

# *Izvedba regulacije temperature merilne celice merilnika koncentracije kisika*

*Damir Vrančič, Janko Petrovčič*

*Univerza v Ljubljani, Institut Jožef Stefan,*

*Jamova 39, 1000 Ljubljana, Slovenija*

**Povzetek.** V članku je prikazan postopek načrtovanja vodenja temperature merilne celice analizatorja kisika. Zaradi izrazite nelinearnosti karakteristike celice in precej ostrih zahtev glede vodenja je bilo treba najprej delno linearizirati proces in kompenzirati izgubo moči pri višjih temperaturah, nato pa se ločeno lotiti izvedbe vnaprejšnje kompenzacije in regulacije. Pri tem je bila vloga vnaprejšnje kompenzacije na podlagi znanega časovnega temperaturnega profila reference voditi proces v širokem temperaturnem območju do delovne temperature. Vloga dodanega PID regulatorja pa je bila odpravljati vpliv preostalih nelinearnosti (povezanih s temperaturnimi lastnostmi materialov) in nihanj omrežne napetosti. Kljub uporabi poenostavljene prenosne funkcije grelnega sistema merilne sonde je bilo načrtano vodenje dokaj uspešno, kar kažejo rezultati poskusov na sondi. Za posebej učinkovito se je izkazala zaščita pred integralskim pobegom.

**Ključne besede:** PID regulator, temperaturna regulacija, integralski pobeg, vnaprejšnja kompenzacija, merilnik kisika.

## *Temperature control of the oxygen analyser measurement cell*

**Abstract.** Recently the combustion control has gained in importance due to ecological and economical reasons. One of the most useful measurements for the control of combustion in industrial power plants is the oxygen concentration in the combustion chamber. The paper presents designing the temperature controller for the oxygen concentration measuring cell (see Fig. 1) as a part of the zircon based oxygen analyser.

The control of the measuring cell temperature turned out to be a difficult task. The basic elements of the control loop are shown in Fig. 2. The control goals were: to ramp-up the temperature of the cell with the prescribed time-increment after the power-up, to keep the cell temperature within  $\pm 0.5^\circ\text{C}$  at  $800^\circ\text{C}$  without limit cycling in steady state, to keep temperature excursions below  $5^\circ\text{C}$ , after some common disturbances like line voltage change, etc.

To fulfil these design goals some special measures had to be used. The first task was to linearise the input-output characteristics of the heater of the measuring cell. The phase-

controlled voltage on the heater is shown in Fig. 3 and the heater power vs. control value PWM0 (see Fig. 2) is shown in Fig. 4. To linearise the static characteristic between the controller output  $u_r$  and the power  $P$  (see Fig. 5) the linearisation table is used. The next task was to compensate the change of resistance of the heating coil due to the change of temperature (see Table 1). This was done by the application of linear transformation over the control value  $u_r$  (see Eq. 4). The measures enumerated enabled the application of linear PID control algorithms for the closed loop control of the heating system. It was designed as follows. In spite of the linearisation between the control value  $u_n$  and the power of the heater, the temperature response is still non-linear (see Fig. 6 and 7). This is due to additional nonlinearities, which are not easily taken into account (radiation, changes in thermal conductivity of the isolation material, etc.). To improve the control of the heater and to fulfil design goals, the control algorithm was also equipped with the feed-forward compensation from reference generator to the control output as needed during power-up standby temperature transitions. The feed-forward compensation design was based on the approximate 2<sup>nd</sup> order model of the heating system, as shown in Fig. 8. The appropriate constants  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  and  $\tau_{12}$  are given by Fig. 9 and expression (8). The feed-forward signal is calculated by implementations of Equations (9) and (10), where  $w$  is the set-point (reference). Fig. 10 shows the specified reference temperature profile at power-up of the heater.

The complete control scheme is given in Fig. 11. The PID controller parameters were obtained by using the Ziegler-Nichols tuning procedure and manual fine adjustments (11). The anti-windup compensator was also implemented and the conditioning technique [2, 6, 7, 8] was used to set its parameters (see Fig. 11).

The results of some closed-loop experiments on the real system are given in Figs. 12 to 19. Figs. 12 and 13 show the cell temperature when changing the cell temperature from 400°C to 800°C. The overshoot is obviously smaller than 1°C. Fig. 14 proves that there is no limit cycling in a steady-state at 800°C. Fig. 15 shows the cell temperature when changing the system from operation into the stand-by state (800°C to 400°C). The response is also as required.

Fig. 16 shows the cell temperature at 10% increased mains voltage and Fig. 17 shows the cell temperature at 10% decreased mains voltage. In both cases the temperature response was still within the specified limits (overshoot smaller than 5°C). Fig. 18 shows the response of the system in case the mains voltage changes from the nominal (220V AC) to 242V AC and then (at  $t=300s$ ) down to 198V AC. The temperature excursions are still acceptable.

Fig. 19 shows the controlled temperature at 198V AC mains voltage after stand-by-to-operate transition. The maximum temperature reached in cases without any anti-windup protection was about 820°C, and was limited only by especial hardware protection against overheating which activated at this temperature. Without such a protection, the overshoot would be even higher. The successful application of the anti-windup algorithm can be clearly noticed by comparing Fig. 17 and Fig. 19.

The experimental results show that the control goals were satisfied. Excellent results at lower main voltage were achieved due to the built-in anti-windup algorithm.

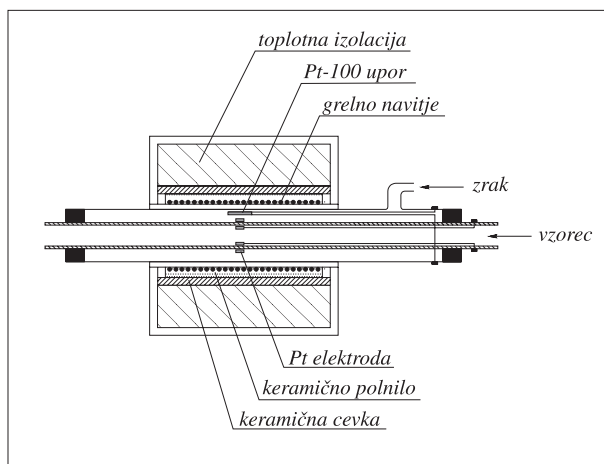
**Key words:** PID controller, temperature control, anti-windup, feed-forward, oxygen analyser.

