

Prof. dr. sc. Mario Vašak
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
mario.vasak@fer.hr

Dr. sc. Nikola Hure
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
nikola.hure@fer.hr

Dr. sc. Hrvoje Novak
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
hrvoje.novak@fer.hr

Paula Perović
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
paula.perovic@fer.hr

Doc. dr. sc. Anita Banjac
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
anita.banjac@fer.hr

Danko Marušić
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
danko.marusic@fer.hr

Leon Lepoša
HEP ESCO d.o.o.
leon.leposa@hep.hr

Doc. dr. sc. Tomislav Capuder
Sveučilište u Zagrebu Fakultet elektrotehnike i računarstva
tomislav.capuder@fer.hr

USLUGA GOSPODARENJA ENERGIJOM U ZGRADI ZASNOVANA NA PREDIKTIVNOM UPRAVLJANJU

SAŽETAK

Rad je usmjeren je na platformu za gospodarenje energijom kroz interakciju zgrada i energetskih mreža, uz omogućavanje aktivnog sudjelovanja zgrada na tržištu usluga fleksibilnosti. Zbog projekta 3Smart na kojoj je iniciran njen razvoj ona se naziva 3Smart platformom. Organizirana je u programske module namijenjene jednostavnoj nadogradnji na postojeće sustave automatizacije u zgradi i mreži. Implementirana je na pilotskim lokacijama u Hrvatskoj, Sloveniji, Austriji, Mađarskoj i Bosni i Hercegovini.

Prikazana je analiza rada 3Smart platforme na strani zgrada na pilotskoj lokaciji u Hrvatskoj, te su demonstrirane značajne mogućnosti pružanja fleksibilnosti i smanjenja operativnog troška zgrada.

Ključne riječi: zgrada, gospodarenje energijom, prediktivno upravljanje, optimizacija, odgovor potražnje, fleksibilnost, aktivacija, rezervacija, 3Smart platforma, PC-ATE Buildings

BUILDING ENERGY MANAGEMENT SERVICE BASED ON PREDICTIVE CONTROL

SUMMARY

The work is focussed on a platform for energy management through interaction of buildings and energy grids, with enabling of active participation of buildings on flexibility services market. Because of the project 3Smart on which its development was initiated it is called the 3Smart platform. It is organized in program modules intended for a simple add-on to existing automation systems in buildings and grids. It is implemented on pilot locations in Croatia, Slovenia, Austria, Hungary and Bosnia and Herzegovina.

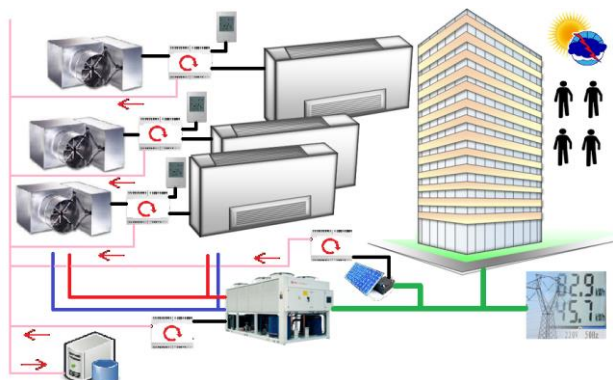
The 3Smart platform operation analysis on the side of buildings in the Croatian pilot is shown. Significant possibilities for provision of flexibility and reduction of operative costs are demonstrated.

Key words: building, energy management, predictive control, optimization, demand response, flexibility, activation, reservation, 3Smart platform, PC-ATE Buildings

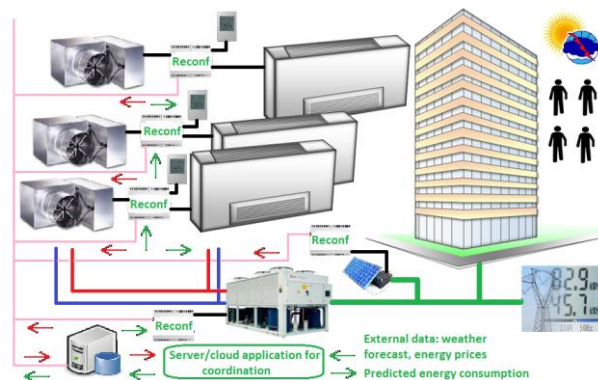
1. UVOD

Sustavi klimatizacije u zgradama zasnovani su na fizikalnim principima termodinamike i prijenosa topline. Toplinske mase zgrade i različiti toplinski spremnici unose bitnu dinamičku komponentu u odgovarajuće toplinske modele zgrade, pa na taj način trenutne upravljačke akcije na elemente za grijanje/hlađenje u prostorijama te na centralne uređaje za pripremu medija ne utječu na komfor korisnika zgrade trenutno, već s određenim vremenskim zatezanjem. Sličan je i efekt s obzirom na vanjske vremenske uvjete, gdje su dominantni faktori temperatura vanjskog zraka te Sunčevo ozračenje. To pruža različite mogućnosti kada i koliko jako djelovati na pojedine upravljive elemente u zgradi, tj. različite mogućnosti odabira slijeda upravljačkih akcija kako bi se ostvario željeni komfor. Pritom se iz skupa različitih mogućih sljedova upravljačkih akcija može odabrati onaj slijed uz koji će se ostvariti za zgradu ekonomski najpovoljniji profil razmjene energije s distribucijskim mrežama. U ovo je naravno uključen i zahtjev za čim manjom potrošnjom energije, no u vremenski promjenjivim uvjetima razmjene energije s mrežom minimalna potrošnja energije nije nužno i ekonomski najpovoljnija. To pogotovo dolazi do izražaja kod aktivnog upravljanja s ciljem smanjenja vršne potrošnje te kod sudjelovanja zgrade u usluzi odgovora potražnje. Dodatno se situacija u zgradama usložnjava, ali i povećavaju prilike, s uvođenjem upravljivih izvora i pohrana energije.

