

MATEMATIČKO MODELOVANJE I PID REGULACIJA TERMALNE ZONE U HIL OKRUŽENJU**MATHEMATICAL MODELING AND PID REGULATION OF THE THERMAL ZONE IN THE HIL ENVIRONMENT**Predrag Nikolić, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

Kratak sadržaj – U ovom radu opisan je matematički model termalne zone, kao i primena Proporcionalno – Integralno – Diferencijalnog zakona PID (eng. Proportional - integral - derivative) regulacije temperature u okviru zone. Praktični deo rada obuhvata implementaciju hardvera u petlji - HIL (eng. Hardware In the Loop) pristupa upotrebom odgovarajućeg hardvera i programskog okruženja. Razvijen je dinamički model termalne zone u kojoj je integrisano grejno telo (radijator) sa mogućnošću upravljanja putem kontrole masenog protoka dotoka tople vode do istog.

Ključne reči: Modelovanje, HIL, PID, termalna zona, regulacija

Abstract – The paper details mathematical modeling and PID (Proportional - integral - derivative) temperature regulation applied to a thermal zone, implemented experimentally using specific hardware and software. A dynamic model of the thermal zone has been developed in which a heating body (radiator) is integrated with the possibility of management by controlling the mass flow of hot water inflow to it.

Keywords: Modeling, PID, HIL, thermal zone, regulation

1. UVOD

Simulacija sa hardverom u petlji predstavlja moćnu tehniku koja se koristi u inženjerskim delatnostima gde je potrebno testirati i oceniti rad složenih dinamičkih sistema. HIL predstavlja vezu između virtualne simulacije i realnih procesa sistema.

Neki od razloga za upotrebu HIL sistema:

- Olakšana manipulacija sa elementima zone u poređenju sa stvarnim procesom.
- Povećana vremenska efikasnost omogućava kontinuirano ispitivanje i postavljanje sistema u željene uslove.
- Smanjeni troškovi putovanja i rada sistema, s obzirom da inženjer ne mora fizički biti prisutan na mestu odvijanja procesa.

NAPOMENA:

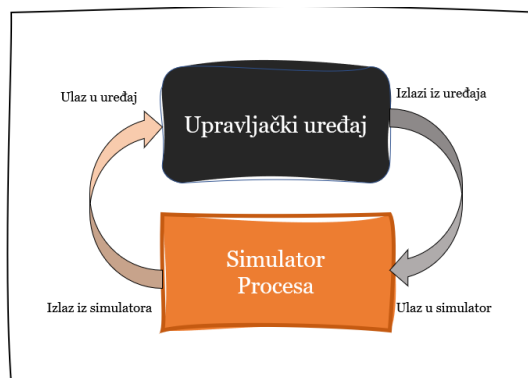
Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio dr Velimir Čongradac, red. prof.

Model procesa zahteva detaljan opis skupa neophodnih diferencijalnih jednačina dinamike sistema koji opisuju energetske tokove, masene tokove kao i promene parametara.

U daljem tekstu rada, detaljno će se izvesti matematičko modelovanje termalne zone, biće sprovedena eksperimentalna ispitivanja sa odgovarajućim softverskim i hardverskim uređajima, a zatim biti analizirani dobijeni rezultati. Ova analiza će dodatno doprineti razumevanju rezultata modela i postaviti smernice za usavršavanje kako modela, tako i kompletnog HIL sistema u simulaciji termalnih procesa.

2. OSNOVE HIL SISTEMA

Hardware in the Loop predstavlja konfiguraciju u kojoj je upravljački uređaj povezan u petlji sa delom ili kompletnim hardverom na kojem se odvija simulacija procesa. Ovaj pristup omogućava inženjerima testiranje upravljačkih algoritama u kontrolisanim uslovima, ubrzavajući tako razvoj i povećavajući efikasnost istraživanja i razvoja simulacija sistema upravljanja.



Slika 1. Sistem hardvera u povratnoj petlji.

3. ZONA

Toplotna zona predstavlja prostoriju ili skup prostorija unutar nekog objekta sa sličnim zahtevima u pogledu održavanja sledećih parametara:

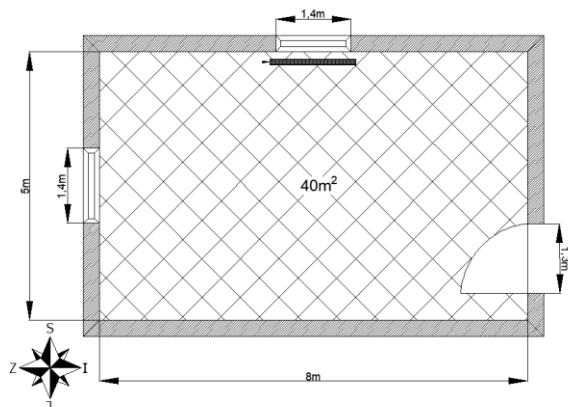
1. Temperatura vazduha,
2. Relativna vlažnost vazduha,
3. Koncentracija CO₂,
4. Osvetljenje.