## 1. Uvod

V regulacijski tehniki se pogosto srečujemo z meritvami koncentracije plinov. Predvsem v zadnjem času se zaradi ekoloških in ekonomskih razlogov v čedalje večji meri uporabljajo sodobni postopki v regulaciji zgorevanja, kjer imajo merilniki koncentracije plinov pomembno vlogo. Tako smo na Institutu Jožef Stefan že leta 1985 razvili merilnik koncentracije kisika MK 100, leta 1990 pa naslednjo verzijo MK 200. Leta 1994 smo razvili nov model merilnika MK 300, pri katerem je funkcije nadzora, meritev, kalibracije, komunikacije in regulacije prevzel vgrajeni mikrokrmilnik [3, 4]. Le-ta poleg funkcije merjenja koncentracije kisika prevzema tudi funkcijo regulatorja v sistemu za vodenje zgorevanja, primerne za vodenje manjših do srednje velikih kurišč (1MW ali več).

Pri gradnji merilnika kisika se je za zanimiv regulacijski problem izkazala regulacija temperature merilne celice. Močna nelinearnost merilne celice in izvršnega člena (fazne regulacije s triac-om), relativno stroge omejitve pri regulaciji temperature in morebitne posledice pred integralnim pobegom so narekovale specifično izvedbo regulacije temperature.

Merilno celico prikazuje slika 1.



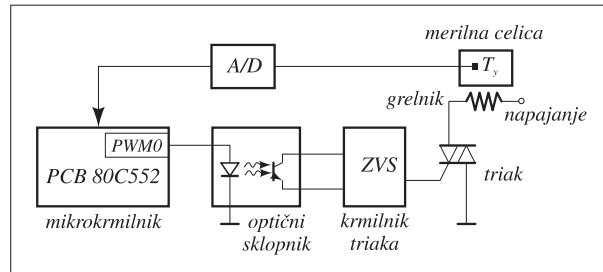
Slika 1. Shematski prikaz merilne celice

Fig. 1. Scheme of the measuring cell

Sestavljena je iz grelnega navitja, obdanega s keramičnim polnilom in toplotno izolacijo. V notranjosti merilne celice sta platinasti elektrodi, ki merita razliko potencialov, ki se ustvari ob različnih koncentracijah kisika v zraku in vzorcu. Pt-100 upor je namenjen merjenju temperature znotraj merilne celice.

## 2. Opis in regulacijske zahteve

Slika 2 prikazuje shematski prikaz vodenja temperature merilne celice.



Slika 2: Shematski prikaz vodenja temperature merilne celice

Fig. 2. Scheme of the temperature control of the measuring cell

Vrednost 8-bitnega registra *PWM0* znotraj mikrokrmilnika *PCB 80C552* določa razmerje impulz/pavza na izhodu iz mikrokrmilnika. Signal se prek optičnega sklopnika in krmilnika triaka (zero voltage switch - phase control) prenese na vhod triaka in povzroča odprtje le-tega. Višja vrednost v registru *PWM0* bo povzročila daljši čas odprtja triaka in s tem večjo moč grelnika in višjo temperaturo merilne celice. Cilj vodenja je vzdrževati stalno temperaturo merilne celice, pri vklopu pa stalno hitrost segrevanja, ki preprečuje termično preobremenitev vgrajenih materialov.

Merilna celica se lahko nahaja v dveh ustaljenih stanjih, in sicer v normalnem režimu delovanja, kjer je želena temperatura merilne celice  $800^{\circ}\text{C}$ , ter v stanju priprave (stand-by), kjer je temperatura merilne celice  $400^{\circ}\text{C}$ . Slednje stanje aktiviramo med tem, ko ne merimo koncentracije kisika, vendar bi radi čim hitreje dosegli delovno temperaturo ( $800^{\circ}\text{C}$ ), če so potrebne nove meritve.

Zahteve, ki jim mora zadostiti vodenje temperature, so naslednje:

- vzdrževanje delovne temperature merilne celice okrog  $800^{\circ}\text{C}$  tudi pri spremembah napetosti napajanja
- hitrost spreminjanja temperature merilne celice zaradi razteznostnih preobremenitev keramike ne sme preseči  $0.5^{\circ}\text{C/s}$ .
- prenehaj pri prehodu na delovno temperaturo mora biti manjši od  $5^{\circ}\text{C}$ .
- v ustaljenem stanju ne sme priti do oscilacij temperature okrog delovne točke.

Znotraj algoritma za vodenje temperature merilne celice moramo tudi zagotoviti zaščito, ki izključi grelnik (vrednost registra *PWM0* znotraj mikrokrmilnika postavi na 0), če temperatura

naraste nad 820°C. Pri nekoliko višji temperaturi (okrog 850°C) že vgrajena elektronska zaščita prepreči morebitno pregrevanje merilne celice.

Cilj vodenja je bil ugoditi vsem navedenim zahtevam. Referenčna temperatura tako narašča od neke začetne temperature (enake dejanski temperaturi merilne celice) do delovne temperature (800°C) s hitrostjo 0.5°C/s. Razen zaščite pri temperaturi 820°C smo dodali še dodatno zaščito referenčne temperature. Referenčna temperatura ne more nikoli postati za več kot 20°C višja oziroma za več kot 50°C nižja od dejanske temperature. S tem smo se zavarovali, da ne more priti do prehudih težav v primeru morebitnih napak na pečici (na primer začasna odpoved napajalnika merilne celice) oziroma ob prehudih nihanjih napajalne napetosti omrežja.

### 3. Izvedba vodenja

Za natančno vodenje sistemov v različnih delovnih točkah je treba zagotoviti, da je sistem, ki ga vodi regulator čim bolj linearen (da obstaja linearna vhodno-izhodna statična karakteristika). Tako smo najprej poskušali linearizirati odvisnost med vrednostjo registra  $PWM0$  in močjo grelnika (glej sliko 2).

