

Upotreba PID regulatora integriranih u programirajući logički kontroler

Mato Fruk, Danijel Maršić, Milivoj Puzak, Goran Malčić

Tehničko veleučilište u Zagrebu

Elektrotehnički odjel

Konavoska 2, Zagreb, Hrvatska

Telefon: 01-5595 300 Fax: 01-5595 360 E-mail: mato.fruk@tvz.hr

Sažetak - Automatizacija suvremenih sustava upravljanja izvodi se programirajućim logičkim kontrolerima (PLC) različitih stupnjeva složenosti. Za regulaciju se najčešće koriste PI i PID regulatori pa je stoga bilo prirodno da se PID algoritam regulatora integrira u industrijska računala.

U ovom radu predstavljena je usporedba dva PID regulatora integrirana u PLC uređaje različitih proizvođača. Inženjerska iskustva iz postrojenja prikazana su na laboratorijskom modelu toplinskog sustava za potrebe nastave na stručnom studiju automatizacije. Prikazani su postupci parametriranja i uspoređeni odzivi.

I. UVOD

Za realizaciju linearnih sustava najčešće se koriste PI i PID regulatori koji su se ranije izvodili kao kontinuirani regulatori u analognoj tehnici (električni, hidraulički, pneumatski). Danas se PID regulatori primjenjuju u digitalnoj izvedbi kao standardni programski moduli u programirajućim logičkim kontrolerima. Digitalni PI i PID regulatori najjednostavnije se dobivaju diskretizacijom odabrane strukture analognog PID regulatora nekom od uobičajenih aproksimacijskih metoda (Eulerova, Tustinova). Ispravnim izborom vremena uzorkovanja digitalni regulator će se ponašati slično analognom pa se mogu koristiti prethodno stečena iskustva. PLC sa svojim A/D pretvaračima može primiti analogne veličine iz upravljanog procesa (temperatura, tlak, itd.), obraditi dobivenu informaciju i na kraju pomoću D/A pretvarača poslati analognu upravljačku veličinu procesu. Ta obrada dobivenih informacija se odvija uporabom PID algoritama integriranog u izvršni program PLC-a.

U radu su predstavljena dva PID regulatora integrirana u industrijska računala (PLC) renomiranih proizvođača opreme za automatizaciju: *Allen-Bradley* i *Siemens*. Prikazano je konfiguriranje i rad programskih PID regulatora integriranih u programirajuće logičke kontrolere serije *AB Micrologix 1500* i *Siemens S7-300*. Budući da su oba PLC-a sklopovski podjednake klase bilo je zanimljivo dobiti uvid u mogućnosti i svojstva integriranih PID algoritama na istom tehničkom procesu.

Svaki PID regulator zasebno je ispitan na laboratorijskom modelu toplinskog procesa te su prikazani dobiveni rezultati.

II. PROGRAMSKI PID REGULATOR

Programske realizacije PID regulatora u razvojnom programskom okruženju znatno se razlikuju od proizvođača do proizvođača. Naime, osim temeljnog algoritma proporcionalnog, integracijskog i derivacijskog djelovanja programski regulator dopunjen je, ovisno o

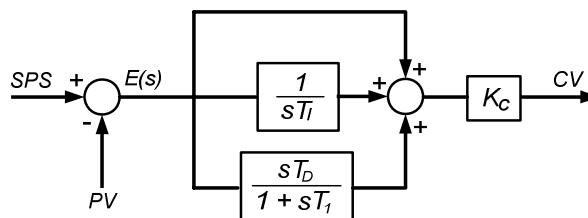
izvedbi, funkcijama limitiranja, skaliranja, funkcijama prijelaza režima rada te izborom oblika izlazne upravljačke veličine (binarni - PWM, ternarni, analogni).

A. Programski PID regulator u *AB Micrologix 1500*

Za rad sa PLC uređajima serije *AB MicroLogix 1500* koristi se programski paket *RSLogix 500* koji sadrži posebnu datoteku (PD datoteku) u koju je implementiran PID regulator. Svaki PID regulator sadrži parametre tipa bita, cjelobrojnih i proširenih cjelobrojnih podataka kojima se može pristupiti preko PD datoteke. PD datoteka može sadržavati maksimalno 255 PID regulatora što je i više nego dovoljan broj za ovu klasu PLC-a.

