

**UNIVERZITET U KRAGUJEVCU  
MAŠINSKI FAKULTET U KRAGUJEVCU**

**PROJEKTOVANJE  
DIGITALNO UPRAVLJANOG  
LABORATORIJSKOG MODELA  
PROCESA ZA SUŠENJE VAZDUHA**

**DIPLOMSKI RAD**

**Petrović Đorđe**

*UNIVERZITET U KRAGUJEVCU  
MAŠINSKI FAKULTET U KRAGUJEVCU*

**PROJEKTOVANJE  
DIGITALNO UPRAVLJANOG  
LABORATORIJSKOG MODELA  
PROCESA ZA SUŠENJE VAZDUHA**

**DIPLOMSKI RAD**

Mentor  
Dr Milić Stojić, red. prof.

Kandidat  
Petrović Đorđe

Kragujevac, Novembar 2001.

*Posebno se zahvaljujem supruzi, ocu i majci koji su mi pružili svesrdnu podršku u svakom pogledu, bez kojih ovaj rad sigurno ne bi bio ostvaren.*

*Zahvaljujem se mom mentoru prof. Dr Miliću Stojiću na vođenju ovog diplomskog rada, Dr Milanu Matijeviću na podršci i izuzetno korisnim savetima u oblasti automatike.*

*Zahvaljujem se Mr Draganu Taranoviću, Mr Miroslavu Ravliću, dipl.ing. Radivoju Milovanoviću, Marijanu Perhineku, Dragoljubu Aleksijeviću, Aleksandru Markoviću, koji su mi približili svet elektronike, u praktičnom smislu.*

*Zahvaljujem se, Zoranu Markoviću iz firme ECM na korisnim savetima, u vezi korišćenog mikrokontrolera.*

*Veliku zahvalnost dugujem prof. Dr Živomiru Petronijeviću, koji je podstakao moje interesovanje za oblast automatike i uključio me u rad CPA, kada je i začeta ideja o realizaciji jednog ovakvog rada.*

# Sadržaj

<b>Uvod</b> .....	1
<b>I Opis laboratorijskog modela procesa za sušenje vazduha</b> .....	2
<b>II Opis i struktura kontrolera C1</b> .....	6
II.1 Mikroprocesor PIC16F84 .....	6
II.2 Napajanje .....	7
II.3 Oscilatorno kolo .....	7
II.4 Merni pretvarač, i A/D konverzija .....	8
II.5 Izvršni organ i D/A konverzija .....	10
II.6 MAX232, serijska RS232 komunikacija sa PC računarom .....	13
II.7 Digitalni kontroler C1.....	14
II.8 Program C1Comm .....	15
<b>III Identifikacija objekta upravljanja</b> .....	17
<b>IV Projektovanje regulatora</b> .....	29
<b>V Eksperimentalna verifikacija</b> .....	40
<b>VI Zaključak</b> .....	53
<b>Prilog A</b> .....	55
<b>Prilog B</b> .....	57
<b>Prilog C</b> .....	63
<b>Literatura</b> .....	65

## Uvod

Cilj diplomskog rada je realizacija laboratorijskog modela procesa za sušenje vazduha po uzoru na procesni trenažer firme *Feedback Instruments*, PT326, koji ima ulogu objekta upravljanja, projektovanje kontrolera na kome bi realizovali regulatora sa Dahlinovim algoritmom upravljanja za ovaj laboratorijski model, kao i izrada programa na PC računaru koji bi imao ulogu ulazno-izlaznog ppanoa i omogućio zapisivanje podataka u fajl na hard disku.

U I glavi biće predstavljen laboratorijski model, njegov opis i struktura. Laboratorijski model po svojim karakteristikama, izrazito nelinearan i nastacionaran, predstavlja pojednostavljeni fizički model procesa za sušenje vazduha, sušare, pa je kao takav bio interesantan, sa gledišta regulacije, za upravljanje.

Stalni razvoj elektronske industrije je uslovio pojavu elektronskih komponenti, mikrokontrolera, koji imaju relativno nisku cenu koštanja, a sa druge strane po svojim performansama omogućavaju izvođenje dosta složenih upravljačkih algoritama. Ideja je bila realizovati, na jednom ovakvom skromnom po performansama, mikrokontroleru digitalni PI zakon upravljanja i analizirati kvalitet regulacije dobiven ovakvim postupkom. Bilo je potrebno rešiti probleme, A/D i D/A konverzije, odabrati merni pretvarač i izvršni organ, uspostaviti komunikaciju sa PC računaru, napraviti program koji bio imao ulogu ulazno-izlaznog ppanoa i obezbedio akviziciju podataka. Kao rezultat ovoga projektovan je digitalni kontroler C1, čiji je opis i struktura predstavljena u glavi II .

U glavi III je izvršena identifikacija objekta upravljanja. Korišćen je metod off-line identifikacije. Nakon izvedenih eksperimenata nad objektom upravljanja, snimljene su ulazno-izlazne sekvence, pomoću kojih je postupkom parametarske identifikacije dobijen matematički model laboratorijskog modela procesa za sušenje vazduha, kao krajnji rezultat.

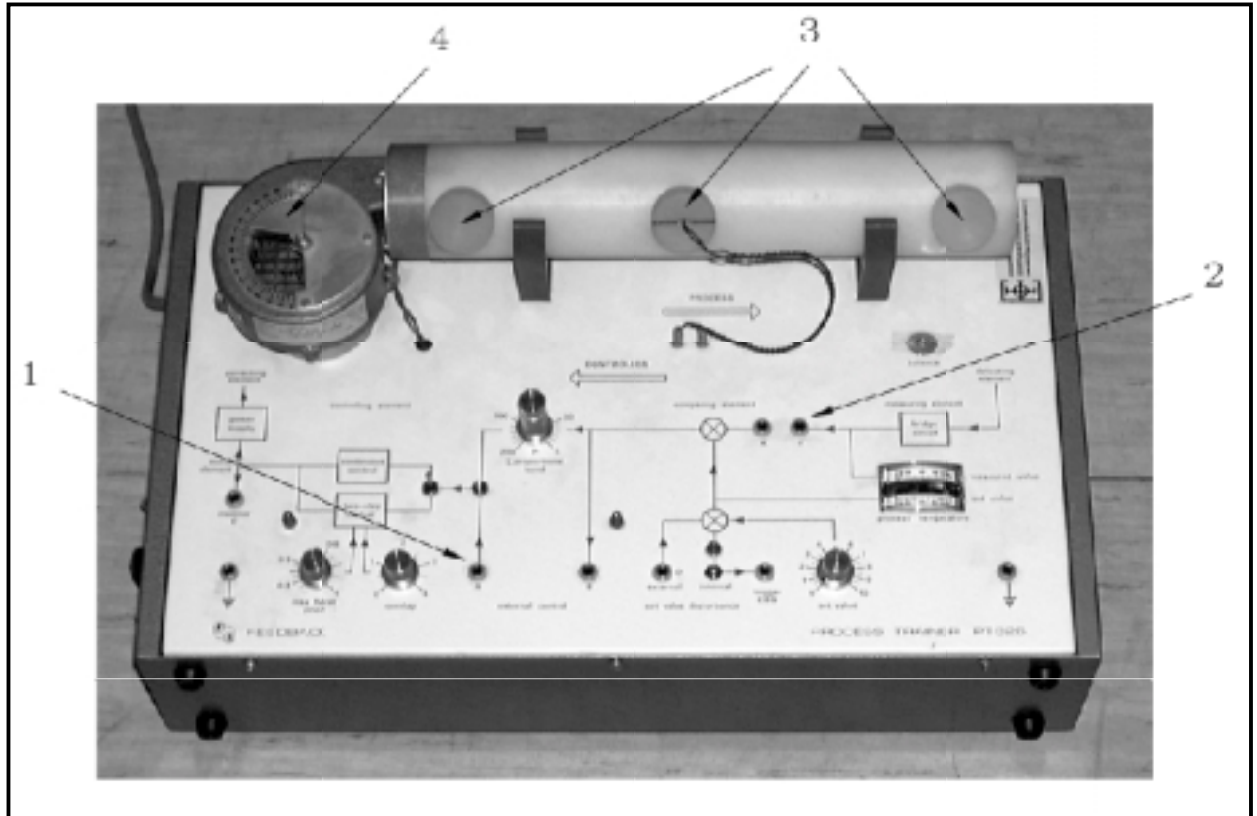
U glavi IV se pristupilo projektovanju i analizi regulatora. S obzirom da identifikovani objekt upravljanja pripada klasi sporih industrijskih procesa, odlučilo se za primenu Dahlinovog PI zakona upravljanja. Opisana je problematika realizacije zakona upravljanja na mikrokontroleru.

Eksperimentalna verifikacija predstavljena u glavi V, imala je za cilj testiranje projektovane konture regulacije u praksi. Ispitano je ponašanje sistema automatskog upravljanja u pogledu praćenja zadate trajektorije kao i suzbijanje uticaja poremećaja na upravljano promenljivo. Analiziran je uticaj podešavajućeg parametra  $\lambda$  Dahlinovog algoritma na ponašanje upravljane promenljive.

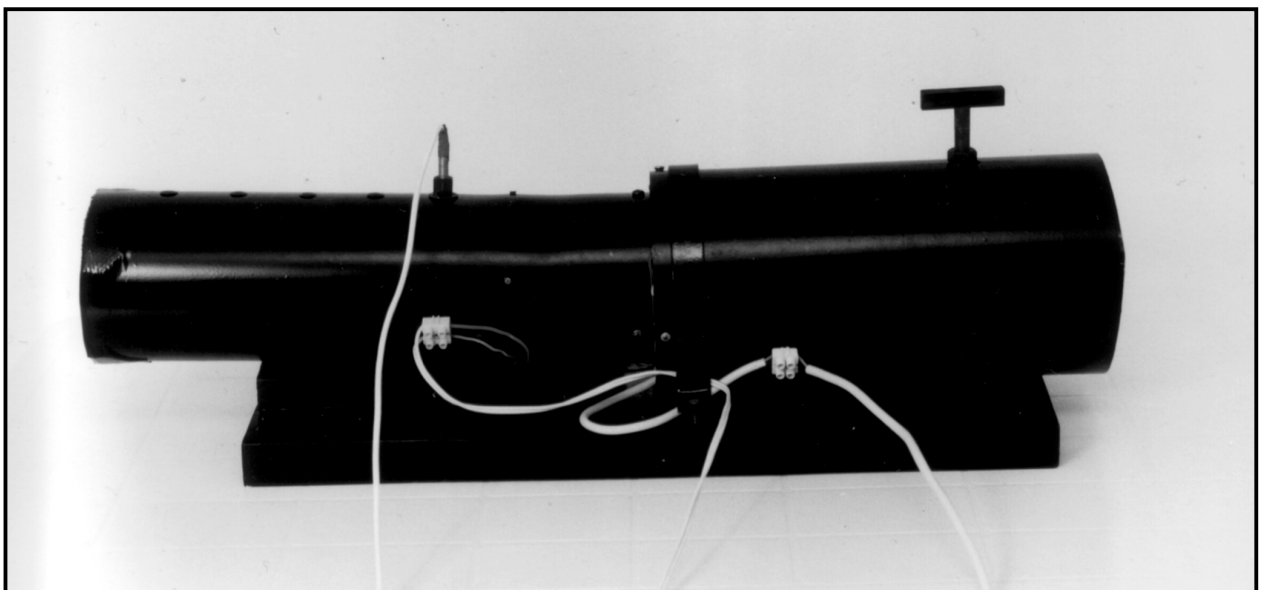
U zaključku, glava VI, izvršena je rekapitulacija ovog rada. Naglašene su pozitivne karakteristike i skrenuta pažnja na mane i nedostatke projektovanog kontrolera

## I Opis laboratorijskog modela procesa za sušenje vazduha

Po ugledu na procesni trenažer firme *Feedback Instruments*, PT326, sl. 1.1 , realizovan je laboratorijski model procesa za sušenje vazduha prikazan na sl. 1.2 .



slika 1.1 procesni trenažer PT326,  
1 – ulazna promenjiva, 2 – izlaz procesa, 3 - mesta za postavljanje senzora temperature  
(na srednjem otvoru se nalazi senzor), 4 – klapna za regulaciju protoka vazduha

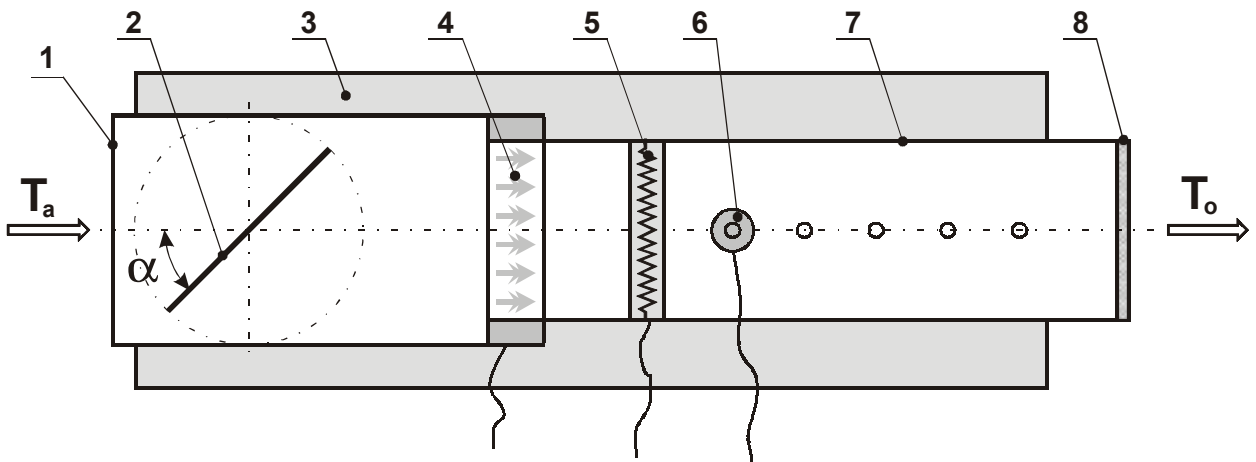


slika 1.2 laboratorijski model procesa za sušenje vazduha

Konstrukcija modela, sl. 1.2 , sadži sledeće elemente:

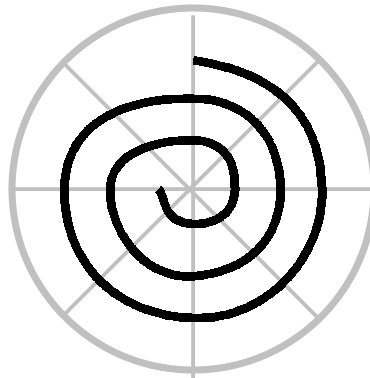
- plastičnu cev prečnika 160 mm, dužine 310 mm
- plastičnu cev prečnika 125 mm, dužine 400 mm
- drveno postolje
- prigušnik tipa klapne
- asihroni motor kao pokretač ventilatora
- grejač od cekas žice umotan spiralno
- merni pretvarač
- pet mernih mesta
- zaštitnu mrežicu

Šematski prikaz laboratorijskog modela prikazan je na slici 1.3 .



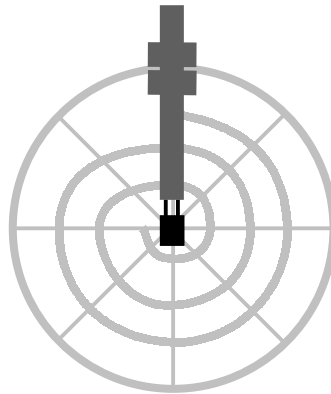
slika 1.3 šematski prikaz laboratorijskog modela: 1 - potisni vod, 2 – prigušnik, 3 – postolje, 4 – ventilator i asihroni motor, koji ga pokreće, 5 – grejač, 6 - merni pretvarač, 7 – potisni vod, 8 – zaštitna mrežica

Plastična cev (1) predstavlja usisni vod a plastična cev (7) potisni. Asihroni motor je snage 30 W i uloga mu je da pogoni ventilator i time izazove strujanje vazduha, i to, usisavanjem vazduha iz okoline usisnim vodom kroz prigušnik, i potiskivanjem kroz grejač i merni davač potisnim vodom. Asihroni motor se napaja naponom iz mreže. Grejač je od cekas žice, snage 510 W, leži u ravni poprečnog preseka potisnog voda a na rastojanju 180 mm od krilca ventilatora. Ručne je izrade. Napaja se naponom iz mreže. Umotan je spiralno, i drži se na pločicama od liskuna, kako bi se ostvario što bolji toplotni prenos sa grejača na struju vazduha, sl. 1.4 .



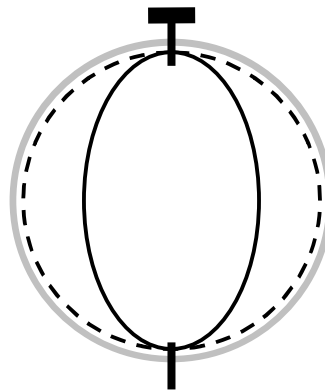
slika 1.4 šematski prikaz grejača

Merni pretvarač je KTY10 firme *Siemens*, za opseg temperatura od  $-50^{\circ}\text{C}$  do  $150^{\circ}\text{C}$ , montira se na potisnu cev šrafljenjem. Nalazi se u središtu potisnog voda (cevi), dok se udaljenost od grejača može menjati, sl. 1.5 .



slika 1.5. šematski prikaz mernog pretvarača

Prigušnik tipa klapne je od aluminijumskog lima i uloga mu je da se zaokretanjem klapne u opsegu od  $0^{\circ}$  do  $90^{\circ}$ , menja koeficijent prigušenja čime se utiče na promenu protoka struje vazduha, jer se asihroni motor okreće "konstantnom" brzinom. Promenom protoka utiče se na ponašanja procesa zagrevanja vazduha, sl. 1.6 . Mernih mesta ima 5 i na rastojanjima su 60 mm, 110 mm, 160 mm, 210 mm, 260 mm od grejača, koja su predviđena za merni pretvarač.



slika 1.6 prigušnik tipa klapne

Promena položaja mernog pretvarača utiče na parametre modela objekta upravljanja. Kod procesnog trenažera PT326 u najvećoj meri položaj je uticao na kašnjenje objekta upravljanja, međutim kod projektovanog laboratorijskog modela položaj mernog davača je u velikoj meri uticao i na statičko pojačanje objekta upravljanja a u manjoj meri i na vremensku konstantu objekta upravljanja. Da bi se to uvidelo predviđeno je više položaja za merni pretvarač. Mrežica na kraju potisnog voda ima zaštitnu ulogu u slučaju havarije grejača. Drveno postolje ima ulogu da obezbedi stabilnost konstrukcije, da bi se smanjile mehaničke vibracije koje bi mogle da izazovu neželjene efekte. Plasticne cevi imaju ulogu usisnog i potisnog voda i izdržavaju temperature u opsegu od temperature okoline  $T_a$  do  $80^{\circ}\text{C}$ , a da ne dodje do havarije laboratorijskog modela procesa za sušenje vazduha.



Laboratorijski model procesa za sušenje vazduha ima karakteristike sušare kod kojih se izvodi upravljanje da bi se održavala temperatura vazduha kojim se suši željena materija i to na način definisan tehnološkim zahtevima za željenu materiju, pa se može reći da ovaj laboratorijski model predstavlja pojednostavljeni fizički model sušare.

## II Opis i struktura kontrolera C1

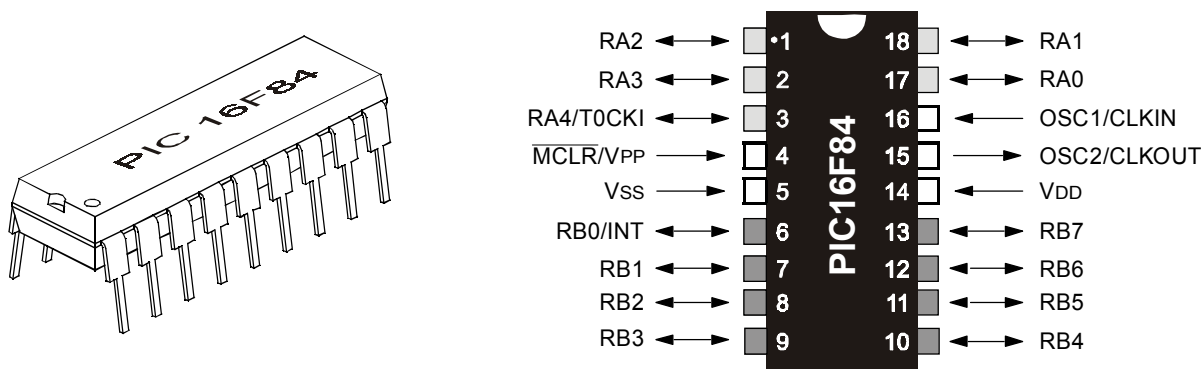
Da bi procesom mogli da upravljamo odnosno da bi realizovali projektovani regulator bilo je potrebno projektovati kontroler koji bi mogao da izvršava zahtevani algoritam upravljanja, kao i da ima mogućnost akvizicije podataka, da bi se identifikovao proces. Iz ovih razloga autor diplomskog rada je pristupio projektovanju kontrolera i nazvao ga C1.

Zadati zahtevi koje je kontroler mora obavljati definisali su sledeće operacije:

1. merenje upravljane promenljive (temperature struje vazduha)
2. izvršavanje algoritma upravljanja
3. upravljanje izvršnim organom (u ovom slučaju, snagom na grejaču)
4. komunikaciju sa PC računarom
5. komunikaciju sa korisnikom (korišćenjem programa C1Comm, ulazno/izlaznog ppanoa)

### II.1 Mikroprocesor PIC 16F84

S obzirom na zahteve koje je kontroler morao da ispuni, odabran je mikrokontroler PIC16F84 (Programable Interuptible Controler) firme *Microchip*, sl. 2.1, koji je s obzirom na svoje karakteristike [1], u hardverskom smislu, bio u mogućnosti da ih i izvrši.



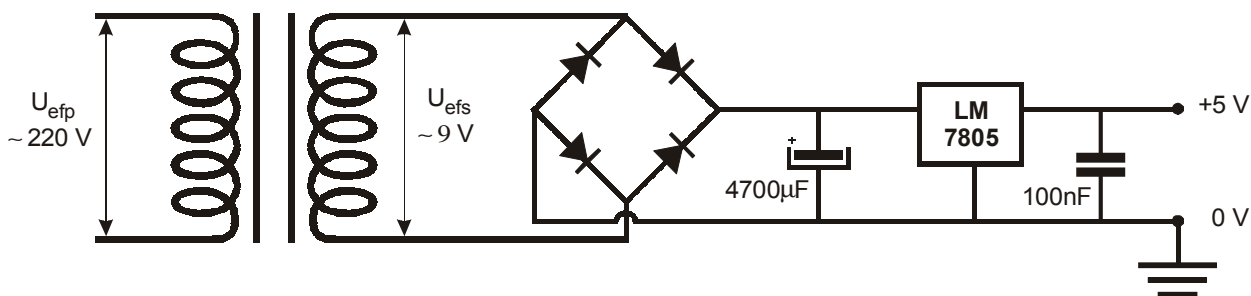
slika 2.1 prikaz i dijagram pinova mikroprocesora PIC16F84

Da bi mikrokontroler PIC16F84 mogao da radi, bilo mu je potrebno obezbediti adekvatnu periferiju i to: napajanje (5V), oscilatorno kolo za spoljni clock signal, kao i periferiju pomoću koje je trebao da ostvari merenje upravljane promenljive, upravljanje grejačem, kao i komunikaciju sa PC računarom.

S obzirom da poseduje osmobicitnu aritmetičko logičku jedinicu (ALU) i RAM memoriju (68 bajta) mogao je da izvrši sračunavanja potrebna za algoritam upravljanja.

## II.2 Napajanje

Za pouzdan i stabilan rad, odabranog mikrokontrolera PIC16F84, se mora obezbediti stabilan napon napajanja od 5V. Napajanje je rešeno jednim od standardnih načina, [2]. Na sl. 2.1 prikazana je šema električnog kola napajanja.

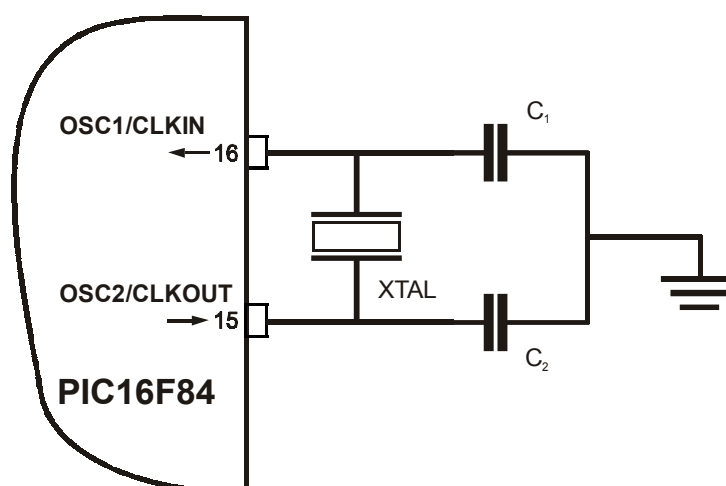


slika 2.1 električna šema kola za napajanje

Transformator pretvara naizmenični napon mreže u naizmenični napon sekundara efektivne vrednosti 9V. Preko grecovog spoja naizmenični napon se punotalasno ispravlja. Elektrolitski kondenzator ima ulogu filtra. Integralno kolo LM7805 ima ulogu da stabilizuje isfiltrirani napon i na svom izlazu da stabilnih 5V.

## II.3 Oscilatorno kolo

Oscilatorno kolo daje stabilan spoljni clock signal mikrokontroleru i prikazano je na sl. 2.2, i izvedeno je prema preporuci proizvođača mikrokontrolera firme *MicroChip* [1].

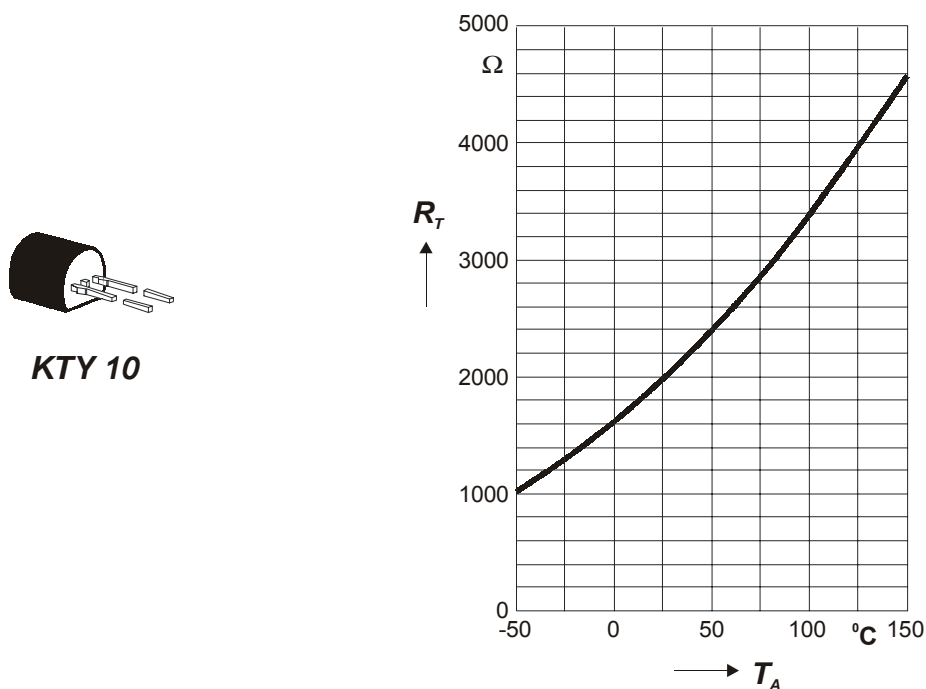


slika 2.2 električna šema oscilatornog kola

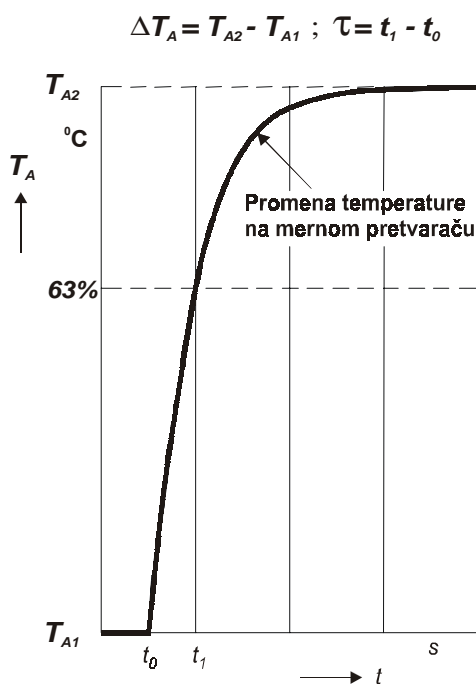
Kvarc ima učestanost 4.096 MHz, kondenzatori  $C_1$  i  $C_2$  imaju istu kapacitivnost 33 pF, i obezbeđuju spoljni clock signal frekvencije 4.096 MHz.

## II.4 Merni pretvarač, i A/D konverzija

Odabran je merni pretvarač, ptc termistor, KTY10 firme *Siemens* [3]. Ovaj merni pretvarač vrši konverziju temperature u otpornost, ptc je tipa tj. sa porastom temperature povećava mu se otpornost, i poseduje karakteristike prikazane na sl. 2.3 i 2.4 .

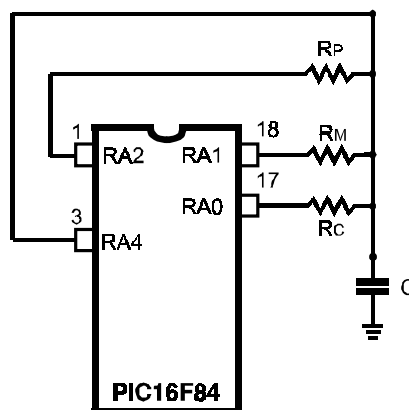


slika 2.3 prikaz i statička karakteristika mernog pretvarača KTY10

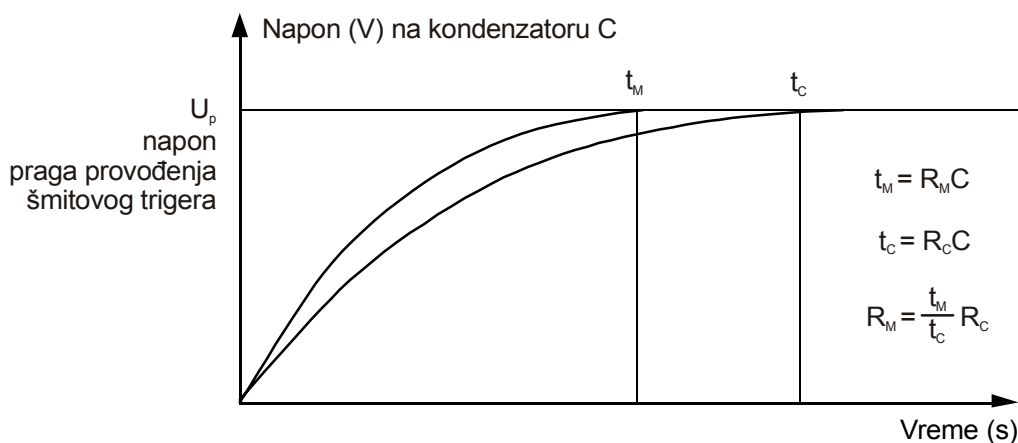


slika 2.4 odskočni odziv mernog pretvarača KTY10

Na sl. 2.4 je prikazan odskočni odziv mernog pretvarača i prema podacima proizvođača vremenska konstanta -  $\tau$  iznosi 40 s kada se merna sonda nalazi u mirnom vazduhu a kad je u ulju  $\tau$  iznosi 4 s [3].



slika 2.5 električna šema kola za A/D konverziju



slika 2.6 grafik porasta napona na kondenzatoru C

Na sl. 2.5 prikazana je šema kola za A/D konverziju. Princip rada je sledeći:

1. Kondenzator C, kapacitivnosti 2100 nF, se prazni preko otpornika  $R_p$ , otpornosti 100  $\Omega$ , kroz pin RA2 mikrokontrolera koji je setovan kao izlaz i ima vrednost 0V.
2. Kondenzator se puni preko pina RA0, sl. 2.6, koji je setovan kao izlaz i ima vrednost 5V, i otpornika  $R_c$  (kalibracionog), otpornosti 2000  $\Omega$ , pri čemu se bez prestanka kontroliše da li je napon na kondenzatoru dostigao vrednost praga provodjenja ulaznog šmitovog okidnog kola pina RA4, koji iznosi 3.45V. Kada je ovaj uslov ispunjen zapamti se vrednost vremena  $t_c$  koje je bilo potrebno da bi se kondenzator napunio do praga provodjenja.
3. Kondenzator se opet prazni preko otpornika  $R_p$  i pina RA2.
4. Kondenzator se puni preko pina RA1, sl. 2.6, koji je setovan kao izlaz, i ima vrednost 5V, i preko otpornika  $R_M$ , koji u stvari predstavlja merni pretvarač KTY10, čija se otpornost menja u zavisnosti od temperature na kojoj se nalazi, i ovo traje sve dok se ne "okine" šmitov triger na ulazu pina RA4, kao u koraku 2. , posle čega se zabeleži vreme  $t_M$  u RAM memoriji MCU PIC16F84.