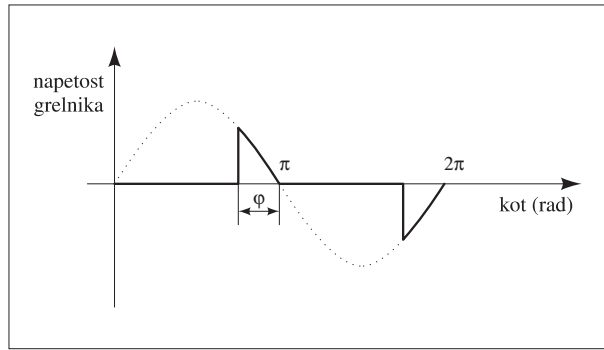
Med vrednostjo registra  $PWM0$  in kotom odprtja triaka obstaja linearna odvisnost, in sicer

$$\varphi = \frac{\pi}{255} PWM0 \text{ [rad]}, \quad (1)$$

kjer je  $\varphi$  kot odprtja triaka. Potek napetosti napajanja merilne celice je prikazan na sliki 3. Iz enačbe (1) in slike 3 lahko izračunamo razmerje med dejansko in največjo močjo grelnika merilne celice v odvisnosti od vrednosti registra  $PWM0$ :

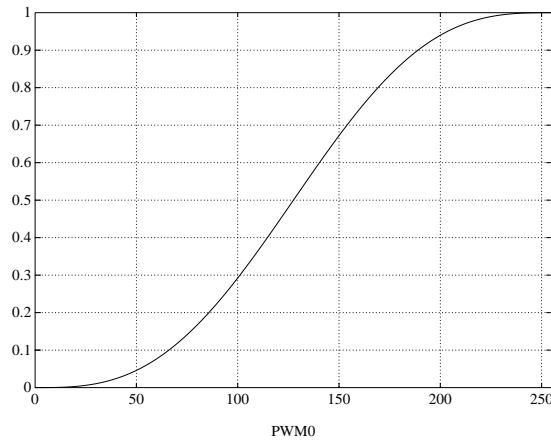
$$\frac{P}{P_m} = \frac{\frac{2\pi PWM0}{255} - \sin\left(\frac{2\pi PWM0}{255}\right)}{2\pi}, \quad (2)$$

kjer je  $P_m$  največja moč merilne celice (pri vrednosti  $PWM0=255$ ). Grafični prikaz enačbe (2) kaže slika 4.



Slika 3. Potek napajalne napetosti merilne celice

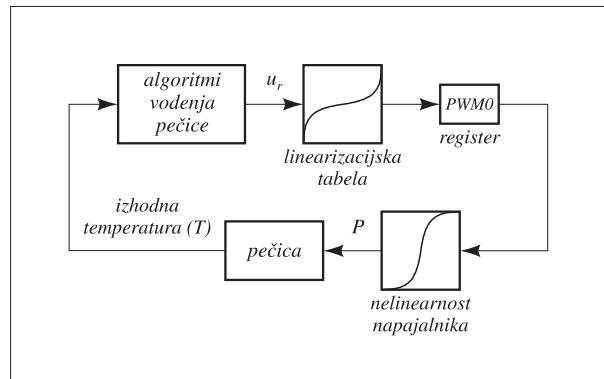
Fig. 3. Voltage on the measuring cell heater



Slika 4. Razmerje med dejansko in največjo močjo ( $P/P_m$ ) v odvisnosti od velikosti registra  $PWM0$

Fig. 4. Proportion between the actual and the maximal power ( $P/P_m$ ) of the heater vs. value of the register  $PWM0$

Linearizacijo odvisnosti med vrednostjo  $PWM0$  in močjo grelnika smo izvedli tako, da smo območje razmerja moči  $P/P_m$  (od 0 do 1) razdelili na 256 delov in za vsak del izračunali vrednost registra  $PWM0$ . Te vrednosti smo nato shranili v linearizacijsko tabelo, kot je prikazano na sliki 5.



Slika 5. Linearizacija odvisnosti med  $u_r$  in močjo grelnika ( $P$ ).

Fig. 5. Linearisation between the  $u_r$  and the power of the heater ( $P$ )

Pri linearizaciji odvisnosti med vrednostjo registra  $PWM0$  in močjo grelnika moramo upoštevati še upornost navitja grelnika. Pri višjih temperaturah je namreč višja, s tem pa se tudi zmanjša moč grelnika. Tabela 1 predstavlja izmerjene vrednosti upornosti navitja grelnika pri treh različnih temperaturah

temperatura [ $^{\circ}C$ ]	28	440	800
upornost [ $\Omega$ ]	119.8	132.4	145.5

Tabela 1. Odvisnost upornosti navitja grelnika od temperature

Table 1. Heater coil resistance vs. temperature

Iz meritev pri  $28^{\circ}C$  in  $800^{\circ}C$  smo določili temperaturni koeficient upornosti grelnika merilne celice:

$$\alpha = 2.77 \cdot 10^{-4} / ^{\circ}C \quad (3)$$

Tako moramo pred linearizacijsko tabelo upoštevati še zmanjševanje moči grelnika pri višjih temperaturah. Kompenzacijo smo izvedli takole:

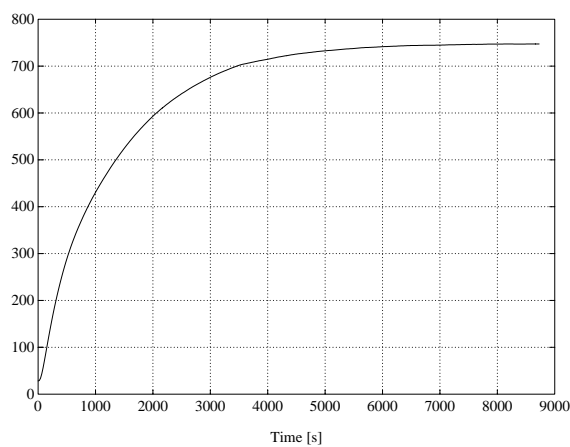
$$u_r = \frac{u_n}{1 + 2.77 \cdot 10^{-4} (T - 25)} \quad (4)$$

kjer pomeni  $u_n$  nekompenzirano izhodno vrednost.

