

# Razvoj algoritma za določanje referenčnih temperatur prostorov objektov \*

<sup>1</sup>Darko Vrečko, <sup>1</sup>Stanko Strmčnik, <sup>2</sup>Narcis Vodopivec

<sup>1</sup>Odsek za sisteme in vodenje, Institut Jožef Stefan, Jamova 39, Ljubljana

<sup>2</sup>GOAP d.o.o. Nova Gorica, Ulica Klementa Juga 7, Solkan

darko.vrecko@ijs.si, stanko.strmcnik@ijs.si, n.vodopivec@goap.si

## *Development of the algorithm for the reference temperature calculation in buildings*

*In the paper an algorithm for the reference temperature calculation in buildings is presented. Algorithm was developed and tested on the simulation building model by using the TRNSYS software. Algorithm calculates reference temperatures in the rooms when they are not occupied in such a way to maintain desired thermal comfort at minimal consumption of energy for cooling and heating. The main advantage of the algorithm is its ability to automatically adapt reference temperature set-points to different thermal conditions.*

## 1 Uvod

V zadnjem desetletju se v poslovnih in turističnih objektih vgrajujejo računalniško podprti sistemi HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) za gretje, prezračevanje in klimatizacijo, z namenom zagotavljanja ustreznega ugodja uporabnikom objektov in smotrne porabe energije. Delovanje sodobnih sistemov HVAC je na spodnjem nivoju večinoma avtomatizirano, vendar praviloma njihovo delovanje ni optimalno s stališča porabe energije in zelenega udobja gosta v objektu.

Delovanje HVAC sistemov je možno optimirati na zgornjem nivoju z ustreznim nadzornim algoritmom, s katerim lahko dosežemo zeleno udobje gosta v objektu pri minimalni porabi energije za hlajenje in gretje. Za razvoj učinkovitega nadzornega algoritma delovanja HVAC sistemov je zelo primerna uporaba simulacijskih modelov objektov, ki upoštevajo glavne termične lastnosti objekta,

kot so nebesna usmerjenost, geometrija, zunanja temperatura zraka, sončno sevanje, toplotna prevodnost sten, modeli HVAC sistemov, itd.

V prispevku predstavljamo razvoj nadzornega algoritma za nastavljanje referenčnih temperatur HVAC sistemov in s tem prostorov objektov. Algoritem je bil razvit na simulacijskem modelu objekta v programskem paketu TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation program) [1]. Algoritem deluje tako, da prilagaja referenčne temperature prostorov, ko le-ti niso zasedeni [2], glede na temperaturne razmere v objektu in zeleno udobje gosta. Na ta način lahko precej zmanjšamo porabo energije za hlajenje/gretje prostorov, pri tem pa ohranimo zeleno udobje gosta.

V prispevku bomo najprej predstavili simulacijski model objekta, ki je bil načrtan v programskem paketu TRNSYS. V nadaljevanju bomo opisali algoritem za določanje referenčnih temperatur prostorov. Nato bomo prikazali rezultate preizkušanja algoritma na simulacijskem modelu objekta. Prispevek bomo zaključili z najpomembnejšimi ugotovitvami.

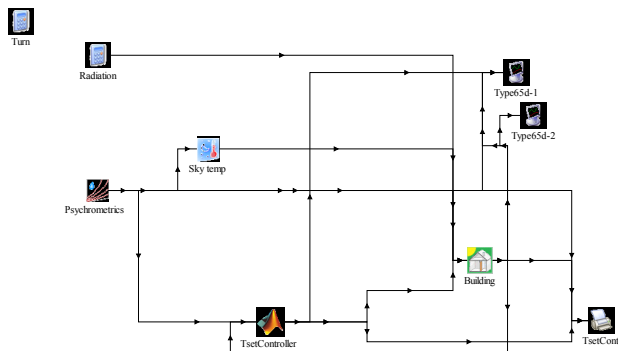
## 2 Simulacijski model objekta

Model objekta je bil načrtan v programskem paketu TRNSYS [1], ki predstavlja enega od vodilnih programskih paketov za modeliranje in dinamično simulacijo različnih sistemov, kot so objekti, toplotni izmenjevalci, sistemi z obnovljivim virom energije itd. Shema delovnega okna v paketu TRNSYS je prikazana na sliki 1. Tloris uporabljenega objekta z

