

Realizacija fazi regulatora temperature i nagiba promene temperature u elektrootpornoj komornoj peći

Milica Jevtić, Nikola Đorđević, Zoran Radaković
Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu
Beograd, Srbija
radakovic@etf.bg.ac.rs / Bulevar kralja Aleksandra 73

Sažetak— U radu se prikazuje inovirana hardverska i softverska platforma za realizaciju fazi regulatora temperature i nagiba promene temperature u elektrootpornoj komornoj peći. Korak koji se prikazuje u radu predstavlja povratak istraživanjima koja su sprovedena u laboratoriji za elektrotermiju pre više od 15 godina, a sa idejom da se ispita robusnost fazi regulatora u pogledu promene objekta upravljanja (podešavanje regulatora na jednoj peći i primena, bez adaptacije regulatora, na drugoj peći).

Ključne riječi - regulacija temperature; fazi regulator; komorna peć; mikrokontroler (temperature control; fuzzy controller; indirect resistance furnace; DSP)

I. UVOD

Objekat upravljanja je elektrootporna komorna peć za opseg temperatura (do 1500°C). U radu [1] je pokazano da peć ima nelinearnu karakteristiku, odnosno da toplotni otpor (odnos porasta temperature i snage zagrevanja), koji predstavlja prenosnu funkciju objekta upravljanja, zavisi od snage zagrevanja. Drugi fenomen potiče od toga što u peći može da se menja količina šarže i materijal šarže, što dovodi do promene toplotnog kapaciteta, a samim tim i prenosne funkcije objekta upravljanja. Zbog navedenih razloga primena PID regulatora nije ni teorijski ni praktično jednostavna. O realizacijama regulatora (histerezisnog i PID sa adaptivnim parametrima) i rezultatima njihove primene je bilo reči u publikacijama koje su prethodile radu u kome je prikazana primena fazi (fuzzy) regulatora [2].

U radu [2] je prikazano da fazi regulator ima dobra svojstva, odnosno da se njegovom primenom može ostvariti dobar odziv sistema, kako za zadatu referencu temperature, tako i za zadati referentni nagib promene temperature. Pokazano je da je on robusan i na sadržaj šarže u peći. Jedan od praktičnih aspekata je pitanje da li je fazi regulator moguće koristiti po "plug and play" principu na peći koje su slične konstrukcije kao peć na kojoj je izvršeno podešavanje fazi regulatora. Ispitivanje ponašanja regulatora u tom smislu je bila motivacija da se ponovo pokrenu istraživanja. Imajući u vidu veliku pauzu od završetka faze rada koja je zaključena objavljivanjem rada [2], prvo je inoviran hardver i regulator realizovan i podešen koristeći savremene hardverske i softverske platforme.

II. HARDVER I PROGRAMIRANJE PERIFERIJA MIKROKONTROLERA

Izgled unutrašnjosti peći snage 5 kW je prikazan na Sl. 1 (a) u hladnom stanju, sa šaržom unutar peći i b) zagrejane peći, bez šarže); u prostor peći je postavljen i termopar za merenje temperature. Na Sl. 2 je prikazan merni, upravljački i aktuatorski deo regulatora.

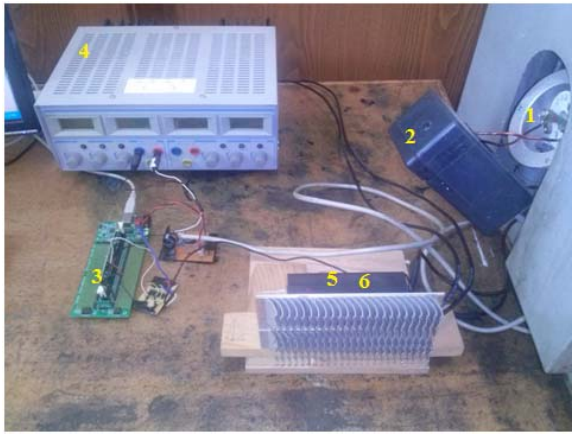


a) unutrašnjost hladne peći sa šaržom



b) unutrašnjost zagrejane peći bez šarže

Slika 1. Izgled unutrašnjosti peći



Slika 2. Merni, upravljački i aktuatorski deo regulatora

- 1) Termopar tipa K (NiCr-Ni), 2) Analogno pojačavačko kolo signala merene temperature (AD595), 3) Mikrokontroler (Texas Instruments Delfino TMS320F28335), 4) Stabilisani izvor jednosmernog napona (+12 V), 5) Optokaplersko kolo MOC 3040 za triak, 6) Trijak BTA 40/600

