

PAMETNO VODENJE SISTEMOV V STAVBAH S STROJNIM UČENJEM IN VEČKRITERIJSKO OPTIMIZACIJO

Rok Piltaver, Tea Tušar, Aleš Tavčar, Nejc Ambrožič, Tomaž Šef, Matjaž Gams, Bogdan Filipič

Institut "Jožef Stefan", Odsek za inteligentne sisteme

Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, Slovenija

e-mail: {rok.piltaver, tea.tusar, ales.tavcar, tomaz.sef, matjaz.gams, bogdan.filipic}@ijs.si

ABSTRACT

Prispevek opisuje programsko opremo za pametno in celovito vodenje sistemov v stavbi, kot so ogrevanje, prezračevanje, senčenje, razsvetljava in upravljanje z viri energije. Cilj je zagotoviti čim nižje stroške in hkrati čim višje udobje za stanovalce. Sistem pametne stavbe pridobi podatke s senzorjev, nameščenih v stavbi, in se iz njih nauči navad in akcij uporabnikov v preteklem obdobju. V drugem koraku uporabi večkriterijsko optimizacijo, ki na podlagi simulacij išče najboljše nastavitve parametrov za vodenje sistemov v stavbi. Uporabniku se najboljše nastavitve parametrov prikažejo v oblik urnikov. Za vsak urnik sta dana dva podatka, udobje in cena, na podlagi katerih uporabnik izbere najprimernejši urnik in s tem na preprost način nastavi parametre za avtomatizacijo sistemov v stavbi, ki zagotovijo želeni kompromis med udobjem in stroški.

1 UVOD

Bivalni objekti v Evropi so leta 2004 porabili 37% vse porabljene energije [3], v Združenih državah Amerike pa je bil v letu 2010 ta delež kar 41% [2]. Iskanje strategij za zmanjšanje porabe energije je torej ena izmed ključnih nalog sodobne družbe in tema številnih raziskav, ki se ukvarjajo z razvojem učinkovitih metod vodenja naprav, ki porabijo veliko energije. Sistemi za ogrevanje, hlajenje in prezračevanje prostorov npr. porabijo 50% vse energije, ki jo stanovanjske hiše potrebujejo za obratovanje [3]. Dobre strategije morajo ustrezno obravnavati nasprotujoče si zahteve uporabnikov, kot sta npr. sočasno doseganje energetske varčnosti in visoke stopnje ugodja.

Zmanjševanje stroškov shranjevanja in obdelave podatkov, dostopnost senzorjev in aktuatorjev ter enostavno povezovanje različnih naprav v skupen sistem omogočajo uporabo kompleksnih metod vodenja tudi v manjših bivalnih enotah. Obstoječi sistemi pametnih hiš sicer omogočajo avtomatizacijo delovanja sistemov v stavbah po vnaprej nastavljenih urnikih, preklapljanje med načini delovanja glede na zaznano prisotnost uporabnikov ali na zahtevo uporabnika preko spletnega vmesnika. Vendar večini uporabnikov ne uspe nastaviti primerne urnika za avtomatizacijo, saj morajo pri tem nastaviti veliko pogosto nerazumljivih parametrov in upoštevati nenehne spremembe svojih potreb in zunanjih vplivov, kot so vreme in cene energentov. Poleg tega take rešitve ne izrabijo celotnega

potenciala, ki jih sistemi hišne avtomatizacije omogočajo. Zato v [4] predlagajo uporabo tehnik strojnega učenja za prepoznavanje navad uporabnikov in gradnjo napovednih modelov njihovega obnašanja ter uporabo večkriterijske optimizacije za zagotavljanje ustreznega upravljanju inteligentnega doma, ki zadovoljuje nasprotujoče si kriterije.

Pričujoči prispevek v 2. razdelku opisuje delovanje sistema OpUS, ki implementira predlagane rešitve za pametno vodenje sistemov v stavbah na podlagi učenja in večkriterijske optimizacije. Rezultati delovanja sistema OpUS so predstavljeni na primeru uporabe v 3. razdelku. Prispevek se zaključuje z razpravo v 4. razdelku.