---

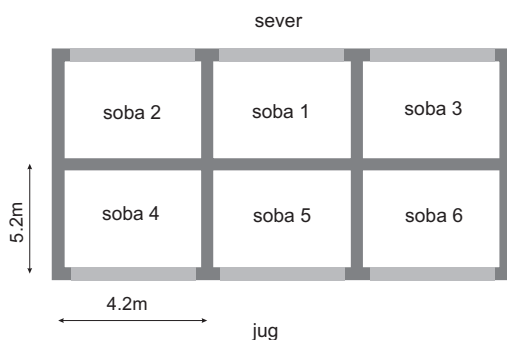
\*Projekt financira Agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije in sofinancira podjetje GOAP d.o.o. Nova Gorica.

nebesno usmerjenostjo in oznako sob je prikazan na sliki 2.



Slika 1. Shema delovnega okna v paketu TRNSYS.

Objekt vsebuje šest sob v velikosti 5.2m x 4.2m x 3m [3]. Sobe so termično sklopljene in spodaj in zgoraj umeščene v preostalo zgradbo. Toplotno prevodnost (u-value) notranjih sten smo nastavili na 1.6 W/m<sup>2</sup>K in zunanjih sten na 0.6 W/m<sup>2</sup>K. Vsaka soba vsebuje okno v velikosti 7.5m<sup>2</sup>, s toplotno prevodnostjo 1.4 W/m<sup>2</sup>K in toplotnimi izgubami (g-value) 0.6.



Slika 2. Tloris objekta.

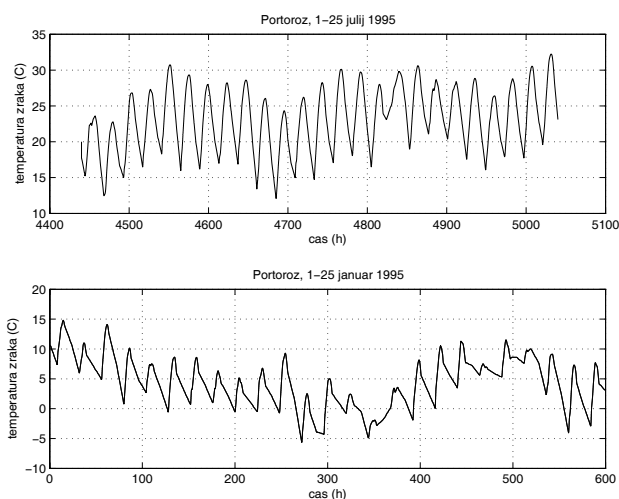
Toplotno kapacitivnost sob smo postavili na 790.9 kJ/K, kar približno ustreza vrednosti 12-kratnega volumna sob. Na ta način smo upoštevali, da sobe niso prazne, ampak imamo v njih tudi pohištvo [4]. V objektu nismo upoštevali senčenja, v vseh sobah pa smo nastavili izmenjavo zraka na 0.2 na uro. Poleg tega smo v objektu upoštevali tudi termični vpliv gostov v času zasedenosti sob.

Moč HVAC sistemov za hlajenje/gretje prostorov smo nastavili na 1 kW, kar zadostuje za vzdrževanje referenčne temperature v prostorih. Na spodnjem nivoju smo temperaturo regulirali z »on-off« regulatorjem, ki vklaplja in

izklaplja hlajenje/gretje, glede na razliko med referenčno in izmerjeno temperaturo v prostoru.

V paketu TRNSYS so na voljo tudi različni podatki o vremenu, npr. zunanja temperatura zraka, sončno sevanje, vlažnost itd. za različna mesta po svetu. V našem primeru smo uporabili vremenske podatke za mesto Portorož in sicer prvih 25 dni v mesecu juliju in januarju za leto 1995. Uporabljeni podatki o zunanji temperaturi zraka so podani na sliki 3. Poletne podatke smo uporabili za preizkušanje hlajenja in zimske za preizkušanje gretja prostorov.