5. Onda se iz relacije (2.1):

$$R_M = \frac{t_M}{t_C} \cdot R_C \quad (2.1)$$

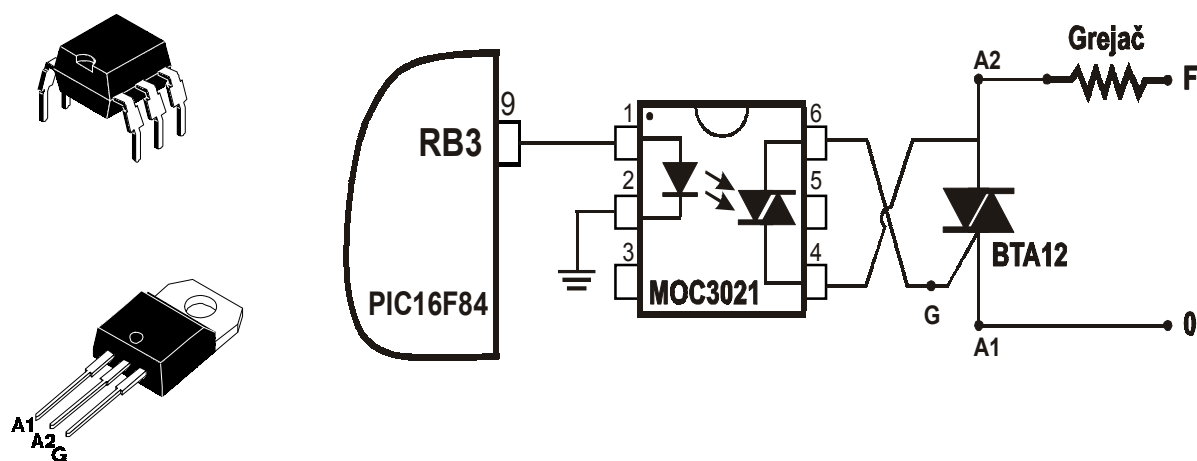
dolazi do vrednosti otpornosti mernog pretvarača, na osnovu koje se iz date karakteristike sl. 2.3 može odrediti temperatura

Znači ovim postupkom moguće je meriti upravljanu veličinu koja je u ovom slučaju bila temperatura. Vidi se da je u stvari konverzijom otpornosti u vreme, punjenjem i pražnjenjem kondenzatora, moguće meriti otpornost, odnosno temperaturu, i to na dosta jeftin način izbegavanjem mernog mosta i korišćenjem skupih A/D konvertora. Naravno ovaj metod ima i svojih mana s obzirom da je rezolucija merene veličine 11-bitna (ima 2048 nivoa u ovom slučaju) kao i da MCU PIC16F84 troši zavidno vreme na punjenje i pražnjenje kondenzatora.

Detaljan opis ovakvog načina merenja otpornosti/temperature prikazan je u literaturi [4] a u prilogu A je dat listing rutine koja izvršava ovu operacije.

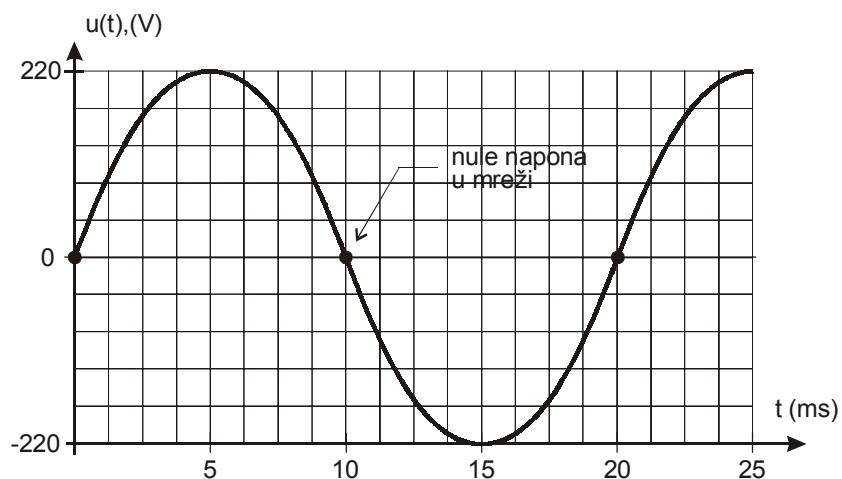
## II.5 Izvršni organ i D/A konverzija

Kod projektovanog laboratorijskog modela proces se sastoji u zagrevanju struje vazduha grejačem, koji ima ulogu aktuatora. Izvršni organ čine grejač u sprezi sa optotriakom MOC3021 firme Motorola i triacom BTA12 firme SGS Thompson, sl. 2.7 .

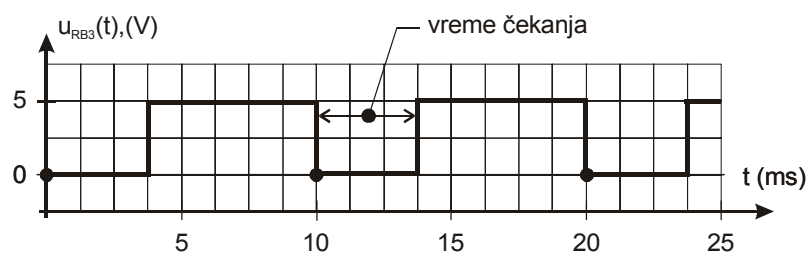


slika 2.7 MOC3021 (gore), BTA12 (dole), električna šema izvršnog organa (levo)

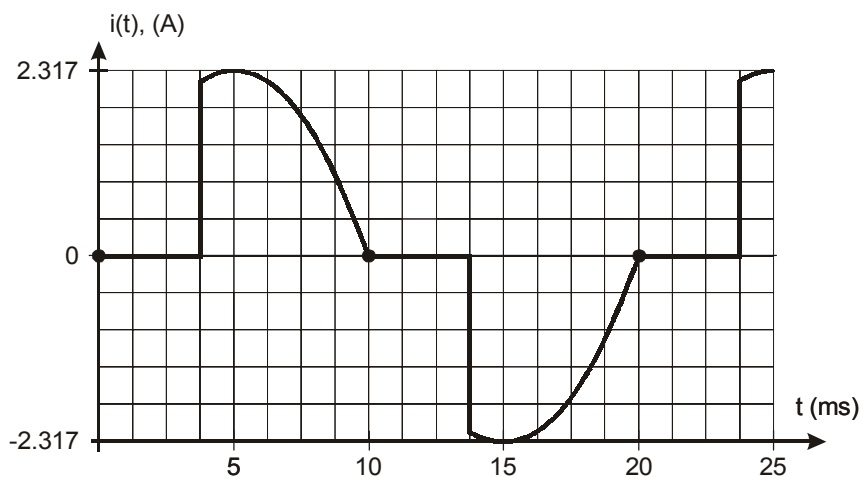
Princip rada ovog električnog sklopa se sastoji u sledećem: posle detektovanja nule napona u mreži, MCU PIC16F84 čeka određeno vreme, pomoću tajmera TMR0 mikrokontrolera, a sračunato algoritmom upravljanja, posle koga se na pin RB3 koji je setovan kao izlaz, dovede napon 5V, usled čega optotriak MOC3021 pusti struju u gejt triaca BTA12 nakon čega on pređe u provodno stanje i pušta struju kroz grejač, sve do pojave naredne nule napona mreže sl 2.9, 2.10, 2.11, 2.12 .



slika 2.9 vremenski dijagram trenutne vrednosti napona u mreži



slika 2.10 vremenski dijagram napona na RB3 pinu



slika 2.11 vremenski dijagram trenutne vrednosti struje kroz grejač



slika 2.12 vremenski dijagram trenutne vrednosti snage na grejaču

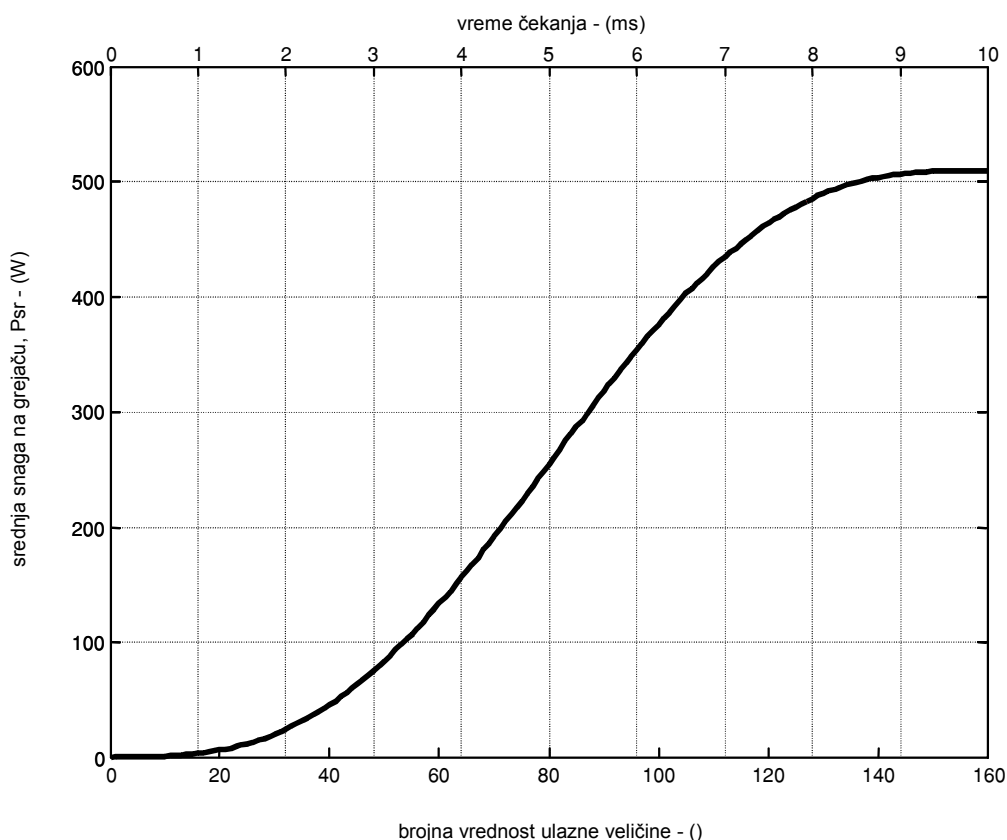
$$p(t) = u(t) \cdot i(t) \quad (2.2)$$

Kako trenutna vrednost snage predstavlja proizvod trenutne vrednosti napona i struje kroz grejač (2.2) vidi se da ćemo ovakvim postupkom uticati na srednju vrednost snage na grejaču, koja je po definiciji [5]:

$$P_{sr} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T p(t) \cdot dt = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} p(t) \cdot dt \quad (2.3)$$

$$P_{sr} = \frac{2}{T} \cdot \int_0^{\frac{T}{2}} u(t) \cdot i(t) \cdot dt \quad (2.4)$$

S obzirom na mogućnosti i princip rada tajmera MCU PIC16F84 [1], došlo se do ograničenja od mogućih 160 nivoa za regulaciju srednje snage na grejaču. Na slici 2.10 prikazana je zavisnost srednje snage na grejaču od vremena čekanja, tj od 160 nivoa (vrednosti) upravljačke promenljive algoritma upravljanja.

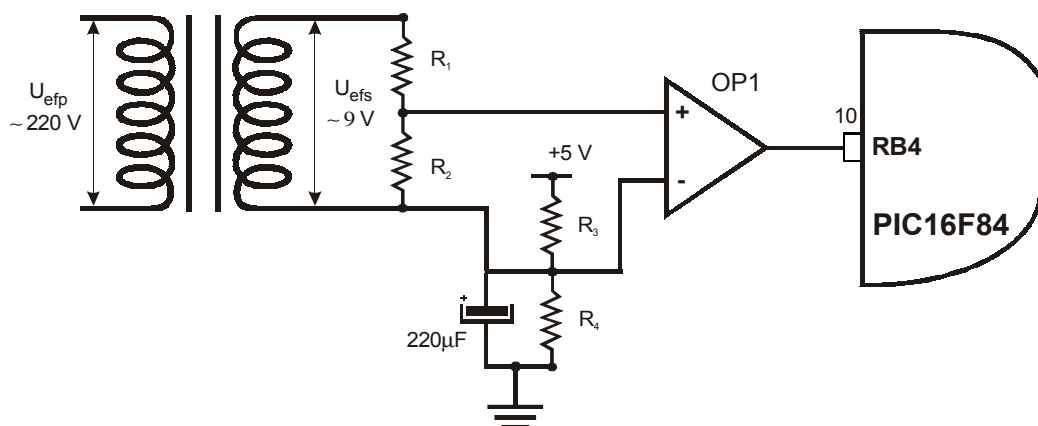


slika 2.13 ulazno-izlazna karakteristika izvršnog organa

Sa sl. 2.13 se vidi da je izvršni organ dosta nelinearan što će se kasnije i pokazati pri identifikaciji.

Da bi mogla na ovaj način da se kontroliše srednja snaga na grejaču, bilo je potrebno i projektovati električno kolo za sinhronizaciju sa mrežom sl. 2.14 .





slika 2.14 šema električnog kola za sinhronizaciju sa mrežom

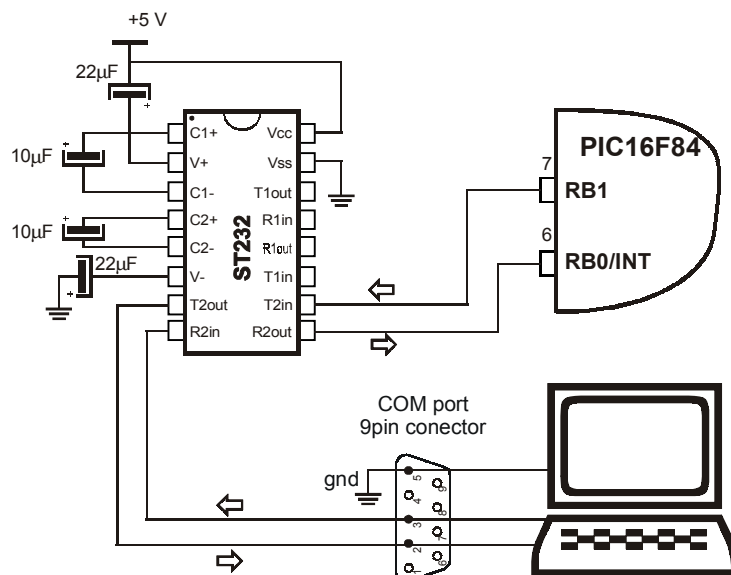
Naizmenični napon na sekundaru transformatora se preko razdelnika napona, otpornika  $R_1$  i  $R_2$ , smanjuje na adekvatnu vrednost i takav dovodi na neinvertujući ulaz operacionog pojačavača OP1, koji u ovom kolu ima ulogu komparatora. Na invertujući ulaz OP1 doveden je referentni napon komparatora (+2.5V). Na izlazu OP1 se dobijaju pravougaonici i to viši nivo (+5V) kad je napon na neinvertujućem ulazu veće vrednosti od referentnog napona i niži nivo (0V) u suprotnom. Ovakav signal sa izlaza komparatora se vodi na RB4 pin MCU PIC16F84, koji izaziva interapt i taj trenutak u stvari predstavlja momenat kada je nula mrežnog napona od kog tajmer počinje da meri vreme čekanja.

Snaga na grejaču se kontroliše električnim sklopom optotriak-triak promenom faznog ugla. Promena vremena čekanja od nule mrežnog napona do trenutka provođenja optotriak-triaka u opsegu od 0 do 10 ms utiče na promenu faznog ugla od 0 do  $180^\circ$ , što odgovara promeni snage na grejaču od 0 do 510 W. Grejač ima funkciju pretvarača energije (električne u toplotnu) i direktno utiče na upravljanu promenljivu. Količina toplote stvorena na grejaču prelazi na vazduh, pri čemu toplotni protok zavisi od temperature grejača i protoka fluida kroz cev. Ovaj prenos toplote u jedinici vremena raste sa porastom temperature grejača i porastom protoka vazduha

Korišćeni način upravljanja srednjom snagom na grejaču se zove fazna regulacija, jer se u stvari upravlja faznim uglom, a neki autori je nazivaju i PWM (*Pulse Wide Modulation*). Na ovaj način je izvedena i D/A konverzija.

## II.6 MAX232, serijska RS232 komunikacija sa PC računarom

Kako mikrokontroler PIC16F84 ima izlazne napone 0 ili 5 V na svojim pinovima za nizak i visok logički nivo, a na strani COM porta PC računara  $-10V$  za logičku nulu i  $+10V$  za logičku jedinicu, potrebno je izvršiti prilagođenje signala, kako bi se komunikacija obavila. Ovaj problem se rešava korišćenjem elektronske komponente MAX232 koji ovo prilagođenje treba da izvrši. Za ovaj kontroler korišćena je zamena ove komponente, komponenta ST232 firme *SGS Thompson*, koja je na isti način rešavala ovaj problem.



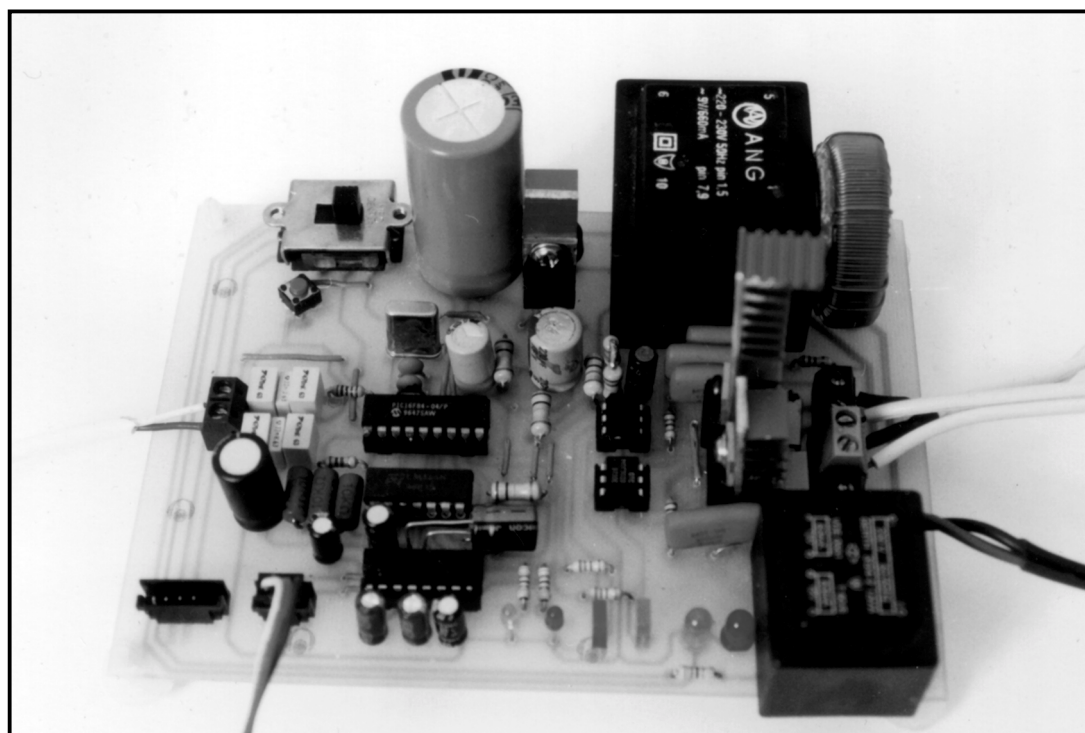
slika 2.15 električna šema povezivanja PIC16F84 i PC računara preko ST232

Na slici 2.15 je prikazan električna šema povezivanja mikrokontrolera PIC16F84 i PC računara preko komunikacionog interfejsa ST232.

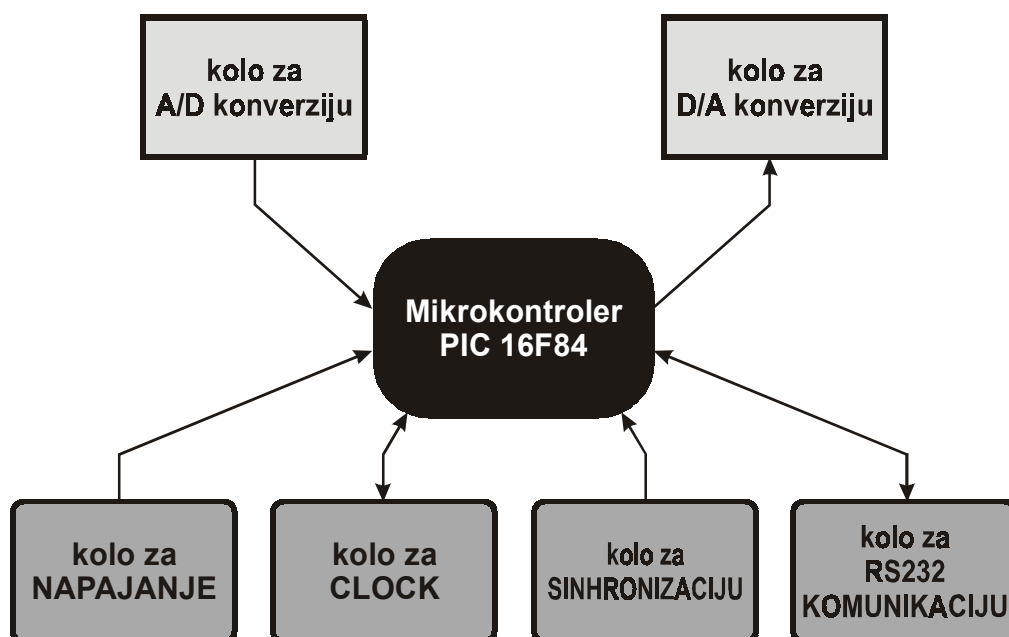
Kod većine mikrokontrolera postoji serijska komunikacija obezbeđena hardverski kao na primer kod mikrokontrolera PIC16F877 firme *Microchip*, što nije bio slučaj kod PIC16F84, kod koga se ovo moralo rešiti softverski. Kontrolera C1 komunicira serijski sa PC računarom brzinom prenosa od 9600 bauda u formatu NRZ (Non Return to Zero), bez pariti bita. Detaljan opis komunikacije opisan je u literaturi [2].

## II.6 Digitalni kontroler C1

U prethodnom tekstu je detaljno objašnjeno i date su električne šeme periferije mikrokontrolera PIC16F84. Na sl. 2.16 prikazan je kontroler C1, a na sl. 2.17 šematski prikaz kontrolera.



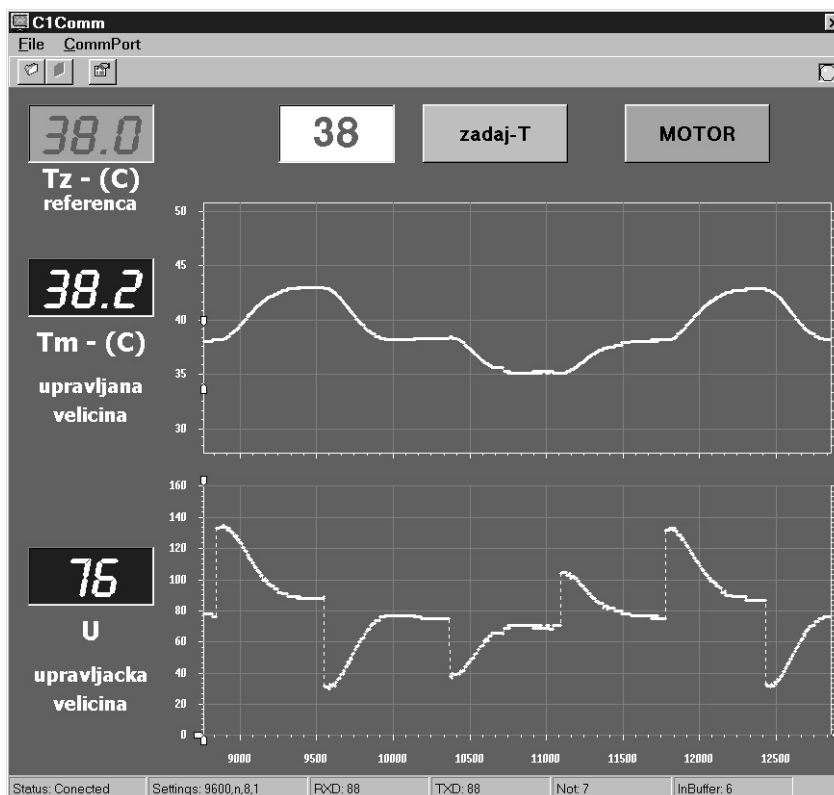
slika 2.16 kontroler C1



slika 2.17 shematski prikaz kontrolera C1

## II.7 Program C1Comm

Pored ostvarene serijske komunikacije sa comm portom PC računara bilo je potrebno uraditi program koji bi podatke primljene na portu računara prikazivao, kao i omogućio da se zadaju željene vrednosti upravljane promenljive kontroleru. Znači bio je potreban program koji bi vršio ulogu ulazno-izlaznog panoa, odnosno interfejsa korisnika sa kontrolerom. Pa je u cilju ostvarenja ovih zahteva i uradjen program C1Comm u programskom jeziku *MS Visual Basic 6.0*. Na sl. 2.18 je prikazan interfejs programa C1Comm.

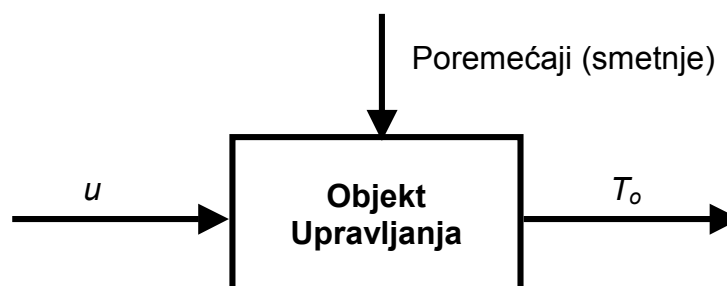


slika 2.18 program C1Comm

Serijska komunikacija sa kontrolerom C1 se uspostavlja pritiskom na taster u gornjem desnom uglu, u obliku crvenog kružića, koji po uspostavljanju komunikacije menja boju u zeleno i obratno. Pritiskom na taster **MOTOR** aktivira se asihroni motor laboratorijskog modela i kontroler počinje sa radom. Program ima textbox za unos zadate vrednosti upravljane promenljive, a zadaje se kontroleru pomoću tastera **zadaj-T**. U donjem delu vide se dve oblasti za grafički prikaz u vremenskom domenu upravljane u gornjoj i upravljačke u donjoj oblasti. Grafici se kontinualno pomeraju s desna na levo. U "Fajl-open\_logfile" meniju moguće je otvoriti log fajl u koji će se upisivati vrednosti zadate upravljane promenljive, trenutne vrednosti upravljane promenljive i vrednosti upravljačke promenljive. Čime je omogućena akvizicija podataka. Aktiviranjem "Fajl-close\_logfile" opcije "Fajl" menija zatvara se log fajl koji je kasnije moguće importovati u programski paket Matlab, kao i u neke druge, i zabeležene podatke obrađivati kakav je slučaj bio kada se vršila identifikacija u ovom diplomskom radu.

### III Identifikacija objekta upravljanja

Identifikacija objekta upravljanja ili sistema upravljana znači nalaženje matematičkog modela dinamičkih sistema bazirano na razmatranju podataka o i iz sistema. Pod terminom sistem smatramo objekat kod koga su promenljive različitih vrsta u interakciji i proizvode opservabilne signale. Opservabilni signali koji su od interesa za nas, nazivaju se izlazi. Spoljni signali izazvani od strane čoveka ili nekog elementa SAU zovemo smetnje, u opštem slučaju. One mogu biti podeljenije na direktno merljive i na one čije se dejstvo uočava kroz njihov uticaj na izlaz [6] .



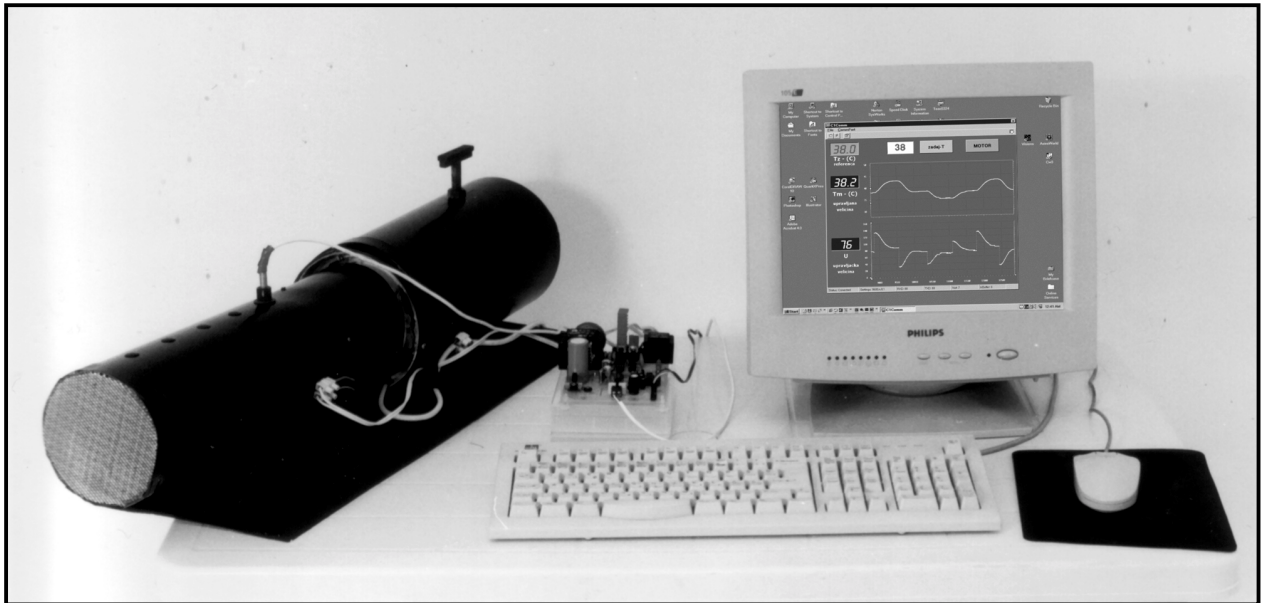
slika 3.1 strukturalni blok dijagram

Pored matematičkog modeliranja sistema, koji se bazira na uspostavljanju zavisnosti između opservabilnih varijabli sistema putem matematičkih izraza u vidu diferencijalnih ili diferentnih jednačina, postoje načini kod kojih se izvode eksperimenti, pri kojima se mere i zapisuju signali ulaza i izlaza, na osnovu kojih se formira model sistema. Drugi način se naziva identifikacija sistema ili objekta upravljanja, koji je i primenjen u ovom radu.

