

# **Algoritem za optimalno izbiro sistemov gretja in hlajenja v prostorih stavb**

**Darko Vrečko<sup>1</sup>, Satja Lumbar<sup>2</sup>, Narcis Vodopivec<sup>3</sup>**

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

<sup>2</sup>Entia d.o.o., Tržaška 2, Ljubljana

<sup>3</sup>GOAP d.o.o. Nova Gorica, Ulica Klementa Juga 7, Solkan

darko.vrecko@ijs.si, satja.lumbar@entia.si, n.vodopivec@goap.si

## *An algorithm for the optimal selection of heating and cooling systems in buildings*

Nowadays, several systems that provide heating, cooling and ventilation are usually used in buildings. Such systems can be radiators, convectors, floor, ceiling or wall heating and cooling. Each of these systems is typically an independent unit with its own control. Those systems can provide expected parameters of comfort in the rooms, whereas the decision on when to use one of them is usually left to the user. Efficient use of energy in buildings also requires proper supervisory control of these systems. In this paper we proposed an algorithm which task is to select the optimum heating or cooling system under the given circumstances and to switch these systems on or off in the appropriate time in order to ensure adequate ambient conditions in rooms at the lowest energy consumption. The proposed algorithm takes into account forecast occupancy of rooms and outdoor temperatures for a period of a day. The algorithm was tested on a simulation model of a room in the Matlab/Simulink environment. Operation of the algorithm was evaluated with the estimated costs spent for heating and cooling of the room.

## *Kratek pregled prispevka*

V današnjem času je v stavbah običajno vgrajenih več različnih sistemov, ki zagotavljajo gretje, hlajenje in prezračevanje prostorov. Takšni sistemi so lahko radiatorski, konvektorski, talno, stropno ali stensko ogrevanje in hlajenje. Vsak od omenjenih sistemov je običajno samostojna enota z lastnim vodenjem. Sistemi gretja in hlajenja sicer lahko zagotavljajo pričakovane parametre ugodja v prostoru, odločitev o tem, kdaj se bo kateri od njih uporabljal pa je običajno prepuščena uporabniku. Učinkovita raba energije v stavbah zahteva tudi pravilno nadzorno vodenje teh sistemov. V prispevku predstavljamo algoritem katerega naloga je, da v danih okoliščinah izbere optimalni sistem gretja ali hlajenja ter ga v ustreznem trenutku vklopi ali izklopi in s tem zagotovi ustrezne ambientalne razmere v prostorih ob najmanjši porabi energije. Predlagani algoritem upošteva napovedi zasedenosti prostorov in zunanje temperature za obdobje enega dneva. Algoritem smo simulacijsko preizkusili na modelu prostora v Matlab/Simulink okolju. Delovanje algoritma smo ovrednotili s stroški za ogrevanje in hlajenje prostora.

## 1 Uvod

Raba energije za ogrevanje prostorov predstavlja največji delež v celotni rabi energije gospodinjstev. Po podatkih Statističnega Urada Republike Sloveni za leto 2011 je bilo v Sloveniji za ogrevanje prostorov porabljenih 62 % celotne energije porabljene v slovenskih gospodinjstvih [1]. Nekaj toplote lahko pride od ljudi, ki se nahajajo v prostorih, električnih naprav (razsvetljava, pečica, ...) in s sončno energijo, večino pa se pridobi iz namenskih grelnih sistemov. Pogoj za ekonomično ter učinkovito ogrevanje zgradb leži predvsem v pravilni izbiri ustreznega ogrevalnega sistema. Pomembno vlogo pri odločitvi, kateri sistem ogrevanja je najprimernejši za določeno stavbo, igra tudi cenovno razmerje med energenti na trgu ter pa strošek obratovanja in vzdrževanja ogrevalnega sistema.

Trenutno stanje v stavbah zajema različne sisteme centralnega ali daljinskega ogrevanja za pokrivanje toplotnih izgub, ki so lahko radiatorski, konvektorski, talno, stropno ali stensko ogrevanje. V take sisteme so lahko vključene še toplotne črpalke v različnih kombinacijah (voda, zrak, zemeljski kolektorji, vrtine). Toplotne črpalke so lahko tudi del hladilnega sistema. Za prezračevanje se uporabljajo klimati, v manjših objektih pa prezračevalni rekuperatorski sistemi. Vsak od omenjenih sistemov je običajno samostojna enota z lastnim vodenjem. Sistemi gretja in hlajenja lahko zagotavljajo pričakovane parametre ugodja v prostoru, odločitev o tem, kdaj se bo kateri od njih uporabljal pa je običajno prepuščena uporabniku. Učinkovita raba energije v stavbah pa zahteva pravilno nadzorno vodenje teh sistemov.

