

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 742

**ZATVORENI SUSTAV UPRAVLJANJA
KONTINUIRANIM VELIČINAMA U PROCESU
PRANJA POSTROJENJA MLJEKARE**

Nikola Božić

Zagreb, srpanj 2013.

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Opis sustava.....	3
3. Identifikacija sustava	6
4. Sinteza regulatora	12
4.1. Glavni regulator (PI)	12
4.2. Kompenzator	15
5. Implementacija regulatora u stvarni sustav.....	21
5.1. Opis upravljačkog sustava	21
5.2. Implementacija regulatora u PLC.....	25
5.3. Odzivi implementiranih regulatora	29
Zaključak	36
Literatura	37
Sažetak	38

1. Uvod

U ovom radu razmatra se zatvoreni sustav upravljanja procesom pranja postrojenja mljekare, s posebnim naglaskom na tehničke zahtjeve na regulacijske krugove kontinuiranih veličina u procesu. Proces pranja postrojenja koji se razmatra spada u skupinu pranja „čišćenje na licu mjesta“, skraćenog naziva CIP.

CIP ("Clean-in-Place") je metoda za čišćenje unutarnjih površina cijevi, ventila, procesne opreme, filtara i vezane opreme, bez rastavljanja. Ona se koristi od davnih 50-ih godina i neprestano se pokušava unaprijediti njena učinkovitost, kako mehaničkim, tako i elektroničkim dostignućima i razvojem.

Neka se oprema može čistiti samo na mjestu gdje je postavljena, a ne može se rastaviti ni odvesti, dok proizvodni postupak zahtijeva redovno čišćenje i dezinfekciju. CIP postupci su stoga temeljni dio svekolikog higijenskog režima u pogonima za proizvodnju hrane i pića. CIP je vjerojatno jedan od najuobičajenijih automatiziranih postupaka čišćenja. No, sve veći troškovi vode i energije, praćeni sve zahtjevnijom dinamikom proizvodnje, potaknuli su potrebu za preispitivanjem djelotvornosti ovog postupka. Sve više korisnika traži pristupe koji smanjuju potrošnju energije, vode i deterdženata i na minimum svode prekide proizvodnje, uz maksimiranje produktivnosti pogona.

S obzirom na opće stanje u državi i svijetu, trend smanjenja utroška energije i resursa je postao pogotovo važan, ali ne samo zbog ekonomskih, već i zbog ekoloških razloga. Ekološki razlozi postaju sve važniji, zbog sve većih cijena ispuštanja otpadnih voda, a i same prirode, odnosno okoliša. Stoga je i kod CIP-a naročito bitna učinkovitost i efikasnost koje moraju biti uzete u obzir kod projektiranja upravljačkog sustava.

U prvom dijelu rada opisan je sustav kojim se upravlja, gdje su navedeni svi njegovi dijelovi kao i upravljačke i mjerene veličine. Nakon toga se provodi postupak identifikacije sustava kako bi se dobio matematički model sustava. Na temelju matematičkog modela sustava određena je vrsta regulacije kojom će se upravljati sustavom. Zatim se provodi sinteza regulatora na temelju matematičkog modela sustava, kao i simulacija sustava sa dobivenim parametrima regulatora u

Matlabu. Na kraju je provedena implementacija regulatora na stvarni sustav (PLC), te validacija dobivenih rezultata regulacije.

Cilj ovog rada je postići zadovoljavajuće (optimalno) ponašanje sustava uz pomoć regulacije glede učinkovitosti i efikasnosti, a da to bude u skladu sa tehničkim (fizikalnim) ograničenjima samog sustava. Kako Hrvatska uskoro postaje članica Europske unije, gdje su norme i propisi daleko zahtjevniji i opsežniji nego u Republici Hrvatskoj učinkovitost i efikasnost će imati velik utjecaj na konkurentnost tvornica u prehrambenoj branši.

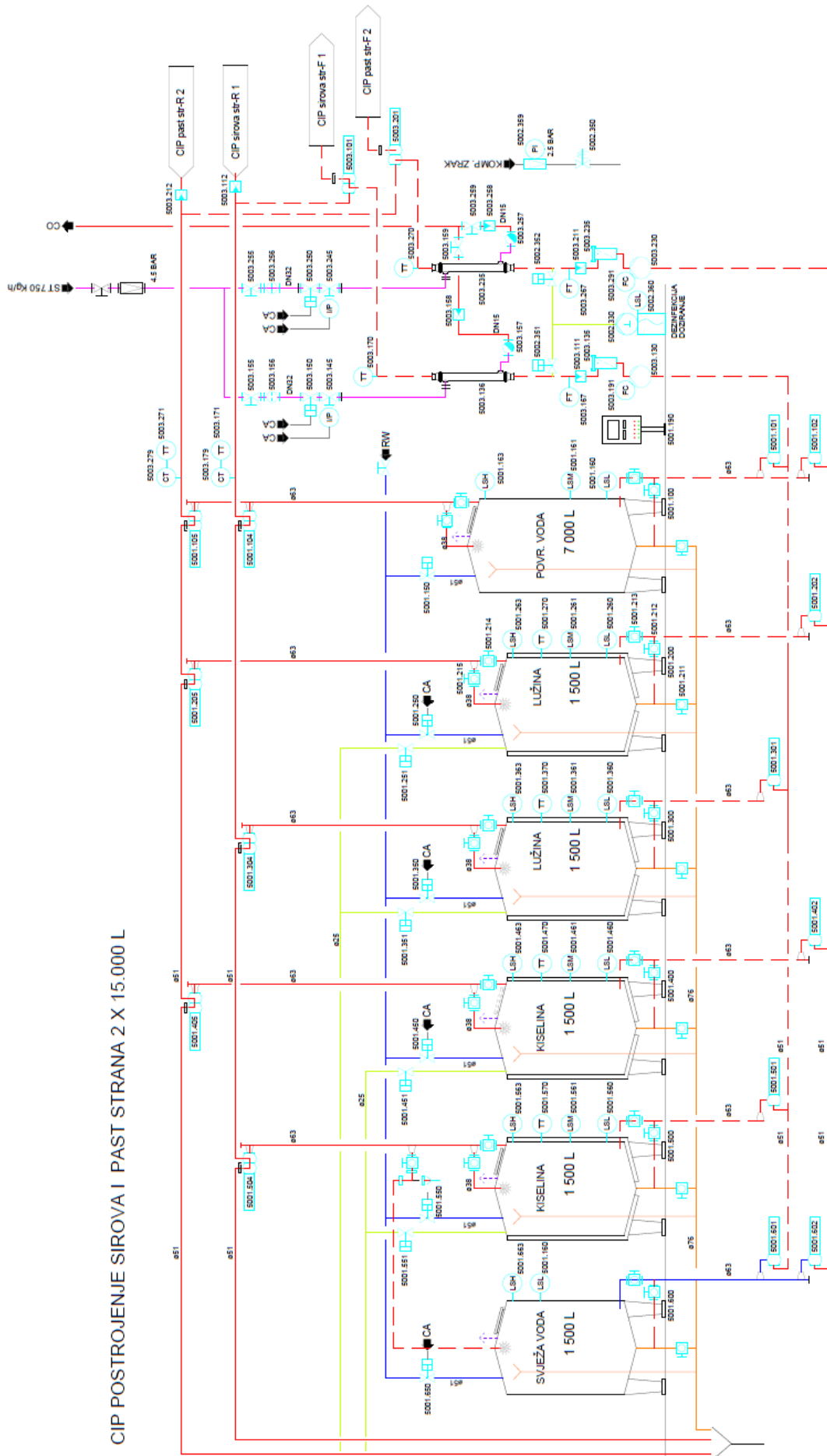


Slika 1.1. Postrojenje CIP-a

2. Opis sustava

Slika 2.1 prikazuje procesno-instrumentacijski (PI) dijagram cijelog postrojenja CIP-a. CIP postrojenje se sastoji od dvije fizički odvojene linije pranja: linija sirove strane i linija pasterizirane strane. Obje linije su identične stoga će se cijela analiza i sinteza provoditi samo za jednu, u ovom slučaju pasteriziranu stranu, što nije ni bitno sa stajališta upravljanja. Linija CIP-a se sastoji od tankova sa deterdžentima, pripadnim cjevovodom, automatskih ventila, centrifugalne pumpe sa frekventnim pretvaračem, senzora razine, mjerača temperature i provodljivosti, te regulacijskog ventila za paru i cijevnog grijača. Cijelim postrojenjem CIP-a se upravlja pomoću programirljivog logičkog kontrolera (PLC), na kojem je vezan operatorski panel (OP) za vizualizaciju upravljanja.

Sam postupak pranja, odnosno algoritam pranja nije toliko bitan za ovaj rad, pa će biti opisan samo ukratko. Kao što je već spomenuto, CIP postrojenje ima tankove s deterdžentima i to jedan s lužinom, jedan s kiselinom, na jednoj liniji, a isto vrijedi za drugu liniju. Tankovi sa svježom i povratnom vodom zajednički su za obje linije. Svaka linija ima više ruta pranja koje se mijenjaju fizičkim prespajanjem švenkova, ali i odabirom na OP panelu. Obje linije su vezane u krug, što znači da se nakon prolaska cijele rute pranja opet vraćaju u postrojenje CIP-a, gdje postoji mogućnost vraćanja tekućine natrag u neki od tankova ili bacanje u kanal. Tank za povratnu vodu služi za uštedu svježe vode, jer se u njega vraća voda korištena u pranju koja je još uvijek relativno čista i koristi se kod prvih ispiranja u programu pranja. Algoritam pranja osnovnog programa bi bio: povratna voda, lužina, svježa voda, kiselina, svježa voda, te po potrebi dezinfekcija na kraju. Grijanje samo radi kod pranja lužinom i kiselinom, tako da će regulacija grijanja raditi samo u tim fazama pranja. Postupak identifikacije sustava bit će proveden sa svježom vodom zbog konstantne polazne temperature tekućine, dok to nije slučaj kod pranja lužinom i kiselinom, gdje se deterdženti vraćaju nazad u tankove.



CIP POSTROJENJE SIROVA I PAST STRANA 2 X 15.000 L

Slika 2.1. PI dijagram postrojenja CIP-a

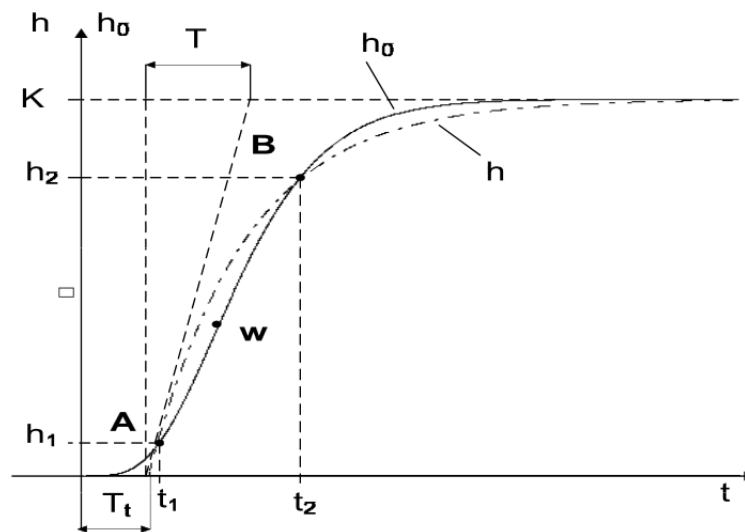
Dakle, sustav kojim treba upravljati sastoji se od sljedećih dijelova bitnih sa strane upravljanja: PLC, regulacijski ventil (aktuator), mjerac temperature (mjerni član), cijevni grijač (prijenosnik topline), pumpa (aktuator), mjerac protoka (mjerni član). Regulirane veličine su otvorenost regulacijskog ventila za paru koji služi za dobavu potrebne količine pare na cijevni grijač, te brzina pumpe. Mjerene veličine su temperatura tekućine u protoku nakon cijevnog grijača i protok koji mjeri mjerac protoka. Poremećajne veličine mogu biti razne, kao npr. promjena tlaka u dobavi pare, promjena protoka tekućine na liniji, promjena početne temperature tekućine u tanku, itd. Od svih poremećajnih veličina može se jedino direktno utjecati na protok, jer je on upravljan sa PLC-a. Regulacija protoka se ne smije koristiti kao predupravljanje za regulaciju temperature, jer protok mora biti konstantan za vrijeme pranja, s time da svaka ruta pranja ima unaprijed definiran protok pranja. Ali, informacija o trenutnom protoku se može koristiti u za predupravljanje u regulaciji temperature, tako da se uvede kompenzator u sustav koji na temelju promjene protoka od zadanog vrši predupravljanje na regulacijskom ventilu pare. Grijanje tekućine za pranje vrši se u protoku pomoću cijevnog grijača koji toplinu pare prenosi na vodu. Protok se regulira pomoću pumpe sa frekventnim pretvaračem na temelju mjerenja sa mjeraca protoka. Evidentno je da postoji sprega između dva regulacijska kruga. Sprega je jednostrana jer se reguliranjem protoka utječe na temperaturu tekućine u protoku, dok se reguliranjem temperature ne utječe na protok tekućine u cjevovodu.



Slika 2.2. Cijevni grijač koji se korišten u postrojenju

3. Identifikacija sustava

U ovom radu koristit će se eksperimentalno određivanje modela sustava, zato jer se radi o stvarnom sustavu koji ima mogućnost snimanja potrebnih odziva u realnom vremenu. Postoji više metoda identifikacije prijenosne funkcije iz prijelazne i težinske funkcije. Koristit će se metoda prema Strejcu koja spada u grafoanalitičke postupke identifikacije sustava. Strejcova metoda je vrlo praktična zbog svoje jednostavnosti i male osjetljivosti na šum, jer se ne određuje direktno točka infleksije, te je relativno dobre preciznosti kod identifikacije.



