[[1]](#footnote-1)

Adaptivan PI regulator u HVAC sistemima sa čistim vremenskim kašnjenjem

Mina Vasković, Vojislav Filipović, Milan Matijević, Milan Ristanović i Dragan Lazić

*Apstrakt*—Rad daje komparativnu analizu različitih algoritama upravljanja u smislu analize performanse regulacije i mogućnosti uštede energije u HVAC sistemu opisanom modelom prvog reda sa čistim vremenskim kašnjenjem. Parametri sistema su promenljivi, što odgovara realnom eksperimentalnom postrojenju sistema klimatizacije na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Beogradu. U radu je opisan rekurzivni algoritam identifikacije koji estimira i čisto vremensko kašnjenje. Na osnovu njega se projektuje adaptivni regulator i analizira njegova performansa u odnosu na neadaptivan slučaj korišćenja konvecionalnih industrijskih regulatora.

*Ključne reči*—HVAC sistem, PI kontroler, Smith-ov prediktor, Dahlin-ov regulator.

# Uvod

Sistemi klimatizacije (Heat, Ventilation and Air Conditioning – HVAC) imaju veliki uticaj na utrošak energije u objektima. Dobar model ovakvog sistema omogućava projektovanje adekvatnog kontrolera, a samim tim i uštedu energije. Većina HVAC sistema može da se predstavi modelom sistema prvog reda sa čistim vremenskim kašnjenjem [1]

Kontroleri koji se adaptiraju prema promenama sistema zahtevaju onlajn identifikaciju modela, koja će davati u svakom trenutku adekvatne vrednosti za podešavanje parametara korišćenog kontrolera. Rekurzivna metoda najmanjih kvadrata (Recursive Least Squares – RLS) daje pojačanje i vremensku konstantu sistema, dok vremensko kašnjenje ostaje nepoznato. Ako prenosnu funkciju sistema sa isključenim kašnjenjem izmenimo tako da se u njoj sadrže i podaci o vremenskom kašnjenju, možemo doći i do informacije o sva tri parametra modela, koji su nam potrebni za podešavanje kontrolera. [2].

Ukoliko je kašnjenje u sistemu malo, standardni PI kontroleri su dovoljno dobri za upravljanje ovakvim objektom. Međutim, značajnije kašnjenje može dovodesti sistem sa zatvorenom spregom do nestabilnosti, ili mu pokvariti performanse. [3] U takvim situacijama Smith-ov prediktor se koristi u povratnoj sprezi, da bi poništio dejstvo vremenskog kašnjenja. [2]. Još jedan od razvijenih PI regulatora koji uključuju vremensko kašnjenje je Dahlin-ov regulator, koji je i jednostavniji za upotrebu.[4]

U narednoj sekciji biće dat opis rekurzivnog algoritma za identifikaciju sistema sa čistim vremenskim kašnjenjem, a nakon toga upravljanje sistemom korišćenjem konvencionalnog samopodešavajućeg PI regulatora, PI regulatora sa uključenim Smith-ovim prediktorom u povratnu spregu, kao i Dahlin-ovog PI regulatora. Simulacije su rađene nad modelom realnog sistema opisanog u [2]. U zaključku će biti dati kometnari dobijenih rezultata.

# Identifikacija sistema sa čistim vremenskim kašnjenjem

Posmatrajmo diskretnu funkciju prenosa prvog reda HVAC sistema:

|  |  |
| --- | --- |
| $P\left(z\right)=\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}z^{-d}=\frac{bz^{-1}}{1-az^{-1}}z^{-d}$, | (1) |

gde *d* predstavlja kašnjenje u sistemu. Ako u polinom u brojiocu „ugradimo“ kašnjenje tako što povećamo red polinoma na *m*, gde je *m-1* maksimalan broj perioda kašnjenja sistema:

|  |  |
| --- | --- |
| $P\_{m}\left(z\right)=\frac{B\_{m}(z^{-1})}{A\_{m}(z^{-1})}=\frac{\hat{b\_{1}}z^{-1}+\hat{b\_{2}}z^{-2}+…+\hat{b\_{m}}z^{-m}}{1-\hat{a}z^{-1}}$, | (2) |

dobijamo diskretnu prenosnu funkciju modela. Sada je vektor koeficijenata prenosne funkcije, koji je potrebno identifikovati:

|  |  |
| --- | --- |
| $\hat{θ }=\left[\hat{a},\hat{b\_{1}},\hat{b\_{2}},…,\hat{b\_{m}}\right]^{T}$. | (3) |

Kombinovanjem RLS metode i jednakosti modela na nultoj učestanosti, dobijamo sva tri parametra sistema, *a*, *b* i *d* [5].