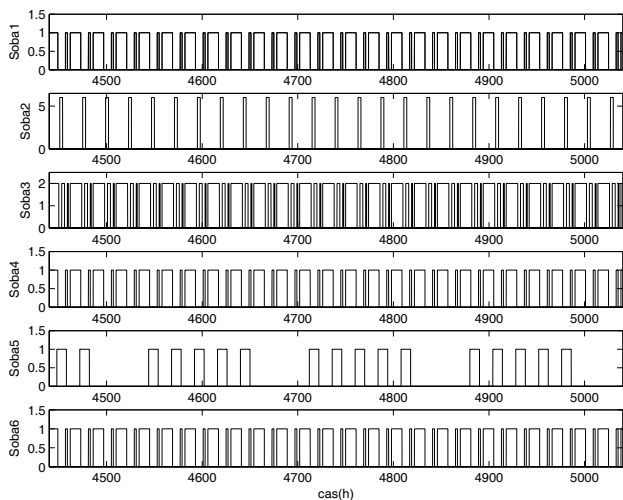
V modelu objekta smo upoštevali tudi različno zasedenost prostorov. Zasedenost v sobah 1, 4 in 6 je tipična za hotelske sobe, ko je gost že prijavljen v hotelu. Sobe so zasedene med 22 in 9 uro in med 17 in 19 uro. Predpostavili smo, da je v sobah prijavljen samo en gost. Zasedenost v sobi 2 predstavlja jedilnico, ki je zasedena samo med 11 in 14 uro. V času zasedenosti je v njej šest oseb. Soba 3 zopet predstavlja hotelsko sobo, vendar z drugačno zasedenostjo, kot prej. V sobi sta dve osebi in sicer med 22 in 10 uro, med 13 in 16 uro in med 19 in 20 uro. Soba 5 predstavlja pisarno za eno osebo in je zasedena samo ob delovnih dneh (od ponedeljka do petka) med 8 in 18 uro. Zasedenost v vseh sobah za obdobje 25 dni prikazuje slika 4.



Slika 3. Zunanja temperatura zraka.

Zasedenost sob je večja od nič, ko so gostje v sobah in nič, ko jih ni v sobah. Pri preizkušanju postopkov smo predpostavili, da zasedenost v

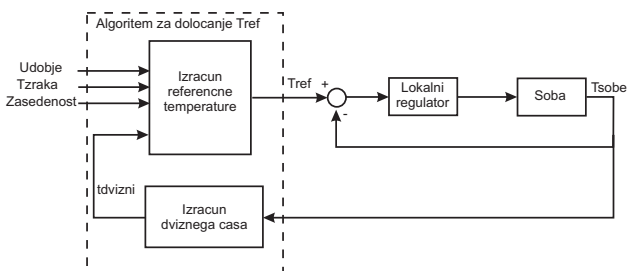
hotelskih sobah 1, 3, 4 in 6 ni znana vnaprej, za razliko od sobe 2 (jedilnica) in 5 (pisarna), kjer smo predpostavili, da je zasedenost znana vnaprej.



Slika 4. Zasedenost sob za 25 dni.

### 3 Algoritem za določanje referenčnih temperatur prostorov

Shemo vodenja temperature prostorov, ki smo jo uporabili, prikazuje slika 5 [3]. Algoritem za določanje referenčne temperature prostorov predstavlja nadzorni sistem za regulatorje temperature na spodnjem (lokalnem) nivoju HVAC sistemov.



Slika 5. Shema vodenja temperature prostorov.

Udobje gosta smo v naši študiji definirali z dovoljenim dviznim časom temperature. V sobah, kjer se vnaprej ne ve, kdaj bodo zasedene (sobe 1, 3, 4 in 6), smo dvizni čas določili, kot čas po vstopu gosta v sobo, do katerega temperatura v sobi doseže referenčno temperaturo. V sobah, kjer pa se že vnaprej ve, kdaj bodo zasedene (sobi 2 in 5), pa smo dvizni čas določili, kot čas pred zasedenostjo sobe, do

katerega dosežemo referenčno temperaturo po vklopu hlajenja/gretja.