Slika 3.1. Metoda identifikacije prema Strejcu

Prema Strejcu na snimljenoj prijelaznoj funkciji $h_0(t)$ odrede se dvije točke: $A(h_1; t_1)$ i $B(h_2; t_2)$. Točke A i B se odaberu tako da je točka infleksije w između njih, zatim se kroz točke A i B ucrtava prijelazna funkcija $h(t)$ i izračunaju se T_t i T prema sljedećim izrazima:

$$h(t) = \begin{cases} 0 & , za \quad t < T_t \\ K(1 - e^{-\frac{t-T_t}{T}}) & , za \quad t \geq T_t \end{cases} \quad (3.1)$$

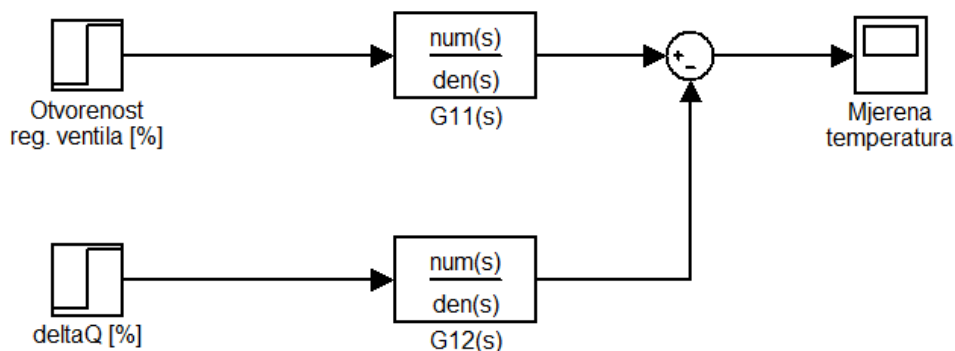
$$h_1 = K(1 - e^{-\frac{t_1-T_t}{T}}) \quad (3.2)$$

$$h_2 = K(1 - e^{-\frac{t_2-T_t}{T}})$$

$$T = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{K - h_1}{K - h_2}\right)}; \quad T_t = T \cdot \ln\left(1 - \frac{h_v}{K}\right) + t_v; \quad (3.3)$$

$v = 1 \quad \text{ili} \quad 2.$

Da bi se mogla provesti identifikacija po Strejcu potrebna je prijelazna funkcija sustava. S obzirom na dva regulacijska kruga u sustavu biti će potrebno identificirati dvije prijenosne funkcije sustava, prikazane na slici 3.2:

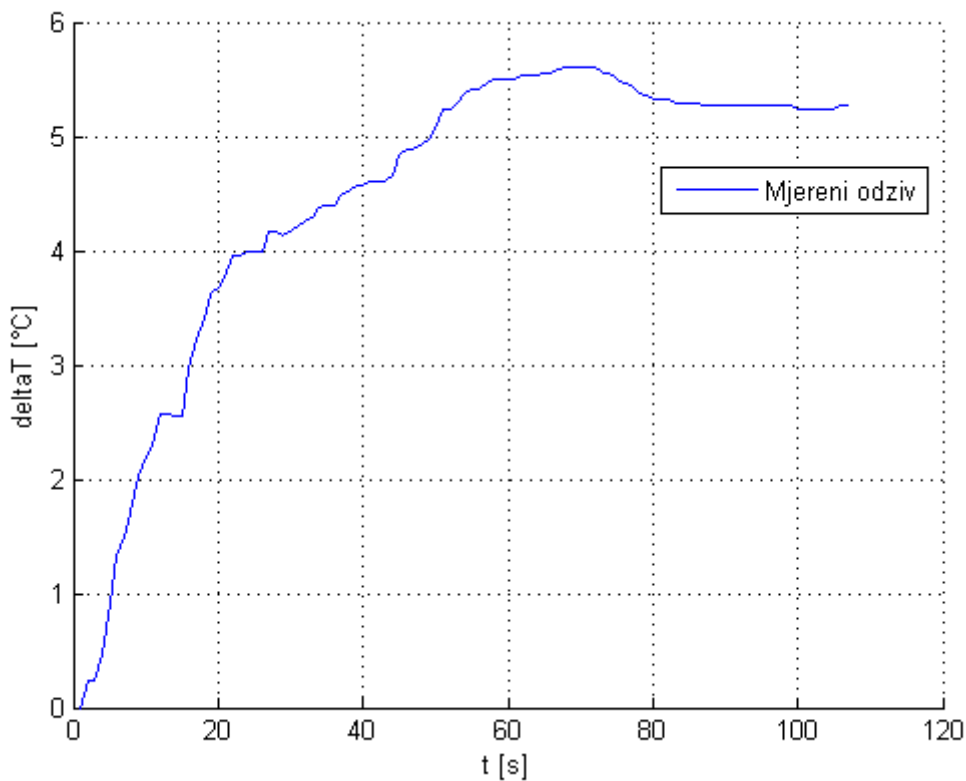


Slika 3.2. Prijenosne funkcije sustava

Prijenosna funkcija $G_{11}(s)$ je glavna prijenosna funkcija sustava koja predstavlja ovisnost promjene otvorenosti regulacijskog ventila i temperature tekućine nakon cijevnog grijača. $G_{12}(s)$ je rasprežna prijenosna funkcija koja pokazuje ovisnost promjene protoka tekućine na temperaturu tekućine nakon cijevnog grijača. Raspon otvorenosti regulacijskog ventila se kreće između 0 i 100%. Raspon promjene protoka tekućine se kreće od -100 do 100%, odnosno maksimalno od -10 000 l/h do +10 000 l/h od zadanog protoka, jer pumpa ima kapacitet 20 000 l/h. Mjerena temperatura je u rasponu od 0 do 100 °C.

Slijede snimljeni odzivi prijelaznih funkcija potrebnih za identifikaciju. Snimljeno je ukupno 18 prijelaznih funkcija, odnosno 2 puta po 9 prijelaznih funkcija za različite radne točke.

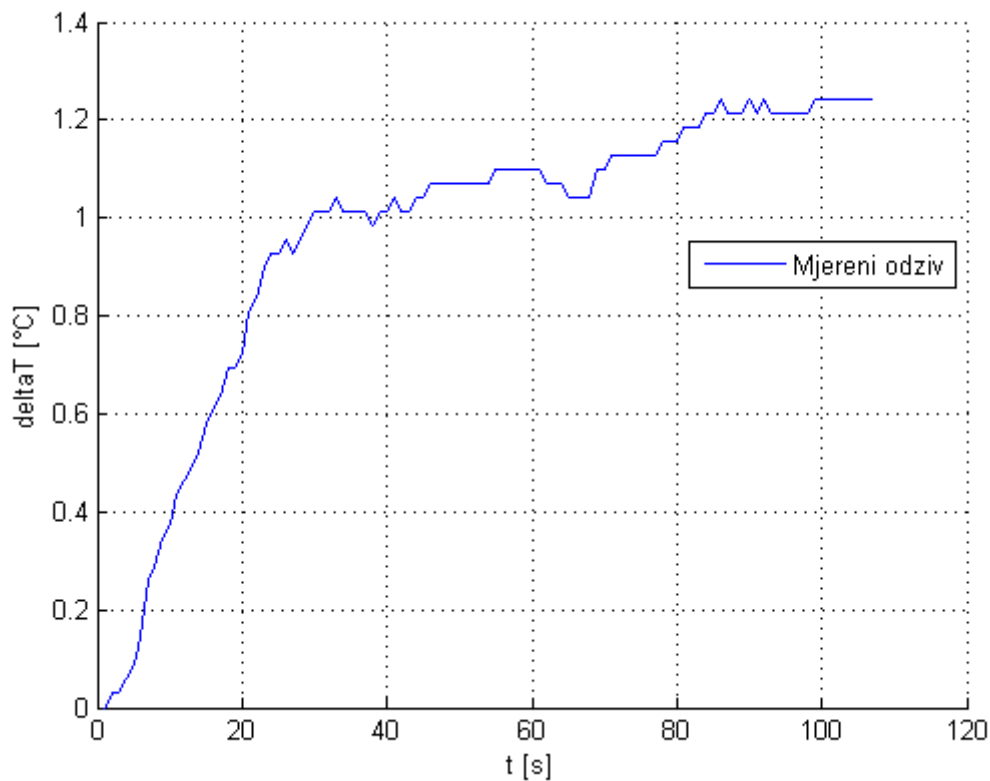
Na slici 3.3 prikazana je snimljena prijelazna funkcija koja predstavlja odziv temperature tekućine na skokovitu promjenu otvorenosti regulacijskog ventila.



Slika 3.3. Prijelazna funkcija promjene temperature (8 000l/h, 50% + 10%)

Snimljeno je 9 prijelaznih funkcija kao na slici 3.3 za 9 različitih radnih točaka, odnosno za 3 različita protoka: 8 000 l/h, 10 000 l/h i 14 000 l/h. Za svaki protok odabrane su tri otvorenosti regulacijskog ventila: 25%, 50% i 75%. Nakon stabilizacije temperature na nekoj radnoj točki, odnosno za određeni protok i otvorenost ventila simulirana je skokovita promjena otvorenosti ventila za +10%.

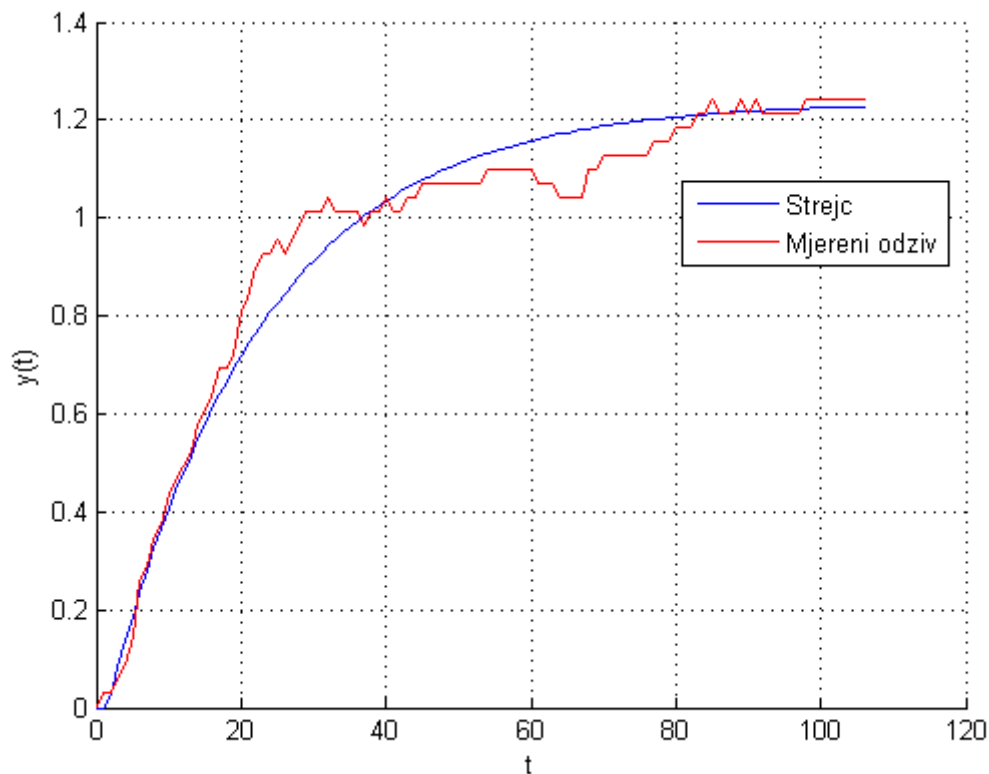
Na slici 3.4. prikazana je snimljena prijelazna funkcija koja predstavlja odziv temperature tekućine na promjenu protoka kroz cijevni grijač. Također je snimljeno 9 različitih prijelaznih funkcija za 9 različitih radnih točaka. Kod snimanja prijelaznih funkcija nakon ustaljenog stanja sustava skokovito je mijenjan protok tekućine za +1 000 l/h što predstavlja relativnu promjenu za +10%.



Slika 3.4. Prijelazna funkcija promjene temperature (14 000l/h + 1 000l/h, 75%)

Na temelju snimljenih prijelaznih funkcija promjene temperature provodi se postupak identifikacije sustava metodom po Strejcu. Za postupak identifikacije korištene su skripte korištene na laboratorijskim vježbama kolegija „Računalno upravljanje sustavima“. Ulazni podaci za skriptu su vrijeme, pobuda i prijelazna funkcija. Skripta vraća dobiveni model sustava, odnosno njegovu prijenosnu funkciju. Za vrijeme identifikacije potrebno je odabrati dvije točke na prijelaznoj funkciji, jednu lijevo, a drugu desno od točke infleksije, tako da preciznost određivanja modela također ovisi i o preciznosti određivanja tih dviju točaka.

Na slici 3.5 prikazan je usporedni odziv mjerenog odziva sustava, te modela sustava dobivenog identifikacijom na skokovitu pobudu. Iz usporednog odziva se vidi da metoda po Strejcu daje vjerni model sustava. Također se vidi da će prijenosna funkcija biti oblika PT1 člana, sa malim mrtvim vremenom, te relativno spore dinamike, odnosno velike vremenske konstante.



Slika 3.5. Usporedni odziv mjerenja i identificiranog modela

Slijede prijenosne funkcije dobivene identifikacijom sustava. Tablica 3.1 prikazuje prijenosne funkcije ovisnosti temperature tekućine u ovisnosti o otvorenosti regulacijskog ventila $G_{11}(s)$, za 9 različitih radnih točaka:

Otvorenost ventila [%] Protok [l/h]	25%	50%	75%
14 000l/h	$e^{-1.23s} \cdot \frac{0.128}{15.69s + 1}$	$e^{-1.04s} \cdot \frac{0.357}{16.54s + 1}$	$e^{-0.264s} \cdot \frac{0.5459}{14.4s + 1}$
10 000l/h	$e^{-1.35s} \cdot \frac{0.2059}{20.38s + 1}$	$e^{-1.15s} \cdot \frac{0.2406}{15.62s + 1}$	$e^{-0.55s} \cdot \frac{0.5606}{17.57s + 1}$
8 000l/h	$e^{-1.15s} \cdot \frac{0.298}{19.56s + 1}$	$e^{-0.308s} \cdot \frac{0.5252}{17.17s + 1}$	$e^{-0.61s} \cdot \frac{1.167}{20.74s + 1}$

Tablica 3.1. Prijenosne funkcije promjene temperature po otvorenosti reg. ventila

U svakoj radnoj točki simulirana je skokovita promjena za +10% otvorenosti regulacijskog ventila od radne točke.

Tablica 3.2 prikazuje prijenosne funkcije ovisnosti temperature tekućine o promjeni protoka tekućine $G_{12}(s)$, za 9 različitih radnih točaka:

Otvorenost ventila [%] Protok [l/h]	25%	50%	75%
14 000l/h	$e^{-0.135s} \cdot \frac{0.0492}{19.94s + 1}$	$e^{-1.71s} \cdot \frac{0.2358}{31.94s + 1}$	$e^{-0.166s} \cdot \frac{0.2513}{22.25s + 1}$
10 000l/h	$e^{-0.252s} \cdot \frac{0.1491}{22.64s + 1}$	$e^{-0.57s} \cdot \frac{0.2044}{22.64s + 1}$	$e^{-0.68s} \cdot \frac{0.427}{20.57s + 1}$
8 000l/h	$e^{-0.628s} \cdot \frac{0.1247}{23.52s + 1}$	$e^{-0.114s} \cdot \frac{0.2112}{21.808s + 1}$	$e^{-1.24s} \cdot \frac{0.6703}{24.26s + 1}$

Tablica 3.2. Prijenosne funkcije promjene temperature po promjeni protoka

Kao što se vidi na odzivima, sve prijenosne funkcije su PT1 članovi, sa praktički zanemarivim mrtvim vremenom zbog spore dinamike procesa. Sve prijenosne funkcije se međusobno razlikuju po vremenskim konstantama, te nešto više po pojačanjima, što je bilo i za očekivati.

Ako se usporede prijenosne funkcije u tablicama 3.1 i 3.2 vidljivo je da nema velike razlike u vremenskim konstantama, dok su pojačanja otprilike duplo veća kod glavnih prijenosnih funkcija $G_{11}(s)$ nego kod rasprednih $G_{12}(s)$.