Izlaz iz estimiranog sistema ima oblik:

|  |  |
| --- | --- |
| $y\left(k\right)=\hat{θ}^{T}h(k)$, | (4) |

gde je $h(k)$ vektor zakašnjenih odbiraka ulaznog i izlaznog signala u *k*-toj iteraciji:

|  |  |
| --- | --- |
| $h\left(k\right)=\left[y\left(k-1\right),u\left(k-1\right),u\left(k-2\right),…,u\left(k-m\right)\right]^{T}$. | (5) |

U gornjoj jednačini $y\left(k\right)$ je izlazni signal, a $u\left(k\right)$ ulazni signal. Greška procene modela biće:

|  |  |
| --- | --- |
| $e\left(k\right)=y\left(k\right)-\hat{θ}^{T}(k-1)h(k)$. | (6) |

Parametri modela prepodešavaju se prema:

|  |  |
| --- | --- |
| $\hat{θ}\left(k\right)=\hat{θ}\left(k-1\right)+G\left(k\right)e(k)$, | (7) |

gde je matrica pojačanja estimatora:

|  |  |
| --- | --- |
| $G(k)=\frac{P\left(k-1\right)h(k)}{ρ+h^{T}\left(k\right)P\left(k-1\right)h(k)}$. | (8) |

Faktor $ρ$ je faktor zaboravljanja, dok je $P\left(k\right)$ kovarijaciona matrica koja se u *k*-toj iteraciji podešava na sledeći način:

|  |  |
| --- | --- |
| $P(k)=\frac{1}{ρ}\left[I-G\left(k\right)h^{T}\left(k\right)\right]P(k-1)$. | (9) |

Kada se estimira vektor $\hat{θ}$, parametar $\hat{a }$identifikovanog modela biće prvi član vektora $\hat{θ}$, dok izjednačavanjem realnog i estimiranog modela na nultoj učestanosti dobijamo parametre $\hat{b }$ i $\hat{d }$.

|  |  |
| --- | --- |
| $\left.B(z^{-1})z^{-d}\right|\_{z=e^{jωT}}=\left.\hat{B\_{m}} (z^{-1})\right|\_{z=e^{jωT}}$. | (10) |

|  |  |
| --- | --- |
| $\frac{\left.dB(z^{-1})z^{-d}\right|\_{z=e^{jωT}}}{dω}=\frac{\left.d\hat{B\_{m}} (z^{-1})\right|\_{z=e^{jωT}}}{dω}$. | (11) |

|  |  |
| --- | --- |
| $\hat{b }=\sum\_{i=1}^{l}\hat{b\_{i}}$. | (12) |

|  |  |
| --- | --- |
| $\hat{d }=\left[\frac{\sum\_{i=1}^{l}i∙\hat{b\_{i}}}{\sum\_{i=1}^{l}\hat{b\_{i}}}\right]-1$. | (13) |

|  |  |
| --- | --- |
| $\hat{d }=INT\left(\hat{d }+0.5\right)$. | (14) |

Pri identifikaciji biraju se početne vrednosti parametra modela, faktor zaboravljanja koji uzima vrednosti od 0 do 1, početna vrednost kovarijacione matrice, koja se obično uzima da bude $P\left(0\right)=αI$, gde je $α$ velika vrednost. Kada se završi procena modela, mogu se podesiti parametri kontrolera.

# Upravljanje HVAC sistemom

Nakon implementiranog algoritma identifikacije, zatvara se povratna sprega u sistemu i uvodi se kontroler.