2 SISTEM OPUS

Programska oprema sistema OpUS, prikazana na sliki 1, je razdeljena v štiri sklope: beli kvadrati predstavljajo vhodno/izhodne module, modra kvadrata ustrezata moduloma za učenje, zelena modulu za optimizacijo in oranžna moduloma za simulacijo. Številke predstavljajo zaporedje toka podatkov skozi sistem od vhodnih senzorskih podatkov (1) do parametrov za avtomatizacijo sistemov v stavbi (10). Vsebina podatkovnih tokov in delovanje posameznih modulov sta opisana v nadaljevanju.

2.1 Pridobivanje senzorskih podatkov

Obstoječi sistemi za hišno avtomatizacijo ponujajo široko paleto senzorjev: od senzorjev gibanja, temperature, vlažnosti in kakovosti zraka, osvetljenosti, pretoka vode in porabe električne energije do pametnih stikal in podatkov o delovanju posameznih naprav. Poleg tega omogočajo tudi zbiranje, shranjevanje in posredovanje senzorskih podatkov zunanjim sistemom (slika 1, točka 1). Sistem OpUS uporablja modul za pridobivanje senzorskih podatkov, ki mora biti prilagojen protokolu komunikacij in formatu podatkov, ki ga podpira sistem hišne avtomatizacije – to omogoča prilagoditev sistema OpUS različnim sistemom hišne avtomatizacije. Pridobljeni senzorski podatki se pretvorijo v poenoteno obliko, ki ob vsaki spremembi shrani čas, tip senzorja (določa mersko enoto, natančnost in frekvenco meritev ipd.) in identifikacijo senzorja (določa lokacijo senzorja in povezavo z zabeleženimi preteklimi vrednostmi) ter novo vrednost. Poenoteni podatki se shranijo v podatkovno bazo za kasnejše analize in prikaz uporabniku ter se na zahtevo posredujejo moduloma za učenje (slika 1, točka 2).

2.2 Modula za učenje

Pretekle raziskave so pokazale, da lahko z uporabo podatkov o prisotnosti uporabnikov in njihovih akcijah napovemo prisotnost ali odsotnost uporabnikov ter njihove navade z relativno visoko točnostjo [1]. Na tej osnovi sta bila razvita modula za učenje navad in akcij, opisana v nadaljevanju.

Modul za učenje navad periodično zahteva časovno okno podatkov, iz katerih prepozna prisotnost in odsotnost uporabnikov ter njihove aktivnosti: spanje, pripravo obroka in prehranjevanje, uporabo kopalnice ipd. Prisotnost uporabnika v določenem prostoru prepozna neposredno iz podatkov o uporabi stikal v prostoru in zaznavah senzorjev gibanja, ostale aktivnosti pa s pomočjo zlivanja senzorskih podatkov in uporabo konteksta: čas, prostor in predhodne aktivnosti. Npr. prižgana luč v kopalnici in 7 minut pretoka tople vode sovpadata z aktivnostjo uporabe kopalnice; ugasnjene ali zatemnjene luči, odsotnost gibanja ter drugih akcij uporabnikov ob podatku, da oseba ni zapustila stavbe ter da je ura 4 zjutraj, sovpadajo z aktivnostjo spanje. Prepoznavanje aktivnosti je pomembno, ker določa okoljske parametre, ki so ob določenih aktivnostih za uporabnika udobni: v času aktivne prisotnosti mora biti temperatura v stavbi primerna, zrak svež in ne presuh ali preveč vlažen; v času spanja so lahko temperatura, osvetljenost in zaloga tople vode nižje; v času odsotnosti temperatura in osvetljenost nista pomembni, okna pa morajo biti zaprta. Samodejno učenje spreminjajočih se uporabnikovih navad odpravi potrebo po ročnem (po)nastavljanju urnikov za avtomatizacijo sistemov v stavbi ter hkrati omogoči boljše nastavitve, ki temeljijo na natančnih statističnih podatkih o pretekli uporabi.