Termopar je tipa K (NiCr-Ni) i uvučen je u peć sa zadnje strane, obložen je izolacionim keramičkim perlicama, pri čemu je vrh termopara na sredini komore peći. Opseg temperatura koje ovaj termopar može da meri je između $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $1372\text{ }^{\circ}\text{C}$, pri čemu je generisana termoelektromotorna sila na hladnim krajevima termopara u opsegu od -6.458 mV do 54.819 mV , pri referentnoj temperaturi hladnih krajeva od $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Prilagođenje signala radnom naponskom nivou A/D konvertora mikrokontrolera se vrši analognim integrisanim kolom AD595, koje pored linearnog diferencijalnog pojačavača sadrži i stepen za kompenzaciju hladnih krajeva i stepen za signalizaciju prekida termopara. Na izlazu ovog kola, koje je postavljeno neposredno na hladnim krajevima termopara, dobija se napon, u opsegu od 0 do 10 V, koji je linearno zavisao od temperature toplog spoja termopara.

Ulazni naponski opseg A/D konvertora je od 0 do 3.3 V i prilagođenje ovom opsegu se vrši pomoću otporničkog razdelnika napona i filtriranje RC filtrom propusnikom niskih učestanosti do 1 kHz.

Merenje temperature se vrši na svakih 10 ms, a kao vrednost temperature koja se koristi kao ulaz u fazi regulator se uzima se srednja vrednost uzastopno izmerenih 1500 odbiraka u toku periode od 15s.

Primenjen je 32 bitni mikrokontroler Texas Instruments TMS320F28335. Od njegovih periferija korišćen je jedan analogno-digitalni konvertor (ulaz) i dva digitalna izlaza.

Izvršni organ (aktuator) je trijak BTA 40/600, za struju do 40 A i napon do 600 V. Trijak je upravljao preko optokaplerskog kola MOC 3040, na osnovu stanja digitalnog izlaza GPIO4 mikrokontrolera.

Kolo MOC 3040 je optokapler koji pomoću foto-diode i foto-tranzistora galvanski izoluje energetska deo od mikrokontrolera, pri čemu monolitskim silikonskim detektorom obezbeđuje detekciju prolaska napona mreže kroz

nulu i uključivanje trijaka u tom trenutku. Na taj način se izbegavaju nagli skokovi struje opterećenja pri uključivanju. Uključenjem i isključenjem trijaka, koji se koristi kao upravljački energetska prekidač, uspostavlja se ili prekida strujno kolo peći.

Frekvencija na kojoj se uspostavlja eventualna promena stanja digitalnog izlaza je 100 Hz (perioda $T = 10\text{ ms}$). Perioda izračunavanja snage zagrevanja je 15 s. Za nominalnu snagu od 5 kW, broj poluperioda n u kojima je stanje digitalnog izlaza jednako logičkoj jedinici (uključen trijak) je jednak

$$n = \frac{15\text{ s}}{0.01\text{ s}} \cdot \frac{P}{5000\text{ W}} \quad (1)$$

gde je P vrednost snage u [W] dobijena na izlazu fazi regulatora. Dakle, vrednost n se kreće u opsegu od 0 (isključen trijak, snaga zagrevanja nula) do 1500 (trijak uključen tokom čitave periode 15 s, snaga zagrevanja jednaka nominalnoj snazi od 5kW).

Na drugi digitalni izlaz (GPIO34) je priključena LED dioda mikrokontrolera. Na ovaj digitalni izlaz se dovodi izlaz iz bloka pulsog generatora (blok u Simulink modelu) koji radi sa frekvencijom od 1kHz i uključuje i isključuje svetleću diodu na pola sekunde. Svrha je kontrole izvršenja programa, odnosno indikacija rada kontrolera.

Izvor napajanja za elektroniku je stabilisani izvor jednosmernog napona +12 V.

Algoritam upravljanja je implementiran u Matlab-u pomoću biblioteka Simulink i Target Support Package. Nakon toga je funkcijom Build izvršeno prevođenje Simulink programa u C kod, kako bi se omogućilo spuštanje koda u RAM memoriju mikrokontrolera pomoću programa Code Composer Studio (CCS) 3.3. Praćenje promenljivih i zadavanje promene parametara tokom izvršenja programa takođe je omogućeno u programu CCS 3.3 [3], [4].

