

Simulator avtomatiziranega notranjega okolja

Simon Tomažič¹, Vito Logar¹, Igor Škrjanc¹, Mitja Košir²

¹Univerza v Ljubljani, Fakulteta za elektrotehniko, Tržaška 25, 1000 Ljubljana, Slovenija

²Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana, Slovenija

E-pošta: simon.tomazic@fe.uni-lj.si

Povzetek. Zaradi zahtev, kot so energetska učinkovitost, boljše delovne in bivanjske razmere ter večja varnost, sistemi za upravljanje zgradb čedalje bolj pridobivajo na svojem pomenu. Vendar sistemi avtomatiziranega nadzora v stavbah še vedno niso zelo razširjeni, saj imajo to pomanjkljivost, da je nastavljanje parametrov za njihovo optimalno delovanje zahteven in dolgotrajen proces. Med našim delom na eksperimentalnem sistemu notranjega okolja, ki je nameščen v kabinetu na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani, se je izkazalo, da bi bil simulator lahko v veliko pomoč pri optimizaciji njegovega delovanja. Simulator smo razvili, da bi dosegli optimalne rezultate pri vodenju notranje temperature, osvetljenosti in kakovosti zraka v zaprtem prostoru in hkrati omogočili veliko hitrejše in varnejše eksperimentiranje kot na realnem testnem sistemu. V prispevku je predstavljen simulator, ki je bil razvit s pomočjo orodij Matlab in Simulink ter Dymola/Modelica. Prispevek predstavlja zasnovo simulatorja in podrobno opisuje mehko vodenje notranje temperature in osvetljenosti. Na koncu so prikazani rezultati simulacije za izbrane podatke pri uporabi mehkega načina vodenja.

Ključne besede: avtomatizacija zgradb, toplotni model, model osvetljenosti, simulator, mehki sistemi

Fuzzy Control of Indoor Temperature and Illuminance

Due to the requirements, such as energy efficiency, better working and living conditions and increased safety, Building management systems (BMS) are gaining on importance. On the other hand, implementing automated control and monitoring systems in buildings is still relatively new, and one of the obstacles for their wider implementation is the ease of setting up the appropriate parameters of the controllers. During our work on an experimental controller of indoor environment that is installed in an occupied office in the building of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering, University of Ljubljana, Slovenia, it has become evident that the computer simulator of the system would be a welcome aid for the optimization of its functioning. In order to achieve the optimized results of temperature, illuminance and air quality control in a smart room, we have developed the simulator which enables much faster and safer experimentation than a real test system. In the paper, a simulator application developed in combined Matlab/Simulink and Dymola/Modelica environment is presented. The paper presents the design of the simulator and describes fuzzy control of temperature and illuminance in detail. In the end, the simulation results obtained with fuzzy control mode are presented for a selected day.

1 UVOD

Avtomatizirano vodenje v stavbah ima velik potencial glede zmanjšanja porabe energije, tako pri sistemih HVAC (ang. heating, ventilation, and air conditioning) [1], kot tudi pri umetni razsvetljavi [2]. Poleg energetske varčnosti avtomatizacija stavb hkrati izboljša

tudi kakovost notranjega okolja in tako omogoči udobnejše bivanje ali prijetnejše okolje za delo, ki naprej vpliva na večjo produktivnost uporabnikov take stavbe.

Integralni regulacijski sistem notranjega okolja (IRsNO), ki je opisan v Košir in drugi [3, 4], je nameščen v realnem okolju, in sicer v kabinetu na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Sistem skrbi za nadzor osvetljenosti v prostoru, ogrevanje, hlajenje in pasivno prezračevanje glede na koncentracijo ogljikovega dioksida. Pogoje v prostoru je mogoče spreminjati s pomočjo elektrificiranih žaluzij, s stropnimi grelno-hladilnimi paneli, s stropnimi fluorescentnimi lučmi in oknom na električni pogon. Pogoji v prostoru so merjeni s pomočjo senzorjev za notranjo in zunanjo svetlobo, temperaturo, relativno vlažnost, CO₂, globalno in reflektirano sončno sevanje, padavine ter merilnika za smer in hitrost vetra.

Pri uporabi in eksperimentiranju na sistemu IRsNO se je izkazalo, da sistem deluje učinkovito le, če so vsi parametri ustrezno nastavljeni glede na trenutni letni čas [3, 5]. Toda del sistema, kjer se izvaja procesiranje (krmilnik), je za operaterja le črna škatla, saj nima natančnega vpogleda, kako sprememba izbranega parametra (regulatorja) vpliva na delovanje sistema. Zato mora operater zelo podrobno poznati sistem, če želi doseči zadovoljivo delovanje regulacijskega sistema. Velik problem je tudi dejstvo, da mora operater po vsaki nastavitvi parametrov čakati tudi več dni, da lahko iz eksperimentalnih rezultatov oceni uspešnost

delovanja sistema, kar je lahko zelo zamudno delo. Če operater dobi zadovoljive rezultate, pa še vedno ne more natančno vedeti, ali so ti res optimalni. Pri tem lahko večdnevne poizkuse pokvari tudi nenadna sprememba vremena [6].