Instrukcija PID regulatora odabire se na kartici *File/Misc* i može se izvršavati u vremenskom (engl. *Timed*) ili prekidnom (engl. *STI*) načinu rada. U vremenskom načinu rada PID instrukcija se koristi u glavnom programu i osvježava vrijednost izlaza u odabranim vremenskim razmacima. U prekidnom načinu rada PID instrukcija se nalazi u vremenskom prekidnom potprogramu i mijenja vrijednost izlaza svaki put kada se izvrši prekidni potprogram. Da bi se PID algoritam ispravno izvršavao vrijeme osvježavanja PID instrukcije mora odgovarati vremenu između prekida. Na okviru PID instrukcije u polje *Process Variable* upisuje se adresa veličine koja ulazi u regulator (u daljnjem tekstu regulirana veličina) a u polje *Control Variable* se upisuje adresa veličine izlaza iz regulatora (u daljnjem tekstu upravljačka veličina). Veličina *SPS* je vodeća ili referentna.

Derivacijsko djelovanje se može postaviti na dva načina. Ako se DA (*Derivate Action*) bit u PD datoteci postavi u jedinicu derivacijsko djelovanje će djelovati na regulacijsku razliku. Sl. 1. prikazuje strukturu PID regulatora u tom slučaju.



Sl. 1. Strukturna shema PID regulatora ako je DA=1

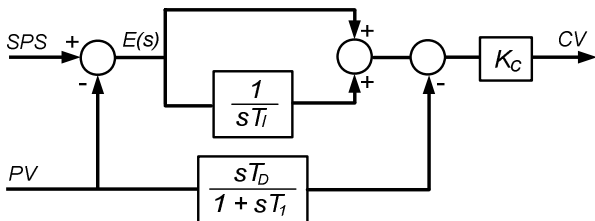
Referentna veličina se zadaje ulaznim parametrom *SPS* dok se na ulaz *PV* dovodi regulirana veličina. Zbrajanjem ovih vrijednosti dobiva se regulacijska razlika $E(s)$ koja se obrađuje u paralelnom PID regulatoru. Uz derivacijski član nužno je koristiti niskopropusni filter T_i kojim se eliminiraju pojačavanja skokovitih promjena i smetnje u

signalu. Upravljačka veličina se dobiva na izlazu CV . Iz strukturne sheme vidljivo je da se PID instrukcija izvršava prema sljedećem algoritmu:

$$CV = K_C \cdot \left[(e) + \frac{1}{T_I} \cdot \int (e)dt + T_D \cdot \frac{d(e)}{dt} \right], \quad (1)$$

gdje je CV iznos upravljačke veličine, (e) regulacijska razlika, K_C pojačanje regulatora, T_I integracijska vremenska konstanta (min), a T_D derivacijska vremenska konstanta (min).

Ako se DA bit postavi u nulu derivacijsko djelovanje će djelovati samo na reguliranu veličinu. Sl. 2. prikazuje strukturu PID regulatora u tom slučaju.



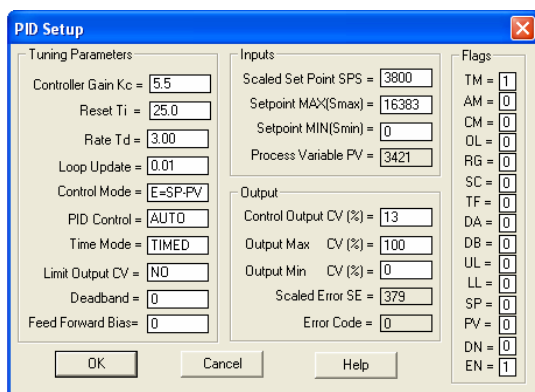
Sl. 2. Strukturna shema PID regulatora ako je $DA=0$

Ovo je PI-D struktura gdje se upravljačka veličina dobiva kao suma obrađene regulacijske razlike u PI algoritmu i derivacije regulirane veličine. Time su izbjegnuti veliki upravljački signali pri prolasku mogućih diskontinuiteta regulacijske razlike kroz derivacijsku granu [14]. Iz strukturne sheme vidljivo je da se PID instrukcije izvršava prema sljedećem algoritmu:

$$CV = K_C \cdot \left[(e) + \frac{1}{T_I} \cdot \int (e)dt - T_D \cdot \frac{dPV}{dt} \right], \quad (2)$$

gdje je CV iznos upravljačke veličine, (e) regulacijska razlika, K_C pojačanje regulatora, T_I integracijska vremenska konstanta (min), T_D derivacijska vremenska konstanta (min), a PV ulazna procesna varijabla. U relacijama (1) i (2) je zanemareno filtriranje jer je T_I 16 puta manje od derivacijske vremenske konstante T_D .

