

# Sudjelovanje u različitim programima odziva potražnje u cilju povećanja ušteda

---

**Funjak, Renato**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:637190>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-06**

*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU  
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I  
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

**Sveučilišni studij**

**SUDJELOVANJE U RAZLIČITIM PROGRAMIMA  
ODZIVA POTRAŽNJE U CILJU POVEĆANJA UŠTEDA**

**Diplomski rad**

**Renato Funjak**

**Osijek, 2023.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK****Obrazac D1: Obrazac za imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

Osijek, 19.09.2023.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Imenovanje Povjerenstva za diplomski ispit**

<b>Ime i prezime Pristupnika:</b>	Renato Funjak
<b>Studij, smjer:</b>	Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika
<b>Mat. br. Pristupnika, godina upisa:</b>	D-1399, 06.10.2021.
<b>OIB studenta:</b>	02440300051
<b>Mentor:</b>	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
<b>Sumentor:</b>	Nemanja Mišljenović, mag. ing. el.
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Predsjednik Povjerenstva:</b>	prof. dr. sc. Zvonimir Klaić
<b>Član Povjerenstva 1:</b>	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
<b>Član Povjerenstva 2:</b>	dr. sc. Matej Žnidarec
<b>Naslov diplomskog rada:</b>	Sudjelovanje u različitim programima odziva potražnje u cilju povećanja ušteda
<b>Znanstvena grana diplomskog rada:</b>	<b>Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Zadatak diplomskog rada:</b>	U diplomskom radu potrebno je dati pregled i objasniti važnost sudjelovanja u programima odziva potražnje. Nadalje, potrebno je izraditi optimizacijski model sustava aktivnog kupca s ciljem maksimizacije ušteda sudjelovanjem u različitim programima odziva potražnje. Sumentor: Nemanja Mišljenović, mag.ing.el. Tema je rezervirana za studenta: Renato Funjak.
<b>Prijedlog ocjene pismenog dijela ispita (diplomskog rada):</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene od strane mentora:</b>	19.09.2023.
Potvrda mentora o predaji konačne verzije rada:	<i>Mentor elektronički potpisao predaju konačne verzije.</i>
	Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 09.10.2023.

**Ime i prezime studenta:**

Renato Funjak

**Studij:**

Diplomski sveučilišni studij Elektrotehnika

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

D-1399, 06.10.2021.

**Turnitin podudaranje [%]:**

9

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Sudjelovanje u različitim programima odziva potražnje u cilju povećanja ušteda**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Goran Knežević

i sumentora Nemanja Mišljenović, mag. ing. el.

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija. Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Zadatak rada</b> .....	<b>2</b>
<b>2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA</b> .....	<b>3</b>
<b>3. SUSTAV UPRAVLJANJA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM</b> .....	<b>5</b>
<b>3.1. Općenito o sustavu upravljanja električnom energijom</b> .....	<b>5</b>
<b>3.2. Arhitektura sustava upravljanja električnom energijom</b> .....	<b>5</b>
<b>3.3. Infrastruktura sustava upravljanja električnom energijom</b> .....	<b>8</b>
<b>4. PROGRAMI ODZIVA POTRAŽNJE I TEHNIKE PLANIRANJA RADA UREĐAJA</b> 12	
<b>4.1. Programi koji se temelje na poticaju</b> .....	<b>12</b>
<b>4.2. Programi koji se temelje na cijeni</b> .....	<b>13</b>
<b>4.3. Usporedba različitih programa odziva potražnje</b> .....	<b>14</b>
<b>4.4. Tehnike planiranja rada uređaja</b> .....	<b>15</b>
4.4.1. Model prediktivnog upravljanja.....	15
4.4.2. Podržano učenje.....	16
4.4.3. Usporedba strojnog učenja i matematičkih metoda optimizacije.....	16
<b>5. MATEMATIČKI MODEL AKTIVNOG KUPCA ZA SUDJELOVANJE U RAZLIČITIM PROGRAMIMA ODZIVA POTRAŽNJE</b> .....	<b>17</b>
<b>6. PRIMJENA PREDLOŽENOG MODELA AKTIVNOG KUPCA ZA SUDJELOVANJE U RAZLIČITIM PROGRAMIMA ODZIVA POTRAŽNJE</b> .....	<b>23</b>
<b>6.1. Potrošnja električne energije aktivnog kupca</b> .....	<b>23</b>
<b>6.2. Proizvodnja električne energije aktivnog kupca</b> .....	<b>24</b>
<b>6.3. Cijene električne energije</b> .....	<b>26</b>
<b>6.4. Električno vozilo – Tesla Model 3</b> .....	<b>30</b>
<b>6.5. Punionica električnog vozila – Pulsar Type 2 – 11 kW</b> .....	<b>30</b>
<b>6.6. Baterijski spremnik – ARK 10.24XH</b> .....	<b>31</b>
<b>6.7. GAMS programsko okruženje za razvoj optimizacijskog modela</b> .....	<b>31</b>
<b>6.8. Simulacija 1: Cijena električne energije se mijenja svaki sat</b> .....	<b>32</b>

<b>6.9. Simulacija 2: Cijena električne energije se mijenja prema dvotarifnom modelu .....</b>	<b>39</b>
<b>6.10. Simulacija 3: Cijena električne energije prema jednotarifnom modelu.....</b>	<b>45</b>
<b>6.11. Usporedba rezultata.....</b>	<b>51</b>
<b>7. ZAKLJUČAK.....</b>	<b>53</b>
<b>8. SAŽETAK.....</b>	<b>54</b>
<b>9. ABSTRACT .....</b>	<b>55</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>56</b>
<b>ŽIVOTOPIS.....</b>	<b>58</b>

## 1. UVOD

Sudjelovanje u programima odziva potražnje (*engl. Demand Response Programme- DRP*) odnosi se na to da potrošači električne energije sudjeluju u različitim programima koje provode opskrbljivači električne energije. Cilj tih programa je da opskrbljivači električne energije upravljaju potrošnjom na način da mogu po potrebi smanjiti potrošnju električne energije krajnjim potrošačima ili mogu upravljati radom njihovih kućanskih uređaja. Sudjelovanjem u tim programima nastoji se održati ravnoteža u sustavu i povećati ušteda električne energije u satima kada dolazi do vrhunaca potrošnje električne energije.