Da bi bilo eksperimentiranje in iskanje optimalnih parametrov sistema IRsNO lažje ter predvsem veliko hitrejše, smo razvili simulator, ki v celoti posnema realno testno okolje IRsNO. Meritve, pridobljene s pomočjo vseh razpoložljivih senzorjev na realni napravi, so bile uporabljene pri razvoju in optimizaciji modelov za temperaturo in osvetljenost v prostoru. Iz meritev so bili pridobljeni tudi podatki o vremenskih razmerah za vse dni v letu. Te podatke je mogoče naložiti v simulator, kar uporabniku omogoča, da lahko preizkuša svoje nastavitve parametrov pri različnih pogojih. Simulator se izvaja v okoljih Matlab in Simulink [7].

V nadaljevanju prispevka so najprej opisani sestavni deli simulatorja, njegove lastnosti in uporaba ter nato še rezultati, ki smo jih dobili pri uporabi mehke logike za namen regulacije temperature in osvetljenosti v prostoru.

2 SIMULATOR

Simulator je bil razvit na podlagi realnega testnega okolja IRsNO in tako prek modelov za osvetljenost in temperaturo posnema tudi delovanje vseh aktuatorjev, ki so prisotni na realnem sistemu.

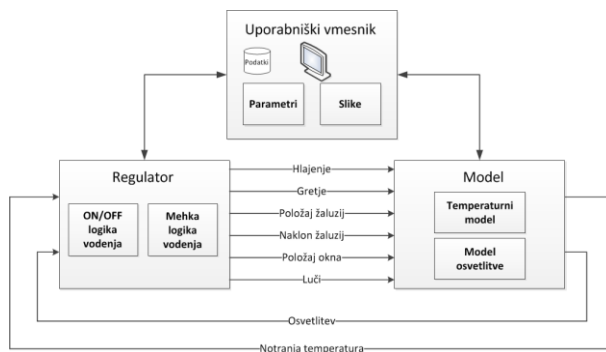
Razvoja simulatorja smo se lotili zato, da bi dobili virtualno okolje, ki natančno posnema realne testne pogoje, hkrati pa omogoča hiter in varen preizkus vpliva različnih parametrov na simulacijske rezultate. Da bi bila uporaba simulatorja preprosta tudi za neizkušenega uporabnika, smo dodali pregleden uporabniški vmesnik, s pomočjo katerega uporabnik spreminja parametre in izvaja različne poizkuse.

Predstavljeni simulator ima številne prednosti v primerjavi z realnim testnim okoljem IRsNO; simulacijski teki so zelo hitri v primerjavi s poizkusom na realni napravi, simulacijo lahko kadarkoli izvajamo za poljuben dan v letu, simulacijo lahko izvedemo za več dni hkrati (do deset dni), ne da bi več dni čakali na rezultate. Torej, s pomočjo simulatorja hitro dobimo informacijo o tem, kako na rezultat vplivajo različni parametri, kot so histereze regulatorjev ON/OFF, reference, časovne omejitve, nastavitve mehkih (ang. »fuzzy«) regulatorjev itd. Končni namen simulatorja je ta, da lahko preizkušene nastavitve regulatorjev nato prenesemo na realno napravo. Ker je testiranje v realnem okolju zamudno in ga pogosto motijo obiskovalci testne sobe, se je v tem primeru simulator izkazal kot optimalna rešitev.

2.1 Deli simulatorja

Simulator sestoji iz treh osnovnih delov: regulatorja, modela in uporabniškega vmesnika, ki so shematsko prikazani na sliki 1.

Kot vidimo na sliki 1, lahko v simulatorju izbiramo med dvema različnima načinoma vodenja, in sicer logiko vodenja ON/OFF in mehko logiko vodenja. Prvi način vodenja je algoritem, ki je sestavljen iz več ON/OFF regulatorjev za osvetljenost, temperaturo, umetno osvetlitev in CO₂ koncentracijo ter iz različnih časovnih in drugih logičnih omejitev.