4. Sinteza regulatora

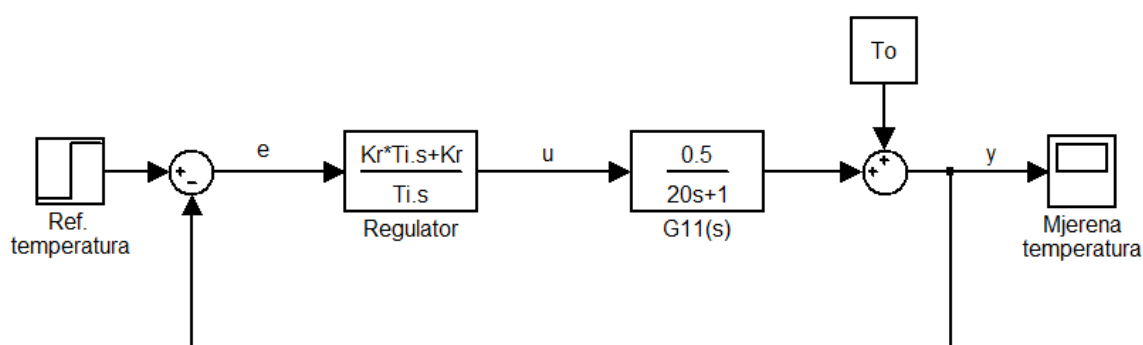
Na temelju identificiranih modela sustava (prijenosnih funkcija) moguće je pristupiti sintezi regulatora. Razmatraju se dva regulatora. Glavni regulator služiti će da osigura regulaciju željene temperature tekućine u zatvorenoj petlji, dok će drugi regulator služiti kao kompenzator, te će vršiti predupravljanje da iskompenzira smetnje u obliku promjene protoka.

4.1. Glavni regulator (PI)

Prvo se provodi sinteza glavnog regulatora. Kao glavna prijenosna funkcija $G_{11}(s)$ uzima se PT1 član sa otprilike srednjom vrijednosti pojačanja i vremenske konstante prema podacima iz tablice 3.1. Mrtvo vrijeme se zanemaruje jer je neznatno u odnosu na cjelokupnu dinamiku procesa. Prijenosna funkcija $G_{11}(s)$ prema tome glasi:

$$G_{11}(s) = \frac{0.5}{20s+1} \quad (4.1)$$

Slika 4.1 prikazuje zatvoreni krug upravljanja temperature sa glavnim regulatorom. U sustav je također dodana konstanta na izlazu mjerenja temperature zbog mogućnosti zadavanja početne temperature tekućine. Odabran je PI regulator radi zahtjeva na osiguravanje točnosti u stacionarnom stanju.



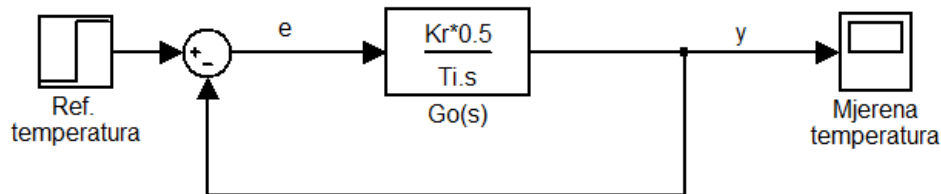
Slika 4.1. Zatvoreni sustav upravljanja sa glavnim regulatorom

gdje je:

Kr - Proporcionalno pojačanje regulatora

Ti – Integralna vremenska konstanta [s]

Integralna vremenska konstanta regulatora je odabrana tako da kompenzira dominantnu vremensku konstantu procesa. Kraćenjem dominantne vremenske konstante procesa dobiva se krug upravljanja samo sa integratorom kao što se vidi slici 4.2.



Slika 4.2. Zatvoreni sustav upravljanja sa glavnim regulatorom

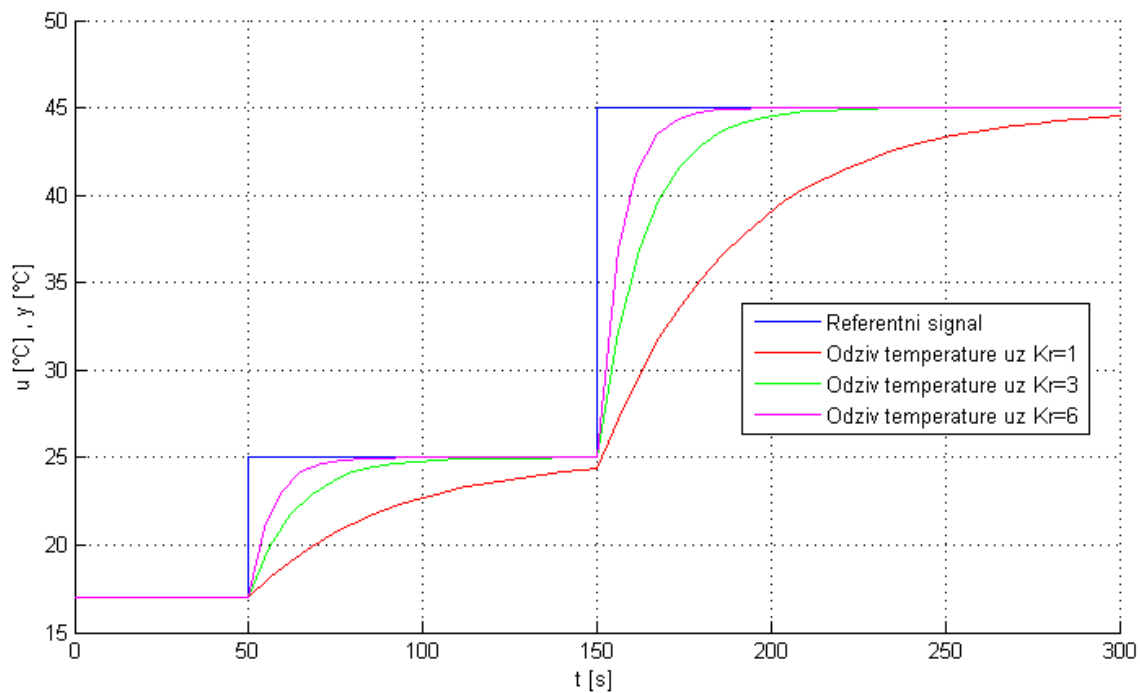
Ako se zatvori krug upravljanja po povratnoj vezi dobiva se prijenosna funkcija oblika PT1 član.

$$G_z(s) = \frac{1}{\frac{T_i}{K_r} s + 1} \quad (4.2)$$

Iz izraza 4.2 vidi se da da cijelu dinamiku sustava upravljanja određuje proporcionalno pojačanje regulatora K_r , jer je integralna vremenska konstanta T_i već odabrana. Sa pojačanjem K_r sada se određuje koliko brzo da se stabilizira sustav, ali pri tome treba pripaziti da to bude unutar tehničkih mogućnosti sustava, odnosno da upravljački signal ne izlazi izvan opsega 0-100%.

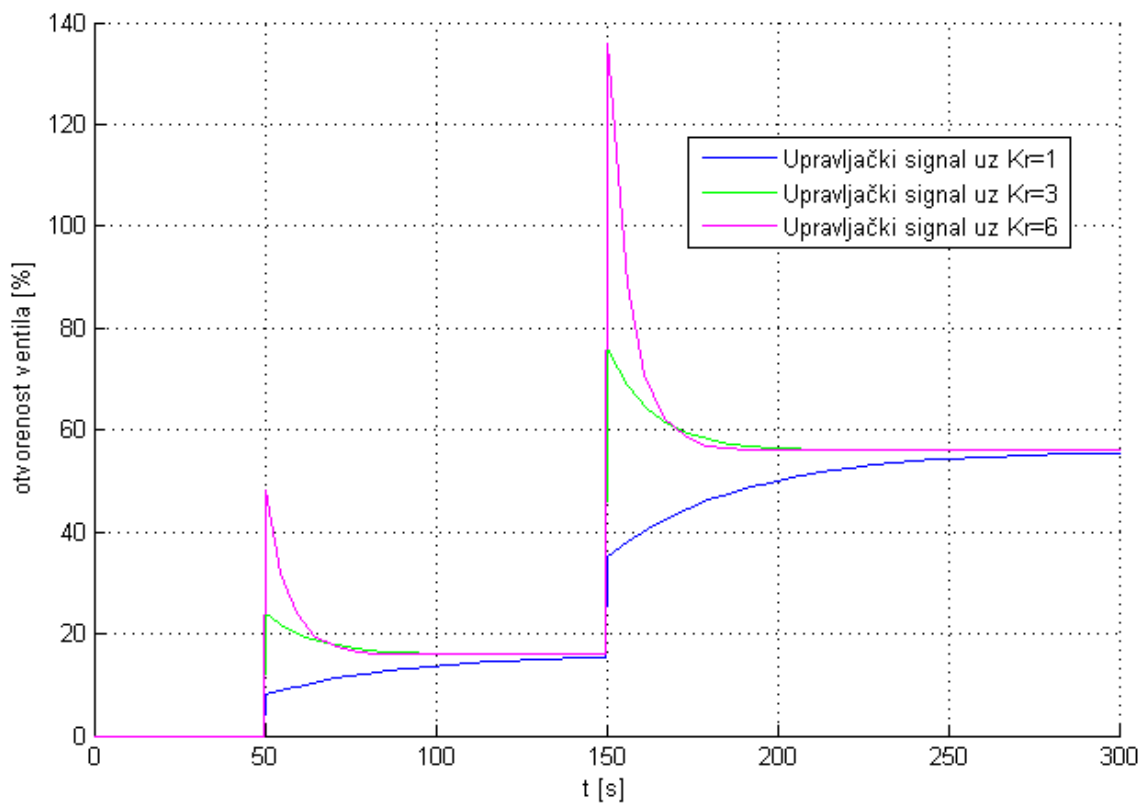
Na slici 4.3 prikazani su odzivi sustava uz različite vrijednosti proporcijalnog pojačanja regulatora. Kao što je prije spomenuto, odziv sustava ispada čisti PT1 član, pri čemu se brzina odziva podešava pojačanjem K_r . Za pojačanje $K_r = 1$ ispada da je sustav previše trom i ne postiže stacionarno stanje u adekvatnom vremenu, dok za veća pojačanja daje vidljivo bolje odzive.

Sa slike 4.4 može se uočiti da upravljački signal za pojačanje $K_r = 6$ izlazi iz dopuštenog područja rada, te djeluje prebrzo („preagresivno“) na aktuator što skraćuje njegov vijek, a može dovesti i do trajnih oštećenja. Također, najoptimalnije upravljanje s obzirom na veličinu upravljačkog signala se dobiva uz pojačanje $K_r = 3$.



Slika 4.3. Odziv temperature za različite parametre regulatora

Zaključno, iz dobivenih odziva odabire se optimalno pojačanje $K_r = 3$ koje će se koristiti u simulaciji i daljnjim razmatranjima.

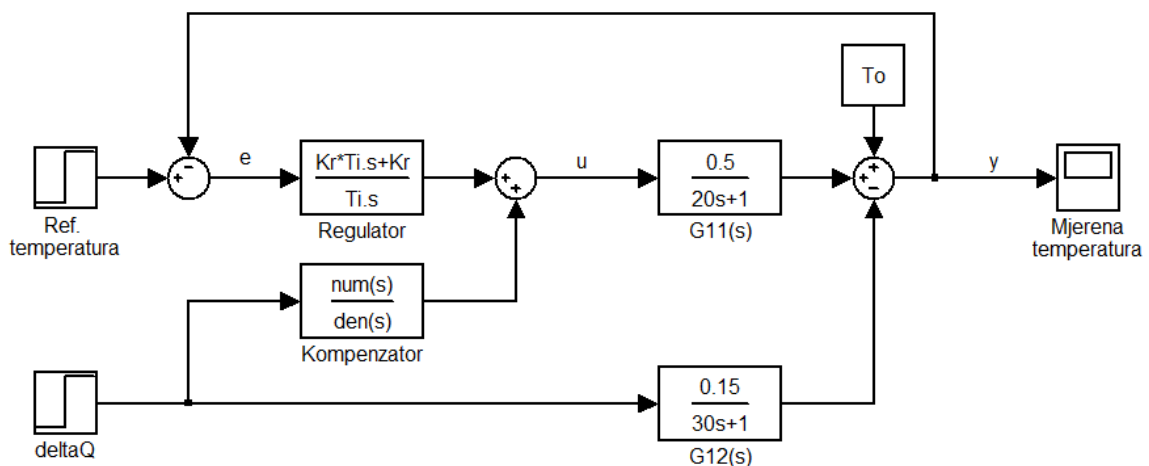


Slika 4.4. Izgled upravljačkog signala za različite parametre regulatora

4.2. Kompenzator

Nakon provedene sinteze glavnog regulatora provodi se sinteza kompenzatora koji služi za kompenziranje poremećaja uzrokovanih promjenom protoka. Isto kao i za glavnu prijenosnu funkciju $G_{11}(s)$, za rasprežnu prijenosnu funkciju $G_{12}(s)$ uzima se PT1 član sa srednjom vrijednošću vremenske konstante i pojačanja prema podacima iz tablice 3.2. Mrtvo vrijeme se zanemaruje, pa prema tome prijenosna funkcija $G_{12}(s)$ glasi:

$$G_{12}(s) = \frac{0.15}{25s + 1} \quad (4.3)$$



Slika 4.5. Zatvoreni sustav upravljanja sa regulatorom i kompenzatorom

Prijenosnu funkciju kompenzatora može se izvesti vrlo jednostavno iz slike 4.5. U slučaju da imamo idealni kompenzator, odnosno da promjena protoka uopće ne utječe na promjenu temperature tekućine mora vrijediti sljedeći izraz:

$$K(s) \cdot G_{11}(s) = G_{12}(s) \quad (4.4)$$

gdje $K(s)$ predstavlja prijenosnu funkciju kompenzatora.