Parametri PID regulatora podešavaju se u prozoru do kojeg se dolazi odabirom *Setup Screen* u okviru PID instrukcije (Sl. 3.). Sve parametre također je moguće podešavati direktno unutar PD datoteke.



Sl. 3. Prozor za podešavanje parametara PID regulatora

U ovom prozoru mogu se podešavati 4 osnovne grupe parametara:

- *Ulazni parametri (engl. Inputs)*: U ovoj grupi parametrom SPS zadaje se referentna veličina koju je moguće ograničiti parametrima $MINS$ i $MAXS$. Također se preko parametra PV može pratiti skalirana vrijednost regulirane veličine.

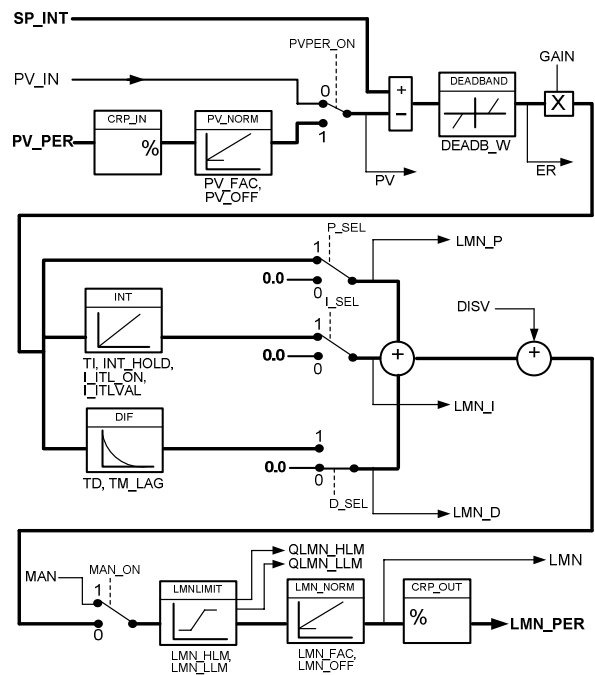
- *Izlazni parametri (engl. Outputs)*: Parametar CV prikazuje upravljačku veličinu regulatora koju je također moguće ograničiti parametrima CVL i CVH dok se parametrom ER prati regulacijska razlika.

- *Parametri za podešavanje (engl. Tuning Parameters)*: U ovoj grupi podešavaju se osnovni parametri regulatora (K_C , T_I , T_D) te vrijeme osvježavanja PID algoritma (parametar LUT) koje može biti najmanje 0.01 sekundu. Postoji i mogućnost odabira ručnog rada u kojem korisnik sam zadaje vrijednost upravljačke veličine (parametar AM).

- *Zastavice (engl. Flags)*: Prikaz i podešavanje svih kontrolnih zastavica.

B. Programski PID regulator u Siemens S7-300

Za programsku realizaciju PID regulatora u okviru *SIMATIC Manager* razvojnog okruženja koristi se standardna biblioteka unutar koje se nalaze funkcijski blokovi u kojima je realiziran PID algoritam. Za regulaciju procesa sa kontinuiranim ulaznim i izlaznim varijablama koristi se funkcijski blok $FB41$ "CONT_C". $FB41$ se poziva u organizacijskom bloku $OB35$ namijenjenom cikličkom prekidu čime se ostvaruje konstantno vrijeme uzorkovanja. Svakom regulatoru je iznad bloka PID funkcije potrebno pridružiti njegov podatkovni blok. Na taj način se podaci svih parametara PID algoritma spremaju u pridruženi podatkovni blok što omogućava praktički neograničeni broj poziva funkcijskog bloka $FB41$. Sl. 4. prikazuje strukturnu shemu PID algoritma realiziranog u funkcijskom bloku $FB41$ [8].