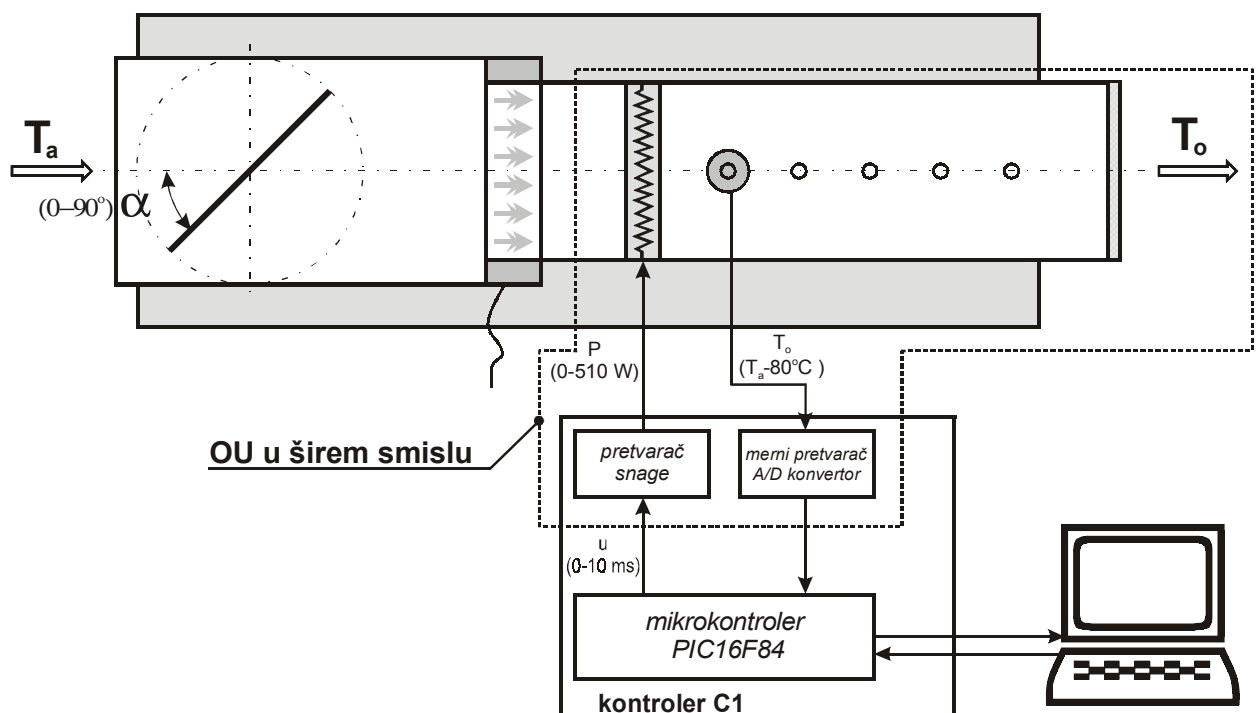
Metode identifikacije moguće je klasifikovati na razne načine. Metode koje koriste ulazne signale tokom rada sistema a na osnovu kojih se dolazi do modela sistema u realnom vremenu, pripadaju klasi on-line metoda identifikacije. Metode koje takođe koriste ulazne signale koji postoje u normalnom režimu rada, ali kod kojih se eksperimentalno dobijeni podaci registruju i tek kasnije obrađuju, a ne u toku rada sistema. Nazivaju se off-line metode identifikacije. Nekad se kod njih koriste i specijalni test signali (impuls, step, rampa).

Kada je poznata struktura sistema, zadatak identifikacije je određivanje vrednosti parametara sistema koji ga opisuju, ovakav metod se naziva parametarska identifikacija, koja je u ovom radu primenjena, korišćenjem odskočnog ulaznog dejstva i analiziranjem vremenskog odziva sistema (izlaza) u toku prelaznog procesa i stacionarnog stanja. Sistem je identifikovan kada se odstupanja između realnog sistema i modela svedu na prihvatljiv nivo. Nivo prihvatljivosti zavisi od objekta i aplikacije u svakom konkretnom slučaju.

Cij je identifikovati objekat upravljanja u širem smislu (u daljem tekstu objekt upravljanja - OU), laboratorijskog modela procesa za sušenje vazduha. Na sl. 3.2 prikazana je korišćena oprema za identifikaciju objekta upravljanja u širem smislu, a na sl. 3.3 njen šematski prikaz.



slika 3.2 oprema korišćena za identifikaciju



slika 3.3 šematski prikaz korišćene oprema za identifikaciju OU

Proces se sastoji u prenosu toplote, koja se grejačem prevodi iz električne u toplotnu energiju, na struju vazduha koju pogoni ventilator. Količina toplote koju će se na fluid preneti zavisi od temperature na grejaču i njegovog protoka kroz cev.

Fluid pokreće ventilator koga pogoni asihroni motor direktno vezan na gradsku mrežu, a na protok se utiče okretanjem klapne prigušnika. Ventilator usisava vazduh temperature ambijenta  $T_a$ . Promene protoka vazduha i ambijentalne temperature  $T_a$  su poremećaji koji deluju na proces. Moguće varijacije mrežnog napona imaju uticaj na rad sistema. Promenom napona u mreži direktno se utiče na brzinu obrtanja asihronog motora, tj ventilatora, što direktno utiče na protok fluida, a kvadratno na vrednost snage

na grejaču. Cev potisnog voda i fluid su u međusobnoj termodinamičkoj interakciji, u nekim trenucima cev se zagrejava od strane vazduha, i suprotno zagrejana cev greje vazduh. Dinamika ovog poremećaja je nepoznata i različita s obzirom na smer prenosa toplote. Osim ovih poremećaja postoji niz drugih uticaja čije bi efekte lakše mogli opisati šumom koji deluje na proces, i to: turbulencija vazduha u cevi, ograničena i niska rezolucija A/D konvertora, kao i vrlo niska rezolucija D/A konvertora, neidealno napravljen ventilator, zazor i oscilacije u mehaničkim sklopovima.

Objekat upravljanja u širem smislu obuhvata pretvarač snage, električni sklop optotriak-triak, proces konverzije električne energije u toplotu putem grejača, prenos toplote sa grejača na fluid i plastičnu cev potisnog voda, proces prenosa toplote sa fluida na merni pretvarač, konverzija temperature mernog pretvarača u otpornost, konverzija otpornosti mernog pretvarača u temperaturu u obliku digitalnog broja.

Laboratorijski model procesa za sušenje vazduha predstavlja objekat upravljanja koji je vrlo nelinearan i nestacionaran što će se i videti u daljem tekstu [7]. Pripada klasi sporih industrijskih procesa čije se dinamičko ponašanje u okolini radne tačke može dobro aproksimirati funkcijom prenosa sa jednom ili više vremenskih konstanti i vremenskim kašnjenjem. Broj vremenskih konstanti, odnosno red sistema, kod termodinamičkih procesa, kao što je ovaj, odgovara postojećem broju toplotnih kapaciteta što bi u našem slučaju bili grejač, fluid u cevi, cev, termistor (merni pretvarač), itd. Proces kod koga se snaga električne energije putem grejača prevodi u toplotnu energiju zagrevanjem cekas žice grejača a sa nje na fluid koji kroz grejač struji, može se modelirati funkcijom prenosa drugog reda. Ukoliko se uzme u obzir i toplotni kapacitet zidova plastične cevi, i toplotni kapacitet termistora, dolazimo do modela četvrtog reda koji je još bliži stvarnoj situaciji. U praksi se obično teži izboru modela objekta upravljanja koji ima što manji broj parametara koji ga opisuju.

Da bi obavili postupak identifikacije objekta upravljanja, u opštem slučaju, potrebno je [7]:

1. imati ulazno-izlazne podatke o objektu,
2. odlučiti se za klasu modela objekta, i
3. izvršiti procenu dobrote modela u odnosu na eksperimentalne podatke.

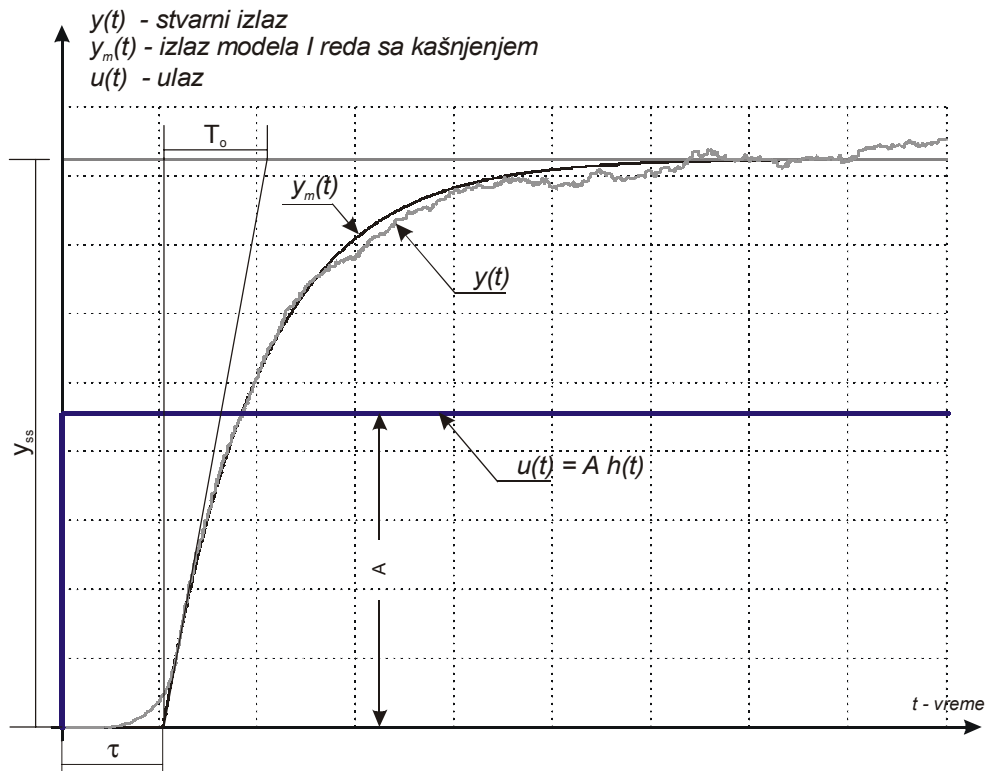
Upravljački signal  $u$  (ms) tj. ulaz u objekat upravljanja generiše kontroler C1, a izlaz,  $T_o$  (°C) u obliku digitalnog broja predstavlja izlaz iz objekta upravljanja odnosno upravljaju promenljivu koju kontroler registruje. Putem serijske komunikacije ulazno-izlazne vrednosti kontroler šalje PC računaru, koje se programom C1Comm beleže u fajl na hard disku računara.

Obzirom na karakteristike objekta upravljana (nelinearnosti, nestacionarnost, poremećaji) odlučeno je da se dinamičko ponašanje u okolini radne tačke aproksimira funkcijom prenosa prvog reda sa vremenskim kašnjenjem, izraz (3.1).

$$G_o(s) = \frac{L[T_o(t) - T_{onom}]}{L[u(t) - u_{nom}]} = \frac{T(s)}{u(s)} = \frac{K_o}{T_o \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s} \quad (3.1)$$

gde su:

- $K_o$  – statičko pojačanje OU
- $T_o$  – vremenska konstanta OU
- $\tau$  – vremensko kašnjenje OU



slika 3.4 aproksimacija stvarnog odziva sistema sa odzivom modela objekta I reda

Na sl. 3.4 prikazan je stvarni odskočni odziv i njegova aproksimacija modelom objekta I reda sa vremenskim kašnjenjem [6]. Vidi se da je moguće sa grafika skinuti vrednosti i odrediti parametre modela I reda OU  $K_o$ ,  $T_o$  i  $\tau$ .

$$K_o = \frac{y_{ss}}{A} \quad (3.2)$$

Statičko pojačanje  $K_o$  se može odrediti iz relacije (3.2), a vremenska konstanta  $T_o$  i vremensko kašnjenje  $\tau$  očitavanjem vrednosti odsečaka naznačenih na sl. 3.4. Ovaj grafoanalitički postupak identifikacije nije bio primenjen u ovom radu s obzirom na sve veći razvoj računarske tehnike i softverskih paketa koji imaju adekvatnija rešenja i lakši su za upotrebu.

U ovom radu je primenjen metod parametarske identifikacije korišćenjem odskočne funkcije na ulazu [6]. Parametarski model, tj autoregresioni eksterni (Auto regression eXternal) (ARX) model, u opštem slučaju ima oblik:

$$G(q) = \frac{T_m(q)}{u(q)} = q^{-nk} \cdot \frac{B(q)}{A(q)} \quad (3.3)$$

gde su  $A$  i  $B$  polinomi u funkciji operatora kašnjenja  $q^{-1}$

$$A(q) = 1 + a_1 \cdot q^{-1} + \dots + a_{na} \cdot q^{-na} \quad (3.4)$$

$$B(q) = b_1 + b_2 \cdot q^{-1} + \dots + b_{nb} \cdot q^{-nb+1} \quad (3.5)$$



$na$  i  $nb$  predstavljaju redove polinoma  $A$  i  $B$ , respektivno.  $nk$  predstavlja broj perioda uzorkovanja za koje izlaz kasni u odnosu na ulaz. ARX model se može predstaviti i u obliku:

$$A(q) \cdot T_m(q) = B(q) \cdot u(q) \cdot q^{-nk} \quad (3.6)$$

$$(1 + a_1 \cdot q^{-1} + \dots + a_{na} \cdot q^{-na}) \cdot T_m(q) = (b_1 + b_2 \cdot q^{-1} + \dots + b_{nb} \cdot q^{-nb+1}) \cdot u(q) \cdot q^{-nk} \quad (3.7)$$

$$T_m(q) + a_1 \cdot T_m(q) \cdot q^{-1} + \dots + a_{na} \cdot T_m(q) \cdot q^{-na} = b_1 \cdot u(q) \cdot q^{-nk} + b_2 \cdot u(q) \cdot q^{-nk-1} + \dots + b_{nb} \cdot u(q) \cdot q^{-nk-nb+1} \quad (3.8)$$

$$T_m(k) + a_1 \cdot T_m(k-1) + \dots + a_{na} \cdot T_m(k-na) = b_1 \cdot u(k-nk) + b_2 \cdot u(k-nk+1) + \dots + b_{nb} \cdot u(k-nk-nb+1) \quad (3.9)$$

Relacija (3.9) predstavlja ARX model, u opštem slučaju, u obliku diferencne jednačine pomoću koje se metodom najmanjih kvadrata mogu odrediti koeficijenti polinoma  $A$  i  $B$ ,  $a_{i=1,na}$  i  $b_{j=1,nb}$ .

Kako ARX model predstavlja diskretni oblik modela, biće potrebno izvršiti diskretizaciju kontinualnog modela (3.1) i uspostaviti veze između odgovarajućih parametara.

$$G_o(q) = Z[G_{h0}(s) \cdot G_o(s)] \quad (3.10)$$

$$G_o(q) = Z\left[\frac{1 - e^{-sT}}{s} \cdot \frac{K \cdot e^{-\tau s}}{T_o \cdot s + 1}\right] \quad (3.11)$$

$$G_o(q) = K \cdot q^{-d} \cdot (1 - q^{-1}) \cdot Z\left[\frac{\frac{1}{T_o}}{s \cdot \left(s + \frac{1}{T_o}\right)}\right] \quad (3.12)$$

$$G_o(q) = \frac{T_m(q)}{u(q)} = K \cdot q^{-d} \cdot \frac{1 - e^{-\frac{T}{T_o}}}{q - e^{-\frac{T}{T_o}}} \quad (3.13)$$

$$T_m(q) \cdot \left(q - e^{-\frac{T}{T_o}}\right) = K \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_o}}\right) \cdot u(q) \cdot q^{-d} \quad (3.14)$$

$$T_m(q) - e^{-\frac{T}{T_o}} \cdot T_m(q) \cdot q^{-1} = K \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_o}}\right) \cdot u(q) \cdot q^{-d-1} \quad (3.15)$$

$$T_m(k) - e^{-\frac{T}{T_o}} \cdot T_m(k-1) = K \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_o}}\right) \cdot u(k-d_1) \quad (3.16)$$

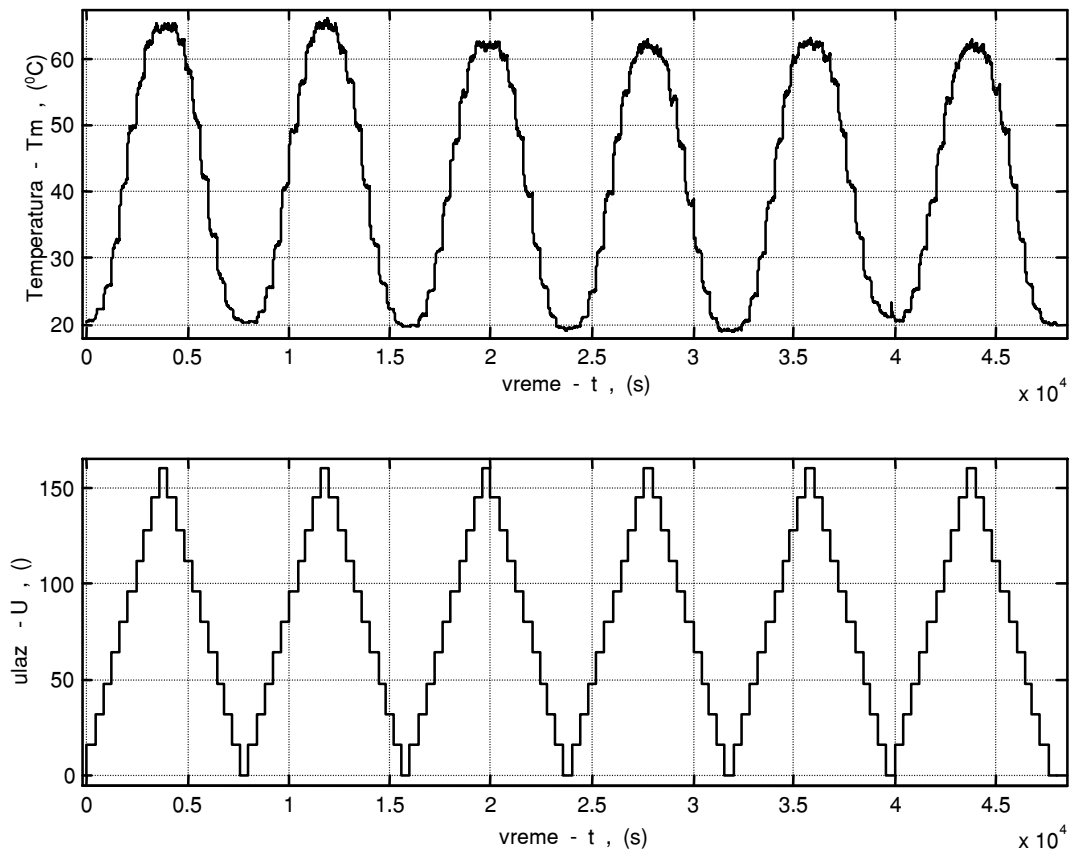
Upoređivanjem izraza (3.16) i (3.9) vidimo da je red polinoma ARX modela objekta upravljanja,  $na=1$  i  $nb=1$ , kao i da postoje sledeće zavisnosti:

$$b_1 = K \cdot \left( 1 - e^{-\frac{T}{T_o}} \right) \Rightarrow K = \frac{b_1}{1 - e^{-\frac{T}{T_o}}} \quad (3.17)$$

$$a_1 = -e^{-\frac{T}{T_o}} \Rightarrow T_o = \frac{-T}{\ln(-a_1)} \quad (3.18)$$

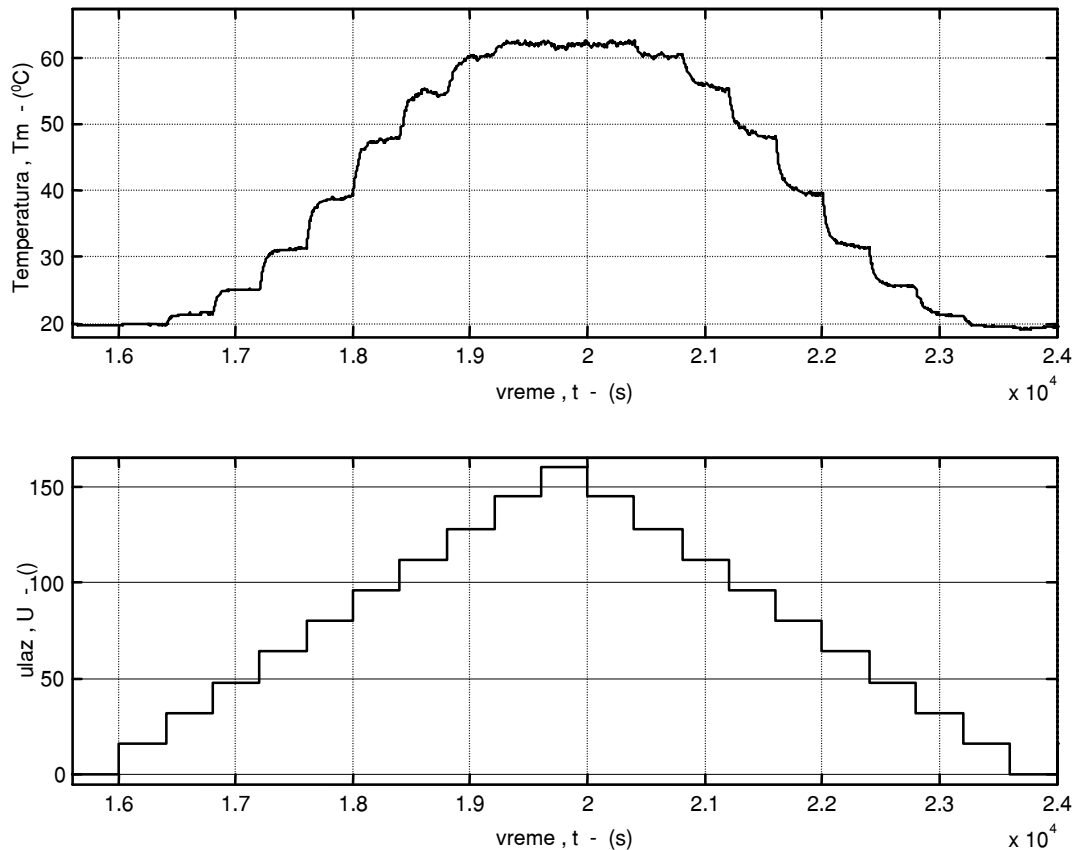
Izrazi (3.17) i (3.18) predstavljaju matematičke relacije pomoću kojih je moguće odrediti statičko pojačanje  $K$ , vremensku konstantu  $T_o$ , dok se vremensko kašnjenje  $\tau$  procenjuje na osnovu odskočnog odziva (vizuelno).

Na eksperimentalnoj opremi prikazanoj na sl. 3.2, sprovodi se eksperiment nad objektom upravljanja. Eksperiment se sastoji u delovanju odskočnom funkcijom na ulazu i snimanju izlaznih i ulaznih sekvenci. Merenje je obavljeno sa periodom odabiranja  $T=0.04$  s. Amplituda ulaznog signala  $A$ ,  $u(t)=A \cdot h(t)$ , se uvećavala u koracima od po 10% od  $u_{max}$  i obratno, a u opsegu od 0% do 100% od maksimalne vrednosti upravljačke promenljive  $u_{max}$  [6]. Svaki step je delovao u vremenskom



slika 3.5 ulazno izlazna sekvenca, otklon klapne  $\alpha = 0^0$

intervalu od 400 s, što je bilo dovoljno da izlazna promenljiva dostigne stacionarno stanje. Menjan je otklon klapne prigušnika i to za vrednosti  $\alpha = 0^0, 22.5^0$  i  $33.75^0$ . Za svaki otklon klapne obavljeno je po 6 eksperimenata. Na sl. 3.5 prikazan je set sekvenci ulaza i izlaza za otvor klapne  $\alpha = 0^0$ .



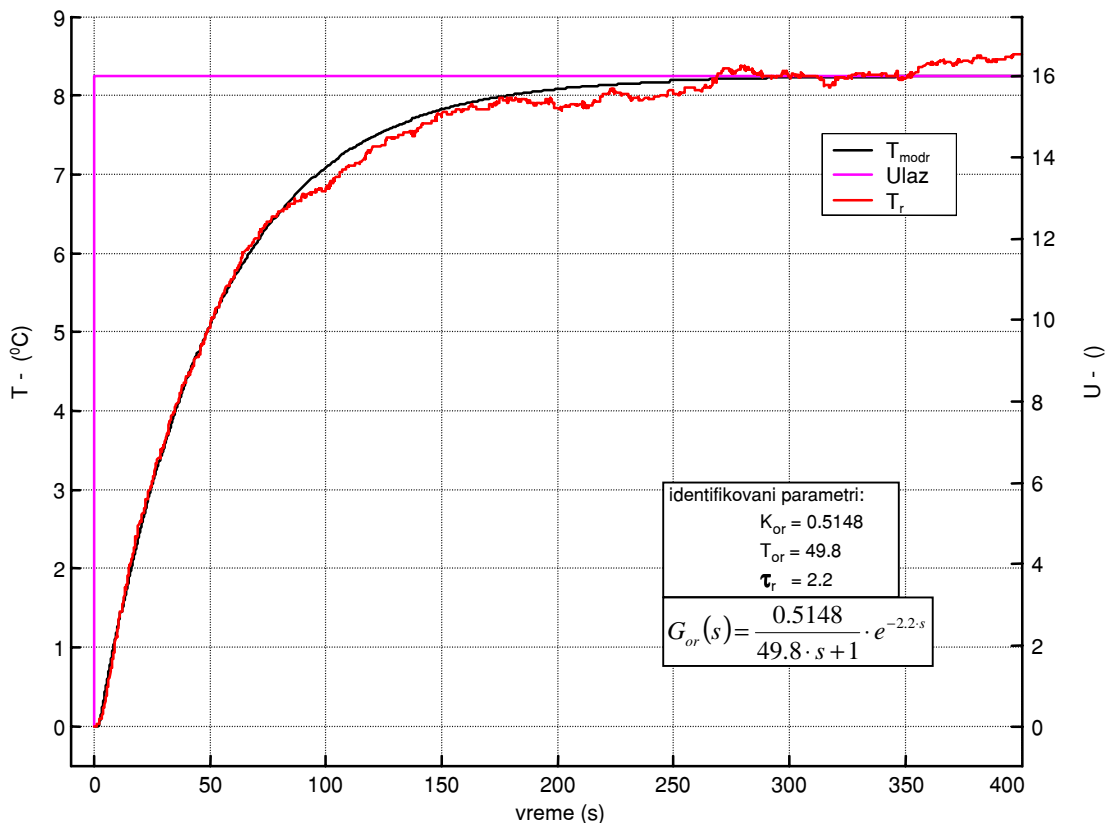
slika 3.6 ulazno izlazna sekvenca za  $t = 16000$  do  $24000$  s, otklon klapne  $\alpha = 0^0$

Na sl. 3.6, prikazana je ulazno-izlazna sekvenca, sa koje se vidi da iako je ulaz bio istovetan u svih 6 ponavljanja, objekt upravljanja nije imao istu izlaznu sekvencu što je bilo izazvano uticajem spoljnog poremećaja, temperaturom okoline  $T_a$ , koja se menjala tokom izvođenja, jer je eksperiment trajao dugo. Takođe se vidi da iako OU dostiže stacionarno stanje, vrednost izlaza se menjala u stacionarnom stanju na šta je u najvećoj meri uticao spoljni poremećaj, napon u mreži  $U_m$ .

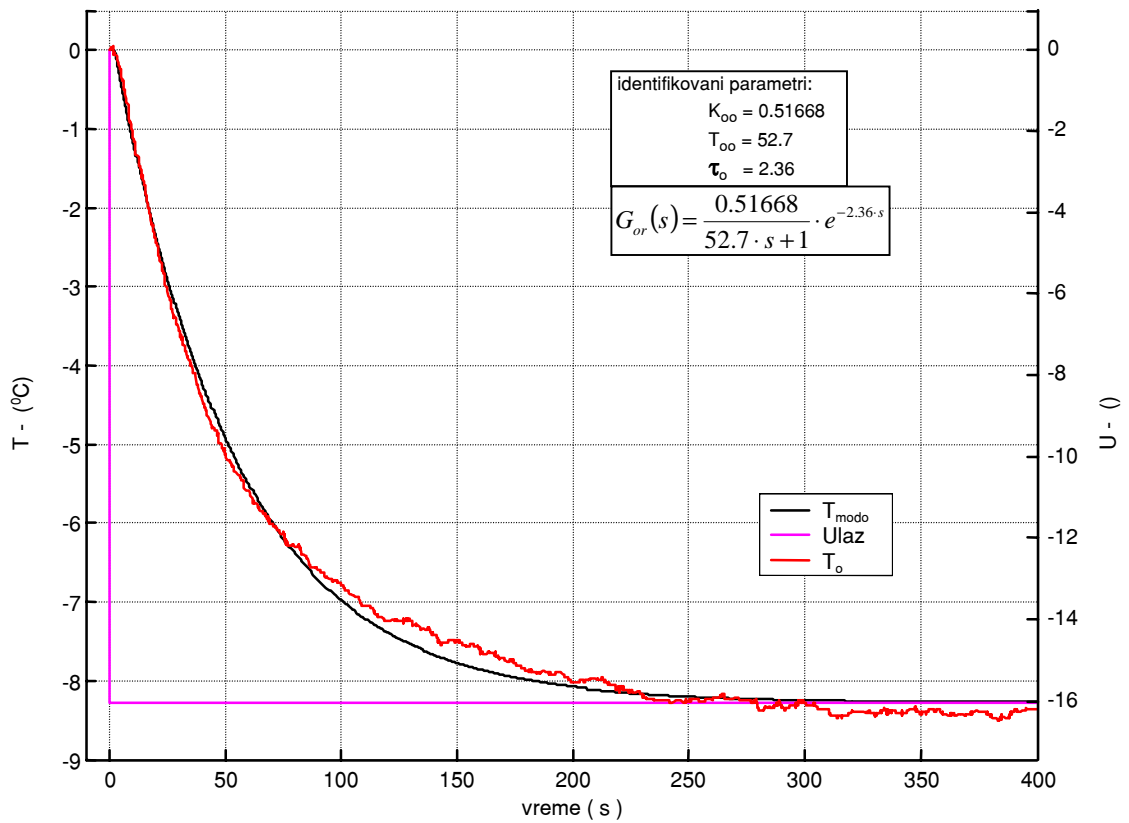
Sa sl. 3.5 i 3.6 se vidi da je pri ispitivanju OU na njega delovano kako rastućim step signalom (npr. step sa  $50\%u_{max}$  na  $60\%u_{max}$ ) tako i opadajućim (npr. step sa  $60\%u_{max}$  na  $50\%u_{max}$ ), čime je omogućeno da se kasnije, po obradi rezultata, uoče razlike u vrednostima parametara OU, dobijene identifikacijom, za rastući step tako i za adekvatan opadajući step na ulazu. Znači da vidimo da li su vrednosti parametara OU iste, kada na njega delujemo, rastućim stepom sa  $50\%u_{max}$  na  $60\%u_{max}$  i u slučaju kad delujemo na njega silaznim stepom step sa  $60\%u_{max}$  na  $50\%u_{max}$ . Na ovaj način se mogla uočiti nelinearnosti tipa histerezis OU.