Iz izraza 4.4 slijedi da za prijenosnu funkciju kompenzatora vrijedi:

$$K(s) = \frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad (4.5)$$

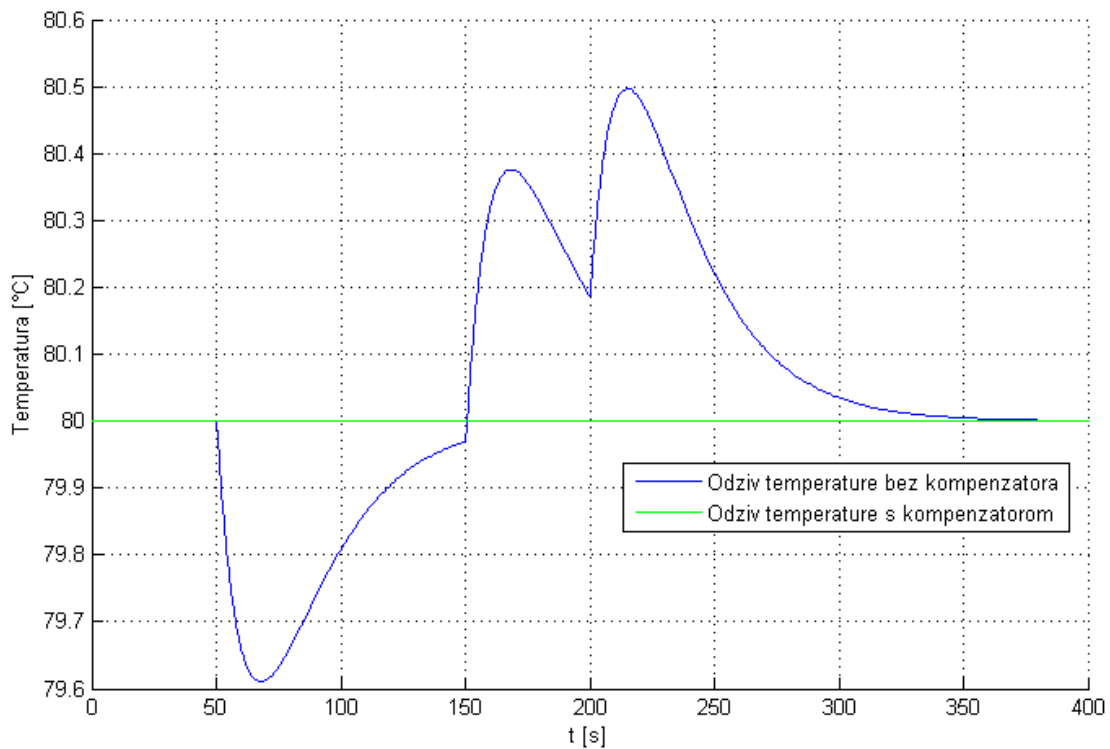
S obzirom da su glavna i rasprežna prijenosna funkcije oblika PT1 člana kompenzator će biti član s faznim kašnjenjem ili prethođenjem. Iz ovog se također

može zaključiti da točnost i efikasnost kompenzatora direktno ovisi o kvaliteti identifikacije prijenosnih funkcija $G_{11}(s)$ i $G_{12}(s)$. Uvrštavanjem stvarnih izraza za $G_{11}(s)$ i $G_{12}(s)$ prijenosna funkcija kompenzatora glasi:

$$K(s) = 0.3 \cdot \frac{20s + 1}{25s + 1} \quad (4.6)$$

gdje se vidi da je kompenzator korekcijski član s faznim kašnjenjem, tzv. „lag kompenzator“. Da je vremenska konstanta rasprežne prijenosne funkcije $G_{12}(s)$ veća od glavne prijenosne funkcije $G_{11}(s)$ kompenzator bi bio s faznim prethođenjem.

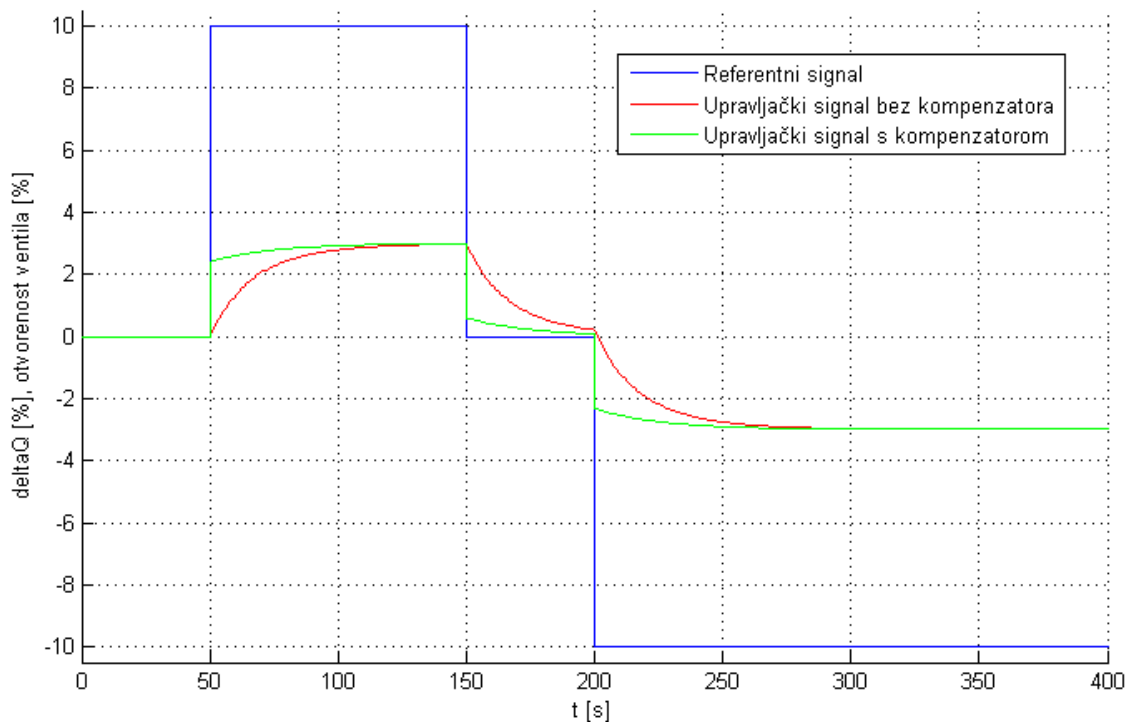
Slijede odzivi temperature s obzirom na poremećaj promjene protoka sa projektiranim kompenzatorom.



Slika 4.6. Odzivi temperature s obzirom na poremećaj protoka

Odziv sa temperature sa slike 4.6 potvrđuje idealnu kompenzaciju poremećaja uzrokovanog promjenom protoka tekućine što potvrđuje da vrijedi izraz 4.4 za idealni kompenzator. Kod oba odziva uključen je glavni PI regulator i vidi se da on bez kompenzatora ne može dovoljno dobro iskompenzirati poremećaj. Na slici 4.7 vidi se jasno djelovanje kompenzatora sa trenutačnim

skokom upravljačke veličine nakon djelovanja poremećaja, te spori porast nakon toga zbog faznog kašnjenja korekcijskog člana.

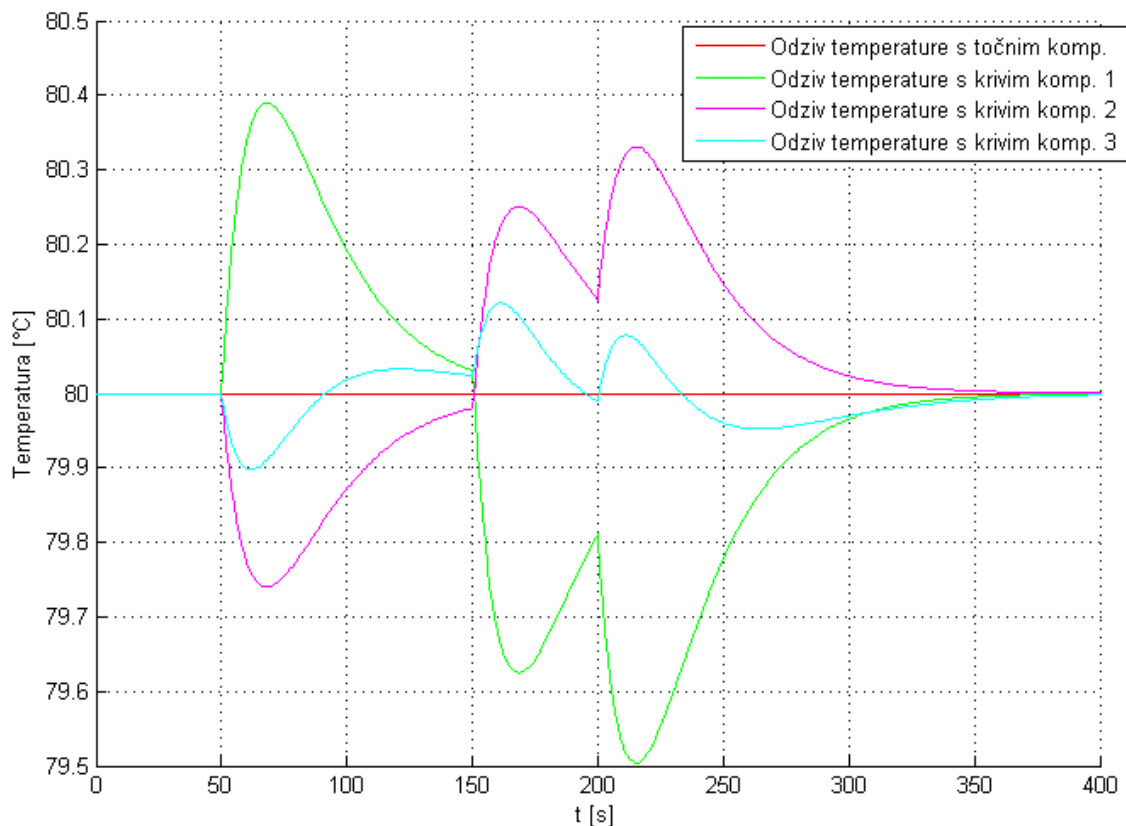


Slika 4.7. Izgled upravljačkog signala s obzirom na poremećaj protoka

Daljnjom analizom upravljačke veličine ustanovljeno je da kod slučaja s idealnim kompenzatorom cijeli iznos upravljačke veličine proizlazi iz korekcijskog člana, dok je iznos od glavnog regulatora jednak nuli. To je posljedica idealnog kompenzatora, jer on direktno slijedi dinamiku poremećaja. Međutim, to je u praksi nemoguće jer je nemoguće idealno identificirati sustav, odnosno prijenosne funkcije $G_{11}(s)$ i $G_{12}(s)$. Kada bi se i uspio idealno identificirati sustav, trebalo bi imati prijenosne funkcije za svaku radnu točku.

Na sljedećim odzivima prikazan je utjecaj pogreške identifikacije sustava na točnost kompenzatora. Prikazan je utjecaj krivog ukupnog pojačanja kompenzatora, te utjecaj krivih vremenskih konstanti. Na slici 4.8 se vidi da krivi izbor kompenzatora ima velik utjecaj na njegovu učinkovitost. Kod prvog odziva s krivim kompenzatorom podešeno je preveliko ukupno pojačanje, što ima za posljedicu da je odziv loš kao da uopće nema kompenzatora, kao onaj na slici 4.6. Kod drugog odziva s krivim kompenzatorom odabrano je premalo pojačanje, što je isto narušilo kvalitetu vladanja, ali ne u toj mjeri koliko preveliko pojačanje. Treći

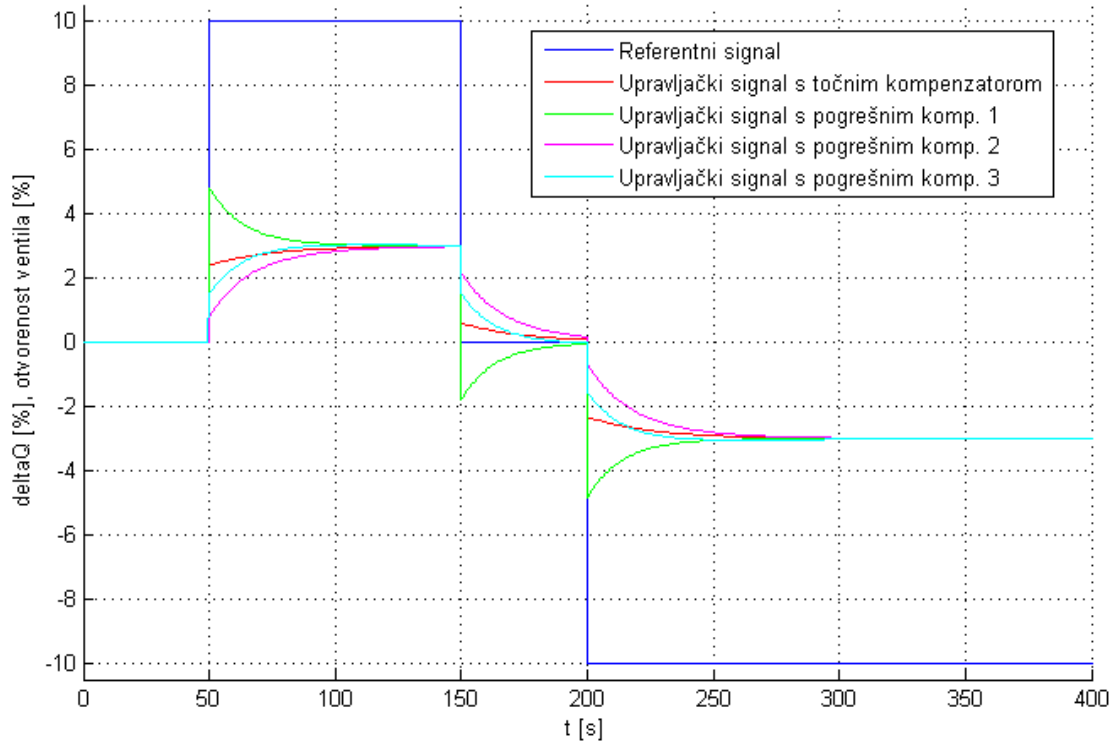
odziv, kod kojeg su odabrane krive vremenske konstante. najmanje odstupa od idealnog kompenzatora.



Slika 4.8. Mjerena temperatura sa krivim odabirom kompenzatora

Na slici 4.9 prikazani su upravljački signali uz krive parametre kompenzatora. Prva dva odziva su vrlo logična, jer za preveliko pojačanje imamo veći upravljački signal od potrebnog, dok za manje pojačanje obrnuto. Kod trećeg odziva se upravljački signal isprepliće sa idealnim, odnosno na nekim mjestima je manji pa postupno postaje veći od idealnog, što je posljedica da kompenzator ima drugačiju dinamiku od poremećaja na sustav.

Može se zaključiti da utjecaj točnosti identifikacije ima velikog utjecaja na samu sintezu regulatora, a time i na kvalitetu upravljanja sustavom, što se naročito odražava na kvalitetu kompenzatora. Kod projektiranja kompenzatora bolje je u početku odabrati premalo pojačanje pa ga postepeno povećavati, jer ako se odabere preveliko može dogoditi da sustav ima gore vladanje nego bez kompenzatora, dok se sa premalim pojačanjem ne može dobiti gore vladanje nego bez kompenzatora.



Slika 4.9. Izgled upravljačkog signala sa krivim odabirom kompenzatora

Sintezom regulatora dobiveni su dobri početni parametri za glavni regulator i kompenzator, koji će biti implementirani u stvarnome sustavu. Međutim, parametre će biti potrebno sigurno modificirati nakon testiranja na stvarnome sustavu. S obzirom da je sinteza glavnog regulatora rađena na temelju srednje vrijednosti svih prijenosnih funkcija iz tablice 3.1, moguća su odstupanja u parametrima regulatora za neke druge radne točke. Ali s obzirom da se vremenske konstante ne razlikuju bitno nije rađena analiza za pojedinu radnu točku. Pojačanja se nešto više razlikuju za pojedine radne točke što bi isto moglo imati za posljedicu u odstupanju u vladanju sustava, ali će se korekcija pojačanja provoditi na stvarnome sustavu eksperimentiranjem. Ako bude potrebno implementirat će se regulator sa promjenjivim pojačanjem ovisno o radnoj točki. Isto vrijedi i za parametre kompenzatora.

