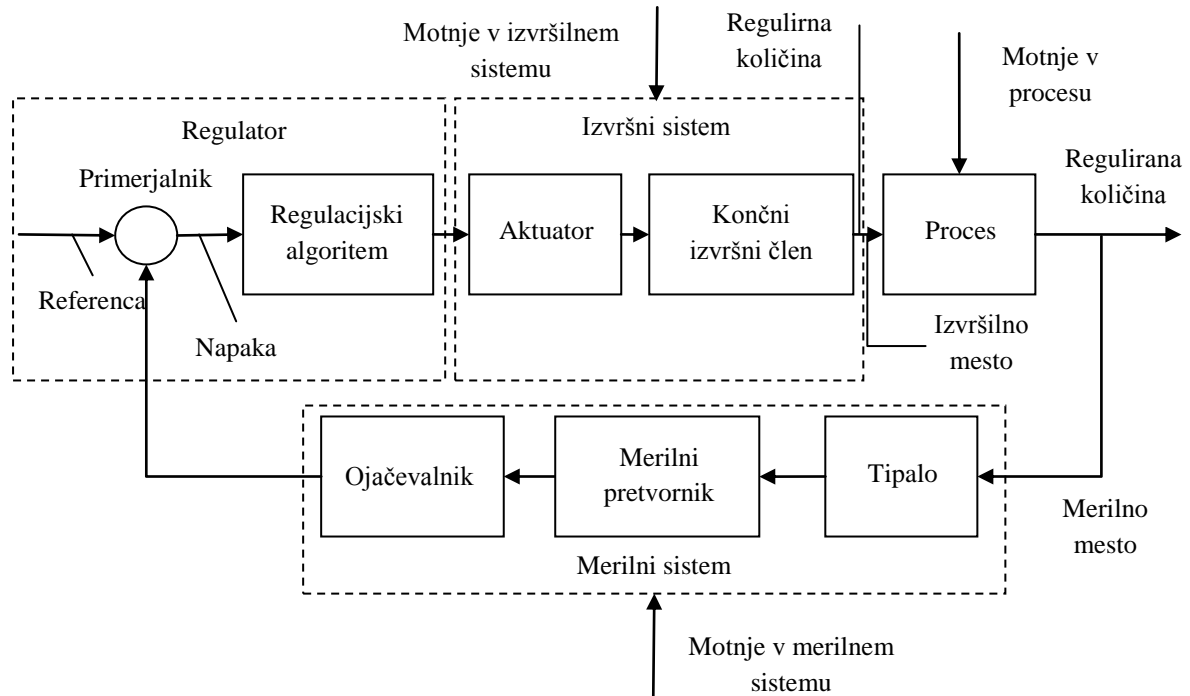
- stabilnost (zmožnost sistema, da se približa neki vrednosti izhoda);
- vodljivost (zmožnost sistema, da mu spreminjamo stanje);
- spoznavnost (zmožnost sistema, da na osnovi izhodov določimo notranja stanja in parametre);
- robustnost (neobčutljivost na spremembe in motnje);
- optimalnost (načrtovanje vodenja po določenih kriterijih optimalnosti);
- adaptivnost (zmožnost sistema, da se prilagaja okolju).

Teorija vodenja uspešno rešuje probleme, pri katerih je sisteme mogoče izraziti z linearnimi matematičnimi modeli, predvsem linearnimi diferencialnimi enačbami. Digitalni računalniki so omogočili razvoj popolnoma samostojnega podpodročja teorije vodenja, ki uporablja vzorčene signale in diskretne modele, zaradi česar lahko govorimo o zvezni in diskretni teoriji vodenja.

Z razvojem računalnikov je poseben razcvet doživelo področje avtomatsko vodenih procesov. To področje se imenuje avtomatika – beseda izhaja iz grške besede *automatos*, ki pomeni 'samogiben'. O avtomatskem vodenju govorimo, kadar se procesi zbiranja informacij o stanju sistema in okolice, priprave ukrepov in odločanja ter ukrepanja izvajajo brez posredovanja človeka [1]. Pretirana avtomatizacija ni primerna pri vseh procesih, saj lahko izrine človeka iz nekaterih kreativnih procesov vodenja. Zato se danes išče uravnotežena delitev dela med avtomatom in človekom.

## 2.3. Regulacije

Regulacija je zaprtozančno vodenje procesa, ki na osnovi primerjave dejanske in želene regulirane količine na proces vpliva tako, da je ta napaka čim manjša, ne glede na morebitne motnje v regulacijskem sistemu. Bločni diagram regulacijskega sistema je prikazan na sliki 2.8.

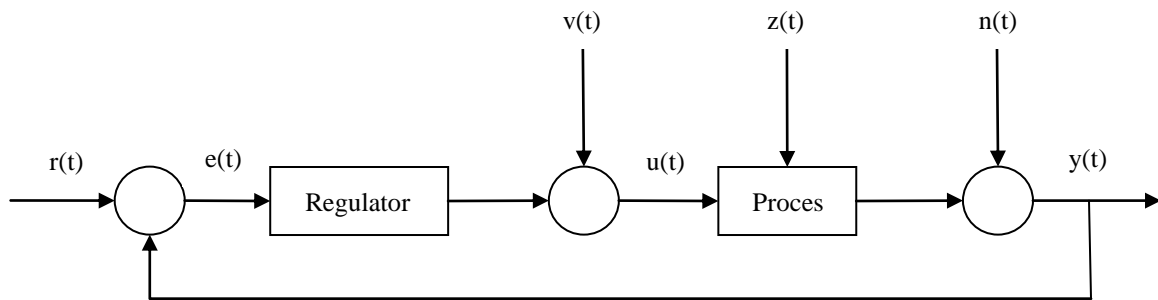


Slika 2.8. Bločna shema regulacijskega sistema [1]

Tipalo tipa regulirno količino na merilnem mestu. Ta signal moramo pretvoriti z merilnim pretvornikom in ga nato ojačiti z ojačevalnikom (npr. v 4-20 mA). Signal je podvržen motnjam na poti do krmilnega sistema, ki jim pravimo motnje v merilnem sistemu.

Pretvorjena regulirana količina se v regulatorju primerja z referenčno količino. Iz napake med njima regulacijski algoritem določi primeren izhodni signal, ki preko aktuatorjev in končnega izvršnega člena na izvršilnem mestu deluje na proces. Izhodni signal je, podobno kot merilni signal, lahko moten na poti do procesa. Tem motnjam pravimo motnje v izvršnem procesu. Tipalo, merilni pretvornik in ojačevalnik združimo v merilni sistem, aktuator in končni izvršni člen pa imenujemo izvršni sistem.

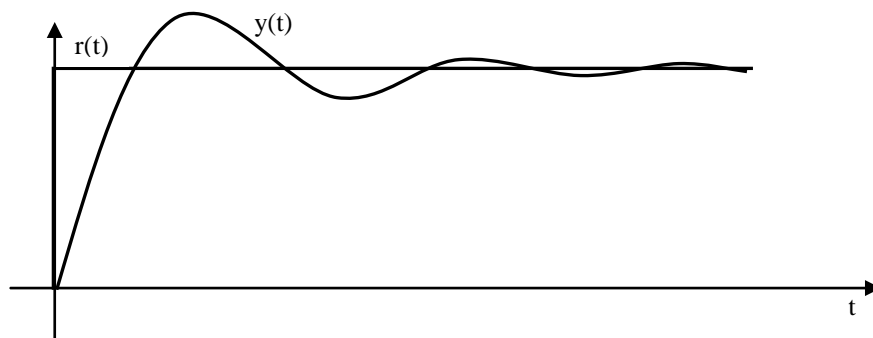
Ob proučevanju dinamičnih lastnosti regulacijske zanke izvršni in merilni sistem vključimo v regulator oziroma proces. Tako v bločni shemi ostaneta samo še regulator in proces (slika 2.9).



Slika 2.9. Poenostavljena shema regulacijskega sistema [1]

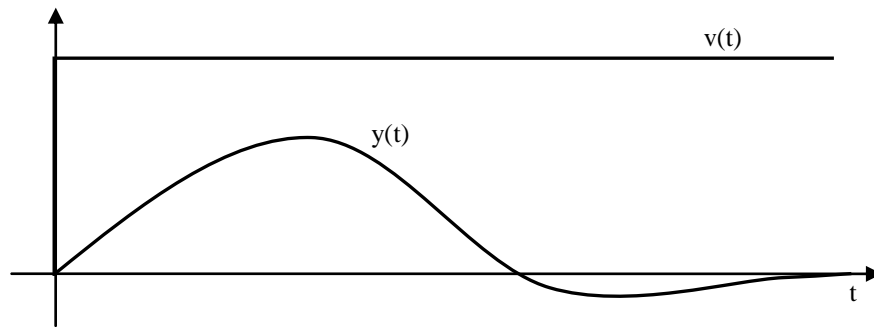
Na sliki 2.9 je  $r(t)$  referenca,  $e(t)$  napaka,  $u(t)$  regulirna količina,  $y(t)$  regulirana količina,  $v(t)$  motnja na vходу v proces,  $n(t)$  motnja na izhodu in  $z(t)$  motnja v procesu.

Pri regulaciji poznamo dva tipa delovanja: sledilno in regulacijsko. Tip regulacije, ki ga bomo uporabili, je odvisen od problema, ki ga rešujemo. Pri sledilnem delovanju mora regulacijski sistem zagotoviti, da regulirana količina dobro sledi referenci. Primer take regulacije je udobno pospeševanje in ustavljanje dvigala. Slika 2.10 prikazuje odziv regulatorja  $y(t)$  na spremembo reference  $r(t)$ . Pri sledilnem delovanju je odpravljanje motenj manj pomembno.



Slika 2.10. Tipična poteka referenčne in regulirane količine pri sledilni regulaciji [1]

Pri regulacijskem delovanju je pomembno predvsem to, da regulator učinkovito odpravlja motnje. Sposobnost reagiranja na spremembo reference je tu manj pomembna, ker predpostavimo, da je referenca nastavljena na konstantno vrednost. Učinkovitost reagiranja na spremenjen referenčni signal nas pri tej regulaciji manj zanima, ker predpostavimo, da je referenca nastavljena na konstantno vrednost in se ne spreminja. Primer je regulacija temperature v prostoru, ko je želena temperatura konstantna. Slika 2.11 prikazuje tipičen odziv regulirane količine  $y(t)$  na stopničasto motnjo  $v(t)$ .



Slika 2.11. Odziv regulirane količine na motnjo v regulacijskem sistemu [1]

Raziskave regulacij so v preteklih desetletjih predstavljale zelo pomembno področje vodenja sistemov. Začetne raziskave sta spodbujali predvsem vojaška in letalska industrija, šele kasneje pa se je vključila procesna industrija. Veliko število razvitih algoritmov je bilo prezahtevno za stopnjo tehnološkega razvoja.

Proporcionalno-integrirno-diferencirna regulacija ali regulacija PID je nesporno najbolj razširjena metoda v procesni industriji. Ta tip regulacije rešuje 90 % regulacijskih problemov. Regulator ni občutljiv na morebitne spremembe v procesu ali njegovi okolici, adaptivni regulatorji pa se lahko prilagajajo tudi večjim spremembam. Posebno regulacijsko problematiko predstavljajo procesi z več vhodi in izhodi, pri čemer nastopajo navzkrižni vplivi med vhodi in izhodi. V takih primerih uporabimo multivariabilne regulatorje.

## 2.4. Regulacija PID

Proporcionalno-integrirno-diferencirna regulacija (regulacija PID) je v procesni industriji najpogosteje uporabljeni regulacijski pristop. Ima enostavno izvedbo, dobre dinamične lastnosti in je zelo robustna med delovanjem. Regulacijo izvedemo kot vsoto proporcionalnega (P), integrirnega (I) in diferencirnega (D) člena. Člen P je neposredno odvisen od trenutne velikosti napake, člen I je odvisen od integrala preteklih napak, člen D pa od hitrosti spreminjanja napake, s katerim lahko deloma predvidimo prihodnje delovanje sistema. Regulirno količino lahko zapišemo s splošno enačbo

$$u(t) = K_P e(t) + K_I \int e(t) + K_D \frac{de(t)}{dt} = K_P (e(t) + \frac{1}{T_I} \int e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt}) \quad (1)$$

oziroma prenosno funkcijo  $G(s)$ , ki je definirana kot razmerje Laplaceovega transformata izhoda  $U(s)$  in Laplaceovega transformata napake  $E(s)$

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right). \quad (2)$$

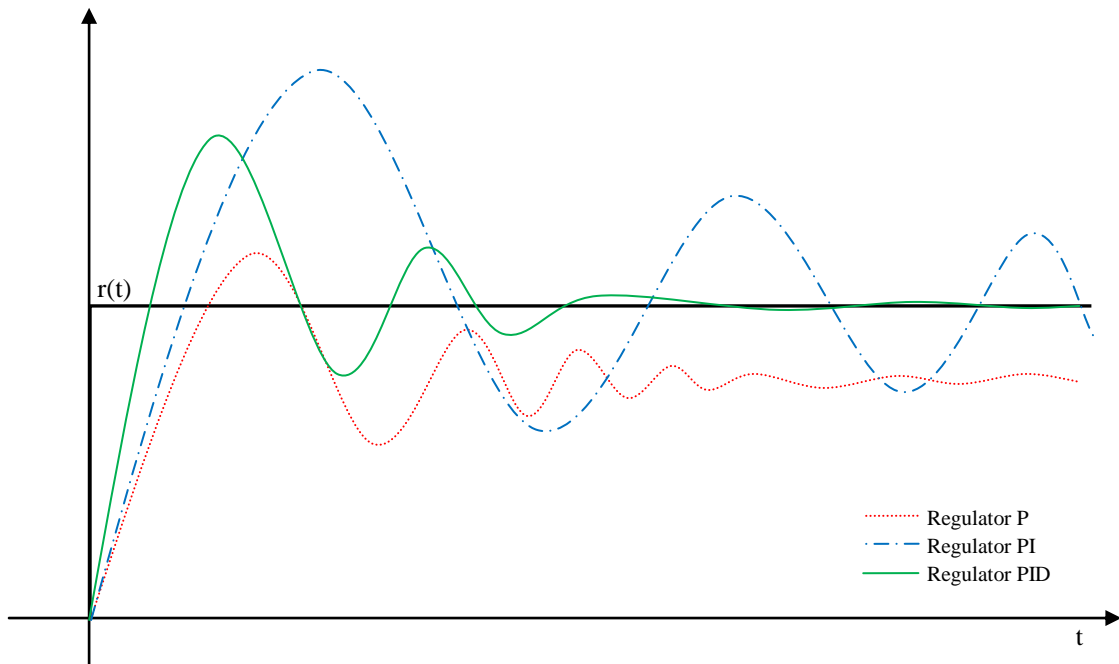
$K_P$ ,  $K_I$  in  $K_D$  so ojačenja proporcionalnega, integrirnega in diferencirnega člena,  $T_I$  je integrirni čas,  $T_D$  pa diferencirni čas.

Poleg popolnega algoritma PID uporabljamo še različne delne izvedbe: regulacija P, PI ali PD. Člen I in člen D se redko uporabljata samostojno.

Enačba PID (2) vsebuje idealni diferenciator (diferencirnemu členu pravimo tudi člen D). V praksi člena D na tak način ne realiziramo, ker bi hitre spremembe referenčnega signala povzročile velike spremembe regulirne količine in nasičenje izvršnih členov, poleg tega pa se ojačujejo visokofrekvenčne motnje. Zato se v praksi uporablja regulator PID, ki vsebuje člen  $D_1$ . Prenosna funkcija tako dobi pol v diferencirnem členu in je podana z naslednjo enačbo

$$G(s) = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_I s} + \frac{T_D s}{T_I' s + 1} \right). \quad (3)$$

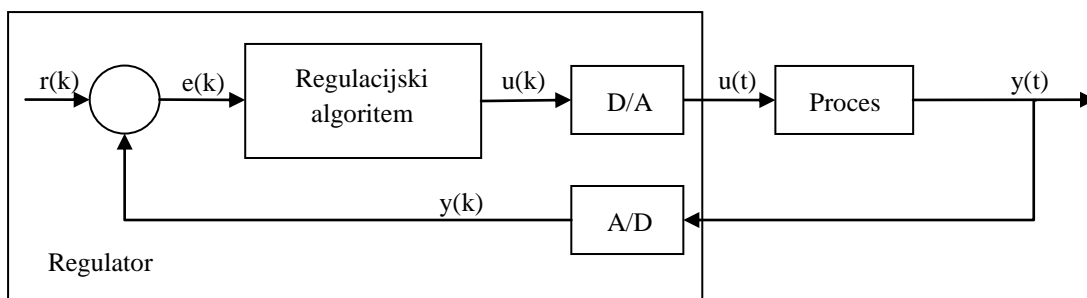
Osnovni člen regulatorja je člen P. Dobro nastavljen člen P hitro izregulira napako, a ne odpravlja napake v ustaljenem stanju. Da bi odpravili to napako, dodamo člen I, ki pa tudi upočasni regulacijski sistem in zmanjša dušenje. Člen D, če je primerno nastavljen, poveča dušenje sistema. Učinek različnih členov na delovanje regulatorja je prikazan na sliki 2.12.



Slika 2.12. Potek nivoja pri stopničasti spremembi reference

Večina novih regulatorjev je izvedena diskretno (računalniško) namesto analogno (hidravlično, pnevmatsko itd.). Računalniško izvedeni regulatorji omogočajo hitro in enostavno spreminjanje njihovih parametrov ali strukture s spremembo programa. To fleksibilnost plačamo z dodatnimi pretvorniki, ki omogočajo prenos izmerjenih vrednosti v računalnik in izhodov na izvršni sistem. To so pretvorniki A/D (analogno-digitalni) in pretvorniki D/A (digitalno-analogni).

Ustrezno bločno shemo prikazuje slika 2.13.



Slika 2.13. Bločna shema regulacijskega sistema z diskretno izvedenim regulacijskim algoritmom [1]

Pretvornik A/D jemlje vzorce v diskretnih korakih s časom vzorčenja  $T_0$ . Posledično nimamo več zveznih podatkov, ki bi jih lahko integrirali ali odvajali. Zato moramo enačbo (1) diskretizirati.

Ker pretvornik A/D jemlje vzorce s časom vzorčenja  $T_0$ , so  $r(k)$ ,  $e(k)$ ,  $u(k)$  in  $y(k)$  ustrezni vzorci v trenutkih  $kT_0$ ,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ . Da lahko programsko realiziramo regulacijski algoritem, je treba enačbo zveznega algoritma PID diskretizirati.