Zaradi lažjega izračunavanja vodenja smo proces tudi normirali. Pri tem smo za vhod vzeli signal  $u_n$ , izhod pa je bila temperatura merilne celice (T). Iz meritev signalov pri 25°C in 800°C smo določili faktor  $K_n$ , s katerim moramo množiti temperaturo (vključno s signalom reference):

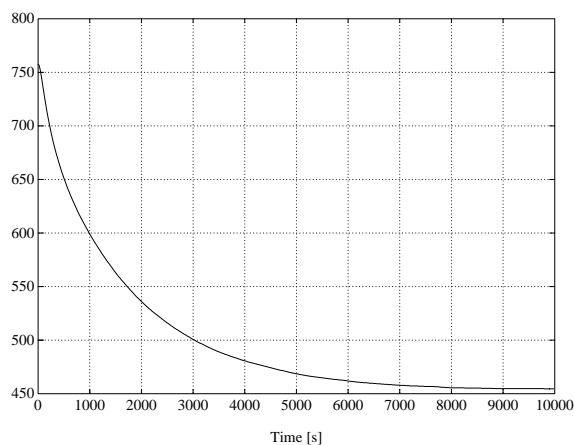
$$K_n = \frac{u_n(T_2) - u_n(T_1)}{T_2 - T_1} = \frac{124 - 0}{800 - 25} = 0.16 \quad (5)$$

Po linearizaciji smo izmerili odziv merilne celice na stopničasto spremembo signala *PWM0*. Sliki 6 in 7 kažeta odziv na pozitivno oziroma negativno skočno spremembo vhodnega signala.



*Slika 6. Odziv merilne celice na pozitivni skok vhodnega signala*

*Fig. 6. Cell temperature response on the positive input step*



*Slika 7. Odziv merilne celice na negativni skok vhodnega signala*

*Fig. 7. Cell temperature response on the negative input step*



Kljub linearizaciji karakteristike med  $u_n$  in močjo grelnika je odziv še vedno precej nelinearen, tako da nismo mogli dobiti zadovoljivega linearnega dinamičnega modela<sup>1</sup>, ki bi uspešno opisoval obnašanje merilne celice v celotnem temperaturnem območju.

Razen morebitne spremembe strukture keramike in drugih materialov pri višjih temperaturah in s tem povezanega toplotnega prevajanja je lahko dodaten razlog za nelinearen odziv tudi sevanje, ki nastane pri višjih temperaturah. Oba pojava je težko modelirati in njuno obnašanje nismo nameravali proučevati.

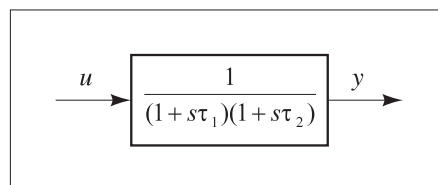
Glede na stroge regulacijske zahteve in nepopolno poznavanje modela merilne celice smo se odločili razdeliti vodenje na dva dela, in sicer na:

- izvedbo vnaprejšnje kompenzacije
- regulacijo

Vnaprejšnja kompenzacija (feed-forward) naj bi služila temu, da bi merilna celica tudi brez dodatnega regulatorja dokaj dobro sledila referenci. Naloga regulatorja naj bi bila odpravljati pogrešek krmiljenja zaradi nelinearnosti merilne celice, sprememb zunanje temperature in napajalne napetosti.

### ***3.1. Izvedba vnaprejšnje kompenzacije (feed-forward)***

Za izračun ustrezne kompenzacije na podlagi znanega časovnega profila referenčnega signala smo za model merilne celice predpostavili sistem 2. reda, kot ga prikazuje slika 8.



*Slika 8. Model 2. reda*

*Fig. 8. Second order process model*

Pri takšnem modelu lahko dosežemo konstantno naraščanje izhodne veličine ( $y$ ) z naslednjo vrednostjo vhoda  $u$ :

---

<sup>1</sup> Poskusili smo z modelom sistema 3. reda

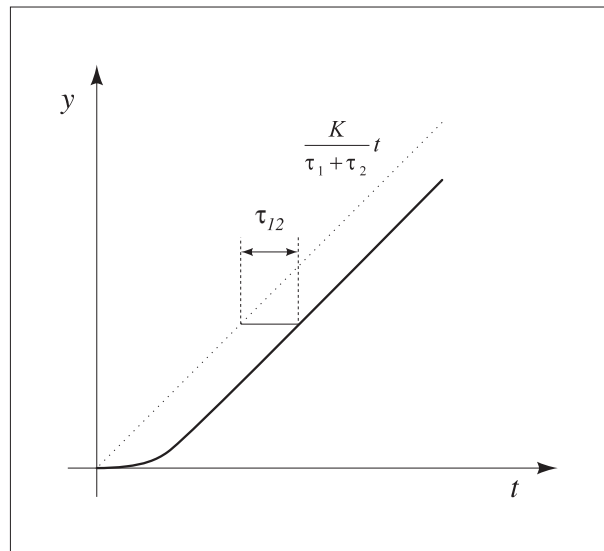
$$u = y + K \quad (6)$$

V primeru, ko je sistem stabilen in je statično ojačenje procesa natanko 1, postane izhod  $y$  enak:

$$y = \frac{K}{\tau_1 + \tau_2} \left[ t - \tau_{12} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau_{12}}} \right) \right] \quad (7)$$

$$\tau_{12} = \frac{\tau_1 \tau_2}{\tau_1 + \tau_2}$$

Izraz (7) kaže, da je hitrost naraščanja izhoda enaka  $K/(\tau_1 + \tau_2)$  in, da izhodni signal zaostaja za čas  $\tau_{12}$  za časovno rampo ( $K \cdot t / (\tau_1 + \tau_2)$ ), kar je prikazano na sliki 9.