Slika 1: Deli simulatorja

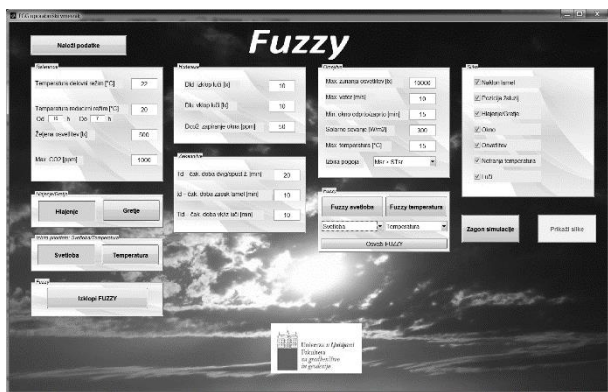
Mehka logika vodenja sestoji iz dveh ločenih mehkih (»fuzzy«) regulatorjev za osvetljenost in temperaturo ter iz dveh ON/OFF regulatorjev za umetno razsvetljavo in prezračevanje (glede na koncentracijo CO₂). Ne glede na izbiro algoritma vodenja je regulator povezan v zaprto zanko z matematičnim modelom, ki je drugi osnovni del simulatorja. Logika, ki je bila poleg regulatorjev implementirana v simulatorju, temelji na znanju, pridobljenem empirično na realni napravi [8, 9].

Na sliki 1 vidimo, da model sestoji iz dveh podmodelov, ki sta dinamičen mehanizem za opis relacij med temperaturo sobe in nivojem osvetljenosti na eni strani ter vplivnimi veličinami, kot so solarno sevanje, zunanja osvetljenost, zunanja temperatura, položaj žaluzij, položaj okna, stanje luči, ogrevanje/hlajenje na drugi.

Prvi podmodel je temperaturni model testne sobe, ki vključuje vse pomembne mehanizme toplotnih prehodov pri določitvi notranje temperature glede na konstrukcijske lastnosti stavbe in druge vplivne veličine. Model, ki je bil uporabljen v tej študiji, je bil razvit v Laboratoriju za modeliranje, simulacijo in vodenje [10, 11]. Pri razvoju je bil model ovrednoten na podatkih, pridobljenih z meritvami v realnem okolju »kamra« (predhodno testno okolje). Temperaturni model je bil razvit v objektno orientiranem okolju Dymola/Modelica. Za namen simulatorja, ki ga predstavljamo v tej študiji, je bil temperaturni model razširjen z dodatnimi mehanizmi in na novo parametriziran glede na meritve, pridobljene na realni napravi. Tako smo dobili temperaturni model, ki dobro posnema razmere realnega testnega okolja.

Drugi podmodel je model notranje osvetljenosti. Ta upošteva učinek naravne osvetlitve (nivo zunanje svetlobe), položaja žaluzij in stanja luči na trenutni nivo osvetljenosti v testnem prostoru. Model osvetljenosti je bil razvit po principu črne škatle s pomočjo sistema mehkega sklepanja (FIS) [12-14]. Model je bil naučen tako, da smo definirali vhod in izhod modela glede na pridobljene meritve na realnem sistemu. Pri vohodu v model so upoštevani zunanja osvetljenost, položaj žaluzij in status luči (umetna razsvetljava). Model nam glede na množico parametriziranih mehkih pravil pri izhodu vrne nivo notranje osvetljenosti.

Tretji del simulatorja je t. i. uporabniški vmesnik (slika 2), pomeni pa povezavo med procesom, ki teče v ozadju simulatorja in uporabnikom, ki želi spreminjati različne nastavitve in parametre ter nato opazovati vpliv teh sprememb na rezultate simulacije.



Slika 2: Uporabniški vmesnik

Predstavljeni simulator je bil razvit in preizkušen v okoljih Matlab in Simulink in Dymola.

3 UPORABA SIMULATORJA

V nadaljevanju bomo predstavili uporabo simulatorja, lastnosti uporabniškega vmesnika in možnosti pri nastavljanju mehkih regulatorjev v simulatorju.

Uporabniški vmesnik je bil oblikovan tako, da je do uporabnika prijazen, kar pomeni, da omogoča preprosto spreminjanje parametrov in prikaz rezultatov v obliki grafov. Kot vidimo na sliki 2, so parametri logično razdeljeni na štiri polja, in sicer na reference, histereze, zakasnitve in druge omejitve. Ob zagonu simulatorja so vsi parametri, ki pripadajo modeloma ali regulatorjem, nastavljeni na privzete vrednosti. Pred zagonom simulacije lahko vse parametre poljubno nastavimo. Glede na to, za kateri dan v letu želimo izvesti simulacijo, moramo naložiti podatke (pridobljene v realnem testnem okolju), kot so zunanja temperatura, zunanja osvetljenost, solarno sevanje, hitrost vetra itd. Hkrati lahko naložimo podatke za največ deset dni in tako opazujemo rezultate simulacije za daljše obdobje. Glede na to, kateremu letnemu času pripadajo naloženi podatki, izberemo način gretja ali hlajenja.