Stanje tehnike u sustavima automatizacije koji se trenutno nalaze u velikoj većini zgrada, što se algoritama upravljanja tiče, nije na razini uz koju je moguće aktivno sudjelovanje zgrade na tržištu električne energije putem odgovora potražnje, a također je i značajno limitirana efikasnost algoritama za smanjenje vršne potrošnje. U pravilu se u sadašnjim sustavima automatizacije koriste reaktivni algoritmi upravljanja, tj. algoritmi koji koriste samo trenutna mjerenja unutarnjih i vanjskih uvjeta i trenutne zahtjeve komfora korisnika zgrade te se dodatno upravlja programski ovisno o dobu dana. Drugo je obilježje stanja tehnike sustava automatizacije u zgradama slaba ili nepostojeća koordiniranost između različitih sustava u zgradi – grijanje/hlađenje u prostorijama se upravlja zasebno, centralna priprema medija za grijanje/hlađenje zasebno, sustavi pohrane i izvori zasebno. Pritom naravno postoji mogućnost skupljanja podataka na jedno mjesto, te mogućnost operatorskog upravljanja s tog mjesta, ali ustvari nema automatiziranih koordiniranih upravljačkih akcija (Slika 1.).



Slika 1. Ilustracija funkcioniranja trenutnih sustava automatizacije u zgradama.



Slika 2. Ilustracija funkcioniranja sustava automatizacije u zgradi nadograđenog 3Smart platformom.

Kroz projekt 3Smart razvijena je platforma koju se nadodaje na postojeće sustave automatizacije u zgradi kako bi se navedene nedostatke otklonilo, te se pritom oslanja na metodologiju prediktivnog upravljanja. Platforma je razvijena tako da bude na jednostavan način poveziva s platformom na strani mreže kojom se omogućuje funkcionalnost odgovora potražnje i općenito koordinacije s mrežom. Kroz 3Smart projekt predložen je i odgovarajući način organizacije programskih modula i algoritama na strani mreže kojima se omogućuje povezivost, no u ovom radu naglasak se stavlja na platformu na strani zgrade. 3Smart platforma dalje se razvija u novim istraživačkim projektima poput projekta PC-ATE Buildings te se približuje komercijalnoj primjeni.

U nastavku rada opisane su glavne karakteristike platforme na strani zgrada (Poglavlje 2) te je nakon toga provedena analiza rada zgrada u sklopu hrvatskog pilota za zadane specifične uvjete (Poglavlje 3).

2. GOSPODARENJE ENERGIJOM U ZGRADI ZASNOVANO NA PREDIKTIVNOM UPRAVLJANJU

Zgrada pri sudjelovanju na tržištu fleksibilnosti u razmjeni električne energije mora procijeniti više svojih načina rada – jedan nominalni po kojem će se zgrada vladati ako se ne aktivira fleksibilnost i koji će služiti kao osnova za određivanje iznosa fleksibilnosti koju zgrada pruža, te jedan ili više alternativnih po kojima će se zgrada ravnati u slučaju aktivacije zahtjeva za fleksibilnost u odgovarajućem trenutku. Zgrada također treba procijeniti koji je to za nju ekonomski najpovoljniji iznos maksimalne fleksibilnosti koju je spremna ponuditi, u skladu s trenutnim uvjetima na tržištu. Konvencionalnim reaktivnim algoritmima upravljanja u postojećim sustavima automatizacije ove načine rada nije moguće procijeniti, osim eventualno izraditi određene ad-hoc strategije rada koje mogu biti ili vrlo konzervativne u iznosu fleksibilnosti koju zgrada nudi ili pak mogu vrlo grubo narušiti komfor korisnika zgrade. Nasuprot tome, korištenjem algoritama prediktivnog upravljanja moguće je simultano odrediti oba način rada zgrade te odlučiti o sudjelovanju zgrade na tržištu fleksibilnosti s optimalnim iznosom fleksibilnosti, pri čemu on naravno može biti i 0 ako trenutni tržišni uvjeti za uslugu fleksibilnosti nisu zgradi isplativi. Razvijeni su algoritmi za planiranje rada zgrade uzevši u obzir različite moguće skupove upravljačkih točaka, dane tržišne uvjete, vanjske okolišne uvjete i načine rada onog dijela zgrade na kojeg se iz zadanog skupa upravljačkih točaka ne može utjecati. Pritom se odlučuje o združenom odnosno koordiniranom radu svih upravljivih dijelova zgrade te na taj način dobiva najveća ekonomska korist uz održan komfor. To su tzv. algoritmi off-line modelskog prediktivnog planiranja rada zgrade, te kao njihov rezultat proizlazi optimalna ponuda fleksibilnosti od strane zgrade za određeni dan.

Zgrada, kada jednom izda svoju ponudu fleksibilnosti te ista bude prihvaćena od strane mrežnog subjekta koji potrebuje tu fleksibilnost, u tzv. on-line radu neprestano svoje vladanje treba planirati u skladu s ugovorenim fleksibilnošću. To se odnosi, kako na planiranje i deklariranje razmjene energije s mrežom dan unaprijed u određenom trenutku u danu kada zgradi budu poznate cijene energije za naredni dan, tako i na neprestani rad u skladu s ugovorenim fleksibilnošću, deklariranom razmjenom energije i aktiviranim zahtjevima za pružanje fleksibilnosti. Pritom zgrada neprestano treba donositi ekonomski optimalne odluke o budućem vladanju u skladu s trenutno zatečenim stanjem te u skladu s trenutnim predviđanjima svih onih varijabli na koje takvo upravljanje nema direktan utjecaj. Razvijeni su također i algoritmi za on-line rad zgrade korištenjem principa prediktivnog upravljanja. Pritom je prediktivno upravljanje središnji algoritam za on-line odlučivanje o načinu rada zgrade, ali ne i jedini algoritam na 3Smart platformi koji omogućuje oživljavanje ovog koncepta. Potrebni su također i algoritmi identifikacije, estimacije i predviđanja kao „oči“ platforme koji se nastavljaju na postojeća očitavanja senzora i prognoze vanjskih uvjeta, a pružaju potrebne informacije algoritmima prediktivnog upravljanja. Također su potrebni i odgovarajući sučeljni algoritmi koji omogućuju realizaciju optimalnih upravljačkih profila na krajnjim akcijskim točkama zgrade – oni ustvari predstavljaju „ruke“ platforme i omogućuju realizaciju željenog povratnog djelovanja na zgradu. Organizacija programskih modula platforme dana je detaljnije u [1].