Če zamenjamo integral z vsoto, odvod pa z diferenco, dobimo enačbo

$$u(k) = K_p \left( e(k) + \frac{T_0}{T_I} \sum_{i=1}^k e(i-1) + \frac{T_D}{T_0} (e(k) - e(k-1)) \right). \quad (4)$$

Če zapišemo enačbo (4) še za  $(k-1)$  in odštejemo obe enačbi, dobimo diskretno enačbo PID v obliki diferenčne enačbe

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2), \quad (5)$$

pri čemer so

$$q_0 = K \left( 1 + \frac{T_D}{T_0} \right), q_1 = -K \left( 1 + 2 \frac{T_D}{T_0} - \frac{T_0}{T_I} \right), q_2 = K \frac{T_D}{T_0}. \quad (6)$$

Programsko realizirani regulacijski algoritem PID uporablja enačbo (5). Za izračun sedanje vrednosti regulirne količine  $u(k)$  potrebujemo preteklo vrednost  $u(k-1)$  in sedanjo vrednost signala napake  $e(k)$  ter dve pretekli vrednosti  $e(k-1)$ ,  $e(k-2)$  [1]. Pseudokoda algoritma je prikazana v algoritmu 1.

```

prejšnja_regulirna_količina = 0
prejšnja_napaka = 0
predprejšnja_napaka = 0
while program_teče do
    q0 = K * (1 + T_D / čas_vzorčenja)
    q1 = -K * (1 + 2 * T_D / čas_vzorčenja - čas_vzorčenja / T_I)
    q2 = K * T_D / čas_vzorčenja
    regulirna_količina = prejšnja_regulirna_količina +
        q0 * napaka + q1 * prejšnja_napaka +
        q2 * predprejšnja_napaka
    prejšnja_regulirna_količina = regulirna_količina
    predprejšnja_napaka = prejšnja_napaka
    prejšnja_napaka = napaka

```

**Algoritem 1. Pseudokoda regulacijskega algoritma PID**

Parametre za regulator PID lahko določimo z vrsto različnih nastavitvenih pravil, ki so se izkazala v praksi. Osredotočili smo se na metodo Zieglerja in Nicholosa, ki smo jo uporabili v projektu. Metoda z uporabo nihajnega preizkusa zahteva preizkus v zaprti zanki in deluje le v primeru, če je proces vsaj tretjega reda ali ima mrtvi čas. Mrtvi čas je čas, ki preteče med spremembo regulirne količine in odzivom regulirane količine. Najprej nastavimo regulator tako, da uporablja samo člen P. Nato povečujemo ojačanje  $K_P$  toliko časa, da regulirana količina nedušeno zaniha. Temu ojačanju pravimo kritično ojačanje  $K_{KR}$ . Nedušeno nihanje

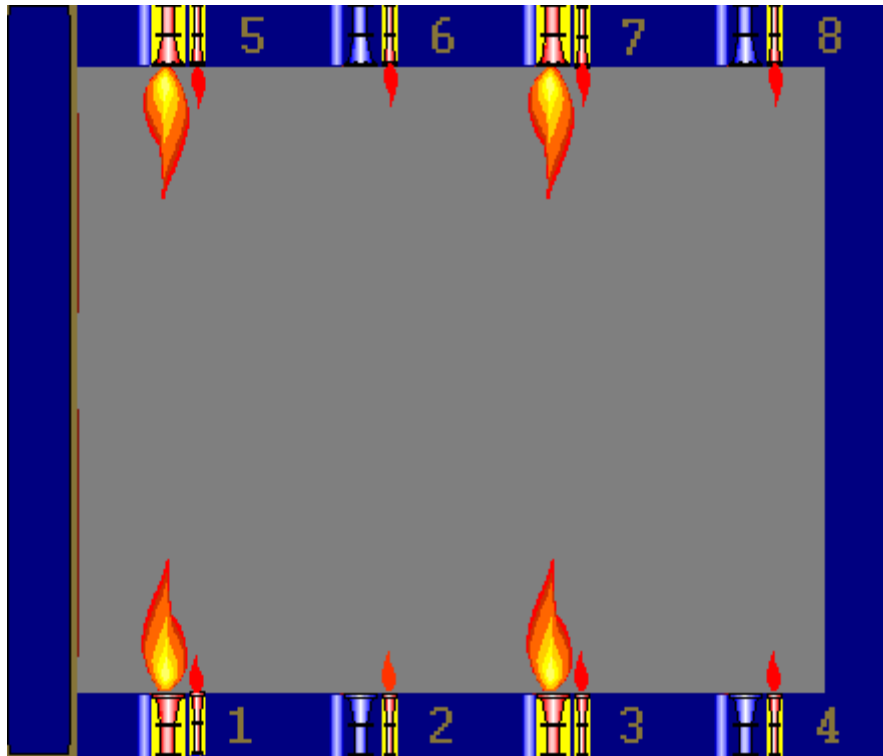
ima svojo periodo, ki ji pravimo kritična perioda  $T_{KR}$ . Na osnovi kritičnega ojačanja in periode sta Ziegler in Nichols za regulator PID predlagala, da je  $K_P$  enak  $0,6 K_{KR}$ ,  $T_I$  enak  $0,5 T_{KR}$  in  $T_D$  enak  $0,125 T_{KR}$ . Ker v praksi uporabljamo neidealni regulacijski algoritem PID, nastopa še dodaten parameter  $T'$ , ki ga ponavadi nastavimo na  $0,1$  do  $0,3 T_D$ . Tako nastavljeni parametri so samo okvirni, ker so pravila Zieglerja in Nicholosa narejena za veliko sorodnih, a vseeno različnih procesov. Te parametre smo kasneje eksperimentalno z uporabo modela dodatno izboljšali.

### 3. Opis problema

Žarilna peč, obnovljena v podjetju Litostroj Jeklo, d. o. o., ima oznako ŽP1. Njene dimenzije so 6,5 m x 3,2 m x 2,8 m, največja nosilnost 50 ton, njeno delovno območje pa od 100 °C do 1200 °C. Ima 8 gorilcev, ki delujejo na zemeljski plin s skupno močjo 2,93 MW. En sam ventilator poganja zrak za vse gorilce. Peč je razdeljena na 3 cone, vsaka cona ima svoj termoelement tipa NiCr-Ni, s katerim merimo temperaturo žarjenja v tej coni. Izpušni plini se odvajajo skozi voziček v tla in nato v dimnik. V cevi pred dimnikom je tudi loputa, ki omejuje količino izpustov. Žarilna peč ŽP1 je prikazana na sliki 3.1, njen tloris pa na sliki 3.2.



Slika 3.1. Žarilna peč ŽP1

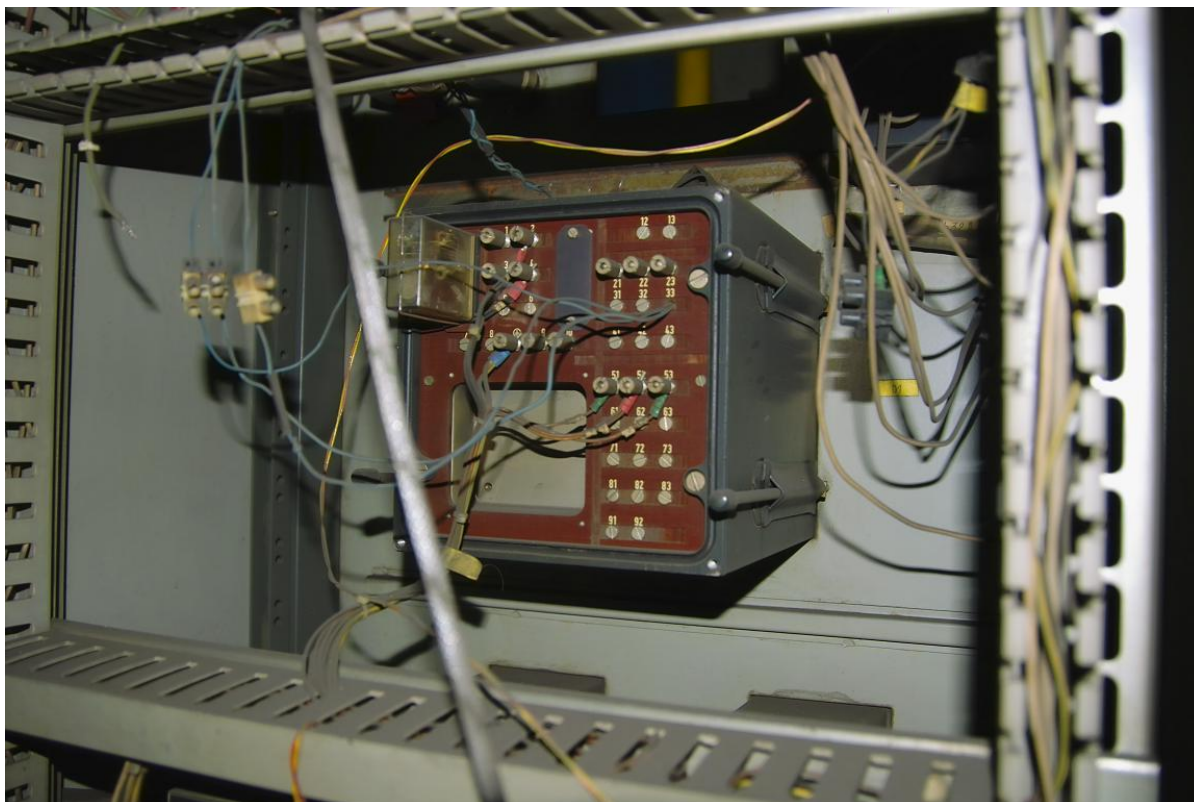


Slika 3.2. Tloris žarilne peči ŽP1

Pred prenovo so regulacijo temperature v peči izvajali analogni elektronski regulatorji PID podjetja Hartmann & Braun, ki so jih vgradili v 70. letih prejšnjega stoletja, in so prikazani na dnu slike 3.3. Programator regulatorjev je na vrhu slike, njegova zadnja stran pa je prikazana na sliki 3.4.



Slika 3.3. Sprednja stran regulatorjev Hartmann & Braun in njihov programator



Slika 3.4. Zadnja stran programatorja Hartman & Braun

Uporaba analognega regulatorja ima več problemov. V splošnem velja, da se analogni regulatorji ne dajo elektronsko nastavljati ter da so manj zanesljivi in manj natančni od digitalnih [2]. Podobno je z regulatorjem Hartmann & Braun. Nastavitve regulatorja so se spreminjale s potenciometri, zaradi česar je bilo natančno nastavljanje zelo zahtevno. Posebno izurjen človek je moral potenciometre nastaviti tako, da so se vse tri regulirane količine pravilno preslikale v notranjo elektroniko regulatorjev. Tudi ko mu je to uspelo za neko temperaturo, npr. 100 °C, ni bilo zagotovilo, da bodo regulatorji pravilno brali druge vrednosti. Dogajalo se je, da je en regulator odčitaval 480 °C, drugi 520 °C, dejanska vrednost v peči pa je bila 500 °C. Ker so industrijske zahteve takšne, da ne dopuščajo temperaturne razlike, večje od 10 °C, je jasno, da so tak kos morali ponovno žariti, kar je povzročalo zamude in stroške podjetju. Potenciometri so se z leti tudi obrabili in včasih zgubljali stik. Na koncu je zaradi vse večjega števila okvar in pomanjkanja rezervnih delov postal regulacijski sistem predrag za vzdrževanje. Odločili so se za prenovo regulatorja. Ob prenovi regulatorja je bilo smiselno zamenjati tudi celotno krmilje, saj se s tem poenostavi njegova izvedba. Med drugim se zmanjša število kontaktorjev, saj je vsa logika v računalniku in ne v elektroniki. S tem se zmanjša poraba energije, poveča zanesljivost krmilnega sistema in zmanjša prostor, potreben za krmilno omaro. Z računalniškim krmiljenjem se je ponudila tudi možnost regulacije pritiska v peči z računalniškim krmiljenjem lopute, ki so jo do takrat nastavljali ročno. To je pomembno, saj se ob previsokem pritisku izpustni plini namesto v dimnik začnejo izpuščati ob strani vozička in lahko prekomerno segrejejo ali celo stopijo napeljavo. Če je loputa odprta bolj, kot je treba, se odvaja več energije, kot je treba, zaradi česar se poveča poraba plina.

Poleg tradicionalnega upravljanja krmilne plošče z gumbi je bilo treba dodati še možnost upravljanja z računalnikom.

Treba je bilo torej na novo narediti krmilno omaro za peč, napisati krmilni program, primerno nastaviti regulator PID in narediti vizualizacijo, ki bo služila kot uporabniški vmesnik za kontrolo delovanja in ukazovanje krmilnemu programu. Vse je treba tudi natančno dokumentirati.

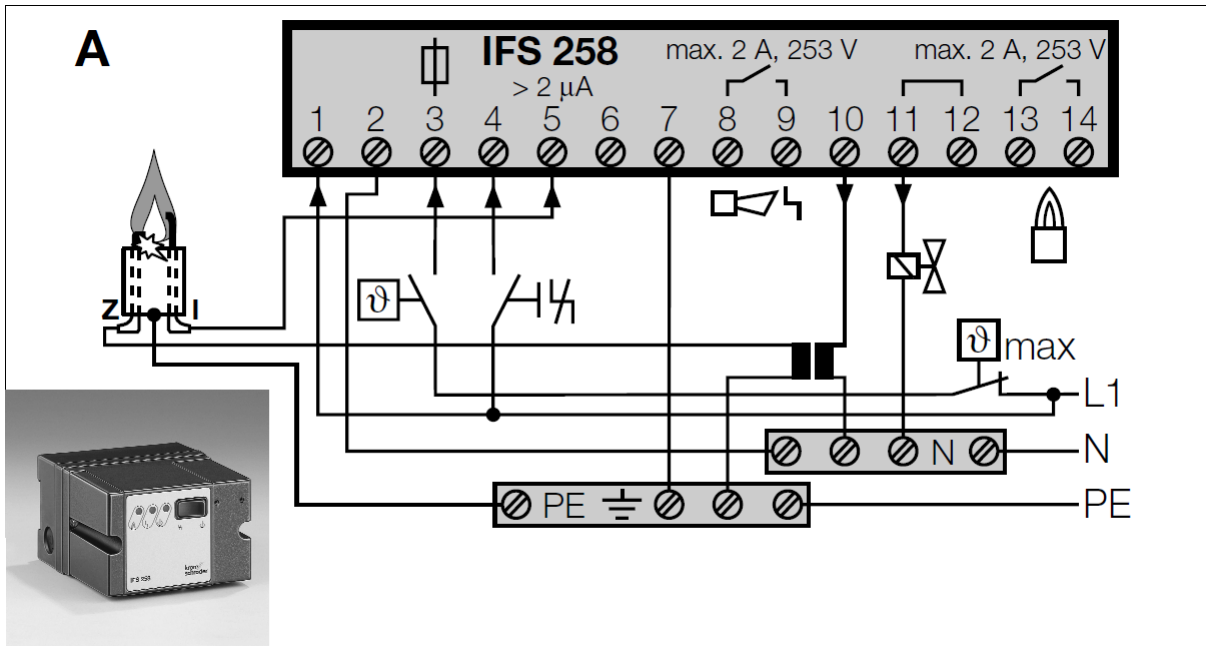
## 4. Izdelava

### 4.1. Krmilna omara

Osnovna funkcija peči je toplotna obdelava žarjenca. Za izvajanje te funkcije moramo v peč naložiti žarjenec in poskrbeti za vžig pilotnih gorilcev, ki omogočajo delovanje glavnih gorilcev. Glavne gorilce moramo z regulatorji pravilno prižigati in ugašati, tako da se program žarjenja izvaja pravilno. Treba je tudi zagotoviti pravilen pritisk v peči z regulacijo izpušne lopute. Vse to mora biti izvedeno tako, da zagotavlja varnost in zanesljivost. Ne gre pozabiti, da se v peč vpihavata zrak in zemeljski plin, in ob nepravilni uporabi lahko pride do požara ali celo eksplozije, ki lahko uniči peč in ogrozi življenja tako delavcev kot mimoidočih. Vse te funkcije krmili računalnik s pomočjo elementov krmilne omare. V nadaljevanju so podrobno razloženi te podfunkcije, tipala in mehanizmi, ki so na voljo za njihovo upravljanje, ter elementi, ki smo jih morali uporabiti v krmilni omari.

Preden lahko peč karkoli žari, moramo vanjo naložiti žarjenec. To lahko storimo z vozom, ki ga lahko izvlečemo iz peči, naložimo in nato vrnemo nazaj v peč. Voz in vrata peči sta isti kos in se premikata skupaj. Preden lahko voz izvlečemo, moramo odpahnniti vrata, ki jih drži na mestu 8 pnevmatskih cilindrov. Vsak cilinder ima dva magnetna senzorja, s katerima vemo, ali so vrata odpahnjena ali zapahnjena. Cilindre krmili 6 ventilov. Voz premika 7,5 kW motor preko reduktorja in verižnega pogona. Končno stikalo nam pove, kdaj je voz popolnoma izvlečen. Nanj naložimo žarjenec in ga vrnemo nazaj v peč, ki ima dve končni stikali za skrajno notranjo lego. Ko pride do skrajne lege, se iz voza v odprtine v tleh spustijo cevi za izpušne pline. Na koncu še zapahnnemo vrata in peč je pripravljena.

Peč uporablja 8 plinskih gorilcev. Vsak ima svoj pilotni gorilec, ki vedno gori in zagotavlja plamen glavnemu gorilcu. Tako nam ni treba ob vsakem vklopu glavnih gorilcev ponavljati vžiga. S tem je povečana varnost, saj bi ob neuspelem vžigu glavnega gorilca v peč stekla večja količina plina, ki se ne bi vžgala. Za vžig pilotnega gorilca smo izbrali avtomatski regulator gorenja KromSchroder IFS 258, ki omogoča varen vžig in nadzor plamena z ionskim tokom. Regulator gorenja IFS 258 in njegova vezava v primeru prepoznavanja plamena z ionskim tokom sta prikazana na sliki 4.1. Ima krmilna vhoda Start (priključek 3) in Reset (priključek 4) ter izhoda OK (priključka 13 in 14) in Error (priključka 8 in 9), ki posredujeta informacijo o stanju plamena, za dodaten nadzor nad delovanjem pa preko računalnika krmilimo tudi napajanje, ki je na priključku 1. Izhoda delujeta kot stikalo in imata zato dva priključka. Ventile za zrak in plin za glavne gorilce krmilimo z računalnikom in so lahko samo popolnoma odprti ali popolnoma zaprti.



Slika 4.1. IFS 258 in njegova vezava pri uporabi ionskega toka

Pritisk v peči meri tipalo tlaka, ki ima delovno območje od -125 do +125 Pa. Ker smo želeli ročno nameščanje lopute zamenjati z računalniškim, smo dodali regulator za krmiljenje lopute (slika 4.2). Kot vhod sprejema 4-20 mA, njegovo gibanje pa je zvezno. Njegov izhod je tudi 4-20 mA in z njim sporoča položaj lopute. 4-20 mA je standarden električni analogni signal, ki emulira kPa pnevmatski standardni signal 20-100. Živa ničla je pri 4 mA, 100-odstotni signal pa pri 20 mA. Vsaka vrednost pod 4 mA je mrtva ničla in je vzrok za alarm [3].



Slika 4.2. Regulator lopute za izpušne pline

Krmilni sistem peči ima mnogo vhodov in izhodov. Med vhodi najdemo:

- 16 digitalnih vhodov za preverjanje, ali so vrata odpahnjena ali zapahnjena;
- 3 digitalne vhode za nadzor položaja voza;
- 16 digitalnih vhodov za nadzor plamenov pilotnih gorilcev.

Med izhodi iz sistema nastopa

- 24 digitalnih izhodov za krmiljenje 8 avtomatskih regulatorjev gorenja;
- 2 digitalna izhoda za krmiljenje voza ter
- 12 digitalnih izhodov za krmiljenje ventilov za odpah in zapah vrat.

Za vklop in izklop glavnih gorilcev ter sprejem podatkov o temperaturi v peči skrbi funkcijski modul FM 355 S, ki je podrobneje obravnavan v nadaljevanju.

Za krmiljenje lopute potrebujemo

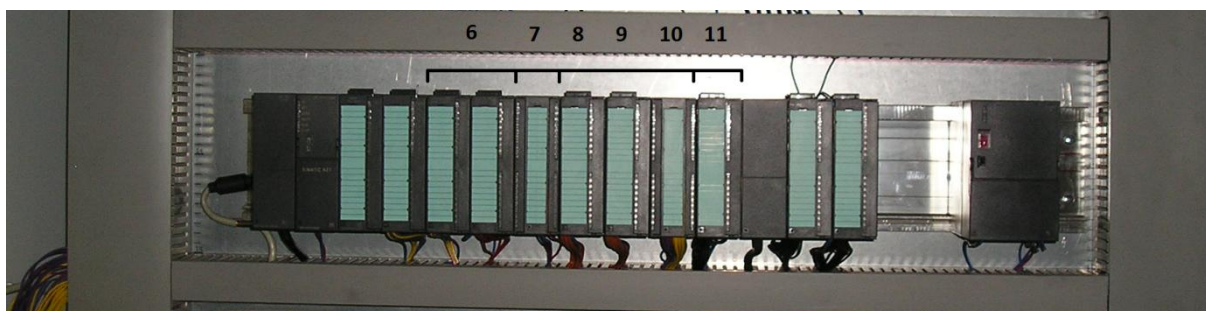
- 2 analogna vhoda in
- 1 analogni izhod.