Obrada podataka je obavljena korišćenjem programskog paketa *Matlab*, verzija 6.0, u kome je urađen program za obradu i prikaz rezultata nazvan O1 čiji je listing prikazan u prilogu B. Iz ulazno-izlazne sekvence, sl. 3.5, je izdvajana deo sekvence u okviru koga deluje jedan odskočni signal, kako rastući tako i opadajući. Takva izdvojena sekvenca ulaza i izlaza je onda normalizovana, tj. obrađena tako da predstavlja uzorak okarakterisan nultim početnim uslovima posle čega je dalje obrađivan radi dobijanja parametara OU. U osnovi ovog programa je korišćena funkcija ARX matlabovog tulboksa *System Identification* kojoj se kao ulaz definiše ulazna, izlazna sekvencu i

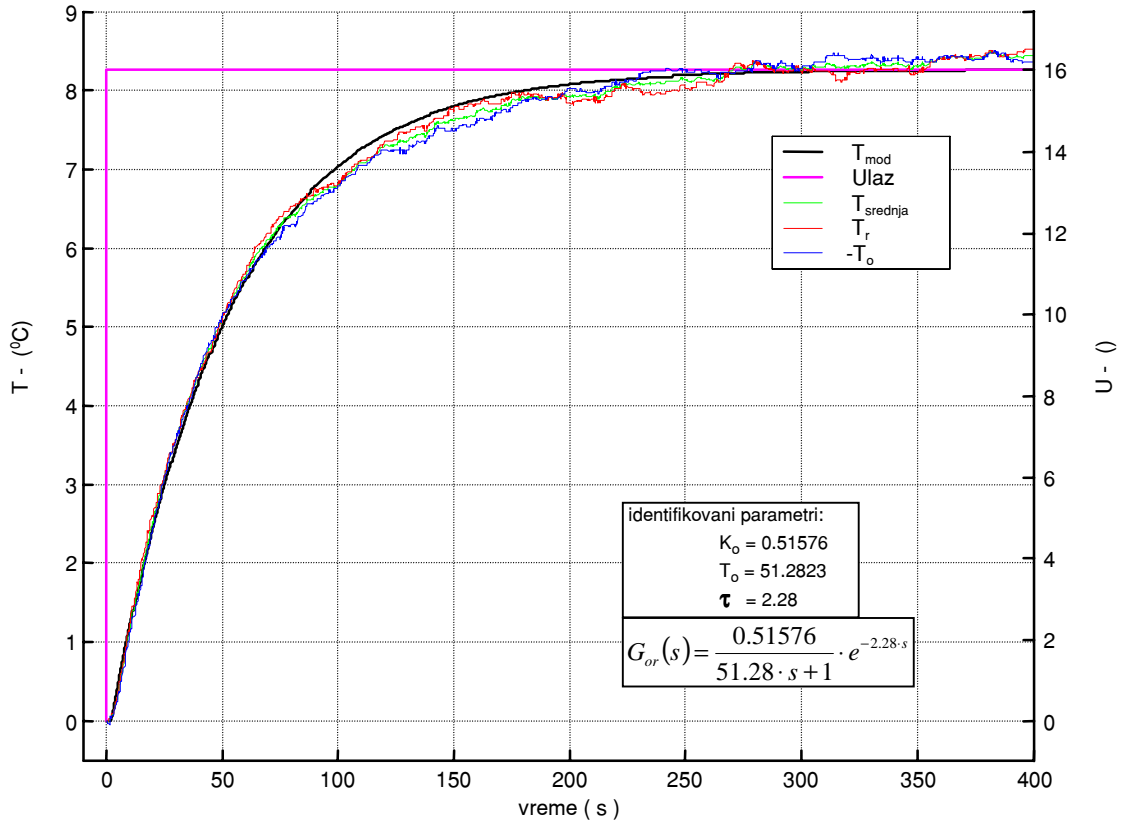
vrednost periode odabiranja  $a$ , metodom najmanjih kvadrata, po njemom izvršenju se dobijaju vrednosti koeficijenta polinoma ARX modela na osnovu kojih se pomoću relacija 3.17 i 3.18 mogu odrediti parametri kontinualnog modela OU  $K_o$  i  $T_o$ . Vremensko kašnjenje  $\tau$  se određivalo procenom, direktno sa dijagrama. kako je već pomenuto, određivane su vrednosti parametara OU za oba slučaja odskočnog signala na ulazu, rastući i analogan njemu opadajući, pa su se dobijale, za iste prirarštaje u pozitivnom odnosno negativnom smislu, srednje snage na grejaču po dve vrednosti za statičko pojačanje i to  $K_{or}$ , što je označavalo identifikovanu vrednost statičkog pojačanja OU pri odskočnom ulazu sa rastućim karakterom, i  $K_{oo}$  identifikovanu vrednost statičkog pojačanja OU pri opadajućem odskočnom ulazu. Analogno ovome dobijale su se po dve vrednosti i za vremensku konstantu OU označene sa  $T_{or}$  i  $T_{oo}$ . Vrednosti parametara,  $K_{or}$  i  $K_{oo}$ , kao i  $T_{or}$  i  $T_{oo}$ , su se razlikovale što je bio očigledan dokaz da OU poseduje nelinearnost tipa histerezis. Kako je razlika ovih vrednosti bila relativno mala, nelinearnost tipa histerezis je zanemarena i za konačnu vrednost parametara, koji će se koristiti za setovanje algoritma upravljanja, je uzeta srednja vrednost, vrednosti parametara dobijenih za rastući i opadajući step na ulazu, i obeležene su sa  $K_o$  i  $T_o$ . Svaka obrađena sekvenca odziva je verifikovana simulacijom, odnosno prikazana grafički. Jedan od takvog niza uporednih grafičkih prikaza, krivih dobijenih merenjem, i krivih dobijenih simulacijom modela, prikazan je za rastući step na sl. 3.7, za opadajući na sl. 3.8 i zajednički uporedni na sl. 3.9.



slika 3.7 normalizovan: stvarni odskočni odziv –  $T_r$ , odziv modela –  $T_{modr}$ , odskocni ulaz (rastući) (50-60)%  $u_{max}$ , pri  $\alpha = 0^0$

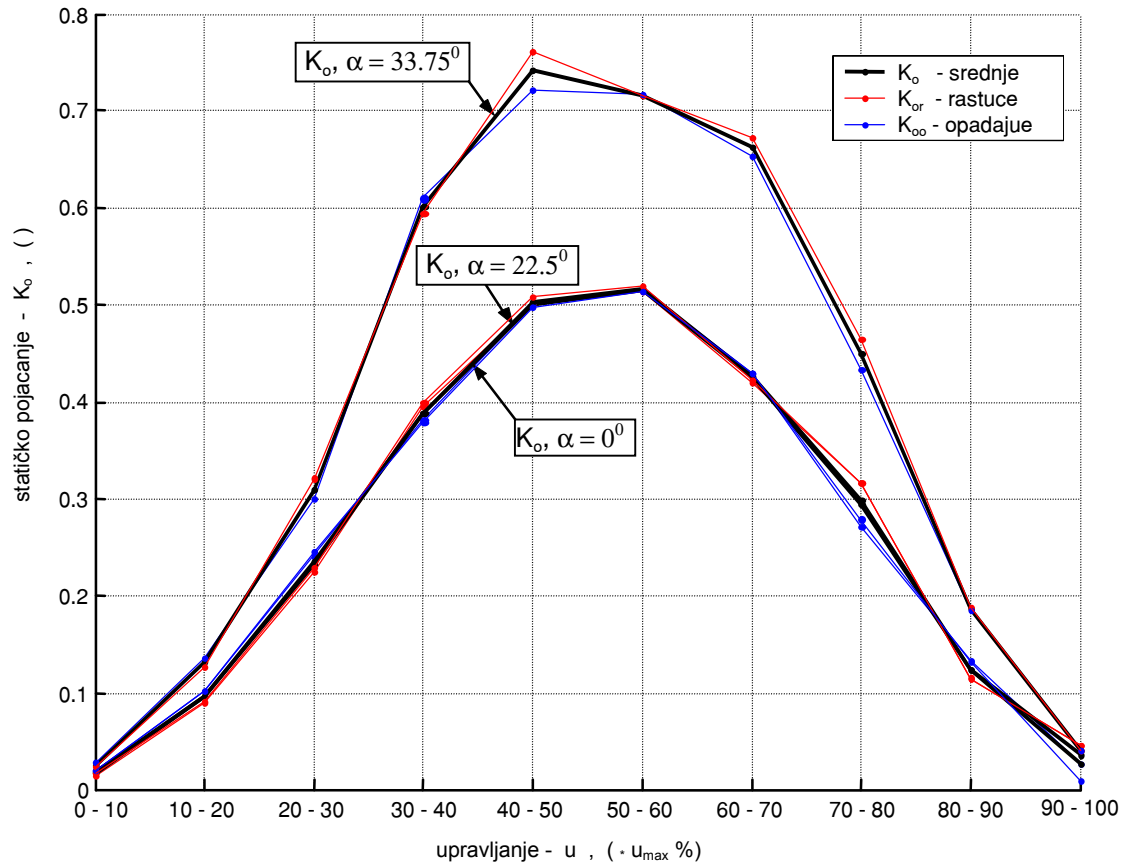


slika 3.8 normalizovan: stvarni odskočni odziv –  $T_o$ , odziv modela –  $T_{modo}$ , odskocni ulaz (opadajući) (60-50)%  $u_{max}$ , pri  $\alpha = 0^0$

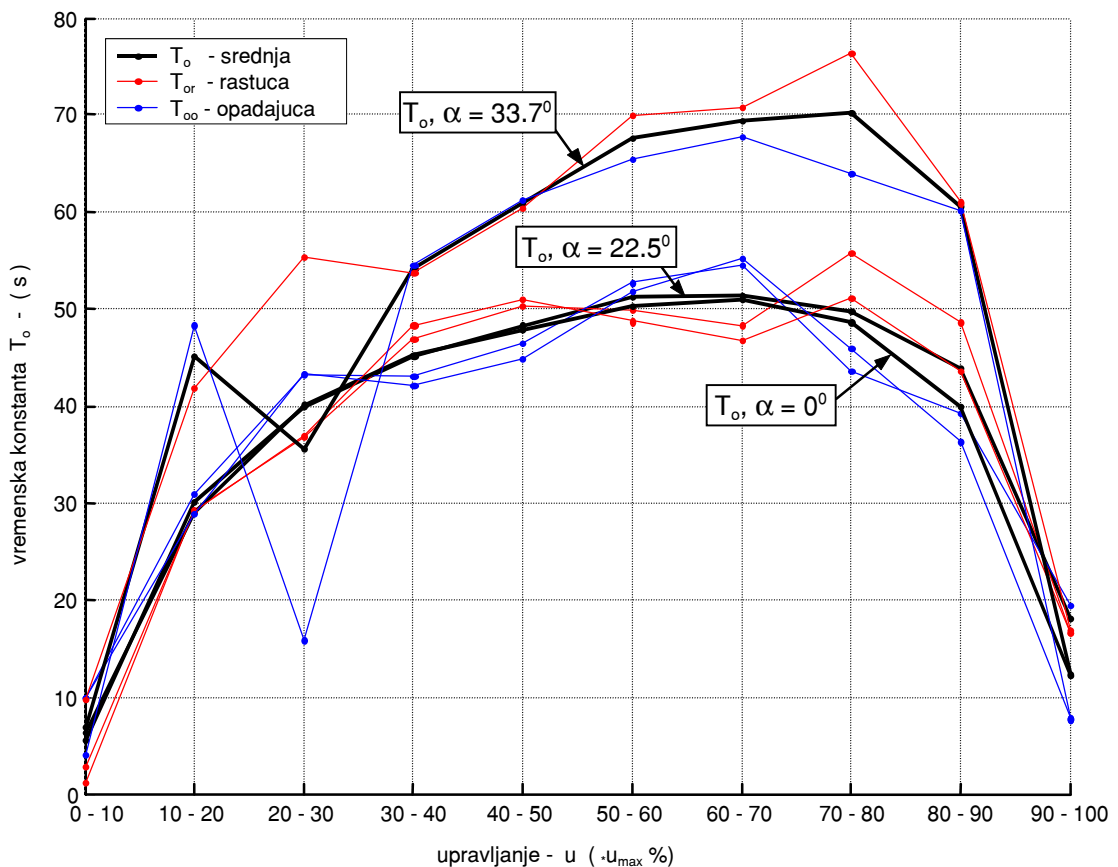


slika 3.9 normalizovan: stvarni odskočni odziv –  $T_r$ , stvarni odskočni odziv –  $(-T_o)$ , srednji odskočni odziv  $T_{srednja}$ , odziv modela –  $T_{mod}$ , odskocni ulaz (rastući) (50-60)%  $u_{max}$ , pri  $\alpha = 0^0$

Na slikama 3.10 i 3.11, je ilustrirano, u kom opsegu se nalaze vrednosti parametara OU , kao i zavisnost parametara OU od upravljačke promenljive.



slika 3.10 promena statičkog pojačanja u funkciji upravljačke promenljive, pri  $\alpha = 0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $33.7^\circ$



slika 3.11 promena vremenske konstante u funkciji upravljačke promenljive, pri  $\alpha = 0^\circ$ ,  $22.5^\circ$ ,  $33.7^\circ$

Na sl. 3.10 su prikazane zavisnosti statičkog pojačanja OU od upravljačke promenljive,  $K_{or}$  dobijene za rastuće odskočne ulaze,  $K_{oo}$  za opadajuće odskočne ulaze i  $K_o$  kao srednja kriva ovih dveju krivih, pri položajima klapne prigušnika  $\alpha = 0^\circ, 22.5^\circ, 33.7^\circ$ . Na sl. 3.11 su prikazane zavisnosti vremenske konstante OU od upravljačke promenljive,  $T_{or}$ ,  $T_{oo}$  i  $T_o$ .

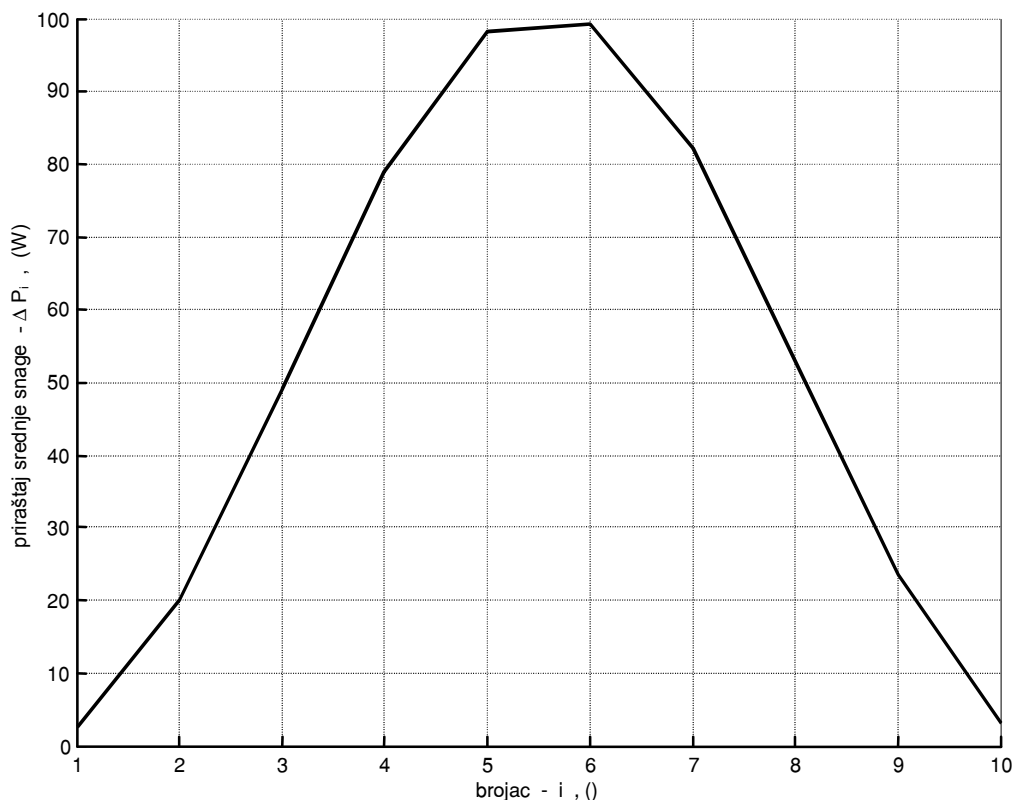
Vidi se izrazita nelinearnost parametara OU, kao i izvesni histerezis. Nelinearnost je u najvećoj meri izazvana nelinearnošću izvršnog organa, tj. pojačavača snage. Analizom ulazne-izlazne karakteristike IO, sl. 2.13, vidi se da iako se pri izvodjenu eksperimenta upravljačka veličina uvećavala/smanjivala u koracima od po 16, linearno, uvećanje/smanjivanje toplotne energije koju emituje grejač se nije menjala u konstantnim koracima. Ovo se može matematički predstaviti.

$$\Delta P_{i+1} = P((i+1) \cdot 16) - P(i \cdot 16), \quad i = 0,9 \quad (3.19)$$

gde je:

- $i$  - brojač koji određuje redni broj zadavanog ulaznog stepa
- $P(i \cdot 16)$  - početna vrednost snage na grejaču ulaznog step signala
- $P((i+1) \cdot 16)$  - krajnja vrednost snage na grejaču ulaznog step signala
- $\Delta P_{i+1}$  - priraštaj snage na grejaču za i-ti step na ulazu IO

Zavisnost priraštaja snage na grejaču od zadavanih odskočnih signala na ulazu IO prikazana je na sl. 3.11.



slika 3.11 zavisnost priraštaja srednje snage  $\Delta P_i$  od zadavanih odskočnih signala na ulazu IO

Iako su priraštaji upravljačke promenljive bili konstantni za svaki zadavani odskočni signal na ulazu IO, priraštaj srednje snage nije bio konstantan što je u najvećoj meri i uticalo na nelinearnost OU.

Položaj mernog pretvarača (udaljenost od grejača) je takođe uticao na parametre OU, ali u manjoj meri. Udaljavanje od grejača uticalo je na smanjenje vrednosti statičkog pojačanja  $K_o$ , porast vrednosti vremenske konstante  $T_o$ , a u najvećoj meri na povećanje vremenskog kašnjenja  $\tau$ , jer je fluid prelazio veće rastojanje do mernog pretvarača.

Način na koji je izveden eksperiment omogućio je da se pored sagledavanja vrednosti parametara objekta upravljanja, vidi i kako utiče vrednost upravljačke promenljive na njih, ugao otklona klapne prigušnika, položaj mernog pretvarača, da se sagleda nelinearnost i nestacionarnost OU, kao i poremećaji koji ga napadaju.

Iz izloženog se vidi da se radi o izrazito nelinearnom objektu upravljanja. U ovakvom slučaju, statička kriva objekta upravljanja se može linearizovati u bliskoj okolini radne tačke, pa se dinamičko ponašanje objekta upravljanja može opisati linearnom diferencijalnom jednačinom. Nominalna radna tačka je određena nominalnim vrednostima upravljačke, upravljane veličine i vrednostima poremećaja.

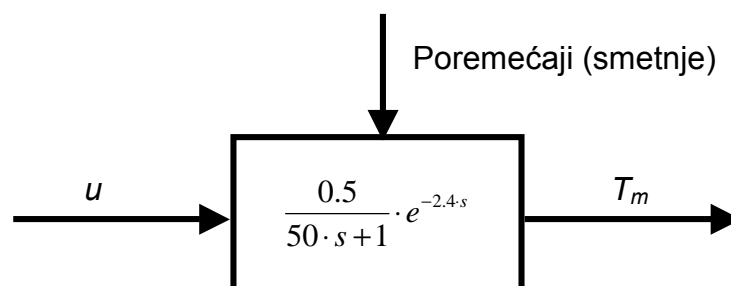
Nezavisna promenljiva linearne diferencijalne jednačine, koja opisuje ponašanje objekta upravljanja u bliskoj okolini radne tačke, predstavlja odstupanje upravljačke veličine od vrednosti upravljanja koje definiše radnu tačku, a zavisna odstupanje izlaza procesa od vrednosti koju ima u radnoj tački.

U konkretnom slučaju, za nominalnu vrednost upravljačke promenljive odabrana je vrednost  $u_{nom}=80$ , dok je njoj odgovarajuća nominalna vrednost upravljane promenljiva  $T_{nom}$ . Pri ovome temperatura ambijenta  $T_a$  ima vrednost sobne temperature, otklon klapne prigušnika je  $\alpha = 0^\circ$ , merni pretvarač je na rastojanju  $60\text{ mm}$  od grejača. Pod ovim uslovima će se testirati rad sistema u zatvorenoj povratnoj sprezi.

S obzirom na uslove koji definišu nominalnu (radnu) tačku, sa sl. 3.10 i 3.11 su očitane vrednosti parametra koji opisuju OU:

$$K_o = 0.5 \quad T_o = 50\text{ s} \quad \tau = 2.4\text{ s} \quad (3.20)$$

Parametri 3.20 predstavljaju krajnji rezultata parametarske identifikacije objekta upravljanja i koriste se za setovanje parametara upravljačkog algoritma.

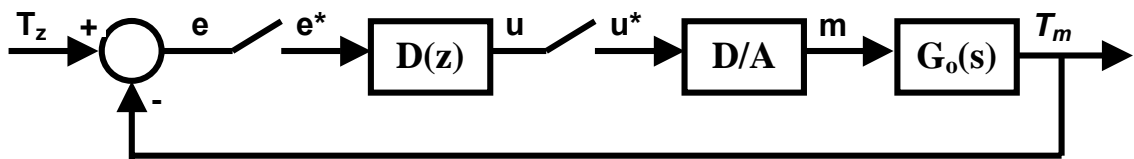


slika 3.12 prikaz identifikovanog objekta upravljanja



## IV Projektovanje regulatora

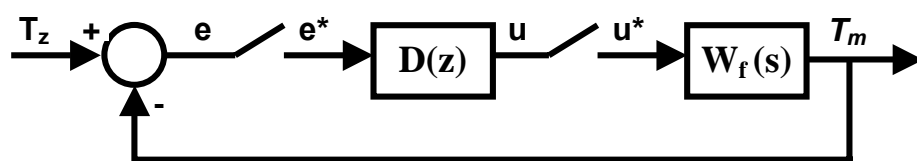
Identifikovani objekt upravljanja pripada klasi sporih industrijskih procesa [8]. Opisan je kao objekt prvog reda sa vremenskim kašnjenjem. Vremenska konstanta objekta je znatno veća od transportnog kašnjenja. Ukoliko se želi da upravljana promenljiva ima aperiodičan odziv na odskočnu pobudu na ulazu sistema sa zatvorenim povratnom spregom, može se primeniti Dahlinov algoritam upravljanja, koji je i odabran u ovom radu.



slika 4.1 struktura tipične konture regulacije

Na sl. 4.1 prikazana struktura tipične konture regulacije gde se može primeniti Dahlinov regulator. Kontinualni deo sistema se sastoji od D/A konvertora, objekta upravljanja koji se sastoji od izvršnog organa, procesa i detektora upravljane promenljive (A/D konvertora). Neka sa  $W_f(s)$  obeležimo funkciju prenosa kontinualnog dela sistema.

$$W_f(s) = \frac{1 - e^{-T_s}}{s} \cdot G_o(s) \quad (4.1)$$



slika 4.2 struktura tipične konture regulacije

$$T_m(s) = W_f(s) \cdot U^*(s) \quad (4.2)$$

$$E(s) = T_z(s) - T_m(s) \quad \Rightarrow \quad E^*(s) = T_z^*(s) - T_m^*(s) \quad (4.3)$$

$$U(s) = D^*(s) \cdot E^*(s) = D^*(s) \cdot [T_z^*(s) - T_m^*(s)] = U^*(s) \quad (4.4)$$

$$T_m(s) = W_f(s) \cdot D^*(s) \cdot [T_z^*(s) - T_m^*(s)] \quad (4.5)$$

$$T_m^*(s) = W_f^*(s) \cdot D^*(s) \cdot [T_z^*(s) - T_m^*(s)] \quad (4.6)$$

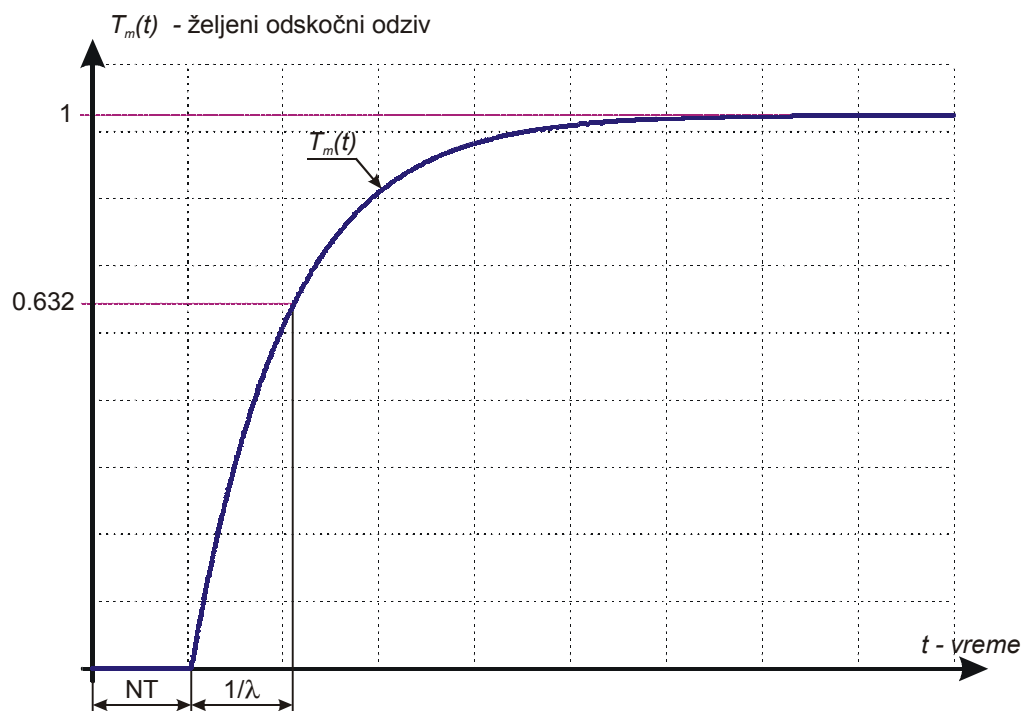
$$T_m(z) \cdot [1 + W_f(z) \cdot D(z)] = W_f(z) \cdot D(z) \cdot T_z(z) \quad (4.7)$$

$$\frac{T_m(z)}{T_z(z)} = \frac{W_f(z) \cdot D(z)}{[1 + W_f(z) \cdot D(z)]} \quad (4.8)$$

Relacija 4.8 predstavlja funkciju diskretnog prenosa konture regulacije. Iz 4.8 može se doći do izraza za algoritam upravljanja regulatora.

$$D(z) = \frac{1}{W_f(z)} \cdot \frac{\frac{T_m(z)}{T_z(z)}}{1 - \frac{T_m(z)}{T_z(z)}} \quad (4.9)$$

Do Dahlinovog algoritma upravljanja se dolazi pomoću željenog aperiodičnog odziva upravljane promenljive na jediničnu odskočnu pobudu  $T_z(t) = h(t)$ , konture regulacije prikazane na sl. 4.2, odnosno na osnovu poznavanja funkcije diskretnog prenosa  $\frac{T_m(z)}{T_z(z)}$ .



slika 4.3 željeni odskočni odziv

Željeni aperiodični odskočni odziv je definisan njegovom vremenskom konstantom  $1/\lambda$  i transportnim kašnjenjem  $T_d = N \cdot T$ . Transportno kašnjenje  $T_d$  predstavlja celobrojni umnožak periode odabiranja  $T$ . Treba doći do izraza za funkciju spregnutog diskretnog prenosa konture regulacije, sl. 4.2.

$$T_m(t) = 1 - e^{-\frac{(t-\tau)}{\lambda}} \quad (4.10)$$

$$T_m(s) = L[T_m(t)] = \frac{1}{s \cdot \left( \frac{1}{\lambda} \cdot s + 1 \right)} \cdot e^{-N \cdot T \cdot s} \quad (4.11)$$

$$T_m(s) = \frac{\lambda}{s \cdot (s + \lambda)} \cdot e^{-N \cdot T \cdot s} \quad (4.12)$$

$$T_m(z) = Z[T_m(s)] = Z \left[ \frac{\lambda}{s \cdot (s + \lambda)} \cdot e^{-N \cdot T \cdot s} \right] \quad (4.13)$$

$$T_m(z) = \frac{z \cdot (1 - e^{-\lambda T})}{(z - 1) \cdot (z - e^{-\lambda T})} \cdot z^{-N} \quad (4.14)$$

$$T_z(t) = 1 \cdot h(t) \quad (4.15)$$

$$T_z(s) = L[T_z(t)] = \frac{1}{s} \quad (4.16)$$

$$T_z(z) = \frac{z}{z - 1} \quad (4.17)$$

Došlo se do izraza za z-kompleksne likove ulaza  $T_m(z)$  (4.14) i  $T_z(z)$  (4.17) na osnovu koji je sada moguće odrediti funkciju spregnutog diskretnog prenosa (4.19).

$$\frac{T_m(z)}{T_z(z)} = \frac{T_m(z)}{T_z(z)} = \frac{\frac{z \cdot (1 - e^{-\lambda T})}{(z - 1) \cdot (z - e^{-\lambda T})} \cdot z^{-N}}{\frac{z}{z - 1}} \quad (4.18)$$

$$\frac{T_m(z)}{T_z(z)} = \frac{(1 - e^{-\lambda T})}{(z - e^{-\lambda T})} \cdot z^{-N} = \frac{(1 - e^{-\lambda T})}{(1 - e^{-\lambda T} \cdot z^{-1})} \cdot z^{-N-1} \quad (4.19)$$

Iz izraza 4.9 se vidi da algoritam upravljanja zavisi i od dinamičkih karakteristika objekta upravljana. Kod Dahlinovog algoritma upravljanja analiziraju se dva tipična slučaja dinamike objekta upravljana. Prvi se odnosi na situaciju kada se objekt upravljana može opisati sa zadovoljavajućom tačnošću kao objekat I reda sa jednom vremenskom konstantom  $T_o$ , statičkim pojačanjem  $K_o$  i transportnim kašnjenjem  $\tau$ . U drugom slučaju dinamika objekta upravljana se aproksimira dve vremenske konstante  $T_1$  i  $T_2$ , statičkim pojačanjem i transportnim kašnjenjem. Drugi slučaj nije bio predmet istraživanja ovog rada.

U glavi III smo identifikovali laboratorijski model procesa za sušenje vazduha kao objekat prvog reda sa vremenskom konstantom  $T_o$ , statičkim pojačanjem  $K_o$  i transportnim kašnjenjem  $\tau$ .

$$G_o(s) = \frac{K_o}{T_o \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s} = \frac{0.5}{50 \cdot s + 1} \cdot e^{-2.4 \cdot s} \quad (4.20)$$

Relacija (4.20) predstavlja model objekta upravljana nad kojim želimo da sprovedemo regulaciju Dahlinovim algoritmom.