Razvojem pametnih elektroenergetskih mreža (*engl. Smart grid – SG*) postoje sve veće mogućnosti za postizanjem uštede električne energije primjenom sustava upravljanja energijom u kućanstvu (*engl. Home Energy Management System - HEMS*). Tim sustavom u suradnji s operatorima tržišta električne energije ili opskrbljivačima električne energije se nastoji povećati ušteda tako da se u kućanstvima koriste određeni upravljivi uređaji koji se mogu uključivati kada je cijena električne energije niža ili izvan vršnih razdoblja opterećenja. Pomoću baterije koja služi kao spremnik električne energije koji se puni kada je za to optimalno vrijeme, na primjer, kada je niža cijena električne energije ili kada postoji višak proizvodnje iz fotonaponske elektrane, osiguravaju se uštede i fleksibilnost kućanstva aktivnog kupca.

Do sada pasivni kupci električne energije, u elektroenergetskoj mreži, postaju aktivni kupci koji proizvode, koriste i pohranjuju vlastitu električnu energiju, ali su i dalje povezani s glavnom elektroenergetskom mrežom. U radu je razvijen model kojim je za kućanstvo s instaliranom fotonaponskom elektranom predložena optimizacija korištenja kućanskih uređaja (perilica rublja, perilica suđa, bojler, klima uređaj), punjenja i pražnjenja električnog automobila te baterijskog spremnika za pohranu električne energije. Cilj optimizacijskog modela je minimizirati trošak korištenja električne energije aktivnog kupca.

Rad se sastoji od šest poglavlja. Nakon uvoda u drugom poglavlju dan je pregled trenutnog područja istraživanja. U trećem poglavlju je opisan HEMS te arhitektura i infrastruktura HEMS-a. U četvrtom poglavlju opisani su DRP-i i tehnike planiranja rada uređaja (*engl. Scheduling controller techniques in the HEMS*) koje se koriste u kombinaciji s HEMS-om. U petom poglavlju prikazan je predložen matematički model za optimalno upravljanje električnom energijom aktivnog kupca koji sudjeluje u DRP. Nadalje, definirana je funkcija cilja predloženog modela te ograničenja. U šestom poglavlju dani su profili potrošnje i proizvodnje električne energije jednog aktivnog kupca koji ima instaliranu fotonaponsku elektranu. Definirane su cijene za prodaju

električne energije u mrežu i kupnju električne energije iz mreže za različite tarifne modele. Dani su glavni podatci o električnom vozilu, punionici i baterijskom spremniku električne energije. Opisan je GAMS sustav modeliranja u kojem je razvijen optimizacijski model te su provedene simulacije u kojima se optimiziralo upravljanje kućanskim uređajima (perilica rublja, perilica suđa, bojler, klima uređaj), punjenje i pražnjenje električnog automobila kao i baterije koja služi kao spremnik električne energije. Simulirana su tri scenarija te je napravljena usporedba dobivenih rezultata svih simulacija kako bi se zaključilo na koji način se može ostvariti najveća ušteda prilikom korištenja električne energije u kućanstvu. U zadnjem poglavlju dat je zaključak rada.

Ovaj diplomski rad izrađen je u okviru aktivnosti na HRZZ projektu Distribucijska elektroenergetska mreža s velikim udjelom aktivnih kupaca (UIP-2020-02-5796).

## **1.1. Zadatak rada**

U diplomskom radu potrebno je dati pregled i objasniti važnost sudjelovanja u programima odziva potražnje. Nadalje, potrebno je izraditi optimizacijski model sustava aktivnog kupca s ciljem maksimizacije ušteda sudjelovanjem u različitim programima odziva potražnje.



## 2. PREGLED PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

U radovima [1] i [2] dan je pregled HEMS-a. U [1] su opisani DRP-i i objašnjene su tehnike planiranja rada uređaja u HEMS-u. Dok su autori u [2] dali pregled arhitekture i infrastrukture HEMS-a, uz osvrt na rezultate, na osnovu pregleda radova. Naime, rezultati pokazuju da bi se operativni troškovi električne energije mogli smanjiti za 23.1% te bi se vršno opterećenje moglo smanjiti za 29.6% koristeći HEMS. Autori u [3] predstavljaju vrste DRP-a koji postoje i tehnike optimizacije koje se koriste kod DRP-a. U radu [4] dokazan je važnost upravljanja potražnjom. Uspoređeno je upravljanje potražnjom (*engl. Demand Management – DM*) i upravljanje proizvodnjom električne energije iz obnovljivih izvora u kombinaciji s

baterijskim sustavom pohrane, gdje se u obzir kao kriterij uzimat ušteda na godišnjem računu za električnu energiju stambene mikromreže koja se opskrbljuje s dva izvora energije i opremljena je električnim vozilom. Rezultati ovog rada pokazuju da u nekim određenim uvjetima upravljanje potražnjom može biti jednako vrijedno kao i upravljanje proizvodnjom električne energije.

Pregled HEMS-a s proizvodnjom energije iz obnovljivih izvora opisano je u radu [5]. Proveden je eksperiment pomoću metode upravljanja energijom koja optimizira troškove energije sustava ovisno o danim podacima tarife prema vremenu korištenja (*engl. Time-of-Use – TOU*). Rezultati pokazuju da se baterija punila u razdobljima nižih cijena električne energije, a pri višim cijenama baterija se praznila te je korištena energija iz fotonaponske elektrane da se pokrije potrošnja električne energije. U radu [6] dan je matematički model za upravljanje električnom energijom u kućanstvima. Model je razvijen na osnovu mješovitog cjelobrojnog linearnog programiranja (*engl. Mixed-Integer Linear Programming – MILP*). Prilikom razvoja optimizacijskog modela autori su u obzir uzeli unutarnju temperaturu prostora, temperaturu tople vode, male kućanske uređaje, sustav za pohranu električne energije i punionicu električnog vozila. Nadalje, autori u [7] prikazali su kako je upravljano punjenje i pražnjenje baterije električnog vozila koje je spojeno na fotonaponsku elektranu i kućnu instalaciju. Rezultati pokazuju da su se ostvarila poboljšanja ako dostupnost sunčevog zračenja nije premala u odnosu na potrebe za energijom električnog automobila. U [8] objašnjeni su hibridni sustavi obnovljivih izvora energije (*engl. Hybrid renewable energy systems – HRES*) i mikro kogeneracija temeljena na obnovljivim izvorima energije. Rezultati pokazuju da Stirling-ov motor za mikro kogeneraciju i fotonaponski termalni kolektor (*engl. Photovoltaic-Thermal Collector – PVT*) imaju najveći potencijal za korištenje obnovljivih izvora energije u kogeneraciji u kućanstvima i zgradama.