Intencija platforme jest da se jednostavno nadodaje na postojeće sustave automatizacije rješavajući tako njihove nedostatke u smislu koordiniranog i optimalnog gospodarenja energijom te omogućavanjem funkcionalnosti odgovora potražnje. To se čini programskom rekonfiguracijom postojećih klasičnih upravljačkih uređaja tako da naredbu mogu primiti s centralnog upravljačkog mjesta – poslužiteljskog računala u kojem se implementiraju razvijeni algoritmi platforme. Na poslužiteljsko računalo primaju se također i potrebne informacije sa senzora zgrade, ali i iz vanjskih servisa poput vremenske prognoze odnosno od subjekata na tržištu električne energije. Pritom naravno poslužiteljsko računalo sa subjektima na tržištu električne energije može obostrano razmjenjivati podatke – ono u pravilu prima informacije o uvjetima razmjene električne energije s mrežom, u skladu s njima optimira vladanje zgrade te optimirani profil razmjene energije komunicira s tim subjektima. Također u smislu funkcionalnosti odgovora potražnje zgrada deklarira i iznos fleksibilnosti koji je spremna pružiti za zadane tržišne uvjete. Podatci se u poslužiteljskom računalu organiziraju na način razvijen kroz 3Smart projekt kao predložak tzv. 3Smart baze podataka za zgradu. Na taj je način pojednostavnjeno repliciranje platforme na nove instance zgrada. Na Slici 2. ilustrirana je promjena koju se obavlja nad klasičnim sustavom automatizacije sa Slike 1. kako bi se u zgradi implementirala 3Smart platforma.

3Smart alat na mrežnoj strani obuhvaća s jedne strane procese dugoročnijeg planiranja mreže sa strateškim odlučivanjem pod kojim je tehničkim i ekonomskim uvjetima funkcionalnost odgovora potražnje prihvatljiva mreži – proces ukoliko postoji ekonomski interes obje strane završava sklapanjem odgovarajućih ugovornih odnosa za pružanje fleksibilnosti od strane krajnjih potrošača – zgrada. S druge strane alat obuhvaća interakciju u stvarnom vremenu sa zgradama u skladu s ugovorima o pružanju

fleksibilnosti gdje se potrebna fleksibilnost zahtijevana od zgrade određuje dan unaprijed te eventualno dodatno vremenski posmiče putem modula za unutardnevni rad.

U Hrvatskoj je 3Smart platforma na strani zgrada implementirana u dvije zgrade. Kroz rad na PC-ATE Buildings projektu to će se proširiti i na zgradu tvrtke Klimaoprema d.d. u Gradni kod Samobora. U nastavku se detaljnije izlaže dobivene rezultate analize rada hrvatskog pilota sa strane zgrada.

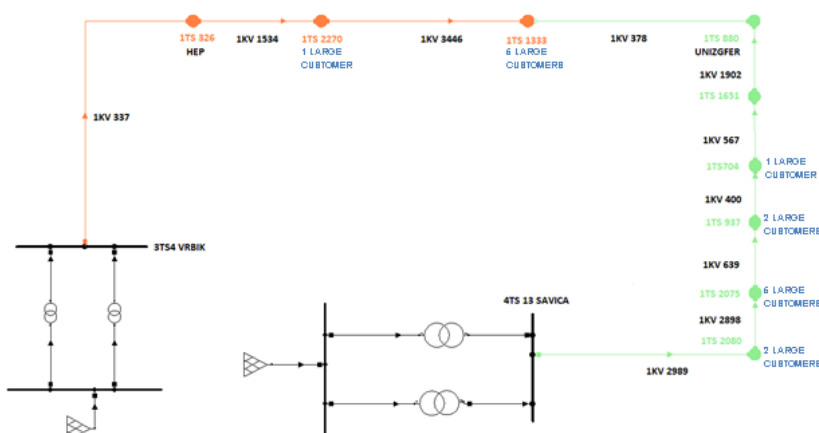
3. ANALIZA RADA 3SMART PLATFORME NA HRVATSKOM PILOTU

3.1. Kratak opis pilota

Hrvatski 3Smart pilot sastoji se od neboderske zgrade FER-a (Unska 3, Zagreb) i tzv. stare upravne zgrade HEP-a (Ulica grada Vukovara 37, Zagreb), te od distribucijske mreže HEP ODS-a oko njih. Zgrade su slične po broju prostorija s upravljivim grijanjem/hlađenjem (248 u neboderskoj zgradi FER-a, 238 u zgradi HEP-a) te orijentaciji prostorija prema sjeveru ili jugu, a površina unutarnjih prostora također je sumjerljiva te iznosi oko 10.000 m².

Pilotske zgrade u prostorijama sadrže, što se elemenata za grijanje i hlađenje tiče, radijatore i ventilokonvektore – kod zgrade FER-a u svim upravljivim prostorijama nalaze se samo ventilokonvektori, a radijatori u neupravljivim hodnicima te servisnim prostorijama; kod zgrade HEP-a u sezoni grijanja u velikoj većini prostorija koriste se radijatori, a u hlađenju bez iznimke ventilokonvektori. Zgrade u grijanju koriste toplinu iz centralnog toplinskog sustava putem toplinske stanice snage 1 MW (u zgradi HEP-a postoji iznimka u svega nekoliko prostorija koje se napajaju iz jedne manje toplinske podstanice), a za potrebe hlađenja posjeduju rashladnike zrak-voda nazivnog rashladnog učina od oko 500 kW. Obje zgrade također posjeduju instaliran punoupravljivi baterijski sustav (32 kWh/10 kW), kao i fotonaponski sustav (FER 21 kWp, HEP 30 kWp). Programski alat za gospodarenje energijom svake od zgrada putem svoje modularne strukture integrira sve navedene elemente i omogućuje optimalno oblikovanje profila razmjene električne energije i topline s distribucijskim mrežama, uz iskorištavanje prilika u sklopu funkcionalnosti odgovora potražnje. Upravljačke točke jesu: ventilatori ventilokonvektora odnosno ventili radijatora na zonskoj razini, polazna temperatura medija za grijanje/hlađenje (kod FER nebodera u grijanju dodatno i protok medija) na razini centralne pripreme medija, te snaga punjenja/praznjenja baterijskog sustava na tzv. razini mikromreže zgrade. Više detalja o samoj pripremi zgrada za pilot dano je u [2].