Iz razloga fizičke ostvarljivosti digitalnog zakona upravljanja (4.19), željeni odskočni odziv sistema sa zatvorenom povratnom spregom, sl. 4.3, mora imati minimalno transportno kašnjenje  $T_d = N \cdot T$  određeno maksimalnom celobrojnom vrednošću periode odabiranja sadržane u  $\tau$ . Neka je, u opštem slučaju,  $\tau$  po vrednosti jednako celobrojnom umnošku  $N$  periode odabiranja plus neko vreme manje od periode odabiranja  $T$ .

$$\tau = N \cdot T + (1 - m) \cdot T, \quad 0 < m \leq 1 \quad (4.21)$$

$m$  – predstavlja parametar modifikovane z-transformacije

Da bi došli do izraza za digitalni zakon upravljanja treba još naći funkciju diskretnog prenosa kontinualnog dela sistema  $W_f(z)$ .

$$W_f(z) = Z[W_f(s)] = Z\left[\frac{1 - e^{-T \cdot s}}{s} \cdot G_o(s)\right] = Z\left[\frac{1 - e^{-T \cdot s}}{s} \cdot \frac{K_o}{T_o \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau \cdot s}\right] \quad (4.22)$$

$$W_f(z) = (1 - z^{-1}) \cdot K_o \cdot Z\left[\frac{1}{s \cdot (T_o \cdot s + 1)} \cdot e^{-[N \cdot T + (1 - m) \cdot T] \cdot s}\right] \quad (4.23)$$

$$W_f(z) = (1 - z^{-1}) \cdot K_o \cdot Z\left[\frac{1}{s \cdot (T_o \cdot s + 1)} \cdot e^{-N \cdot T \cdot s} \cdot e^{-(1 - m) \cdot T \cdot s}\right] \quad (4.24)$$

$$W_f(z) = (1 - z^{-1}) \cdot K_o \cdot z^{-N} \cdot Z_m\left[\frac{1}{s \cdot (T_o \cdot s + 1)}\right]_{m=1 - \left(\frac{\tau - N \cdot T}{T}\right)} \quad (4.25)$$

$$W_f(z, m) = (1 - z^{-1}) \cdot K_o \cdot z^{-N} \left[ \frac{1}{z-1} - \frac{e^{-\frac{mT}{T_o}}}{z - e^{-\frac{T}{T_o}}} \right] \quad (4.26)$$

$$W_f(z, m) = K_o \cdot \frac{\left(1 - e^{-\frac{T}{T_o}}\right) + \left(e^{-\frac{mT}{T_o}} - e^{-\frac{T}{T_o}}\right) \cdot z^{-1}}{1 - e^{-\frac{T}{T_o}} \cdot z^{-1}} \cdot z^{-N-1} \quad (4.27)$$

$$W_f(z, m) = \frac{K_o \cdot [C_1 + C_2 \cdot z^{-1}] \cdot z^{-N-1}}{1 - e^{-\frac{T}{T_o}} \cdot z^{-1}} \quad (4.28)$$

gde su  $C_1$  i  $C_2$  :

$$C_1 = 1 - e^{-\frac{mT}{T_o}} \quad \text{i} \quad C_2 = e^{-\frac{mT}{T_o}} - e^{-\frac{T}{T_o}} \quad (4.29)$$

$$D(z) = \frac{1}{W_f(z, m)} \cdot \frac{\frac{T_m(z)}{T_z}}{1 - \frac{T_m(z)}{T_z}} = \frac{1 - e^{-\frac{T}{T_o}} \cdot z^{-1}}{K_o \cdot [C_1 + C_2 \cdot z^{-1}] \cdot z^{-N-1}} \cdot \frac{\frac{(1 - e^{-\lambda T})}{(1 - e^{-\lambda T} \cdot z^{-1})} \cdot z^{-N-1}}{1 - \frac{(1 - e^{-\lambda T})}{(1 - e^{-\lambda T} \cdot z^{-1})} \cdot z^{-N-1}} \quad (4.30)$$

$$D(z) = \frac{1 - e^{-\frac{T}{T_o}} \cdot z^{-1}}{K_o \cdot [C_1 + C_2 \cdot z^{-1}] \cdot z^{-N-1}} \cdot \frac{(1 - e^{-\lambda T}) \cdot z^{-N-1}}{(1 - e^{-\lambda T} \cdot z^{-1}) - (1 - e^{-\lambda T}) \cdot z^{-N-1}} \quad (4.31)$$

$$D(z) = \frac{(1 - e^{-\lambda T}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_o}} \cdot z^{-1}\right)}{K_o \cdot [1 - e^{-\lambda T} \cdot z^{-1} - (1 - e^{-\lambda T}) \cdot z^{-N-1}] \cdot (C_1 + C_2 \cdot z^{-1})} \quad (4.32)$$

Izraz (4.32) predstavlja algoritam upravljanja koji će obezbediti željeni aperiodičan odziv konture regulacije. Međutim, ako se analizira upravljačka promenljiva  $u(t)$ , primećuje se da ona ima vrlo skokovite promene. Teoretski gledano sinteza algoritma upravljanja je obavljena korektno, ali praktično gledano većina izvršnih organa nije u mogućnosti da fizički izvrši upravljanje, upravljačko dejstvo. Funkcija spregnutog diskretnog prenosa ima sve polove unutar jediničnog kruga i to na pozitivnom delu realne ose u z-ravni. Neželjena osobina treperenja upravljačke promenljive potiče od funkcije diskretnog prenosa regulatora  $D(z)$ , jer ima ili konjugovano kompleksne polove

ili polove na negativnom delu realne ose a unutar jediničnog kruga z-ravni, ili oba. Prvi pol dobijamo iz izraza za pol koji se nalazi na negativnom delu realne ose unutar jediničnog kruga z-ravni:

$$C_1 + C_2 \cdot z^{-1} = 0 \quad \Rightarrow \quad z_1 = -\frac{C_1}{C_2} \quad (4.33)$$

Do ostalih polova možemo doći analizom izraza u srednjoj zagradi.

$$1 - e^{-\lambda T} \cdot z^{-1} - (1 - e^{-\lambda T}) \cdot z^{-N-1} = 0 \quad (4.34)$$

Uzmimo da je  $N=2$

$$1 - e^{-\lambda T} \cdot z^{-1} - (1 - e^{-\lambda T}) \cdot z^{-3} = 0 \quad (4.35)$$

Izraz (4.34) ima faktor  $(1-z^{-1})$

$$\left[1 + (1 - e^{-\lambda T}) \cdot z^{-1} + (1 - e^{-\lambda T}) \cdot z^{-2}\right] \cdot (1 - z^{-1}) = 0 \quad (4.36)$$

Iz izraza u srednjoj zagradi jednačine (4.35) može se doći do para konjugovano-kompleksnih polova:

$$z_{2,3} = \frac{-(1 - e^{-\lambda T})}{2} \pm j \cdot \sqrt{(1 - e^{-\lambda T}) - \frac{(1 - e^{-\lambda T})^2}{4}} \quad (4.37)$$

Iz izraza (4.33) i (4.37) se vidi da su polovi  $z_1$  i  $z_{2,3}$  razlog zbog čega se javlja treperenje upravljačke promenljive. Potrebno ih je eliminisati kako bi rešili problem treperenja upravljačke promenljive. Dahlin je predložio da se eliminacija ovih polova izvede, tako što ćemo u izrazu (4.33) i u izrazu u srednjoj zagradi izraza (4.36), kompleksnu promenljivu  $z$  smeniti sa vrednošću 1. Smenom  $z=1$  u navedenim izrazima ne utičemo na stacionarno stanje upravljane promenljive, što dokazuje druga (krajnja) granična teorema z-transformacije:

$$T_m(\infty) = \lim_{n \rightarrow \infty} T_m(n \cdot T) = \lim_{z \rightarrow 1} (1 - z^{-1}) \cdot T_m(z) = \lim_{z \rightarrow 1} (1 - z^{-1}) \cdot \frac{T_m(z)}{T_z(z)} \cdot T_z(z) \quad (4.38)$$

Uvedena smena će uticati, u manjoj meri, na upravljanu promenljivu u prelaznom procesu, pa će doći do izvesnog odstupanja odskočnog odziva upravljane promenljive od željenog odziva, sl 4.3 .

Sada se izraz (4.32) , za slučaj  $N=2$ , može svesti na sledeći oblik, :

$$D(z) = \frac{(1 - e^{-\lambda T}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_o}} \cdot z^{-1}\right)}{K_o \cdot \left[1 + (1 - e^{-\lambda T}) \cdot z^{-1} + (1 - e^{-\lambda T}) \cdot z^{-2}\right]_{z \rightarrow 1} \cdot (1 - z^{-1}) \cdot (C_1 + C_2 \cdot z^{-1})_{z \rightarrow 1}} \quad (4.39)$$

$$D(z) = \frac{(1 - e^{-\lambda T}) \cdot \left(1 - e^{-\frac{T}{T_o}} \cdot z^{-1}\right)}{K_o \cdot (C_1 + C_2) \cdot (3 - 2 \cdot e^{-\lambda T}) \cdot (1 - z^{-1})} \quad (4.40)$$

Izraz (4.40) predstavlja Dahlinov digitalni PI zakon upravljanja, za slučaj  $N=2$ . Sređivanjem ovog izraza može se doći do oblika u kome se direktno sagledavaju izrazi za proporcionalno dejstvo  $K_p$  i vremensku konstantu integralnog dejstva  $T_I$  Dahlinovog regulatora. Digitalni PI regulator u opštem slučaju ima oblik (4.41):

$$D(z) = K_p \cdot \left(1 + \frac{\frac{T}{T_I}}{1 - z^{-1}}\right) \quad (4.41)$$

$$D(z) = \frac{(1 - e^{-\lambda T})}{K_o \cdot (C_1 + C_2) \cdot (3 - 2 \cdot e^{-\lambda T})} \cdot \frac{e^{-\frac{T}{T_o}} \cdot \left(e^{\frac{T}{T_o}} - z^{-1}\right)}{(1 - z^{-1})} \quad (4.42)$$

$$D(z) = \frac{(1 - e^{-\lambda T})}{K_o \cdot (C_1 + C_2) \cdot (3 - 2 \cdot e^{-\lambda T})} \cdot \frac{e^{-\frac{T}{T_o}} \cdot \left(1 - z^{-1} + \left(e^{\frac{T}{T_o}} - 1\right)\right)}{(1 - z^{-1})} \quad (4.43)$$

$$D(z) = \frac{(1 - e^{-\lambda T})}{K_o \cdot e^{-\frac{T}{T_o}} \cdot (C_1 + C_2) \cdot (3 - 2 \cdot e^{-\lambda T})} \cdot \left(1 + \frac{e^{\frac{T}{T_o}} - 1}{1 - z^{-1}}\right) \quad (4.44)$$

Upoređivanjem izraza (4.41) i (4.44) direktno se uočavaju izrazi za  $K_p$  i  $T_I$ , za slučaj  $N=2$ .

$$\left[K_p\right]_{N=2} = \frac{(1 - e^{-\lambda T})}{K_o \cdot e^{-\frac{T}{T_o}} \cdot (C_1 + C_2) \cdot (3 - 2 \cdot e^{-\lambda T})} \quad (4.45)$$

$$\left[\frac{T}{T_I}\right]_{N=2} = e^{\frac{T}{T_o}} - 1 \quad (4.46)$$

U opštem slučaju, za bilo koje  $N \geq 0$ , Dahlinov digitalni zakon upravljanja ima oblik:

$$D(z) = \frac{(1 - e^{-\lambda T})}{K_o \cdot \left( e^{\frac{T}{T_o}} - 1 \right) \cdot [1 + N(1 - e^{-\lambda T})]} \cdot \left( 1 + \frac{e^{\frac{T}{T_o}} - 1}{1 - z^{-1}} \right) \quad (4.47)$$

odakle se uočavaju izrazi za proporcionalno dejstvo  $K_p$  i vremensku konstantu integralnog dejstva  $T_I$  u opštem slučaju.

$$K_p = \frac{1 - e^{-\lambda T}}{K_o \cdot \left( e^{\frac{T}{T_o}} - 1 \right) \cdot [1 + N(1 - e^{-\lambda T})]} \quad (4.48)$$

$$\frac{T}{T_I} = e^{\frac{T}{T_o}} - 1 \quad (4.49)$$

Dahlinov digitalni PI regulator (4.47) se sada može izraziti u obliku diferencne jednačine, pogodnom za realizaciju na projektovanom kontroleru C1.

$$D(z) = \frac{U(z)}{E(z)} = \frac{(1 - e^{-\lambda T})}{K_o \cdot \left( e^{\frac{T}{T_o}} - 1 \right) \cdot [1 + N(1 - e^{-\lambda T})]} \cdot \left( 1 + \frac{e^{\frac{T}{T_o}} - 1}{1 - z^{-1}} \right) = K_p \left( 1 + \frac{T}{T_I} \cdot \frac{1}{1 - z^{-1}} \right) \quad (4.50)$$

$$U(z) = K_p \left( 1 + \frac{T}{T_I} \cdot \frac{1}{1 - z^{-1}} \right) \cdot E(z) = K_p \cdot E(z) + K_p \cdot \frac{T}{T_I} \cdot \frac{1}{1 - z^{-1}} \cdot E(z) \quad (4.51)$$

$$U(z) \cdot (1 - z^{-1}) = K_p \cdot (1 - z^{-1}) \cdot E(z) + K_p \cdot \frac{T}{T_I} \cdot E(z) \quad (4.52)$$

$$U(z) - U(z) \cdot z^{-1} = K_p \cdot [E(z) - E(z)z^{-1}] + K_p \cdot \frac{T}{T_I} \cdot E(z) \quad (4.53)$$

$$u(k) - u(k-1) = K_p \cdot [e(k) - e(k-1)] + K_p \cdot \frac{T}{T_I} \cdot e(k) \quad (4.54)$$

$$u(k) = K_p \cdot [e(k) - e(k-1)] + K_p \cdot \frac{T}{T_I} \cdot e(k) + u(k-1) \quad (4.55)$$



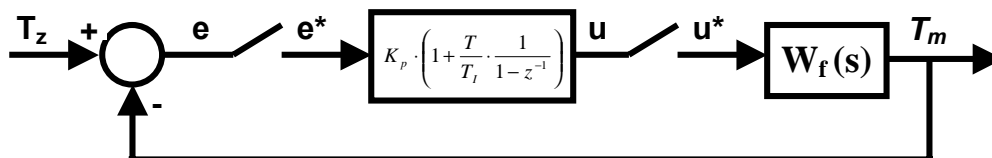
možemo uvesti pojačanje integralnog dejstva  $K_i$  kao:

$$K_i = K_p \cdot \frac{T}{T_i} \quad \Rightarrow \quad K_i = K_p \cdot \left( e^{\frac{T}{T_i}} - 1 \right) \quad (4.56)$$

$$u(k) = K_p \cdot [e(k) - e(k-1)] + K_i \cdot e(k) + u(k-1) \quad (4.57)$$

Izraz (4.57) predstavlja Dahlinov algoritam upravljanja u obliku diferencne jednačine. Zakon upravljanja je inkrementalnog tipa.

Dahlinov algoritam, tj. paramtri koji ga opisuju su određeni iz uslova da odskočni odziv upravljane promenljive bude aperiodičnog karaktera. Žejeni odskočni odziv bio je određen parametrima  $Td=N \cdot T$  i vremenskom konstantom  $1/\lambda$ . Transportno kašnjenje je određeno parametrima objekta upravljanja. Vremenska konstanta  $1/\lambda$  odskočnog odziva unosi samopodešavajuće svojstvo u Dahlinov regulator. Parametar  $\lambda$  se može menjati u širokom dijapazonu vrednosti. Njegova vrednost utiče na prirodu prelaznog procesa upravljane promenljive ali ne i na stacionarno stanje. U slučaju kada  $\lambda \rightarrow \infty$  odskočni odziv konture regulacije poprima oblik koji se dobija primenom "deadbeat" upravljanja. Praktično gledano, biranjem odgovarajuće vrednosti parametra  $\lambda$  moguće je objekt upravljanja u zatvorenoj povratnoj sprezi ubrzati u odnosu na njegovu brzinu van konture regulacije.



slika 4.4 konture regulacije Dahlinovim regulatorom

U ovom radu je bilo potrebno realizovati izloženi zakon upravljanja definisan relacijom (4.55) na kontroleru C1. Perioda odabiranja kontrolera je  $T=0.04$  s, a parametri objekta upravljanja u bliskoj okolini radne tačke su  $K_o = 0.5$ ,  $T_o = 50$  s i  $\tau = 2.4$  s.

Vidimo da je  $N=60$  s obzirom na vrednost transportno kašnjenje objekta upravljanja  $\tau$  i periode odabiranja  $T$ . Da bi mogli da uočimo uticaj parametra  $\lambda$  na ponašnje odskočnog odziva upravljane promenljive, uzet je set vrednosti za  $\lambda$ , i to 0.02, 0.04, 0.08, 0.16 i 0.32. Parametri  $K_p$  i  $K_i$  Dahlinovog algoritma za set vrednosti parametra  $\lambda$  su prikazane u tabeli T4.1, do kojih se došlo iz izraza (4.48) i (4.56).

Tabela T4.1

$N$	$\lambda$	$1/\lambda$	$K_p$	$T_i$	$K_i$
60	0.02	50	0.190690576590	49.9800027	0.000152613499
	0.04	25	0.364551370863		0.000291757784
	0.08	12.5	0.669972747115		0.000536192646
	0.16	6.25	1.152938401076		0.000922719760
	0.32	3.125	1.802691364962		0.001442730107

Dahlinov digitalni PI regulator je testiran za tri para vrednosti pojačanja proporcionalnog  $K_p$  i integralnog  $K_i$  dejstva što će biti prikazano u narednoj glavi.

Da bi mogao da realizuje Dahlinov algoritam upravljanja, opsian diferencnom jednačinom (4.57), mikrokontroler je morao da obezbedi izvršavanje aritmetičkih operacija sabiranje, oduzimanje i množenje, kao i da obezbedi potreban memorjski prostor za pamćenje konstanti  $K_p$  i  $K_i$ , i smeštanje tekućih promenljivih  $e(k)$ ,  $e(k-1)$ ,  $u(k)$ ,  $u(k-1)$ .

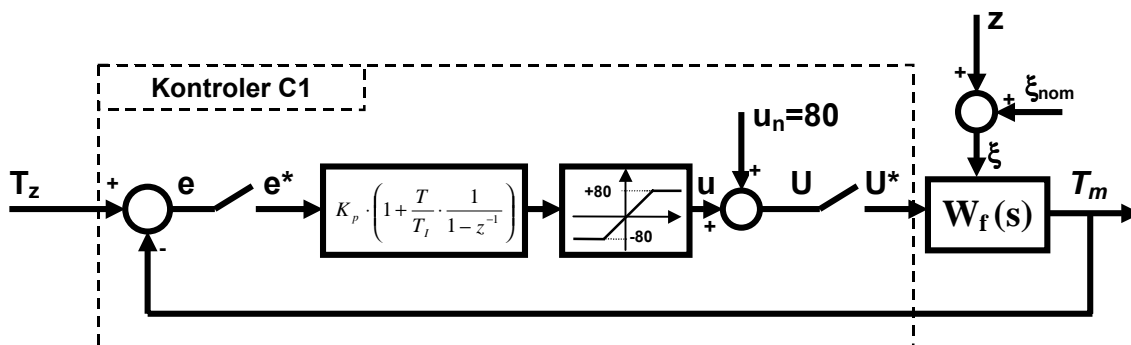
Rutine za aritmetičke operacije su rešene u integer aritmetici i detaljan opis algoritma i listing programa u assembleru je dat u literaturi [9,10]. Rutine su se pozivale kao podprogrami i to:

**FXSub66S** - rutina za sabiranje dva 16-tobitna broja, znakovno (sign)

**FXSub66S** - rutina za oduzimanje dva 16-tobitna broja, znakovno (sign)

**FXM1616S** - rutina za množenje dva 16-tobitna broja, znakovno (sign)

Pri realizaciji algoritma upravljanja primenjena je tehnika *anti-windup*. Vrednost upravljačke promenljive se kreće i opsegu od -80 do +80. Ukoliko bi se na ulazu konture regulacije zadala velika vrednost ili ako bi se klapna prigušnika previše otvorila s obzirom na zadatu vrednost reference, upravljačka promenljiva sračunata algoritmom upravljanja bi izašla iz mogućeg intervala vrednosti i povećavala bi se i dalje, što bi dovelo do "navijanja" regulatora. Onda bi, u slučaju kada prođe navedena kritična situacija (promeni se referenca ili ugao otklona prigušnika), integralno dejstvo u sebi imalo zapamćenu veliku vrednost (po apsolutnoj vrednosti) i upravljanje bi i dalje ostalo na istoj vrednosti. Ovaj problem se rešava ograničavanjem upravljačke promenljive na opseg vrednosti koji se stvarno može ostvariti i to od -80 do +80. Praktično, kao da smo na izlazu regulatora postavili nelinearni element tipa zasićenja.



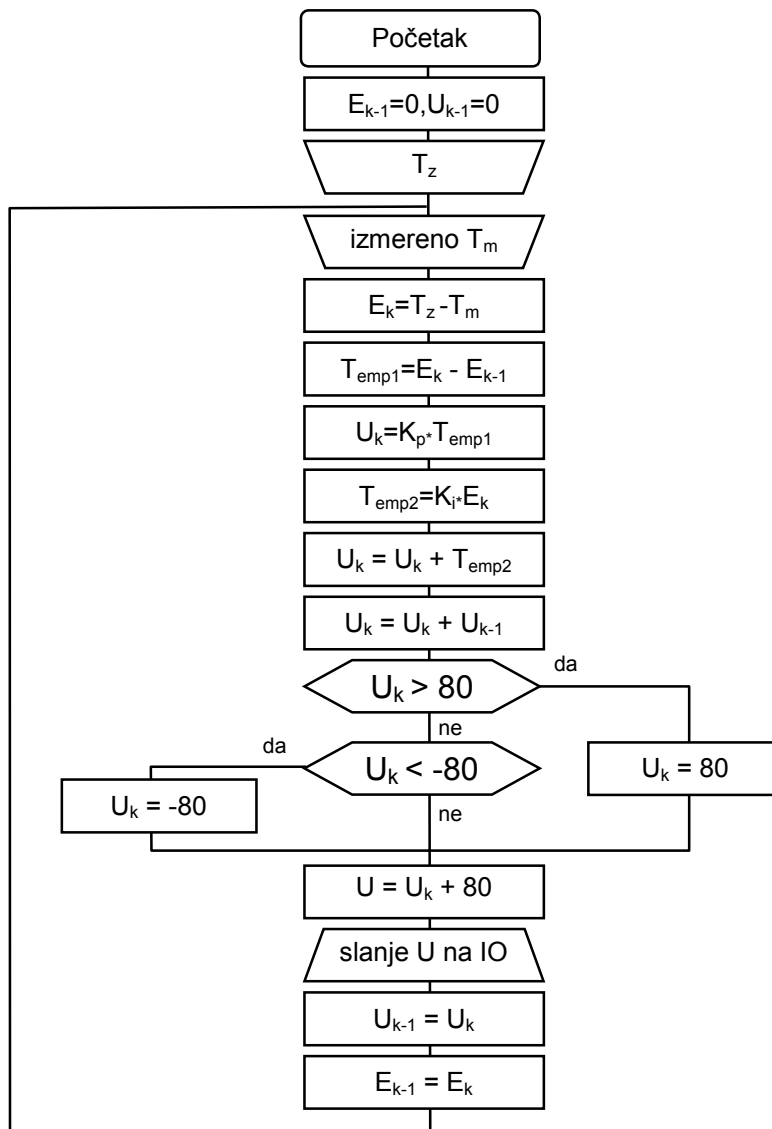
slika 4.5 strukturalni blok dijagram konture regulacije

Na sl. 4.5 prikazan je strukturalni blok dijagram konture regulacije koji je stvarno realizovan pomoću kontrolera C1. Prikazan je element zasićenja koji je nastao kao rezultat *anti-windup* tehnike. Upravljačka promenljiva se izračunava zakonom upravljanja ali u bliskoj okolini radne tačke definisane nominalnim upravljanjem  $u_n = 80$ .

Algoritam po kome se realizovao regulator prikazan je na sl. 4.6, a listing programa pisanog u assembleru za mikrokontrolere firme *MicroChip* je dat u prilogu C. Korišćeni programski jezik assembler za ovaj tip mikrokontrolera razvijen je od firme *Microchip*. Za programiranje i debaging koda u assembleru korišćen je program *MPLab*.

(Microchip Laboratory) razvijen od firme *Microchip*. Za direktno programiranje mikrokontrolera PIC16F84 korišćen je programator firme "ECM" iz Kragujevca.

Na sl. 4.6 prikazan je algoritam po kome se izvršavao zakon upravljanja.



slika 4.6 algoritam programa za izvršavanje zakona upravljanja

## V Eksperimentalna verifikacija

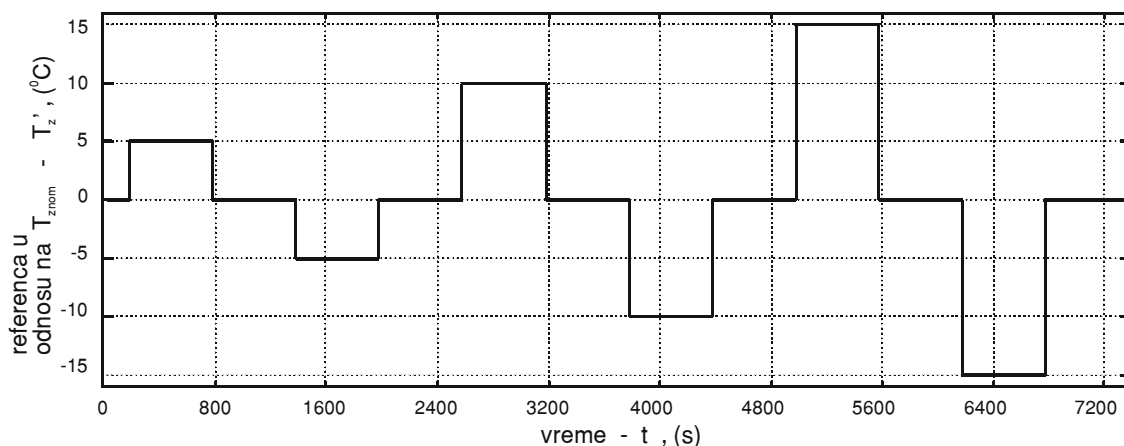
Da bi izvršili testiranje projektovanog laboratorijskog modela procesa za sušenje vazduha obavljena je eksperimentalna verifikaciju. Cilj je bio uočiti kako projektovani regulator radi u praksi, koji su nedostaci i mane projektovanog kontrolera. Korišćena eksperimentalna oprema je prikazana na sl. 3.2 . Fleksibilnost digitalnog kontrolera je omogućila da pored obavljanja operacija D/A i A/D konverzije, izvršavanja projektovanog algoritma upravljanja, omogući ispitivanje regulatora za set vrednosti parametra  $\lambda$  Dahlinovog PI regulatora menjanjem vrednosti koeficijenta proporcionalnog i integralnog dejstva, kao i komunikaciju sa PC računarnom radi akvizicije podataka. Program C1Comm je obezbedio prikazivanje i zapis podataka primljenih od kontrolera. Zabeleženi podaci su se kasnije mogli ilustrovati u programskom paketu *Matlab*, koji poseduje mogućnost importovanja podataka zabeleženih u fajl na hard disku.

Pre izvođenja svakog eksperimenta bilo je potrebno dovesti sistem u nominalnu radnu tačku. Nju karakterišu sledeće vrednosti:

- $U_{nom} = 80$  - nominalna vrednost upravljačke promenljive
- $T_{mnom}$  - nominalna vrednost upravljane promenljive
- $T_a$  - temperatura ambijenta
- $\alpha_{nom} = 0^0$  - nominalna vrednost ugaonog otklona klapne prigušnika, čime je definisan  $Q_{nom}$  – nominalni protok
- $U_{mreže-nom}$  - nominalna vrednost napona u mreži

Izvršeno je eksperimentalno testiranje projektovanog regulatora, u odnosu na praćenje zadate trajektorije, i u smislu apsorpcije efekta poremećaja tipa promenljivog protoka.

Izvedeni su eksperimenti za tri vrednosti parametra  $\lambda$  u cilju sagledavanja njegovog uticaja na zakon upravljanja, odnosno na ponašanje upravljane promenljive. Kako je svaki eksperiment trajao dugo, dolazilo je do promene temperature okoline  $T_a$ , kao i promene vrednosti napona u mreži  $U_{mreže}$ , što je uslovalo u izvesnoj meri pomeranje nominalne radne tačke tokom trajanja eksperimenta.

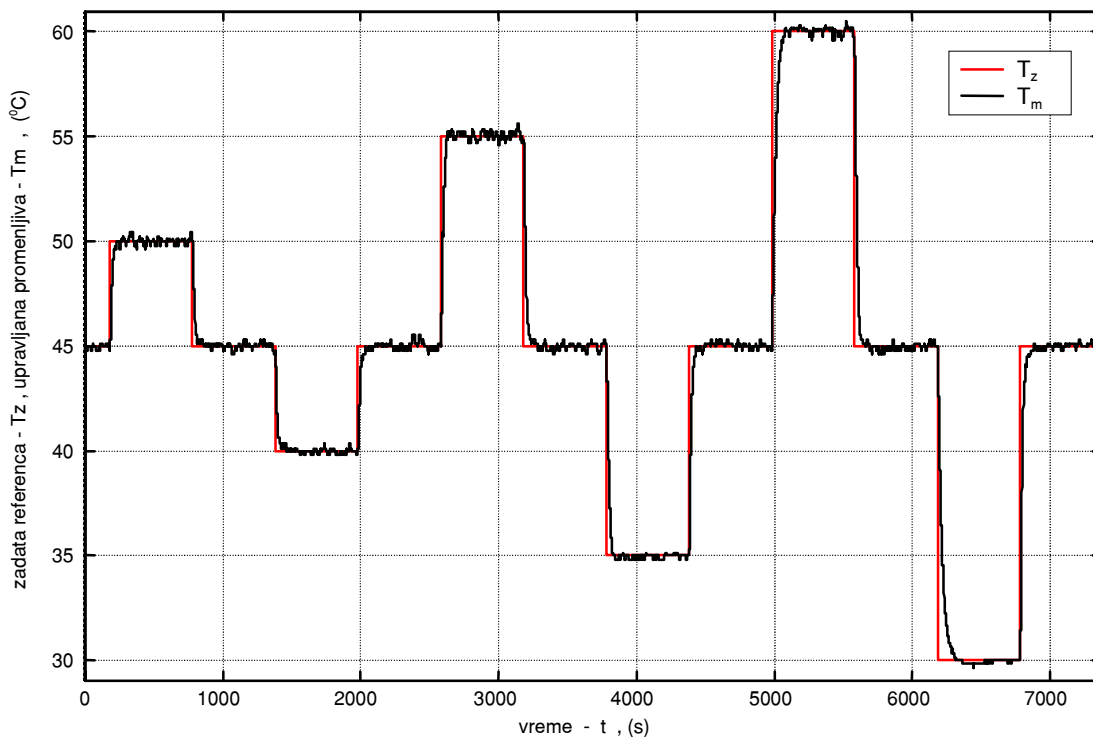


slika 5.1 vremenski dijagram zadavane trajektorije u odnosu na  $T_{mnom}$

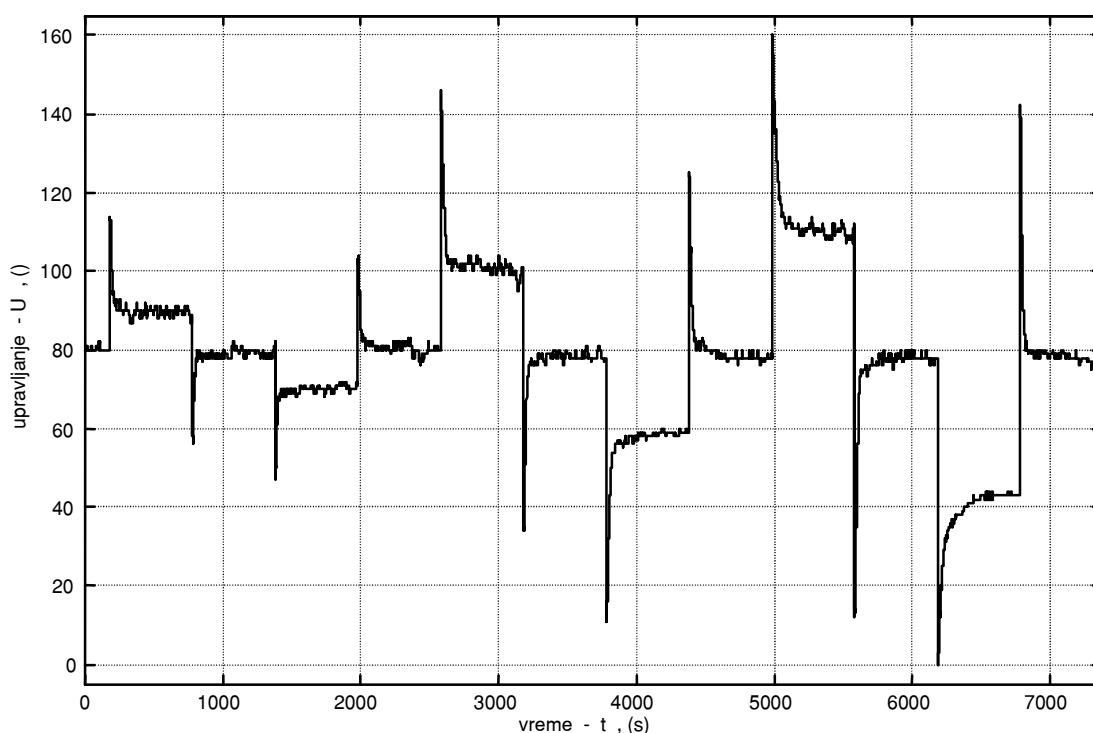
Testiranje praćenja zadavane trajektorije je obavljeno tako što su zadavani odskočni signali na ulazu čija se amplituda menjala u vremenskim intervalima od 600 s. Posle dovođenja konture regulacije u nominalni režim rada zadavan je prvo step

amplitude  $+5^{\circ}\text{C}$  u odnosu na nominalnu vrednost reference  $T_{mnom}$ , pa onda vraćanje na nominalni režim, zatim step amplitude  $-5^{\circ}\text{C}$  u odnosu na  $T_{mnom}$ , pa opet vraćanje na nominalni režim, i na isti način ponavljajući step signale na ulazu od  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  i  $\pm 15^{\circ}\text{C}$  u odnosu na  $T_{mnom}$ . Oblik zadavane trajektorije je prikazan na sl. 5.1. Na ovaj način smo testirali projektovani regulator u širokom dijapazonu vrednosti parametara objekta upravljanja.

Na sl. 5.2 je prikazan odziv upravljane promenljive na zadatu trajektoriju, a na sl. 5.3 grafik upravjačke promenljive, za vrednost parametra  $1/\lambda = 12.5 \text{ s}$ .