Tehnološki pristupi pametnim kućama opisani su u radu [9]. Ovaj rad pruža pregled karakteristika i trenutni razvoj sustava pametnih kuća (*engl. Smart Home System – SHS*) te daje uvid u najnoviju hardversku opremu za kućne sustave. Također, u radu je prikazano jedanaest glavnih tehnoloških pristupa. Autori su zaključili da će aplikacije za pametne telefone imati ključnu ulogu u budućnosti razvoja pametnih kuća zbog jednostavne dostupnosti i bolje funkcionalnosti.

Sudjelovanje aktivnih kupaca u elektroenergetskom sustavu je objašnjeno u [10]. Autori su identificirali četiri tipa dizajna upravljanja, gdje prvi karakterizira funkcija ulaganja tako da energetske zajednice smanjuj prepreke ulaganju i povećavaju kapital povjerenja, a ostala tri karakterizira funkcija usklađivanja i upravljanja energetske sredstvima tako da se šalju cjenovni signali s vele tržišta kako bi potrošači sami prilagodili svoja energetska sredstva. U radu [11] može se pronaći što je to koncept SG-a te što su prednosti i ciljevi. Također, obrazložene su metode optimizacije koje su prilagođene za planiranje rada kućanskih uređaja u pametnim kućama.

## **3. SUSTAV UPRAVLJANJA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM**

### **3.1. Općenito o sustavu upravljanja električnom energijom**

Zbog povećanja potražnje za električnom energijom i povećanja broja aktivnih kupaca potreban je koncept SG-a. SG mora biti samoodrživ i interaktivan sustav koji omogućuje integraciju distribuiranih izvora električne energije i sustava za pohranu električne energije. SG se temelji na pametnim uređajima i dvosmjernoj komunikaciji između opskrbljivača električne energije i aktivnih kupaca, što se smatra ključnom primjenom SG-a za održavanje pouzdanosti sustava i ravnoteže potrošnje električne energije na strani aktivnih kupaca. Ostale primjene SG-a su punjene i pražnjenje električnih vozila, distribuirana proizvodnja električne energije s pohranom i integracija na tržište električne energije. Za olakšavanje upravljanja potražnjom u kućanstvima koristi se HEMS, prema [5].

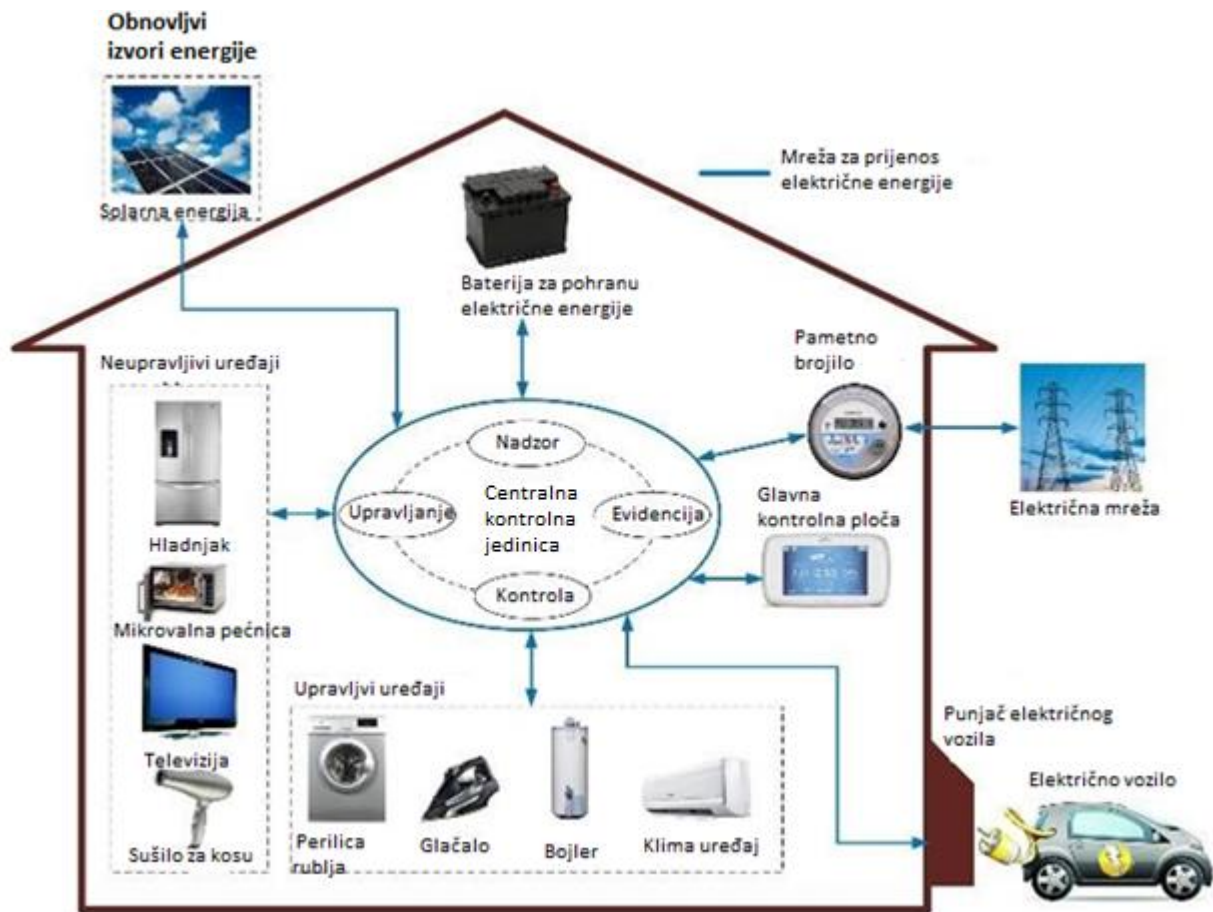
Kod SG-a se koriste pametna brojila koja omogućuju dvosmjernu komunikaciju između opskrbljivača električne energije i potrošača. Korištenje pametnih brojila pruža mogućnost ekonomskih poticaja za pametne kuće kako bi upravljale resursima s potrošačke strane tako da raspoređuju potrošnju električne energije tijekom vršnih opterećenja kao odgovor na promjene u cijeni električne energije. HEMS se definira kao sustav koji pruža usluge upravljanja uređajima kako bi učinkovito nadzirao i upravljao proizvodnjom, potrošnjom i pohranom električne energije u pametnim kućama, prema [2].