Slika 9. Izhod sistema 2. reda pri vhodnem signalu podanem z izrazom (6)

Fig. 9. Output of the second order process model at the input given by expression (6)

Iz meritev na pečici in dodatnih poskusov smo nato določili približne vrednosti časovnih konstant  $\tau_1$  in  $\tau_2$ :

$$\tau_1 \approx 1550s \approx \tau_1 + \tau_2 \quad (8)$$

$$\tau_2 \approx 20s \approx \tau_{12}$$

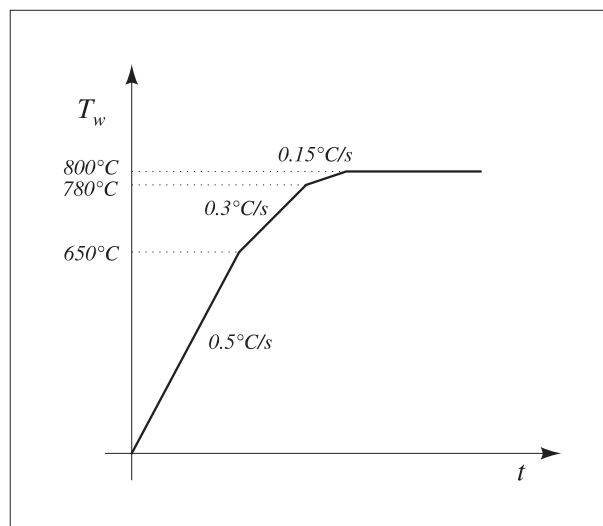
Za čim boljše prilagajanje temperature merilne celice referenčni temperaturi pa smo poskrbeli s tem, da je referenčna temperatura začela naraščati (spreminjati) šele  $\tau_{12}$  sekund po spremembi vhodnega signala, opisanega v enačbi (6).

Omenimo še, da realizacija dviga temperature, kot je podana z enačbo (6), lahko povzroči težave. Če statično ojačenje ni natanko enako 1, se lahko dviganje temperature ustavi ali pa začne vse hitreje naraščati. Problem smo odpravili tako, da smo namesto izhodne vrednosti ( $y$ ) uporabili (normiran) signal reference:

$$u = w + K \quad (9)$$

kjer je  $w$  signal reference. Tako smo se izognili morebitni nestabilnosti.

Profil referenčne temperature, ki smo jo uporabili pri vodenju merilne celice, kaže slika 10.



*Slika 10. Profil referenčne temperature merilne celice.*

*Fig. 10. Profile of the measuring cell reference temperature*

Po vklopu grelnika merilne celice postane referenčna temperatura merilne celice ( $T_w$ ) enaka dejanski temperaturi in ostane enaka, dokler ne mine čas  $\tau_{12}$  (20s). Po tem času začne  $T_w$  naraščati s hitrostjo  $0.5^\circ\text{C/s}$  skladno z zahtevami (omejitvami) vodenja. Pri  $650^\circ\text{C}$  se naraščanje upočasni na  $0.3^\circ\text{C/s}$ , ker merilna celica ne zmore (nima dovolj moči) obdržati začetnega tempa naraščanja.  $20^\circ\text{C}$  pod delovno temperaturo merilne celice naraščanje še dodatno upočasnimmo na  $0.15^\circ\text{C/s}$ , da omogočimo bolj umirjen prehod dejanske temperature v ustaljeno stanje.

Dodatek  $K$  v enačbi (9) je odvisen od želene hitrosti naraščanja temperature (glej enačbo 7 in sliko 9). Za hitrost naraščanja  $0.5^\circ\text{C/s}$  potrebujemo

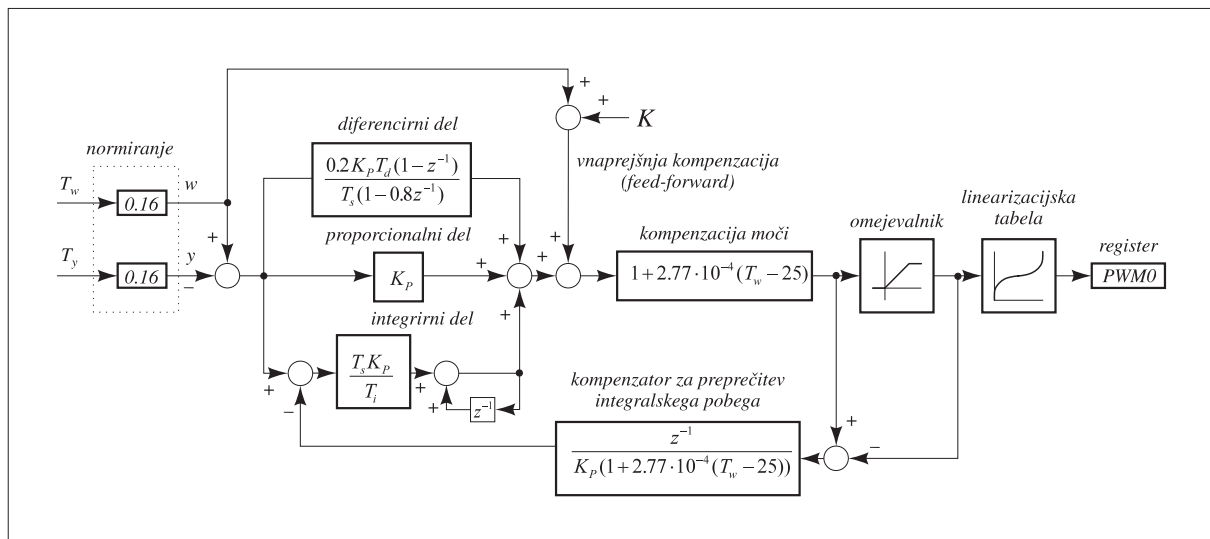
$$K = 0.5 \cdot K_n (\tau_1 + \tau_2) = 124, \quad (10)$$

kjer  $K_n$  pomeni faktor normiranja (0.16). Poudarimo še, da faktor  $K$  spremenimo že 20s pred spremembo naklona referenčne temperature zaradi zaostajanja dejanske temperature (glej sliko 9).