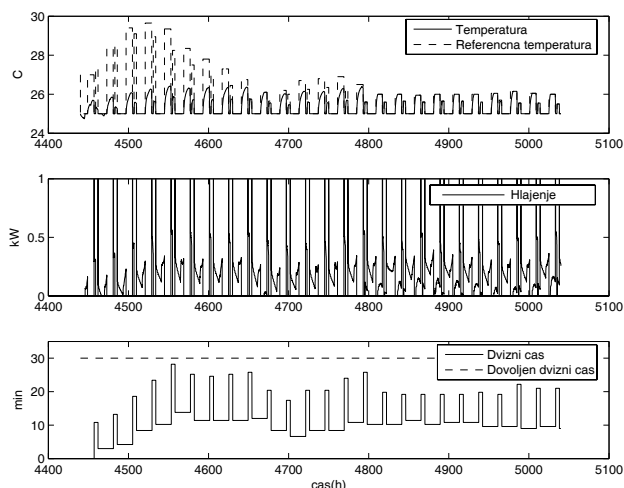
Algoritem določa referenčne temperature na dva načina. V sobah, kjer se vnaprej ne ve, kdaj bodo zasedene, algoritem v obdobju nezasedenosti ustrezno spremeni referenčno temperaturo, da potem, ko gost vstopi v sobo, doseže temperatura želeno vrednost v predpisanem dviznem času. V sobah, kjer pa se vnaprej ve, kdaj bodo zasedene, algoritem ustrezno spremeni referenčno temperaturo v času nezasedenosti in v pravem trenutku vklopi hlajenje/gretje, da se doseže referenčno temperaturo v sobi pred začetkom zasedenosti sobe. S takšnim spreminjanjem referenčne temperature dosežemo precej manjšo porabo energije za hlajenje/gretje v obdobju nezasedenosti sob, hkrati pa v obdobju zasedenosti sob ohranimo želeno udobje gosta.

Na osnovi mnogih simulacij in preizkušanj smo razvili algoritem določanja referenčnih temperatur prostorov, ki zadovoljivo deluje in je primeren tudi za praktično uporabo. Algoritem v sobah, kjer je gost prijavljen v sobi in se vnaprej ne ve, kdaj bo v sobi (soba 1, 3, 4 in 6), poveča spremembo referenčne temperature za naslednje obdobje nezasedenosti, če je zadnji izmerjeni dvizni čas temperature manjši od dovoljenega. Obratno, če je zadnji izmerjeni dvizni čas temperature v sobi večji od dovoljenega, zmanjša spremembo referenčne temperature za naslednje obdobje nezasedenosti. Ker ne želimo, da referenčna temperatura pretirano oscilira, se sprememba referenčne vrednosti pri vsakem izračunu omeji na 2 °C, skupna sprememba na 5 °C. V sobah, kjer se vnaprej ve, kdaj bodo zasedene (sobi 2 in 5), algoritem najprej izračuna koliko časa pred začetkom naslednje zasedenosti sobe bo potrebno vklopiti hlajenje/gretje, nato pa, podobno, kot prej, izračuna referenčno temperaturo za naslednje obdobje nezasedenosti. V primeru, da pri prejšnjem vklopu hlajenja/gretja dosežemo referenčno temperaturo pred zasedenostjo sobe, algoritem zmanjša čas vklopa pred naslednjo zasedenostjo in nekoliko poveča spremembo referenčne temperature za naslednje obdobje nezasedenosti. Obratno, če pri prejšnjem vklopu

hlajenja/gretja ne dosežemo referenčne temperature v sobi pred začetkom zasedenosti, algoritem poveča čas vklopa hlajenja/gretja pred začetkom naslednje zasedenosti in nekoliko zmanjša spremembo referenčne temperature za naslednje obdobje nezasedenosti. Pri vsakem računskem koraku se, podobno kot prej, omeji sprememba časa vklopa hlajenja/gretja na 30 min in sprememba referenčne temperature na 1 °C, skupna sprememba referenčne temperature pa na 5 °C.