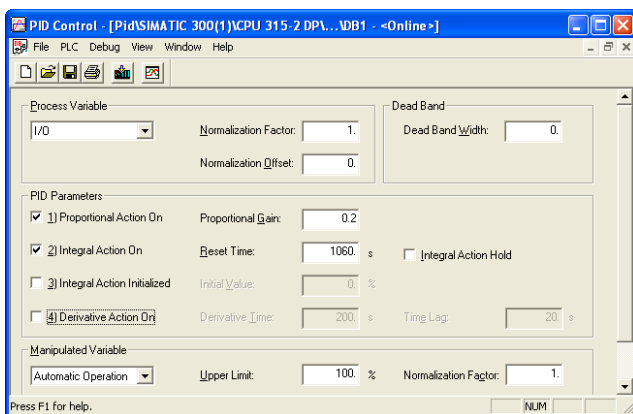
Sl. 4. Strukturna shema funkcijskog bloka $FB41$ "CONT_C"

Željena vrijednost regulirane procesne veličine SP_INT zadaje se u postocima, dok izmjerena vrijednost procesne varijable može biti sa PV_IN što znači da je interna iz programa ili dovedena preko analognog ulaza PV_PER . Odabir se vrši varijablom $PVPER_ON$ nakon čega se željena i odabrana vrijednost procesne varijable dovodi u zbrajalo. Na izlazu iz zbrajala regulacijska razlika se pomnoži s proporcionalnim pojačanjem i vodi na obradu u tri paralelne grane od kojih pojedina predstavlja proporcionalno, integracijsko i derivacijsko djelovanje. Pojedino djelovanje se omogućuje preko varijabli P_SEL , I_SEL i D_SEL . Pomoću prekidača MAN_ON odabire se da li se na izlaz šalje upravljačka vrijednost dobivena izvršenim algoritmom ili ručna vrijednost definirana varijablom MAN . Bez obzira na odabir definiraju se gornja i donja granična vrijednost ograničenja ($QLMN_HLM$, $QLMN_LLM$), vrši se normiranje i dobiva se izlazna upravljačka vrijednost LMN . Upravljačka vrijednost LMN_PER u postocima dobiva se nakon bloka CRP i može se poslati direktno na analogni izlaz. Iz strukturne sheme vidljivo je da se funkcijski blok $FB41$ izvršava prema sljedećem PID algoritmu:

$$LMN = GAIN \cdot \left[(e) + \frac{1}{T_I} \cdot \int (e) dt + T_D \cdot \frac{d(e)}{dt} \right], \quad (3)$$

gdje je LMN iznos upravljačke veličine, (e) regulacijska razlika, $GAIN$ pojačanje regulatora, T_I integracijska vremenska konstanta (s), a T_D derivacijska vremenska konstanta (s). PID algoritam funkcijskog bloka $FB41$ odgovara PID algoritmu u *MicroLogix 1500* u slučaju kada derivacijsko djelovanje djeluje na regulacijsku razliku. Filtriranje derivacijske komponente preporučeno je s filterom vremenske konstante 10 puta manje od derivacijske T_D .

Osnovni parametri PID algoritma podešavaju se u posebnoj aplikaciji *PID Control Parameter Assignment* koja je sastavni dio *STEP 7* programskog paketa. Unutar aplikacije odabere se pridruženi podatkovni blok u koji se spremaju podaci PID algoritma nakon čega se otvori prozor za podešavanje parametara (Sl. 5.).



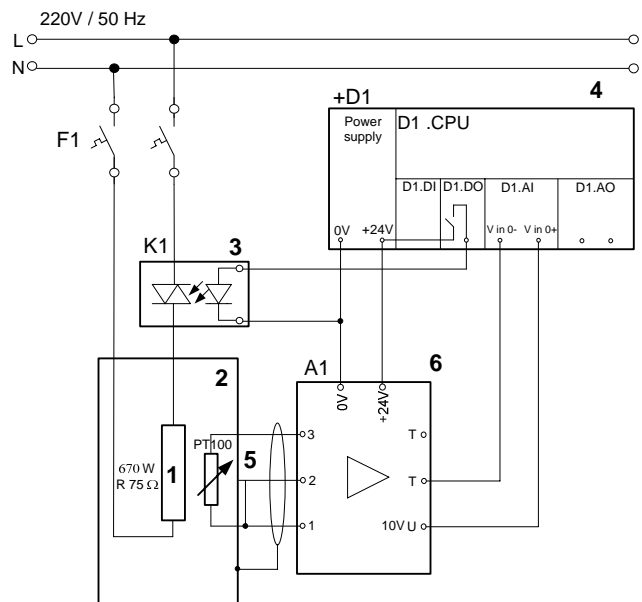
Sl. 5. Prozor za podešavanje parametara PID algoritma