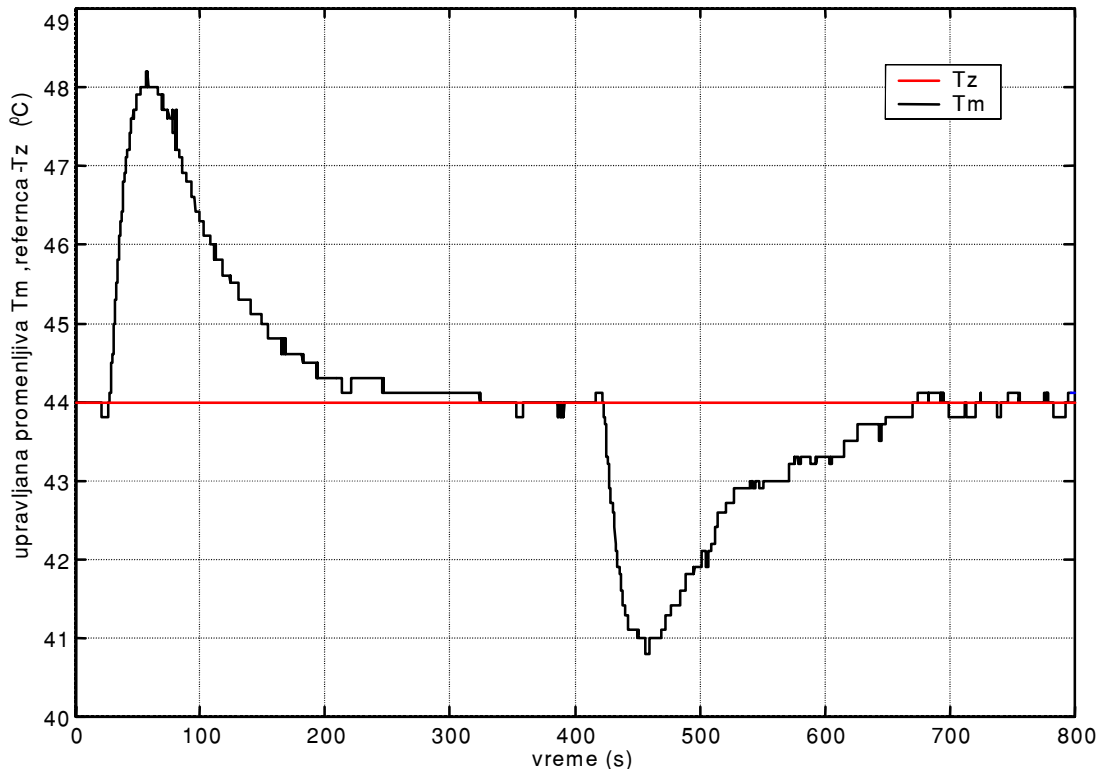
slika 5.2 odziv upravljane promenljive na zadatu trajektoriju



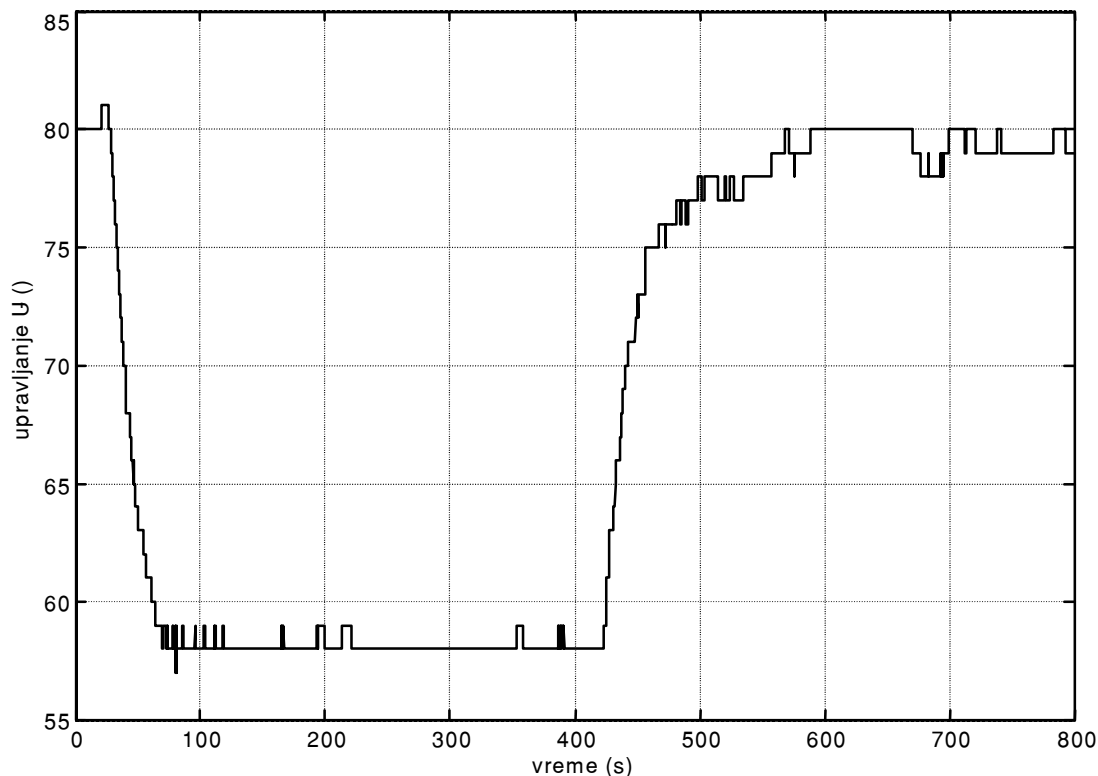
slika 5.3 grafik upravjačke promenljive pri praćenju zadate trajektorije

Sa sl. 5.2 vidimo da regulator na zadovoljavajući način prati zadatu trajektoriju iako su se parametri OU menjali usled velikih promena upravljačke promenljive.

Provera regulatora, u smislu održavanja upravljane promenljive kada na objekt upravljanja deluje poremećaj promene protoka  $Q$ , je izvedena naglim okretanjem klapne prigušnika sa  $\alpha = 0^\circ$  na  $\alpha = 45^\circ$  a kasnije kada je uticaj poremećaja na upravljaju promenljivu bio suzbijen, klapna se vraćala na početni položaj  $\alpha = 0^\circ$  nakon čega je regulator opet trebao da potisne efekat poremećaja.



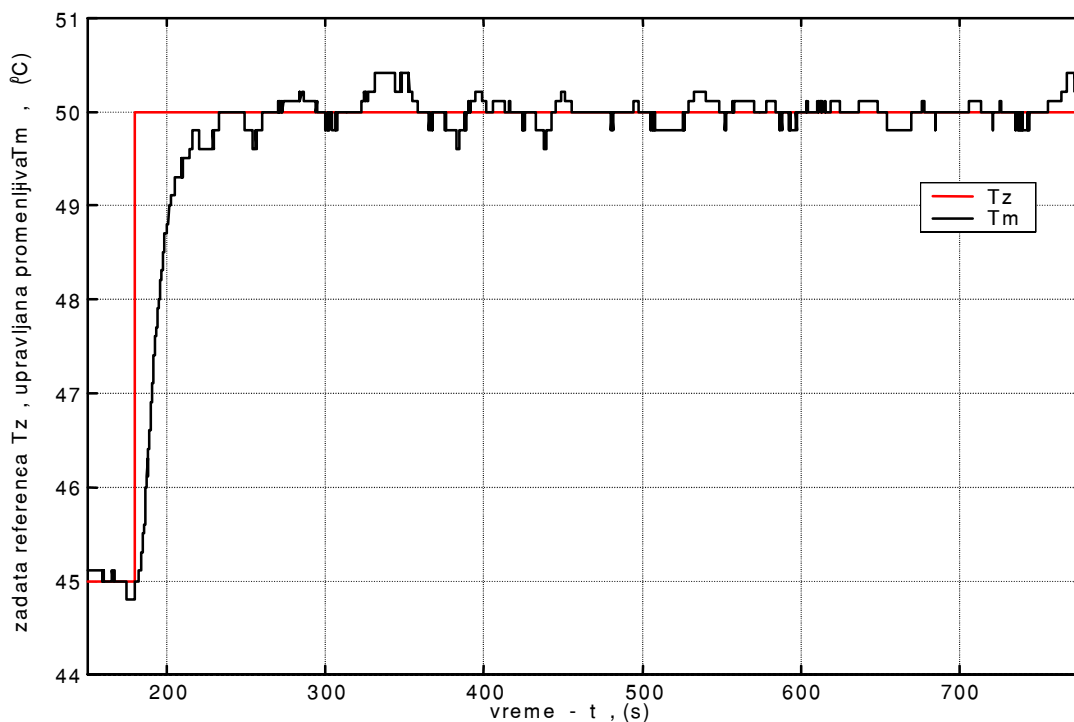
slika 5.4 suzbijanje efekta poremećaja na upravljaju promenljivu



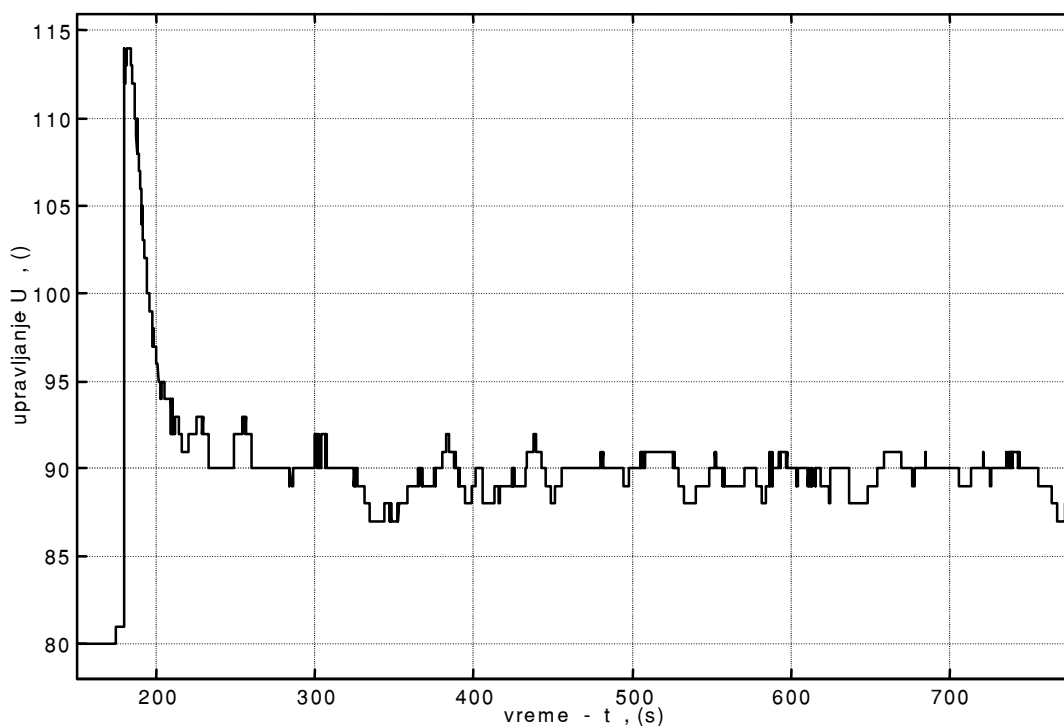
slika 5.5 upravljačka promenljiva pri suzbijanju efekta poremećaja

Na sl. 5.4 prikazan je grafik upravljane promenljive pri dejstvu poremećaja, na sl. 5.5 prikazano je upravljanje koje je suzbijalo efekat poremećaja na upravljaju promenjivu, i to pri vrednosti parametra  $1/\lambda = 25 \text{ s}$ , i referenci  $T_z = 44^\circ\text{C}$ . Vidi se da projektovani regulator potiskuje uticaj poremećaja tipa odskočne promene protoka na upravljaju promenjivu.

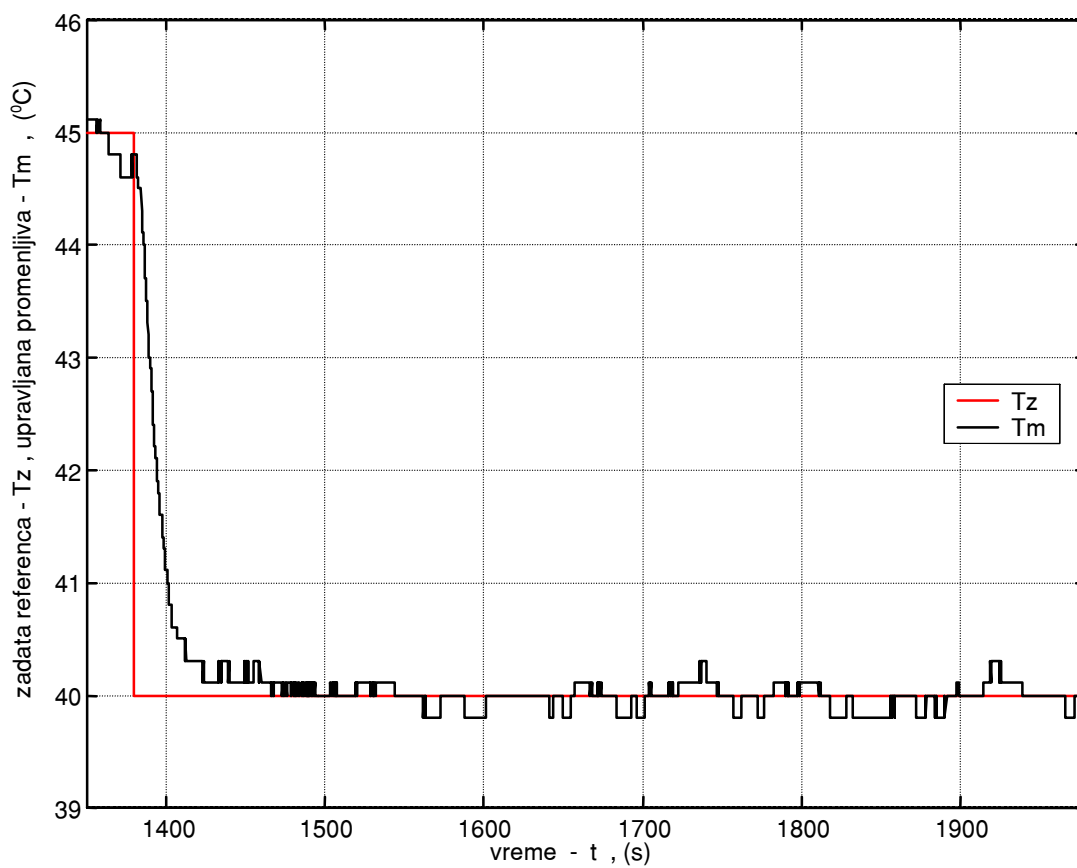
U narednim graphicima, sl. 5.6 do 5.17, biće prikazani pojedinačni odzivi na zadate odskočne ulaze, i upravljačke promenljive, koji su prikazani na sl. 5.2, ali u većoj razmeri radi boljeg sagledavanja rada projektovanog regulatora, pri  $1/\lambda = 12.5 \text{ s}$  i  $\alpha = 0^\circ$ .



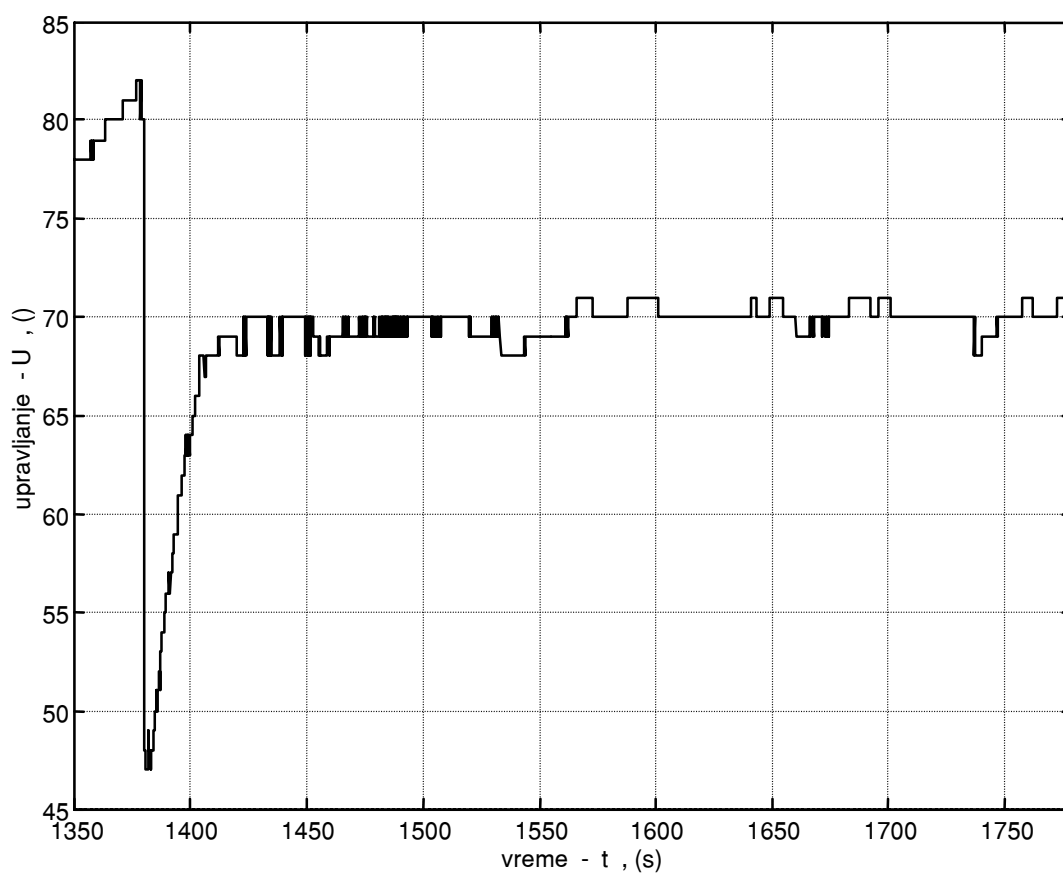
slika 5.6 upravljana promenljiva, pri odskočnom ulazu  $+5^\circ\text{C}$  u odnosu na  $45^\circ\text{C}$



slika 5.7 upravljanje, pri odskočnom ulazu  $+5^\circ\text{C}$  u odnosu na  $45^\circ\text{C}$

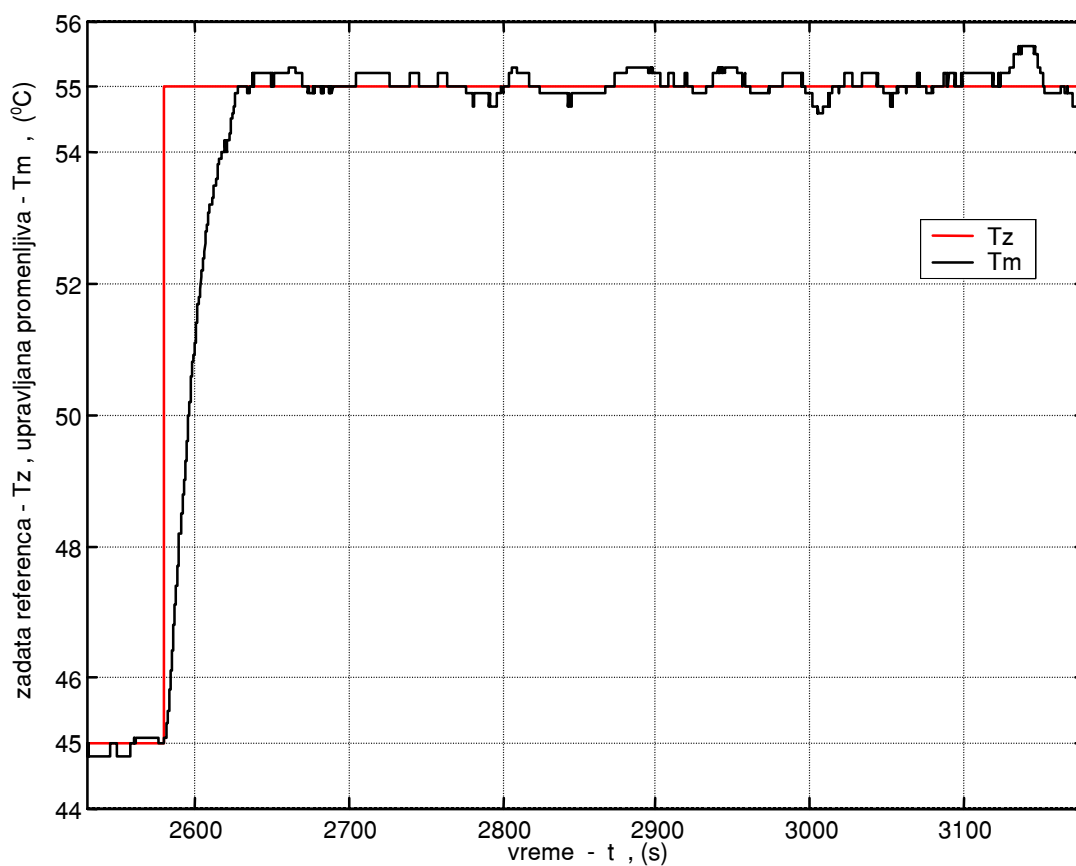


slika 5.8 upravljana promenljiva, pri odskočnom ulazu  $-5^{\circ}\text{C}$  u odnosu na  $45^{\circ}\text{C}$

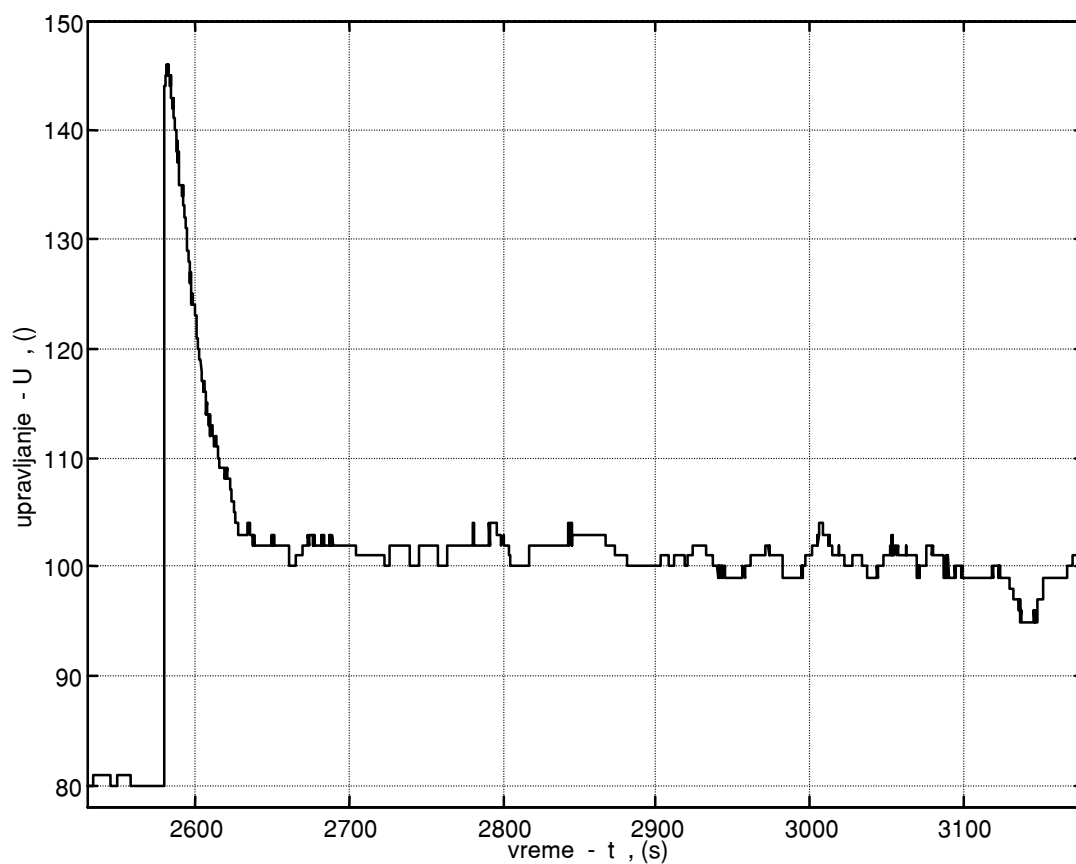


slika 5.9 upravljanje, pri odskočnom ulazu  $-5^{\circ}\text{C}$  u odnosu na  $45^{\circ}\text{C}$

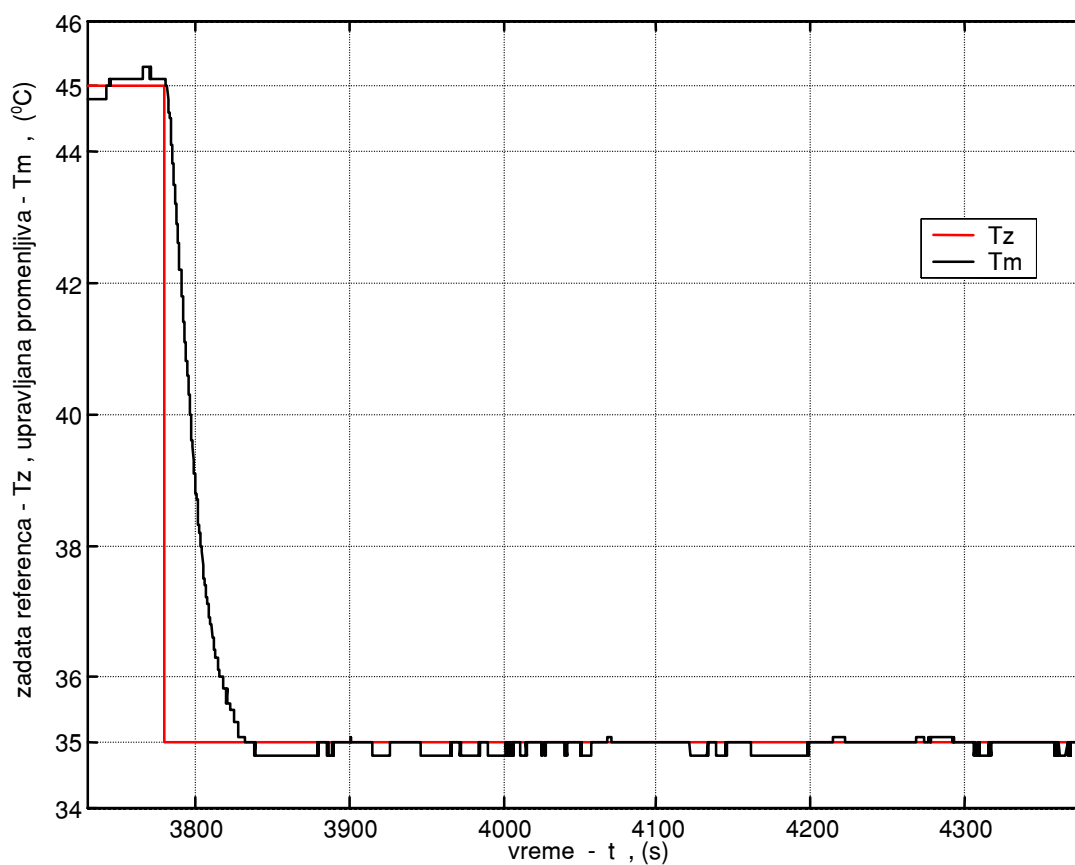




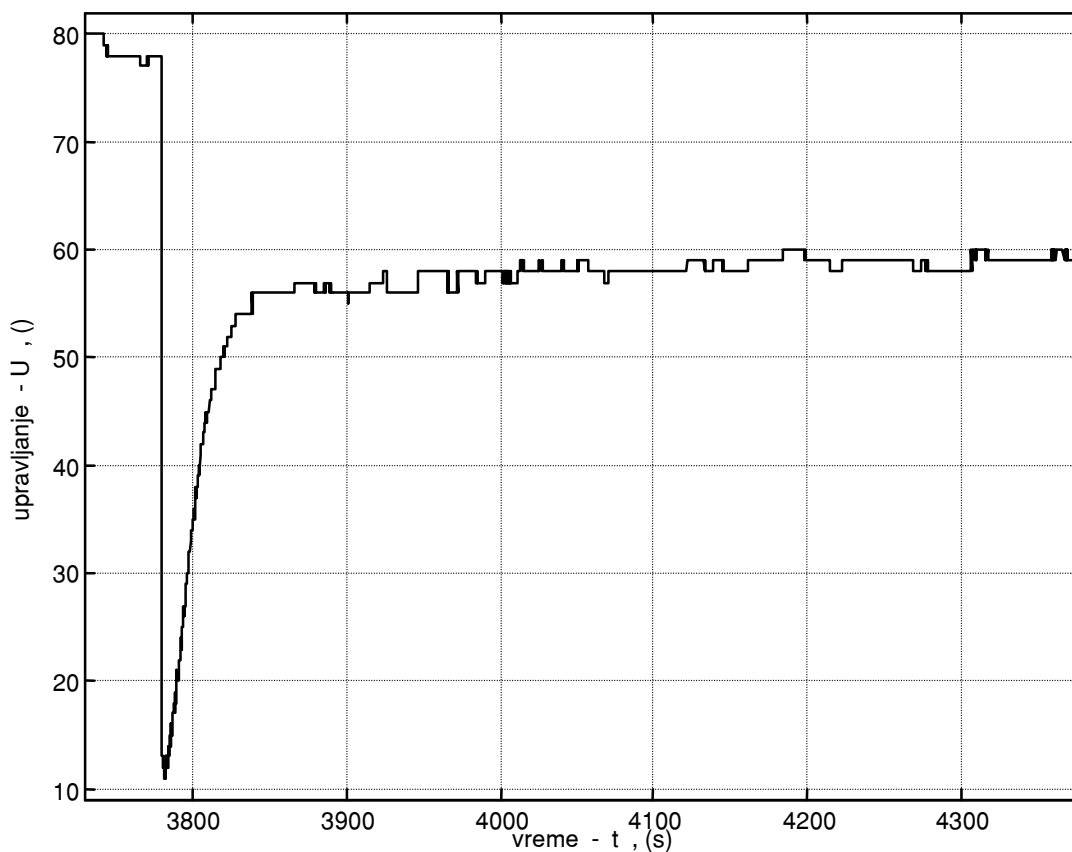
slika 5.10 upravljana promenljiva, pri odskočnom ulazu  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  u odnosu na  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$



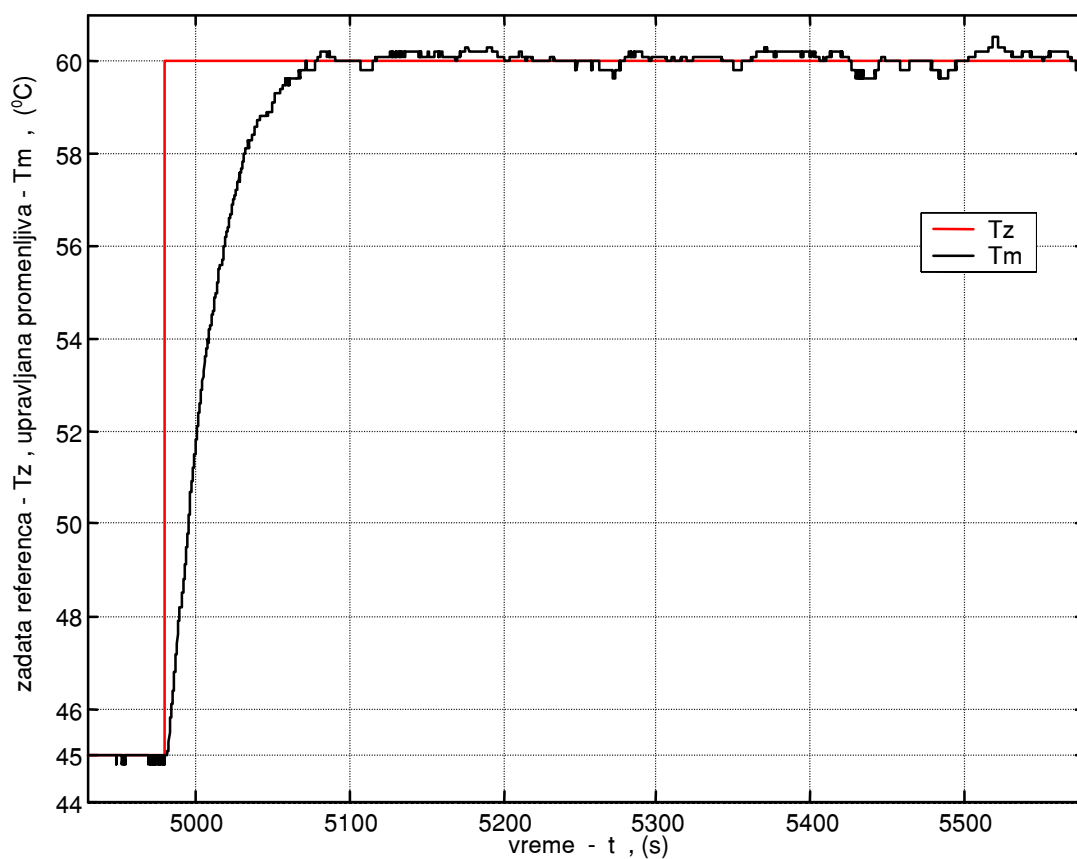
slika 5.11 upravljanje, pri odskočnom ulazu  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  u odnosu na  $45\text{ }^{\circ}\text{C}$