Ker mora biti delavec prisoten ob premikih voza, je ob peči še krmilna plošča:

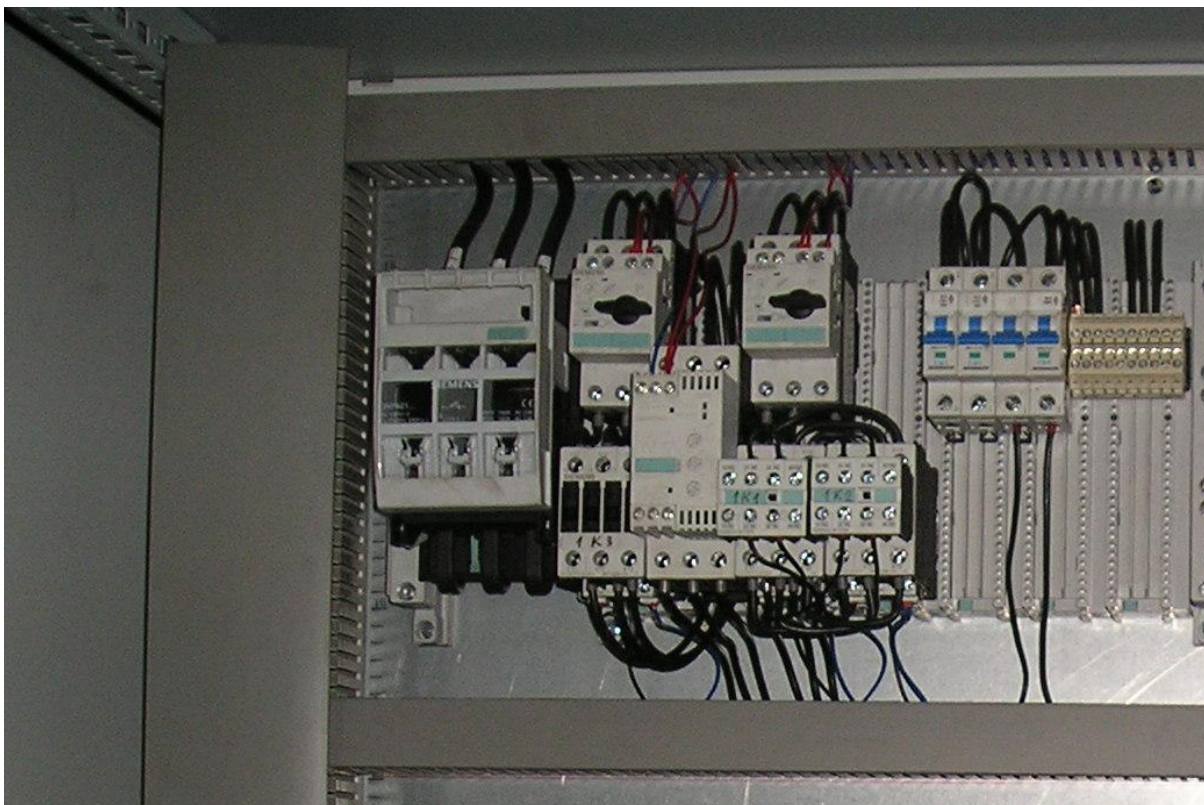
- z gumbi za premik voza noter in ven, zapah, odpah in ustavitev v sili, ki ima dva signala, za kar potrebujemo še 6 digitalnih vhodov, ter
- s tremi svetlobnimi signali in sireno za prikaz delovanja peči in alarmiranje, za kar potrebujemo še 4 digitalne izhode.

Sistem ima tako skupaj 41 digitalnih vhodov, 2 analogna vhoda, 42 digitalnih izhodov in 1 analogni izhod.

Celoten krmilni sistem vodi programirljiv logični krmilnik (PLK) preko vhodno-izhodnih modulov. Na sliki 4.3 so prikazani funkcijski modul FM 355 S, dodatni moduli za vhode in izhode ter eden od napajalnikov. Moduli so pričvrščeni na montažno letev. Na sliki 4.4 so prikazani avtomatska varovalka, ki varuje omaro in mehki zagon, ter motorni zaščitni, ki skrbita za motorja voza in ventilatorja.



Slika 4.3. FM 355 S (modul 6), analogni vhodi (modul 7), digitalni vhodi (moduli od 8 do 10), digitalni izhodi (modul 11), napajalnik (skrajno desno)

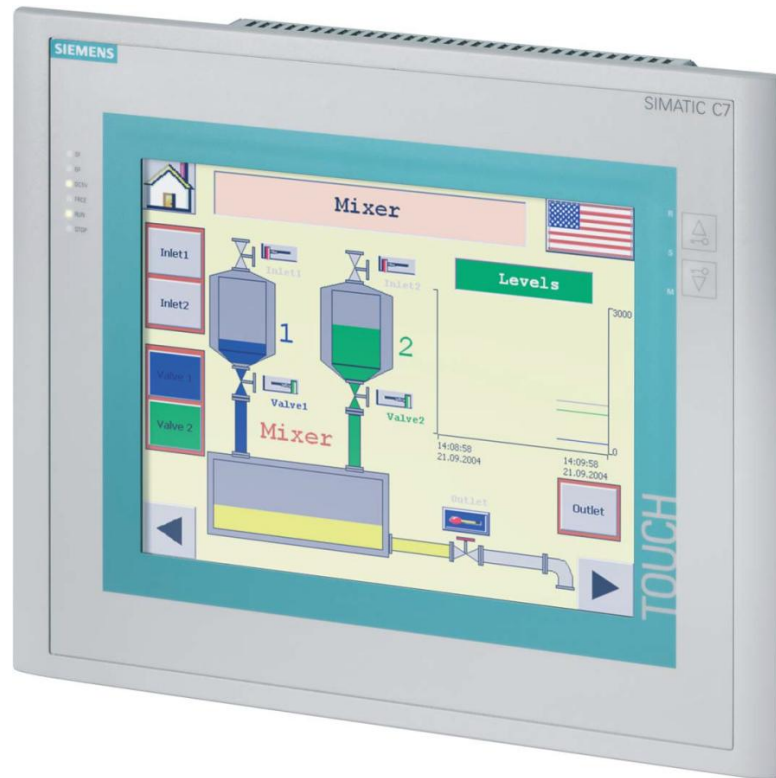


Slika 4.4. Varnostni elementi krmilne omare

#### 4.1.1. Programirljivi logični krmilnik

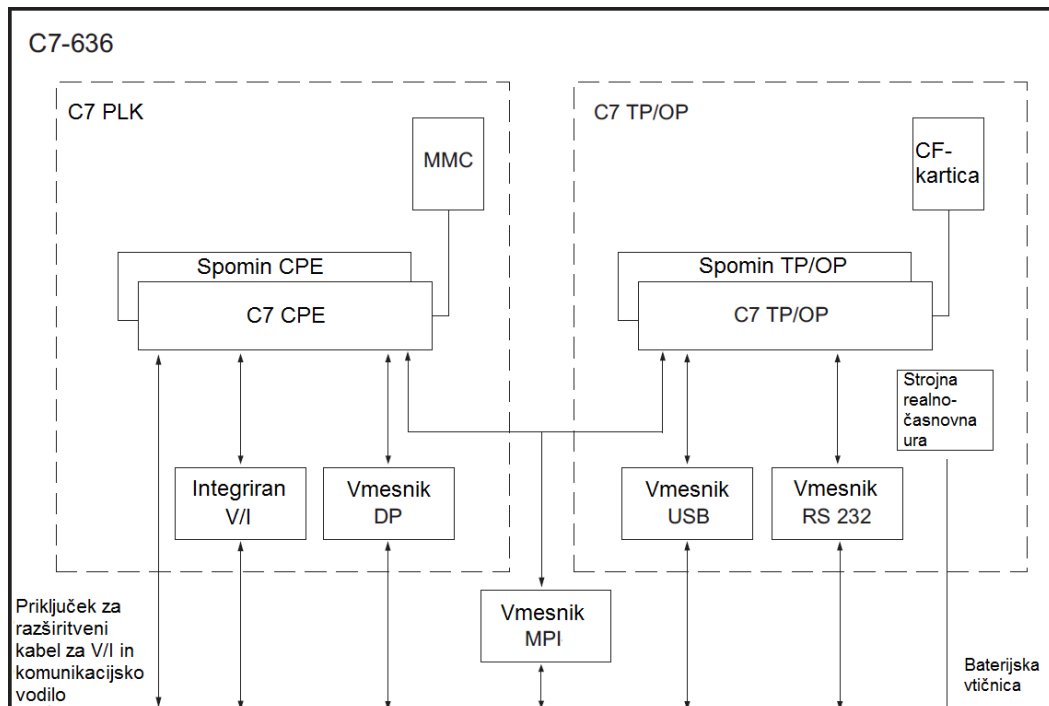
Programirljivi logični krmilniki so bili razviti ob koncu 60. let prejšnjega stoletja. Njihov glavni namen je bil zamenjati množico relejev, kontaktorjev in drugih električnih elementov. Omogočajo veliko lažje načrtovanje, izvedbo in spreminjanje krmilne logike ter so dovolj robustni, da lahko desetletja delujejo v industrijskih obratih. Njihov osnovni in še danes zelo priljubljen način programiranja so lestvični diagrami, ki posnemajo sheme relejne logike, ki jo uporabljajo elektroinženirji in tehniki. Programirljivi logični krmilnik deluje drugače od navadnih računalnikov. Najprej prebere vrednosti vseh vhodov, ki morajo biti v času branja stabilne, in jih prekopira v pomnilnik. Nato enkrat izvede vse vrstice programa in zapiše nove vrednosti izhodov v pomnilnik. Na koncu vse vrednosti izhodov prenese na izhodne module.

Uporabili smo Siemensov procesor 315C-2 DP, ki je integriran v Siemensov zaslon na dotik C7 CPU 636 Touch, s katerim delavec upravlja peč. Zaslon je prikazan na sliki 4.5.



Slika 4.5. Sprednja stran C7 CPU 636 Touch [4]

V zaslonu sta dva procesorja: 315C-2 DP, ki je del programirljivega logičnega krmilnika, na katerem se izvaja krmilni program, in procesor za zaslon na dotik (TP), ki izvaja program uporabniškega vmesnika. Medsebojno komunicirata preko vmesnika MPI in sta neodvisna. Shema zaslona C7 je prikazana na sliki 4.6.



Slika 4.6. Shema zaslona C7[4]

Procesor programirljivega logičnega krmilnika v C7-636 spada v družino procesorjev S7-300, ki so srednje močni Siemensovi procesorji. Ima 128 kB RAM-a, 24 digitalnih vhodov, 16 digitalnih izhodov, 4 analogne vhode, 2 analogna izhoda in en vhod Pt 100 za merjenje temperature. Bit operacije izvede v 0,1  $\mu$ s, ukaze nad besedo v 0,2  $\mu$ s, aritmetiko s fiksno vejico v 2  $\mu$ s, aritmetiko s plavajočo vejico pa v 6  $\mu$ s. Ima števec in časovnik, za katere je vnaprej rezerviran pomnilnik, uporabnik pa lahko doda toliko števcov IEC in časovnikov, kolikor dopušča velikost delovnega pomnilnika. Ima tudi komunikacijski vmesnik PROFIBUS DP, ki je hitrejši od vmesnika MPI. Standard PROFIBUS je zasnovan za komunikacijo različnih naprav, od senzorjev in aktuatorjev do višjih komunikacijskih sistemov, preko enega kabla, kar doseže z enotnim komunikacijskim protokolom [5]. Krmilni program je shranjen na kartico MMC (Micro Memory Card, mikro pomnilna kartica), ki je kupljena posebej [4]. Pomnilna kartica uporablja pomnilnik v tehnologiji flash velikosti 8 MB. Programirljiv logični krmilnik do modulov na sliki 4.3 dostopa preko 1,5 m dolgega kabla, ki je preko vodila priključen na skrajni levi modul na montažni letvi. Način priklopa je prikazan na sliki 4.7.

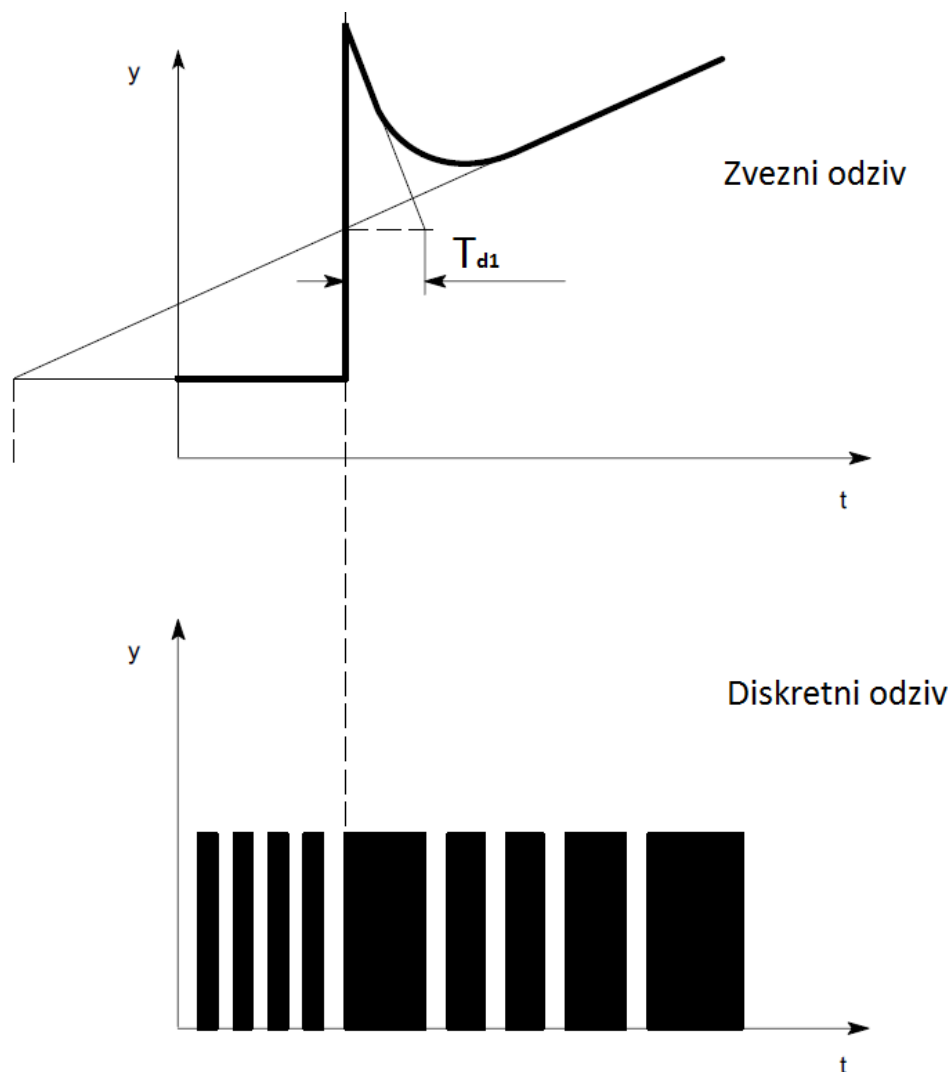


Slika 4.7. Priklop dodatnih modulov preko razširitvenega kabla [4]

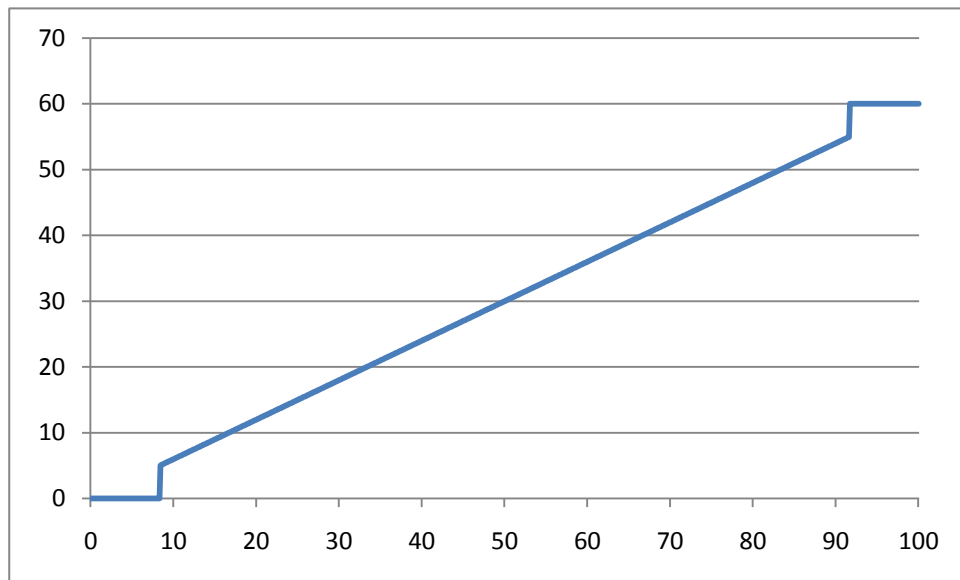
#### 4.1.2. Funkcijski modul FM 355 S

Siemensov funkcijski modul FM 355 S je krmilni modul za sisteme S7-300. Krmilniki modula delujejo ali z mehko logiko ali z algoritmom PID. Zato se lahko uporablja na mnogih področjih, na primer za regulacijo temperature, pretoka ali pritiska. Ima 4 neodvisne krmilnike, 4 analogne vhode, 8 digitalnih vhodov in 8 digitalnih izhodov. Za enostavno povezovanje s termoelementi ima še kompenzacijski vhod Pt 100, s katerim merimo referenčno temperaturo. Analogni vhodi in krmilniki niso fiksno povezani, uporabnik lahko določi, kateri vhod bo neki krmilnik uporabljal. Vsak krmilnik je povezan z dvema digitalnima izhodoma. Vsak analogni vhod ima svoje filtriranje, linearizacijo in druge operacije, ki prilagodijo vhod našim potrebam. Lahko jih nastavimo na vrsto standardnih vhodov (0-20 mA, 4-20 mA, termoelementi itd.). Funkcijski modul FM 355 S je narejen za

krmiljenje izvršnih členov, ki imajo največ tri možna stanja. V našem primeru je to gorilec, ki je lahko ali na največji moči ali ugasnjen. Funkcijski modul za krmiljenje uporablja modulacijo širine pulza, ki pretvori zvezni v dvostanjski signal. Pretvorba je prikazana na sliki 4.8. Če bi postavili periodo na 60 sekund, krmilnik bi pa želel 70-odstotno moč, bi gorilec gorel 42 sekund, 18 sekund bi bil pa ugasnjen. Ker realni elementi potrebujejo nekaj časa, da preidejo iz enega v drugo stanje, lahko funkcijskemu modulu določimo najkrajši čas pulza in najkrajši čas premora, s katerim omogočimo preklopnim elementom in aktuatorjem dovolj časa, da izvedejo preklap, in jih varujemo pred prepogostim preklapljanjem. Relacija med ukazom krmilnika in trajanjem pulza pri periodi 60 sekund je prikazana na sliki 4.9. Programira se preko posebnega vmesnika v razvojnem okolju Step 7, ki je osnova za programiranje Siemensovih programirljivih logičnih krmilnikov.