Dakle, konačni parametri regulatora koji će se koristiti kao početni parametri u implementaciji glase:

glavni regulator:

$$K_r = 3; \quad T_i = 20[s]; \quad (4.7)$$

kompenzator:

$$K(s) = 0.3 \cdot \frac{20s + 1}{25s + 1}; \quad (4.8)$$

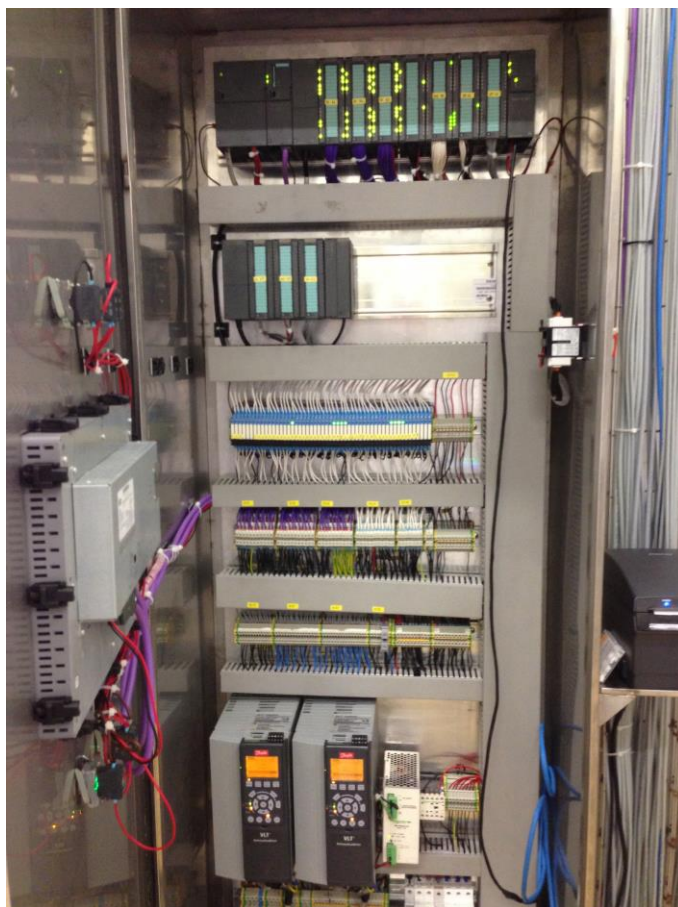
pri tome će pojačanje kompenzatora biti označeno kao $K_k = 0.3$.

5. Implementacija regulatora u stvarni sustav

5.1. Opis upravljačkog sustava

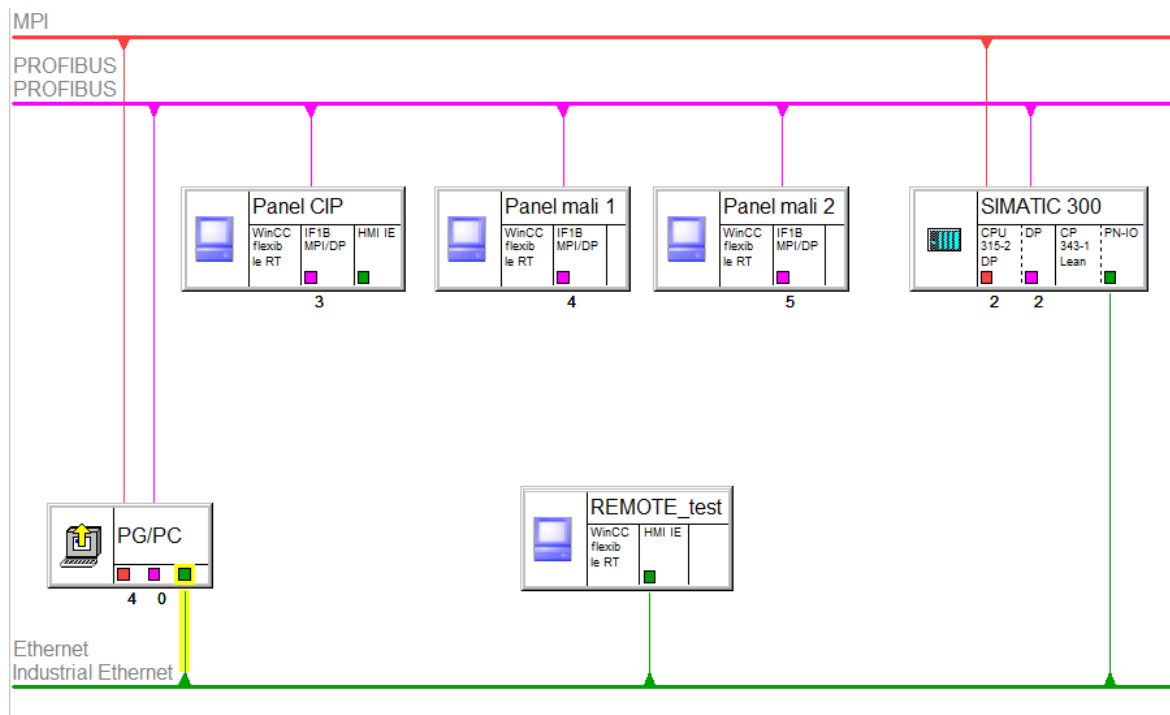
Projektirane regulatore potrebno je realizirati na stvarnom sustavu upravljanja postrojenjem. Upravljački sustav čini PLC sa pripadnim ulazno/izlaznim modulima za analogne i digitalne signale, te operatorskim panelima za vizualizaciju sustava upravljanja (SCADA).

PLC koji je korišten je od proizvođača Siemens, tipa S7-300 sa centralnom procesorskom jedinicom CPU 315-2DP. Program za PLC je pisan u programskom alatu SIMATIC MANAGER, STEP7 od Siemens. STEP7 nudi pisanje programa na više načina. Postoje: Statement List (STL), Ladder Diagram (LD), Function Block Diagram (FBD). U pisanju programa korišteni su Ladder Diagram i Statement List. Za lakši prikaz stanja postrojenja i upravljanje, koristi se WinCC flexible program također od SIEMENSA. Pomoću njega je izrađena cijela SCADA za postrojenje.



Slika 5.1 Upravljački ormar

Na slici 5.1 prikazan je upravljačko-elektronički ormar u kojemu se nalazi PLC sa svim svojim modulima, te popratnom elektronikom, kao i frekvencijskim pretvaračima. Korišteni tip PLC-a ima tri mogućnosti komunikacije: MPI, ProfiBus i ProfiNET. Operatorski panel komunicira sa PLC-om preko industrijskog protokola od Siemens-a pod nazivom „ProfiBus“. Svu komunikaciju između PLC-a i operatorskih panela kao i dodatne module potrebno je iskonfigurirati u Simatic Manageru. Komunikacijska struktura je prikazana na sljedećoj slici 5.2.:

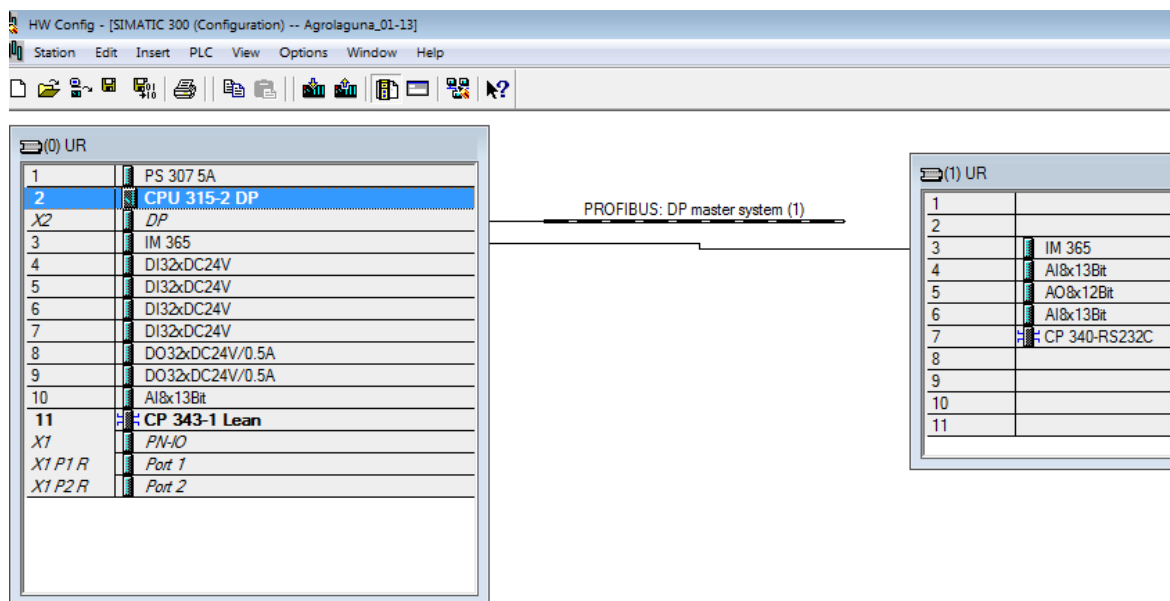


Slika 5.2 Komunikacijska mreža upravljačkog sustava

Kao što je spomenuto PLC komunicira sa operatorskim panelima preko ProFibusa, dok se protokol Industrial Ethernet (LAN) koristi za upravljanje sustavom preko udaljenog pristupa. PG/PC na slici zapravo predstavlja PC s kojeg se može upravljati sustavom ili raditi modifikacije na programu, dok je REMOTE_test virtualni operatorski panel korišten za lakše upravljanje sustavom u postupku identifikacije.

Slika 5.3 prikazuje konfiguraciju dodatnih modula PLC-a, kojih ima ukupno 13. Svaki modul se mora točno odabrati po serijskom broju, a neki zahtijevaju i dodatne postavke, kao npr. za analogne module, odabir strujnog, naponskog ili omskog signala. Konfiguracija sadrži 4 modula po 32 digitalna ulaza, 2 modula po 32 digitalna izlaza, 3 modula po 8 analognih ulaza i jedan modul s 8 analognih izlaza. Korišten je i posebni modul IM 365 koji služi za povezivanje redova („rack“)

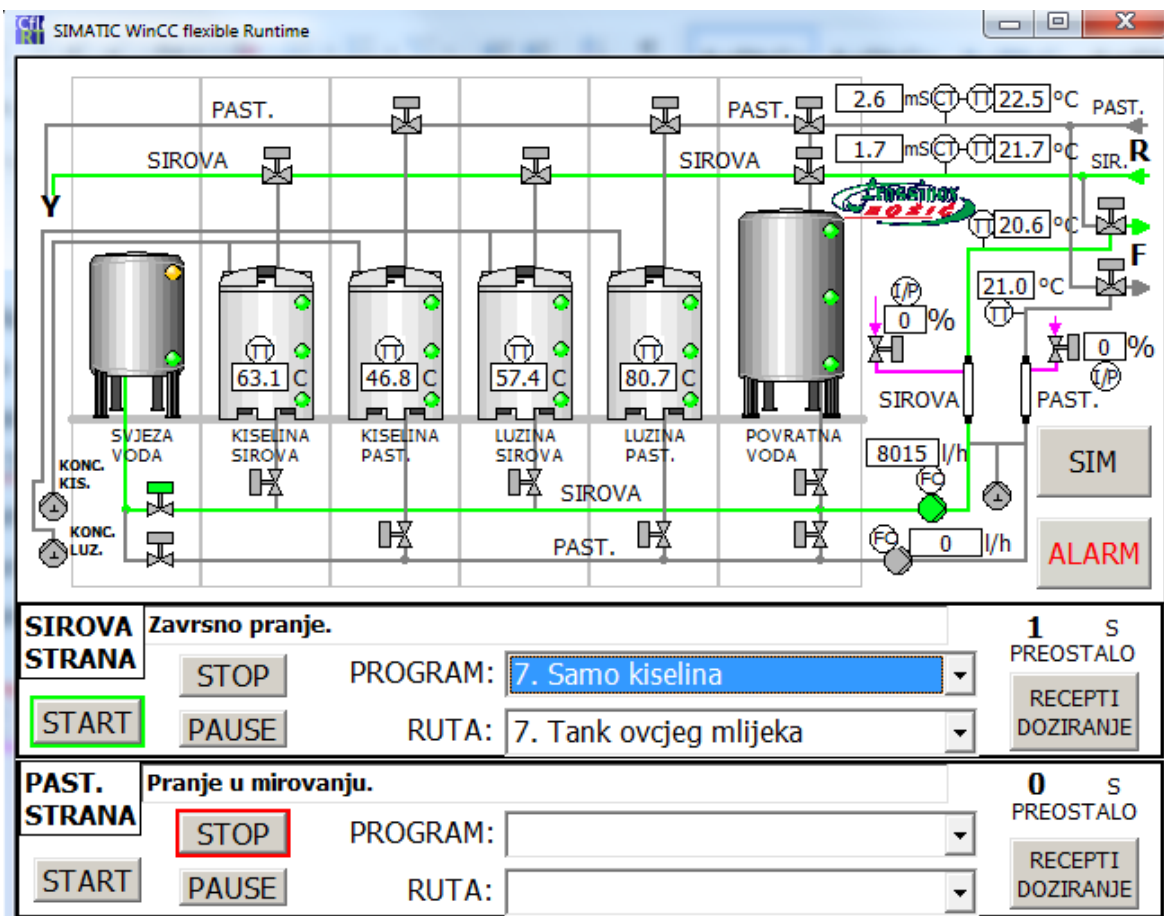
s modulima od 8 modula po redu. Ugrađen je i modul CP 342-1 Lean koji koristi za ProfiNET (LAN) komunikaciju, te posebni modul CP 340RS232C za komunikaciju putem RS232 sučelja.



S...	Module	Order number	Firmwa...	MPI addr...	I address	Q addr...	Comment
1	PS 307 5A	6ES7 307-1EA00-0AA0					
2	CPU 315-2 DP	6ES7 315-2AH14-0AB0	V3.3	2			
X2	DP				2047**		
3	IM 365	6ES7 365-0BA01-0AA0			2000		
4	DI32xDC24V	6ES7 321-1BL00-0AA0			0...3		
5	DI32xDC24V	6ES7 321-1BL00-0AA0			4...7		
6	DI32xDC24V	6ES7 321-1BL00-0AA0			8...11		
7	DI32xDC24V	6ES7 321-1BL00-0AA0			12...15		
8	DO32xDC24V/0.5A	6ES7 322-1BL00-0AA0				0...3	
9	DO32xDC24V/0.5A	6ES7 322-1BL00-0AA0				4...7	
10	AI8x13Bit	6ES7 331-1KF02-0AB0			100...115		
11	CP 343-1 Lean	6GK7 343-1CX10-0XE0	V3.0	3	1136...1151	1136...115	
X1	PN-IO				1023**		
X1	Port 1				1022**		
X1	Port 2				1021**		

Slika 5.3 Konfiguracija modula PLC-a

Na slici 5.4 prikazana je vizualizacija upravljanja CIP-om (SCADA) ugrađena u operatorskom panelu, odnosno u REMOTE_test virtualni operatorski panel. Na panelu se može pratiti rad svih elemenata veznih na sustav upravljanja. Operater u mljekari odabire željeni program i rutu pranja te pokreće pranje pritiskom na tipku START. Jedina razlika u vizualizaciji stvarnog panela i onog testnog korištenog u radu je tipka SIM, pomoću koje se pristupa posebnom izborniku izrađenom za potrebe identifikacije i simulacije prijelaznih pojava u sustavu. Na panelu se također može pratiti rad regulacijskog ventila, kao i temperaturu tekućine u protoku što je potrebno za samu implementaciju.