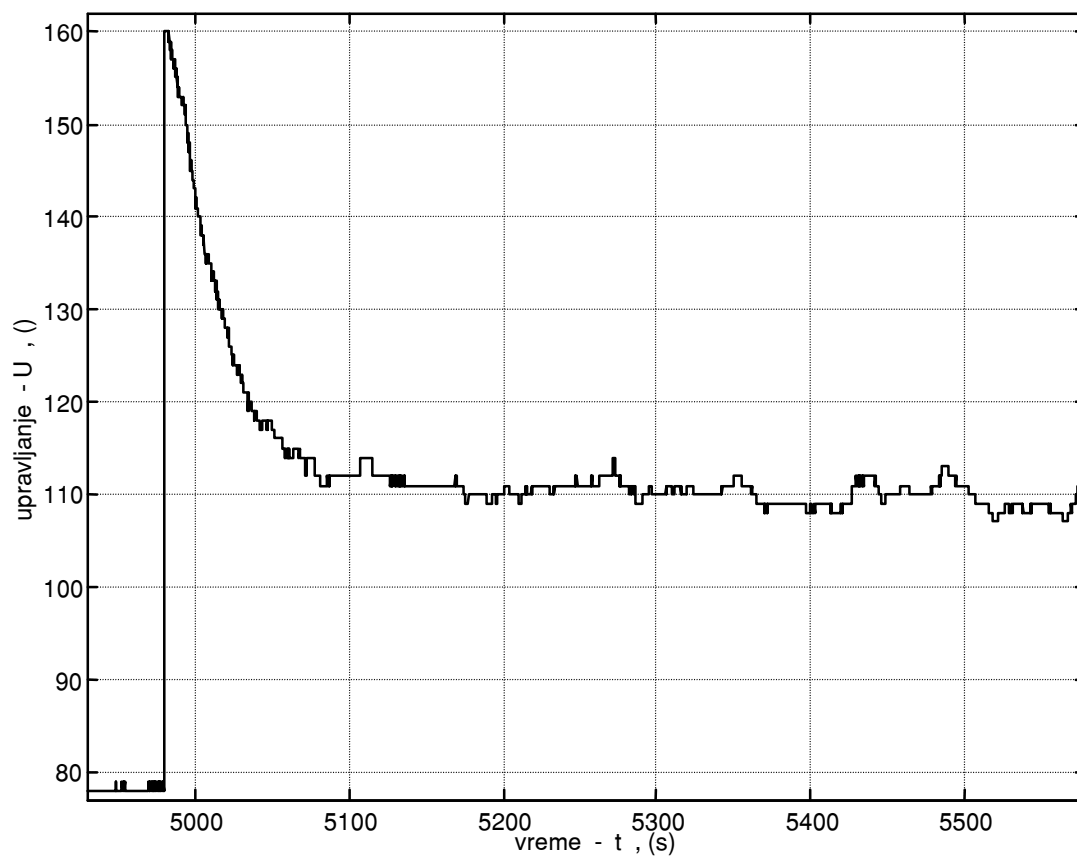
slika 5.12 upravljana promenljiva, pri odskočnom ulazu  $-10^{\circ}\text{C}$  u odnosu na  $45^{\circ}\text{C}$



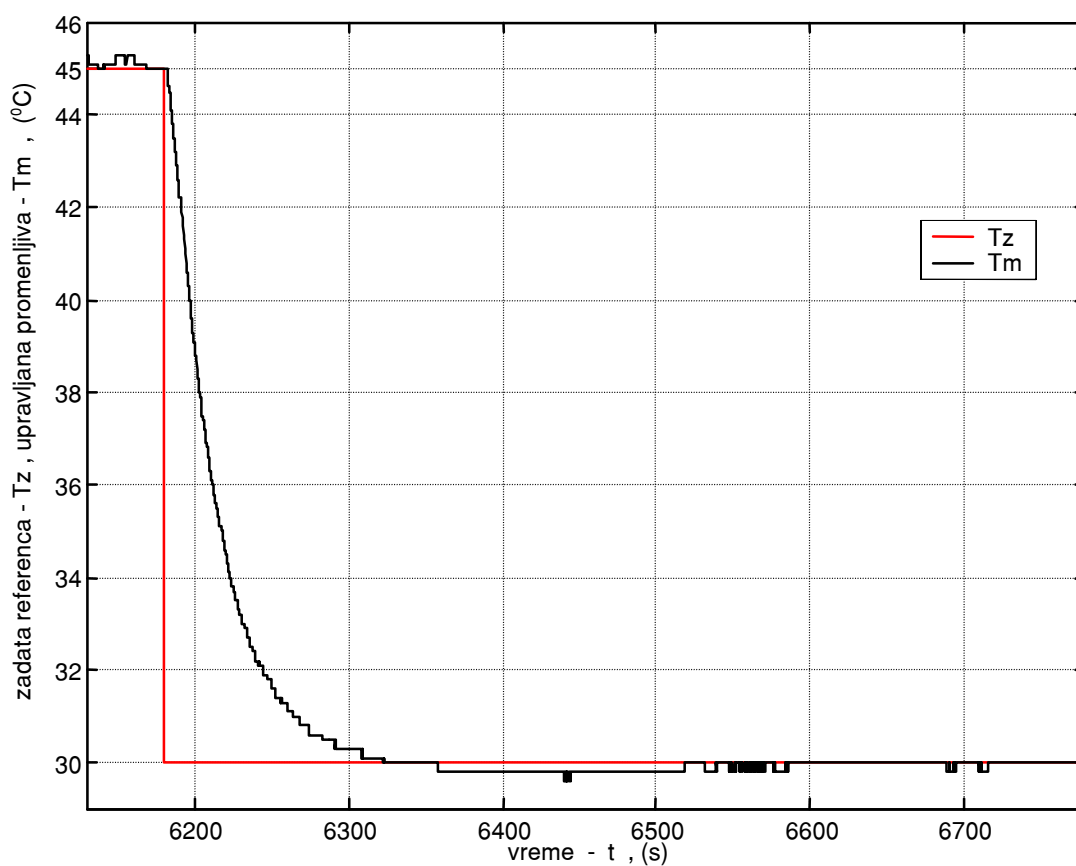
slika 5.13 upravljanje, pri odskočnom ulazu  $-10^{\circ}\text{C}$  u odnosu na  $45^{\circ}\text{C}$



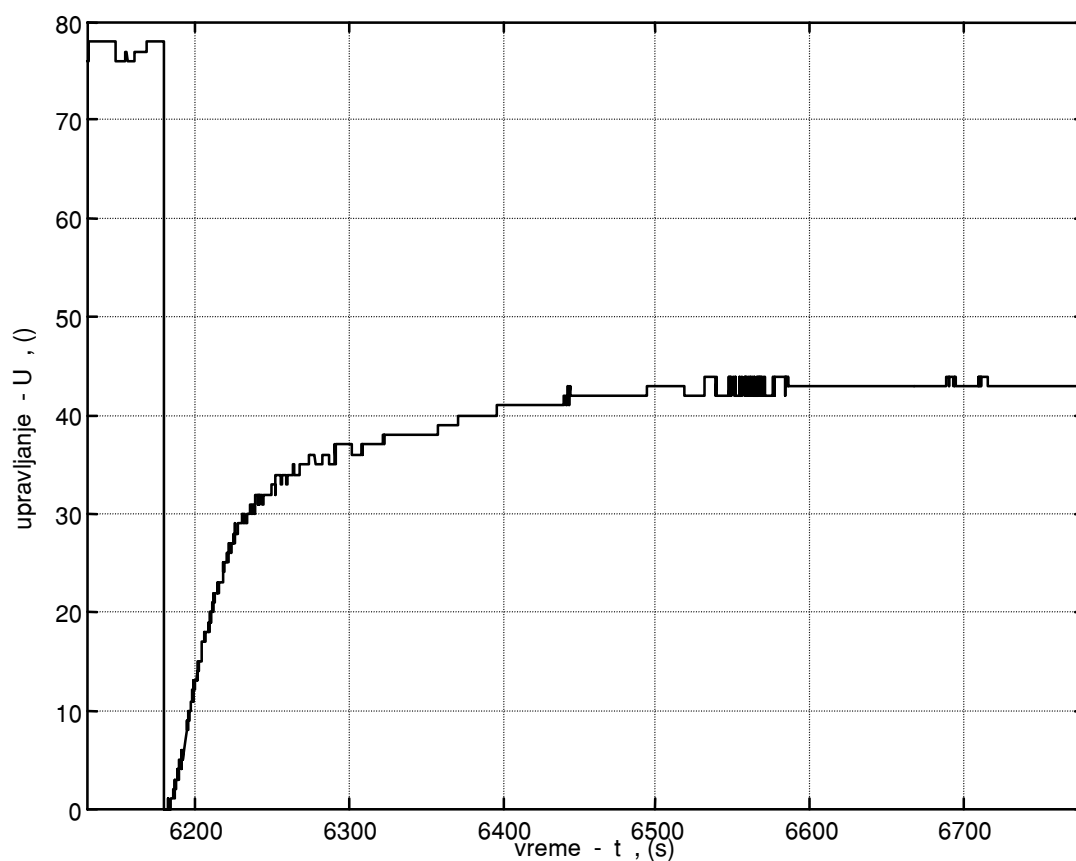
slika 5.14 upravljana promenljiva, pri odskočnom ulazu  $+15^{\circ}\text{C}$  u odnosu na  $45^{\circ}\text{C}$



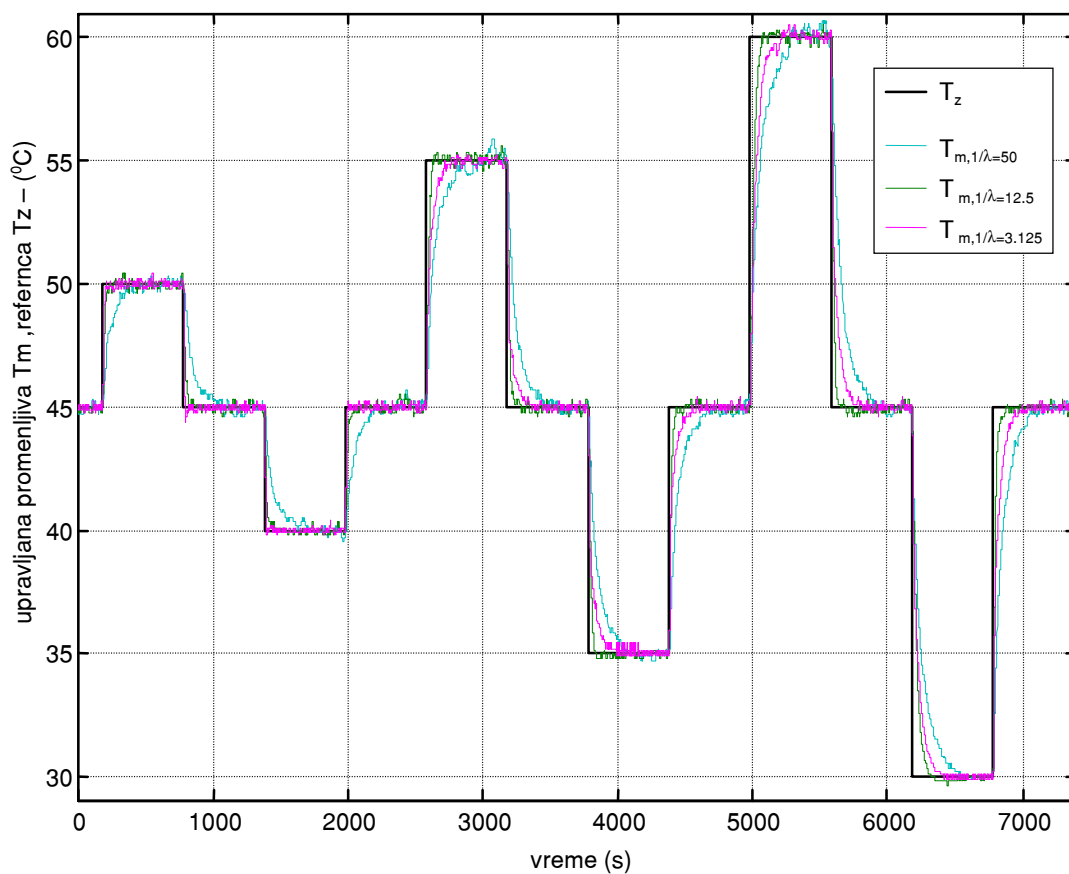
slika 5.15 upravljanje, pri odskočnom ulazu  $+15^{\circ}\text{C}$  u odnosu na  $45^{\circ}\text{C}$



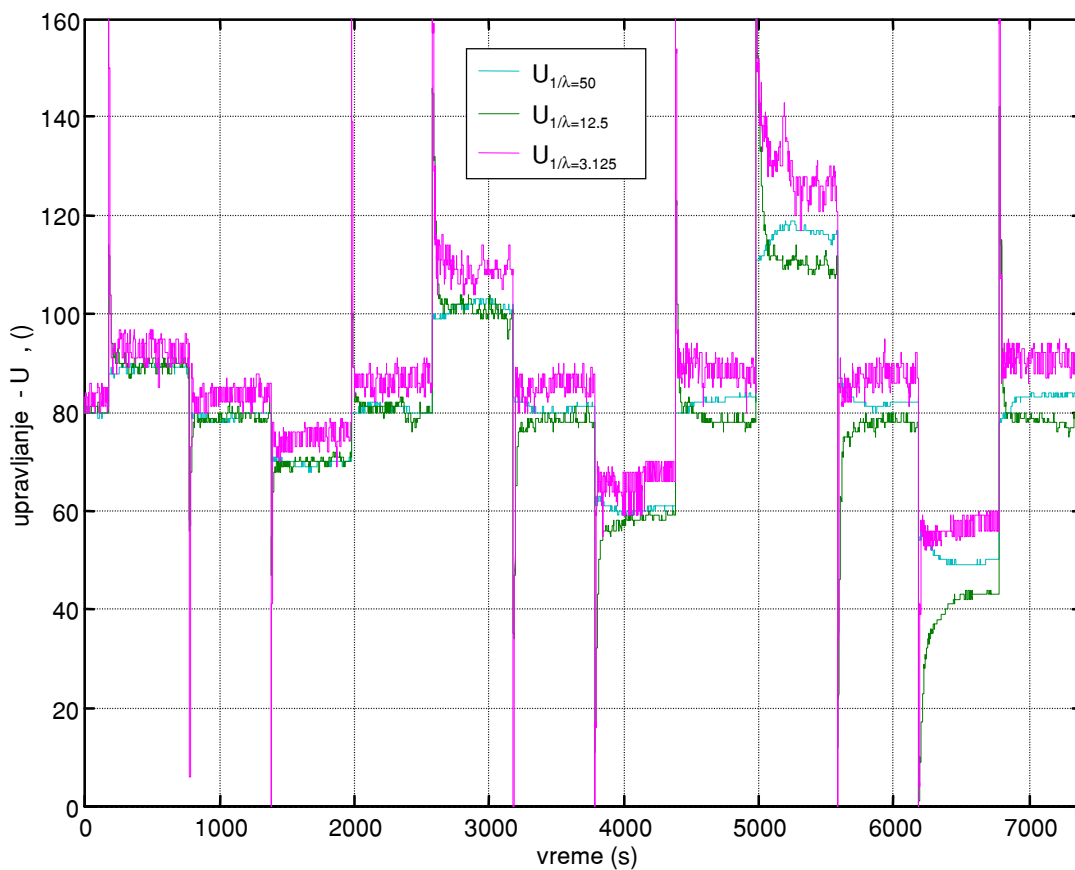
slika 5.16 upravljana promenljiva, pri odskočnom ulazu  $-15^{\circ}\text{C}$  u odnosu na  $45^{\circ}\text{C}$



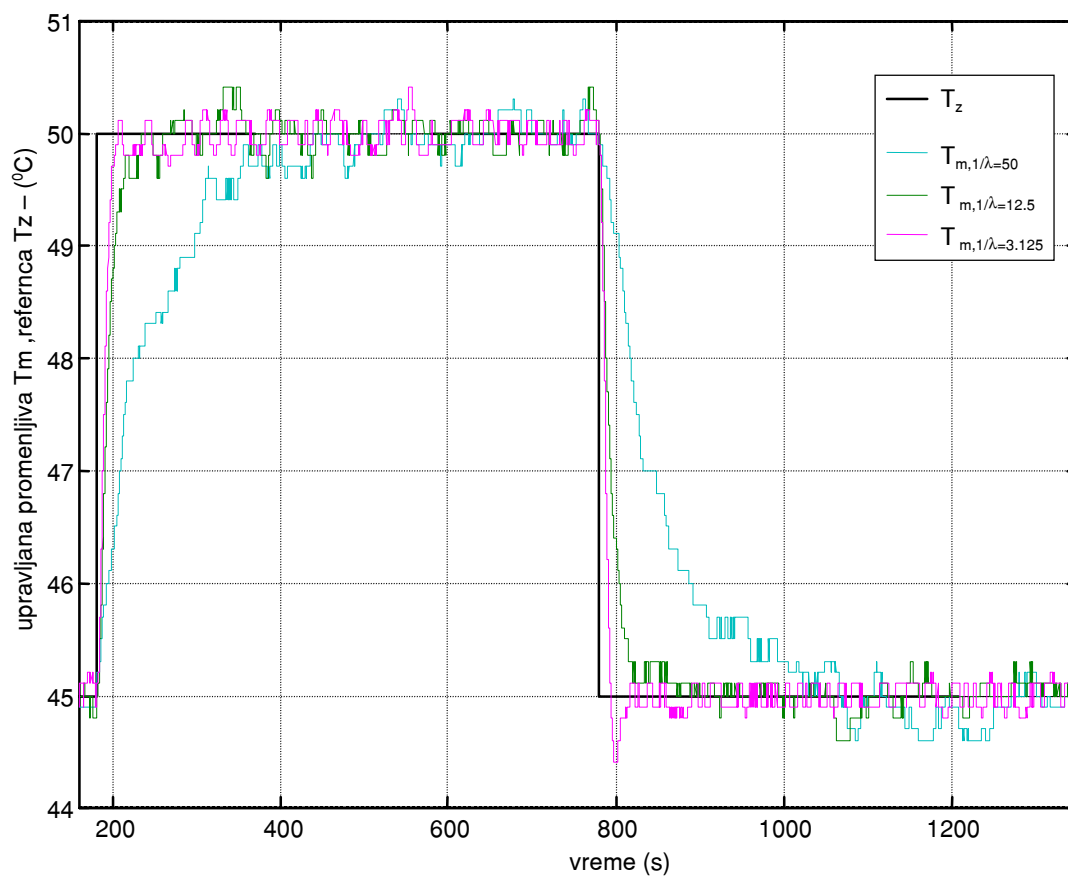
slika 5.17 upravljanje, pri odskočnom ulazu  $-15^{\circ}\text{C}$  u odnosu na  $45^{\circ}\text{C}$



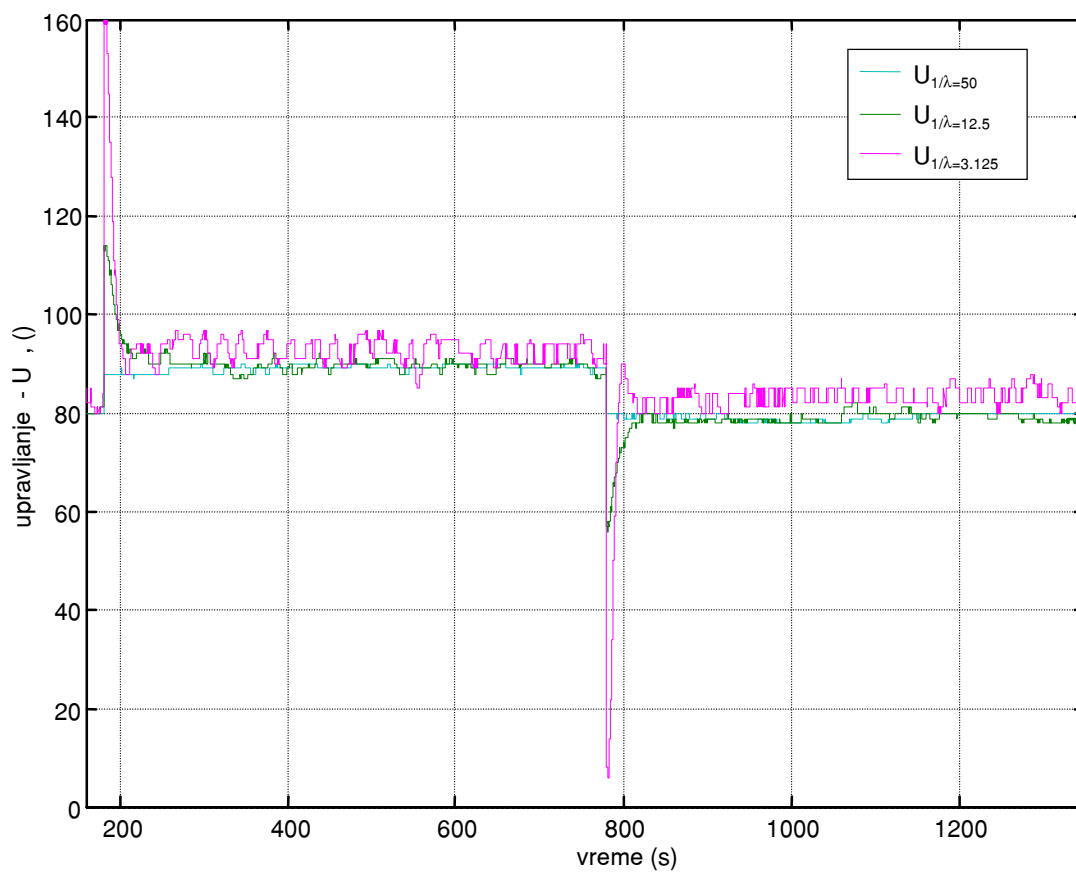
slika 5.18 upravljana promenljiva pri praćenju trajektorije, za  $1/\lambda = 50, 12.5, 3.125$



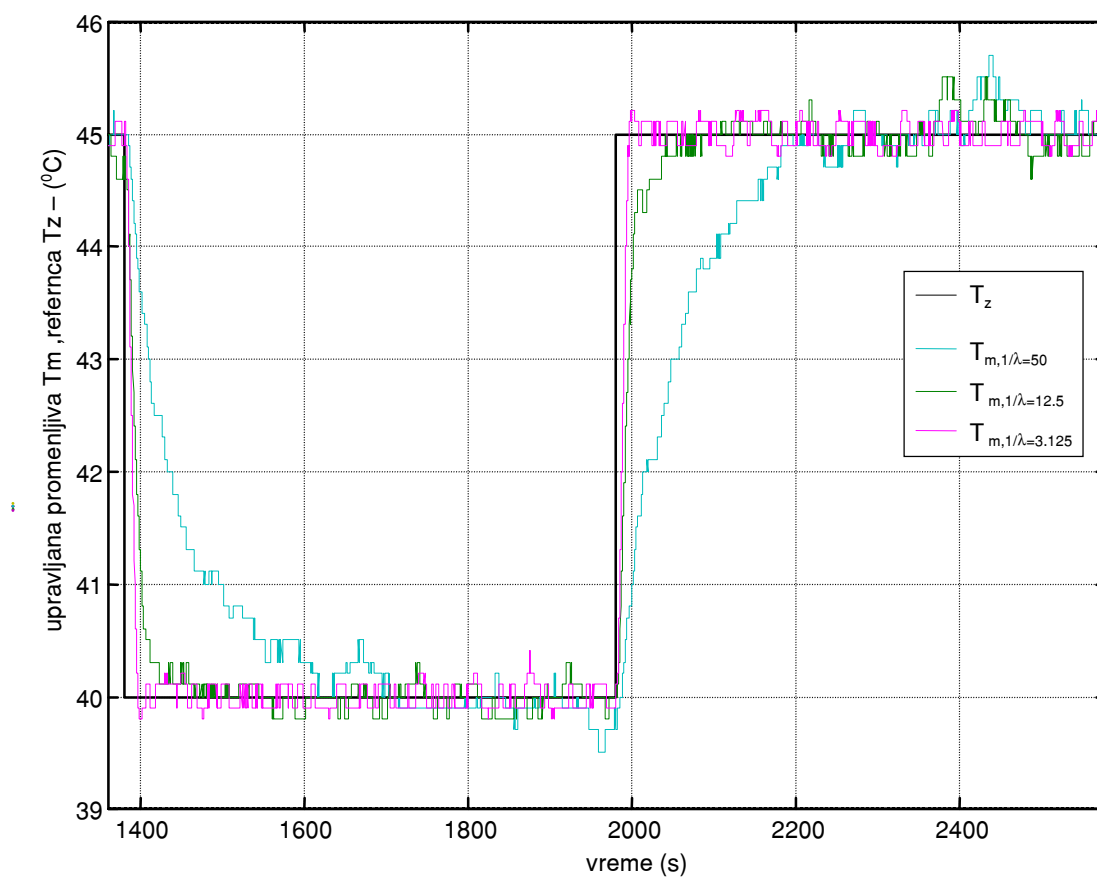
slika 5.19 upravljачka promenljiva pri praćenju trajektorije, za  $1/\lambda = 50, 12.5, 3.125$



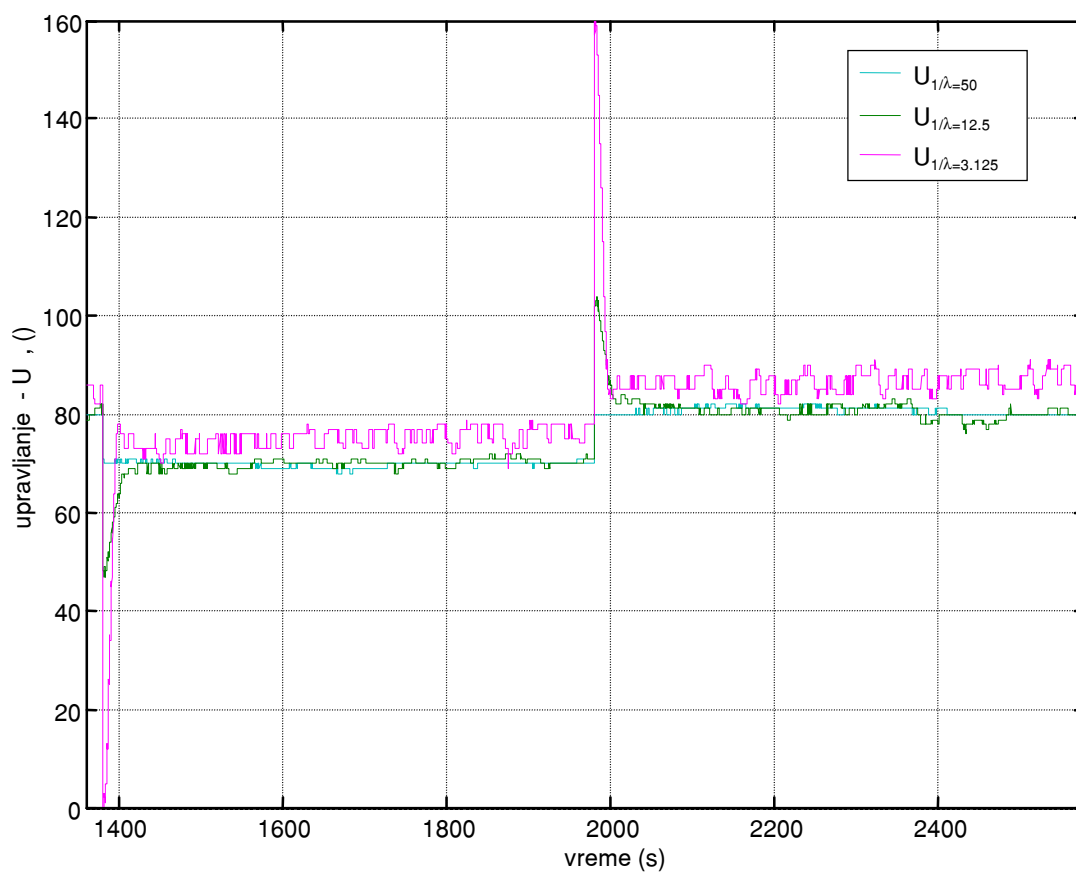
slika 5.20 upravljana promenljiva pri praćenju trajektorije (  $t = 160-1380$  s), za  $1/\lambda = 50, 12.5, 3.125$



slika 5.21 upravljačka promenljiva pri praćenju trajektorije (  $t = 160-1380$  s), za  $1/\lambda = 50, 12.5, 3.125$



slika 5.22 upravljana promenljiva pri praćenju trajektorije (  $t = 1330 - 2580$  s), za  $1/\lambda = 50, 12.5, 3.125$



slika 5.23 upravljačka promenljiva pri praćenju trajektorije (  $t = 1330 - 2580$  s), za  $1/\lambda = 50, 12.5, 3.125$

Na sl. 5.18-5.23 prikazano je kako upravljana promenljiva prati zadatu trajektoriju, pri različitim vrednostima podešavajućeg parametra  $\lambda$  Dahlinovog algoritma upravljajana. Vidi se da se sa porastom vrednosti parametra  $\lambda$  povećava brzina odziva upravljane promenljive.

Digitalni sistem automatskog upravljanja je bio u stanju da prati zadatu trajektoriju na zadovoljavajući način kao i da potiskuje uticaj svih poremećaja na upravljaju promenljivu.



## Zaključak

Realizovani laboratorijski model procesa za sušenje vazduha se pokazao kao adekvatan fizički model industrijskog procesa za sušenje vazduha pa je kao takav zgodan za testiranje algoritama upravljanja. Cevi usisnog i potisnog voda su od plastičnog materijala pa s obzirom na to treba posebno voditi računa da slučajno ne dođe do havarije.

U procesu identifikacije se uvidelo da je objekt upravljanja dosta nelinearan, kao i nestacionaran. Objašnjeno je u glavi III da je nelinearnost u najvećoj meri izazvana nelinearnošću izvršnog organa koja je bila uslovljena ograničenjima korišćenog mikrokontrolera u pogledu kapaciteta programske memorije, kao i načinom rada tajmera.

Korišćeni regulator je obezbedio zadovoljavajuće ponašanje konture regulacije, što ne znači da bi korišćenjem nekog drugog algoritma upravljanja postigli čak i bolje performanse, a što nije bio predmet razmatranja ovog rada. Manjkavosti ovakvog načina regulacije sa gledišta praktične primene, se u najvećoj meri ogledaju u nepoznavanju parametara objekta upravljanja, što uslovljava obavezan postupak identifikacije objekta upravljanja pre pristupanja projektovanju regulatora. Kako se u ovom radu radilo o dosta sporom objektu upravljanja, proces identifikacije je trajao dugo, da bi se došlo do što tačnijih vrednosti parametara koji ga opisuju, a što nije uvek ostvarivo u realnim uslovima. U industriji, naročito kod nekih hemijskih procesa, kao i u nekim drugim slučajevima, ovakav način podešavanja regulatora nije moguće izvesti.

Kontura regulacije je testirana u celom opsegu vrednosti parametara objekta upravljanja. Uz opadanje kvaliteta regulacije u odnosu na nominalni režim regulator je u širokom dijapazonu vrednosti parametara ispunjavao svoj osnovni osnovni zadatak, u pogledu praćenja zadate trajektorije i suzbijanja efekta poremećaja na upravljanoj promenljivoj.

Projektovani kontroler je obezbedio A/D i D/A konverziju, izvršavanje algoritma upravljanja, kao i komunikaciju sa PC računom. S obzirom na cenu koštanja, A/D konverzija je izvedena na dosta jednostavan način, ali je uslovlila i nisku rezoluciju što je uticalo na kvalitet regulacije, a i mikrokontroler je trošio dosta vremena za ovu operaciju. Između oprečnih zahteva, cene koštanja i kvaliteta upravljanja, korišćeni način konverzije je predstavljao prihvatljivo rešenje. Korišćeni metod, D/A konverzija i pojačanja snage, izveden pomoću opto-triak-triak sekcije, je imao izuzetno nisku rezoluciju od 160 nivoa, što je takođe uticalo na nizak nivo kvaliteta regulacije, mada je praktično primenljiv i pokazao se kao jedno od mogućih rešenja. Primećeno je tokom rada kontrolera, da se triak dosta greje pa je bilo neophodno obezbediti mu adekvatno hlađenje, što je i učinjeno hladnjakom. Mikrokontroler je koristio integer aritmetiku prilikom izvršavanja algoritma upravljanja, što je uslovlilo negativne efekte na tačnost procesiranja u smislu greški nastalih zaokruživanjem promenljivih na celobrojne vrednosti, a samim tim i na kvalitet regulacije. Naravno ovaj problem je moguće rešiti razvojem softvera koji bi koristio aritmetiku sa pokretnim zarezom što nije bio predmet razmatranja ovog diplomskog rada, ali se postavlja i pitanje koliko bi se poboljšanje kvaliteta regulacije stvarno postiglo na projektovanom kontroleru, s obzirom na dosta nisku rezoluciju D/A i A/D konverzije korišćene u ovom radu.