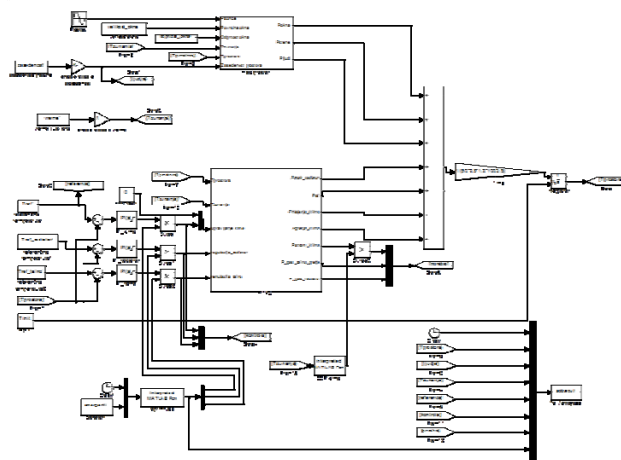
V prispevku bomo predstavili algoritem, ki v stavbi z več ogrevalnimi sistemi, enkrat na dan izbere za ogrevanje določen sistem ter ga v ustreznem trenutku vklopi ali izklopi in s tem zagotovi ustrezne ambientalne razmere v prostorih ob najmanjši porabi energije. Pri tem, poleg značilnosti prostora, algoritem upošteva

tudi napoved temperature in pa napoved zasedenosti prostora za naslednji dan. Algoritem lahko nadomešča operaterjevo izbiro oziroma svetuje pri vsakodnevni izbiri optimalnega energetskega sistema za naslednji dan. Glavni kriterij pri izbiri teh sistemov so ocenjeni stroški gretja oziroma ocenjena količina porabljene energije za gretje.

V prispevku bomo najprej predstavili simulacijski model prostora, ki nam je služil za preizkušanje algoritma. V nadaljevanju bomo opisali algoritem za izbiro optimalnega sistema gretja. Nato bomo prikazali simulacijske rezultate različnih načinov gretja. Prispevek bomo zaključili z najpomembnejšimi ugotovitvami.

## 2 Simulacijski model prostora stavbe

Slika 1 prikazuje simulacijsko shemo modela prostora stavbe v Matlab/Simulink okolju.



Slika 1. Simulacijska shema modela prostora.

V simulacijsko shemo so vključeni [2]:

- model ogrevanja in hlajenja prostora (stene, okno z žaluzijo, model zunanje temperature in model zasedenosti prostora),
- model sistemov gretja in hlajenja (radiatorsko ogrevanje, ogrevanje s talnim gretjem, toplovodni kotel za dobavo tople vode, mešalni ventili za zagotavljanje temperature vode za talno gretje, konvektorska klima s funkcijama hlajenja in

gretja ter regulatorji sistemov gretja in hlajenja),

- algoritem za optimalno izbiro sistemov gretja in hlajenja.

V modelu so zunanje in notranje stene, strop in tla prostora sestavljene iz različnih slojev. Vsak sloj predstavlja izolacijo, ki omejuje prehod toplote iz notranjosti, hkrati pa tudi zalogovnik toplote [3]. Prostor je dolg 10 m, širok 5 m in visok 2.5 m. Površina tal in stropa znaša  $50 \text{ m}^2$ , površina zidov pa  $75 \text{ m}^2$ . Predpostavljeno je, da se prostor nahaja med dvema etažama približno enake temperature. Izgube skozi tla in strop smo pri tem zanemarili. Toplotna prevodnost zunanjih zidov v modelu je okoli  $0.19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Toplotni tok, ki prehaja skozi okna se modelira kot vsota sončnega sevanja, ki prehaja skozi steklo ter prenosa toplote zaradi temperaturne razlike na vsaki strani okna. Toplotna prevodnost okna v modelu je  $0.7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Površina okna je enaka  $7 \text{ m}^2$ , z odprtostjo žaluzij pa je mogoče kontrolirati toplotno prevodno površino okna.