#### 4 Preizkušanje algoritma za določanje referenčnih temperatur na modelu objekta

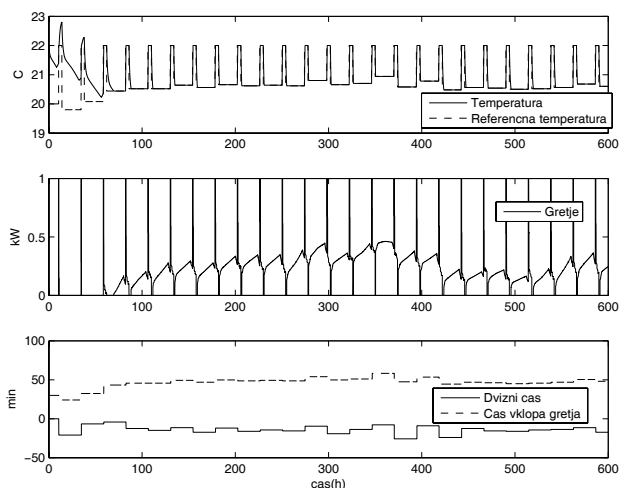
Predstavljen algoritem za določanje referenčnih temperatur prostorov smo simulacijsko preizkusili tako pri hlajenju, kot tudi pri gretju prostorov. Pri tem smo za referenčno temperaturo prostorov, ko je gost v sobi, pri hlajenju izbrali 25 °C in pri gretju 22 °C. Dovoljen dvižni čas temperature po vstopu gosta v sobo smo nastavili na 30 min, začetno spremembo referenčne temperature v obdobju nezasedenosti prostorov na 2 °C in začetni čas vklopa hlajenja/gretja pred zasedenostjo prostorov na 30 min. Rezultati simulacij pri uporabi algoritma določanja referenčnih temperatur pri hlajenju/gretju prostorov so prikazani na slikah od 6 do 11.



Slik 6. Spreminjanje referenčne temperature a pri hlajenju sobe 1.

Algoritem pri hlajenju sobe 1 prilagaja referenčno temperaturo glede na zunanjo

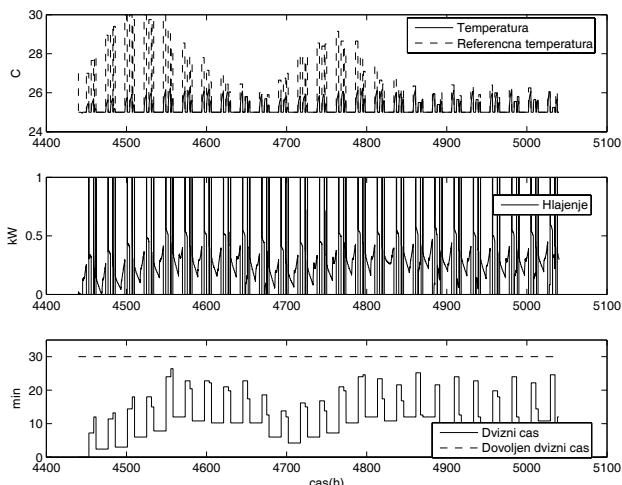
temperaturo zraka. Pri nizkih zunanjih temperaturah so referenčne temperature v sobi večje in pri visokih temperaturah manjše. Moč, ki je potrebna za hlajenje sobe se spreminja med nič in 1 kW. Ta moč je izračunana iz energije, ki je potrebna za hlajenje sobe in ni enaka trenutni moči hlajenja. Dvižni čas temperature po vstopu gosta v sobo je v povprečju okoli 15 min in vedno pod dovoljeno vrednostjo 30 min.



Slik 7. Spreminjanje referenčne temperature a in časa vklopa gretja v sobi 2.

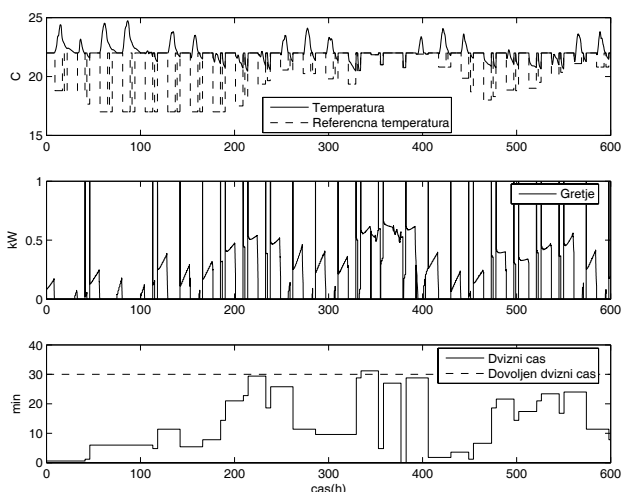
V sobi 2 algoritem spreminja referenčno temperaturo in čas vklopa gretja pred zasedenostjo sobe brez večjih nihanj. Ker leži soba na severni strani objekta, jo je potrebno skoraj ves čas ogrevati. Dvižni čas v sobi je v povprečju okoli -15 min in vedno manjši od 0. To pomeni, da doseže temperatura v sobi referenčno vrednost v povprečju okoli 15 min pred začetkom zasedenosti sobe in vedno pred začetkom zasedenosti sobe.