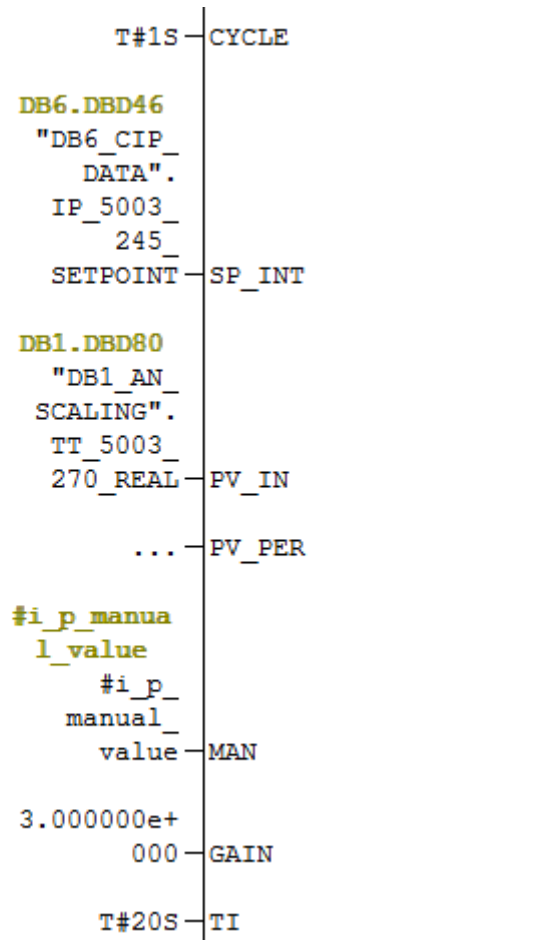


Slika 5.4. SCADA na operatorskom panelu CIP-a

Program Wincc flexible ima mogućnost spremanja vrijednosti varijabli, tzv. „trendova“, koji su korišteni u postupku identifikacije za spremanje odziva sustava, a koristit će se naravno i u implementaciji. Trendovi se spremaju u vremenskim intervalima od jedne sekunde što je jednako i osvježavanju vrijednosti u SCADA sustavu. Trendovi se spremaju u .csv formatu što je pogodno za unosenje u Matlab.

5.2. Implementacija regulatora u PLC

Implementacija glavnog regulatora u PLC je vrlo jednostavna, jer postoji gotov programski blok (funkcija) pod imenom SFB/FB 41 "CONT_C" koji predstavlja kontinuirani PID regulator. U blok se direktno unose parametri K_r i T_i kao što je prikazano na slici 5.5.:



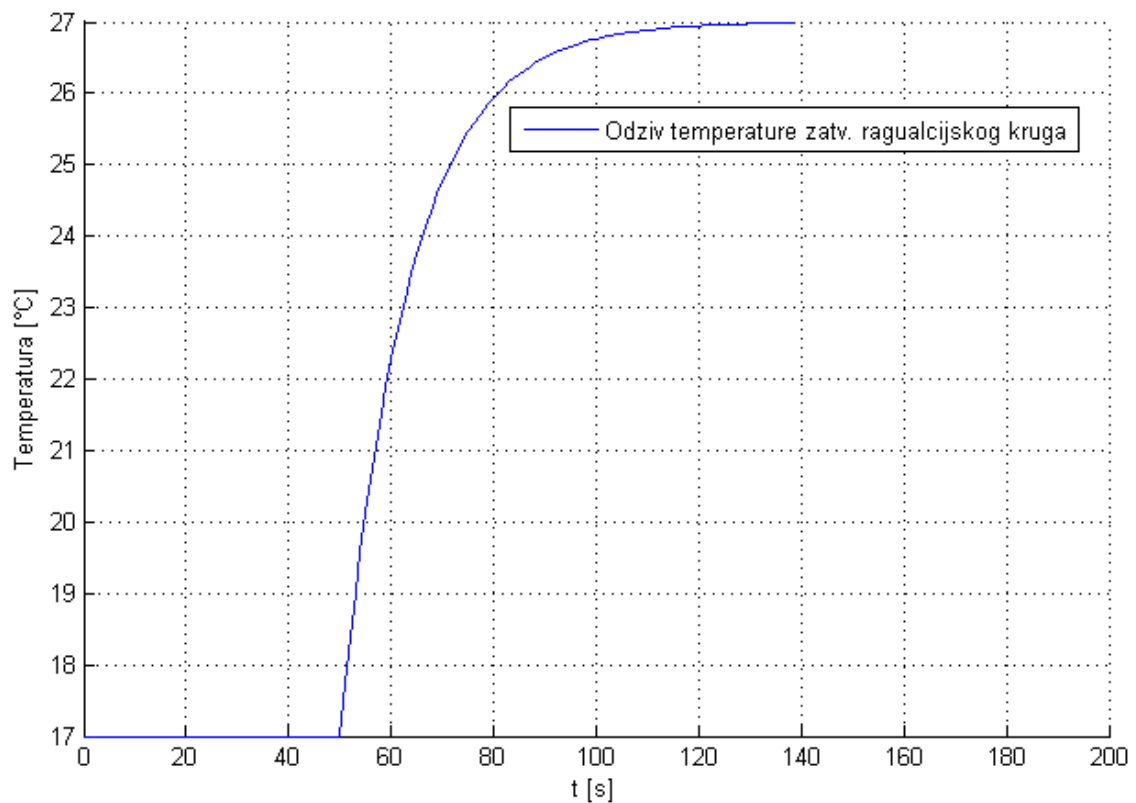
Slika 5.5. Programski blok SFB/FB 41

Uneseni su potrebni parametri, kao period uzorkovanja, referentna veličina (SP_INT), procesna (mjerena) veličina (PV_IN), proporcionalno pojačanje (GAIN) te integralno pojačanje (TI). Naravno potrebno je još puno stvari podesiti da bi regulacija temperature mogla funkcionirati, npr. pozivanje bloka za regulaciju u pravo vrijeme, resetiranje svih spremljenih statičkih varijabli bloka, kako ne bi program kod ponovne regulacije kretao sa nekim nepoznatim vrijednostima, što bi moglo napraviti velike probleme u cijelom sustavu. Bitno je također napomenuti da je provedeno normiranje svih signala korištenih u regulaciji na iznos -100 do 100%.

Za implementaciju kompenzatora ne postoje gotovi programski blokovi, stoga će kompenzator biti realiziran kao posebna funkcija u STL kodu. Najlakši način unosa prijenosnih funkcija u digitalne sustave je preko jednadžbi diferencija, odnosno rekurzivne formule. Da bi se kompenzator mogao zapisati u obliku jednadžbe diferencija potrebno je diskretizirati njegovu prijenosnu funkciju nekom od metoda diskretizacije. Kod diskretizacije je potrebno odabrati odgovarajuće vrijeme uzorkovanja koje se određuje iz karakteristike vremenskog odziva zatvorenog regulacijskog kruga prema izrazu:

$$T = (0,1 \div 0,25)t_r \quad (5.1)$$

gdje t_r predstavlja vrijeme porasta zatvorenog kontinuiranog regulacijskog kruga



Slika 5.6. Simulirani odziv temperature zatvorenog regulacijskog kruga

Vrijeme porasta odabrano je kao vrijeme dok zatvoreni regulacijski krug ne dođe do 90% stacionarne vrijednosti, što iznosi otprilike 30 sekundi. Stoga vrijeme uzorkovanja iznosi:

$$T = (3 \div 7,5)[s] \quad (5.2)$$

Kao postupak diskretizacije odabire se ZOH postupak kojim se u diskretnoj domeni zadržavaju svojstva kontinuirane prijelazne funkcije.

$$K(z) = (1 - z^{-1}) Z \left\{ \frac{K(s)}{s} \right\} \quad (5.3)$$

gdje je $K(s)$ kompenzator prema izrazu 4.8.

Diskretizirani kompenzator uz vrijeme uzorkovanja $T = 3[s]$ glasi:

$$K(z) = \frac{0.24z - 0.2061}{z - 0.8869} \quad (5.4)$$

Iz dobivene diskretizirane prijenosne funkcije lako se dobije rekurzivna jednadžba diferencija kao što slijedi:

$$K(z) = \frac{0.24z - 0.2061}{z - 0.8869} = \frac{y(z)}{u(z)} = \frac{0.24 - 0.2061z^{-1}}{1 - 0.8869z^{-1}} \quad (5.5)$$

$$y(k) - 0.8869y(k-1) = 0.24u(k) - 0.2061u(k-1) \quad (5.6)$$

Rekurzivna formula za realizaciju na PLC-u glasi:

$$y(k) = 0.24u(k) - 0.2061u(k-1) + 0.8869y(k-1) \quad (5.7)$$

Na slici 5.7 prikazan je odsječak programskog koda u STL-u kompenzatora u rekurzivnoj formuli. Vrlo bitno je da se funkcija kompenzatora mora pozivati svake 3 sekunde što odgovara periodu uzorkovanja. U programu treba biti osigurano da se spremaju prošle vrijednosti (vrijednosti u prošlom koraku) mjerene i upravljačke veličine kako bi se mogla računati rekurzivna formula. Izlaz iz kompenzatora se mora pribrajati izlazu iz glavnog regulatora, dok je na ulaz kompenzatora potrebno dovesti proračunatu vrijednost promjene protoka u postocima. Također, potrebno je osigurati da se kompenzator pravovremeno uključuje, odnosno da ima neko kašnjenje u fazi grijanja nakon pokretanja pumpe, da se protok stabilizira prije njegovog uključivanja. Zbog velikog odstupanja od traženog protoka kompenzator bi davao veliku upravljačku veličinu, a mogla bi se i dogoditi podrhtavanja i oscilacije u sustavu, zbog naglog otvaranja regulacijskog

ventila. Naknadno, ako će biti potrebno može se ugraditi ograničenje upravljačke veličine od kompenzatora.

```

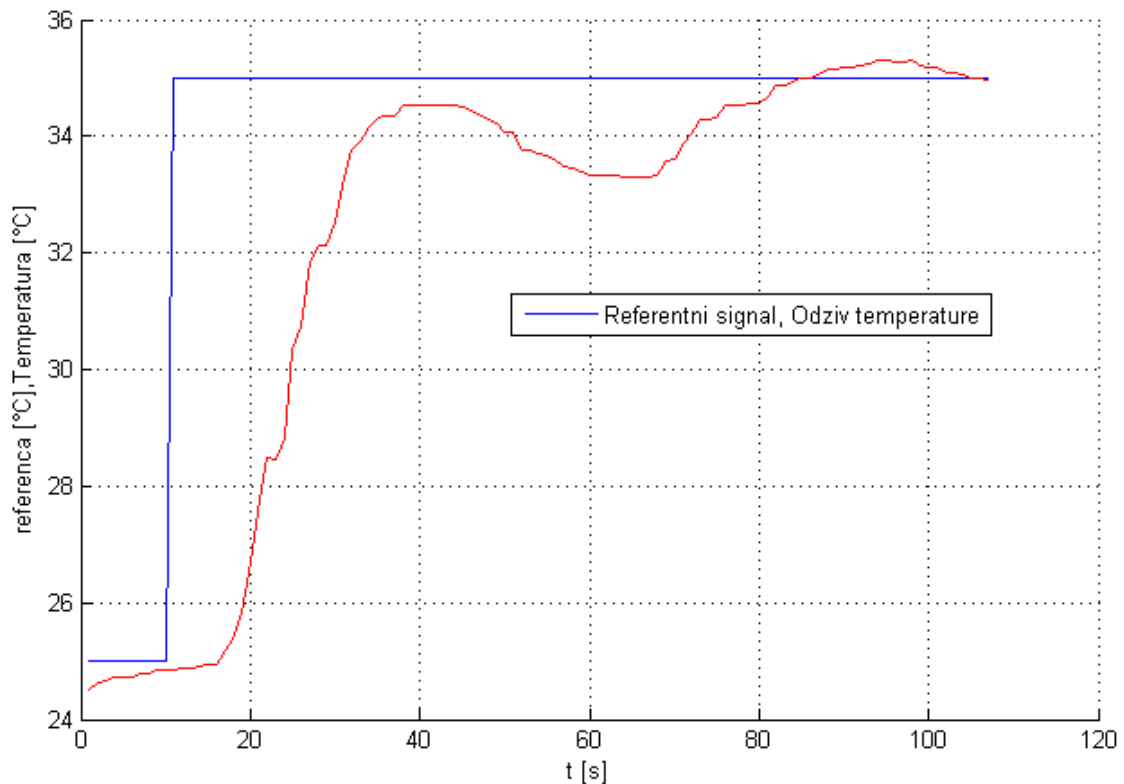
L      2.400000e-001
L      #u_k                               #u_k
*R
T      #y_k_static                         #y_k_static
AN     OV
SAVE
CLR
A      BR
)
JNB   _001
L      -2.061000e-001
L      #u_k_1                             #u_k_1
*R
T      #temp_sum                           #temp_sum
AN     OV
SAVE
CLR
_001: A      BR
)
JNB   _002
L      #temp_sum                           #temp_sum
L      #y_k_static                         #y_k_static
+R
T      #y_k_static                         #y_k_static
AN     OV
SAVE
CLR
_002: A      BR
)
JNB   _003
L      8.869000e-001
L      #y_k_1                             #y_k_1
*R
T      #temp_sum                           #temp_sum
AN     OV
SAVE
CLR
_003: A      BR
)
JNB   _004
L      #temp_sum                           #temp_sum
L      #y_k_static                         #y_k_static
+R
T      #y_k_static                         #y_k_static
_004: NOP   0

```

Slika 5.7 Kompenzator u STL kodu

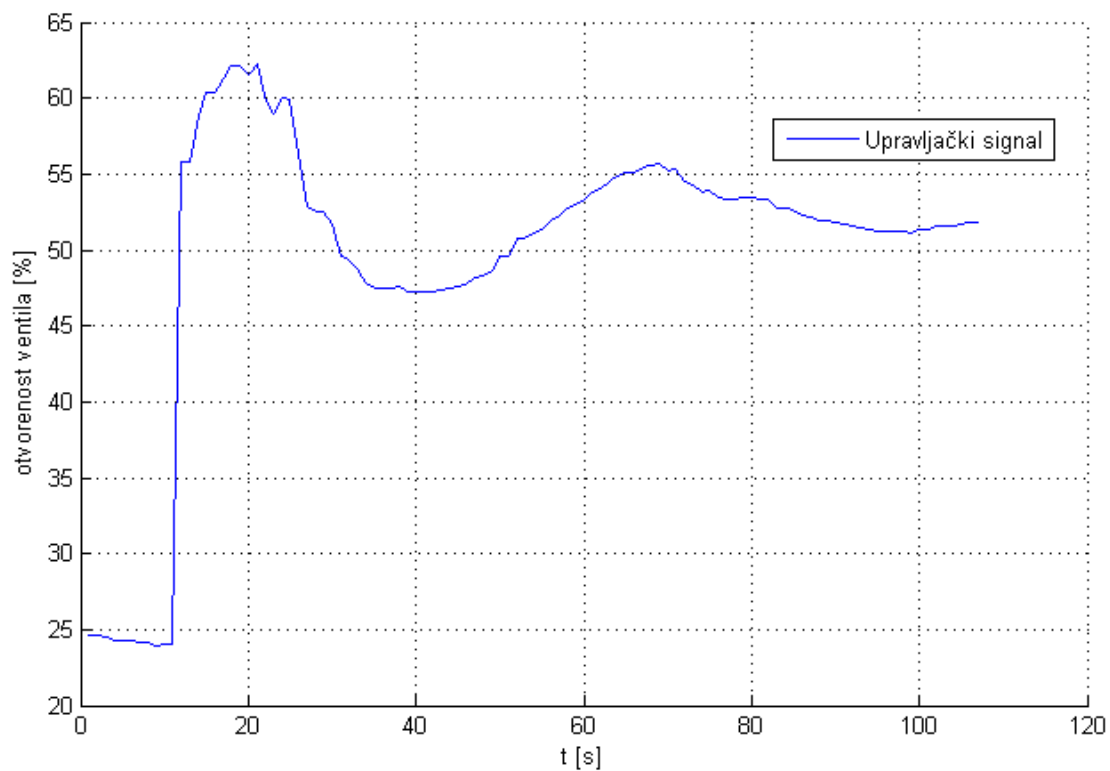
5.3. Odzivi implementiranih regulatora

Slika 5.8 prikazuje odziv zatvorenog kruga upravljanja samo sa glavnim regulatorom na skokovitu promjenu referentne temperature za $+10^{\circ}\text{C}$. Vidljivo je da sustav ima približno isto vrijeme porasta kao i matematički model sustava, gdje je vrijeme porasta $t_r = 30[s]$. Postoje i male oscilacije u sustavu prije postizanja stacionarne vrijednosti.