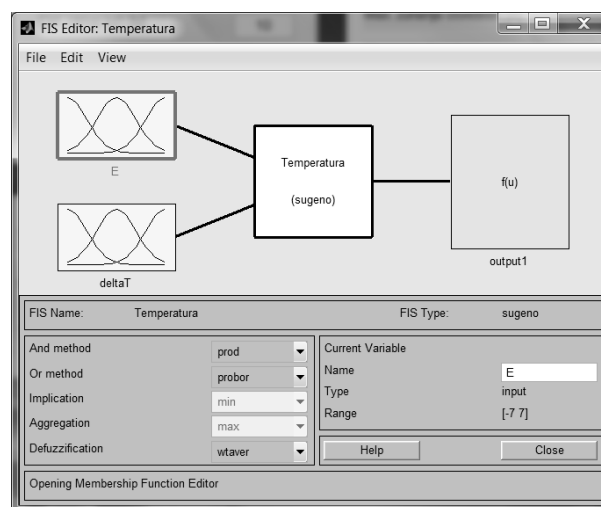
Kot smo že omenili, lahko znotraj simulatorja, tako kot na realnem sistemu, uporabljamo dva različna načina vodenja, in sicer način ON/OFF in način, ki temelji na mehki logiki. V celoti izveden način vodenja ON/OFF ima nekaj pomanjkljivosti (regulator ON/OFF pri izhodu lahko vrne le dve vrednosti in ne more slediti referenci brez pogoška, iz česar sledijo oscilacije okoli reference). Prednost uporabe mehke logike v primerjavi s konvencionalnimi regulacijskimi pristopi je predvsem v bolj intuitivni izvedbi regulacijskih pravil, saj so le-ta formulirana s pogojno posledičnimi pravili v obliki »if«, »then«. Takšen pristop je zelo podoben človeškemu načinu razmišljanja in dojemanja ter omogoča matematično modeliranje lingvističnih spremenljivk, kot npr. zelo hladno, toplo, presvetlo [15].

Če je izbran način vodenja, ki temelji na mehki logiki, potem za regulacijo temperature in naravne svetlobe skrbita dva mehka regulatorja ter za umetno osvetlitev in prezračevanje dva preprosta regulatorja ON/OFF. Znotraj uporabniškega vmesnika lahko uporabnik izbira med več predhodno nastavljenimi mehki regulatorji za notranjo temperaturo in osvetljenost (slika 3).



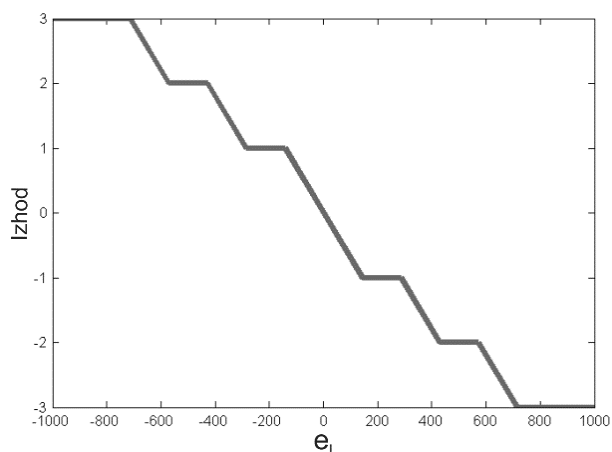
Slika 3: Izbira prednastavljenih mehkih regulatorjev

S klikom na gumba »Fuzzy svetloba« in »Fuzzy temperatura« (slika 3) se nam odpre okno FIS (»FIS editor«, slika 4), ki je del »Fuzzy Logic Toolbox« v okoljih Matlab in Simulink, v katerem lahko spreminjamo že obstoječe mehke regulatorje ali pa ustvarimo povsem nov regulator.



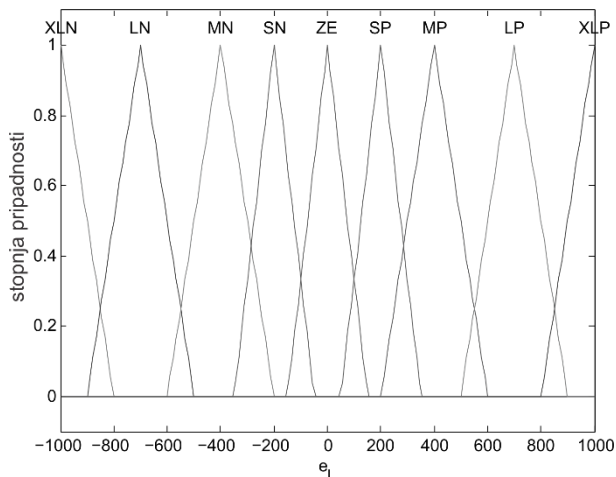
Slika 4: Okno FIS v okolju Matlab

Za prikaz rezultatov simulacije smo uporabili dva predhodno nastavljena mehka regulatorja za temperaturo in osvetljenost, ki vključujeta način mehkega sklepanja Takagi-Sugeno [16]. Izbrani mehki regulator za osvetljenost, ki skrbi za položaj in naklon žaluzij, je preprost P regulator, katerega vhodno-izhodna karakteristika je prikazana na sliki 5.