Prostorije koje čine jednu toplotnu zonu mogu, a i ne moraju biti fizički odvojene što znači da u okviru jednog

objekta može postojati veći broj toplotnih zona svaka sa nezavisnim izvorom grejanja i hlađenja [1]. Zbog različite namene, broja ljudi i sunčevog zračenja, svaka pojedinačna zona zahteva određene parametre kako bi uslovi bili odgovarajući, pa se zoniranje, tj. upravljanje parametrima pojedinačne zone čini adekvatnim rešenjem. Treba napomenuti da se zoniranjem postižu znatne uštede u energiji, spram na primer grejanja kompletne zgrade, jer se stavlja akcenat na zone koje se koriste.

4. REFERENTNA TOPLOTNA ZONA

U radu će se koristiti toplotna zona koja predstavlja kuću sa jednom prostorijom, površine 40m^2 , ne uzimajući u obzir debljinu zidova. Kuća je pozicionirana na teritoriji opštine Novi Sad, geografske širine $45^\circ 14' 9.27''$ i geografske dužine $19^\circ 45' 40.17''$. Podrazumeva se da su svi zidovi kuće spoljašnji i orijentisani kao što je prikazano na slici 2. Visina prostorije, od poda do plafona iznosi 3.14 m , što predstavlja proizvoljnu izabranu vrednost. Za projektovanu temperaturu u zoni je izabrana vrednost od 20°C .



Slika 2. Referentna toplotna zona.

5. MATEMATIČKI MODEL TOPLOTNE ZONE

Model će biti zasnovan početnoj bilansnoj jednačini toplotnih dobitaka i gubitaka u okviru zone. Definiše se kao:

$$\dot{Q}_{omotač} + \dot{Q}_{inf} = \dot{Q}_{ljudi} + \dot{Q}_{rad} \quad (1)$$

gde $\dot{Q}_{omotač}$ predstavlja gubitke toplotnih omotača zone, \dot{Q}_{inf} toplotne gubitke usled infiltracije kroz procepe vrata i prozora, \dot{Q}_{ljudi} toplotni dobitak od ljudi i \dot{Q}_{rad} što predstavlja toplotni dobitak od strane grejnog tela.

5.1 Model toplotnog omotača zone

Proračun toplotnih gubitaka zone je izveden po EN 12831 [2] standardu. Deli se na transmisione i ventilacione gubitke i definiše se kao:

$$\Phi_u = \Phi_T + \Phi_V. \quad (2)$$

gde Φ_T predstavlja transmisione gubitke i Φ_V predstavlja ventilacione gubitke. Transmisioni gubici se ogledaju u

gubicima prilikom prenosa toplote iz zone ka spoljašnjoj sredini. Granične površine prenosa su zid, plafon, pod, prozor i vrata. Potrebno je izračunati transmisione gubitke kroz sve te površine, te se definiše kao:

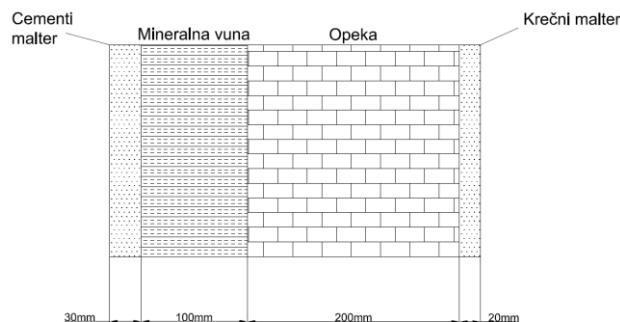
$$\Phi_T = (H_{T,z} + H_{T,p} + H_{T,v} + H_{T,p} + H_{T,p}) \cdot \Delta t \quad (3)$$

gde je $H_{T,i}$ pojedinačan koeficijent transmisioinog gubitka od grejanog prostora prema spoljašnjoj okolini dok Δt predstavlja razliku temperatura između unutrašnje projektovane i spoljašnje sredine.