III. FAZI REGULATOR

Zadatak fazi regulatora je da u oblasti daleko od zadate temperature održava zadati nagib promene temperature, dok se u blizini reference sa regulacije nagiba prelazi na regulaciju temperature, pri čemu se teži dostizanju referentne temperature bez prebačaja. U odnosu na klasičnu regulaciju kod koje bi se regulator projektovao tako da se postigne odziv sistema u zatvorenoj povratnoj petlji po eksponencijalnoj vremenskoj funkciji sa jednom vremenskom konstantom, projektovani fazi regulator omogućava da se prati nagib (kao što je slučaj na početnom linearnom delu eksponencijalne funkcije), ali sve do bliske referentnoj temperaturi.

Kao posledica razdvojenosti područja delovanja, kontrola se može implementirati uz pomoć dva odvojena kontrolera: za temperaturu i nagib. Stoga se u Matlab - u formiraju dva fazi sistema zaključivanja (FIS - Fuzzy Inference System), jedan za regulaciju temperature, drugi za regulaciju nagiba, koji imaju po dva ulaza i jedan izlaz. Ovakav koncept je mnogo pogodniji za praktičnu realizaciju u odnosu na jedan FIS sa četiri ulaza zbog zauzimanja manjih memorijskih resursa mikrokontrolera.

Projektovanje fazi regulatora je vršeno korišćenjem Fuzzy Logic Toolbox-a u okviru Matlab programskog paketa. Korišćen je fazi kontroler na bazi FIS – a Sugeno tipa, kod koga izlaz može biti konstanta ili linearna funkcija.

Inicijalno definisanje svih elemenata regulatora temperature i nagiba promene temperature je izvršeno kao u radu [2], a odnosi se na: a) Funkcije pripadnosti (MF - Membership Functions) ulaznih promenljivih koje su trougaonog i trapezoidnog oblika, b) Funkcije pripadnosti izlazne promenljive koje su konstante, c) fazi pravila (fuzzy rules) za regulator temperature, sa ulazima MF-A i MF-B, d) fazi pravila (fuzzy rules) za regulator nagiba temperature, sa ulazima MF-C i MF-D, e) vrednost na kojoj se sa regulacije nagiba temperature, nakon približavanja referentnoj temperaturi, prelazi na regulaciju temperature. Korekcija regulatora, koji je inicijalno podešen i testiran na simulacijama je, kao i u [2], izvršena na bazi eksperimenta na realnom objektu upravljanja (peći). Detalji se mogu naći u [5]. Za razliku od [2], kod za mikrokontroler (TI TMS320F28335) je generisan direktno iz Matlab-a. Takođe, tokom razvoja i testiranja regulatora korišćen je rule viewer, pomoću koga u simulaciji mogu da se posmatraju aktivne MF funkcije i logika izvršenja fuzzy rules, a na osnovu vrednosti ulaznih promenljivih.

Ulazi u FIS strukturu za regulaciju temperature su temperaturna greška merene u odnosu na referentnu vrednost temperature (MF-A) i nagib promene temperature (MF-B). Ulazi u FIS strukturu za regulaciju nagiba promene temperature su greška nagiba temperature u odnosu na referentnu vrednost (MF-C) i promena nagiba temperature (MF-D). Izlaz iz obe strukture je inkrement snage (pozitivan ili negativan) u procentima od nominalne snage.

Opseg regulacije temperature je moguć za ulaznu vrednost temperaturne greške od -100 K do 100 K, dok je opseg regulacije nagiba u opsegu od -2.5 K/15 s do 2.5 K/15 s. Izlaz iz regulatora za vrednost ispod donje (negativne) granice je nula, a iznad gornje (pozitivne) granice je 100 %. Na izlazu iz regulatora se dobija procentualni inkrement snage u opsegu od -100 % do 100 %, koji utiče na promenu snage peći sa korakom od 3.33W.

IV. REZULTATI OGLEDA

Posle podešavanja fazi regulatora izvršeno je ukupno 6 ogleđa (tri na praznoj peći manje snage (5kW), jedan na peći manje snage u koju je postavljena šarža (komad gvožđa paralelopipednog oblika težine 16 kg), jedan na praznoj peći veće snage (5.5 kW) i jedan na peći veće snage u koju je postavljena ista šarža kao u peć manje snage.