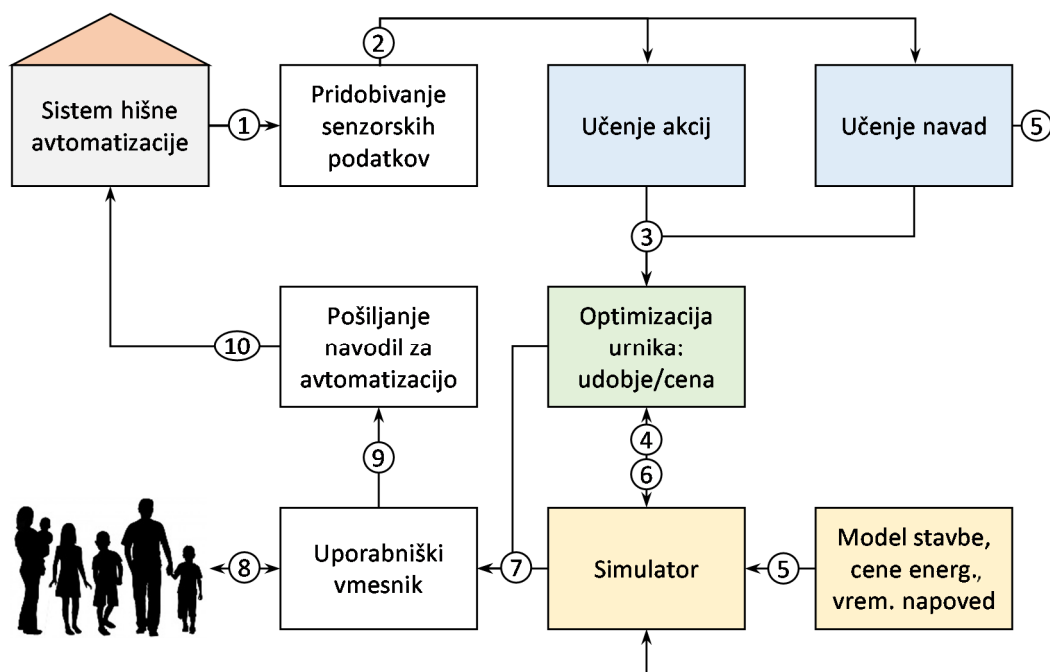
Modul za učenje akcij periodično zahteva podatke o akcijah uporabnika, ki jih le-ta izvede, kadar okolje v stavbi

zanj ni dovolj udobno: npr. previsoka temperatura, slaba osvetljenost ali kakovost zraka. Zbrane podatke modul analizira v kontekstu časa, prostora in prepoznane aktivnosti. Če zazna, da uporabnik pri določeni aktivnosti v določenem prostoru večkrat izvede enako akcijo, iz tega sklepa, da je nastavitev scene (opisana v [5]) za to aktivnost in prostor neprimerna ter predlaga njeno spremembo.

Oba modula poleg specifičnih metod za prepoznavanje akcij in aktivnosti uporabljata standardne algoritme strojnega učenja, da zgradita model, ki uporabniku zagotavlja udobje. Model vsebuje podatke o tem, kakšna je verjetnost, da uporabnik na določen dan v tednu ob določenem času potrebuje neko sceno (povezano z aktivnostjo uporabnika), in kake vrednosti parametrov naj bodo nastavljene za posamezno sceno (temperatura zraka, osvetljenost, zaprta okna idr.) [5]. Model se posreduje modulu za optimizacijo, kot prikazuje slika 1, korak 3.

2.3 Modul za optimizacijo

Cilj optimizacije je poiskati nedominirane (t.j. najboljše) urnike po kriterijih udobja in cene – namesto te se lahko uporablja tudi količina porabljenih energentov ali količina posledično izpuščenega CO₂. Ker sta si kriterija udobje in cena nasprotujoča, je izhod postopka optimizacije množica urnikov, ki so med sabo neprimerljivi (boljši v enem kriteriju in slabši v drugem) in boljši od vseh ostalih urnikov. Urnik je predstavljen kot zaporedje 15-minutnih časovnih intervalov za katere je treba določiti parametre vodenja posameznih sistemov v stavbi. Za iskanje nedominiranih urnikov se uporablja algoritem večkriterijske optimizacije, ki podatka o ceni in udobju urnika pridobi od modula za simulacijo (slika 1, korak 6).



Slika 1: Programski moduli sistema OpUS in podatkovni tokovi med njimi

2.4 Simulacija

Modul za simulacijo na vhodu sprejme (slika 1, korak 5) model stavbe, ki npr. določa toplotne izgube, porabo energije posameznih sistemov ipd.; cene energentov, ki omogočijo izračun stroškov določenega urnika; vremensko napoved, ki določa pričakovane zunanje vplive na pogoje v stavbi; in model uporabnikovih navad, ki je osnova za izračun udobja danega urnika. Simulator je osnovan na obstoječih splošnih simulatorjih delovanja sistemov v stavbah, lastnostih stavbe in konkretnih sistemov, prisotnih v stavbi ter metodi za izračun neudobja uporabnika glede na okoljske pogoje v stavbi in želene pogoje. Rezultati simulacije, ki so odvisni od točnosti simulatorja in vhodnih podatkov, se vrnejo modulu za optimizacijo (slika 1, korak 6), ki na njihovi podlagi predlaga nove urnike (slika 1, korak 4). Po končani optimizaciji se izbrani urnik in pripadajoče udobje ter cena posredujejo uporabniškemu vmesniku (slika 1, korak 7).