Pilot na strani mreže prikazan je na Slici 3 – sastoji se od dvaju radialno vođenih 10 kV vodova iz različitih transformatorskih stanica koje napajaju navedene zgrade. Zgrada HEP-a napaja se iz TS 30/10 kV Vrbik. Vod s kojeg je napajana zgrada HEP-a napaja sveukupno 3 SN/NN stanice i 7 potrošača s priključnom snagom preko 100 kW, od kojih je jedan upravo ta zgrada. Kompleks FER-ovih zgrada, uključujući i pilotsku nebodersku zgradu, napaja se iz TS 110/10 kV Savica. Vod s kojeg je napajan kompleks FER-ovih zgrada napaja ukupno 6 SN/NN podstanica te 11 potrošača s priključnom snagom preko 100 kW od kojih je jedan upravo FER.



Slika 3. Prikaz pilotske distribucijske mreže hrvatskog 3Smart pilota.

Pilotska mreža je dovoljno kapacitirana za snabdijevanje potrošača pa su za potrebe aktivacije fleksibilnosti u sklopu rada pilota umjetno smanjene granice opterećenja voda za aktivaciju fleksibilnosti.

3.2. Analiza rada pilota na strani zgrada

Analiza rada odnosi se na odzive zgrade za tipične uvjete rada u sezoni hlađenja. U ovom radu odabrana za analizu je sezona hlađenja budući da u njoj postoje veće mogućnosti fleksibilnosti u potrošnji električne energije kojom se osigurava sva energija za rad rashladnog sustava. Naglasak je stavljen na analizu rada esencijalnih modula koji omogućuju koordinirano i optimalno ponašanje cjelokupne zgrade i povezani su s mrežnim modulima. Analiza se provodi na razini karakterističnog dana.

U nastavku se pod terminom operativni troškovi rada zgrade podrazumijevaju ukupni troškovi za energiju, ali i troškovi degradacije same opreme u zgradi – primjerice trošak degradacije kapaciteta baterijskog sustava njegovim punjenjem ili pražnjenjem. Dobiveni odzivi zgrade daju odgovore na sljedeća pitanja postavljena nad načinom rada zgrade tijekom određenog dana, na koja nije lako odgovoriti bez korištenja platforme.

- Koji je optimalan način dnevnog rada zgrade, uz neporemećen komfor, u smislu ukupnih operativnih troškova?
 - Kada i koliko hladiti svaku pojedinu od nekoliko stotina zona?
 - Kada i na koju temperaturu postaviti izlazni medij iz rashladnika?
 - Kada i koliko prazniti/puniti baterijski sustav?
 - S kojim je početnim uvjetom optimalno da zgrada započne rad na početku dana?
 - Koji iznos fleksibilnosti u potrošnji energije je optimalan za ponuditi mreži?
- Koliko je optimalan način rada korištenjem platforme bolji od uobičajenog, konvencionalnog?

U analizi se uspostavlja ponovljivo ponašanje iz dana u dan, na način da je početno stanje zgrade (na početku dana, u ponoć), koje je podložno optimizaciji, jednako konačnom stanju zgrade (u sljedeću ponoć). Na ovaj se način uspostavlja nepristrana evaluacija rada 3Smart sustava budući da se ne može uštede nikako pripisati razlici početnog i krajnjeg stanja budući da je nema. Time se ne iskorištava energija sadržana u početnom uvjetu rada zgrade.

Na temelju provedenih analiza za različite dane zgrada je spremna ponuditi odgovarajuće iznose fleksibilnosti mreži, za sklapanje ugovornog odnosa. Analiza je napravljena za sunčan radni dan u srpnju.

3.2.1. Rubni uvjeti za analizu

Uvjeti u kojima se zgrada vodi sunčanog radnog dana u srpnju, za koji se radi analiza, sastoje se od uvjeta razmjene energije s mrežom, uključivo i uvjeta za funkcionalnost odgovora potražnje, okolišnih uvjeta, te neupravljivih uvjeta rada zgrade – poput zahtijevanog komfora ili potrošnje onih dijelova zgrade koji nisu upravljani od strane platforme (npr. rasvjeta ili grijanje/hlađenje prostorija nad kojima instalirana platforma nema utjecaja).

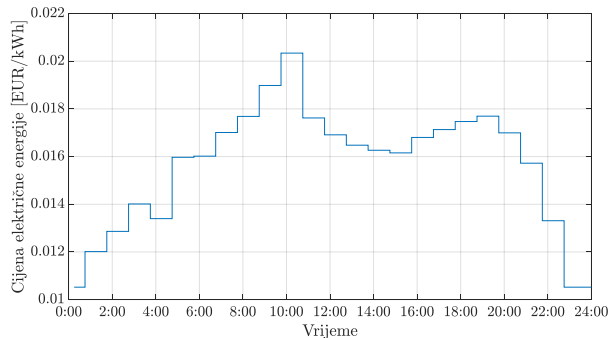
Uvjeti razmjene energije s mrežom su sljedeći. Tri su vremenska prozora fleksibilnosti unutar kojih mreža potražuje fleksibilnost, i to za sva tri slučaja radi se o fleksibilnosti tipa smanjenja potrošnje:

- 11:30-11:45;
- 13:00-13:30;
- 14:30-15:00.