Tri različita kontrolera su testirana za ovaj sistem. Prvi je konvencionalni PI kontroler čiji se parametri podešavaju u toku simulacije prema dobijenim parametrima modela. Drugi je takođe konvencionalni adaptivni PI regulator, s tim da je u povratnu spregu uključen i Smith-ov prediktor, da bi se poništilo dejstvo kašnjenja u sistemu i da bi se očuvale performanse kontrolera. Poslednji je Dahlin-ov regulator, koji predstavlja robusnu metodu upravljanja sistemima sa vremenskim kašnjenjem, gde se promenom parametra $\frac{1}{λ}$ menja robusnost i brzina odziva. Parametri digitalnog Dahlin-ovog regulatora, podešenih tako da nema naglih promena u upravljačkom signalu, su:

|  |  |
| --- | --- |
| $K\_{p}=\frac{1-e^{-λt}}{K\_{0}(e^{\frac{T}{T\_{0}}}-1)\left[1+d\left(1-e^{-λt}\right)\right]}$. | (15) |

|  |  |
| --- | --- |
| $\frac{T}{T\_{i}}=e^{\frac{T}{T\_{0}}}-1$, | (16) |

gde su $K\_{0}$ i $T\_{0}$ pojačanje i vremenska konstanta funkcije prenosa sistema u kontinualnom domenu.

Dimenzije prostorije koja se zagreva na željenu temperaturu su 5,0 m x 4,0 m x 3,8 m. Grejač koji zagreva vazduh je snage od 0 W do 12 kW i u simulacijama je taj opseg pretvaran u opseg 0-100% snage. Statička karakteristika sistema je data na slici 1 [2]

Sl. 1. Statička karakteristika sistema.

Model sistema u kontinualnom domenu, nad kojim su testirani kontroleri je:

|  |  |
| --- | --- |
| $G\left(s\right)=\frac{72e^{-300s}}{60s+1}$. | (17) |

Slika 2 prikazuje rezultate identifikacije ovog modela u otvorenoj sprezi. Može se primetiti da se parametri modela ne mogu odrediti u prvom periodu trajanja simulacije, tačnije sve dok ne prođe period kašnjenja. Pri zatvaranju povratne sprege ovo predstavlja problem, u smislu da sistem ne može da uključi adaptivne regulatore koji se oslanjaju na algoritam identifikacije, u toku trajanja kašnjenja minimalno. Nakon isteka kašnjenja može da se uključi algoritam identifikacije u povratnu spregu, a do tada sistem radi ili u otvorenoj sprezi, ili sa uključenim fiksnim regulatorom.



Sl. 2. Procenjeni parametri modela sistema.

Temperatura prostorije pre uključivanja regulatora je dovedena na $27℃$. Željene temperature su redom $35℃$, $39℃$ i $32℃$, a promene željene temperature dešavale su se na svakih 100 min. Na slikama 3 i 4 prikazani su rezultati praćenja referentnih vrednosti upotrebom koriišćenih algoritama upravljanja, kao i upravljački signali koji su dobijeni u toku simulacija.



Sl. 3. Izlaz iz sistema sa zatvorenom povratnom spregom sa PI regulatorom sa i bez Smith-ovog prediktora i sa Dahlin-ovim PI regulatorom.

Perioda odabiranja je jedan minut, a vremenska osa je normalizovana tako da je njen početak postavljen na nulu u trenutku prve promene referentne vrednosti. Pre uključivanja promenljivih regulatora, u sistemu je bio uključen PI regulator konstantnih parametara, da bi se omogućio nesmetan rad sistema u zatvorenoj sprezi, dok ne prođe kašnjenje, da bi se dobili parametri modela iz algoritma za identifikaciju.



Sl. 4. Upravljački signali iz PI regulatora sa i bez Smith-ovog prediktora i iz Dahlin-ovog PI regulatora.