Za svaki od ogleđa je izvršena i računarska simulacija, čiji se rezultati prikazuju na graficima zajedno sa rezultatima merenja. U simulacijama izvršenim u Simulink-u elektrootporna komorna peć je predstavljena prenosnom funkcijom čiji su parametri određeni iz rezultata merenja - odziva sistema na step pobudu snage zagrevanja (merena je temperatura u praznoj peći). Odzivi (porast temperature unutar peći) su mereni za različite vrednosti snaga, manjih ili jednakih nominalnoj, prikazani su u [1]. Zatim su estimirani parametri prenosnih funkcija u vremenskom domenu, a na osnovu njihovih određeni parametri prenosne funkcije objekta upravljanja

(toplotni otpor, određen kao odnos porasta temperature i snage zagrevanja), u kompleksnom (s) i diskretnom (z) - domenu. Korišćen je tipičan oblik prenosne funkcije koja opisuje dinamiku sistema sa zagrevanjem u kompleksnom domenu:

$$G(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s} \frac{K}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} e^{-NTs} \quad (2)$$

(K je statičko pojačanje, $\tau = NT$ je vremensko kašnjenje (ceo broj perioda odabiranja), T je perioda odabiranja, T_1 je vremenska konstanta koju unosi izvršni organ, T_2 je vremenska konstanta koju unosi proces upravljanja, članom $(1 - e^{-Ts})/s$ se modeluje AD konvertor). Odgovarajuća funkcija, dobijena primenom tablica Laplasove i Z-transformacije, u diskretnom z domenu glasi [6]:

$$G(z) = \frac{g(z - z_z)}{(z - z_{p1})(z - z_{p2})} z^{-N} \quad (3)$$

U nastavku su dati rezultati testiranja konačne verzije regulatora na praznoj i šaržiranoj peći, snage 5 kW. U simulacijama nije uzimana u obzir promena parametara peći sa snagom zagrevanja, već je za peć uzeta konstantna prenosna funkcija peći, određena prema odzivu snimljenom za 45 % nominalne snage. Zbog nelinearnog karaktera prenosa toplote parametri navedene funkcije objekta upravljanja su promenljivi, odnosno objekat upravljanja nije linearan. Potencijalno su mogle biti primenjene dve alternative korišćenju konstantne prenosne funkcije peći, određene prema odzivu snimljenom za 45 %: a) da se u svakom trenutku koriste parametri određeni iz ogleđa pri snazi koja je najbliža trenutnoj snazi zagrevanja ili b) da se peć modeluje preko jednačina koje opisuju fiziku prelaznih toplotnih procesa. Opcija a) je bila relativno lako izvodljiva, ali ni ona ne predstavlja značajno približavanje realnoj predstavi dinamičkog ponašanja peći, jer su parametri pri različitim snagama određeni tako da se minimizira suma kvadrata odstupanja vrednosti dobijenih korišćenjem prenosne funkcije od merenih vrednosti, u kompletnom temperaturnom opsegu - od početnog hladnog stanja do ustaljene temperature. U toku regulacije, promena snage se vrši skokovito, ali pri temperaturama većim od ambijentalne, zbog koga je dinamika termičkog procesa različita od one koja se imala pri snimanju odziva i određivanju prenosne funkcije. Pristup b) zahteva dinamički termički model peći, koja se sastoji od više slojeva, načinjenih od materijala različitih termičkih karakteristika. Pri tome, prenos toplote zračenjem i strujanjem imaju nelinearan karakter i moraju se modelovati simultanim sistemom jednačina prenosa toplote zračenjem i strujanjem, što predstavlja izazovan zadatak u oblasti termičkog modelovanja [7, 8].

Vrednosti parametara prenosne funkcije u diskretnom domenu za odziv snimljen na step pobudu od 45 % nominalne snage peći od 5kW su:

$$g = 8.94 \cdot 10^{-4}, z_z = 0.997, z_{p1} = 0.9926, z_{p2} = 0.9992, N = 8.$$