Cjenovni uvjeti, izračunati na temelju proračuna 3Smart programskih modula na strani mreže vezanih uz dugoročni rad mreže, su sljedeći:

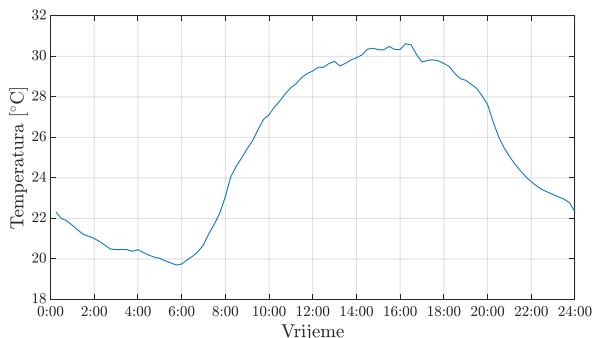
- cijena rezervacije fleksibilnosti: 0.027 EUR/kW/15 min;
- cijena aktivacije fleksibilnosti: 0.109 EUR/kWh;
- cijena penala ukoliko se pozvana fleksibilnost ne odradi u 90%-tnom ili većem iznosu: 0.219 EUR/kWh.

Očekivani cjenovni uvjeti što se tiče cijena na tržištu dan unaprijed prikazani su na Slici 4. Unutardnevne cijene kojima se penalizira odstupanje zgrade od deklariranog profila razmjene energije pretpostavlja se da su 20% veće od cijena dan unaprijed u odgovarajućim trenucima.

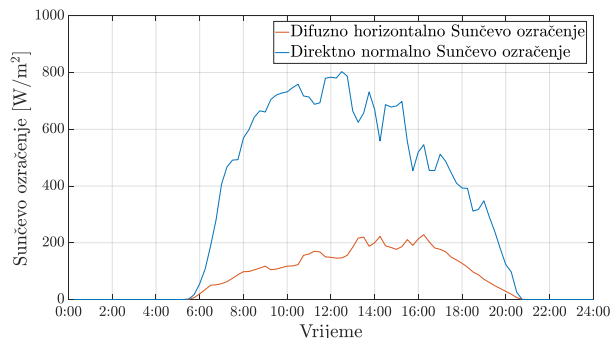


Slika 4. Očekivane cijene dan unaprijed za sunčan radni dan u srpnju.

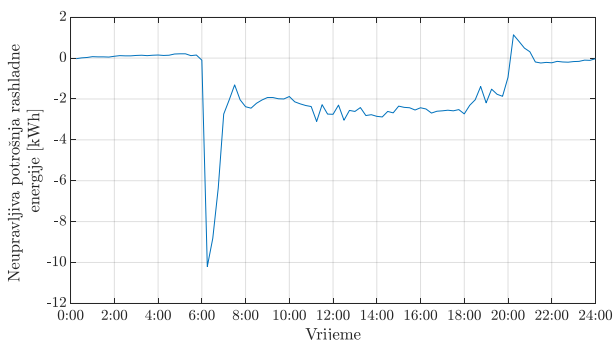
Vanjski meteorološki uvjeti za koje se radi analiza prikazani su narednim slikama – vanjska temperatura zraka na Slici 5, te direktno normalno i difuzno horizontalno Sunčevo ozračenje na Slici 6. Ukupna neupravljiva potrošnja rashladne energije (tj. dio potrošnje nad kojom platforma nema utjecaja), kao i ukupna neupravljiva potrošnja električne energije u zgradi, prikazani su na slikama 7 i 8. Sve slike koje prikazuju potrošnju energije u prikazu ove analize prikazuju potrošnju u kWh za svaki od 96 15-minutnih vremenskih intervala u danu. Neupravljiva potrošnja rashladne energije odnosi se kod obje zgrade na potrošnju susjednih objekata u koje se također razvodi rashladni medij iz rashladnika. Neupravljiva potrošnja električne energije odnosi se dominantno na rasvjetu, računala, dizala zgrade te na hladnjake i klima uređaje u serverskim salama.



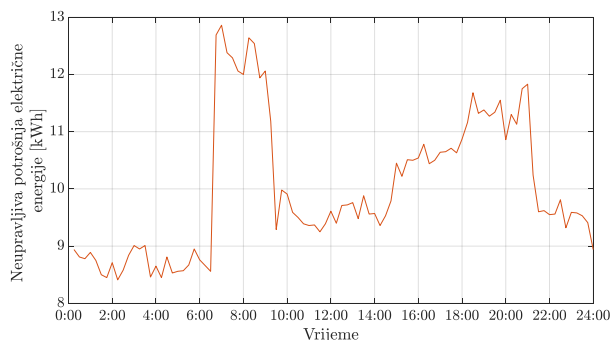
Slika 5. Vanjska temperatura zraka za sunčan radni dan u srpnju.



Slika 6. Direktno normalno i difuzno horizontalno Sunčevo ozračenje za sunčan radni dan u srpnju.



Slika 7. Neupravljiva potrošnja rashladne energije zgrade za sunčan radni dan u srpnju.



Slika 8. Neupravljiva potrošnja električne energije zgrade za sunčan radni dan u srpnju.

Za sve prostorije zgrade upravljive putem 3Smart platforme pretpostavljen je temperaturni komforni zahtjev od 24°C od 06:30 do 20:00 sati, s dopuštenim odstupanjem od $\pm 0.5^\circ\text{C}$ oko ove temperature. Za period 06:00-20:30 pretpostavlja se raspoloživost rashladnika, a izvan ovog vremena on je isključen.