I pored navedenih, mana i nedostataka, kontroler je obezbedio zadovoljavajući nivo kvaliteta ponašanja upravljane promenljive. Sa manjim izmenama, od slučaja do slučaja, može se praktično primeniti za regulaciju u industriji, gde se ne zahteva visok nivo kvaliteta regulacije kao i gde postoji mogućnost za izvođenje procesa identifikacije. Upoređujući ga sa kontrolerima velikih firmi, Siemens, Omron, po ceni koštanja je u neuporedivoj prednosti a na račun nešto nižeg kvaliteta regulacije. Omogućava akviziciju podataka, programom C1Comm, kao i nadgledanje procesa. Kontroler ima i priključak za reprogramiranje mikrokontrolera čime je obezbeđena softverska nadgradnja, što ga čini fleksibilnim. Prilikom snimanja ulazno-izlaznih sekvenci, tokom identifikacije, i eksperimentalne verifikacije, kontroler je radio više puta po tri dana bez prestanka, pri čemu nije dolazilo do prekida komunikacije sa PC računarom, niti do zaglavlivanja mikrokontrolera, pa se pokazao kao stabilan i pouzdan u radu.

## Prilog A

```

*****
;*
;* ODREDJIVANJE TEMPERATURE (OTPORA) *
;*
*****

```

DSCHRG

```

movlw .3
movwf TEMPhi

```

```

BANK1
movlw B'00010011'
movwf TRISA
BANK0

```

LOOPdschrg1

```

decfsz TEMPhi,F
goto LOOPdschrg2
goto ENDDSCHRG

```

LOOPdschrg2

```

movlw .166
movwf TEMP

```

LOOPdschrg21

```

decfsz TEMP, F ;WAIT
goto LOOPdschrg21
goto LOOPdschrg1

```

ENDDSCHRG

```

BANK1
movlw B'00010111'
movwf TRISA
BANK0
retlw 0

```

M\_TIME

```

TLOOP incfsz TEMP, F
goto ENDCHK
incf TEMPhi, F

```

```

ENDCHK btfss PORTA,4
goto TLOOP

```

```

END_M retlw 0x00

```

PRORACUNotpornosti

```

BANK0
movlw high Rcal
movwf AARGB0
movlw low Rcal
movwf AARGB1

```

```

movf tmerO,W
movwf BARGB0
movf tmerO+1,W
movwf BARGB1

```

call FXM1616S

```

movf tcalO,W
movwf BARGB0
movf tcalO+1,W
movwf BARGB1

```

call FXD3216U

```

movf AARGB0,W
movwf Rmer
movf AARGB1,W
movwf Rmer+1

```

retlw 0x00

KiN

```

OdACS Rmer , Opseg1 , 0
btfss AARGB0,7
goto OpH

```

```

OdACS Rmer , Opseg2 , 0
btfss AARGB0,7
goto OpG

```

```

OdACS Rmer , Opseg3 , 0
btfss AARGB0,7
goto OpF

```

```

OdACS Rmer , Opseg4 , 0
btfss AARGB0,7
goto OpE

```

```

OdACS Rmer , Opseg5 , 0
btfss AARGB0,7
goto OpD

```

```

OdACS Rmer , Opseg6 , 0
btfss AARGB0,7
goto OpC

```

```

OdACS Rmer , Opseg7 , 0
btfss AARGB0,7
goto OpB

```

```

OdACS Rmer , Opseg8 , 0
btfss AARGB0,7
goto OpA

```

OpH

```

movlw h'10'
movwf KI
movlw h'46'
movwf KI+1
movlw 0xFF
movwf NI
movlw 0x82
movwf NI+1
movwf ExitKiN

```

OpG

```

movlw h'12'
movwf KI
movlw h'15'
movwf KI+1
movlw 0x00
movwf NI
movlw 0x37
movwf NI+1
movwf ExitKiN

```

OpF

```

movlw h'13'
movwf KI
movlw h'88'
movwf KI+1
movlw 0x00
movwf NI
movlw 0xB4
movwf NI+1
movwf ExitKiN

```

OpE

```

movlw h'15'
movwf KI
movlw h'3A'
movwf KI+1
movlw 0x01
movwf NI
movlw 0x30
movwf NI+1
movwf ExitKiN

```

OpD

```

movlw h'18'
movwf KI
movlw h'6A'
movwf KI+1
movlw 0x01
movwf NI
movlw 0xF4
movwf NI+1

```

	goto	ExitKiN		call	M_TIME
OpC	movlw	h'1B'		movf	TEMPHi,W
	movwf	KI		movwf	tcalO
	movlw	h'20'		movf	TEMP,W
	movwf	KI+1		movwf	tcalO+1
	movlw	0x02			
	movwf	NI		BANK1	
	movlw	0x7E		movlw	B'00010111'
	movwf	NI+1		movwf	TRISA
	goto	ExitKiN		BANK0	
OpB				retlw	0x00
	movlw	h'1E'			
	movwf	KI		MERENJEotpornosti	
	movlw	h'84'			
	movwf	KI+1		BANK1	
	movlw	0x03		movlw	B'00010111'
	movwf	NI		movwf	TRISA
	movlw	0x0D		BANK0	
	movwf	NI+1			
	goto	ExitKiN		call	DSCHRG
OpA					
	movlw	h'25'		clrf	TEMP
	movwf	KI		clrf	TEMPHi
	movlw	h'8F'			
	movwf	KI+1		BANK1	
	movlw	0x03		movlw	B'00010101'
	movwf	NI		movwf	TRISA
	movlw	0xFB		BANK0	
	movwf	NI+1			
	goto	ExitKiN		call	M_TIME
ExitKiN	retlw	0x00			
PRORACUNtemperature				movf	TEMPHi,W
	call	KiN		movwf	tmerO
	movf	Rmer,W			
	movwf	AARGB0		movf	TEMP,W
	movf	Rmer+1,W		movwf	tmerO+1
	movwf	AARGB1			
	movf	KI,W		BANK1	
	movwf	BARGB0			
	movf	KI+1,W		movlw	B'00010111'
	movwf	BARGB1		movwf	TRISA
				BANK0	
	call	FXM1616S		retlw	0x00
	movlw	0x27			
	movwf	BARGB0			
	movlw	0x10			
	movwf	BARGB1			
	call	FXD3216U			
	movf	NI,W			
	movwf	BARGB0			
	movf	NI+1,W			
	movwf	BARGB1			
	call	FXSub66S			
	movf	AARGB0,W			
	movwf	Tmer			
	movf	AARGB1,W			
	movwf	Tmer+1			
	retlw	0x00			
KALIBRACIJA					
	BANK1				
	movlw	B'00010111'			
	movwf	TRISA			
	BANK0				
	call	DSCHRG			
	clrf	TEMP			
	clrf	TEMPHi			
	BANK1				
	movlw	B'00010110'			
	movwf	TRISA			
	BANK0				

## Prilog B

```

%
% Program za obradu podataka za identifikaciju OU
% Objekt je l reda , i promena parametara OU
% u zavisnosti od vrednosti upravljacke promenljive u
% kao i od promene prigusenja zbog zaokretanja klapne
% exp. X - klapna je na 0 stepeni - najmanje prigusenja
% exp. Y - klapna je na 22.5 stepeni - srednje prigusenja
% exp. Z - klapna je na 33.8 stepeni - najvece prigusenja
%
% Petrovic Djordje
%

%clear all;
clear global;
home,clc

format long

if x==1
    load('T.mat')
    load('U.mat')
    load('TI.mat')
    load('KI.mat')
end

time=0:0.04:1000;
t=0.04;
Klapna = ['X' 'Y' 'Z'];
Senzor = ['A' 'B' 'C'];
RastPad = ['R' 'O'];

%nkr = [53 58 63;
%      55 59 63;
%      67 70 73];

%nko = [65 70 75;
%      68 72 76;
%      72 75 78];

nkr = [55 55 55 55 55 55 55 55 55 55;
      58 58 58 58 58 58 58 58 58 58;
      74 74 74 74 74 74 74 74 74 74];
nko = [59 59 59 59 59 59 59 59 59 59;
      62 62 62 62 62 62 62 62 62 62;
      75 75 75 75 75 75 75 75 75 75];

while x~=1

clear T TI KI

for i=1:3; % Klapna

clear IMEf exx
clear TrPr urPr Tr ur Trs Ar Br Tlr Klr Tlrs Klrs Ur1
clear ToPr uoPr To uo Tos Ao Bo Tlo Klo Tlos Klos Uo1
clear Tss Tls Kls

Vr=10000;IMEf = Klapna(i);

disp(['UCITAVANJE experimenta ' IMEf])
exx=load(['IMEf ' .m']); %OBAVEZNO DODATI !!!!
exx(:,2)=fix(exx(:,2)*0.631);
exx(:,1)=exx(:,1)/10;
%exx=load(['IMEf ' .m']); %OBAVEZNO DODATI !!!!
No = fix((length(exx)/Vr)/20);
No1= length(exx);
figure(10);plot((1:No1),exx(:,1),(1:No1),exx(:,2));
%figure(10);plot((1:No1),exx(:,1)-min(exx(:,1)),(1:No1),exx(:,2)*0.235);
title(['experiment ' IMEf]);
xlabel(' br uzorka (i)');ylabel(' Temperatura - (^o C) , u (s)');

```

```

grid;pause;saveas(1,['_ex' IMEf],'fig');close(10)

for j=1:10; %Odredjuje o kom nivou snage se radi

%
% RASTUCE KRIVE
%

ind=0;
Uredu=2;

while Uredu~=1

clear Tr ur TrPr urPr

for m=((j-1)*Vr+1):20*Vr:No1-Vr;

TrPr(1:Vr+1,(((m-((j-1)*Vr+1))/(20*Vr))+1),j)= exx(m:m+Vr,1); %-exxSR;
urPr(1:Vr+1,(((m-((j-1)*Vr+1))/(20*Vr))+1),j)= exx(m:m+Vr,2)-exx(m,2);

if j==1 | j==2 | j==9 | j==10
figure(1);
plot((1:Vr+1),TrPr(:,((m-((j-1)*Vr+1))/(20*Vr))+1,j)); %,(1:Vr+1),urPr(:,((m-((j-1)*Vr+1))/(20*Vr))+1,j))*0.5
title(['ex ' IMEf ' (' num2str((j-1)*10) '- ' num2str(j*10) '% snage RASTUCA']);grid;

Odg=menu([' experiment - ' num2str(((m-((j-1)*Vr+1))/(20*Vr))+1) ' je OK ',' DA ',' NE ']);
close(1)
if Odg==1
ind=ind+1;
Tr(:,ind,j)=TrPr(1:Vr+1,(((m-((j-1)*Vr+1))/(20*Vr))+1,j);
ur(:,ind,j)=urPr(1:Vr+1,(((m-((j-1)*Vr+1))/(20*Vr))+1,j);
end

else

Tr=TrPr;
ur=urPr;
end

end;

if j==1 | j==2 | j==9 | j==10
Trs(:,j)=mean(Tr(:,j),2);
if j>1 | j<10;Trs(1:10,j)=Trs(10,j);end;
pom=Trs(10,j);
Trs(:,j)=Trs(:,j)-Trs(10,j);
Ur1(:,j)=ur(:,j);

figure(1);
plot((1:Vr+1),Tr(:,j),'c-',(1:Vr+1),Trs(:,j)+pom,'k-',(1:Vr+1),Ur1(:,j)*.1+pom,'m-', 'LineWidth',1.5);
title(['experiment ' IMEf ' (' num2str((j-1)*10) '- ' num2str(j*10) '% snage RASTUCA']);
xlabel(' uzorka ');ylabel(' Temperatura - (^o C) ');
grid;saveas(1,['IMEf 'R' num2str(j) 'nivo'],'fig');

Uredu=menu(' IZABRANE KRIVE SU OK ',' DA ',' NE ');
close(1)
if Uredu==2
ind=0;
%clear Tr ur TrPr urPr
end
else
Trs(:,j)=mean(Tr(:,j),2);
if j>1 | j<10;Trs(1:10,j)=Trs(10,j);end;
pom=Trs(10,j);
Trs(:,j)=Trs(:,j)-Trs(10,j);
Ur1(:,j)=ur(:,j);

figure(1);
plot((1:Vr+1),Tr(:,j),'c-',(1:Vr+1),Trs(:,j)+pom,'k-',(1:Vr+1),Ur1(:,j)*.1+pom,'m-', 'LineWidth',1.5);
title(['experiment ' IMEf ' (' num2str((j-1)*10) '- ' num2str(j*10) '% snage RASTUCA']);
xlabel(' uzorka ');ylabel(' Temperatura - (^o C) ');
grid;saveas(1,['IMEf 'R' num2str(j) 'nivo'],'fig');close(1) % pause;

Uredu=1;

end

end
end

```

```

erl=iddata(Trs(:,j),ur(:,1,j),0.04);
mrl=arx(erl,[1 1 nkr(i,j)],'Focus','Prediction'); %mrlc=d2c(mrl);mrlctf=tf(mrlc);mrlctf=tf(mrl)
[Ar(j,:) Br(j,:)] = arxdata(mrl);

Tlr(j,1) = (-t)/log(-Ar(j,2));
Klr(j,1) = Br(j,nkr(i,j)+1)/(1+Ar(j,2));

%
%   OPADAJUCE KRIVE
%

ind=0;
Uredu=2;

while Uredu~=1

clear To uo ToPr uoPr

for m=((j-1)*Vr+1+10*Vr):20*Vr:No1-Vr;

ToPr(1:Vr+1,((m-((j-1)*Vr+1+10*Vr))/(20*Vr))+1,11-j)= exx(m:m+Vr,1); %-exx(m+5,1);
uoPr(1:Vr+1,((m-((j-1)*Vr+1+10*Vr))/(20*Vr))+1,11-j)= exx(m:m+Vr,2)-exx(m,2);

if j==1 | j==2 | j==9 | j==10
figure(1);
plot((1:Vr+1),ToPr(:,((m-((j-1)*Vr+1+10*Vr))/(20*Vr))+1,11-j)); %, (1:Vr+1),uoPr(:,((m-((j-1)*Vr+1+10*Vr))/(20*Vr))+1,11-j)*0.5
title(['ex. ' IMEf ' (' num2str((11-j)*10) ' - ' num2str((10-j)*10) ')'] % snage OPADAJUCA]);grid;

Odg=menu([' experiment - ' num2str(((m-((j-1)*Vr+1+10*Vr))/(20*Vr))+1) ' . je OK '], ' DA ', ' NE ');
close(1)

if Odg==1
ind=ind+1;
To(:,ind,11-j)=ToPr(1:Vr+1,((m-((j-1)*Vr+1+10*Vr))/(20*Vr))+1,11-j);
uo(:,ind,11-j)=uoPr(1:Vr+1,((m-((j-1)*Vr+1+10*Vr))/(20*Vr))+1,11-j);
end

else
To=ToPr;
uo=uoPr;
end

end;

end;

if j==1 | j==2 | j==9 | j==10

Tos(:,11-j)=mean(To(:,11-j),2);
if j>1 | j<10;Tos(1:10,11-j)=Tos(10,11-j);end
pom=Tos(10,11-j);
Tos(:,11-j)=Tos(:,11-j)-Tos(10,11-j);
Uo1(:,11-j)=uo(:,1,11-j);

figure(1)
plot((1:Vr+1),To(:,11-j),'c-',(1:Vr+1),Tos(:,11-j)+pom,'k-',(1:Vr+1),Uo1(:,11-j)*.1+pom,'m-', 'LineWidth',1.5);
title(['experiment ' IMEf ' (' num2str((11-j)*10) ' - ' num2str((10-j)*10) ')'] % snage OPADAJUCE]);
xlabel(' broj uzorka (j)');ylabel(' T - (^o C)');
grid;saveas(1,['IMEf 'O' num2str(11-j) 'nivo'],'fig');
Uredu=menu(' IZABRANE KRIVE SU OK ', ' DA ', ' NE ');
close(1)
if Uredu==2
ind=0;
%clear To uo ToPr uoPr
end
end
else
Tos(:,11-j)=mean(To(:,11-j),2);
if j>1 | j<10;Tos(1:10,11-j)=Tos(10,11-j);end
pom=Tos(10,11-j);
Tos(:,11-j)=Tos(:,11-j)-Tos(10,11-j);
Uo1(:,11-j)=uo(:,1,11-j);

figure(1)
plot((1:Vr+1),To(:,11-j),'c-',(1:Vr+1),Tos(:,11-j)+pom,'k-',(1:Vr+1),Uo1(:,11-j)*.1+pom,'m-', 'LineWidth',1.5);
title(['experiment ' IMEf ' (' num2str((11-j)*10) ' - ' num2str((10-j)*10) ')'] % snage OPADAJUCE]);
xlabel(' broj uzorka (j)');ylabel(' T - (^o C)');
grid;saveas(1,['IMEf 'O' num2str(11-j) 'nivo'],'fig');close(1) % pause;
Uredu=1;
end
end

```

```

end

eol=iddata(Tos(:,11-j),uo(:,1,11-j),0.04);
mol=arx(eol,[1 1 nko(i,j)],'Focus','Prediction'); %molc=d2c(mol);molctf=tf(molc),moldtf=tf(mol)
[Ao(11-j,:) Bo(11-j,:)] = arxdata(mol);

Tlo(11-j,1) = (-t)/log(-Ao(11-j,2));
Klo(11-j,1) = Bo(11-j,nko(i,j)+1)/(1+Ao(11-j,2));

%
end % KRAJ petlje za J
%

for q=1:10;
Tss(:,q)=mean([Trs(:,q) -Tos(:,q)],2);
end;

T(i,1:3)=[{Trs} {Tos} {Tss}];
%figure(1);plot([T{i,1} T{i,2}]);pause;;close(1)

U(i,1:2)=[{Ur1} {Uo1}];

Tls(:,1)=mean([Tlr Tlo],2);
Kls(:,1)=mean([Klr Klo],2);

TI(i,1:3)=[{Tlr} {Tlo} {Tls}];
%figure(1);plot([TI{i,1} TI{i,2} TI{i,3}]);pause;close(1)

KI(i,1:3)=[{Klr} {Klo} {Kls}];
%figure(1);plot([KI{i,1} KI{i,2} KI{i,3}]);pause;close(1)

%
% S I M U L A C I J E
%
for j=1:10 % Nova J petlja za simulacije
%
% S I M U L A C I J E
%

clear Tlrs Klrs nkrs Uras
Tlrs=Tlr(j,1);Klrs=Klr(j,1);nkrs=nkr(i,j);Uras=Ur1(2,j);

sim susSR;

figure(1);hold on;
plot(time(1:Vr+1),TemR(1:Vr+1,2),'b-','LineWidth',1.5);
plot(time(1:Vr+1),Ur1(:,j)*Klrs,'m-',time(1:Vr+1),Trs(:,j),'r-');
title(['ex. ' IMEF ' (' num2str((j-1)*10) '- ' num2str(j*10) ')% snage - mlreda i srednja RASTUCA; Klr = ' num2str(Klrs,4) ' Tlr = '
num2str(Tlrs,3) ' nkr = ' num2str(nkr(i,j)) ' U = ' num2str(Uras)];);
xlabel(' vreme (s)');ylabel(' T - ^o C');legend('Tmod','Ulaz','Trs',0);
grid;pause;saveas(1,['IMEF 'Rsim' num2str(j)],'fig');hold off;close(1)

clear Tlos Klos nkos Uopa
Tlos=Tlo(j,1);Klos=Klo(j,1);nkos=nko(i,j);Uopa=Uo1(2,j);

sim susSO;

figure(1);hold on;
plot(time(1:Vr+1),TemO(1:Vr+1,2),'b-','LineWidth',1.5);
plot(time(1:Vr+1),Uo1(:,j)*Klos,'m-',time(1:Vr+1),Tos(:,j),'r-');
title(['ex. ' IMEF ' (' num2str((j-1)*10) '- ' num2str(j*10) ')% snage - mlreda i srednja OPADAJUCA ; Klo = ' num2str(Klos,5) ' Tlo = '
num2str(Tlos,3) ' nko = ' num2str(nko(i,j)) ' U = ' num2str(Uopa)];);
xlabel(' vreme ( s )');ylabel(' T - ( ^o C ) ');
legend('Tmod','Ulaz','Tos',0);
grid;pause;saveas(1,['IMEF 'Osim' num2str(j)],'fig');hold off;close(1)

clear Tlss Klss nkss Usim
Tlss=Tls(j,1);Klss=Kls(j,1);nkss=(nko(i,j)+nkr(i,j))/2;Usim=Ur1(2,j);

sim susS;

figure(1);hold on;
plot(time(1:Vr+1),Tem(1:Vr+1,2),'k-','LineWidth',1.5);
plot(time(1:Vr+1),Ur1(:,j)*Klss,'m-',time(1:Vr+1),Tss(:,j),'g-',time(1:Vr+1),Trs(:,j),'r-',time(1:Vr+1),-Tos(:,j),'b-');
title(['ex. ' IMEF ' (' num2str((j-1)*10) '- ' num2str(j*10) ')% snage - mlreda:srednja RASTUCA i -(OPADAJUCA) - KI = ' num2str(Klss) '
TI = ' num2str(Tlss) ' nks = ' num2str(nkss) ' U = ' num2str(Usim)];);

```



```

xlabel(' vreme ( s )');ylabel(' T - ( ^o C ) ');
legend(' Tmod',' Ulaz',' Tss',' Trs',' -1*(Tos),0);
grid;pause;saveas(1,['IMEf 'sim' num2str(j)],'fig');hold off;close(1)

%
% KRAJ SIMULACIJE
%
end % KRAJ Nove J petlje za simulacije
%
% KRAJ SIMULACIJE
%

end % KRAJ petlje za l

save T T
save U U
save TI TI
save KI KI

break
end % KRAJ za X

for i=1:3;

nTI=length(TI{i,1});
nKI=length(KI{i,1});

figure(1);hold on;
plot((1:nTI),TI{i,3},'k.-','LineWidth',1.5)
plot((1:nTI),TI{i,1},'r.-',(1:nTI),TI{i,2},'b.-')
title(['experiment ' Klapna(i) ' - vremenske konstante TI=f(u) OU ']);
legend('TI','Tlr','Tlo',0);
xlabel([' upravljanje - u ( *10% umax)']),ylabel(['Tlx - vremenska konstanta OU ( s ) ']);
grid;pause;saveas(1,['Klapna(i) 'TI'],'fig');hold off;close(1);

figure(1);hold on;
plot((1:nKI),KI{i,3},'k.-','LineWidth',1.5)
plot((1:nKI),KI{i,1},'r.-',(1:nKI),KI{i,2},'b.-')
title(['experiment ' Klapna(i) ' - pojacanje KI=f(u) OU']);
legend('KI','Klr','Klo',0);
xlabel([' upravljanje - u ( *10% umax)']),ylabel(['Klx - pojacanje OU ( ) ']);
grid;pause;saveas(1,['Klapna(i) 'KI'],'fig');hold off;close(1)

end;

figure(1);hold on;
for i=1:3
plot((1:nTI),TI{i,3},'k.-','LineWidth',1.5)
plot((1:nTI),TI{i,1},'r.-',(1:nTI),TI{i,2},'b.-')
end
title(['experiment ' Klapna(1:3) ' - vremenske konstante TI']);legend('TI','Tlrs','Tlos',0);
xlabel([' upravljanje - u ( *10% umax)']),ylabel(['Tlx - vremenska konstanta ( s ) ']);
grid;pause;saveas(1,['Klapna(1:3) 'TI'],'fig');
hold off;close(1);

figure(1);hold on;
for i=1:3
plot((1:nKI),KI{i,3},'k.-','LineWidth',1.5)
plot((1:nKI),KI{i,1},'r.-',(1:nKI),KI{i,2},'b.-')
end
title(['experiment ' Klapna(1:3) ' - pojacanja KI']);legend('KI','Klrs','Klos',0);
xlabel([' upravljanje - u ( *10% umax)']),ylabel(['Klx - pojacanje ( ) ']);
grid;pause;saveas(1,['Klapna(1:3) 'KI'],'fig');
hold off;close(1);

figure(1);hold on;
for j=1:10;
plot([T{1,1}(::j) T{1,2}(::j)],'c.-')
plot([T{2,1}(::j) T{2,2}(::j)],'r.-')
plot([T{3,1}(::j) T{3,2}(::j)],'b.-')
end
title(['experiment ' Klapna(1:3) ' srednje RASTUCE i OPADAJUCE']);

```

```
legend('Tro - ex. X', 'Tro - ex. Y', 'Tro - ex. Z', 0);  
xlabel(['vreme (s)']), ylabel(['T - temperatura (°C)']);  
grid; pause; saveas(1, [Klapna(1:3) 'RasOpa'], 'fig');  
hold off; close(1);
```

```
boja=['cgykrbgcmk'];
```

```
for i=1:3;  
figure(1); hold on;  
for j=1:10;  
plot(T{i,1}(:,j), boja(j))  
end  
title(['experiment ' Klapna(i) ' RASTUCE']);  
xlabel(['vreme (s)']), ylabel(['T - temperatura (°C)']);  
legend('10%umax', '20%umax', '30%umax', '40%umax', '50%umax', '60%umax', '70%umax', '80%umax', '90%umax', '100%umax', 0);  
grid; pause; saveas(1, [Klapna(i) 'Ras'], 'fig'); hold off; close(1);  
end
```

```
for i=1:3;  
figure(1); hold on;  
for j=1:10;  
plot(T{i,2}(:,j), boja(j))  
end  
title(['experiment ' Klapna(i) ' OPADAJUCE']);  
xlabel(['vreme (s)']), ylabel(['T - temperatura (°C)']);  
legend('10%umax', '20%umax', '30%umax', '40%umax', '50%umax', '60%umax', '70%umax', '80%umax', '90%umax', '100%umax', 0);  
grid; pause; saveas(1, [Klapna(i) 'Opa'], 'fig'); hold off; close(1);  
end
```

## Prilog C

	call	PRORACUNotpornosti			movf	AARGB0,W		
	call	PRORACUNtemperature			movwf	Uk		
					movf	AARGB1,W		; AARGB-0-3 -> Uk-0-3
	movf	Tzad,W			movwf	Uk+1		
	movwf	AARGB0			movf	AARGB2,W		
	movf	Tzad+1,W			movwf	Uk+2		
	movwf	AARGB1			movf	AARGB3,W		
					movwf	Uk+3		
	movf	Tmer,W			bcf	ISTATUS,1		
	movwf	BARGB0			btss	AARGB0,7		
	movf	Tmer+1,W			goto	ConstuB		
	movwf	BARGB1			bsf	ISTATUS,1		
					call	negAARG03		
	call	FXSub66S ; Ek = Tzad - Tmer			ConstuB	movlw	0x27	
					movwf	BARGB0		; (Constant=10000) -> BARGB-0-1
	movf	AARGB0,W			movlw	0x10		
	movwf	Ek			movwf	BARGB1		
	movf	AARGB1,W			call	FXD3216U ;Deljenje abs(Uk) sa 10000->AARGB-0-1		
	movwf	Ek+1						
	movf	Ek1,W			btss	ISTATUS,1		
	movwf	BARGB0			goto	UkOK1		
	movf	Ek1+1,W			call	negAARG01		
	movwf	BARGB1			bcf	ISTATUS,1		
	call	FXSub66S ; RAZ = Ek - Ek1 -> AARGB-0-1			UkOK1	movf	AARGB0,W	
KpuB	movf	Kp,W			movwf	Utmp		; AARGB-0-1 -> Utmp
	movwf	BARGB0			movwf	U		; AARGB-0-1 -> U
	movf	Kp+1,W			movf	AARGB1,W		
	movwf	BARGB1			movwf	Utmp+1		
					movwf	U+1		
	call	FXM1616S ;Mnozi Kp sa (Ek-Ek1) -> AARGB-0-3						
	movf	AARGB0,W			clrf	BARGB0		
	movwf	Uk			movlw	.80		; Ispitujem dal je (80 ->
	movf	AARGB1,W			movwf	BARGB1		; Uk>80 ?
	movwf	Uk+1			call	FXSub66S		
	movf	AARGB2,W			btsc	AARGB0,7 ; Uk-80 je >0 => Uk>80 => Uk=80		
	movwf	Uk+2			goto	Ukmanjeod80		
	movf	AARGB3,W			clrf	U		
	movwf	Uk+3			movlw	.80		
	movf	Ek,W			movwf	U+1		; U=80 !!
	movwf	AARGB0			clrf	Uk		
	movf	Ek+1,W			movlw	0x0C		
	movwf	AARGB1			movwf	Uk+1		
	movf	Ki,W			movlw	0x35		; Uk=80 !!
	movwf	BARGB0			movwf	Uk+2		
	movf	Ki+1,W			movlw	0x00		
	movwf	BARGB1			movwf	Uk+3		
					goto	Udalje1		
	call	FXM1616S ;Mnozi Ki sa Ek -> AARGB-0-3			Ukmanjeod80	clrf	AARGB0	
					movlw	.80		
	movf	Uk1,W			movwf	AARGB1		; Ispitujem dal je
	movwf	BARGB0						; Uk<-80 ?
	movf	Uk1+1,W			movf	Utmp,W		
	movwf	BARGB1			movwf	BARGB0		
	movf	Uk1+2,W			movf	Utmp+1,W		
	movwf	BARGB2			movwf	BARGB1		
	movf	Uk1+3,W			call	FXAdd66S		
	movwf	BARGB3						
	call	FXAdd22S ; Saberi Ki*Ek sa Uk1 -> AARGB-0-3			btss	AARGB0,7		
					goto	Udalje1		
	movf	Uk,W			Ukmanjeodminus80	movlw	0xFF	
	movwf	BARGB0			movwf	U		; U=-80 !!
	movf	Uk+1,W			movlw	0xB0		
	movwf	BARGB1			movwf	U+1		
	movf	Uk+2,W			movlw	0xFF		
	movwf	BARGB2			movwf	Uk		
	movf	Uk+3,W			movlw	0xF3		
	movwf	BARGB3			movwf	Uk+1		
					movlw	0xCB		; Uk=-80 !!
	call	FXAdd22S ; Saberi(Ki*Ek+Uk1)saUk->AARGB-0-3						

```

movwf Uk+2
movlw 0x00
movwf Uk+3

Udalje1 movf U,W
movwf AARGB0
movf U+1,W
movwf AARGB1

clrf BARGB0
movlw .80
movwf BARGB1

call FXAdd66S

movf AARGB0,W
movwf U ; Uk -racunsko
movf AARGB1,W
movwf U+1 ; stvarno U=Uk+Unom - Unom=80 50% snage

VREMEcekanja

movlw .0
movwf BARGB0
movlw .95
movwf BARGB1

call FXAdd66S
movf AARGB1,W

VREMEje
movwf VREME
btfss MRport
clrf VREME

PAMCENJEzaSledculteraciju

movf Uk,w
movwf Uk1
movf Uk+1,W ; Uk -> Uk1
movwf Uk1+1
movf Uk+2,w
movwf Uk1+2
movf Uk+3,W
movwf Uk1+3

movf Ek,W
movwf Ek1
movf Ek+1,W
movwf Ek1+1

bcf INTCON,INTF
bsf INTCON,4

```

## Literatura

- [1] Microchip Technology Inc, *PIC16F8X Datasheet*, literature number 30430c, [www.microchip.com](http://www.microchip.com), 2001.
- [2] D. Andrić i N. Matić, *PIC mikrokontroleri*, Agencija APC, drugo izdanje, Beograd, 2001.
- [3] Siemens, *Silizium-Temperatur-Sensoren*, Siemens AG, München, 1988.
- [4] Microchip Technology Inc, *Implementing Ohmeter/Temperature Sensor*, literature number AN512, [www.microchip.com](http://www.microchip.com), 1994.
- [5] Ž. Petronijević, *Elektrotehnika*, Naučna knjiga, Beograd, 1986
- [6] L.J.S. Draganović, *Projektovanje sistema automatskog upravljanja*, Lola Institut, Beograd, 1999.
- [7] M.S. Matijević, *Razvoj novih struktura digitalno upravljanih elektromotornih pogona i industrijskih procesa*, doktorska disertacija, Mašinski fakultet u kragujevcu, 2001.
- [8] M.R. Stojić, *Digitalni sistemi upravljanja*, Nauka, Beograd, 1990.
- [9] A. Palacherla, *Pic16C5X/PIC16CXXX Math Utility Routines*, literature number AN526, [www.microchip.com](http://www.microchip.com), 2001.
- [10] F.J. Testa, *Fixed Point Routines*, literature number AN617, [www.microchip.com](http://www.microchip.com), 2001.