V modelu smo za zunanjo temperaturo uporabili podatke za Ljubljano iz leta 2010. Predpostavili smo, da gre za poslovni prostor, v katerem dela ena oseba vsak delovnik od 8 do 16 ure, med vikendom pa je prazen. Prisotnost oseb v prostoru prispeva k segrevanju zraka preko konvekcije in radiacije. V našem primeru smo predpostavili, da je toplotni tok oseb konstanten in enak  $160 \text{ W}$  na osebo.

Modeliran je tudi toplovodni kotel prostornine  $1000 \text{ L}$ , ki se segreva s plinskim grelcem z nazivno močjo  $2500 \text{ W}$ . Voda v kotlu se začne segrevati, če njena temperatura pade pod  $65^\circ\text{C}$  in se neha segrevati, ko njena temperatura preseže  $70^\circ\text{C}$ . Iz kotla teče voda skozi dva ločena tokokroga. Prvi pri višji temperaturi,  $55\text{--}62^\circ\text{C}$ , napaja radiator, drugi pri temperaturi okoli  $35^\circ\text{C}$  pa je uporabljen v talnem gretju. V mešalnih ventilih se meša voda iz kotla s povratnim tokom iz talnega gretja in iz radiatorja.

V modelu radiatorja smo upoštevali samo proces konvekcije. Toplota, ki prehaja iz

radiatorja v zrak je odvisna od toplotne prevodnosti radiatorja, površine radiatorja in razlike med temperaturo radiatorja in temperaturo zraka v prostoru. Radiator je dimenzioniran tako, da oddaja največ  $2000 \text{ W}$  toplotnega toka.

Model talnega gretja je sestavljen iz treh elementov. Prvi element predstavlja cevi talnega gretja in je modeliran kot prej opisani radiator. Drugi element je sloj tal iz cementa neposredno nad cevmi. Tretji element pa predstavlja sloj parketa. Toplota tako prehaja s cevi talnega gretja v tla in nato preko parketa v zrak.

Ventila za radiator in talno gretje omogočata pretok tople vode v radiator in/ali talno gretje. Ventila se regulirata s PI regulatorjem.

Za model klime je bil uporabljen empirični model na osnovi statičnih karakteristik. Uporabljena je bila zvezna električna klima, ki omogoča gretje in hlajenje in ki je regulirana s PI regulatorjem.

Parametri PI regulatorjev ventilov in električne klime so bili nastavljeni na osnovi MOMI metode [4].

### 3 Opis algoritma

Algoritem za izbiro optimalnega sistema ogrevanja deluje tako, da izračuna količino energije, ki bo pri dani napovedi zunanje temperature in zasedenosti prostora potrebna za vzdrževanje želene temperature v prostoru. Na podlagi te energije se potem izračuna, kateri sistem bo ekonomsko najučinkovitejši, pri čemer se upošteva ceno uporabljenega energenta in pa izgube značilne za uporabljen sistem.

Vhodi v algoritem so:

- nabor sistemov za ogrevanje stavb (npr. radiator, konvektor, talno gretje, električni grelnik, toplovodni kotel, klimatska naprava, toplotna črpalka,...),
- uporabljen energent za vsak sistem ogrevanja (elektrika, plin, olje,...),

- izkoristek sistema gretja glede na zunanjo temperaturo,
- parametri prostora,
- površina prostora ( $A$ ),
- toplotna prevodnost prostora ( $k$ ),
- napoved zunanje temperature za prihodnji dan ( $T_{zun}$ ),
- napoved zasedenosti prostora za prihodnji dan ( $z$ ),
- trenutne cene energentov na trgu.

V algoritmu smo predpostavili, da sta podatka o zunanji temperaturi in zasedenosti prostora za prihodnji dan znana. V realnosti se lahko za napoved zunanje temperature uporabijo podatki agencije za okolje, napoved zasedenosti prostora pa se lahko izračuna na osnovi zgodovine zasedenosti prostora [5]. Referenčna temperatura se preračuna iz napovedi zasedenosti prostora. Predpostavili smo, ko je prostor nezaseden ( $z=0$ ) je referenčna temperatura v prostoru  $18^{\circ}\text{C}$ , ko pa so v prostoru ljudje ( $z=1$ ), je referenčna temperatura enaka  $22^{\circ}\text{C}$ .