Slika 5: Vhodno-izhodna karakteristika mehkega regulatorja notranje osvetljenosti

Vhod v regulator osvetljenosti je pogrešek $e_L = ST_{IL} - M_{IL}$, kjer je ST_{IL} zelena notranja osvetljenost, M_{IL} pa dejanska notranja osvetljenost. Glede na velikost pogreška e_L , obliko in porazdelitev pripadnostnih funkcij (slika 6) regulator pri izhodu vrne vrednosti med -3 in 3 (tabela 1). Izhodna vrednost regulatorja pomeni, za koliko stopenj se mora spremeniti trenutni položaj žaluzij. Negativne vrednosti zapirajo žaluzije, pozitivne pa jih odpirajo.



Slika 6: Mehke množice vhodne spremenljivke e_L pri mehkem regulatorju osvetljenosti

Tabela 1: Pravila v mehkem regulatorju osvetljenosti

Če e_L pripada	XLN	potem je izhod	3
Če e_L pripada	LN	potem je izhod	3
Če e_L pripada	MN	potem je izhod	2
Če e_L pripada	SN	potem je izhod	1
Če e_L pripada	ZE	potem je izhod	0
Če e_L pripada	SP	potem je izhod	-1
Če e_L pripada	MP	potem je izhod	-2
Če e_L pripada	LP	potem je izhod	-3
Če e_L pripada	XLP	potem je izhod	-3

Žaluzije lahko zavzamejo štiri položaje, od 0 do 4, pri čemer 0 pomeni, da so žaluzije povsem zaprte (0° – vertikalni položaj), 3, da so lamele najbolj odprte (90° – horizontalni položaj) in 4, da so žaluzije povsem dvignjene. Trenuten položaj je definiran kot predhodni položaj, spremenjen za vrednost, ki jo vrne regulator.

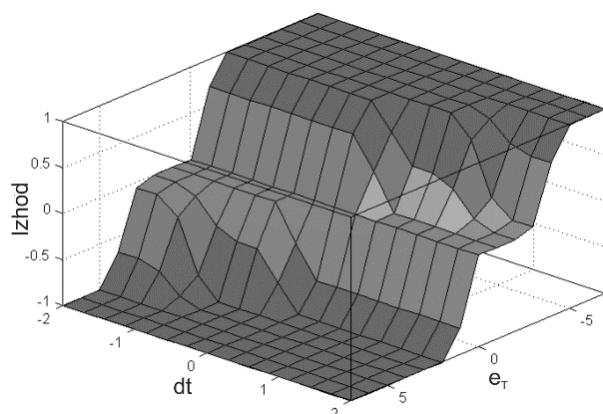
Ob nezadostni naravni osvetljenosti se vključi umetna osvetlitev, ki jo regulira preprost regulator ON/OFF. Ta lahko vklopi luči le, če je v prostoru pretemno, čeprav so žaluzije že povsem dvignjene (zunanja osvetljenost je padla pod določen prag).

Vsi regulatorji v simulatorju vključujejo tudi časovne omejitve, ki preprečujejo, da bi se aktuatorji prepogosto vklopili in izklopili. Tako lahko uporabnik simulatorja izbere npr., koliko minut mora miniti med posameznima premikoma naklona lamel žaluzij.

Na temperaturo v testni sobi lahko vplivajo grelno/hladilni paneli, sončno sevanje (gretje) in pasivno hlajenje pri odprtem oknu. Za namen regulacije temperature smo v simulatorju izbrali predhodno nastavljeni mehki regulator PD (TS s trikotnimi pripadnostnimi funkcijami), katerega vhodno-izhodna karakteristika je prikazana na sliki 7. Vhoda v regulator sta pogrešek $e_T = ST_T - M_T$ (pri čemer je ST_T zelena temperatura v prostoru, M_T pa dejanska temperatura v prostoru) in odvod temperature dT . Pri določanju pravil »if-then« je bil med mehкими množicami uporabljen operator »AND«, v fazi ostrenja pa metoda uteženih kvadratov.

Kot vidimo na sliki 7, lahko mehki regulator temperature zavzame vrednosti med -1 in 1 , pri čemer 1 pomeni vključeno gretje, -1 pa vključeno hlajenje. Vrednost 0 pomeni, da sta tako gretje kot hlajenje izključena.