Gde se pojedinačni koeficijent transmisioinog gubitka od grejanog prostora prema spoljašnjoj okolini $[\text{W/K}]$ računaju:

$$H_{T,i} = A_i \cdot U_i \cdot e_i \quad (4)$$

gde je A_i površina elementa građevine (zid, prozor, vrata, plafon, pod), U_i koeficijent prelaza toplote i - te građevine i e_i korekcionni faktor izloženosti, usvaja se 1. Konstrukcija zida je prikazana na slici 3.



Slika 3. Konstrukcija zida

Ventilacioni gubici se definišu kao:

$$\Phi_{V,i} = H_{V,i} \cdot (t_u - t_s). \quad (6)$$

gde je $H_{V,i}$ koeficijent ventilacionih toplotnih gubitaka, t_u unutrašnja projektana temperatura, spoljašnja temperatura t_s .

5.2 Model unutrašnji toplotnih dobitaka

Unutrašnji toplotni dobici potiču od:

1. Ljudi
2. Osvetljenja
3. Uređaja

U ovom radu će se zanemariti uticaj osvetljenja i uređaja dok će se toplotni dobitak ljudi i dalje razmatrati. Da bi se izvršila sinteza modela unutrašnjih dobitaka od strane ljudi, neophodno je poznavati vrednosti toplotne energije koju ljudi oslobode prilikom boravka u prostoriji.

Treba napomenuti da ta vrednost varira od tipa aktivnosti kojom se ljudi bave u prostoriji. Podaci su preuzeti iz ASHRE priručnika [3] i prikazani u tabeli 1.

Aktivnost	Osetna W	Latentna W	Ukupna W
Sedenje (odmor)	70	30	100
Sedenje (laki rad)	75	45	120
Stojanje	75	70	145
Laki fizički rad	90	160	250
Teški fizički rad	185	285	470

Tabela 1. Procenjena emitovana toplotna energija od ljudi.

Na osnovu procenjene emisije toplotne energije od strane ljudi je definisana je sledeća diferencijalna jednačina:

$$\frac{dQ_{ljudi}}{dt} = n_s \cdot 70 + n_{st} \cdot 75 + n_l \cdot 90 + n_t \cdot 185. \quad (12)$$

gde je n_s broj ljudi koji sedi, n_{st} broj ljudi koji stoji, n_l broj koji obavlja laki rad i n_t broj koji obavlja teški rad.

5.3 Model grejnog tela

Bilansna jednačina grejnog dela je definisana kao:

$$\dot{Q}_{dov} = \dot{Q}_{aku} + \dot{Q}_{rad}. \quad (13)$$

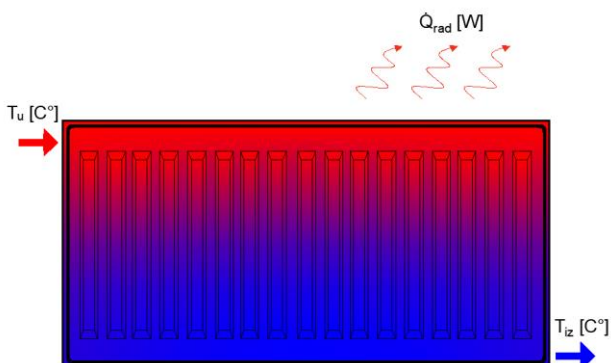
gde \dot{Q}_{dov} predstavlja toplotnu energiju dopremljenu grejnom telu, \dot{Q}_{aku} akumulisanu toplotnu energiju i \dot{Q}_{rad} toplotnu energiju emitovanu u okolinu [4].

Detaljni model je definisan kao:

$$\dot{m}_w \cdot c_w \cdot (T_u - T_{iz}) = K_1 \cdot \frac{dT}{dt} + \dot{Q}_n \cdot \left[\frac{\Delta t}{\Delta t_n} \right]^n. \quad (14)$$

$$K_1 = (m_v \cdot c_w + m_m \cdot c_m). \quad (15)$$

gde je \dot{m}_w maseni protok tople vode ka radijatoru, c_w toplotni kapacitet vode, m_v masa vode u radijatoru, m_m masa metala radijatora, c_m toplotni kapacitet metala radijatora, \dot{Q}_n nominalna snaga radijatora za dati tip radijatora merena po standardu EN 442, Δt logaritamska razlika u temperaturi, Δt_n logaritamska razlika u temperaturi koja se računa za odabrani temperaturski režim (90/70/20 °C), dok je n karakteristični eksponent za dati tip radijatora.



Slika 4. Skica panelnog radijatora.