U ovom prozoru moguće je aktivirati i podesiti parametre proporcionalnog, integracijskog i derivacijskog djelovanja PID algoritma. Također se odabire da li regulator prati procesnu varijablu s analognog ulaza ili internu vrijednost. Omogućena je promjena parametara u

toku izvršavanja programa pri čemu se parametri trenutno primjenjuju nakon prebacivanja u PLC. Svi parametri PID regulatora mogu se podesiti direktno u pridruženom podatkovnom bloku unutar razvojnog okruženja *SIMATIC Manager*.

III. LABORATORIJSKI MODEL TOPLINSKOG SUSTAVA

Za potrebe testiranja PID regulatora integriranih u PLC računalo upotrijebljen je laboratorijski model toplinskog procesa (Sl. 6.) u kojem se promjenom snage grijača mijenja temperatura tijela. Grijač (1) snage 670 W montiran je u aluminijsko tijelo (2) toplinskog otpora 0,49 K/W. Snagom grijača upravlja se impulsno korištenjem triaka kao sklopke (3) - "solid state relay". Relej se uklapa signalom napona 24 V s digitalnog izlaza PLC-a (4) koji se dovodi na upravljački krug. Mjerni slog se sastoji od $PT100$ toplinskog osjetnika (5) i pojačala signala (6) s faktorom pojačanja $K_{PI}=0,05$ V/°C.



Sl. 6. Principna shema laboratorijskog modela

Za izradu toplinskog modela snimljena je prijelazna funkcija koja se može aproksimirati članom prvog reda s mrtvim vremenom PT_1T_t koji je opisan prijenosnom funkcijom staze:

$$G(s) = \frac{K_s}{1 + s \cdot T_t} \cdot e^{-s \cdot T_d}, \quad (4)$$

gdje je K_s pojačanje staze, T_t dominantna vremenska konstanta staze, a T_d nadomjesno mrtvo vrijeme. Parametri staze imaju sljedeće iznose: $K_s=12$, $T_t=1060$ (s), $T_d=200$ (s).

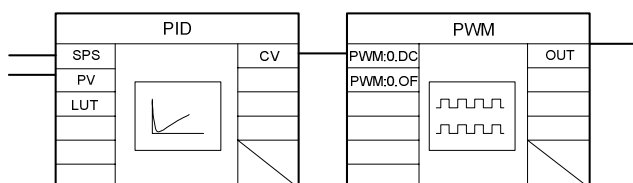
IV. PROGRAMSKA PODEŠENJA

U laboratorijskom modelu grijač se upravlja preko digitalnog izlaza PLC-a, a PID regulator na svom izlazu

daje cjelobrojnu vrijednost pa je potrebno izvršiti prilagodbu upravljačke veličine. Prilagodba je izvršena korištenjem pulсноširinske modulacije.

A. Podešenja u AB Micrologix 1500

Prilagodba upravljačke varijable ostvarena je povezivanjem PID instrukcije i PWM funkcije koja omogućava da izvršni uređaj bude upravljan sa PWM signalom (Sl. 7.). U tom slučaju se PID instrukcija mora izvršavati u vremenskom načinu rada zbog čega se zajedno s PWM funkcijom smješta u glavnu programsku datoteku *LAD2*. Vrijeme osvježavanja PID instrukcije je postavljeno na 2 sekunde.

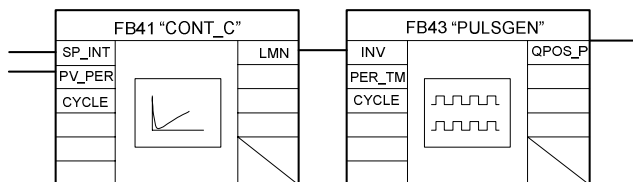


Sl. 7. Sprega PID instrukcije i PWM funkcije

Upravljačka veličina se preko naredbe za linearnu aproksimaciju skalira u cjelobrojne vrijednosti u granicama od 0 do 1000 koje se spremaju na adresu *PWM:0.DC*. Cjelobrojna vrijednost zapisana na ovoj adresi određuje širinu impulsa modulacije. Frekvencija modulacije se odabire parametrom *PWM:0.OF* kojemu se pristupa preko funkcijske datoteke i podešena je na 1 Hz.