Energijo, ki bo potrebna za vzdrževanje temperature v prostoru izračunamo z upoštevanjem toplotnega toka, ki prehaja iz prostora v okolico:

$$P_i = k \cdot A \cdot (T_{zun} - T_{ref}) - n \cdot P_{osebe} \quad (1)$$

Pri tem je  $k$  povprečna toplotna prevodnost prostora [ $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$ ],  $A$  površina prostora [ $\text{m}^2$ ],  $T_{ref}$  referenčna temperatura v prostoru [ $\text{K}$ ],  $n$  število oseb v prostoru,  $P_{osebe}$  toplotni tok, ki ga povzroči prisotnost človeka v prostoru ( $160 \text{ W}$ ) in  $i$  je indeks časa v urah  $i = [1, 2, \dots, 24]$ .

Energijo, ki bo potrebna za vzdrževanje referenčne temperature v prostoru za en dan (24 ur) lahko izračunamo na naslednji način:

$$Q = \sum_{i=1}^{24} (P_i \cdot \Delta t) \quad (2)$$

Pri tem je  $\Delta t$  računski korak, ki je bil v našem primeru enak 1 uri.

Za vsak uporabljen sistem ogrevanja izračunamo, koliko energije bomo dejansko porabili upoštevajoč karakteristiko izkoristka sistema ( $\mu$ ):

$$Q_j = \frac{Q}{\mu_j} \quad (3)$$

Indeks  $j$  je indeks uporabljenega sistema za ogrevanje. V našem primeru je bil indeks klime 1, radiatorja 2 in talnega gretja 3. Kot je znano, izkoristek sistema pada s časom, kjer je velikosti padanja odvisna od karakteristike sistema in pa kvalitete vzdrževanja sistema. Tega v algoritmu nismo upoštevali, lahko pa to predstavlja osnovo pri nadaljnji izboljšavi algoritma.

Energijo (3) smo pomnožili še s trenutno ceno uporabljenega energenta, da smo dobili dejanski strošek sistema ogrevanja:

$$C_j = Q_j \cdot C_{e,j} \quad (4)$$

pri čemer je  $e$  indeks uporabljenega energenta,  $j$  pa indeks uporabljenega sistema ogrevanja. Za energent za talno ogrevanje in ogrevanje z radiatorjem smo uporabili kurilno olje, klimo pa smo napajali z električno toplotno črpalko. Cena energenta toplotne črpalke smo nastavili na  $0.03 \text{ €/kWh}$ , ceno plina pa na  $0.1023 \text{ €/kWh}$ . Upoštevali smo, da je cena uporabljenega energenta konstantna, čeprav vemo, da lahko cene energentov v resnici močno nihajo tudi v kratkih časovnih obdobjih. Trenutne cene energentov bi bilo možno v realnem času prebirati iz javno dostopnih baz cen, ki so dostopne na spletu in tako še dodatno izboljšati algoritem za optimalno izbiranje sistema ogrevanja v stavbi.

Izhod algoritma je vektor vrednosti  $C_j$  za posamezne sisteme ogrevanja. Avtomatski algoritem (ali pa upravnik stavbe) lahko na podlagi tega rezultata vsak dan vklopi sistem za ogrevanje, ki bo ekonomsko najugodnejši.

Algoritem je bil zaenkrat preizkušen samo s sistemi za ogrevanje prostora, ne pa tudi s sistemi za hlajenje prostora, za katere prav tako veljajo zgornji izračuni. Razširitev algoritma na

sisteme za hlajenje tako predstavlja možnost za nadaljnje izboljšanje algoritma.

Pomemben parameter v opisanem algoritmu predstavlja podatek koliko časa pred zasedenostjo prostor je potrebno vklopiti sistem gretja, da bo temperatura v prostoru dosegla želeno vrednost še pred zasedenostjo prostora. S simulacijskimi poizkusi smo za naš prostor ugotovili koliko časa potrebujejo sistemi gretja za spremembo notranje temperature iz 18°C na 22°C. Pri ogrevanju s talnim gretjem so ti časi najdaljši, pri ogrevanju z radiatorji nekoliko krajši medtem, ko so pri ogrevanju s klimo najkrajši. Tabela 1 prikazuje najdaljše čase iz simulacijskih poizkusov, torej čase ki zagotavljajo, da bo temperatura v prostoru vedno pravočasno dosegla želeno vrednost.