### **3.2. Arhitektura sustava upravljanja električnom energijom**

Stvarni podatci o potrošnji električne energije u realnom vremenu s kućanskih uređaja uključujući i upravljive i neupravljive kućanske uređaje, prikupljaju se putem centralne kontrolne jedinice HEMS-a kako bi se optimalno moglo upravljati uređajima. Pametno brojilo se koristi kao interaktivno komunikacijsko sučelje između opskrbljivača električne energije i pametne kuće. Takvo brojilo prima signal za odgovor na potražnju (*engl. Demand Response - DR*) od opskrbljivača električne energije kao ulaz u centralnu kontrolnu jedinicu HEMS-a te se može provesti optimizacija rasporeda rada kućanskih uređaja. Električno vozilo je poseban tip upravljivog uređaja s obzirom na raspored korištenja i načine mogućeg rada. Ono, osim što troši električnu energiju iz mreže kako bi ispunio zahtjeve korisnika, također može pružati rezervnu energiju za druge kućanske uređaje, prema [2].

Trenutno se u kućanstvima najčešće koristi električna energija proizvedena iz fotonaponskog sustava. Korištenjem energije iz obnovljivih izvora omogućuje se pametnim kućama da se ne

moraju oslanjati samo na energiju iz distribucijske mreže. Zbog toga što je energija iz obnovljivih izvora nepredvidljiva, koriste se uređaji za pohranu energije koji imaju važnu ulogu u poboljšanju kvalitete energije i energetske učinkovitosti, ali i u održavanju pouzdanosti elektroenergetskog sustava, prema [2].



**Slika 3.1.** Arhitektura sustava upravljanja električnom energijom u kućanstvu [12]

U cilju ostvarivanja ušteda i sudjelovanja u DRP-ima, HEMS treba biti što fleksibilniji u upravljanju i kontroli pametnih kućanski uređaja, obnovljivih izvora energije i sustava za pohranu energije. Usluge poput pružanja informacija u stvarnom vremenu o potrošnji energije i cijeni energije mogu se potrošačima pružiti na temelju HEMS-a. Korisnici u kućanstvu mogu putem grafičkog sučelja definirati vlastite preferencije rada uređaja u kućanstvu. Pet glavnih funkcionalnih HEMS-a su: nadzor, zapisivanje, kontrola, upravljanje i alarm, prema [2].

Nadzor služi kako bi omogućio jednostavan pristup informacijama u stvarnom vremenu o potrošnji energije i omogućuje korisnicima da se usredotoče na uštedu energije. Nadalje, pruža informacije o radu kućanskih uređaja i njihovom energetske statusu, prema [2].

Zapisivanje je proces sakupljanja i pohranjivanja podataka o količini potrošene električne energije kućanskih uređaja, proizvodnji iz distribuiranih izvora energije i stanju sustava za pohranu energije, prema [2]

Kod kontrole razlikujemo dva tipa kontrole, a to su izravna kontrola i daljinska kontrola. Izravna kontrola se odvija unutar kuće na način da korisnik izravno podešava željenu temperaturu na termostatu, uključuje ili isključuje rasvjetu u kući te može izravno paliti kućanske uređaje. Kod izravne kontrole nije potreban internet kako bi se uređaji kontrolirali. Daljinska kontrola se odnosi na mogućnost korisnika da putem prijenosnog računala ili pametnog telefona izvan kuće pristupaju online praćenju i upravljanju uređajima u kućanstvu. Kod daljinske kontrole je bitan pristup internetu kako bi uređaji bili povezani, prema [2].

Upravljanje je zapravo najvažnija funkcija HEMS-a jer provodi učinkovito korištenje električne energije u pametnoj kući. Obuhvaća niz usluga koje uključuju upravljanje obnovljivim izvorima energije, upravljanje sustavima za pohranu energije, upravljanje kućanskim uređajima, upravljanje električnim vozilima, prema [2].



**Slika 3.2.** Baterijski sustav za pohranu električne energije u kućanstvu [13]

Alarm služi da se automatski aktivira i šalje obavijest u centralnu kontrolnu jedinicu HEMS-a s informacijama do kakve je nepravilnosti ili kvara došlo i mjestu kvara, prema [2].

### 3.3. Infrastruktura sustava upravljanja električnom energijom

Unutar infrastrukture HEMS-a nalazi se centralna kontrolna jedinica, pametna brojila, komunikacijski i mrežni sustavi te drugi pametni uređaji, prema [2].

Centralna kontrolna jedinica HEMS-a je jezgra HEMS-a i služi za provođenje pametnog upravljanje energijom na način da može upravljati i kontrolirati rad uređaja u kućanstvu i može upravljati proizvodnjom iz obnovljivih izvora (ako je moguće). Glavne funkcije su: 1) primanje velike količine podataka poslanih od strane pametnog brojila i prikaza putem grafičkog sučelja. Naredbe izdane od strane potrošača šalju se svim kućanskim uređajima, a kao rezultat toga postiže se automatski odgovor na potražnju, 2) grafičko sučelje koje podržava stvarno vrijeme pregledavanja potrošnje električne energije, online praćenje, postavljanje zadataka i druge funkcije radi unapređenja korištenja električne energije, 3) kontrola količine vode, električne energije i plina u kućanstvu i 4) integracija sustava koji proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora, uređaja za pohranu električne energije i električnih vozila. [2]



**Slika 3.3.** Centralna kontrolna jedinica sustava upravljanja električnom energijom [14]

Pametna brojila, kako je već navedeno, mjere potrošnju električne energije kućanstva te putem dvosmjerne komunikacije pružaju dodatne informacije opskrbljivačima električne energije kao i kupcima električne energije. Kao rezultat toga, kupci električne energije mogu donositi odluke o rasporedu korištenja kućanskih uređaja, sustava za pohranu energije i sustava za proizvodnju energije iz obnovljivih izvora. Glavne funkcije pametnih brojila su: 1) mjerenje višestrukih perioda i višestrukih načina naplate aktivne i reaktivne (jalove) energije, 2) podrška dvosmjernoj komunikaciji, slanje podataka i prihvaćanje podataka, 3) omogućavanje odgovora na zahtjeve za

postizanje smanjenja opterećenja i komunikacija s pametnim brojilima tijekom tranzicije u otočni pogon kada dođe do kvara na glavnoj elektroenergetskoj mreži i 4) prikupljanje podataka s pametnih plinskih brojila, vodovodnih brojila i drugih raznovrsnih dodatnih usluga, prema [2].