B. Podešenja u Siemens S7-300

Da bi mogli realizirati PID regulator sa impulsnim izlazom za proporcionalne članove u kombinaciji s funkcijskim blokom *FB41 "CONT_C"* se koristi generator impulsa *FB43 "PULSGEN"* (Sl. 8.). Oba funkcijska bloka smještaju se u organizacijski blok *OB35* (ciklički prekid). Vrijeme između poziva PID algoritma je postavljeno na 2 sekunde.



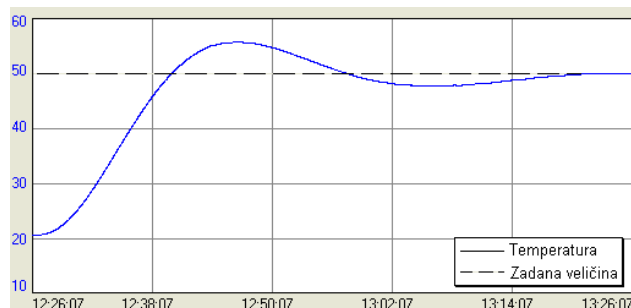
Sl. 8. Sprega PID algoritma i generatora impulsa

FB43 transformira ulaznu varijablu *INV* modulirajući izlazni signal regulatora *LMN* u širinu impulsa konstantne periode čije se trajanje određuje na ulazu *PER_TM*. Vrijeme *PER_TM* se mora podudarati s vremenom pozivanja bloka *FB41 "CONT_C"*. Unutar vremena *PER_TM* generator impulsa se poziva više puta ovisno o vremenu između poziva zadanog na ulazu *CYCLE*. Odnos između vremena pozivanja generatora impulsa (*PULSEGEN cycle*) i vremena pozivanja PID algoritma

(*CONT_C cycle*) određuje rezoluciju modulacije. U našem slučaju generator impulsa je pozivan 20 puta brže od PID algoritma čime je postignuta rezolucija modulacije od 5%. Pri tome je odabran mod rada sa binarnim upravljačkim signalom i korišten je tranzistorski digitalni izlaz.

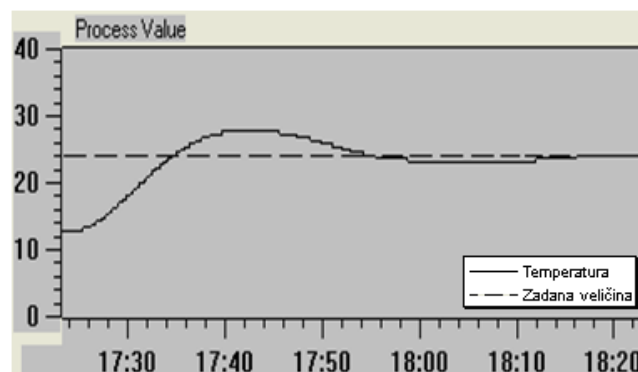
V. REZULTATI TESTIRANJA

Na laboratorijskom modelu ispitano je djelovanje regulatora oba proizvođača. Prilikom testiranja rada PID regulatora integriranog u *MicroLogix 1500* korišteno je samo PI djelovanje uz postavljene parametre $K_c=1.5$, $T_f=25$ minuta i vrijeme osvježavanja PID instrukcije od 2 sekunde. Na Sl. 9. prikazan je odziv temperature na skokovitu promjenu referentne veličine s 21°C na 50 °C. Odziv toplinskog sustava snimljen je grafičkom opcijom *Trend* koja je sastavni dio *RSLogix 500* programskog paketa.



Sl. 9. Odziv temperature korištenjem regulatora u *MicroLogix 1500*

Na jednak način ispitan je funkcijski blok PID regulatora integriranog u *S7-300* uz parametre regulatora $GAIN=2.0$, $T_f=1500$ sekundi i vremenom između poziva PID algoritma od 2 sekunde. Odziv temperature na skokovitu promjenu referentne veličine je snimljen grafičkom opcijom *Curve Recorder* koja je sastavni dio aplikacije za podešavanje osnovnih parametara PID algoritma. Dobiveni rezultat je prikazan u postocima pri čemu 25% odgovara temperaturi od 50°C (Sl. 10.).