2.5 Uporabniški vmesnik

Uporabniški vmesnik ponuja vizualizacijo, iz katere sta razvidna cena in udobje najboljših urnikov. Uporabniku se ob izbiri posameznega ponujenega urnika prikažejo razlike v trajanju in nastavitvah scen ter udobju in ceni med izbranim in trenutno nastavljenim urnikom. Množica najboljših (nedominiranih) rešitev omogoča, da uporabnik dobi vso informacijo o delovanju sistema in se na podlagi te informacije odloči, kateri kriterij je zanj pomembnejši ter kakšen kompromis med kriterijema mu bolj ustreza. Uporabnik lahko v koraku 8 (slika 1) izbere enega od predlaganih urnikov ter ga po potrebi prilagodi svojim željam – v tem primeru se ponovno izvede optimizacija izvajanja urnika in simulacija za oceno cene in udobja predlaganih sprememb urnika.

Sistem OpUS začne delovati z vnaprej nastavljenim urnikom, ki je dober približek splošno uporabnega urnika. Skozi čas se sistem nauči navad in potreb uporabnika ter predlaga boljše urnike. Izboljšan urnik je primeren za uporabo, dokler ne pride do sprememb navad uporabnikov ali do spremembe zunanjih vplivov: vremena kot posledice letnih časov ali bistvene spremembe cen energentov na trgu. Poleg izbire in primerjave urnikov uporabniški vmesnik ponuja tudi pregled nad preteklo porabo in skladnostjo izbranega urnika s prepoznanimi potrebami uporabnika ter ročno upravljanje s sistemom za hišno avtomatizacijo.

2.6 Vodenje sistemov v stavbi

Izbrani urnik in pripadajoči parametri za vodenje sistemov v stavbi se iz uporabniškega vmesnika pošljejo modulu za pošiljanje navodil za avtomatizacijo (slika 1, korak 9). Le-ta je izhodni modul, ki mora biti prilagojen konkretnemu sistemu hišne avtomatizacije podobno kot modul za pridobivanje senzorskih podatkov. Poleg določenega urnika modul sprejme tudi podatke o zaznanih aktivnostih uporabnikov, ki jih prepozna modul za učenje navad, na podlagi katerih preklaplja med scenami, kadar se pričakovana aktivnost na urniku ne ujema z zaznano aktivnostjo (slika 1, korak 10).

3 PRIMER UPORABE

V tem razdelku predstavljamo rezultate pametnega vodenja na primeru stavbe s fotovoltaičnimi paneli, kjer lahko določamo polnjenje in praznjenje baterije ter delovanje nekaterih porabnikov, medtem ko so scene omejene na nastavljanje želene temperature v stavbi. Stavbo modeliramo s simulatorjem, ki za dani urnik vrača njegove stroške in udobje. V stroških upoštevamo tudi neporabljeno energijo v bateriji, ki predstavlja prihodnji dobiček. Optimizacijo izvajamo z evolucijskim večkriterijskim optimizacijskim algoritmom, ki poišče kompromisne urnike glede na obravnavana nasprotujoča si kriterija.

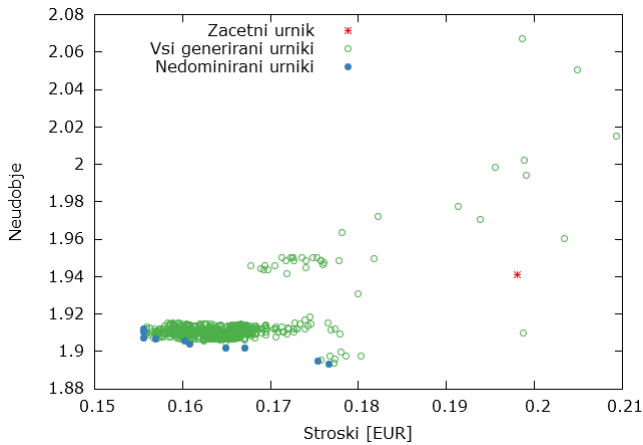
Optimizacijski algoritem kot vhodne podatke uporabi podani začetni (neoptimirani) urnik stavbe in podatke o ceni energije, napovedi sončne energije, porabnikovih in navadah uporabnikov. Dokler ni izpolnjen ustavitveni pogoj (čas, ki je na voljo za optimizacijo), poteka preiskovanje prostora urnikov in njihovo vrednotenje preko omenjene simulacije.