5.4 Model emisije CO₂

Količina ugljen - dioksida u prostoriji je u direktnoj zavisnosti od ljudi koji se nalaze u prostoriji i vrste aktivnosti kojom se bave. Osvežavanje prostorije se jedino vrši prilikom infiltracije vazduha kroz procepe vrata i prozora što će se uzeti u obzir prilikom modelovanja [5]. Treba napomenuti da je ovaj model izveden iz statičkog modela i da je usvojen sa dosta pretpostavki.

Model emisije je definisan kao:

$$\frac{dC(t)}{dt} = \frac{K_e}{3600} - \frac{V_{inf} \cdot 400}{3600} \quad (16)$$

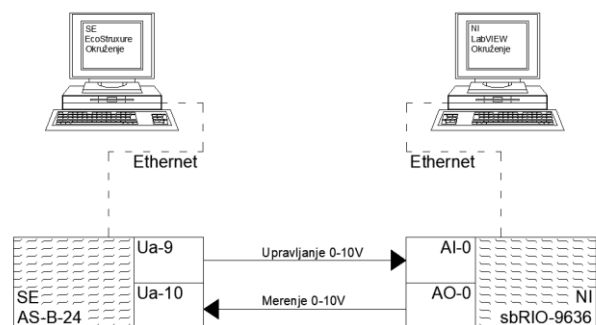
$$K_e = n_s \cdot 5 + n_{st} \cdot 6,06 + n_{lr} \cdot 7 + n_t \cdot 9,5 \quad (17)$$

gde je n_s broj ljudi koji sedi, n_{st} broj ljudi koji stoji, n_{lr} broj ljudi koji obavlja laki fizički rad, n_{tr} broj ljudi koji obavlja teški fizički rad i V_{inf} protok svežeg vazduha usled infiltracije kroz procepe vrata i prozora.

5 EKSPERIMENTALNA KONFIGURACIJA

Prilikom formiranja HIL sistema, potrebno je posedovati određeni hardverski sklop na kojem će se izvršavati upravljanje kao i simulacija u realnom vremenu. Za potrebe upravljanja u ovom radu će se koristiti kontroler Schneider Electric AS-B-24 na kojem će se izvršavati zakon upravljanja PID, a simulacija termalne zone će se odvijati na kontroleru National Instruments sbRIO-9636. National Instruments sbRIO 9636 kontroler je opremljen Real-Time procesorom i FPGA-om na istom čipu što je ključno za funkcionisanje ovog kontrolera u realnom vremenu.

Naime, na analognom izlazu iz NI kontrolera se šalje informacija o trenutnoj temperaturi zone, takav signal se doprema do SE kontrolera koji na osnovu referentne vrednosti (20°C) računa grešku uz pomoć PID zakona upravljanja, a pritom na svom analognom izlazu generiše upravljanje. Signal upravljanja se obrađuje u NI kontroleru i pomoću njega reguliše otvorenost ventila grejnog tela radijatora. Treba napomenuti da su oba kontrolera povezana Ethernet vezom sa PC računarima na kojima se vrši prikaz trenutnih vrednosti parametara simulacije zone i upravljanja.

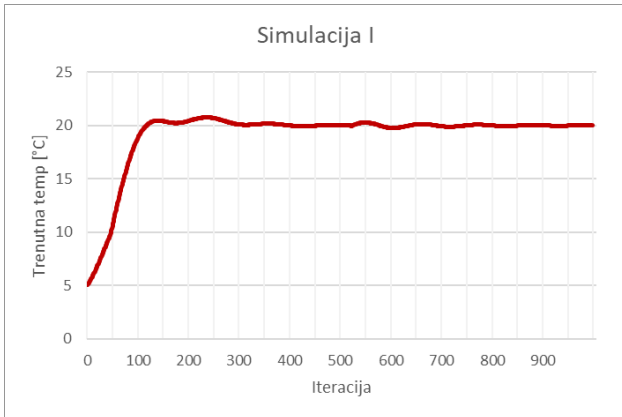


Slika 5. Šematski prikaz HIL konfiguracije.

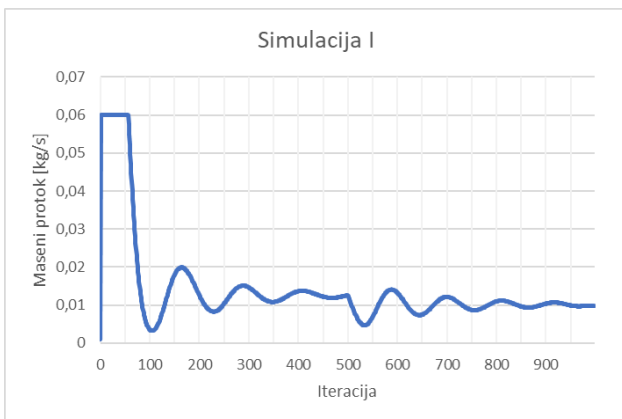
6 REZULTATI EKSPERIMENTALNE POSTAVKE

Prilikom simulacije termalne zone, izvršeno je par simulacija radi prikaza funkcionisanja HIL sistema kao i provere normalnog rada simulacionog modela i upravljanja.