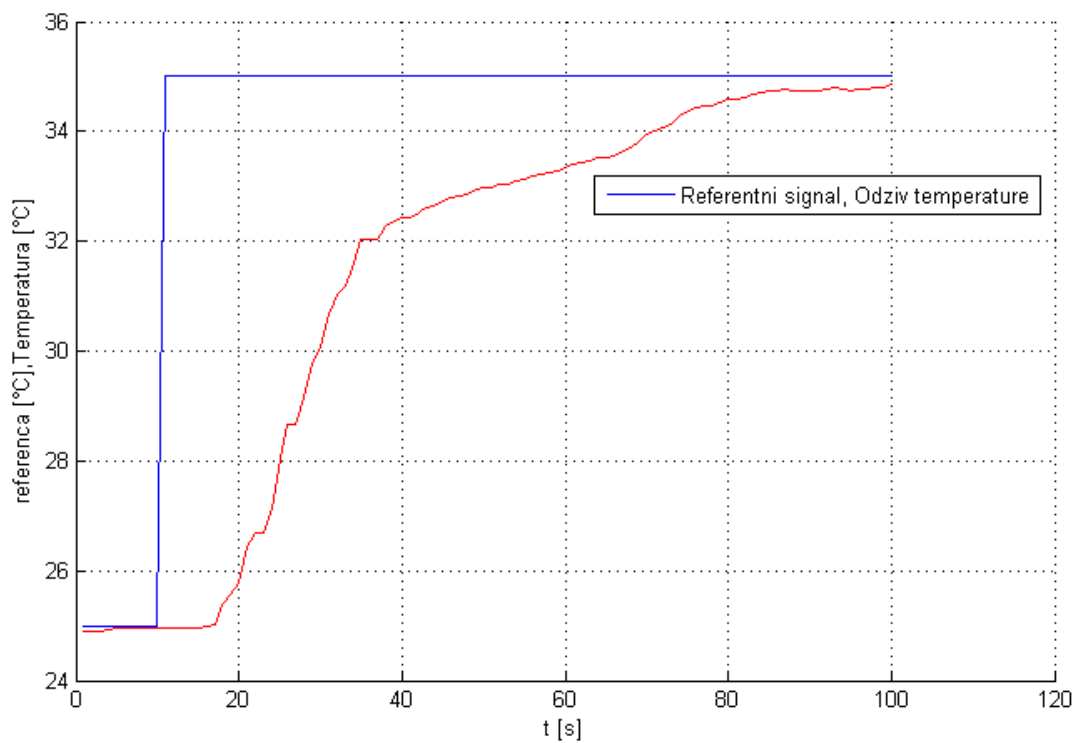
Slika 5.8. Referentna veličina i mjereni odziv temperature uz glavni regulator

Sa slike 5.9 jasno se vidi uzrok oscilacija odziva temperature. Naime, upravljačka veličina ima veliki skok u trenu skokovite promjene reference, te nakon toga dosta brzo pada i malo zaoscilira. Ove oscilacije su jednim dijelom uzrok nesavršenosti stvarnog sustava, a jednim dijelom možda i prevelikim pojačanjem regulatora. Također, sinteza regulatora rađena je za srednju vrijednost identificiranog sustava, odnosno za neku drugu radnu točku u kojoj je pojačanje sustava manje.

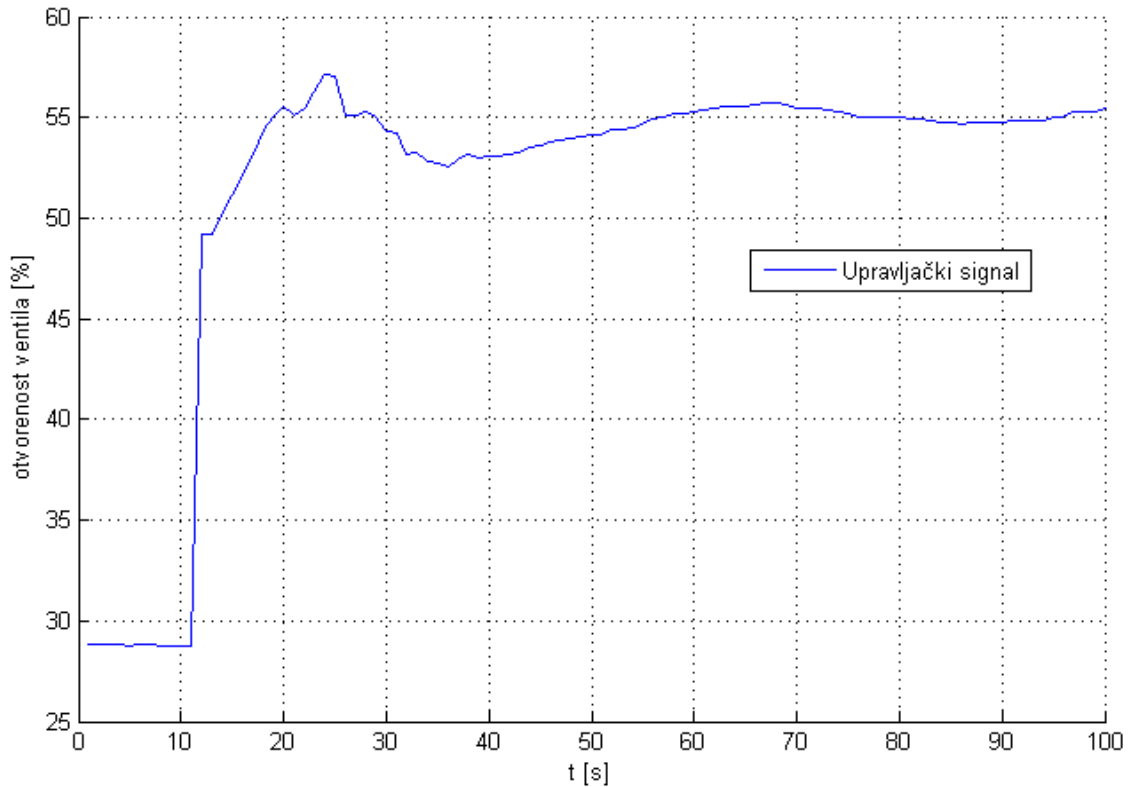


Slika 5.9. Upravljačka veličina glavnog regulatora

Ponovljeno je još jedno mjerenje odziva sustava samo sa glavnim regulatorom, ali je pritom pojačanje regulatora podešeno na $K_r = 2$.



Slika 5.10. Odziv sustava sa glavnim regulatorom uz $K_r = 2$



Slika 5.11. Izgled upravljačke veličine glavnog regulatora uz $K_r = 2$

Sa manjim pojačanjem regulatora zatvorenom krugu upravljanja treba duže vrijeme da dođe na stacionarnu vrijednost, što je vidljivo sa slike 5.10. Vidi se da su i manje oscilacije u upravljačkoj veličini što se vidi sa slike 5.11. Kao što je spomenuto u sintezi regulatora, manje pojačanje daje mirniji (stabilniji), ali i sporiji odziv.

S obzirom da u samom procesu pranja neće biti velikih skokova u zadavanju referentne temperature, osim u početnoj fazi grijanja, odlučeno je da se pojačanje regulatora ostavi na vrijednosti $K_r = 3$, a na zadavanje mjerene veličine u regulator ugradi ograničenje iznosa kako zbog velike razlike u referentnoj i mjerenoj veličini ne bi upravljačka veličina izlazila izvan dozvoljenih granica. To znači da ako je razlika referentne i mjerene veličine veća od nekog iznosa, smanjivat će se na definirani maksimalni iznos prema izrazu:

$$x_{ref} - y = \begin{cases} e & ,za \quad |e| \leq e_{max} \\ e_{max} & ,za \quad |e| > e_{max} \end{cases} \quad (5.8)$$

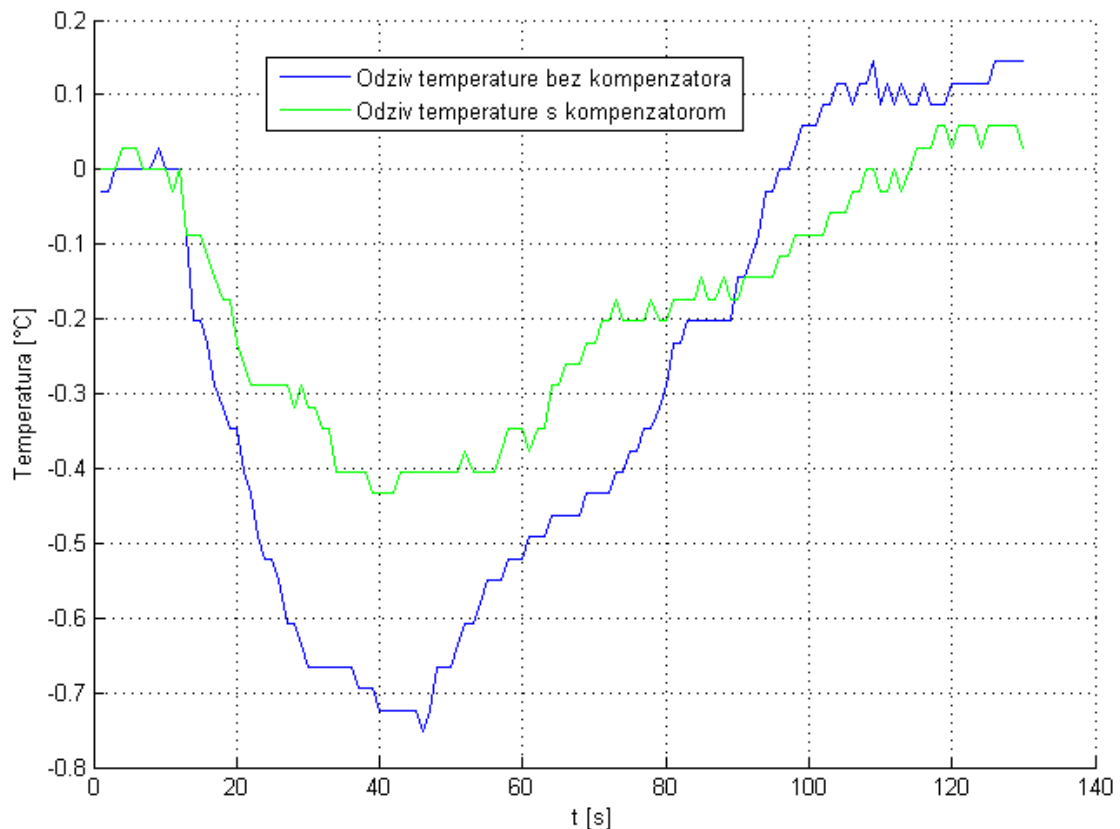
gdje je

x_{ref} - referentna veličina

y - mjerena veličina

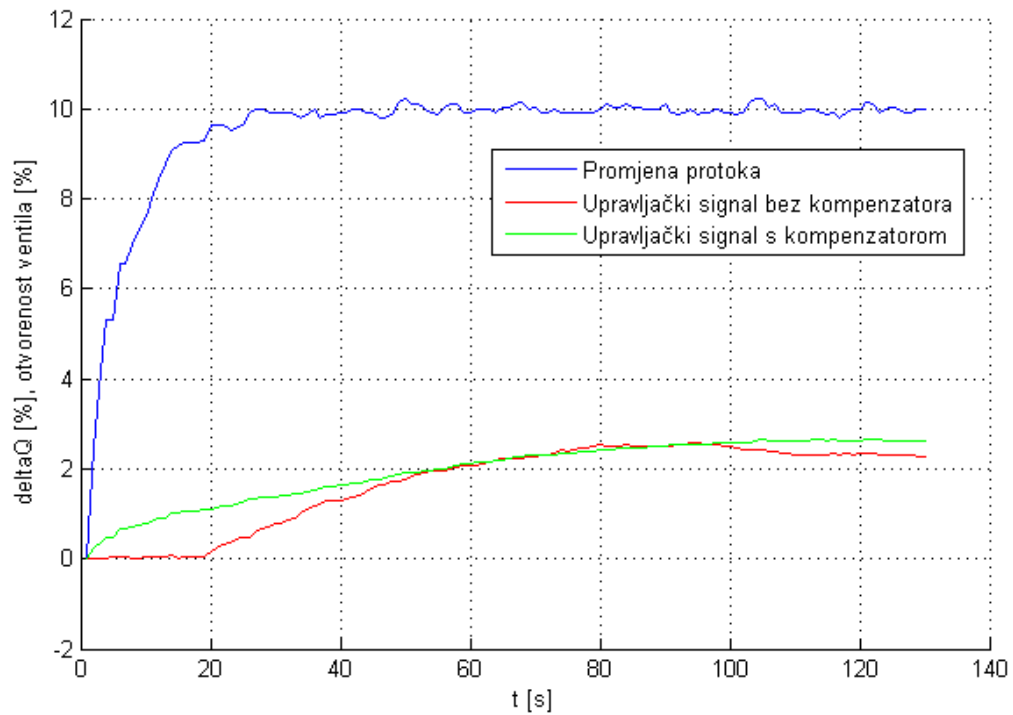
e - regulacijsko odstupanje (pogreška)

Na slici 5.12 prikazan je usporedni odziv zatvorenog sustava upravljanja na poremećaj protoka uz kompenzator i bez. Vidljivo je da je uz kompenzator gotovo duplo manji propad temperature uz povećanje protoka za 1 000l/h.