Prehoda iz delovne temperature merilne celice v stanje priprave (400°C) ne zadeva nobena omejitev vodenja, razen najvišje hitrosti zniževanja temperature (0.5°C/s), ki pa jo merilna celica, tudi če je izključena, ne more preseči. Odločili smo se za hitrost zniževanja 0.2°C/s, kar približno ustreza hitrosti izklopljene merilne celice v okolici stanja priprave.

### 3.2. Izvedba regulacije

Krmiljenju (vnaprejšnjemu signalu) je dodan regulator, ki odpravlja vplive nelinearnosti merilne celice, sprememb temperature okolice in nihanja napajalne napetosti merilne celice. Za ta namen smo uporabili PID algoritem vodenja. Shema PID regulatorja prikazuje slika 11.



Slika 11. Shema vodenja merilne celice

Fig. 11. Measuring cell temperature control scheme

Na vhodu v regulator najprej normiramo temperaturo merilne celice in referenčno temperaturo. Regulacijski pogrešek nato vodimo na vhode proporcionalnega, integrirnega in diferencialnega dela regulatorja. Seštevku vseh treh komponent nato dodamo vnaprejšnjo kompenzacijo (opisano v prejšnjem podpoglavju). Celoten signal gre nato prek kompenzatorja moči in omejevalnika, ki omeji signal v območju med 0 in 255 (mogoče vrednosti registra *PWM0*). Omejen signal gre nato prek linearizacijske tabele v register *PWM0*.

V regulacijski shemi obstaja notranja povratna zanka od omejevalnika do vhoda v integrirni del, ki prepreči integralni pobeg. To bi se lahko zgodilo takrat, ko vhod in izhod iz omejevalnika nista enaka, in bi lahko povzročil precejšnje prevzpone temperature merilne celice. Zaščita je realizirana po metodi prilagajanja stanj (conditioning technique) [2, 6, 7, 8]. Uspešnost prikazane zaščite pred integralnim pobegom bo prikazana v naslednjem poglavju.

Pri načrtovanju regulatorja smo upoštevali, da so najbolj kritične zahteve za vodenje vezane na delovno temperaturo merilne celice (800°C). Zato je moral biti tudi regulator načrtovan tako, da je uspešno vodil pečico v okolici te temperature. Konstante PID regulatorja ( $K_p$ ,  $T_i$  in  $T_d$ ) smo tako določili na podlagi odziva temperature merilne celice na začetku poskusa, prikazanega na sliki 6. V prevojni točki smo potegnili tangento in načrtali regulator s pomočjo Ziegler-Nicholsovih nastavitvenih pravil [1, 5]:

$$\begin{aligned}K_p &= 55.8 \\T_i &= 65s \\T_d &= 10.4s\end{aligned}\tag{11}$$

#### **4. Rezultati vodenja**

Preskušanje lastnosti načrtanega regulacijskega sistema smo v nadaljevanju dela izvajali neposredno na grelnem sistemu merilne celice. Simulacijski preskusi ob uporabi lineariziranih modelov sistema bi namreč zaradi izrazitih nelinearnosti sistema dali pomanjkljive rezultate. Preskusili smo sledenje temperature pečice referenčni temperaturi pri različnih napajalnih napetostih merilne celice (nominalna ter 10% sprememba nominalne napetosti), vodenje v ustaljenem stanju (pri 800°C) odpravo motenj (sprememba napajalne napetosti v ustaljenem stanju).

Slika 12 prikazuje dejansko in referenčno temperaturo pri prehodu merilne celice iz stanja priprave (400°C) v normalni režim delovanja (800°C). Meritev je opravljena pri nominalni napetosti napajanja merilne celice (220V napetosti omrežja). Vidimo, da temperatura celice dokaj dobro sledi referenci, razen v začetku poskusa, ko imamo nekakšen prehodni pojav. Slika 13 daje podrobnejši prikaz temperatur v okolici delovne točke (800°C), kjer vidimo, da je prevzpon v okvirih podanih zahtev vodenja. Hkrati vidimo, da so spremembe temperature merilne celice v okolici delovne temperature počasne.

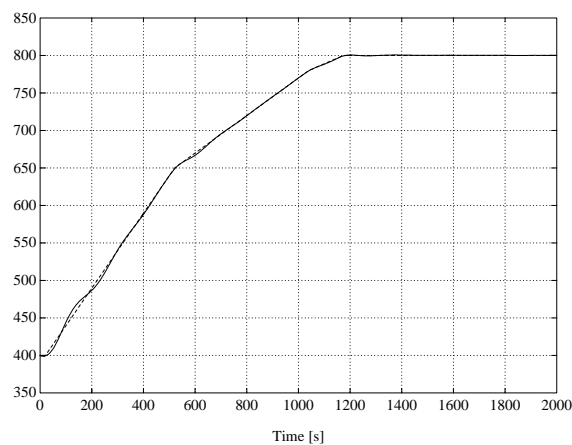
Slika 14 prikazuje temperaturo merilne celice v ustaljenem stanju, kjer ne opazimo nobenih oscilacij, kar je tudi ena od zahtev vodenja. Slika 15 prikazuje prehod iz delovnega območja v stanje priprave. Tudi tu vidimo, da temperatura merilne celice uspešno sledi referenci.

Slika 16 prikazuje prehod iz 400°C na 800°C pri 10% višji, slika 17 pa pri 10% nižji omrežni napetosti. Oba rezultata kažeta, da je vodenje uspešno tudi pri različnih napajalnih napetostih. Na sliki 17 opazimo, da je naraščanje temperature počasnejše kot v drugih primerih. Vzrok je nezadostna moč grelnika merilne celice. Kljub temu, da je triak popolnoma odprt, merilna celica ne zmore slediti referenci. Pri prehodu na delovno temperaturo ne opazimo prevelikih prevzponov (so v okviru postavljenih omejitev).