Tabela 1. Najdaljši časi ogrevanja prostora za posamezne sisteme ogrevanja.

	Talno gretje	Radiator	Klima
Čas	6 h	2 h	0.25 h

S vklopom sistemov pred dejansko spremembo referenčne temperature smo zagotovili, da se želeno temperatura v prostoru doseže še preden je prostor dejansko zaseden. Tako smo talno gretje vklopili 6 ur pred zasedenostjo prostora, radiator 2 uri pred, pri ogrevanju s klimo pa predčasnega vklopa nismo uporabili, saj je čas od vklopa sistema do dosega želene temperature v prostoru zelo kratek.

V simulacijah smo za vklop sistema vedno uporabili najdaljši čas, ki nam v vsakem primeru zagotovi, da bo ob zasedenosti prostora dosežena referenčna temperatura, čeprav bi lahko bili ti časi v nekaterih primerih krajši, kar bi vplivalo na ceno uporabe sistema. Vklop sistema smo izvedli s stopničasto spremembo referenčne temperature v prostoru. V prihodnje bi bilo smiselno upoštevati spremembo referenčne temperature npr. po linearno naraščajoči funkciji, čase vklopa pa bi bilo potrebno sproti računati v odvisnosti od napovedi zunanje temperature. Poleg tega bi

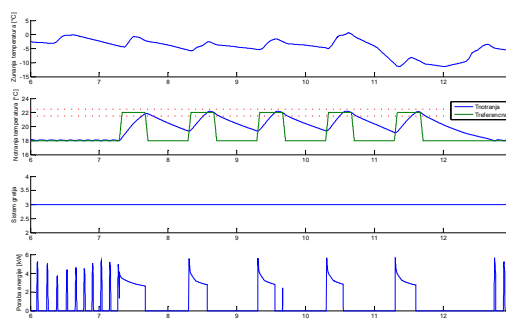
bilo smiselno določiti tudi čase izklopa sistema pred nezasedenosti prostora, ko bi že bilo možno izklopiti posamezen sistem ogrevanja, brez da bi temperatura v prostoru do trenutka nezasedenosti padla pod želeno vrednost.

#### 4 Simulacijski rezultati

V prispevku bomo pokazali simulacijske rezultate naslednjih načinov ogrevanja:

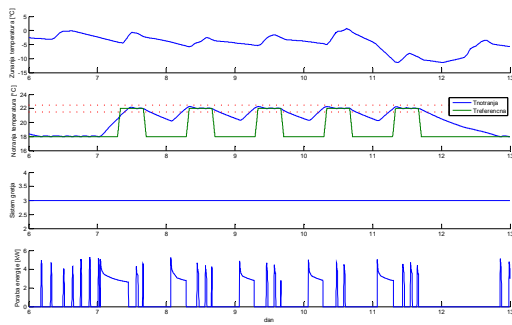
- ogrevanje samo s talnim gretjem,
- ogrevanje samo z radiatorjem,
- ogrevanje samo s klimo,
- ogrevanje prostora z uporabo algoritma za izbiro optimalnega sistema gretja.

Sliki 2 in 3 prikazujeta rezultate simulacije za sedem dni, ko smo za ogrevanje uporabili samo talno gretje. Slika 2 prikazuje rezultate brez vnaprejšnjega vklopa sistema. Vidimo, da brez vnaprejšnjega vklopa prepočasi dosegamo želeno temperaturo.



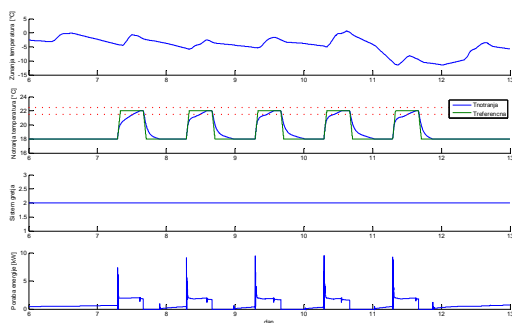
Slika 2. Rezultati talnega gretja brez vnaprejšnjega vklopa. Od zgoraj navzdol: zunanja temperatura, notranja temperatura in referenčna vrednost, indeks sistema gretja, poraba energije talnega gretja.