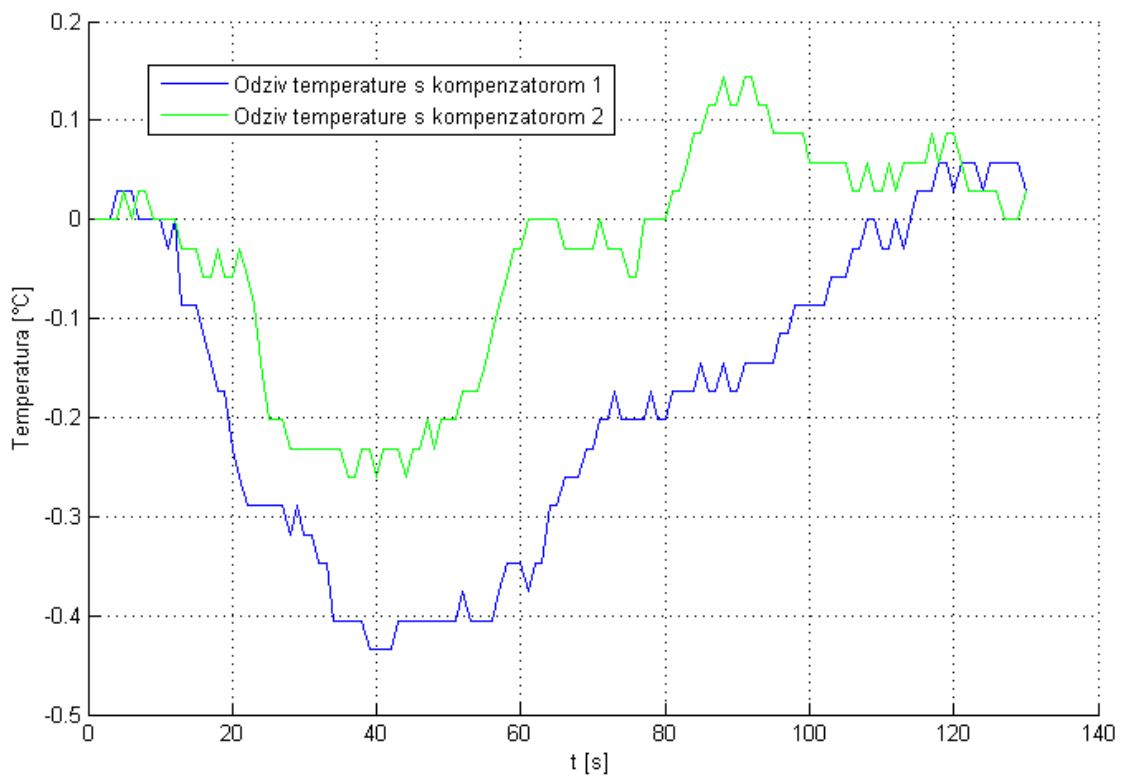
Slika 5.12. Odziv sustava na poremećaj uz kompenzator

Upravljačka veličina bez kompenzatora kao da zaostaje za onom sa kompenzatorom, kao što se vidi sa slike 5.13. Razlog zaostajanja je sporija dinamika glavnog regulatora, ali i neko kašnjenje u mjerenju i promjeni temperature zbog, kao i zbog sporije promjene protoka. Dok kod kompenzatora upravljačka veličina počne trenutno rasti sa protokom. Kao i kod glavnog regulatora, za kompenzator isto vrijedi da mu parametri ovise za koju radnu točku je projektiran, stoga će biti napravljeno još jedno mjerenje sa promijenjenim parametrima da se probaju dobiti još bolji rezultati.



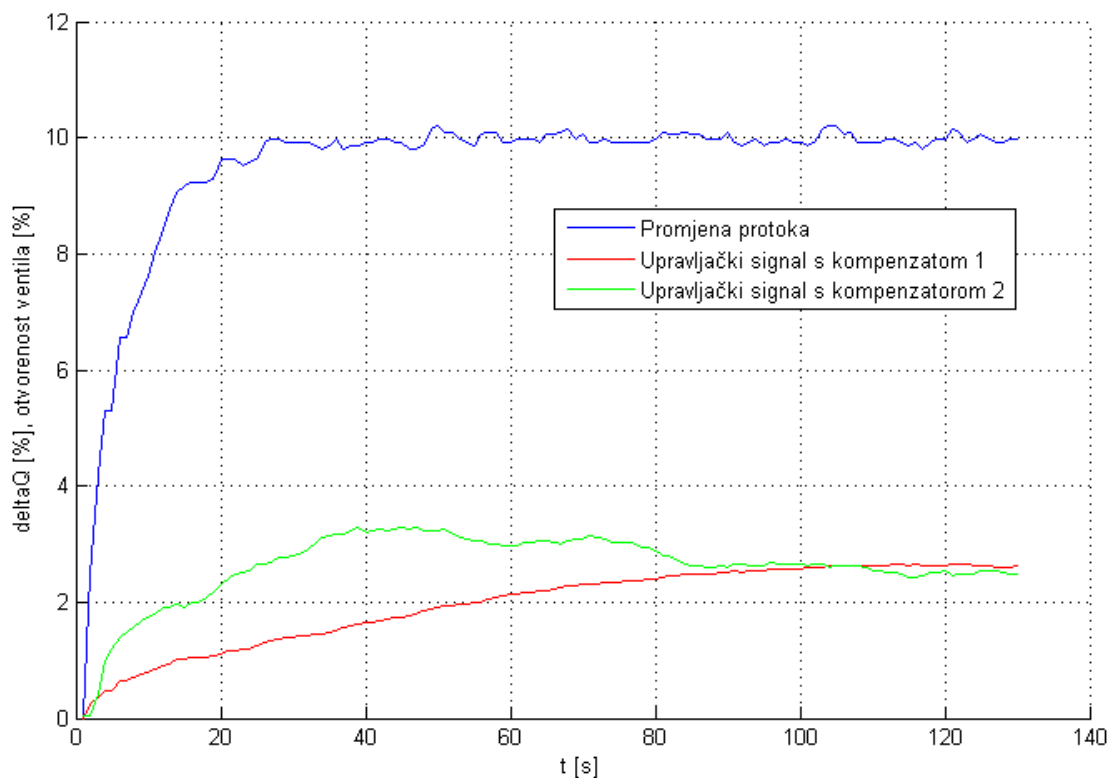
Slika 5.13 Izgled upravljačke veličine sa kompenzatorom

Slika 5.14. prikazuje usporedni odziv kompenzatora sa promijenjenim pojačanjem sa $K_k = 0,3$ na $K_k = 0,5$.



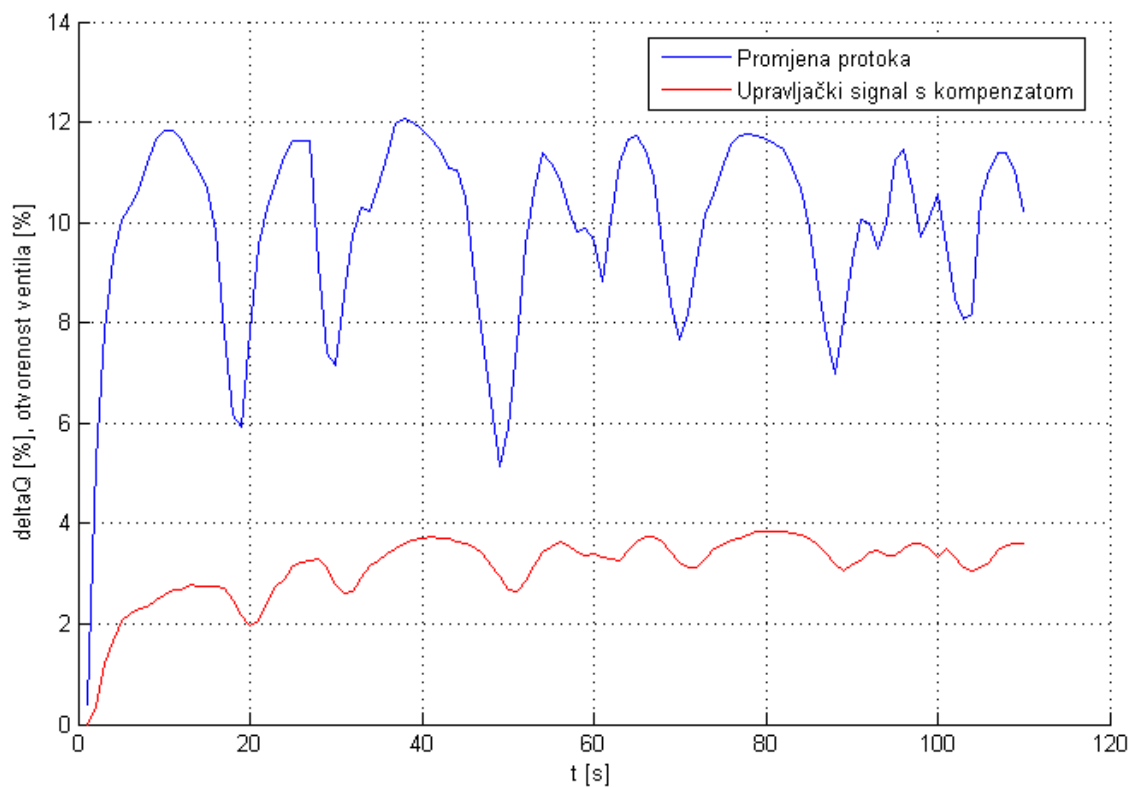
Slika 5.14. Odziv sustava uz izmijenjene parametre kompenzatora

Uz veće pojačanje kompenzator još bolje kompenzira poremećaj (propad temperature), ali se pojavljuje nadvišenje zbog povećanja upravljačkog signala. Sa usporednog odziva upravljačkih veličina, prije i poslije povećanja pojačanja (slika 5.15.), vidi se da povećanje pojačanja kompenzatora direktno utječe na povećanje upravljačke veličine.



Slika 5.15. Izgled upravljačke veličine sa promijenjenim parametrima kompenzatora

Povećanjem pojačanja dobila se još bolja kompenzacija poremećaja, ali postoji mogućnost pojave oscilacija na upravljačkom signalu za velike iznose pojačanja regulatora. Isto tako i veliki poremećaj protoka može pridonijeti oscilacijama upravljačke veličine, stoga će se provesti mjerenje upravljačke veličine za povećano pojačanje kompenzatora uz simulirane oscilacije na protoku.



Slika 5.16. Izgled upravljačke veličine uz velike oscilacije protoka

Kao što je spomenuto, velike oscilacije protoka mogu uzrokovati oscilacije na upravljačkom signalu preko kompenzatora, a to dokazuje slika 5.16. Oscilacije protoka se direktno prenose na upravljački signal što može dovesti do nestabilnosti sustava upravljanja, kao i do oštećenja aktuatora. Stoga treba vrlo pažljivo odabrati parametre kompenzatora i testirati ih kako ne bi dolazilo do ove pojave. Po potrebi se može i ograničiti upravljački signal koji dolazi sa kompenzatora, da ukoliko dođe do velikih oscilacija u protoku, nema forsiranja aktuatora.

Zaključak

Kod projektiranja zatvorenih sustava upravljanja bitno je dobro analizirati sve dijelove sustava kojima se želi upravljati, kako bi se mogao definirati problem upravljanja. Potrebno je razmotriti tehničke zahtjeve na upravljački sustav, te vidjeti na koje načine se oni mogu postići i da li se mogu postići. Na temelju tehničkih zahtjeva odabire se vrsta regulatora koji će upravljati potrebnim veličinama.

Odlučeno je da će sustav upravljanja činiti glavni regulator PI tipa, te kompenzator za poremećaje protoka tekućine. Glavni PI regulator pokazao se dovoljnim za regulaciju temperature u protoku, ali ne dovoljno učinkovit uslijed poremećaja protoka koji se može javiti kao smetnja. Stoga je dodan kompenzator koji vrši predupravljanje u sustavu te tako ispravlja promjene temperature uslijed promjene protoka. U sintezi regulatora ima veliku ulogu kvaliteta identifikacije sustava. Također je vrlo bitno provesti identifikaciju sustava za više radnih točaka, kako bi se utvrdila njegova dinamika kroz cijelo područje rada, a time lakše odredili parametri regulatora.

Sintezom regulatora se dobiju zapravo dobri početni parametri za implementaciju na stvarnom sustavu, dok bi u protivnom trebalo nagađati iste. Ako to sustav tehnički dozvoljava najbolje je krenuti u implementaciju sa najsporijim dobivenim parametrima regulacije, te ih onda na stvarnom sustavu povećavati ako je to potrebno. Isto tako je bitno za određene parametre sustava provjeriti da li su pogodni za sve radne točke sustava, te u svim situacijama u kojima se sustav može nalaziti. U radu se pokazalo da iako se nakon povećanja pojačanja kompenzatora bolje kompenzira poremećaj, može uzrokovati nastanak oscilacija na aktuatoru i nestabilnost cijelog sustava upravljanja.

Dakle, u stvarnom sustavu upravljanja nema točno određenih „najboljih“ parametara, već oni ovise o tehničkim mogućnostima i zahtjevima na sustav, koji se obično tiču učinkovitosti i efikasnosti.

Literatura

- [1] PI- dijagram postrojenja Agrolaguna Sirana d.d., Poreč, 31-10-2012, nacrt br. 12-02.00
- [2] Dairy processing handbook, Second revised edition, 2003 Tetra Pak Processing Systems AB
- [3] AU_predavanje 10,15,16, - predavanja iz kolegija „Automatsko upravljanje“, 2012, FER
- [4] RUS_03_Pristup_sintezi_digitalnih_regulatora_2012-13 - predavanja iz kolegija „Računalno upravljanje sustavima“, 2012, FER

Sažetak

Zadatak diplomskog rada bio je opisati razmatrani proces pranja postrojenja mljekare, te naglasiti tehničke zahtjeve na regulacijske krugove kontinuiranih veličina u procesu. Zatim je provedena identifikacija sustava, kako bi se dobile potrebne prijenosne funkcije procesa za regulacijske krugove. Na temelju dobivenih prijenosnih funkcija procesa provedena je sinteza regulatora za definirane regulacijske krugove. Utvrđena je postojanost jednostrane sprege između dva regulacijska kruga, dok je mrtvo vrijeme zanemareno. Zaključno, provedena je implementacija upravljačkih algoritama sa regulatorima u programirajući logički kontroler, te eksperimentalno provedena validacija rezultata. Na temelju rezultata napravljena su dodatna podešavanja parametara regulatora, te upravljačkih algoritama.

The task of this graduate work was to describe the considered process of washing of dairy plant and highlight the technical requirements of the continuous control loops in the process. Then the identification of system has been carried out, in order to obtain the necessary transfer functions of process for control loops. Based on the transfer functions of the process, the design of the controller for defined control loops has been carried out. Persistence of unilateral coupling between two control circuit was determined, while the dead time is ignored. Finally, the implementation of control algorithms with regulators was carried out into the programmable logic controller, and experimental validation of results was performed. Based on the results, additional adjustments of controller parameters, and control algorithms were made.