3.2.2. Dobiveni rezultati

Predstavljanje optimalnog ponašanja zgrade dano je prolazeći kroz različite razine modularne i hijerarhijske organizacije platforme – razinu zona, razinu centralne pripreme medija za hlađenje i razinu mikromreže – te analizirajući rezultate na svakoj od njih. Važno je naglasiti da se razine međusobno koordiniraju kako bi rezultatno ponašanje bilo optimalno za sveukupni rad zgrade. Za svaku od razina prikazuju se tri različita ponašanja:

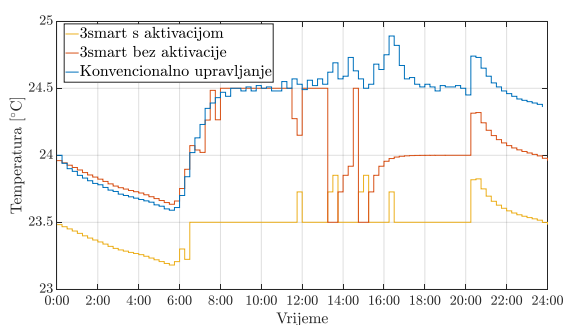
- ponašanje uz konvencionalno upravljanje sadašnjih komercijalnih sustava automatizacije (također je navedeno što se točno pod time podrazumijeva na svakoj od razina);
- ponašanje uz 3Smart platformu kad je fleksibilnost ugovorena s mrežom, ali ju mreža nije zatražila (ili, kraće: bez aktivacije);
- ponašanje uz 3Smart platformu kada je fleksibilnost ugovorena s mrežom te ju je mreža zatražila (ili, kraće: s aktivacijom).

Naravno, rezultatno ponašanje na nekoj od razina posljedica je primjene istog tipa ponašanja na preostalim razinama. Treba još napomenuti da je ponašanje kada je fleksibilnost ugovorena, ali nije zatražena, ono koje će zgrada deklarirati prema mreži i služiti će kao osnova za utvrđivanje iznosa fleksibilnosti koju je u konačnici, po aktivaciji, zgrada pružila.

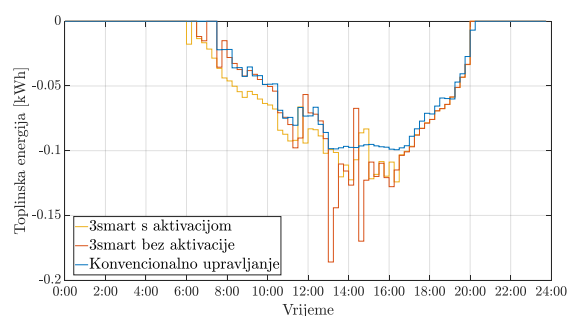
Prvo su analizirani odzivi na razini zona. Što se konvencionalnog upravljanja tiče, pretpostavlja se algoritam jednostavnog histereznog upravljanja koji progresivno uklapa sve veću brzinu rada ventilatora ventilokonvektora kako temperatura u prostoriji raste iznad nominalne, i obrnuto kako temperatura u prostoriji pada. Na Slici 9 prikazan je profil temperature za jednu od zona zgrade. Konvencionalnim upravljanjem (plava linija) temperatura zraka održava se na otprilike 24.5°C tijekom radnih sati, tj. otprilike 0.5°C više od željene referentne temperature od 24°C.

Pri radu platforme, kada fleksibilnost nije aktivirana (ljubičasta linija na Slici 9), zgrada u principu nastoji uštedjeti energiju svugdje, osim u intervalima fleksibilnosti u koje fokusira svoju potrošnju i time si daje čim veću osnovicu za pružanje fleksibilnosti. Zgrada intenzivno u intervalima fleksibilnosti angažira i rashladnik i ventilatore ventilokonvektora. Kako bi se zonu zadržalo u intervalu komfora i dalo čim više prostora intenzivnom hlađenju u periodu fleksibilnosti, u periodima prije intervala fleksibilnosti temperaturu se zadržava na gornjem rubu dozvoljenog intervala komfora.

Rad sustava kada je fleksibilnost aktivirana (narančasta linija na Slici 9) odvija se na način da se maksimizira smanjenje potrošnje u intervalima fleksibilnosti u odnosu na potrošnju koja je bila najavljena mreži (3Smart bez aktivacije, objašnjeno paragraf iznad). Stoga sustav pothlađuje prostor prije intervala fleksibilnosti tako da čim više može iskoristiti inerciju toplinske mase zgrade i smanjiti potrošnju rashladnog sustava u intervalima fleksibilnosti te pritom ostati unutar intervala komfora. Stoga se pri radu 3Smart sustava uz aktivaciju zone održavaju na donjem rubu intervala komfora, dakle na 23.5°C. Također treba primijetiti da 3Smart sustav u bilo kojoj od varijanti planira temperaturu nakon 24 sata rada postaviti na istu temperaturu kao što je bila i početna (koja je podložna optimizaciji), što znači da se ovo ponašanje može ponavljati proizvoljan broj dana za iste vanjske uvjete (Slike 4-8).



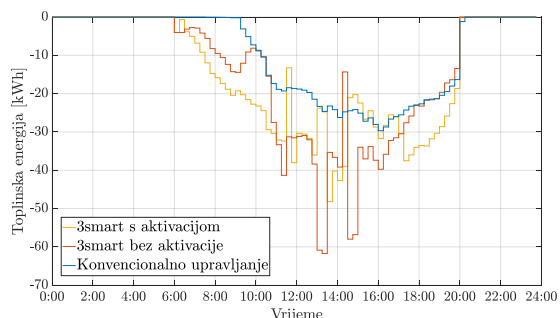
Slika 9. Tipičan odziv temperature u zoni pilotske zgrade tijekom analiziranog dana.



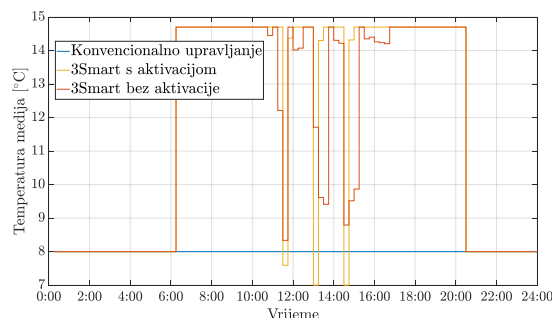
Slika 10. Tipičan odziv potrebnih rashladnih energija za zonu.