Slika 3 prikazujeta rezultate, ko smo talno gretje vklopili 6 ur pred dejansko spremembo referenčne temperature. Opazimo lahko bistveno izboljšanje sledenja referenci glede na primer, ko nismo uporabili vnaprejšnjega vklopa. Zavedati pa se moramo, da smo z vnaprejšnjim vklopom talnega gretja povečali stroške gretja.



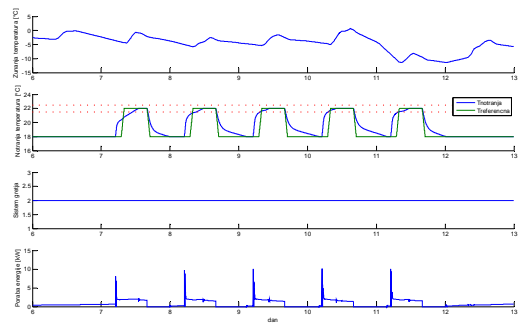
Slika 3. Rezultati talnega gretja z vnaprejšnjim vklopom. Od zgoraj navzdol: zunanja temperatura, notranja temperatura in njena referenčna vrednost, indeks sistema gretja, poraba energije sistema gretja.

Sliki 4 in 5 prikazujeta rezultate simulacije za sedem dni, ko smo za ogrevanje uporabljali samo radiator. Slika 4 prikazuje rezultate brez vnaprejšnjega vklopa radiatorja. Vidimo, da v tem primeru tudi prepočasi dosegamo referenčno temperaturo, kar zopet kaže na to, da je za ta sistem potreben vnaprejšnji vklop.



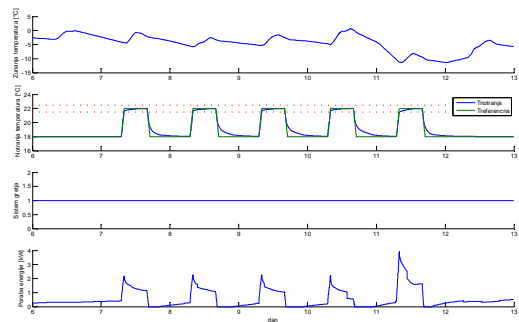
Slika 4. Rezultati radiatorskega gretja brez vnaprejšnjega vklopa. Od zgoraj navzdol: zunanja temperatura, notranja temperatura in referenčna vrednost, indeks sistema gretja, poraba energije talnega gretja.

Slika 5 prikazuje rezultate simulacije pri 2 urnem vnaprejšnjem vklopu radiatorja pred zasedenostjo prostora. Opazimo lahko izboljšanje sledenja referenci glede na primer, ko nismo uporabili vnaprejšnjega vklopa. Slika 6 prikazuje rezultate simulacije za sedem dni, ko smo za ogrevanje uporabili klimo brez vnaprejšnjega vklopa.



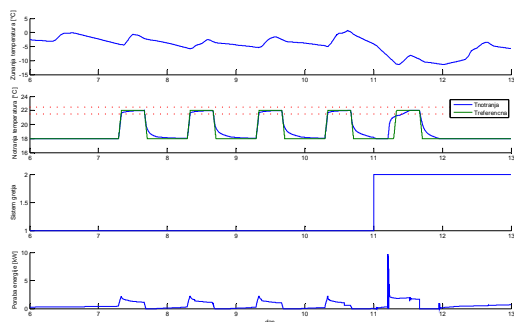
Slika 5. Rezultati radiatorskega gretja z vnaprejšnjim vklopom. Od zgoraj navzdol: zunanja temperatura, notranja temperatura in referenčna vrednost, indeks sistema gretja, poraba energije talnega gretja.

Vidimo, da v primeru ogrevanja s klimo vnaprejšnji vklop sistema ni potreben, saj dovolj hitro dosežemo referenčno temperaturo. Slika 7 prikazuje rezultate simulacij za sedem dni v primeru, ko smo uporabili algoritem za optimalno izbiro sistema ogrevanja v stavbi.



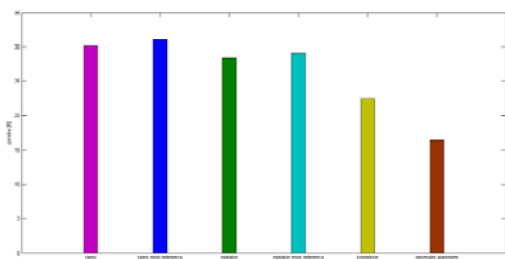
Slika 6. Rezultati gretja s klimo. Od zgoraj navzdol: zunanja temperatura, notranja temperatura in referenčna vrednost, indeks sistema gretja, poraba energije talnega gretja.