**Slika 3.4.** Pametno brojilo [15]

Različite komunikacijske tehnologije poput komunikacije putem električne mreže, ZigBee-a, BACnet-a i Bluetooth-a primjenjuju se u HEMS-u. Za komunikaciju između čovjeka i HEMS-a koristi se grafičko sučelje. Na temelju analize različitih komunikacijskih tehnologija odabran je ZigBee. To je bežična komunikacijska tehnologija koja se brzo razvila u posljednjih nekoliko godina te ima raspon frekvencije od 2,4 GHz do 2,4835 GHz. ZigBee ima nisku potrošnju energije, nisku cijenu i može podržavati veliki broj različitih karakteristika mrežnih čvorova, stoga se može koristiti u širokom rasponu industrijskih primjena, prema [2].



**Slika 3.5.** ZigBee [16]

Kućanski uređaji i sustavi za pohranu električne energije mogu se analizirati i modelirati na temelju karakteristika uređaja i načina korištenja. Pametni kućanski uređaji se mogu podijeliti u dvije kategorije: 1) neupravljivi kućanski uređaji kao što su hladnjak, printer, mikrovalna pećnica, televizor i sušilo za kosu i 2) upravljivi kućanski uređaji kao što su perilica rublja, klima uređaj, bojler i električna vozila. Upravljivi kućanski uređaji su oni koji mogu obaviti određeni zadatak bez prisustva korisnika, dok neupravljivi uređaji ovise o ručnoj kontroli kako bi obavili zadatak i potrebni su samo kada su korisnici kod kuće, osim hladnjaka koji radi stalno jer je potrebno da stalno bude uključen, prema [2].



**Slika 3.6.** Pametni klima uređaj – upravljivi kućanski uređaj [17]



**Slika 3.7.** Električno vozilo [18]





**Slika 3.8.** Pametni hladnjak – neupravljivi kućanski uređaj [19]

## **4. PROGRAMI ODZIVA POTRAŽNJE I TEHNIKE PLANIRANJA RADA UREĐAJA**

U okviru DRP-a razlikuju se tri opcije kojima potrošači mogu utjecati na smanjenje troškova. U prvoj opciji, korisnici mogu smanjiti potrošnju električne energije tijekom kritičnih vršnih razdoblja kada su cijene visoke na način da povećaju temperaturu klima uređaja (u ljetnom razdoblju) ili hladnjaka, ili da smanje temperaturu vode u bojleru jer će na taj način biti potrebno manje električne energije za pokrivanje potrošnje tih uređaja. Ova opcija ima privremeni utjecaj na razinu udobnosti, ali pomaže pri smanjenju potrošnje električne energije. U drugoj opciji, korisnici mogu odgovoriti na visoke cijene električne energije tako da premjeste korištenje određenih kućanskih uređaja s vršnih na izvan vršna razdoblja. U trećoj opciji, korisnik koristi električnu energiju iz distribuiranih izvora električne energije. Korisnici koji sudjeluju u DRP-ima mogu smanjiti troškove električne energije smanjenjem potrošnje tijekom vršnih razdoblja. Vršna razdoblja su razdoblja kada postoji najveća potrošnja električne energije te dnevni dijagram opterećenja u vršnim razdobljima poprima maksimalne vrijednosti, prema [1].

### **4.1. Programi koji se temelje na poticaju**

DRP-i temeljeni na poticajima pružaju financijske poticaje korisnicima koji žele smanjiti i premjestiti svoju potrošnju tijekom vršnih razdoblja. Programi temeljeni na poticajima uključuju programe izravnog opterećenja, programe ograničenja ili prekida opterećenja i programe ponude potražnje, prema [1].

Program izravnog opterećenja omogućuje daljinsko upravljanje kućanskim uređajima korisnika od strane opskrbljivača putem signala koji uključuju/isključuju uređaje u kratkom roku na temelju ugovora između opskrbljivača energije i korisnika. Ovim programom se upravljaju bojleri, klima uređaji i javna rasvjeta, prema [1].

U programu ograničenja ili prekida opterećenja dogovara se cijena električne energije između opskrbljivača i velikih industrija ili kućanstava koja isključuju ili premještaju potrošnju u izvan vršna razdoblja tijekom izvanrednih situacija (električni kvarovi, povećana potrošnja, nestabilnost generatora). Ograničenje ili prekid opterećenja postiže se slanjem signala za ograničenje ili prekid opterećenja od strane opskrbljivača, a korisnici dobivaju poticajne isplate. Ovaj program pomaže stabilizaciji mreže tijekom izvanrednih situacija, prema [1].

Program ponude potražnje temelji se na ponudama potrošača električne energije. Korisnici licitiraju za određeno smanjenje opterećenja na veleprodajnom tržištu električne energije, pri čemu

se licitacija obično provodi dan unaprijed. Korisnici koji sudjeluju u programima podnose ponude za smanjenje vršne snage u određenom vremenu i budu plaćeni prema svojoj ponudi ako se stvarni iznos uštede snage osigura prema dostavljenoj ponudi. Uz to nema financijskih kazni ako korisnik ne uspije smanjiti potrošnju energije prema zahtjevu. Ovi programi pomažu u održavanju pouzdanosti mreže tako da smanje rizik od prekida opskrbe energijom ili preopterećenja, prema [1].

## 4.2. Programi koji se temelje na cijeni

Programi temeljeni na cijeni uključuju sve tarife gdje korisnici dobivaju financijske pogodnosti ili popuste zbog smanjenja opterećenja u određenim vremenima. Korisnici dobrovoljno korigiraju potrošnju električne energije u svojim kućanstvima na temelju cijena električne energije. Kod programa koji se temelje na cijeni razlikuju se sljedeće tarife: TOU, naplata u stvarnom vremenu (*engl. Real-time pricing -RTP*) ili naplata u vršnim razdobljima (*engl. Critical peak pricing -CPP*). Ti programi nude različite cijene u različitim vremenima tijekom vršnih razdoblja i izvan vršnih razdoblja, prema [1].

Kod TOU programa cijene električne energije su podijeljene na vremenske intervale. Opskrbljivači koriste TOU programe kako bi postavljali cijene u vršnim i izvan vršnim razdobljima. U tom slučaju cijene električne energije su veće tijekom vršnih razdoblja opterećenja, a niže su tijekom izvan vršnih razdoblja opterećenja. Na taj način potiču potrošače da premjeste rad kućanskih uređaja prema povećanju cijena kako bi uređaji radili kada je niža cijena električne energije, prema [1].