Dodatna logika skrbi za to, da se vedno, ko je to mogoče, uporabi pasiven vir gretja oz. hlajenja. Za pasivno gretje se uporablja sončno sevanje, za pasivno hlajenje pa zunanji (hladnejši) zrak, katerega dotok se kontrolira z avtomatiziranim oknom. To okno je namenjeno tudi prezračevanju prostora. Če dežuje, algoritem prepreči možnost odpiranja okna.



Slika 7: Vhodno-izhodna karakteristika mehkega (»fuzzy«) regulatorja temperature

Ker jakost sončnega sevanja bistveno vpliva na notranjo temperaturo, ima algoritem dodatno možnost izbire prioritete med temperaturo ali osvetljenostjo [3]. To pomeni, da tedaj, ko ima osvetljenost višjo prioriteto kot temperatura, logika določi tak položaj žaluzij, da je osvetljenost v prostoru čim bolj enaka želeni osvetljenosti (pasivno ogrevanje v tem primeru ni mogoče oz. v poletnem času lahko pride do pregrevanja prostora). Če ima temperatura višjo prioriteto kot osvetljenost, pa logika določi položaj žaluzij tako, da prepreči pregrevanje poleti, v zimskem času pa omogoči uporabo sončnega sevanja za pasivno ogrevanje.

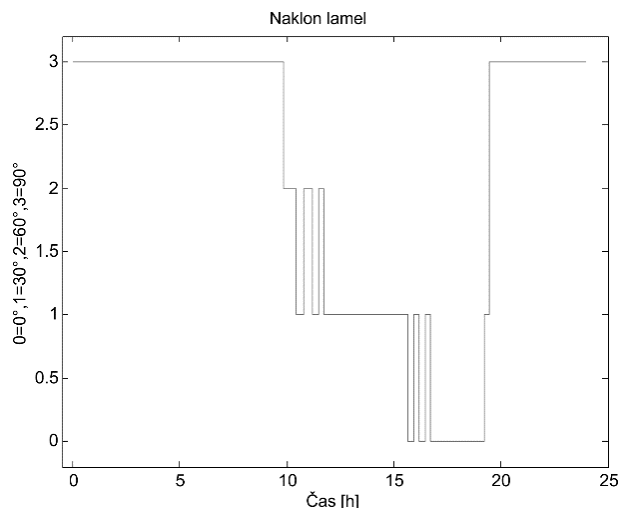
4 REZULTATI SIMULACIJE

V tem razdelku bomo predstavili rezultate simulacije, ki smo jih dobili pri uporabi mehke logike vodenja temperature in osvetljenosti za izbrani poletni dan.

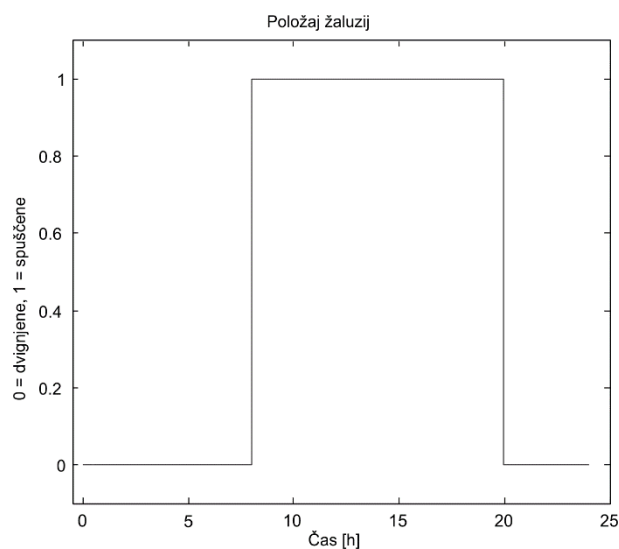
Ker so v praksi prepogosti premiki žaluzij nezaželeni, smo nastavili časovni omejitvi, ki določata, da se lahko žaluzije spustijo ali dvignejo le vsakih 30 minut ter da se naklon lamel lahko spremeni le vsakih 15 minut. Za regulator luči ON/OFF smo nastavili histerezo na 100 lx. Luči se lahko prižgejo oz. ugasijo le vsakih 10 minut.

Na sliki 8 vidimo prikazan naklon lamel, ki ga določa mehki regulator osvetljenosti. Naklon lamel se lahko spreminja le, če so žaluzije spuščene (slika 9). V tem primeru se to zgodi ob 8.00, ko zunanja osvetljenost dovolj naraste. Kot vidimo na sliki 8, so vsi premiki naklona lamel, z izjemo enega, enokoračni.