Vsak urnik opisuje delovanje stavbe med podanima začetnim in končnim časom, pri čemer je vmesno obdobje razdeljeno na 15-minutne intervale. Urnik je sestavljen iz naslednjih štirih komponent:

- *Temperatura:* Za vsak interval določimo želeno temperaturo v stopinjah Celzija, ki mora zadoščati omejitvam (biti mora vsebovana v $[T_{\min}, T_{\max}]$, kjer sta temperaturi T_{\min} in T_{\max} lahko podani za vsak interval posebej).
- *Energija+:* V primeru, da imamo presežek energije (fotovoltaični paneli proizvedejo več energije, kot je hiša porabi), za vsak interval določimo delovanje baterije. Možni sta le dve vrednosti, in sicer 1 (baterija naj se polni) in 0 (baterija naj se ne polni). Če se baterija ne polni, presežek energije prodajamo.
- *Energija-:* V primeru, da imamo primanjkljaj energije (fotovoltaični paneli proizvedejo manj energije, kot je hiša porabi), za vsak interval določimo delovanje baterije. Možni sta le dve vrednosti, in sicer 1 (baterija naj se prazni) in 0 (baterija naj se ne prazni). Če se baterija ne prazni, potrebno energijo črpamo iz omrežja.
- *Porabniki:* Za vsakega porabnika določimo čas, ko naj začne delovati, t.j. porabljati energijo. Končni čas in količina porabljene energije se izračunata iz lastnosti porabnika.

Optimizacijo smo preizkusili na naslednjem konkretnem primeru. Želimo optimirati vodenje stavbe s fotovoltaičnimi paneli, eno baterijo in enim porabnikom, ki mora delovati enkrat dnevno. Zanima nas vodenje stavbe za dva naslednja dneva: v prvem je napovedano jasno (sončno) vreme, v drugem pa pretežno oblačno vreme. Začetni urnik je določen na podlagi vremenske napovedi in uporabnikovih navad ter zelenih temperatur. Optimizacijo izvajamo, dokler ne pregledamo 1000 urnikov.

Slika 2 predstavlja rezultate tega poskusa. Zeleni krožci prikazujejo vse generirane urnike. Začetni urnik je obarvan rdeče, nedominirani urniki (vseh je deset) pa so predstavljeni



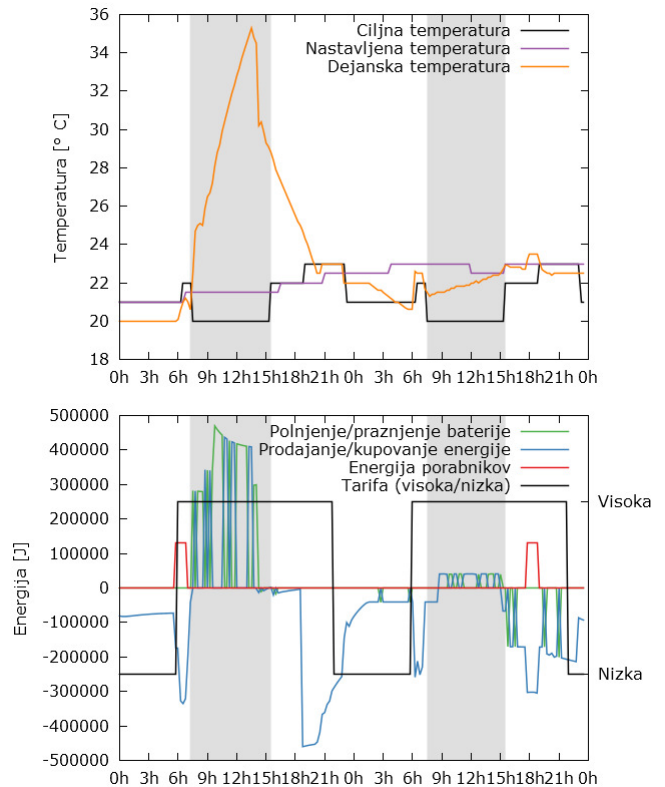
Slika 2: Vsi urniki dobljeni po postopku večkriterijske optimizacije

z modrimi pikami. Kot lahko vidimo, optimizacijski algoritem najde različne kompromise med stroški in udobjem, ki so po obeh kriterijih boljši od začetnega urnika. Najugodnejši dobljeni urnik je podrobneje obrazložen v nadaljevanju.