RTP program je program kod kojeg tijekom godine svaki sat može imati drugačiju cijenu električne energije. U vršnim razdobljima budu veće cijene električne energije, a u izvan vršnim budu niže cijene, ali cijena nije ista svaki sat. Mnogi opskrbljivači električne energije smatraju da su RTP programi najučinkovitiji DRP-mi jer su fleksibilni i prihvatljivi su na tržištu električne energije, prema [1].

CPP program je program kojim se nagrađuju korisnici koji dobrovoljno kontroliraju i smanjuju potrošnju električne energije na način da premještaju rad uređaja u izvan vršna razdoblja. CPP se obično koristi preko ljeta kada dođe do značajnog povećanja potražnje za električnom energijom. CPP program ima opciju da potrošači dobiju povrat novca koji odgovara iznosu smanjenja električne energije, tj. dobiju nagradu ako smanje potrošnju u vršnom razdoblju, prema [1].

### 4.3. Usporedba različitih programa odziva potražnje

U tablici 4.1 prikazana je usporedba različitih DRP-a uz prikaz prednosti i nedostataka.

**Tablica 4.1:** Usporedba različitih programa odziva potražnje [1]

<i>Stambeni DRP</i>	<i>Vrijeme odgovora i aktivacije</i>	<i>Prednosti</i>	<i>Nedostatci</i>
<i>RTP</i>	<i>Cijena električne energije se mijenjanja svaki sat</i>	<i>Krajnji korisnik može smanjiti trošak električne energije u skladu s promjenama cijena</i>	<i>Korisnici koji žele smanjiti račun za električnu energiju moraju odmah reagirati</i>
<i>TOU</i>	<i>Cijene električne energije su podijeljene na vremenska razdoblja</i>	<i>Cijene su visoke tijekom vršnih sati i niske izvan vršnih sati, mogućnost premještanja opterećenja</i>	<i>Ne zna se koja će cijena električne energije biti u isto vrijeme sutra dan</i>
<i>CPP</i>	<i>Cijene kod krajnjih korisnika se znatno povećavaju tijekom vršnih razdoblja opterećenja</i>	<i>Krajnji korisnici dobivaju obavijest tijekom određenih razdoblja kako bi ostvarili popust</i>	<i>Korisnici trebaju ograničiti ili odgoditi potrošnju tijekom određenog razdoblja</i>
<i>Izravni program opterećenja</i>	<i>Cijene se dogovaraju između opskrbljivača i krajnjih korisnika električne energije tako da potpišu ugovor</i>	<i>Krajnji korisnik može smanjiti trošak ako ušteda energije odgovara određenom zahtjevu</i>	<i>Opskrbljivači mogu daljinski upravljati uređajima aktivnih kupaca kako bi mogli smanjiti potrošnju energije u vršnim razdobljima</i>
<i>Programi ograničenja ili prekida opterećenja</i>	<i>Cijene električne energije se dogovaraju između opskrbljivača i kupaca</i>	<i>Korisnici reaguju u određenom vremenu radi ostvarivanja popusta</i>	<i>Korisnici trebaju isključiti ili premjestiti svoje opterećenje tijekom izvanrednih situacija</i>
<i>Program ponude potražnje</i>	<i>Kupci nude određeno smanjenje opterećenja na veleprodajnom tržištu električne energije i licitiraju dan unaprijed</i>	<i>Opskrbljivači plaćaju korisnicima prema ponudi ako ušteda energije odgovara određenom zahtjevu</i>	<i>Korisnici trebaju ograničiti ili odgoditi potrošnju tijekom vršnih razdoblja opterećenja</i>

Različiti DRP-i u kućanstvima koji su prikazani u tablici 3.1 služe za to kako bi pomogli potrošačima da uštede novac, smanje potrošnju električne energije u vršnim razdobljima opterećenja i smanje investicije u infrastrukturu opskrbljivača električnom energijom, prema [1].

## 4.4. Tehnike planiranja rada uređaja

Korištenjem HEMS-a, korisnici koji sudjeluju u DRP-ima mogu smanjiti troškove električne energije ako smanje potrošnju tijekom vršnih razdoblja i premjeste opterećenja s vršnih u izvan vršna razdoblja. Različite tehnike planiranja rada uređaja su korištene u HEMS-u kako bi se omogućilo optimalno korištenje energije, a to su: algoritam temeljen na pravilima, umjetnoj inteligenciji (*engl. Artificial intelligence – AI*) i optimizacijskim tehnikama, prema [1].

Algoritam temeljen na pravilima koristi se za optimizaciju korištenja električne energije, uz osiguravanje ušteda i udobnosti korisnika unutar kuće, tako da premješta potrošnju električne energije na razdoblja s nižom cijenom prema unaprijed određenim pravilima, prema [1].

Različite AI tehnike su korištene za optimizaciju rasporeda rada kućanskih uređaja u pametnim kućama. Nadalje, poboljšavaju učinkovitost, prilagodljivost i sposobnost donošenja odluka za rad kućanskih uređaja u HEMS-u. AI tehnike temelje se na umjetnim neuronskim mrežama (*engl. Artificial neural network – ANN*), kontroli neizrazite logike (*engl. Fuzzy logic control – FLC*) i prilagodljivom neuronskom sustavu zaključavanja (*engl. Adaptive neural fuzzy inference system – ANFIS*), prema [1].

Optimizacija je pristup rješavanju problema kako bi se pronašlo optimalno rješenje. Prilikom razvoja optimizacijskog modela potrebno je definirati funkciju cilja s određenim ograničenjima. Funkcija cilja postavlja se kako bi se postigao određeni cilj (npr. minimizirao trošak električne energije). Ograničenja su uvjeti koji moraju biti ispunjeni kako bi rješenje bilo prihvatljivo. Razne tehnike optimizacije se koriste kako bi se pomoglo krajnjim korisnicima u stvaranju optimalnog rasporeda rada kućanskih uređaja na temelju različitih DRP-a i postavki udobnosti. Metode optimizacije se mogu podijeliti na matematičke metode optimizacije i heurističke metode optimizacije, prema [1].