Na Slici 10 prikazan je graf potrebnih 15-minutnih energija hlađenja za temperaturni odziv zone sa Slike 9. Najniža potrošnja rashladne energije u zonama ustvari se ovdje ostvaruje konvencionalnim upravljanjem, ali je isto tako uz konvencionalno upravljanje komfor najlošiji odnosno najveće je prosječno odstupanje od željene temperature. U vremenskim prozorima fleksibilnosti može se uočiti nagli porast potrošnje rashladne energije za slučaj 3Smart upravljanja bez aktivacije fleksibilnosti te nagli pad potrošnje rashladne energije za slučaj s aktivacijom.

To je još očitije na Slici 11 na kojoj je prikazan zbroj potrebnih 15-minutnih energija hlađenja za sve zone zgrade.



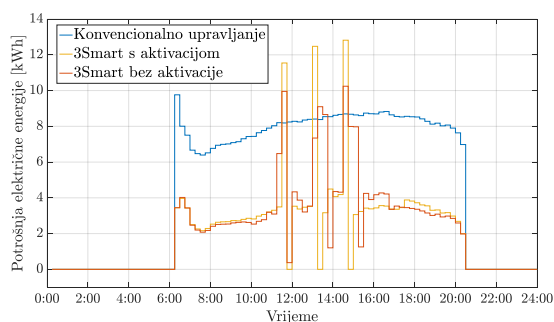
Slika 11. Ukupne rashladne potrebe zona.



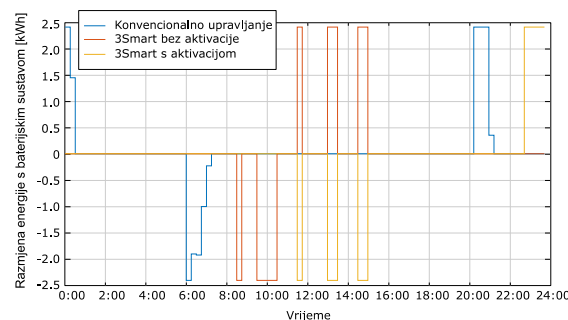
Slika 12. Profil izlazne temperature medija iz rashladnika.

Na razini centralne pripreme medija upravljačka varijabla je polazna temperatura medija iz rashladnika. Pritom je najniža prihvatljiva vrijednost 7°C. Konvencionalnim upravljanjem je ta temperatura postavljena na konstantan iznos od 8°C (plava crta na Slici 12). S ciljem ušteda, računajući da se dovoljno energije za potrebe svih zona može dobiti i na višim temperaturama medija, 3Smart sustav postavlja mnogo više polazne temperature čime se dobiva puno bolji koeficijent iskoristivosti rashladnika i značajno smanjuje potrošnja električne energije rashladnog sustava.

U odgovarajućim trenutcima u danu je, međutim, temperatura medija korištenjem 3Smart sustava značajno snižena, čak i ispod 8°C, kako bi se osigurala potrebna rashladna energija za sve prostorije u skladu sa zahtjevima s razine zona. Također se ovi nagli propadi koriste za pružanje fleksibilnosti. Slike 12 i 13 pokazuju ponašanje polazne temperature iz rashladnika te profil potrošnje električne energije cjelokupnog rashladnog sustava – dakle potrošnju rashladnika te ventilatora ventilokonvektora. Slika 13 pokazuje značajnu mogućnost smanjenja potrošnje električne energije za hlađenje korištenjem boljih radnih točaka rashladnika, u skladu s rashladnim potrebama zona – temperatura medija je takva da se uvijek sve rashladne potrebe zona mogu poslužiti. Također, može se vidjeti značajna razlika u profilu potrošnje električne energije za slučaj bez aktivacije fleksibilnosti i za slučaj aktivacije. Kada fleksibilnost nije aktivirana, potrošnja prije intervala fleksibilnosti je smanjena, a u intervalu fleksibilnosti je maksimalno uvećana. Za slučaj aktivacije fleksibilnosti situacija je dijametralno suprotna – više se troši prije intervala fleksibilnosti (postignuta pothlađenost prostora, kako je objašnjeno gore), i onda potrošnja maksimalno smanjena u intervalu fleksibilnosti. Na taj je način maksimiziran potencijal za pružanje usluge fleksibilnosti sa stajališta rashladnog sustava. Na Slici 13 može se uočiti da je zgrada, što se rashladnog sustava tiče, spremna pružiti fleksibilnost u iznosu između 2 i 5 kWh u 15 minuta, tj. fleksibilnost smanjenja potrošnje zgrade je između 8 kW (za prvi interval fleksibilnosti) i 20 kW (za drugi i treći interval fleksibilnosti).



Slika 13. Ukupna potrošnja električne energije sustava za hlađenje po 15-minutnim intervalima (rashladnik i ventilatori ventilokonvektora).



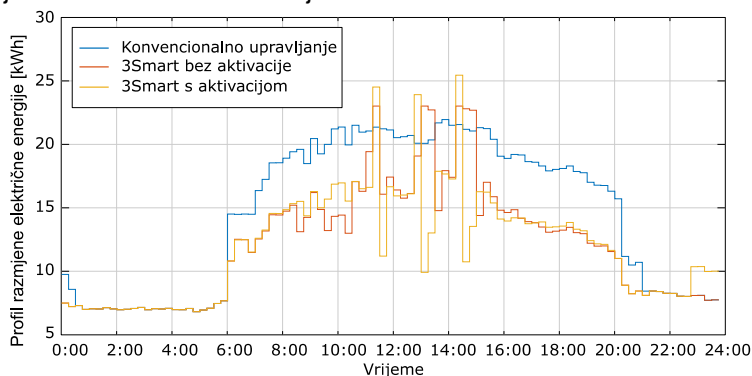
Slika 14. Razmjena energije ostatka zgrade s baterijskim sustavom.