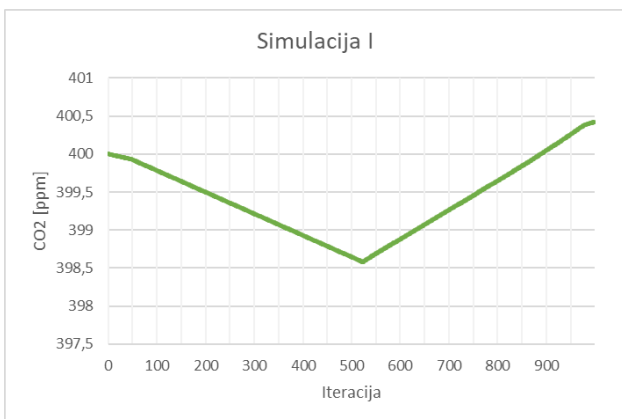
Na slici 6, 7 i 8 su prikazani rezultati simulacije I, na kojima se mogu uočiti promene temperature u prostoriji, promene masenog protoka tople vode na dovodu radijatora, kao i promena koncentracije CO₂.



Slika 6. Rezultati simulacije I, trenutna temperatura.



Slika 7. Rezultati simulacije I, maseni protok.



Slika 8. Rezultati simulacije I, koncentracija CO₂.

Simulacija termalne zone je u skladu sa očekivanjima, prateći zadatke dostizanja ciljanih vrednosti. Ipak, primećen je poremećaj u simulaciji kada dve osobe ulaze u zonu i obavljaju aktivnosti sedenja i lakog rada, što se može uočiti oko petstote iteracije. Grafikoni masenog

protoka tople vode jasno pokazuju nagli pad u tim trenucima, s PID zakonom upravljanja koje uspešno kompenzuje dodatne poremećaje i uspeva da održi temperaturu u željenom opsegu.

7 ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedenog istraživanja, čiji je cilj bio proučavanje i simulacija termalne zone u HIL sistemu, mogu se izvesti sledeći zaključci.

Razvijen je dinamički model termalne zone u kojoj je integrisano grejno telo (radijator) sa mogućnošću upravljanja putem kontrole masenog protoka dotoka tople vode do istog. Kroz simulaciju pokazano je da model termalne zone, koji je povezan sa PID regulatorom, postiže željene vrednosti projektovane temperature zone i oponaša poremećaje u vidu ulaska ljudi u prostoriju termalne zone. Iako se HIL sistemi često koriste u automobilskoj, avio, vojnoj i energetske industriji, pokazuje se da se dobri rezultati postižu i u procesima grejanja i hlađenja stambeno-poslovnih objekata [6]. Na osnovu zaključaka i rezultata iznetih u ovom radu, potrebno je dalje istraživanje kako bi se uspostavio precizniji i detaljniji model termalne zone.

8 LITERATURA

- [1] <http://ymgigroup.com/> Pristupljeno 10.02.2024.
- [2] Evropski komitet za standardizaciju. (2017). SRPS EN 12831-1:2017: Energetska efikasnost zgrada - Metoda za proračun projektovanog toplotnog opterećenja - Deo 1: Opterećenje i proračun grejanja.
- [3] Kreider, J. F., Curtiss, P. S., & Rabl, A. (2010). Heating and Cooling of Buildings: Design for Efficiency. (pp. 300).
- [4] Chen, L., & Sørensen, B. R. (2020). Modelling Multi-layer Hydronic Radiators. E3S Web of Conferences, 172, 12007.
- [5] Sakamoto, M., Li, M., Kuga, K., Ito, K., Bekö, G., Williams, J., & Wargoeki, P. (2022). CO₂ emission rates from sedentary subjects under controlled laboratory conditions. Building and Environment, 211, 108735.
- [6] Mihalić, F., Truntić, M., & Hren, A. (2022). Hardware-in-the-Loop Simulations: A Historical Overview of Engineering Challenges. Electronics, 11, 2462.

Kratka biografija:



Predrag Nikolić rođen je u Boru 1998. god. Osnovne akademske studije završio je 2022. god., smer Čiste energetske tehnologije. Master rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Automatike i računarstva odbranio je 2024.god. kontakt: predragnikolic99@gmail.com