Slika 3 prikazuje dva grafa s podrobnejšo informacijo o najugodnejšem dobljenem urniku. Siva območja označujejo obdobja, ko uporabnik ni prisoten v stavbi. Takrat se meri samo poraba energije, ne pa tudi udobje. Zgornji graf na sliki 3 prikazuje ciljno temperaturo (tisto, ki ustreza največjemu udobju), nastavljeno temperaturo ter dejansko temperaturo, ki jo izmeri simulator, ko stavba poskuša voditi sisteme gretja in ohlajanja tako, da se čim bolj približa nastavljeni temperaturi. Vidimo, da je razkorak med nastavljeno in dejansko temperaturo precejšen predvsem v obdobjih neprisotnosti, ko se stavba ne hladi oz. ogreva. Spodnji graf kaže, kaj se v določenem intervalu dogaja z energijo. Baterija se včasih polni (pozitivna energija) in včasih prazni (negativna energija), energijo prodajamo (pozitivna energija) in kupujemo (negativna energija), vidimo tudi, v katerih intervalih obratuje porabnik. Na grafu je označena tudi tarifa kupovanja energije, ki je lahko bodisi visoka bodisi nizka. V prvem, sončnem dnevu, fotovoltaični paneli proizvedejo veliko energije, ki se deloma shrani v baterijo, deloma pa proda. V drugem dnevu je takšne energije zelo malo. Večina energije, ki se je shranila v baterijo, ostaja v bateriji tudi po koncu urnika (za porabo v prihodnjem obdobju).

4 RAZPRAVA

Prispevek opisuje arhitekturo programske opreme, ki s pametnim vodenje sistemov v stavbi rešuje pereč problem zagotavljanja visoke stopnje udobja in hkrati nizkih stroškov. Arhitektura temelji na ideji uporabe strojnega učenja uporabnikovih navad in potreb ter večkriterijske optimizacije parametrov vodenja na podlagi simulacije. Poleg arhitekture, ki omogoča vključitev v obstoječe sisteme pametnih stavb, so predlagane tudi formalne predstavitev problemov učenja, optimizacije in simulacije ter algoritmi, ki so primerni za reševanje teh problemov. Primer uporabe predlaganih rešitev kaže, da je tak sistem sposoben predlagati urnike, ki so



Slika 3: Podrobnosti najugodnejšega urnika. Siva območja označujejo obdobja, ko uporabnik ni prisoten v stavbi.

udobnejši in cenejši od ročno nastavljenih urnikov, saj se lahko sproti prilagajajo zunanjim vplivom in potrebam uporabnikov. Uporaba takega sistema odpravi tudi potrebo po ročnem nastavljanju urnikov in hkrati spodbuja energetske varčnosti uporabnikov.

LITERATURA

- [1] Gjoreski M., Gjoreski H., Piltaver R., Gams M. "Predicting the arrival and the departure time of an employee." *Zbornik 16. mednarodne multikonference Informacijska družba – IS 2013*, str. 43–46.
- [2] *Annual Energy Outlook 2012*. U.S. Energy Information Administration (EIA), 2012.
- [3] Perez-Lombard L., Ortiz J. in Pout C. "A review on buildings energy consumption information." *Energy and Buildings*, 40 (3): 394–398, 2008.
- [4] Šef T., Piltaver R., Tušar T. "Projekt OpUS: optimizacija upravljanja energetske učinkovitih pametnih stavb." *Zbornik 16. mednarodne multikonference Informacijska družba – IS 2013*, str. 110–113.
- [5] Tavčar A., Piltaver R., Zupančič D., Šef T., Gams M. "Modeliranje navad uporabnikov pri vodenju pametnih hiš." *Zbornik 16. mednarodne multikonference Informacijska družba – IS 2013*, str. 114–117.