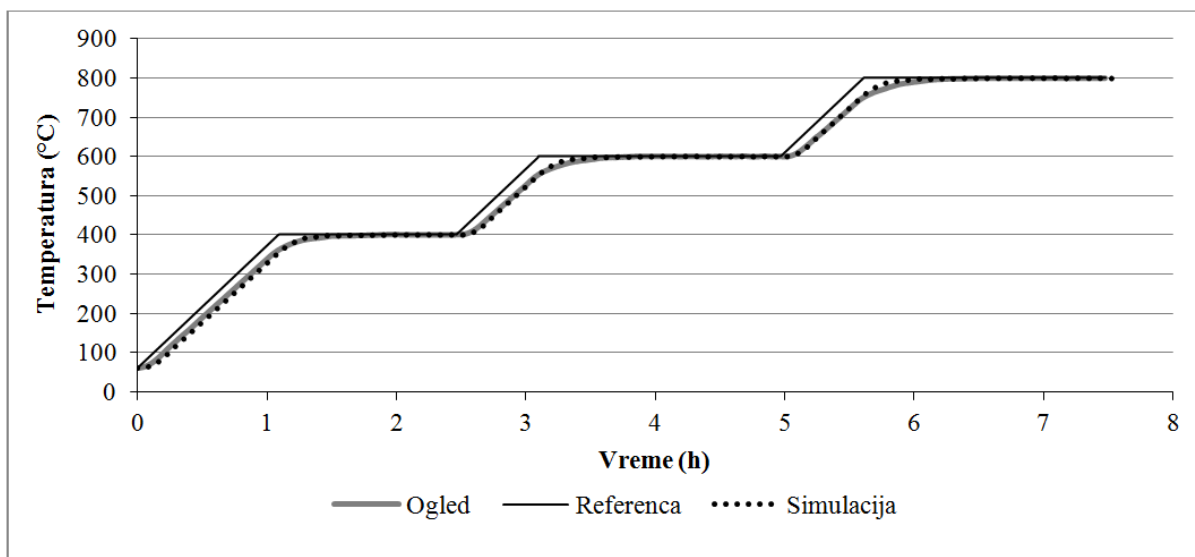
Ovo je glavni razlog odstupanja rezultata simulacije od rezultata dobijenih merenjem na peći, pogotovu za slučaj šaržirane peći, gde nije uzeto u obzir povećanje toplotnog kapaciteta i vremenske konstante objekta upravljanja.

Napomenimo da slaganje rezultata simulacije i merenja u ovom slučaju nije od prvorazrednog značaja. Naime, pokazalo se da se podešavanje regulatora, odnosno promena funkcija pripadnosti i fazi pravila, može izvršiti prilično jednostavno na osnovu veličina registrovanih tokom eksperimenata na peći, pri čemu je fazi regulator inicijalno podešen koristeći računarsku simulaciju (u Simulink-u). Nije realno očekivati da se samo na osnovu rezultata simulacija može idealno podesiti regulator koji bi se primenio direktno (bez dodatnog finog podešavanja) na realnoj peći. U tom smislu, iako smanjuje stepen intervencije u konačnom finom podešavanju na osnovu rezultata merenja na realnoj peći, tačnije modelovanje nema toliki praktični značaj, odnosno ne može se očekivati da je

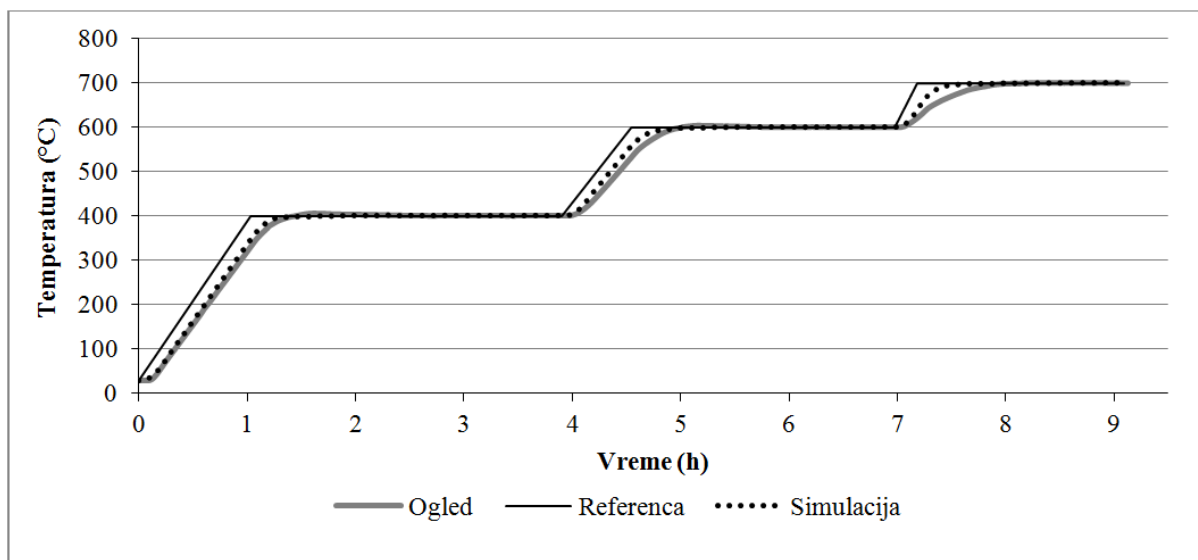
moguće potpuno eliminisanje dodatnog finog podešavanja fazi regulatora na osnovu rezultata merenja na realnoj peći.