Pri hlajenju sobe 3 se referenčna temperatura lepo prilagaja termičnim razmeram v objektu. Pri nizkih zunanjih temperaturah se referenčna temperatura v obdobju nezasedenosti precej poveča in zmanjša pri višjih zunanjih temperaturah.



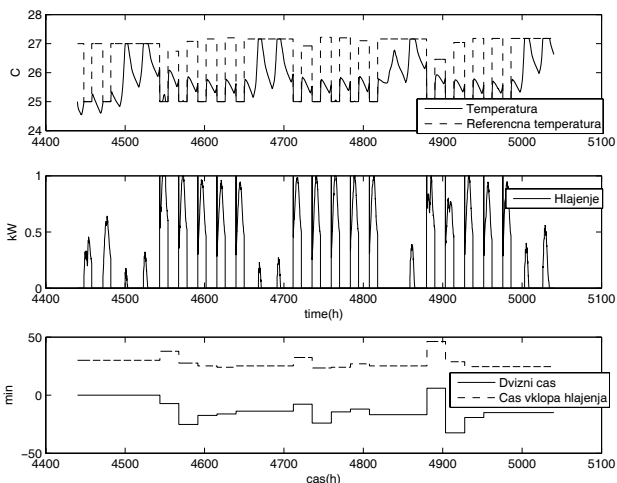
Slik 8. Spreminjanje referenčne temperature a pri hlajenju sobe 3.

Pri ogrevanju sobe 4 se lahko referenčna temperatura v obdobju nezasedenosti sobe precej zniža. Ker leži soba na južni strani objekta, je ni potrebno toliko ogrevati.



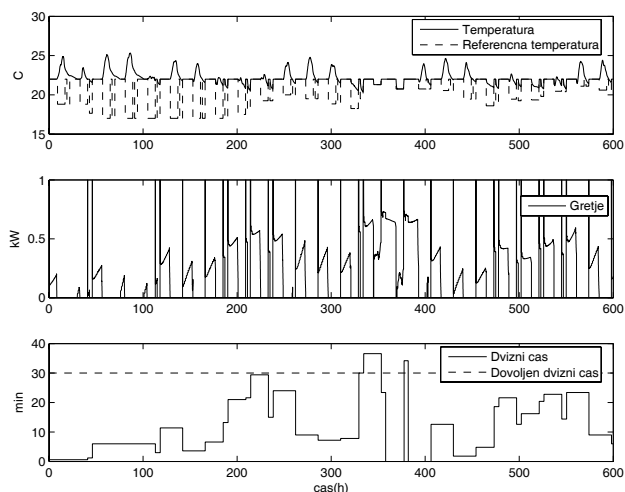
Slik 9. Spreminjanje referenčne temperature a pri gretju sobe 4.

V sobi 5 dobimo dvakrat kršitve časa, do katerega želimo, da temperatura doseže referenčno vrednost (dvizni čas je dvakrat večji nič). To pomeni, da dosežemo referenčno temperaturo v sobi po začetku zasedenosti. V teh situacijah se precej poveča čas vklopa hlajenja pred začetkom zasedenosti sobe, s čimer se kratkoročno preprečijo nadaljnje kršitve začetka zasedenosti.



Slik 10. Spreminjanje referenčne a temperature in časa vklopa hlajenja v sobi 5.

V sobi 6 dobimo eno večjo kršitev dviznega časa temperature. Do te kršitve je prišlo zaradi nenadnega znižanja temperature zunanega zraka. Kot vidimo, se delovanje algoritma prilagaja samo počasnim temperaturnim spremembam.



Slik 11. Spreminjanje referenčne a temperature pri gretju sobe 6.

Delovanje algoritma smo primerjali tudi z rezultati, ki smo jih dobili pri ročno nastavljenih konstantnih vrednostih referenčnih temperatur in časov vklopa hlajenja/gretja. Preizkusili smo različne konstantne vrednosti sprememb referenčne temperature v obdobju nezasedenosti prostorov (0 °C, 1 °C in 2 °C) in različne čase vklopa hlajenja/gretja pred zasedenostjo prostorov (30 min in 15 min).