Slika 4.8. Zvezni in diskretni odziv krmilnika FM 355 [6]

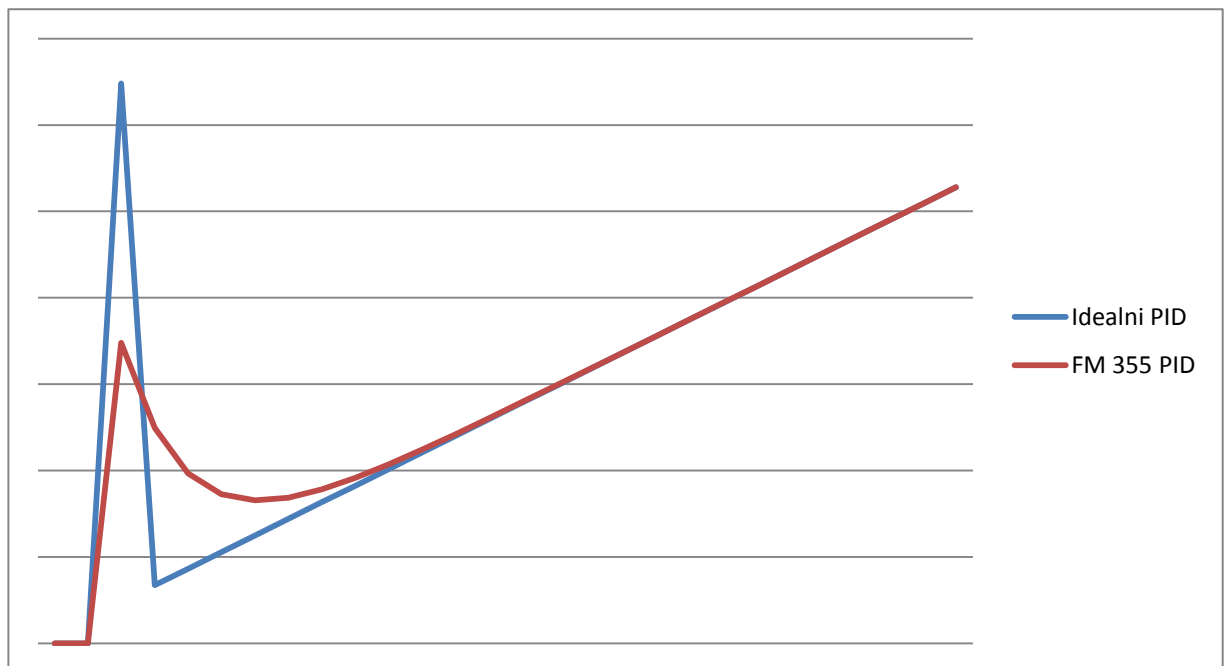


Slika 4.9. Relacija med ukazom krmilnika in trajanjem pulza

Funkcijski modul FM 355 S za izračun naslednje izhodne vrednosti uporablja neidealno enačbo PID. Odziv na skok reference dokumentacija modula opisuje z naslednjo enačbo [6]

$$y = K_p * x_w * \left( 1 + \frac{t}{T_I} + \frac{T_D}{T_{D1}} * e^{-\frac{t}{T_{D1}}} \right). \quad (7)$$

$K_p$  je ojačanje,  $x_w$  je sprememba reference,  $t$  je čas, ki je pretekel od skoka reference,  $T_I$  je integrirni čas,  $T_D$  diferencirni čas,  $T_{D1}$  pa člen  $D_1$  neidealne enačbe PID. Na sliki 4.10 je prikazana razlika med odzivom idealnega algoritma PID in odzivom algoritma PID funkcijskega modula FM 355 pri enakih spremenljivkah. Trenutna napaka je vedno enaka.



Slika 4.10. Odziv idealnega algoritma PID in algoritma PID funkcijskega modula FM 355 na skok napake

### 4.1.3. Varnostni elementi

Vse električne elemente v omari in naprave, ki jih preko omare krmilimo, moramo primerno zaščititi pred prekomernim tokom. Omara ima glavno stikalo, ki je sposobno prenesti do 160 A toka in 690 V napetosti. Od stikala gre napeljava najprej na glavne varovalke, ki prenesejo do 80 A toka, nato pa preko zbiralk do zaščite motorja za voz (18-22 A), zaščite motorja za ventilator (25 A) in preko para varovalk (16 A) do transformatorja, ki napetost spusti s 400 V na 230 V. Motorne zaščite delujejo podobno kot varovalke s to razliko, da dovolijo začasno prekoračitev omejitve toka. To je posledica načina delovanja elektromotorjev, ki ob zagonu potrebujejo več toka kot med delovanjem. Transformator napaja vse ostale komponente omare preko dveh parov varovalk (6 A). Prvi par napaja naprave, ki jih vklapljammo s kontaktorji, in relejni izhodni modul, ki regulatorjem gorilcev pošilja signala Start in Reset, drugi par pa napaja vhodni modul za signala OK in Error, izhodni modul za napajanje regulatorja gorenja ter izhodna modula za krmilne signale ventilatorja in voza. Programirljiv logični krmilnik ima neodvisno napajanje preko Siemensovega napajalnika, ki je zaščiten z varovalko (10 A).

Celotno električno napeljavo je bilo treba dokumentirati in narediti električne sheme, s katerimi lahko v primeru napake usposobljeni tehniki hitro najdejo mesto okvare. Za izdelavo shem smo imeli na voljo program EPLAN Electric P8. Izdelava shem se je začela pri koncu programiranja krmilnega programa, saj je program neposredno vplival na to, kako bodo potekale povezave od programirljivega logičnega krmilnika do izvršilnih elementov. Primer ene od shem, ki prikazuje varnostne elemente omare, je na sliki 4.11.



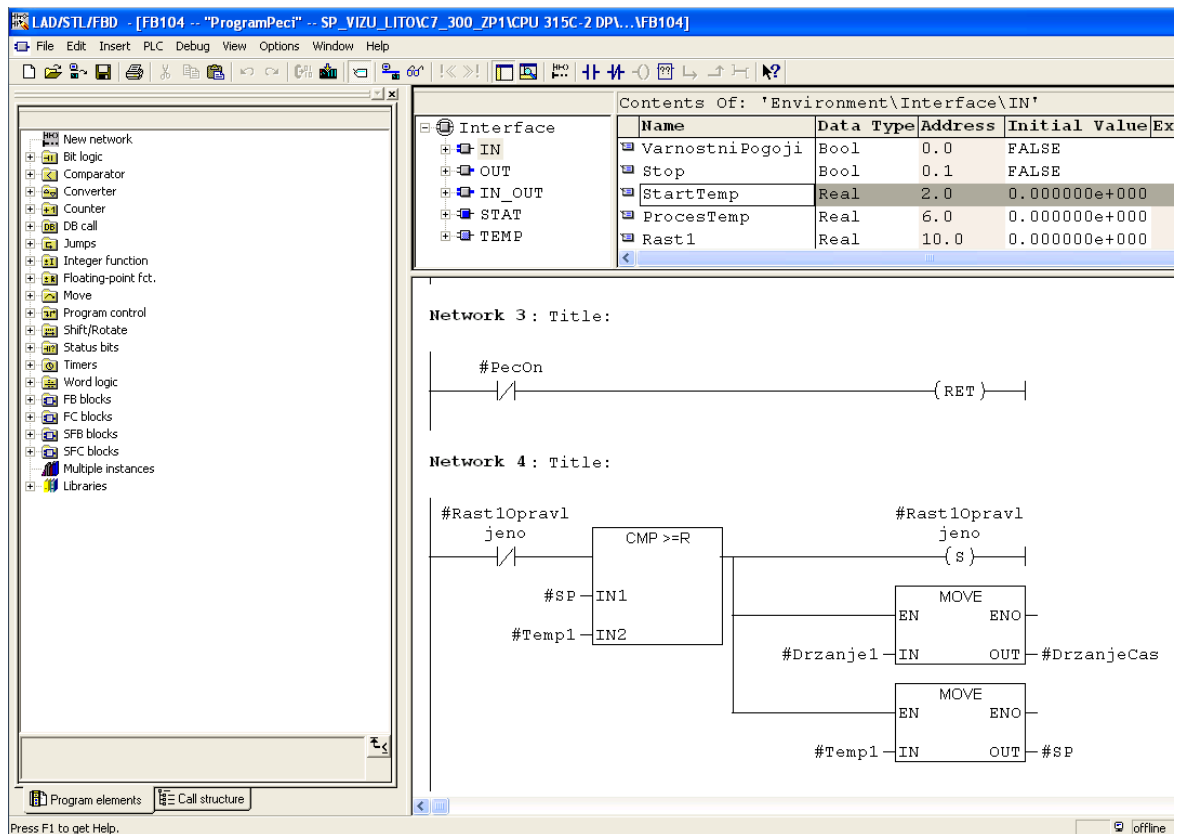
## 4.2. Krmilni program

Vse naprave neposredno ali posredno krmili program, ki teče na programirljivem logičnem krmilniku. Program mora omogočati uporabniku upravljanje peči in hkrati onemogočiti kombinacije ukazov, ki niso smiselni ali lahko povzročijo škodo peči ali okolici, na primer gorilci ne smejo goreti, če voz ni v peči. Program prižiga in ugaša gorilce in ventilator, premika voz, vodi program gretja in regulira loputo. Ukaze sprejema od nadzorne plošče ali uporabniškega vmesnika zaslona na dotik, pred izvedbo ukazov pa mora glede na stanje varnostnih spremenljivk odločiti, ali bo ukaz izvedel. Pred opisom posameznih delov programa na kratko opišemo orodje, s katerim smo programirali programirljiv logični krmilnik.

### 4.2.1. Siemensovo razvojno okolje Step 7

Step 7 je osnovno orodje za programiranje in nastavljanje proizvodov za avtomatizacijo SIMATIC. Z njim določamo in postavljamo nastavitve strojne opreme, ki jo uporabljamo v projektu, izdelujemo programe za to opremo ter postavljamo nastavitve za omrežja in povezave, v katerih sodeluje strojna oprema. Tu na kratko obrazložimo način programiranja s tem orodjem.

Step 7 omogoča programiranje v lestvičnih diagramih, funkcijskih diagramih ali listi ukazov in v večini primerov lahko spreminjamo način, na katerega opazujemo program. Lestvični diagrami so najbolj razširjeni zaradi lahkega razumevanja posameznih delov programa, sledijo jim ukazni sezname, ki so zaradi podobnosti programom, napisanim v zbirniku klasičnega računalnika, lahko razumljivi programerjem. Funkcijski diagrami niso pogosto uporabljeni. Na sliki 4.12 vidimo del programa, napisanega v lestvičnem diagramu, na sliki 4.13 pa ta isti del programa v listi ukazov.



Slika 4.12. Primer programa v lestvičnem diagramu

**Network 3 : Title:**

```

AN    #PecOn
SAVE
BEC

```

**Network 4 : Title:**

```

AN    #Rast1Opravljeno
A(
L     #SP
L     #Temp1
>=R
)
=    L    12.0
A    L    12.0
BLD  102
S    #Rast1Opravljeno
A    L    12.0
JNB  _004
L    #Drzanje1
T    #DrzanjeCas
_004: NOP    0
A    L    12.0
JNB  _005
L    #Temp1
T    #SP
_005: NOP    0

```

Slika 4.13. Primer programa v listi ukazov

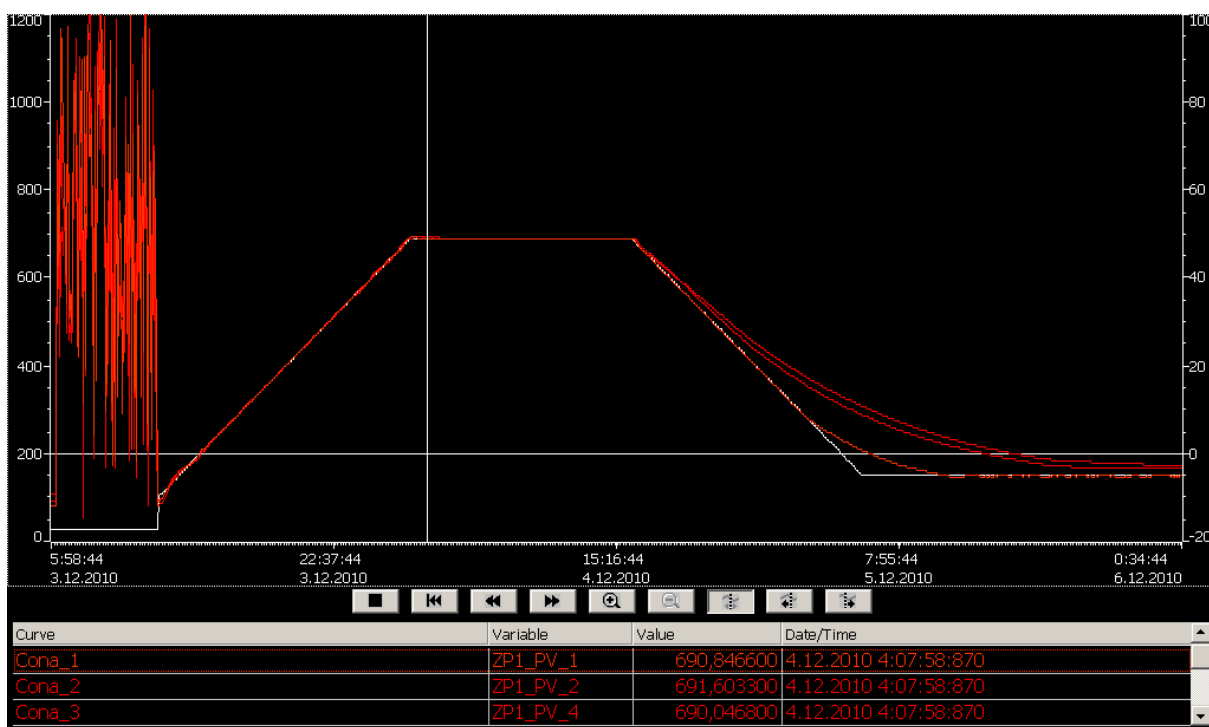
Del programa, ki je prikazan, je del funkcijskega bloka, ki izvaja program gretja. Ta del najprej preveri stanje spremenljivke PecOn. Če je ta 0, se izvajanje funkcije ustavi do naslednjega cikla. Če ni, se funkcija nadaljuje. Naslednja ukazna vrstica preveri stanje spremenljivke Rast1Opravljeno, in če je 0, se izvede primerjava med referenco in želeno temperaturo ob koncu rasti. Če je referenca višja ali enaka želeni temperaturi ob koncu rasti, je prva faza rasti končana in program postavi Rast1Opravljeno na 1. Hkrati se uporabnikova spremenljivka za trajanje držanja temperature prekopira v notranji pomnilnik, referenca pa se postavi na želeno temperaturo ob koncu rasti, zato da se možne napake ob računanju prirastka zaradi uporabe plavajoče vejice odstranijo. Oba prikaza programa izvajata isto funkcijo, razlika je le v načinu, na katerega je program predstavljen uporabniku.

#### 4.2.2. Struktura programa

Celoten program je razdeljen v dva organizacijska bloka, OB 1 in OB 35. OB 1 je osnovni organizacijski blok, ki se izvede ob vsakem ciklu programa. OB 35 je ciklični prekinitveni organizacijski blok, ki se izvede enkrat na interval, privzeto nastavljen na 100 ms, in je edini te vrste, ki ga vgrajeni procesor podpira. Taka razdelitev je potrebna zato, da ima program enakomerne presledke med interakcijo z modulom FM 355 S. Organizacijski blok OB 1 vsebuje nadzor plamena, premika voza in zapah, prižiga in ugaša ventilator ter skrbi za svetlobno signalizacijo, medtem ko organizacijski blok OB 35 komunicira s funkcijskim modulom FM 355 S, izvaja program gretja in regulira loputo.

Funkcija kontrole plamena preverja, ali lahko odpre glavni ventil za plin in ali so izpolnjeni pogoji, da regulatorji gorenja prižgejo pilotne gorilce. Program bere stanja regulatorjev, in če vžig ne uspe, naroči ponovitev, po desetih neuspešnih poskusih pa označi pilotni gorilec kot nedelujoč, kar se prikaže na uporabniškem vmesniku. Če pride do napake ali nevarnosti, funkcija takoj odklopi dovod plina in ugasne vse regulatorje, kar ugasne tudi pilotne gorilce. Funkcija za premikanje voza in zapah vrat predvsem preverja trenutno stanje končnih stikal. Vrat ne moremo zapahniti, če voz ni potisnjen do konca noter, voza pa ne moremo izvleči, če so vrata zapahnjena. Peči ne moremo aktivirati, če voza ni v peči ali so vrata odpahnjena. Ventilator za zrak se prižge ob vklopu peči, rdeča, rumena in zelena luč ter sirena pa signalizirajo trenutno stanje peči. Če je peč aktivna, gori rumena luč, če peč izvaja program gretja, gori zelena luč, rdeča luč pa se prižge ob napaki v delovanju. Kratki piski sirene signalizirajo premike voza, dolgi piski pa napako.

Funkcija regulacije temperature komunicira in upravlja s funkcijskim modulom FM 355 S, ki dejansko izvaja regulacijo PID. Poleg tega funkcija pomaga modulu z izvajanjem nekaterih dodatnih operacij, ki pomagajo pri regulaciji te specifične peči. Funkcijo bomo podrobneje opisali kasneje. Funkcija programa peči podaja referenco, ki se jo regulator PID poskuša čim bolj držati. Končni uporabnik je želel možnost sprotnega pisanja programov gretja, kar je omogočeno preko uporabniškega vmesnika. Uporabnik ima na voljo dve fazi rasti in držanja ter eno fazo padanja. Uporabnik določi hitrost in čas rasti in padanja ter dolžino trajanja držanja temperature. Tipičen program gretja je prikazan na sliki 4.14. Bela črta je referenca, ostale tri pa temperature termoelementov.



Slika 4.14. Podatki o temperaturah termoelementov med delovanjem peči

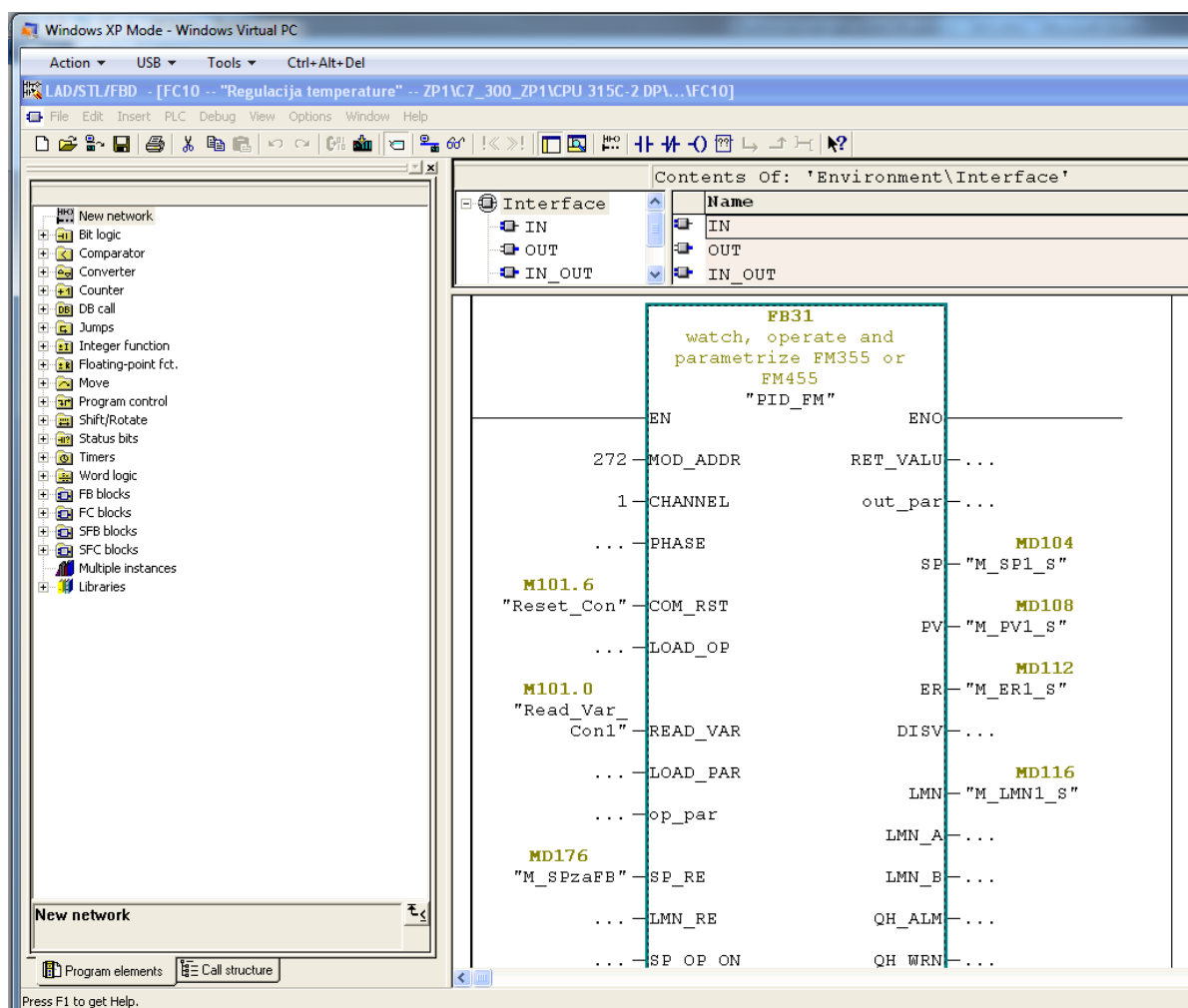
Funkcija, ki regulira loputo, uporablja Siemensov funkcijski blok FB 58, s katerim izvajamo regulacijo. Funkcijski blok je sposoben izvajati regulacijo PID, za regulacijo lopute pa uporablja zgolj člena P in I. Uporaba člena D se tu ne bi obnesla, saj se pritisk v peči zaradi načina regulacije temperature pogosto in hitro spreminja, kar bi člen D spremenilo v hitre in nepotrebne skoke izhodne vrednosti regulacije lopute. V nasprotju s funkcijskim modulom FM 355 se funkcijski blok v celoti izvaja na procesorju, kar pomeni, da se ob ustavitvi procesorja loputa več ne regulira. Odprtost lopute je odvisna od nastavljene vrednosti želene razlike pritiska v notranjosti peči in atmosferskega pritiska. To vrednost smo določili kot najmanjšo razliko v pritisku, pri katerem na vnaprej določenih mestih iz peči ne uhaja vroč zrak. Merjenje temperature smo opravili ob prvem poskusu delovanja regulacije. Pritisk v peči merimo s tipalom, ki je prikazano na sliki 4.15. Pred uporabo pritiska kot pokazatelja trenutne vrednosti odprtosti lopute ga filtriramo in normaliziramo. Filter duši hitre spremembe pritiska, normalizacija vhoda pa spremeni vhod v realno vrednost med -125 in +125. Na želeno vrednost pritiska v peči vpliva tudi, koliko časa so vklopljeni gorilci, ker se ob gretju zrak hitro širi.