Slika 18 prikazuje odziv sistema na nihanje napajalne napetosti v okolici delovne temperature (800°C). Ob začetku poskusa smo za 10% zvišali omrežno napetost (iz 200V na 242V), ob

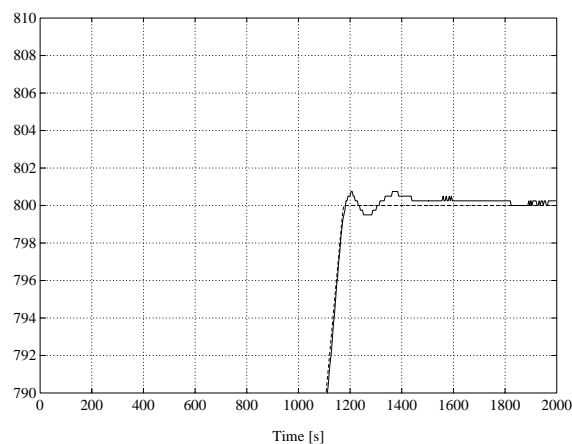
času 300s pa smo jo znižali na 10% pod nominalno vrednost (iz 242V na 198V). Rezultati vodenja kažejo dokaj uspešno izkrmiljenje motenj.

V prejšnjem poglavju smo omenili tudi integralski pobeg. Zaščita proti integralskemu pobegu je bil kompenzator, vezan na vhod v integracijski člen regulatorja. Slika 19 prikazuje odziv sistema pri popolnoma enakem poskusu, kot je prikazan na sliki 17, vendar brez uporabe kompenzatorja za zaščito pred integralskim pobegom. Opazna je občutna razlika med odzivoma. Omenimo še, da bi bil prevzpon temperature na sliki 19 še višji, če ne bi obstajala programska zaščita za izklop merilne celice, ko temperatura le-te preseže  $820^{\circ}\text{C}$ , kar se kaže tudi v osciliranju temperature okrog  $820^{\circ}\text{C}$ .



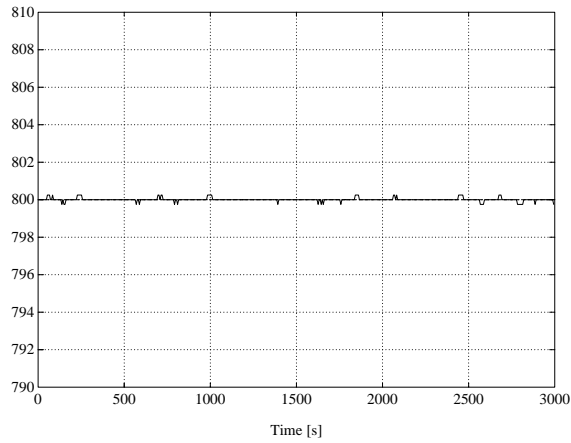
*Slika 12. Prehod iz stanja priprave ( $400^{\circ}\text{C}$ ) na delovno temperaturo merilne celice ( $800^{\circ}\text{C}$ );  
— temperatura merilne celice, -- referenčna temperatura*

*Fig. 12. Cell temperature change from  $400^{\circ}\text{C}$  to  $800^{\circ}\text{C}$ ;  
— measuring cell temperature, -- reference temperature*



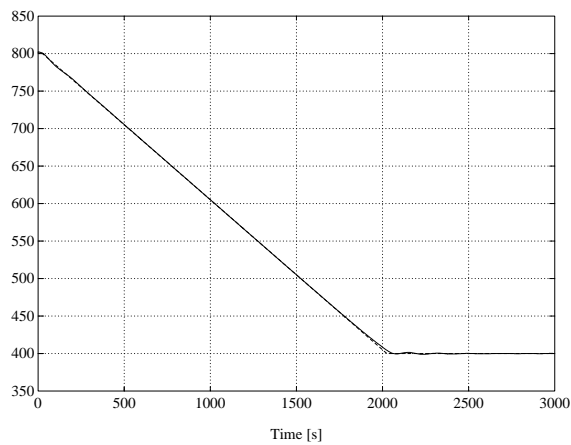
*Slika 13. Prikaz prehoda na delovno temperaturo v okolici  $800^{\circ}\text{C}$ ;  
— temperatura merilne celice, -- referenčna temperatura*

*Fig. 13. The detailed view of Fig. 12;  
— measuring cell temperature, -- reference temperature*



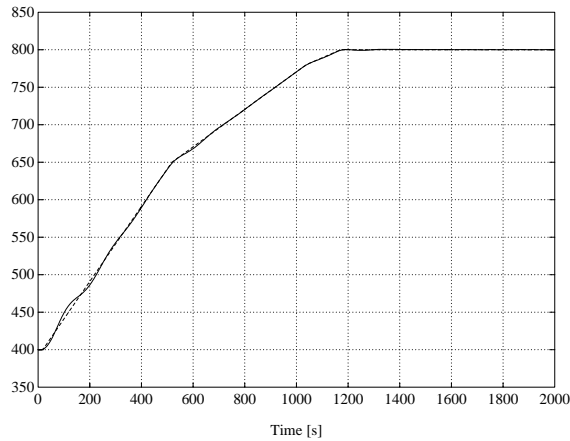
*Slika 14. Temperatura merilne celice v ustaljenem stanju;  
 \_\_\_ temperatura merilne celice, -- referenčna temperatura*

*Fig. 14. Steady-state cell temperature;  
 \_\_\_ measuring cell temperature, -- reference temperature*



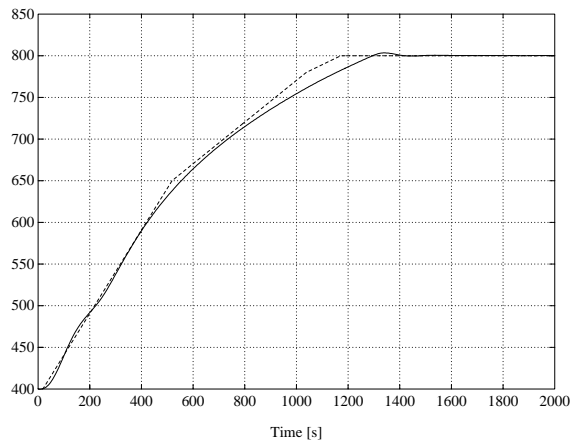
*Slika 15. Prehod iz delovne temperature v stanje priprave;  
 \_\_\_ temperatura merilne celice, -- referenčna temperatura*

*Fig. 15. Cell temperature change from the steady-state to the stand-by mode;  
 \_\_\_ measuring cell temperature, -- reference temperature*