### 4.4.1. Model prediktivnog upravljanja

Model prediktivnog upravljanja (*engl. Model predictive control – MPC*) se koristi za rješavanje problema optimalnog korištenja energije u kućanstvima uzimajući u obzir buduća predviđanja ulaznih podataka kao što su zahtjevi za opterećenjem, proizvodnja energije iz obnovljivih izvora i cijena električne energije u stvarnom vremenu. MPC zahtjeva precizan dinamički model sustava, funkciju cilja s ograničenjima i algoritam optimizacije. Algoritam se često temelji na matematičkim metodama optimizacije, linearnom programiranju (*engl. Linear programming – LP*) i nelinearnom programiranju (*engl. Nonlinear programming – NLP*), prema [5].

#### 4.4.2. Podržano učenje

Podržano učenje (*engl. Reinforcement learning – RL*) je vrsta strojnog učenja koje predstavlja skup metoda koje uče prepoznati obrasce, na temelju navika aktivnih kupaca, skupljajući njihove podatke o potrošnji električne energije. Te metode koriste obrasce za predviđanje ili donošenje odluka. Razlikuju se tri vrste strojnog učenja: nadgledano učenje, nenadgledano učenje i učenje potkrjepljivanjem. RL je algoritam bez modela koji se može prilagoditi nesigurnom okruženju i optimalno upravljati sustavom putem podataka iz prošlosti (npr. podatci o potrošnji i proizvodnji električne energije kupaca) i komunikacije sa sustavom. Zbog povećanja količine podataka i složenosti određenih sustava, RL se primjenjuje u HEMS-u, prema [5].

#### 4.4.3. Usporedba strojnog učenja i matematičkih metoda optimizacije

Kod strojnog učenja poput RL, zadatak je pronaći prirodne uzorke i poveznice u podacima i na temelju toga donositi odluke i predviđanja. Strojno učenje se primjenjuje svakodnevno u medicini, trgovini, predviđanju potrošnje električne energije itd. Strojno učenje se koristi kako bi se iz velikog broja podataka ponudilo ono što odgovara korisnicima (trgovci ga koriste da steknu uvid u navike kupaca, koristi se kada se nešto traži na internetu i od velikog broja mogućnosti preporuči onu koja bi korisniku najviše odgovarala). Strojno učenje se koristi kada postoje neki zadatci ili problemi koji podrazumijevaju veliki broj podataka i varijabli, a ne postoje točno razrađene formule, modeli ili jednadžbe kojima bi se to riješilo, prema [20].

LP, koje se može primijeniti u MPC-u, se odnosi na primjenu različitih linearnih jednadžbi ili ne jednadžbi kod procesa rješavanja određenih problema pomoću određenog programa kako bi se postiglo optimalno rješenje. LP je matematička metoda koja se primjenjuje koristeći određene matematičke modele i algoritme s ciljem minimiziranja ili maksimiziranja neke linearne funkcije, te da se tako pronađe optimalno rješenje koristeći se računalnim programom. Osnovne komponente linearnog programiranja su funkcija cilja i ograničenja. Ako postoji nekakav problem koji se mora riješiti, i ako postoji mogućnost matematičkog zapisa tog problema on se rješava prvenstveno pomoću LP. Ako nije moguće taj problem riješiti pomoću LP, on se rješava pomoću NLP, MILP ili mješovitog cjelobrojnog nelinearnog programiranja (*engl. Mixed-Integer Nonlinear Programming – MINLP*). MILP se dobije tako da se kod već postojećih linearnih problema uvode cjelobrojne varijable, prema [21].

## 5. MATEMATIČKI MODEL AKTIVNOG KUPCA ZA SUDJELOVANJE U RAZLIČITIM PROGRAMIMA ODZIVA POTRAŽNJE

Cilj modela je minimizirati troškove električne energije aktivnog kupca sudjelovanjem u različitim programima odziva potražnje. Funkcija cilja je minimizacija troškova tako da se električna energija iz fotonaponske elektrane i baterije iskoristi za rad upravljivih kućanskih uređaja, a ne proda u mrežu.

Optimizacijski problem može se zapisati:

Minimiziraj:

- *Kupljena električna energija – prodana električna energija*

Ograničenja:

- *Balans električne snage*
- *Ograničenje maksimalne snage iz mreže*
- *Ograničenje maksimalne snage u mrežu*
- *Stanje napunjenosti baterijskog spremnika*
- *Stanje napunjenosti baterijskog spremnika električnog automobila*
- *Ograničenje temperature tople vode u bojleru*
- *Ograničenje temperature u prostoru*

Minimizacija troškova je definirana relacijom (5-1):

$$\min \sum_{t=1}^{n_t} (Pk_t \cdot ck_t - Pp_t \cdot cp_t) \quad (5-1)$$

gdje je:

- $n_t$ - vrijeme simulacije
- $Pk_t$ - kupljena električna energija iz mreže u vremenskom koraku  $t$  [kWh]
- $Pp_t$ - prodana električna energija u mrežu u vremenskom koraku  $t$  [kWh]
- $ck_t$ - cijena kupljene električne energije u vremenskom koraku  $t$  [€/kWh]
- $cp_t$ - cijena prodane električne energije u vremenskom koraku  $t$  [€/kWh].

U relaciji (5-1) postoje dva člana, odnosno umnoška. Prvi umnožak je umnožak kupljene električne energije iz mreže i cijene kupljene električne energije u vremenskom koraku  $t$  koji predstavlja trošak pri kupovini električne energije iz mreže. Drugi je umnožak prodane električne

energije u mrežu i cijene prodane električne energije u vremenskom koraku  $t$  koji predstavlja prihod pri prodaji električne energije. Vremenski korak je 1 h s horizontom planiranja 24 h u budućnost.