Slika 4.15. Tipalo pritiska žarilne peči

#### 4.2.3. Funkcija regulacije temperature

Funkcija regulacije temperature je osrednja funkcija programa. Njena osnovna naloga, ki je nujna za delovanje celotnega krmilja, je komunikacija s funkcijskim modulom FM 355 S. Cilj komunikacije je v branju podatkov iz modula, možnost ponovnega zagona in vnašanja zelene temperature. Komunikacijo izvajamo preko Siemensovega funkcijskega bloka FB 31, ki je priložen programskemu paketu za funkcijski modul. Klic bloka je predstavljen na sliki 4.16. Blok označuje referenco s SP (SetPoint), regulirano količino s PV (Process Value), trenutno napako z ER (ERror), regulirno količino pa z LMN (manipulated value).



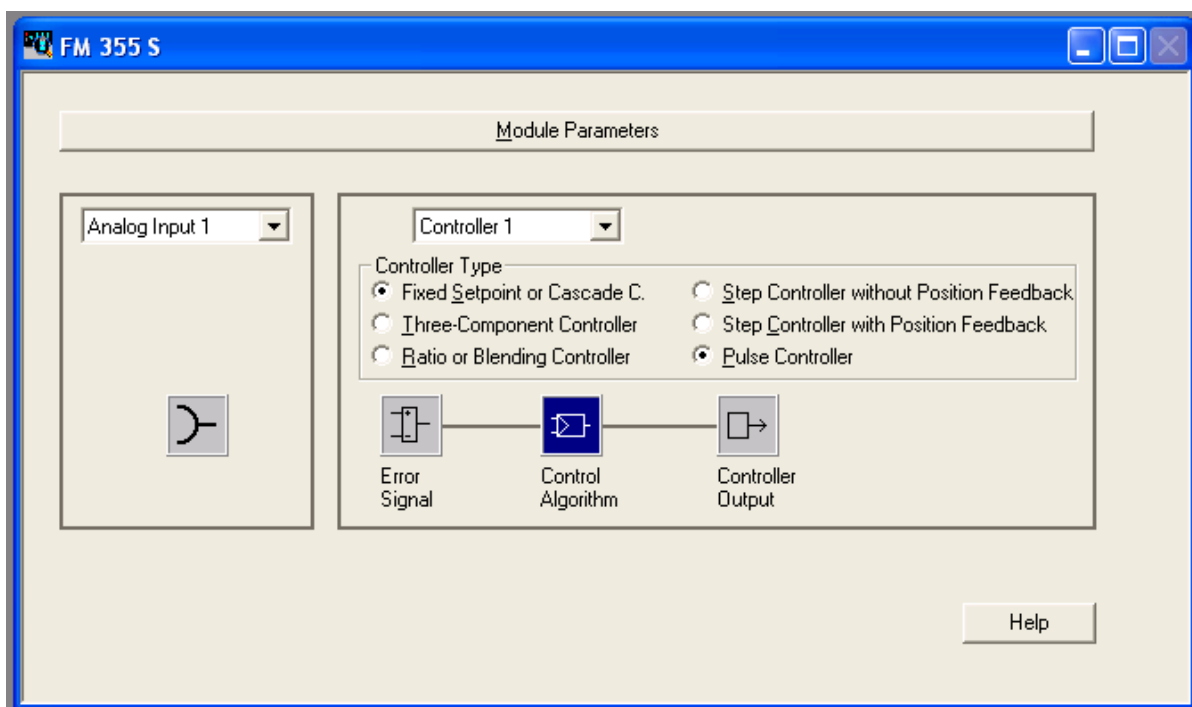
Slika 4.16. Prvi del klica funkcijskega bloka FB 31

Poleg komunikacije funkcija računa referenco, ki jo pošilja funkcijskemu modulu, ob nedelovanju ali nepravilnem delovanju peči ustavlja funkcijski modul in sproža arhiviranje izvajanja programa gretja. Referenca se prilagaja na dva načina. Referenca se zmanjša v obratnem sorazmerju z razliko trenutne temperature zraka v peči od 1120 °C, ki se sicer med samim programom gretja nikoli ne preseže. To dodatno varuje peč pred prekomernim gretjem. Druga prilagoditev izhaja iz razlike med temperaturo zraka v peči in povprečno temperaturo površine žarjenca. Če je ta razlika večja od 250 °C, se referenca zmanjša za presežek razlike nad 250 °C. Na primer, če je razlika 265 °C, se referenca zmanjša za 15 °C. Na ta način omejimo prekoračitev regulirane količine nad referenco ter stabiliziramo in izboljšamo delovanje regulatorja. Funkcija tudi omejuje referenco v območje med 20 °C in 1055 °C. Ker je peč razdeljena na 3 cone, mora regulator skrbeti za to, da je v vsaki coni temperatura čim bližja referenci. Te cone so razporejene približno enakomerno po notranjosti peči. Prva cona je pri vratih in zaseda približno 25 % peči, druga cona zaseda 50 % v sredini peči, tretja je v zadnjem delu peči. V splošnem velja, da je pravilna regulacija peči pogojena s pravilno regulacijo druge cone. Imamo 4 pare gorilcev, funkcijski modul pa ima 4 krmilnike, zato lahko vsakemu paru gorilcev določimo drugačno regulirno količino. Najlažje je poskrbeti za prvi in četrti par gorilcev, ker nanju vpliva le temperatura prve oziroma tretje cone. Na drugi par gorilcev vpliva temperatura druge cone. Tretji par gorilcev ima za osnovo regulirno

količino drugega para, s tem da se mu doda še vrednost, ki je sorazmerna razliki med temperaturo prve in tretje cone, ter na ta način deluje kot izenačevalec med njima. Tako bo, če bo temperatura v prvi coni višja, tretji par delal dlje kot drugi, v nasprotnem primeru pa bo deloval manj časa od drugega para.

#### 4.2.4. Nastavitve funkcijskega modula FM 355 S

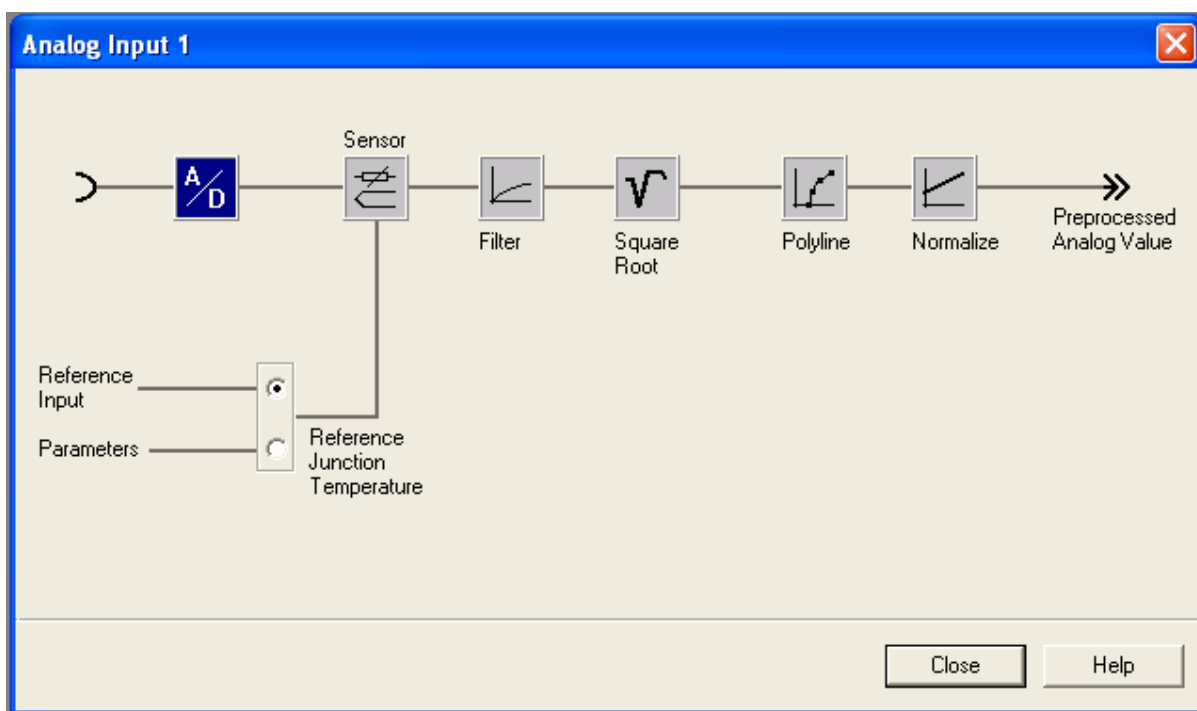
Funkcijski modul FM 355 S nastavljamo s posebnim priloženim orodjem. Osnovno okno, prikazano na sliki 4.17, omogoča izbiro načina delovanja posameznih krmilnikov, med parametri modula pa najdemo izbiro frekvence napajanja in mersko enoto temperature ( $^{\circ}\text{C}$  ali  $^{\circ}\text{F}$ ). Krmilniki so nastavljeni na delovanje s fiksno referenco in generirajo izhode s pulzno modulacijo. Nastavitve za izbran analogni vhod ali krmilnik spreminjamo tako, da izberemo vhod ali krmilnik, ki ga želimo nastavljati, in izberemo eno izmed podskupin. Vsak krmilnik ima lastne nastavitve, s katerimi nastavljamo, od kod dobi vhodne vrednosti, kakšni so parametri njegovega regulatorja in kako generira izhod.



Slika 4.17. Osnovno okno za nastavljanje funkcijskega modula FM 355 S

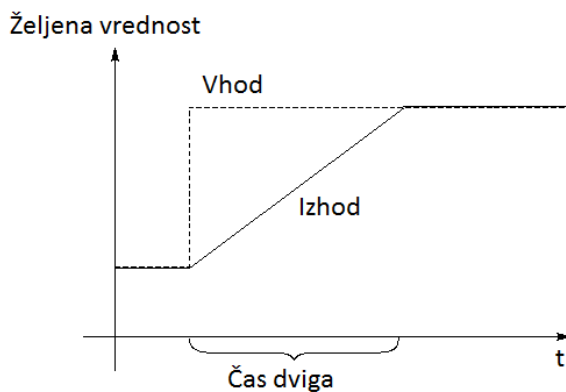
Funkcijski modul ima vgrajeno možnost izvajanja predprocesiranja nad analognimi vhodi. Najprej izbiramo med 12-bitno in 14-bitno ločljivostjo pretvorbe iz analognega v digitalni signal. Višja ločljivost poveča število diskretnih stanj in s tem natančnost pretvornika, a le do meje šuma. Nad to mejo so odčitavanja nestabilna [7]. Zaradi dolgotrajnosti in počasnega odziva procesa žarjenja si lahko dovolimo uporabo 14-bitne ločljivosti, ne da bi žrtvovali natančnost delovanja regulatorja. Vhodi so različnih vrst, zato moramo izbrati pravilno vrsto senzorja, ki je lahko npr. 0-20 mA, 0-10 V ali pa termoelement. Vsi termoelementi, ki se uporabljajo v peči, so tipa K in lahko delujejo neprestano v območju od 0  $^{\circ}\text{C}$  do 1100  $^{\circ}\text{C}$ . Za pravilno odčitavanje temperature potrebujemo pravilno referenčno temperaturo v točki, kjer izvajamo meritev, to pa dobimo z uporovnim termometrom Pt 100, ki ga priklopimo na

funkcijski modul. Uporovni termometri se razlikujejo od navadnih termoelementov. Narejeni so iz ene same kovine, navadno platine, katere upornost se večja približno linearno z absolutno temperaturo [8]. Filter izvaja časovni zamik signala prvega reda in na ta način lahko zmanjša visokofrekvenčne motnje na vhodu. Ta zamik je nastavljen na 5 sekund za vse vhode. Če je vhod neka kvadratna funkcija, ga lahko korenimo, da dobimo linearno funkcijo, kar pa v tem primeru ni potrebno. Z lomljenko lahko nastavimo funkcijo, s katero se interpretira vhod. Ker je že izbran termoelement tipa K, funkcijski modul to naredi samodejno. Z normalizacijo nato vhod linearno preslikamo v neko vrednost med najmanjšo in največjo nastavljeno vrednostjo, ki je v našem primeru 0 in 100. Izbira nastavitve vhodnega signala je prikazana na sliki 4.18.



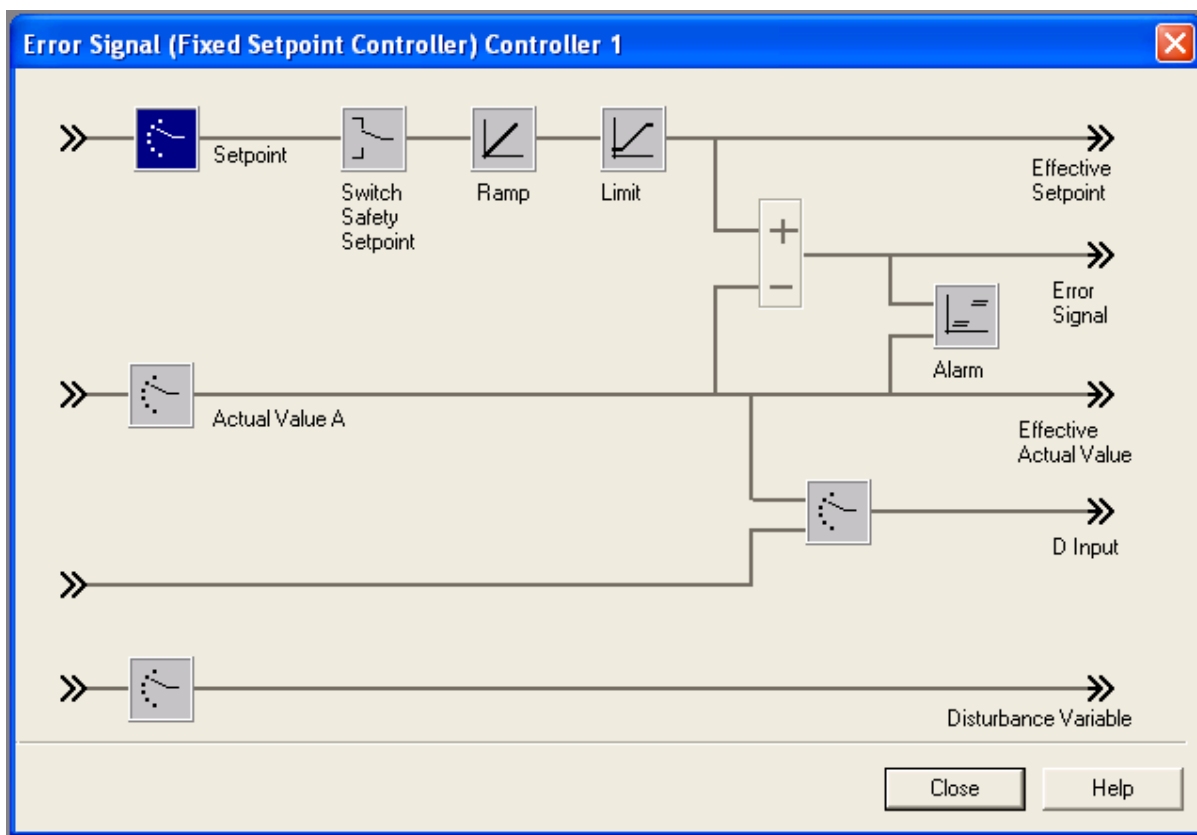
Slika 4.18. Izbira nastavitve vhodnega signala

Z izjemo regulirane količine so nastavitve vhodnih vrednosti za vse krmilnike enake. Posamezen krmilnik pridobiva referenco preko funkcijskega bloka FB 31, vsak krmilnik pa ima svojo podatkovno bazo, iz katere bere spremenljivke. Z rampo nastavimo hitrost, s katero se izvede sprememba reference. V programu je ta vrednost nastavljena na 5 sekund, kar pomeni, da se ob skoku reference dejanska vrednost linearno približuje novi referenci 5 sekund, preden jo doseže. Delovanje rampe je prikazano na sliki 4.19.



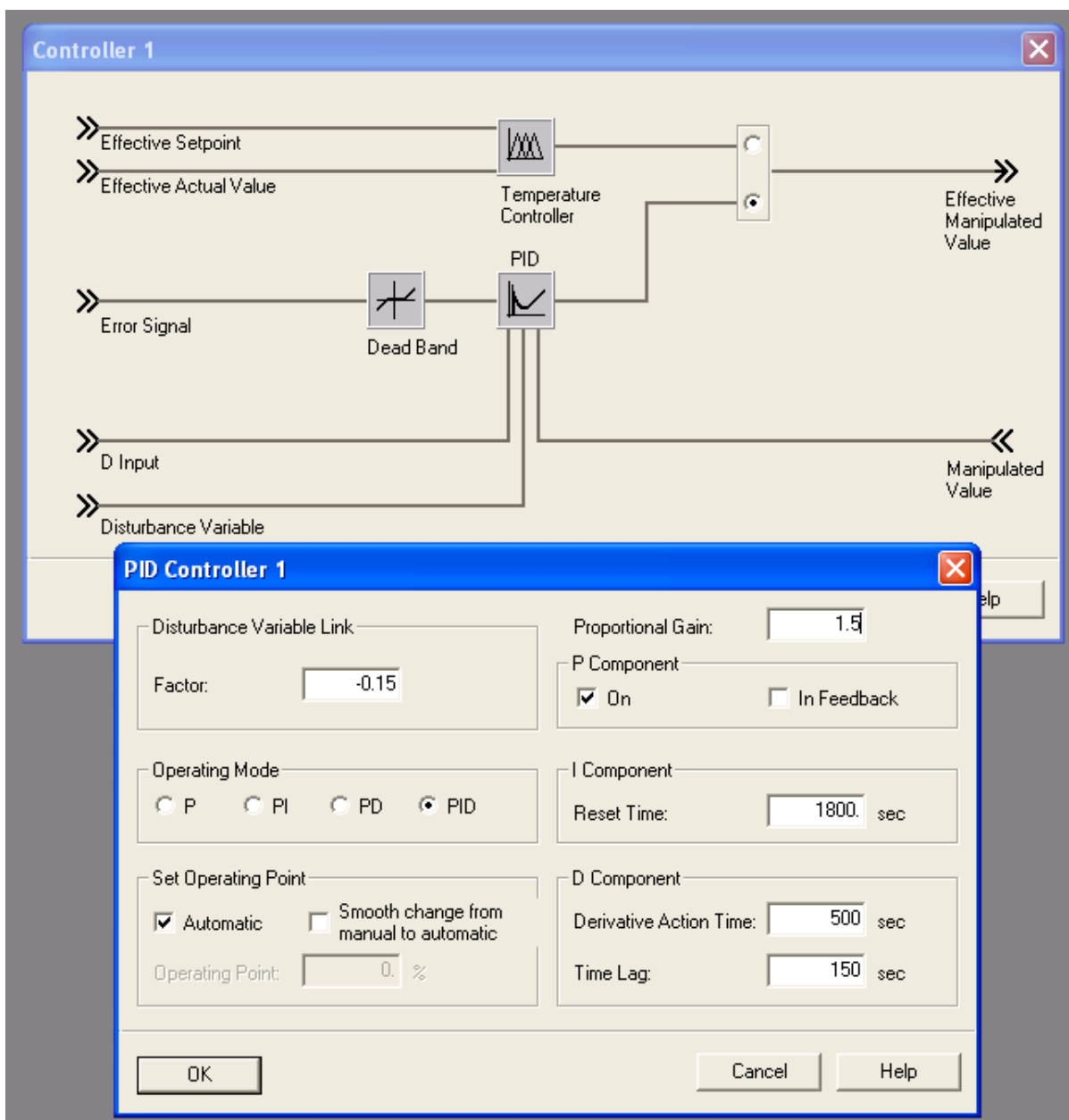
Slika 4.19. Delovanje funkcije rampe

Referenco lahko še omejimo navzgor in navzdol. Krmilniki so nastavljeni tako, da je referenca navzdol omejena na 0 °C, navzgor pa na 1070 °C. Regulirano količino prvi krmilnik pridobiva iz prvega analognega vhoda (cona 1), drugi in tretji krmilnik iz drugega analognega vhoda (cona 2), četrti krmilnik pa iz četrtega analognega vhoda (cona 3). Razlika med regulirano količino in referenco je napaka, ki se nato upošteva v regulatorju PID. Na vsak krmilnik vpliva tudi motnja, ki je v našem primeru temperatura zraka v peči. Ob višji temperaturi zraka bo tudi temperatura žarjenca hitreje rasla. Vnos motnje omogoči regulatorju, da se prilagodi na znane motnje in s tem zgladi delovanje. Temperaturo zraka merimo na tretjem analognem vhodu. Slika 4.20 prikazuje okno za nastavljanje teh vrednosti.