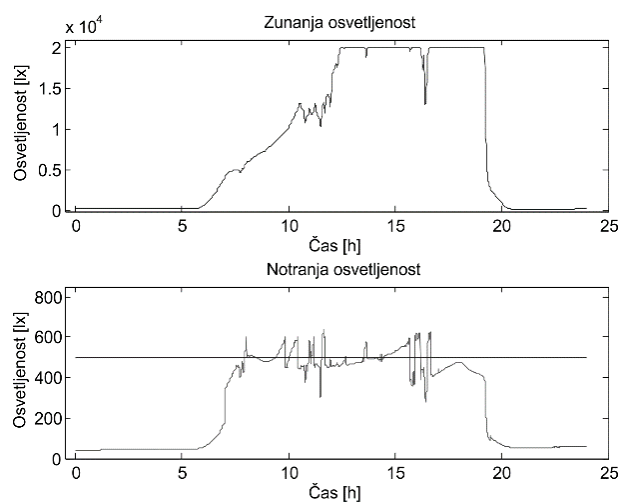
Na sliki 10 sta prikazani notranja osvetljenost, ki jo dobimo pri simulaciji, in izmerjena zunanja osvetljenost. Kot lahko opazimo, je notranja osvetljenost v času delovnega režima (med 7.00 in 16.00) blizu referenci (500 lx), pri čemer je umetna osvetlitev vključena le med 7.00 in 8.00, ko je zunanja osvetljenost še prenizka.



Slika 8: Naklon lamel



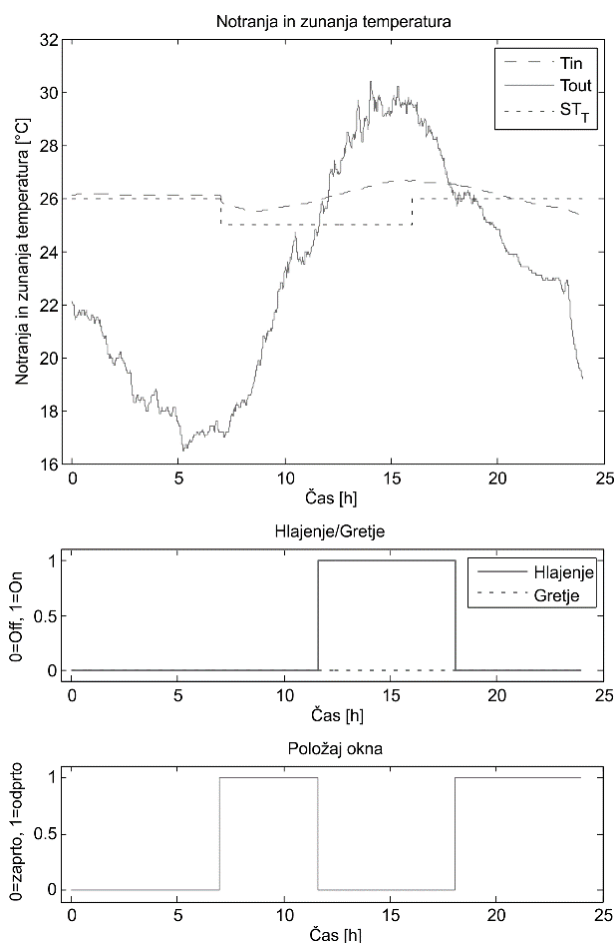
Slika 9: Položaj žaluzij



Slika 10: Zunanja in notranja osvetljenost

Ker smo naložili podatke za poletni dan, smo znotraj uporabniškega vmesnika vključili način hlajenja. Histereza regulatorja temperature je enaka $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Na sliki 11 (zgoraj) so prikazane simulirana notranja temperatura, iz podatkov pridobljena zunanja temperatura in zelena temperatura. Kot opazimo na sliki, je razlika med zeleno in dejansko temperaturo med polnočjo in sedmo uro zjutraj dovolj nizka, da ni potrebno hlajenje. Ob 7.00, ko se aktivira delovni režim (v delovnem režimu je zelena temperatura nižja), pa pogrešek θ_T naraste in posledično se vključi hlajenje. Dokler je zunanja temperatura nižja od zelene notranje temperature, se uporablja pasivno hlajenje, kar pomeni, da se odpre okno. Okoli poldneva zunanja temperatura preseže zeleno notranjo temperaturo, kar pomeni, da je treba okno zapreti. Ker je bilo za primer simulacije izbrano, da ima osvetljenost v prostoru višjo prioriteto kot temperatura, prihaja do pregrevanja zaradi sončnega sevanja (slika 11). Namreč, notranja temperatura narašča, čeprav so hladilni paneli vključeni. Ta problem bi lahko odpravili s hladilnimi paneli, ki imajo večjo hladilno moč ali pa z izbiro načina, ko je temperatura pomembnejša kot osvetljenost v prostoru.



Slika 11: Regulacija temperature; zgoraj so prikazane notranja, zunanja in zelena temperatura, na sredini je prikazano stanje gretja/hlajenja, spodaj je prikazan položaj okna

5 SKLEP

V tem članku smo predstavili simulator notranjega okolja, njegove dele in lastnosti ter prikazali rezultate simulacije pri uporabi mehke logike vodenja temperature in osvetljenosti v prostoru.