Ono što se svakako nameće kao zaključak posmatranjem prethodnih grafičkih rezultata je svakako pogoršanje performanse sistema kada se koristi samo PI kontroler, bez Smith-ovog prediktora. S obzirom da vremensko kašnjenje nije zanemarljivo u odnosu na vremensku konstantu sistema, performanse celokupnog sistema sa ovim kontrolerom nisu očekivane. Preostala dva kontrolera daju dobre rezultate, sto se tiče vremena smirenja i preskoka u odzivu. Preskok je mali, sto je za ovakav sistem veoma dobro, jer ne bi trebalo da dolazi do naglih promena temperatura u prostoriji.

# Zaključak

U radu je dat rekurzivni algoritam identifikacije HVAC sistema sa čistim vremenskim kašnjenjem, koji je primenjen nad modelom prostorije datih dimenzija koja se zagreva na željenu temperaturu. Pokazano je da se parametri modela procenjuju tačno, što je omogućilo projektovanje kontrolera za upravljanje datim procesom. Tri različita kontrolera su upoređena. Konvencionalni PI kontroler, čiji se parametri podešavaju onlajn prema estimiranim parametrima procesa, najlošije rezultate daje. Druga dva kontrolera, PI sa Smith-ovim prediktorom i Dahlin-ov PI regulator daju zadovoljavajuće rezultate. Ono što Dahlin-ov regulator stavlja ispred PI regulatora sa Smith-ovim prediktorom je jednostavnost i robusnost.

Zahvalnica

Ovo istraživanje je rezultat aktivnosti u okviru projekta TR 33047 - Inteligentni sistemi upravljanja klimatizacije u cilju postizanja energetski efikasnih režima u složenim uslovima eksploatacije, i podržano je od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj republike Srbije.

Literatura

1. M. Kasahara, T. Matsuba, Y. Kuzuu, T. Yamazaki, Y. Hashimoto, K. Kamimura, S. Kurosu, Design and tuning of robust PID controller for HVAC systems, ASHRAE Transactions 105 (PA) (1999) 154–166.
2. J. Bai, S. Wang, X. Zhang, Development of an adaptive Smith predictor-based self-tuning PI controller for an HVAC system in a test room, Energy and Buildings, Volume 40, Issue 12, 2008, Pages 2244-2252
3. C.H. Chang, C.H. Tan, W.P. Chan, A Performance study of control systems with dead time, IEEE Transactions on IECI 27 (3) (1980) 234–241.
4. Dumont, Guy A., Ashraf Elnaggar, and Abdel Elshafei. "Adaptive predictive control of systems with time-varying time delay." *1st European Control Conferences*. 1991.
5. Jianbo Bai, Xiaosong Zhang, A new adaptive PI controller and its application in HVAC systems, Energy Conversion and Management, Volume 48, Issue 4, April 2007, Pages 1043-1054

Abstract

Paper presents comparative analysis of different control algorithms in way of analysing regulation performance and possible energy saving in HVAC system described by first order model with time-delay. Model parameters vary, which corresponds to real experimental setup implemented at Faculty of mechanical engineering in Belgrade. In this paper recursive identification algorithm is presented, for estimation of time-delay parameter. Based on this algorithm, adaptive regulator is created and it’s performance is analysed in comparison with nonadaptive case with conventional industrial regulators.

**Adaptive PI regulator in HVAC systems with time-delay**

Mina Vasković, Vojislav Filipović, Milan Matijević, Milan Ristanović i Dragan Lazić

1. Mina Vasković – Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, Srbija (e-mail: minavaskovic@yahoo.com).

Vojislav Filipović – Fakultet za mašinstvo i građevinarstvo u Kraljevu, Univerzitet u Kragujevcu, Dositejeva 19, 36000 Kraljevo, Srbija (e-mail: v.filipovic@open.telekom.rs).

Milan Matijević – Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, Srbija (e-mail: milan.matijevic@gmail.com).

Milan Ristanović – Mašinski fakultet, Univerzitet u Begradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: mristanovic@mas.bg.ac.rs).

Dragan Lazić – Mašinski fakultet, Univerzitet u Begradu, Kraljice Marije 16, 11120 Beograd, Srbija (e-mail: dlazic@mas.bg.ac.rs). [↑](#footnote-ref-1)