Slika 4.20. Nastavitve signala napake in signala motnje

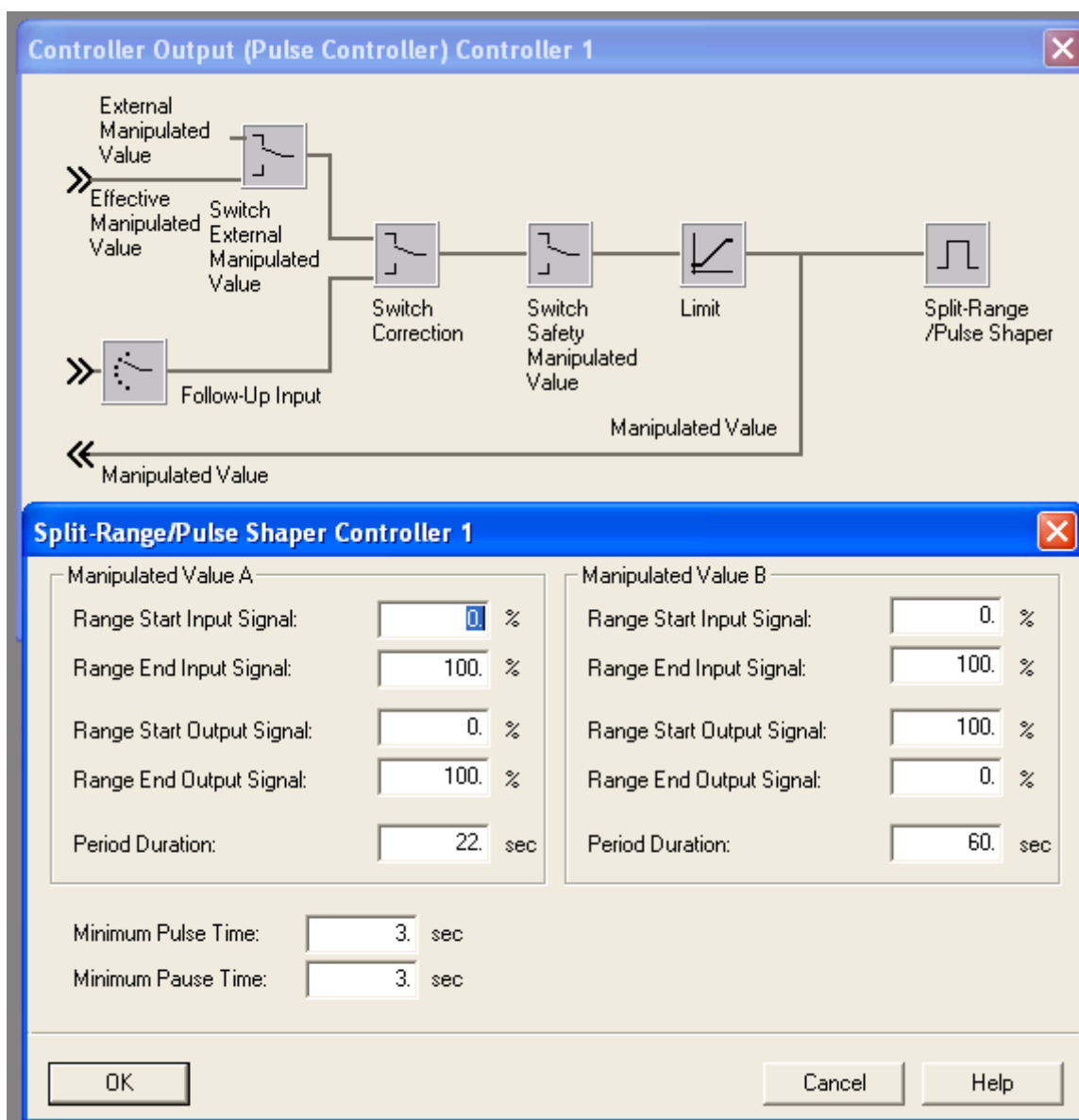
Regulator je nastavljen na delovanje PID z motnjo. Ima možnost ročnega delovanja, ki pa je v programu onemogočena. Vsi regulatorji imajo nastavljen faktor ojačanja  $K_p$  na 1,5, integrirni čas  $T_I$  na 1800 sekund, diferencirni čas  $T_D$  na 500 sekund, drugi člen diferencirni člen  $T_{D1}$  pa na 150 sekund. Faktor vpliva motnje je nastavljen na -0,15. Pri rasti temperature zraka bo regulator reagiral tako, da bo zmanjšal regulirno količino, pri padcu temperature zraka pa jo bo povečal. Nastavitve regulatorja so prikazane na sliki 4.21.



Slika 4.21. Izbira vrste regulatorja in nastavitve parametrov PID

Izhod krmilnikov lahko izhaja iz regulatorja, iz funkcijskega bloka, ki komunicira z regulatorjem, ali iz nekega analognega vhoda. Ob posebnih dogodkih (npr. ponoven zagon modula, signal iz programa) lahko izhod zmanjšamo na neki odstotek pravega izhoda. Izhod lahko tudi omejimo navzgor in navzdol, preden ga pretvorimo v dvostanjski signal. Vsi krmilniki so nastavljeni na uporabo regulatorjevega izhoda brez dodatnih omejitev. Pretvorba

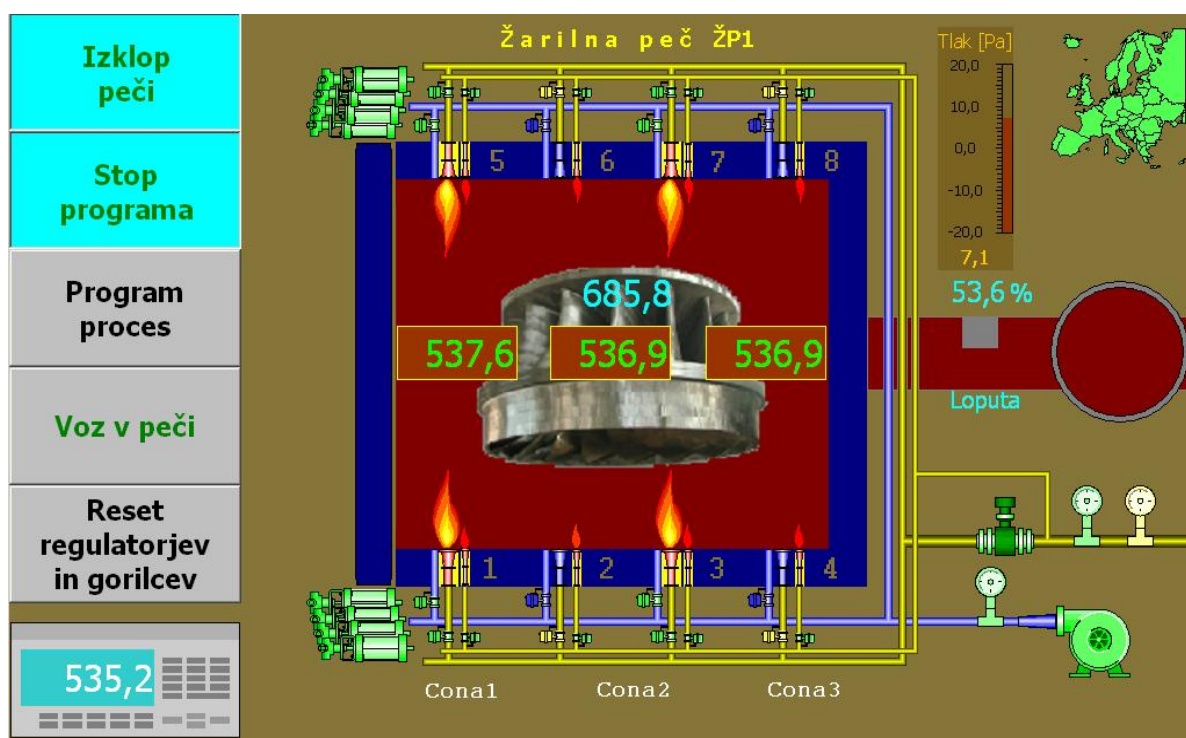
v dvostanjski signal je odvisna od želene oblike pulza. Vsak krmilnik ima dva izhoda, uporablja se le prvi. Tu lahko določimo preslikavo vhodnega v izhodni signal, dolžino periode enega cikla signala ter najkrajše trajanje pulza in pavze. Najkrajše trajanje pulza in pavze zavaruje mehanske izvršilne elemente ter omogoči, da se dejansko stanje teh elementov stabilizira. Dolžina cikla mora omogočati fleksibilnost regulirne količine, ki se večja z dolžino cikla, v odvisnosti od najkrajšega trajanja pulza in pavze, hkrati pa zagotavljati odzivnost, ki je boljša ob krajšem ciklu. Najkrajši čas pulza in pavze krmilnikov je 3 sekunde, dolžina cikla je rezultat zmanjševanja napake med poskusnim delovanjem peči in je nastavljena na 22 sekund. Slika 4.22 prikazuje nastavljanje izhoda krmilnika.



Slika 4.22. Nastavitve izhoda funkcijskega modula

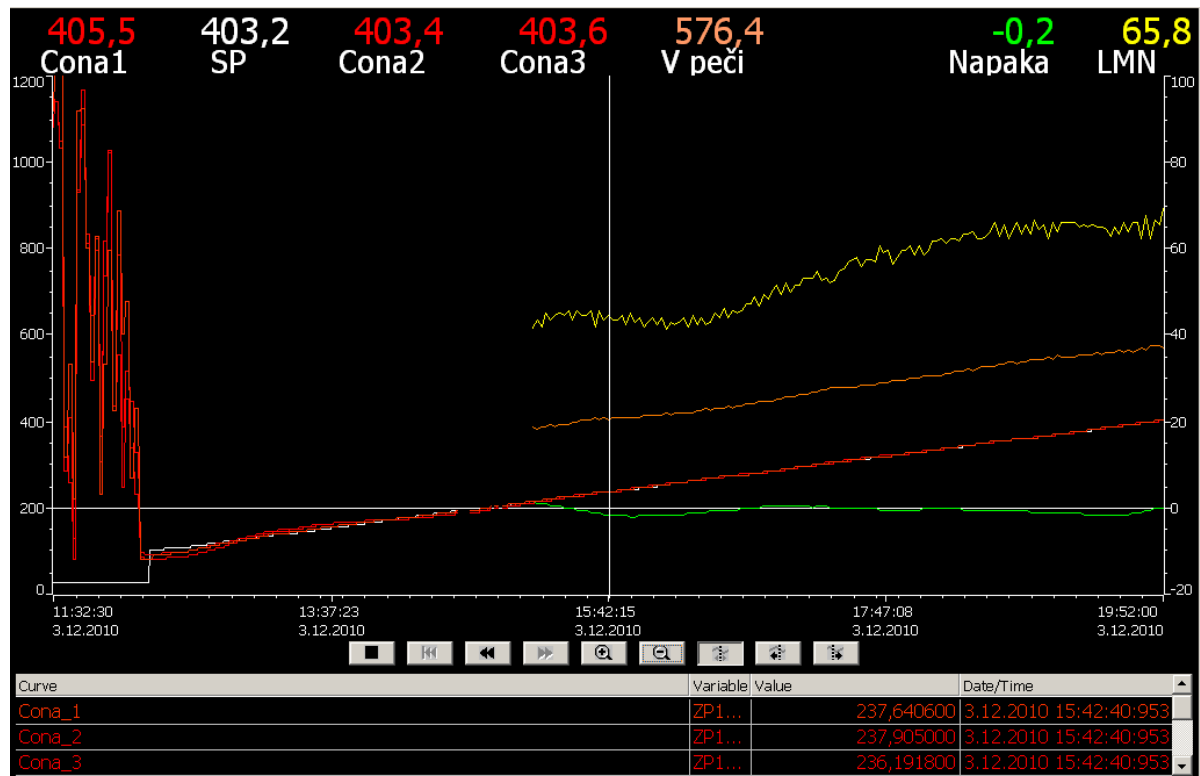
#### 4.2.5. Uporabniški vmesnik

Uporabniški vmesnik je izveden preko zaslona na dotik C7-636. Ima tri slike, preko katerih uporabnik lahko dostopa do funkcij peči. Prva slika, prikazana na sliki 4.23, vsebuje gumb za vklop in izklop peči, gumb za zagon programa, gumb za zagon programa s trenutne temperature žarjenca, kar je uporabno, če je žarjenec že pri višji temperaturi, gumb za premik voza v peč in iz nje ter gumb za ponastavitev regulatorja in gorilcev. Prikazuje ventile, interpretirane podatke s senzorjev, trenutno temperaturo con, temperaturo zraka v peči, referenco regulatorja, odprtost lopute in trenutni tlak v peči. Prikazuje tudi delovanje ventilatorja, gorilcev in pilotnih gorilcev. Vse elemente, ki ne delujejo pravilno, označi z rdečo barvo.

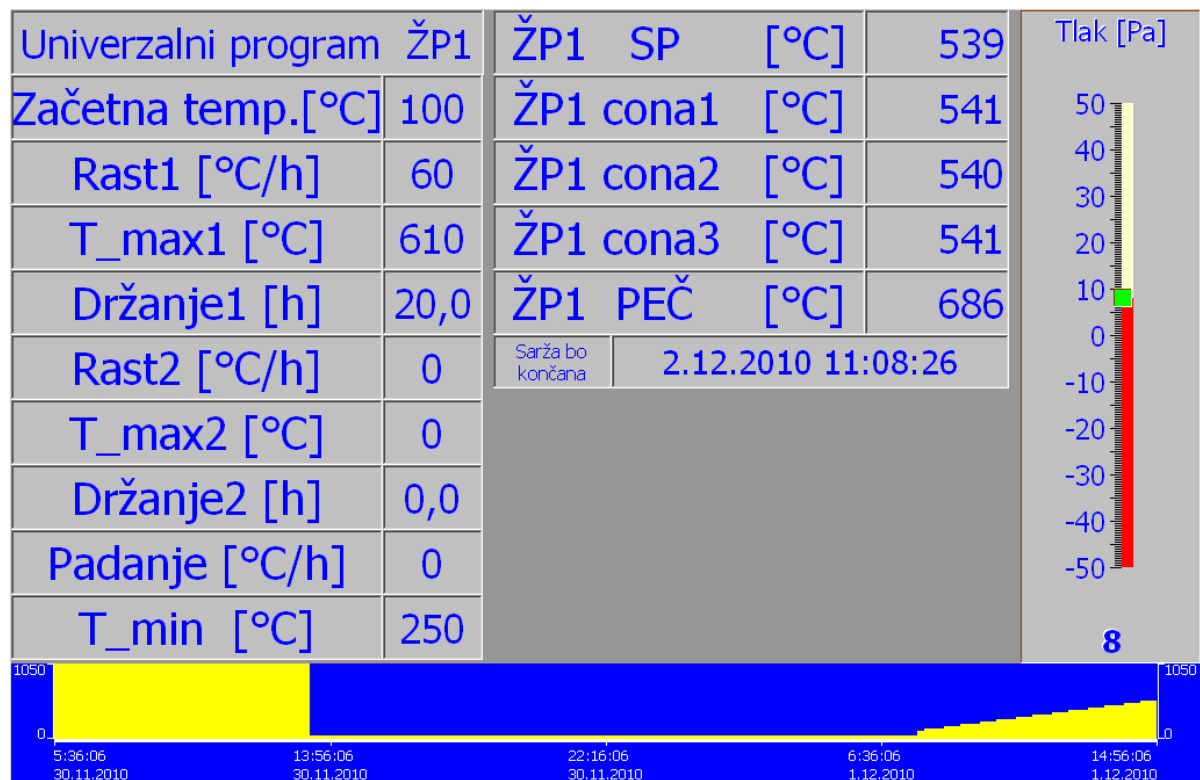


Slika 4.23. Prva slika uporabniškega vmesnika za žarilno peč ŽP1

Druga slika ima podatke o zgodovini reguliranih količin vseh treh con in reference. Med delovanjem zapisuje tudi podatke o temperaturi zraka v peči, regulirni količini in napaki. Ti dodatni podatki se ob izgubi napajanja ali izklopu peči izgubijo. V vsakem trenutku lahko uporabnik pogleda podatke v katerikoli točki grafa. Slika 4.24 prikazuje sliko z grafom. Na vrhu so trenutne vrednosti, na dnu pa vrednosti v izbrani točki. Zadnja slika vsebuje vhodne podatke za univerzalni program. Tu uporabnik določi vse parametre programa žarjenja, lahko pa tudi spreminja zelen tlak v peči. Tudi na tej sliki so podatki o trenutni temperaturi con in zraka ter referenca. Program izračuna, kdaj bo delovni cikel končan z danimi podatki, in to prikaže. Če hoče uporabnik spremeniti karkoli, mora vnesti uporabniško ime in geslo, nato pa lahko spreminja, kar želi. Program avtomatično prepreči nadaljnje spreminjanje parametrov po kratkem času neaktivnosti.



Slika 4.24. Slika z grafom delovanja žarilne peči ŽP1



Slika 4.25. Slika z univerzalnim programom

## 4.3. Testni program

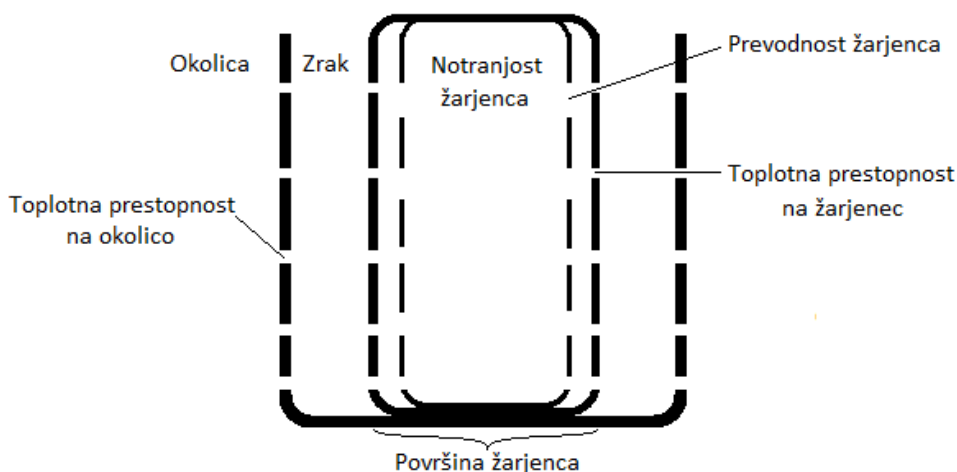
### 4.3.1. Model peči

Tipičen program žarilne peči traja nekaj dni, ob tem pa peč porabi velike količine zemeljskega plina. Zaradi tega bi bilo nesmiselno in negospodarno uporabljati peč za postavljanje parametrov PID. Treba je bilo narediti model peči, s katerim bi bilo možno dovolj dobro oceniti prave parametre členov PID, ne da bi čakali več ur ali dni na rezultate. Z modelom smo ustvarili programski simulator, na katerem smo nato izvajali poskuse.