*Slika 16. Prehod iz stanja priprave na delovno temperaturo pri 10% višji napajalni napetosti;  
 \_\_\_ temperatura merilne celice, -- referenčna temperatura*

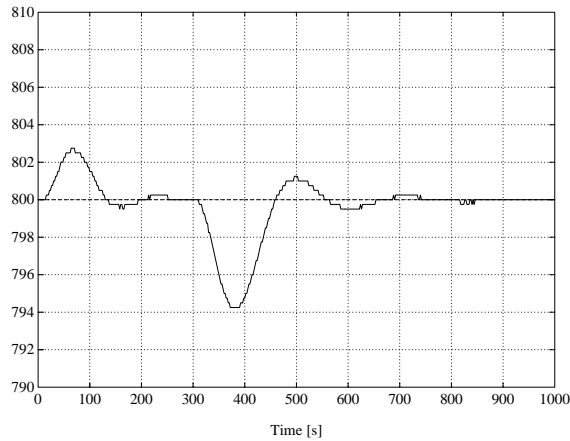
*Fig. 16. Cell temperature change at 10% higher main voltage;  
 \_\_\_ measuring cell temperature, -- reference temperature*



*Slika 17. Prehod iz stanja priprave na delovno temperaturo pri 10% nižji napajalni napetosti;  
 \_\_\_ temperatura merilne celice, -- referenčna temperatura*

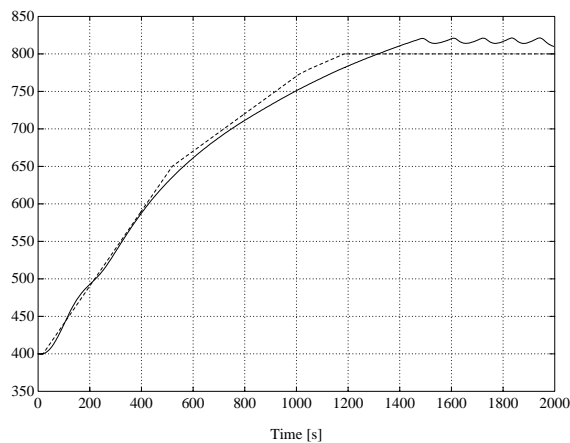
*Fig. 17. Cell temperature change at 10% lower main voltage;  
 \_\_\_ measuring cell temperature, -- reference temperature*





*Slika 18. Odziv sistema na nihanja napajalne napetosti; ob 0s 10% zvišanje nad nominalno napetost napajanja, ob 300s pa 10% znižanje pod nominalno napetost napajanja;  
 \_\_\_ temperatura merilne celice, -- referenčna temperatura*

*Fig. 18. Cell temperature deviations caused by the change of the supply voltage; at  $t=0s$ , increasing the main voltage by 10% and at  $t=300s$  decreasing by 10% below the nominal voltage;  
 \_\_\_ measuring cell temperature, -- reference temperature*



*Slika 19. Prehod iz stanja priprave na delovno temperaturo pri 10% nižji napajalni napetosti brez zaščite pred integralskim pobegom;  
 \_\_\_ temperatura merilne celice, -- referenčna temperatura*

*Fig. 19. Cell temperature change at 10% lower main voltage without the anti-windup protection;  
 \_\_\_ measuring cell temperature, -- reference temperature*

## 5. Sklep

Nekatere nelinearnosti sistema krmiljenega segrevanja merilne celice je bilo mogoče dokaj preprosto modelirati in rezultate modelov uporabiti za linearizacijo prenosne funkcije sistema. Nelinearnosti, povezane s temperaturnimi lastnostmi materialov, ni bilo mogoče preprosto obravnavati, zato jih pri načrtovanju sistema tudi nismo kompenzirali. To delo je opravljal PID regulator.

Po drugi strani smo imeli sorazmerno stroge zahteve za vodenje, kot so majhni prevzponi, omejena hitrost naraščanja temperature ter uspešno vodenje tudi pri spremembah omrežne napetosti.

Kljub omenjenim težavam nam je uspelo načrtati dokaj uspešno vodenje, kar je bilo razvidno iz rezultatov poskusov na pečici.

Za posebej učinkovito se je izkazala zaščita proti integralskemu pobegu, ki tudi v primeru dolgotrajnega zasičenja krmilnega signala omogoča relativno majhne prevzpone temperature. S tem je ves čas varovala pečico pred morebitnim pregrevanjem. Učinkovitost zaščite je potrjena s primerjavo rezultatov, dobljenih v primeru, ko nismo uporabili omenjene zaščite.

## 6. Reference

- [1] A. Haalman, "The adjustment of continuous controllers", Review A, VIII/4, pp. 181-199, 1966.
- [2] R. Hanus, "Anti-windup and bumpless transfer: a survey", Computing and Computers for Control Systems. P. Borne et al., eds., IMACS, Vol. 4, pp. 3-9, 1989.
- [3] J. Petrovčič, J. Grom, A. Popovič, "Zasnove industrijske verzije merilnika koncentracije kisika", IJS Delovno poročilo, DP-6360.
- [4] J. Petrovčič, J. Grom, M. Štrubelj, "Električne sheme in načrti mehanskih sestavnih delov merilnika koncentracije kisika", IJS Delovno poročilo, DP-6915, 1993.
- [5] D. Vrančič, Đ. Juričić, "Nastavitve parametrov PID regulatorjev za procese 2. reda", ERK'94, Portorož, Zvezek A, str. 281-284, 1994.
- [6] D. Vrančič, Y. Peng, "Anti-windup and conditioned transfer for PID controller", ERK'94, Portorož, Vol. A, pp. 183-186, 1994.
- [7] D. Vrančič, J. Peng, Đ. Juričić, "Some aspects and Design of Anti-windup and Conditioned Transfer", IJS Delovno poročilo, DP-7169, 1995.
- [8] D. Vrančič, J. Petrovčič, "Analiza interakcije algoritmov za preprečevanje integralskega pobega in prevzpona", ERK'93, Portorož, Zvezek A, str. 273-276, 1993.