Na razini mikromreže upravljiva komponenta je baterijski sustav čijim se punjenjem odnosno pražnjenjem modificira ukupni profil razmjene električne energije s mrežom. Slika 14 prikazuje rad baterijskog sustava za konvencionalno upravljanje te za dva načina rada 3Smart sustava – bez i s aktivacijom fleksibilnosti. Za slučaj konvencionalnog upravljanja (plava linija na Slici 14) primijenjeni algoritam odgovara uobičajenom načinu rada zatvorenih komercijalnih baterijskih sustava što je u osnovi poravnanje vrhova u potrošnji kako bi se minimiziralo plaćanje na ime vršne potrošnje. Za slučaj zgrada u hrvatskom 3Smart

pilotu, kapacitet i maksimalna snaga punjenja/pražnjenja baterijskog sustava su relativno maleni (32 kWh / 10 kW), te je samim time ograničen njegov učinak na sveukupni trošak električne energije zgrade vezano uz poravnanje krivulje potrošnje zgrade. Konvencionalnim se upravljanjem pražnjenje radi u 06:00 simultano s uključanjem sustava hlađenja kako bi se smanjila vršna snaga prilikom pokretanja rashladnika. Punjenje se obavlja u 20:30 nakon isključenja rashladnika kada se značajno smanji potrošnja zgrade. Međutim, zbog malog kapaciteta baterijskog sustava efekt baterijskog sustava na glađenje profila potrošnje električne energije značajno je ograničen.

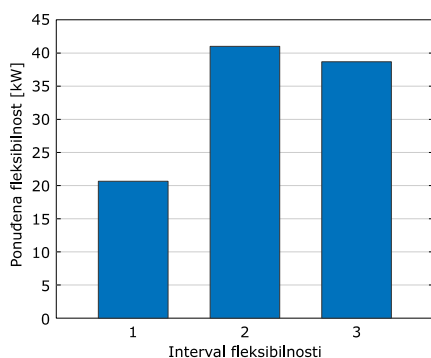
Kada se baterijski sustav vodi preko mikromrežne razine 3Smart platforme, njega se koristi za povećanje mogućnosti pružanja fleksibilnosti. Reakcija na mikromrežnoj razini konzistentna je s reakcijama na nižim razinama kojima se koordinirano s mikromrežom upravlja rashladnim sustavom budući da je odlučeno da su ponuđene cijene fleksibilnosti dovoljne da se isplati koristiti baterijski sustav u svrhu pružanja fleksibilnosti. Kada fleksibilnost nije aktivirana, planira se puniti bateriju upravo u intervalima fleksibilnosti čime se povećava potrošnja koju se deklarira prema mreži. Međutim, ako je fleksibilnost aktivirana, tada se u intervalu fleksibilnosti umjesto punjenja događa upravo suprotno – pražnjenje. Na taj je način postignuta fleksibilnost za 10 kW baterijski sustav i dovoljno kratko vrijeme pružanja odnosno dovoljno velik kapacitet baterije jednaka $10 \cdot (-10) \text{ kW} = 20 \text{ kWh}$.

Ukupan profil razmjene električne energije s mrežom za sva tri slučaja dan je na Slici 15. Značajno smanjena potrošnja električne energije dolazi dominantno zbog efikasnijeg hlađenja zgrade s višom polaznom temperaturom medija pri čemu je koeficijent učinkovitosti rashladnika veći. Također je moguće uočiti izvedive iznose fleksibilnosti u potrošnji zgrade kao razlike između profila rada sustava putem platforme bez aktivacije fleksibilnosti i s aktivacijom.

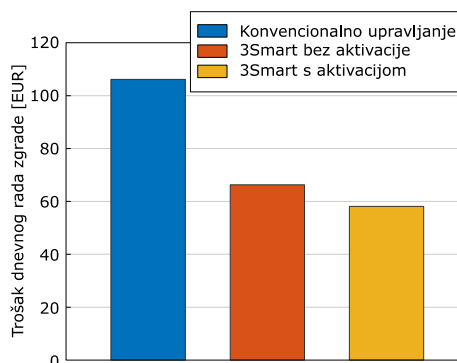


Slika 15. Profil razmjene električne energije između zgrade i mreže.

Ponuđene fleksibilnosti u zadanim intervalima fleksibilnosti od zgrade prema mreži dane su na Slici 16. Ukupni operativni troškovi zgrade prikazani su Slikom 17: 105 EUR za konvencionalno upravljanje, 73 EUR za 3Smart upravljanje bez aktivacije fleksibilnosti i 66 EUR za 3Smart upravljanje s aktivacijom fleksibilnosti.



Slika 16. Ponuđena fleksibilnost smanjenja potrošnje za intervale fleksibilnosti: 20/41/38 kW.



Slika 17. Ukupni operativni troškovi rada zgrade za sunčan radni dan u srpnju.

4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana analiza rada 3Smart platforme za gospodarenje energijom u zgradama i mreži na zgradama hrvatskog 3Smart pilota. Prikazani su i objašnjeni izračunati dobitci u radu zgrade vođene platformom za tipičan sunčani dan u srpnju te potencijal pružanja fleksibilnosti u sklopu funkcionalnosti odgovora potražnje za taj dan. Dnevni operativni trošak rada zgrade smanjuje se upotrebom platforme za oko 35 EUR (33%), i to uz unaprijeđen komfor. Ujedno zgrada omogućuje značajnu fleksibilnost u potrošnji električne energije, na razini između 20 i 40 kW.

5. ZAHVALA

Prikazani istraživački rezultati gospodarenja energijom u zgradi nastali su radom na projektu Razvoj sustava prediktivnog upravljanja i autonomnog trgovanja energijom u zgradi (PC-ATE Buildings). Projekt je sufinanciran sredstvima Europske unije iz Europskog fonda za regionalni razvoj kroz Operativni program konkurentnost i kohezija 2014-2020 (ugovor KK.01.2.1.01.0069).

6. LITERATURA

- [1] Modular cross-spanning energy management tool. 3Smart Output T2.1, 2019, dostupno on-line pri: <http://www.interreg-danube.eu/approved-projects/3smart/outputs>
- [2] Equipment installed and developed data communication through open site-specific real-time two-way data bases for all buildings and the grid in the Croatian pilot. 3Smart Deliverable T5.1, 2018.