Sl. 10. Odziv temperature korištenjem regulatora u *S7-300*

VI. ZAKLJUČAK

Korištenje i izvedba analognih PID regulatora su vrlo složeni jer promjena parametara ili strukture regulatora zahtijeva fizički zahvat na modulima. Uz to, pojavljuju se problemi diskontinuiranih veličina i smetnji u signalima koji se obrađuju.

Uvođenjem programskih PID regulatora integriranih u programirljive logičke kontrolere omogućeno je upravljanje mnoštvom složenih sustava i podsustava, a sama uporaba PID regulatora postala je jednostavnija i pouzdanija. Prednost programski realiziranih regulatora je u jednostavnoj promjeni strukture i podešenju parametara. Programske izvedbe PID algoritama uvažavaju teorijske kriterije primjene diskretnih struktura u regulaciji kontinuiranih procesa, amplitudnu i vremensku diskretizaciju, te se u uputama za korisnike navode relacije kao da se radi o kontinuiranim sustavima.

Djelovanja ispitivanih PID regulatora u istom regulacijskom sustavu očekivano je dalo usporedive rezultate točnosti i brzine regulacije. Pri tome se je *AB MicroLogix* rješenje pokazalo jednostavnije za podešavanje jer se koristi univerzalni programski blok s preglednim programskim sučeljem. Nasuprot tome, *Siemens SIMATIC* ima složenije programsko sučelje, ali i razvijenije funkcije za prilagodbu različitim vrstama procesa, te pruža znatno veće mogućnosti prilagodbe.

Posebno treba obratiti pažnju na zadavanje vremenskih konstanti koje su normirane u različitim vremenskim jedinicama (minute, sekunde).

LITERATURA

- [1] G. Malčić: *Programabilni logički kontroleri*, skripta za kolegij Procesna računala, Tehničko veleučilište u Zagrebu, Elektrotehnički odjel, Zagreb, 2006.
- [2] G. Malčić: *PID regulator u PLC-u AB Micrologix 1500*, stručni časopis Elektro, Zagreb 2005.
- [3] G. Malčić: *Prilagodba signala za PID regulator u PLC-u AB Micrologix 1500*, stručni časopis Elektro, Zagreb 2005.
- [4] G. Malčić: *Metode podešavanja PID regulatora integriranog u PLC AB Micrologix 1500*, stručni časopis Elektro, Zagreb 2005.
- [5] M. Puzak, G. Malčić: *Sustavi automatizacije – laboratorijske vježbe*, Tehničko Veleučilište u Zagrebu, Elektrotehnički odjel, Zagreb, 2006.
- [6] Allen Bradley: *MicroLogix 1200 and MicroLogix 1500 Programmable Controller Instruction set reference manual*, Publication 1762-RM001E-EN-P, October 2005.
- [7] Allen Bradley: *MicroLogix 1500 Programmable Controllers User manual*, Publication 1764-UM001B-EN-P, April 2002.
- [8] Siemens: *Standard Software for S7-300 and S7-400 PID Control - User manual*, Publication C79000-G7076-C516-01, Siemens AG, 2006.
- [9] Siemens: *Standard PID Control - User manual*, Publication A5E00204510-02, Siemens AG, Edition 2005.
- [10] H. Berger: *Automating with SIMATIC*, 3rd revised edition, Publicis Corporate Publishing, Berlin and Munich, 2006.
- [11] H. Berger: *Automating with STEP 7 in LAD and FBD*, 3rd revised edition, Publicis Corporate Publishing, Berlin and Munich, 2005.
- [12] N. Perić, I. Petrović: *Automatizacija postrojenja i procesa*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za automatiku i procesno računarstvo, Zagreb, 2004.
- [13] N. Perić: *Automatsko upravljanje*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva, Zavod za automatiku i procesno računarstvo, Zagreb, 2004.
- [14] Z. Vukić, Lj. Kuljača: *Automatsko upravljanje*, Kigen, Zagreb, 2005.
- [15] D. Tišma: *Primjena programskog PID regulatora integriranog u programirljivi logički kontroler*, diplomski rad, Tehničko Veleučilište u Zagrebu, Elektrotehnički odjel, Zagreb, 2007.