Na Sl. 3 su prikazani porasti temperature u vremenu za praznu elektrootpornu komornu peć dobijeni merenjem i simulacijom (korišćenjem Simulink-a). Zadavane reference temperature su 400 °C, 600 °C i 800 °C, respektivno, a zadati nagib promene temperature je 1.3 K / 15 s. Delovi oglada za svaku od referentnih temperature su trajali oko 2.5 sati.

Na Sl. 4 su prikazane vrednosti promene temperature šaržirane peći dobijene merenjem i simulacijom. Referentne vrednosti temperature za ovaj ogled su 400 °C, 600 °C i 700 °C, respektivno, dok je zadati nagib 1.5 K / 15 s.



Slika 3. Promena temperature tokom oglada na praznoj peći



Slika 4. Promena temperature tokom oglada na šaržiranoj peći

V. ZAKLJUČAK

Kroz prikazanu mikroprocesorsku regulaciju temperature i njenog nagiba se vidi visok nivo razvojnih alata za generisanje koda za mikrokontroler. Kroz odgovarajuće Toolbox-ove u Matlab-u je moguće jednostavno realizovati fazi regulator, podesiti ga na simulacijama, a zatim generisati kod za mikrokontroler. Code Composer Studio omogućava testiranje koda koji se izvršava na mikrokontroleru i tako vrši regulacija temperature.

Prikazani rad predstavlja etapu povratka istraživanju, odnosno realizaciju mikroprocesorskog fazi regulatora temperature i njenog nagiba u elektrootpornoj komornoj peći, posle čega će se nastaviti testiranja fazi regulatora - pre svega mogućnosti da se on primenjuje po "plug and play" principu za peći čija je konstrukcija slična konstrukciji na kojoj je regulator podešen.

LITERATURA

- [1] Z. Radaković, N. Parojčić, D. Stevanović, „Regulacija temperature elektrootporne komorne peći korišćenjem mikroprocesorske tehnike“, VI konferencija informacionih tehnologija, Žabljak, pp. 363-366, 2000.
- [2] Z. Radakovic, V. Milosevic, S. Radakovic, “Application of temperature fuzzy controller in indirect resistance furnace”, Applied Energy, Vol. 73, Issue 2, pp. 167-182, 2002.
- [3] „TI C2000 Support from Embedded Coder“ [Online] Available: <http://www.mathworks.com/hardware-support/ti-c2000.html> (24.01.2018.)
- [4] “TMS320F2833x, TMS320F2823x Digital Signal Controllers (DSCs)“, [Online] Available: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320f28335.pdf> (25.01.2018.)
- [5] Milica Jevtić, "Fazi regulator temperature i nagiba promene temperature u elektrootpornoj komornoj peći", Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, Master rad, septembar 2017.
- [6] M.R.Stojić, *Digitalni sistemi upravljanja*, Naučna knjiga, 1989.
- [7] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, *Heat and Mass Transfer*, USA, NJ, Hoboken: Wiley, 2002.
- [8] Sajt predmeta termički procesi u elektroenergetici, online dostupan na: <http://term-procesi.ef.rs/> (05.03.2018.)

ABSTRACT

The paper presents an innovated hardware and software platform for the implementation of the fuzzy regulator for temperature and temperature slope control in an electric resistance chamber furnace. The point of this paper is to present the modern hardware and software tools, which we used in order to lift up the base for continuation of the research done in the laboratory for electrical heating more than 15 years ago. The next item of study is the robustness of the fuzzy controller - can it be applied as "plug and play controller", i.e. can it be applied to another furnace of the similar construction to the one where fine-tuning of the fuzzy controller is performed.

REALIZATION OF THE FUZZY REGULATOR FOR TEMPERATURE AND TEMPERATURE INCLINATION CHANGE IN AN ELECTRIC RESISTANCE CHAMBER FURNACE

Milica Jevtic, Nikola Djordjevic, Zoran Radakovic