Peč si lahko predstavljamo kot tri posode, postavljene ena v drugi, ki imajo preluknjane stene, kot je prikazano na sliki 4.26. Zunanja posoda predstavlja temperaturo zraka, srednja temperaturo površine žarjenca, notranja pa temperaturo notranjosti žarjenca. Površina dna posode predstavlja maso elementa. Nivo vode v posodah predstavlja temperaturo. Posoda za zrak je edina, v katero lahko neposredno točimo vodo. Velikost lukenj v posamezni posodi določa hitrost, s katero se voda pretaka iz ene posode v drugo ali pa izliva v okolico. Podobno velja za peč. Ob izvajanju gretja lahko v peči neposredno vplivamo le na temperaturo zraka v peči. Toplota se preko zraka prenaša tako na površino žarjenca kot na okolico peči, s površine žarjenca pa se nato prenaša v notranjost žarjenca. Merimo temperaturo zraka in površine žarjenca, temperature notranjosti žarjenca pa ni možno meriti. Masa žarjenca je precejšnja, prenos med površino in notranjostjo traja nekaj časa, kar je treba upoštevati pri modelu. Hitrost prenosa je odvisna od toplotne prevodnosti materiala, v našem primeru jekla. Če je temperatura zraka nižja od temperature površine žarjenca, bo prenos potekal v nasprotno smer. Tak model lahko v grobem izvedemo z naslednjimi parametri:

- temperaturo zraka,
- temperaturo površine žarjenca,
- temperaturo notranjosti žarjenca,
- površino žarjenca,
- površino peči,
- faktorjem toplotne prevodnosti žarjenca in
- faktorjem toplotne izgube v okolico.

Faktor toplotne prevodnosti žarjenca je hkrati faktor toplotne prestopnosti z zraka na žarjenec. Prevajanje toplote je možno le, če toplotni prevodnik miruje, izvaja pa se s trki molekul v snovi. Prestop toplote je podoben prevajanju, s tem da ob prestopu toplote sredstvo prenosa kroži. Toplotna prestopnost ni odvisna le od snovi, ampak tudi od temperature, hrapavosti in drugih lastnosti. Zaradi tega je prestopnost različna od sistema do sistema [9]. Poenotenje faktorja prevajanja in prestopanja bistveno ne vpliva na delovanje modela. Seveda bi bilo bolj pravilno, če bi imeli še en faktor za toplotno prestopnost, a to bi samo nepotrebno zapletlo model.



Slika 4.26. Ideja za model žarilne peči

Model predstavljajo enačbe, ki določajo nove vrednosti temperatur ob nekem vhodu. Vhod neposredno vpliva na temperaturo zraka. Temperatura zraka ter površina in prevodnost peči vplivajo na to, koliko toplote bo izgubljene v okolico. Razlika med temperaturo zraka in temperaturo površine žarjenca, površina in prevodnost žarjenca določajo, koliko toplote bo preneseno iz zraka na žarjenec ali obratno. Podobno velja tudi za temperaturo notranjosti žarjenca, ki je odvisna od razlike med temperaturo površine in notranjosti ter parametri žarjenca. Za pospešeno delovanje modela v primerjavi z realno pečjo poskrbi čas cikla, ki pove, koliko časa naj bi preteklo od računanja prejšnjih vrednosti. Enačbe modela lahko razdelimo na dva dela. Prvi del enačb je

$$\Delta T_{PP} = (T_P(t-1) - T_{P\check{Z}}(t-1)) * F_{\check{Z}} * t_c, \quad (8)$$

$$\Delta T_{PN} = (T_{P\check{Z}}(t-1) - T_{N\check{Z}}(t-1)) * F_{\check{Z}} * t_c, \quad (9)$$

$$\Delta T_{ZP} = T_P(t-1) * F_P * t_c. \quad (10)$$

Te enačbe izračunajo prenos toplote med okolico in različnimi deli peči. Izhajajo iz enačbe o toplotni prevodnosti [9]. Enačbi (8) in (9) odštejeta prejšnjo temperaturo zraka v peči in prejšnjo temperaturo površine žarjenca oziroma površine žarjenca in notranjosti žarjenca, rezultat pa pomnožita s faktorjem prevodnosti žarjenca in časom cikla. Enačba (10) naredi podobno za temperaturo zraka in temperaturo okolice, s tem da se za okolico predpostavlja temperatura 0 °C, namesto faktorja prevodnosti žarjenca pa uporablja faktor izgub peči. Rezultate teh enačb uporabljajo enačbe za računanje novih vrednosti temperatur

$$T_P(t) = T_P(t-1) + \frac{LMN * t_c - \Delta T_{ZP} - \Delta T_{PP}}{S_P}, \quad (11)$$

$$T_{P\check{Z}}(t) = T_{P\check{Z}}(t-1) + \frac{\Delta T_{PP} - \Delta T_{PN}}{S_{\check{Z}}}, \quad (12)$$

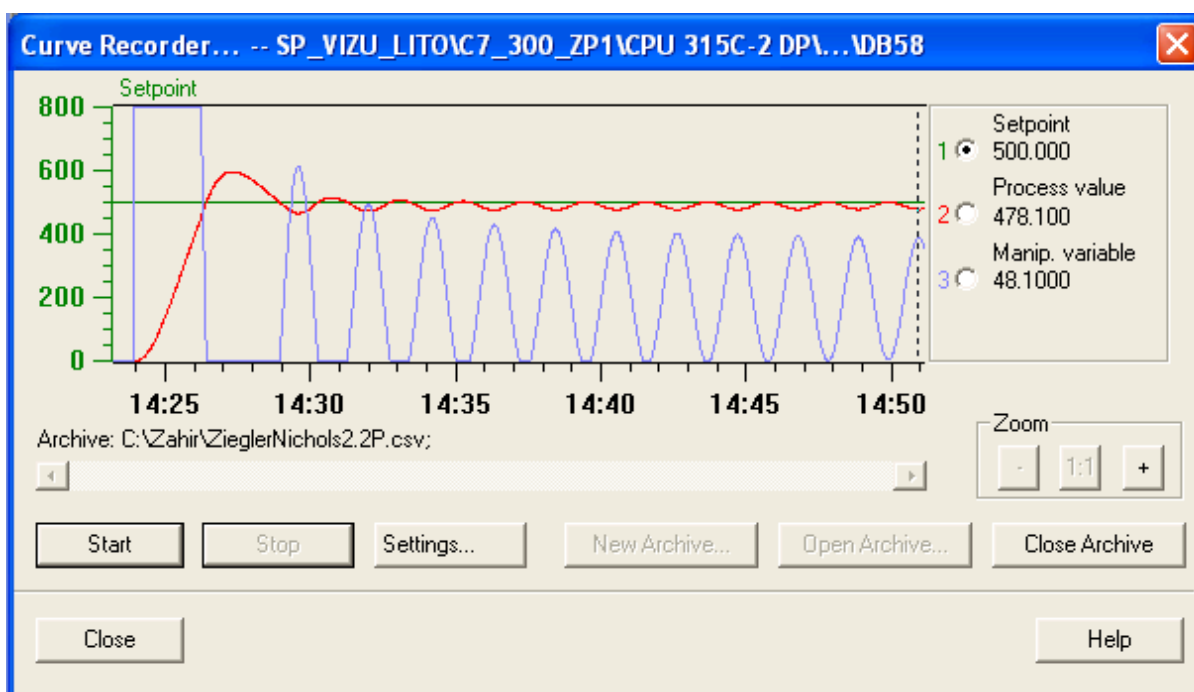
$$T_{N\check{Z}}(t) = T_{N\check{Z}}(t-1) + \frac{\Delta T_{PP} - \Delta T_{PN}}{S_{\check{Z}}}. \quad (13)$$

V enačbah je  $T_P$  temperatura zraka v peči,  $T_{Pž}$  temperatura površine žarjenja,  $T_{Nž}$  temperatura notranjosti žarjenja,  $S_P$  površina peči,  $S_ž$  površina žarjenja,  $F_P$  faktor izgub peči,  $F_ž$  faktor prevodnosti žarjenja,  $LMN$  regulirna količina,  $t_c$  pa čas cikla.

Parametre modela smo nastavili tako, da se obnaša čim bolj podobno realni peči. Postavljene vrednosti izhajajo iz podatkov o prejšnjih delovnih ciklih, ki so se izvajali v peči. Med podatki so bili hitrost rasti temperature zraka v peči, hitrost rasti temperature površine žarjenja, hitrost hlajenja žarjenja in hitrost hlajenja zraka v peči. Med drugim se je izkazalo, da je hitrost rasti temperature žarjenja, če je temperatura zraka višja za  $250\text{ °C}$ , približno  $120\text{ °C/h}$ , hkrati pa programi delovnih ciklov niso nikoli imeli rasti, ki bi presegala  $50\text{ °C/h}$ . Podatki so pokazali, da se bo model obnašal približno tako kot realna peč pri  $S_P = 64$ ,  $S_ž = 180$ ,  $F_P = 1/30$  in  $F_ž = 0,05$ .

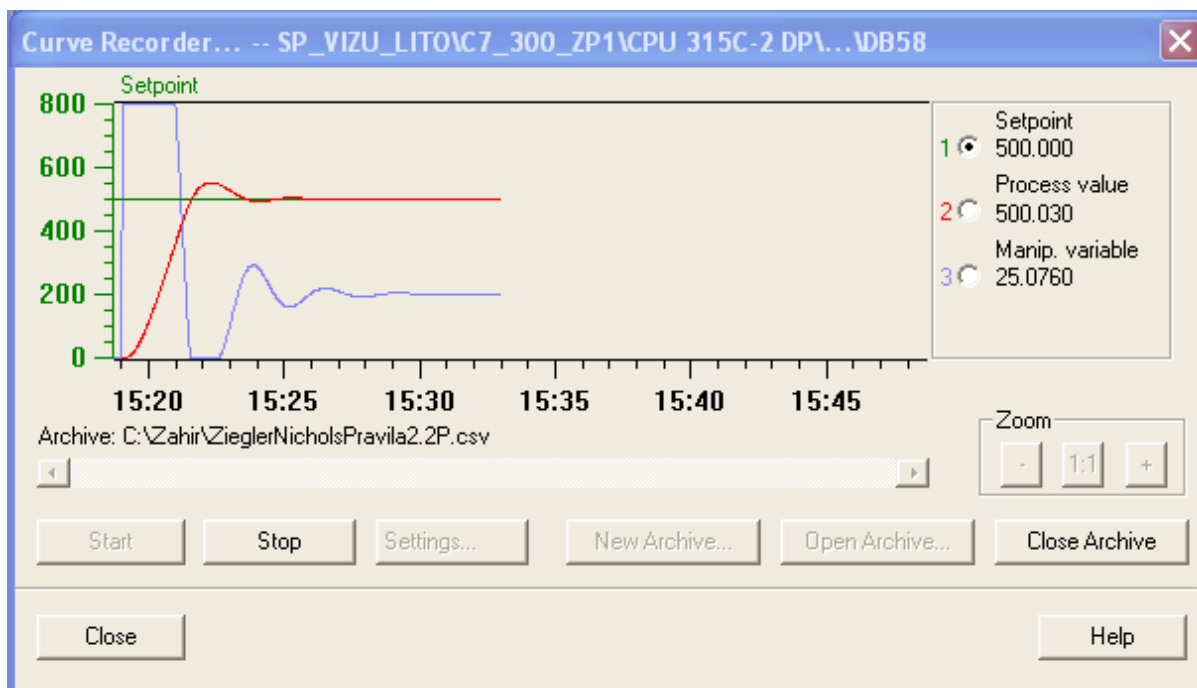
#### 4.3.2. Določanje parametrov PID

Za izvajanje simulacij je treba izhod regulatorja postaviti na vhod modela peči, trenutno temperaturo žarjenja pa speljati na vhod regulatorja. Za simulacije smo uporabili funkcijski blok FB 41, ki je vgrajen programski regulator PID in deluje zelo podobno funkcijskemu modulu. Model peči je nastavljen na 60-krat hitrejše delovanje od realne peči, kar pomeni, da vsaka minuta predstavlja eno uro delovanja. Začetek določanja parametrov je v nihajnem poskusu Zieglerja in Nicholisa. Najprej je treba poiskati tako vrednost za člen P, da bo regulator P nedušeno nihal. Regulator bi moral dobro izvajati sledilno delovanje, zato smo sprva vse simulacije izvajali tako, da smo referenco dvignili z  $0\text{ °C}$  na  $500\text{ °C}$ . Po nekaj simulacijah smo odkrili, da je meja nedušenega nihanja pri vrednosti 2,2. Na sliki 4.27 je prikazana simulacija, ki prikazuje regulacijo P ob  $K_P = 2,2$ .



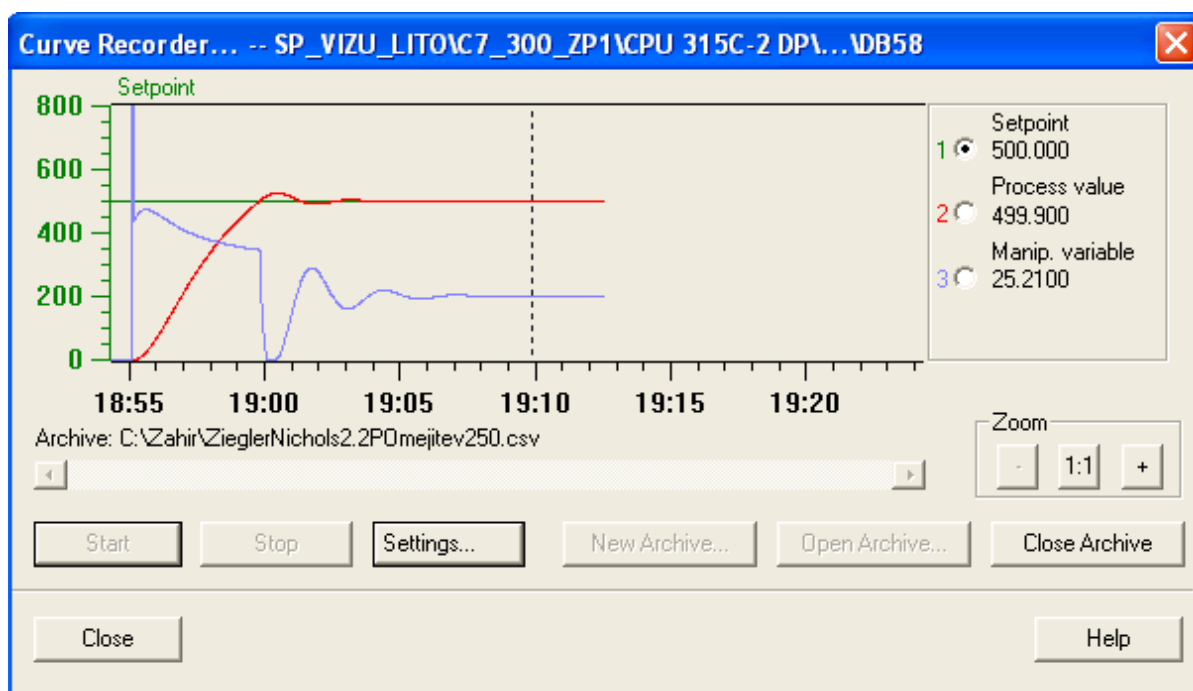
Slika 4.27. Nedušeno nihanje izhoda regulatorja P

Glede na rezultate simulacije sta po pravilih Zieglerja in Nicholosa kritično ojačanje  $K_{KR} = 2,2$  in kritična perioda  $T_{KR} = 2$  h. Iz tega sledi, da je  $K_P = 1,32$ ,  $T_I = 1$  h,  $T_D = 15$  min in  $T_{D1} = 3$  min. S teoretičnimi parametri smo ponovili simulacijo, njeni rezultati pa so na sliki 4.28.

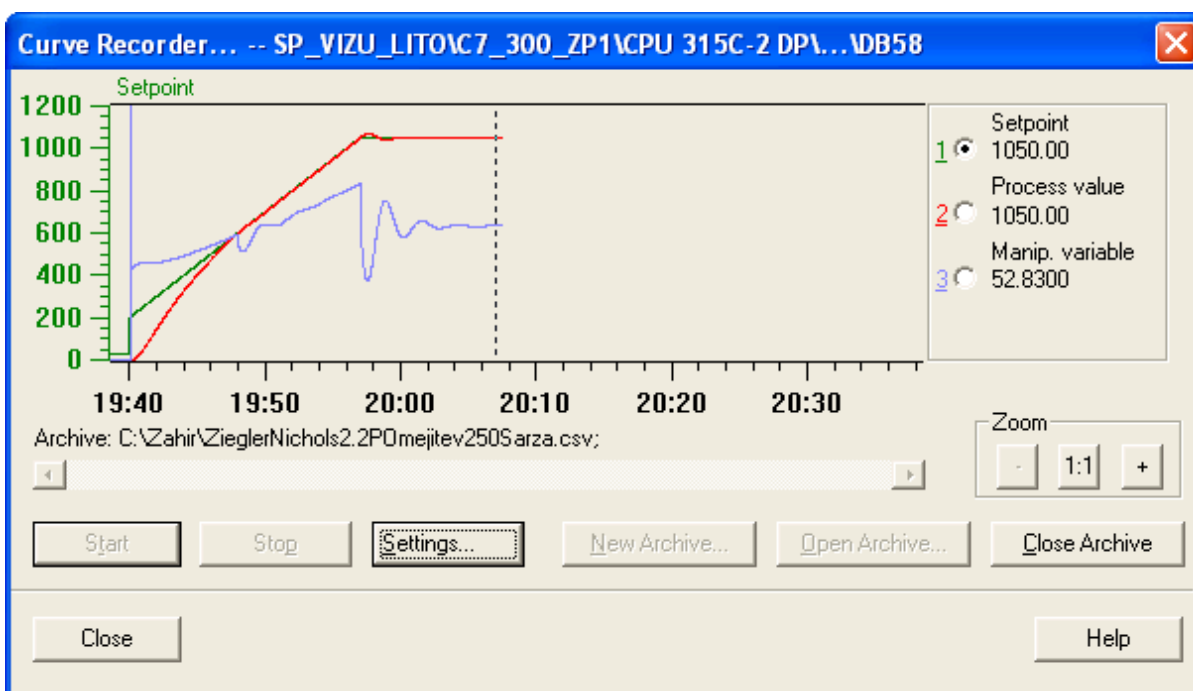


Slika 4.28. Regulacija PID s parametri Zieglerja in Nicholosa

Takoj je opazno precejšnje preseganje reference. Ker vemo, da dejanska rast v resnici ne bo presegala  $50$  °C/h, lahko tudi omejimo najvišjo možno rast. Smiselno bi bilo omejiti rast tako, da temperatura zraka v peči ni neprimerno višja od temperature žarjenca, ampak da vseeno lahko brez težav preseže zeleno rast. Omejitev lahko izvedemo z omejitvijo največje razlike temperature zraka in temperature žarjenca. Če to razliko nastavimo na  $250$  °C, bi v teoriji morali izpolniti vse pogoje. Rast omejimo tako, da presežek razlike temperatur odštejemo od reference, ki jo pošljemo v regulator. To varuje žarjenec pred prehitrim gretjem, drži nižjo temperaturo zraka in zmanjša preseganje reference. Simulacija, ki vključuje omejitev, je prikazana na sliki 4.29, kjer je presežek vidno nižji. Čas rasti je sicer višji, a zaradi najvišje hitrosti rasti v dejanskih delovnih ciklih to ni težava. S temi parametri je treba izvesti še simulacijo delovnega cikla in pogledati, ali so vse vrednosti v mejah tolerance. Na sliki 4.30 je prikazana simulacija delovnega cikla, pri kateri se referenca povzpne do  $1050$  °C s hitrostjo  $50$  °C/h, drži to temperaturo  $10$  ur, nato pa se s hitrostjo  $50$  °C/h spušča do  $200$  °C.