Primerjava rezultatov delovanja algoritma z rezultati pri ročno nastavljenih konstantnih spremembah referenčnih temperatur in časov vklopa hlajenja/gretja je podana v Tabeli 1. Primerjavo smo ovrednotili glede na porabo energije za hlajenje/gretje, glede na kršitve dovoljenega dvižnega časa temperature in glede na kršitve časa začetka zasedenosti sobe.

Tabel 1. Primerjava rezultatov pri uporabi algoritma in pri ročno nastavljenih spremembah referenčnih temperatur in časa vklopa hlajenja/gretja.

	Predlagan algoritem	$\Delta T_{ref}=0^{\circ}\text{C}$ , $t_v=30\text{min}$	$\Delta T_{ref}=1^{\circ}\text{C}$ , $t_v=30\text{min}$	$\Delta T_{ref}=2^{\circ}\text{C}$ , $t_v=15\text{min}$
Poraba energije (kWh)	1465(-17%)	1761	1496(-15%)	1375(-22%)
Kršitve dvižnega časa (min)	51	0	8.4	1126
Kršitve začetka zasedenosti (min)	55	0	1.2	716

Vidimo, da s predlaganim algoritmom dosežemo za okoli 17 % manjšo porabo energije za hlajenje/gretje, kot v primeru, če referenčnih temperatur v sobah v obdobju nezasedenosti ne spreminjamo. V primeru, da referenčno temperaturo v obdobju nezasedenosti prostorov spremenimo za 1 °C in vklopimo hlajenje/gretje prostorov 30 min pred začetkom zasedenosti, dobimo podobne rezultate, kot pri predlaganem algoritmu. Pri spremembi referenčne temperature za 2 °C in vklopu začetka hlajenja/gretja 15 min pred začetkom zasedenosti pa sicer dosežemo za okoli 5 % manjšo porabo energije za hlajenje/gretje v primerjavi s predlaganim algoritmom, vendar dobimo pri tem prevelike kršitve dvižnega časa in časa začetka zasedenosti.

Ugotovimo, da lahko za krajše obdobje z ročno nastavljenimi spremembami referenčnih temperatura in časi vklopa hlajenja/gretja dosežemo podobne rezultate, kot s predlaganim algoritmom, vendar je te vrednosti v praksi težko nastaviti, saj se s časom spreminjajo. S predlaganim algoritmom pa se referenčne temperature in časi vklopa hlajenja/gretja ves čas samodejno nastavljajo na optimalne vrednosti.

## 5 Zaključek

V prispevku smo predstavili algoritem za določanje referenčnih temperatur prostorov. Algoritem deluje tako, da spreminja referenčne temperature prostorov v obdobju nezasedenosti in čase vklopa hlajenja/gretja pred zasedenostjo prostorov. Algoritem smo simulacijsko preizkusili v programskem paketu TRNSYS na modelu objekta, ki vsebuje šest termično skoplenih sob z različno zasedenostjo. Simulacije smo opravili tako za hlajenje, kot tudi za gretje prostorov. Delovanje algoritma smo primerjali z rezultati, kjer sta bila sprememba referenčne temperature in čas vklopa hlajenja/gretja konstantna. Primerjavo smo ovrednotili glede na porabo energije za hlajenje/gretje ter glede na kršitve dvižnih časov temperature in časov začetkov zasedenosti sob. Ugotovili smo, da je prednost predlaganega algoritma predvsem v tem, da se spremembe referenčnih temperatur v obdobju nezasedenosti samodejno nastavljajo na optimalne vrednosti, za razliko od ročnega nastavljanja, ki ga je v praksi praktično nemogoče optimalno izvajati.

## 6 Zahvala

Zahvaljujemo se Agenciji za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije za finančno podporo.

## 7 Literatura

- [1] *TRNSYS Documentation*. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison, Madison, USA, 2004.
- [2] K. Spasokukotskiy, H.R. Trankler: *Efficiency Estimation for Demand-Driven Climate Control in Buildings*, <http://smarthome.unibw-muenchen.de>.
- [3] M. Žele in S. Strmčnik. *Analysis and optimization of room temperature control strategies*, (IJS delovno poročilo, 9304), 2005.
- [4] S. Muhič in V. Butala. *Študijski model hotela: končno poročilo*. Fakulteta za strojništvo Univerze v Ljubljani, 2006.