Tretji graf od zgoraj navzdol kaže, kateri sistem je bil izbran za ogrevanje prostora. Vidimo, da je bilo v našem primeru največkrat uporabljeno ogrevanje s klimo, nekajkrat pa radiatorsko gretje. Omeniti je potrebno, da bi v primeru izbire drugih sistemov in drugih energentov bili rezultati drugačni - algoritem je univerzalen za vse sisteme ogrevanja in za vse energente na trgu.



Slika 7. Rezultati algoritma za optimalno izbiro sistema gretja. Od zgoraj navzdol: zunanja temperatura, notranja temperatura in referenčna vrednost, indeks sistema gretja, poraba energije talnega gretja.

Različne načine ogrevanja smo ovrednotili s stroški za ogrevanje za tri zimske mesece. Primerjavo stroškov prikazuje Slika 8.



Slika 8. Stroški za različne načine ogrevanja za obdobje treh mesecev. Od leve proti desni: talno gretje (z in brez vnaprejšnjega vklopa), radiator (z in brez vnaprejšnjega vklopa), klima, algoritem.

Vidimo, da lahko z uporabo predlaganega algoritma občutno znižamo stroške ogrevanja prostorov. Poleg tega se kaže, da so razlike med stroški ogrevanja brez in z vnaprejšnjim vklopom sistemov relativno majhne. Stroški pri uporabi klime so v našem primeru manjši kot pri talnem gretju in radiatorju, kar je smiselno, saj se je klima edina napajala iz toplotne črpalke, ki je ekonomsko bolj ugodna kot toplovodni kotel. Toplotna črpalka pa ni primerna za uporabo pri zelo nizkih zunanjih temperaturah, zato je v teh primerih bolj smiselno uporabiti talno gretje ali ogrevanje z radiatorjem.

## 5 Zaključek

Razvit je bil algoritem, ki glede na napoved zunanje temperature in zasedenosti prostora, vsak dan izbere za ogrevanje prostora tisti sistem, ki je ekonomsko najugodnejši. Algoritem najprej izračuna energijo, ki bo naslednji dan potrebna za ogrevanje prostora, nato pa v odvisnosti od karakteristike sistemov in pa cene uporabljenih energentov izbere tisti vir, katerega delovanje je najcenejše.

Algoritem bi bilo še možno na več načinov izboljšati. V prvi fazi bi bilo smiselno čase vklopa sistemov gretja sproti računati v odvisnosti od napovedi zunanje temperature. Poleg tega bi bilo smiselno oceno referenčne temperature prostora po vklopu sistema gretja izboljšati npr. z uporabo linearno naraščajoče funkcije. Algoritem je potrebno v prihodnje razširiti tudi na sisteme za hlajenje.

## 6 Zahvala

Delo je bilo izvedeno v okviru Kompetenčnega centra za sodobne tehnologije vodenja. Center delno financirata Republika Slovenija, Ministrstvo za visoko šolstvo, znanost in tehnologijo ter Evropska unija (EU) - Evropski sklad za regionalni razvoj v okviru Operativnega programa krepitve regionalnih razvojnih potencialov za obdobje 2007 - 2013.

## 7 Literatura

- [1] Poraba energije in goriv v gospodinjstvih, Slovenija, 2011, Poročilo statističnega urada republike Slovenije, 2011, [http://www.stat.si/novica\\_prikazi.aspx?id=5027](http://www.stat.si/novica_prikazi.aspx?id=5027).
- [2] Vodopivec N., Kandare G., Vrečko D., Skušek A., Pušič A., Anžin M., Klopčič M., Rahne L. (2012). Poročilo KC-STV o razvoju podsistemov RRP4.1-D02.
- [3] U-Wert-Berechnung und Bauteilenkatalog, BFE, Švica, 2002.
- [4] Vrančič D., Peng Y., Strmčnik S. (1999). A new PID controller tuning method based on multiple integrations. Control Eng. Pract., 7, 623-633.
- [5] Anžin M., Rahne L., Sakelšek S. (2013). Poročilo o preizkusih sistema za kontrolo pristopa RRP4.1-D05.