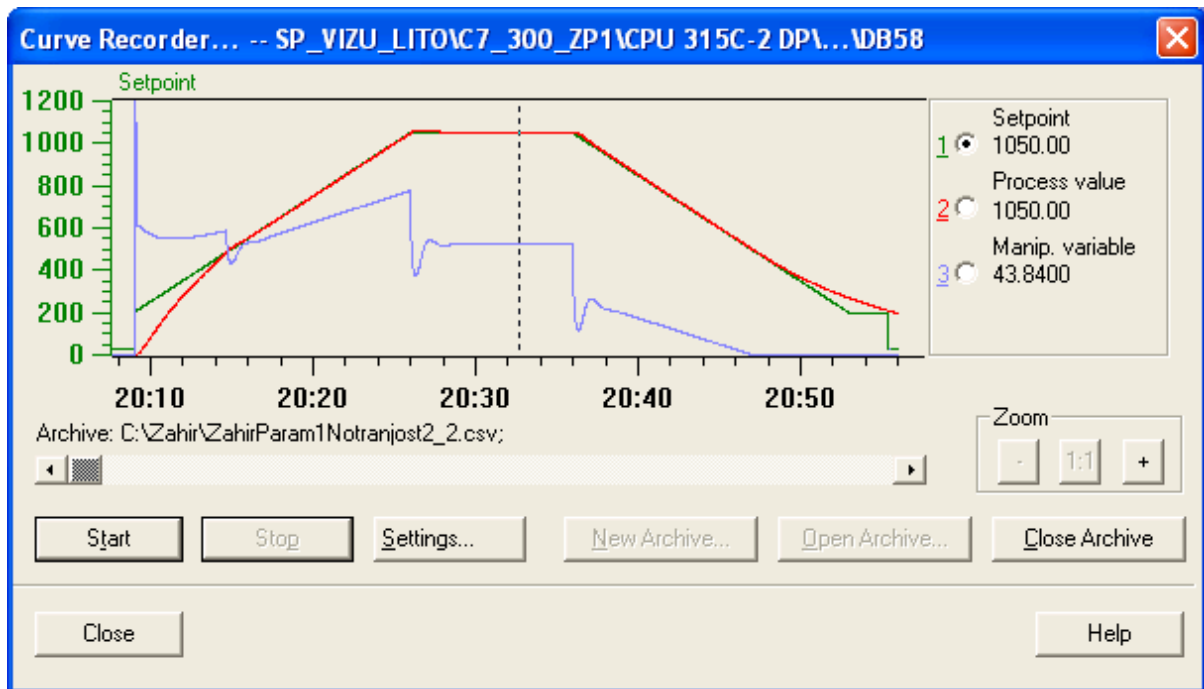


Slika 4.29. Regulacija PID z omejitvijo na 250 °C razlike med temperaturo zraka in temperaturo žarjenca



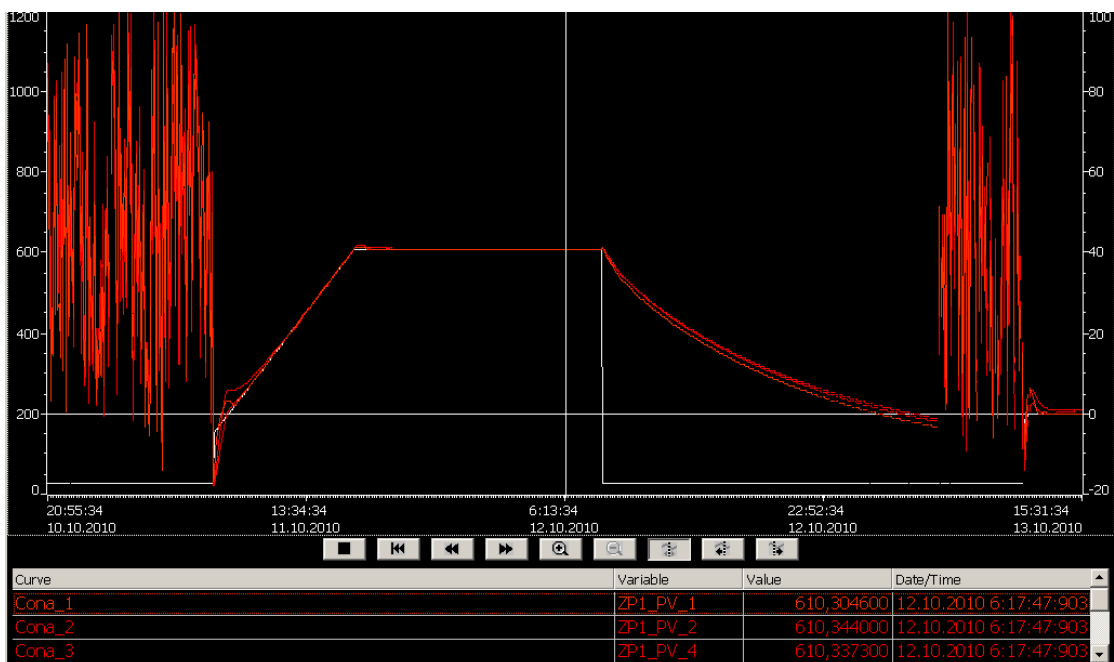
Slika 4.30. Regulacija delovnega cikla s parametri Zieglerja in Nicholsa in omejitvijo razlike temperatur

Čeprav simulacija kaže, da bi ti parametri verjetno delovali dovolj dobro takšni, kot so, smo z dodatnimi simulacijami iskali rešitev za preseganje reference po koncu rasti. Višji  $K_P$  in  $T_I$  povečata odzivnost na trenutno napako na račun tega, da se rahlo poveča napaka v fazi rasti, a ker je napaka v fazi rasti že tako večinoma v območju 1 °C, si to lahko privoščimo. S parametri  $K_P = 1,5$ ,  $T_I = 2$  h,  $T_D = 15$  min in  $T_{D1} = 3$  min smo ponovili simulacijo, rezultat pa je na sliki 4.31.



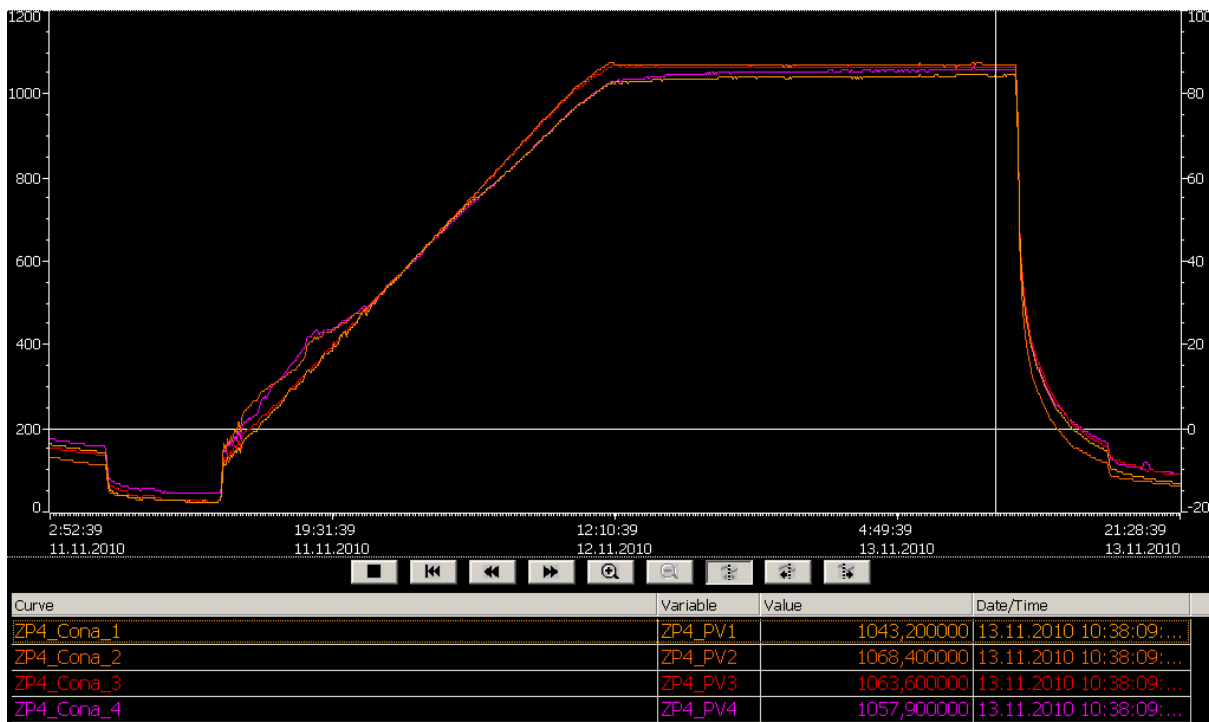
Slika 4.31. Regulacija s popravljenimi parametri PID in omejitvijo razlike temperatur

Te vrednosti smo nato testirali v funkcijskem modulu FM 355 S v dejanski peči. Ker so simulacije izvajane zgolj na modelu, je bilo potrebno še nekaj sprememb, vseeno pa smo za nastavitve porabili veliko manj časa, kot če bi vse teste izvajali v peči. Izkazalo se je, da ima peč nižjo kritično periodo, in sicer 1 uro, zato so vrednosti realne peči nastavljene na  $K_P = 1,5$ ,  $T_I = 30$  min,  $T_D = 500$  s in  $T_{D1} = 150$  s. Na sliki 4.32 je prikazan delovni cikel, ki se je izvedel v žarilni peči.



Slika 4.32. Delovni cikel, izveden v žarilni peči, z modificiranimi parametri PID

Z rezultati dela smo zelo zadovoljni. Razlika med regulirano količino in referenco v večini primerov ne preseže 1 °C, kar je zelo dobro. Za primerjavo ponujamo sliko 4.33, na kateri je prikazano delovanje druge žarilne peči. Regulator za to peč je dve leti starejši od regulatorja za ŽP1, naredilo pa ga je podjetje iz Italije. Peč ima sicer eno cono več, ampak je vseeno dovolj podobna za primerjavo. Točka prikazanih vrednosti na dnu slike je na koncu delovnega cikla, kar je najbolj ugodno mesto za regulator, saj je imel največ časa za regulacijo. Vidimo, da je razlika med prvo in drugo cono kar 25 °C. Tudi če je referenca točno med njima, je napaka še vedno 12 °C, medtem ko je v podobni točki na sliki 4.32 razlika med referenco in regulirano količino 0,3 °C.



Slika 4.33. Delovni cikel žarilne peči ŽP4

## 5. Zaključek

V diplomskem delu je predstavljen projekt prenove krmilja žarilne peči. Žarilna peč in njene funkcije so v delu natančno opisane. Za pravilno obdelavo materialov je nujno, da temperatura žarjenca sledi podanemu žarilnemu programu. Gre za zaprtozančni proces, ki ga je treba pravilno regulirati. Poglavitni razlog za prenovo je zastarelost prejšnjega krmilja, ki je vsebovalo analogni proporcionalno-integrirno-diferencialni regulator ali regulator PID in elektroniko za izvajanje krmilnega programa.

Analogni regulator PID je zamenjal digitalni v obliki funkcijskega modula Siemens FM 355 S, spremljajočo elektroniko je zamenjal program, ki se izvaja na programirljivem logičnem krmilniku (PLK). Zahteve programa se preko elementov krmilne omare prenašajo na končne izvršne člene peči.

Krmilni program, ki teče na programirljivem logičnem krmilniku, omogoča uporabniku upravljanje peči in omejuje delovanje takrat, ko je to nujno potrebno za varno delovanje. Program je narejen v razvojnem okolju Step 7, ki je osnovno orodje za programiranje proizvodov za avtomatizacijo SIMATIC. V diplomskem delu so prikazani osnovna načina programiranja, lestvični diagrami in liste ukazov. Opisana je struktura programa s posebnim poudarkom na funkciji regulacije temperature, ki izvaja komunikacijo krmilnega programa s funkcijskim modulom FM 355 S. Funkcijski modul FM355 S nato z modulacijo širine pulza in prilagojeno teoretično enačbo regulatorja PID dejansko regulira peč. Opisani so tudi varnostni elementi, ki skrbijo za varnost opreme in delno preprečujejo nepravilno delovanje peči ter s tem zaščitijo peč, uporabnike in okolico pred nezaželenimi pojavi.

Za kar najbolj enostavno vodenje peči je bilo treba razviti tudi uporabniški vmesnik, s katerim operater upravlja peč. Uporabniški vmesnik je izveden na zaslonu na dotik in omogoča enostavno uporabo tudi nekvalificiranim delavcem. Uporabnikom prikazuje delovanje vseh elementov peči, kar poenostavi vzdrževanje in odpravo morebitnih napak na opremi, ter jim omogoča osnovno krmiljenje peči in dinamično programiranje delovnih ciklov.

Pri zaprtozančnem vodenju procesa je pomembno skrbeti za stabilnost sistema. To pri regulatorju PID dosežemo z ustrezno nastavitvijo parametrov P, I in D. Postavitev osnovnih parametrov PID je zahtevala izdelavo modela peči. Ta model je moral imeti določeno zakasnitev in upoštevati podatke dejanske peči, zato sta bili izbira pravilnega modela in dobra postavitev parametrov ključni za relativno dobro določanje parametrov. Model sam sicer ni kompleksen, njegova izdelava pa je vzela kar nekaj časa. Da bi preprečili nepotrebno pregrevanje peči, je bila regulatorju dodana omejitev največje razlike med temperaturo zraka in temperaturo žarjenca.

Projekt je bil uspešno izveden. Odstopanja regulatorjev so zelo majhna, v večini primerov napaka regulatorja ne preseže 1 °C. Dodali bi, da bi se kljub dobri rezultati dalo narediti še kaj za zmanjšanje preseganja reference ob preklopih delovanja med rastjo in držanjem, saj je program gretja znan vnaprej.

Podjetje izvaja najbolj kritične programe žarjenja na tej žarilni peči in jo uporablja kot prikaz svojih zmožnosti. Testiranja žarjencev po končanem žarjenju pokažejo visoko kakovost izdelkov in do sedaj se ni zgodilo, da bi morali kakšen delovni cikel ponoviti. Zaradi prenove krmilnega sistema se je tudi občutno zmanjšala poraba zemeljskega plina, tako neposredno zaradi boljše regulacije kot tudi posredno, saj se zaradi izboljšane zanesljivosti več ne dogaja, da bi morali delovne cikle ponavljati. To je pomembno tako z gospodarskega in tudi z ekološkega vidika.

## 6. Seznam slik

Slika 2.1. Shema sistema z notranjo strukturo [1] .....	5
Slika 2.2. Poenostavljena shema sistema [1] .....	6
Slika 2.3. Ločitev procesa vodenja od osnovnega procesa [1] .....	7
Slika 2.4. Odprtozančno vodenje [1] .....	8
Slika 2.5. Odprtozančno vodenje z izravnavanjem motnje [1] .....	8
Slika 2.6. Zaprtozančno vodenje [1] .....	9
Slika 2.7. Univerzalni mehanizem procesa vodenja [1] .....	9
Slika 2.8. Bločna shema regulacijskega sistema [1] .....	11
Slika 2.9. Poenostavljena shema regulacijskega sistema [1] .....	12
Slika 2.10. Tipična poteka referenčne in regulirane količine pri sledilni regulaciji [1] .....	12
Slika 2.11. Odziv regulirane količine na motnjo v regulacijskem sistemu [1] .....	13
Slika 2.12. Potek nivoja pri stopničasti spremembi reference .....	15
Slika 2.13. Bločna shema regulacijskega sistema z diskretno izvedenim regulacijskim algoritmom [1] .....	15
Slika 3.1. Žarilna peč ŽP1 .....	18
Slika 3.2. Tloris žarilne peči ŽP1 .....	19
Slika 3.3. Sprednja stran regulatorjev Hartmann & Braun in njihov programator .....	19
Slika 3.4. Zadnja stran programatorja Hartman & Braun .....	20
Slika 4.1. IFS 258 in njegova vezava pri uporabi ionskega toka .....	23
Slika 4.2. Regulator lopute za izpušne pline .....	23
Slika 4.3. FM 355 S (modul 6), analogni vhodi (modul 7), digitalni vhodi (moduli od 8 do 10), digitalni izhodi (modul 11), napajalnik (skrajno desno) .....	24
Slika 4.4. Varnostni elementi krmilne omare .....	25
Slika 4.5. Sprednja stran C7 CPU 636 Touch [4] .....	26
Slika 4.6. Shema zaslona C7[4] .....	26
Slika 4.7. Priklop dodatnih modulov preko razširitvenega kabla [4] .....	27
Slika 4.8. Zvezni in diskretni odziv krmilnika FM 355 [6] .....	28
Slika 4.9. Relacija med ukazom krmilnika in trajanjem pulza .....	29
Slika 4.10. Odziv idealnega algoritma PID in algoritma PID funkcijskega modula FM 355 na skok napake .....	29
Slika 4.11. Shema varnostnih elementov krmilne omare .....	31
Slika 4.12. Primer programa v lestvičnem diagramu .....	33
Slika 4.13. Primer programa v listi ukazov .....	33
Slika 4.14. Podatki o temperaturah termoelementov med delovanjem peči .....	35
Slika 4.15. Tipalo pritiska žarilne peči .....	36
Slika 4.16. Prvi del klica funkcijskega bloka FB 31 .....	37
Slika 4.17. Osnovno okno za nastavljanje funkcijskega modula FM 355 S .....	38
Slika 4.18. Izbira nastavitve vhodnega signala .....	39
Slika 4.19. Delovanje funkcije rampe .....	40
Slika 4.20. Nastavitve signala napake in signala motnje .....	40
Slika 4.21. Izbira vrste regulatorja in nastavitve parametrov PID .....	41

Slika 4.22. Nastavitve izhoda funkcijskega modula.....	42
Slika 4.23. Prva slika uporabniškega vmesnika za žarilno peč ŽP1.....	43
Slika 4.24. Slika z grafom delovanja žarilne peči ŽP1.....	44
Slika 4.25. Slika z univerzalnim programom .....	44
Slika 4.26. Ideja za model žarilne peči.....	46
Slika 4.27. Nedušeno nihanje izhoda regulatorja P .....	47
Slika 4.28. Regulacija PID s parametri Zieglerja in Nicholosa.....	48
Slika 4.29. Regulacija PID z omejitvijo na 250 °C razlike med temperaturo zraka in temperaturo žarjenca.....	49
Slika 4.30. Regulacija delovnega cikla s parametri Zieglerja in Nicholosa in omejitvijo razlike temperatur.....	49
Slika 4.31. Regulacija s popravljenimi parametri PID in omejitvijo razlike temperatur .....	50
Slika 4.32. Delovni cikel, izveden v žarilni peči, z modificiranimi parametri PID .....	50
Slika 4.33. Delovni cikel žarilne peči ŽP4 .....	51

## 7. Reference

- [1] S. Strmčnik, *Celostni pristop k računalniškemu vodenju procesov*. Ljubljana: Fakulteta za elektrotehniko, 1998.
- [2] Varun Aggarwal, Meng Mao, and Una-May O'Reilly, "A Self-Tuning Analog Proportional-Integral-Derivative (PID) Controller," in *NASA/ESA Conference on Adaptive Hardware and Systems*, 2006.
- [3] Building Automation Products, Inc. (2006, Oktober) BAPI Building Automation Products, Inc. [Online]. [http://www.bapihvac.com/content/uploads/2010/07/Understanding-4-20-mA-Current\\_Loops.pdf](http://www.bapihvac.com/content/uploads/2010/07/Understanding-4-20-mA-Current_Loops.pdf)
- [4] Siemens, *Device Manual C7-636 Control System*. Nurnberg, Nemčija: Siemens AG, December 2006.
- [5] PROFIBUS & PROFINET International, *PROFIBUS System Description - Technology and Application*. Karlsruhe, Nemčija: PROFIBUS Nutzerorganisation e.V. (PNO), 2010.
- [6] Siemens, *FM 355 closed-loop control module, Operating Instructions*. Nurnberg, Nemčija: Siemens AG, Februar 2006.
- [7] Biodata Ltd. (2006) Analogue-to-Digital Converters (ADC, A/D, atod). [Online]. <http://www.microlink.co.uk/a-d.html>
- [8] National Physical Laboratory. (2007, Oktober) National Physical Laboratory. [Online]. [http://www.npl.co.uk/engineering-measurements/thermal/temperature/faqs/what-is-a-platinum-resistance-thermometer-\(faq-thermal\)](http://www.npl.co.uk/engineering-measurements/thermal/temperature/faqs/what-is-a-platinum-resistance-thermometer-(faq-thermal))
- [9] Prof. John H. Lienhard IV and Prof. John H. Lienhard V, *A Heat Transfer Textbook*, 4th ed. Cambridge, Massachusetts, ZDA: Phlogiston Press, 2011.