Predstavljeni simulator je orodje, ki omogoča nove študije na področju energetske učinkovitosti stavb, avtomatizacije stavb in iskanja boljših bivanjskih in delovnih razmer. S pomočjo simulatorja je iskanje optimiziranih nastavitev regulatorjev in drugih parametrov sistema preprosto in hitro. Optimalne nastavitve lahko nato preprosto prenesemo tudi na realen sistem.

LITERATURA

- [1] Rubinstein F., Jennings J., Avery D., Blanc S.: Preliminary results from an advanced lighting controls testbed. In: IESNA 1998 Annual Conference, San Francisco, Lawrence Berkeley National Laboratory, San Antonio (1998).
- [2] Selkowitz S., Lee E.: Integrating automated shading and smart glazings with daylighting controls. In: International Symposium on Daylighting Buildings (IEA SHC TASK 31), Tokyo (2004).
- [3] Košir M., Krainer A., Kristl Ž.: Integral control system of indoor environment in continuously occupied spaces. *Automat. Constr.*, vol. 21, pp. 199–209, (2012).
- [4] Košir M., Krainer A., Dovjak M., Perdan R., Kristl Ž.: Alternative to the Conventional Heating and Cooling Systems in Public Buildings. *J. Mech. E.*, vol. 56(9), pp. 575–583, (2010).
- [5] Košir M., Krainer A., Dovjak M., Kristl Ž.: Automatically controlled daylighting for visual and nonvisual effects. *Light Res. Tech.*, vol. 43(4), pp. 439–455, (2011).
- [6] Clarke J. A., Cockroft J., Conner S., Hand J. W., Kelly N. J., Moore R., et al.: Simulation-assisted control in building energy management systems. *Energ Buildings*, vol. 34, pp. 933–940, (2002).
- [7] The Mathworks: Simulink User's Guide. r2012b ed. Natick: The Mathworks, (2012).
- [8] Kristl Ž., Košir M., Trobec Lah M., Krainer A.: Fuzzy control system for thermal and visual comfort in building. *Renew. Energ.*, vol. 33, pp. 694–702, (2008).
- [9] Trobec Lah M., Zupancic B., Peternej J., Krainer A.: Daylight illuminance control with fuzzy logic. *Sol. Energy.*, vol. 80(3), pp. 307–321, (2006).
- [10] Škrjanc I., Zupancic B., Furlan B., Krainer A.: Theoretical and experimental fuzzy modelling of building thermal dynamic response. *Build. Environ.*, vol. 36(9), pp. 1023–1038, (2001).
- [11] Sodja A., Zupancic B.: Modelling thermal processes in buildings using an object-oriented approach in modelica. *Simul. Model. Pract. Th.*, vol. 17(6), pp. 1143–1159, (2009).
- [12] Wang L.X., Mendel J.M.: Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal leastsquares learning. *IEEE T. Neural Networ.* vol. 3(5), pp. 807–814, (1992).
- [13] Kosko B.: Fuzzy systems as universal approximators. *IEEE T. Comput.*, vol. 43(11), pp. 1329–1333, (1994).
- [14] Ying H., Chen G.: Necessary conditions for some typical fuzzy systems as universal approximators. *Automatica*, vol. 33(7), pp. 1333–1338, (1997).
- [15] Munakata, T.: Fundamentals of the New Artificial Intelligence: Beyond Traditional Paradigms. Springer-Verlag, New York, (1998).

[16] Takagi T., Sugeno M.: Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control.

[17] IEEE T. Syst. Man. Cyb., vol. 15(1), pp. 116–132, (1985).

Simon Tomažič je diplomiral leta 2012 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot mladi raziskovalec na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo lokalizacijo v zaprtem prostoru s pomočjo pametnega telefona.

Vito Logar je diplomiral leta 2004 in doktoriral leta 2009 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot asistent na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo modeliranje in uporabo optimizacijskih tehnik na različnih področjih.

Igor Škrjanc je diplomiral leta 1988, magistriral leta 1991 in doktoriral leta 1996 na Fakulteti za elektrotehniko v Ljubljani. Zaposlen je kot profesor na Fakulteti za elektrotehniko Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo adaptivne, prediktivne, mehke in adaptivno mehke sisteme vodenja.

Mitja Košir je diplomiral leta 2003 na Fakulteti za arhitekturo in doktoriral leta 2008 na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo v Ljubljani. Zaposlen je kot asistent na področju stavbarstva na Fakulteti za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Njegova raziskovalna zanimanja vključujejo področje oblikovanja in regulacije stavbnega ovoja, kot tudi notranjega okolja stavb s posebnim poudarkom na vizualnem in toplotnem okolju ter energetski učinkovitosti stavb.