Jednadžba balansa električne snage definirana je relacijom (5-2):

$$De_t - Ge_t + Pcha_t \cdot b_{cha} + Pch_t - Pdcha_t \cdot b_{cha} - Pdch_t + Persud \cdot Pers_t + Perrub \cdot Perr_t + Phw \cdot Phwb_t + Phvacc_t + Phvach_t = Pk_t - Pp_t \quad (5-2)$$

gdje je:

- $De_t$  – potražnja snage kućanstva u vremenskom koraku  $t$  [kW]
- $Ge_t$  – snaga dobivena iz fotonaponske elektrane u vremenskom koraku  $t$  [kW]
- $Pcha_t$  – snaga potrebna za punjenje baterijskog spremnika električnog automobila u vremenskom koraku  $t$  [kW]
- $Pch_t$  – snaga potrebna za punjenje baterijskog spremnika u vremenskom koraku  $t$  [kW]
- $Pdcha_t$  – snaga dobivena pražnjenjem baterijskog spremnika električnog automobila u vremenskom koraku  $t$  [kW]
- $Pdch_t$  – snaga dobivena pražnjenjem baterijskog spremnika u vremenskom koraku  $t$  [kW]
- $Persud$  – maksimalna snaga perilice suđa [kW]
- $Pers_t$  – binarna varijabla odluke za uključenje perilice suđa u vremenskom koraku  $t$
- $Perrub$  – maksimalna snaga perilice rublja [kW]
- $Perr_t$  – binarna varijabla odluke za uključenje perilice rublja u vremenskom koraku  $t$
- $Phw$  – maksimalna snaga bojlera [kW]
- $Phwb_t$  – binarna varijabla odluke za uključenje bojlera u vremenskom koraku  $t$
- $Phvacc_t$  – snaga klima uređaja potrebna za hlađenje prostora u vremenskom koraku  $t$  [kW]
- $Phvach_t$  – snaga klima uređaja potrebna za grijanje prostora u vremenskom koraku  $t$  [kW]
- $b_{cha}$  – binarni parametar koji određuje je li automobil spojen na mrežu (stanje 1) ili nije spojen (stanje 0).

Procjena stanja napunjenosti baterijskog spremnika (*engl. State of Charge – SOC*) određuje se relacijom (5-3) za  $t=1$ , tj. za prvi sat na početku svakog horizonta planiranja:

$$SOC_t = SOC_0 + Pch_t \cdot \eta_c - \frac{Pdch_t}{\eta_d} \quad (5-3)$$

Za ostale sate u danu (ne uzimajući u obzir prvi sat) vrijedit će relacija (5-4):



$$SOC_t = SOC_{t-1} + Pch_t \cdot \eta_c - \frac{Pdch_t}{\eta_d} \quad (5-4)$$

gdje je:

- $SOC_t$  – stanje napunjenosti baterijskog spremnika na kraju vremenskog koraka  $t$  [kWh]
- $SOC_0$  – stanje napunjenosti baterijskog spremnika na početku prvog vremenskog koraka  $t_1$  [kWh]
- $SOC_{t-1}$  – stanje napunjenosti baterijskog spremnika za prošli vremenski korak  $t-1$  [kWh]
- $\eta_c$  – koeficijent učinkovitosti punjenja baterijskog spremnika
- $\eta_d$  – koeficijent učinkovitosti pražnjenja baterijskog spremnika.

Ograničenje maksimalne trenutne snage kupljene iz mreže u vremenskom koraku  $t$  definirano je relacijom (5-5):

$$0 \leq Pk_t \leq Pk_{max} \quad (5-5)$$

Ograničenje maksimalne trenutne snage prodane u mrežu u vremenskom koraku  $t$  definirano je relacijom (5-6):

$$0 \leq Pp_t \leq Pp_{max} \quad (5-6)$$

Ograničenje napunjenosti baterijskog spremnika definirano je relacijom (5-7):

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (5-7)$$

Ograničenje za perilicu rublja definirano je relacijom (5-8):

$$\sum_{k1}^{k2} Perr_t = 1 \quad (5-8)$$

Ograničenje za perilicu suđa definirano je relacijom (5-9):

$$\sum_{k3}^{k4} Pers_t = 1 \quad (5-9)$$

gdje je:

- $k1, k2$  – raspon vremena u kojem će se perilica rublja upaliti i raditi jedan sat
- $k3, k4$  – raspon vremena u kojem će se perilica suđa upaliti i raditi jedan sat.

Procjena unutrašnje temperature prostora u prvom vremenskom koraku  $t_1$  definirana je relacijom (5-10):

$$Tin_t = Tin_{init} + \alpha \cdot (Tout_t - Tin_{init}) + \beta_h \cdot Phvac_t - \beta_c \cdot Pachvc_t \quad (5-10)$$

Procjena unutrašnje temperature prostora za ostale vremenske korake definirana je relacijom (5-11):

$$Tin_t = Tin_{t-1} + \alpha \cdot (Tout_t - Tin_{t-1}) + \beta_h \cdot Phvach_t - \beta_c \cdot Phvacc_t \quad (5-11)$$

gdje je:

- $Tin_t$  – unutrašnja temperatura prostora na kraju vremenskog koraka  $t$  [°C]
- $Tin_{t-1}$  – unutrašnja temperatura prostora za prošli vremenski korak  $t-1$  [°C]
- $\alpha$  – termalna karakteristika klima uređaja
- $Tout_t$  – vanjska temperatura u vremenskom koraku  $t$  [°C]
- $Tin_{init}$  – početna temperatura prostora na početku prvog vremenskog koraka  $t_1$  [°C]
- $\beta_h$  – način rada klima uređaja, grijanje
- $\beta_c$  – način rada klima uređaja, hlađenje.

Ograničenje temperature koju klima uređaj mora održavati u prostoru definirano je relacijom (5-12):

$$Tin_{min} \leq Tin_t \leq Tin_{max} \quad (5-12)$$

Ograničenje snage grijanja klima uređaja definirano je relacijom (5-13):

$$Phvach_t = Phvac_{max} \cdot hvachb_t \quad (5-13)$$

Ograničenje snage hlađenja klima uređaja definirano je relacijom (5-14):

$$Phvacc_t = Phvac_{max} \cdot Phvaccb_t \quad (5-14)$$

gdje prema relaciji (5-15) vrijedi:

$$Phvachb_t + Phvaccb_t \leq 1 \quad (5-15)$$

Ukupna snaga klima uređaja je definirana relacijom (5-16):

$$Phvach_t + Phvacc_t = Phvac_{max} \quad (5-16)$$

Procjena temperature tople vode u bojleru u prvom vremenskom koraku  $t_1$  definirano je relacijom (5-17):

$$Thw_t = Thw_{init} \cdot e^{-\left(\frac{1}{R \cdot C}\right) \cdot \Delta t} + (G \cdot R \cdot Tin_{init} + B_2 \cdot R \cdot Thw_{in} + Q_t \cdot R) \cdot (1 - e^{-\left(\frac{1}{R \cdot C}\right) \cdot \Delta t}) \quad (5-17)$$

Procjena temperature tople vode u bojleru za ostale sate definirana je relacijom (5-18):

$$Thw_t = Thw_{t-1} \cdot e^{-\left(\frac{1}{R \cdot c}\right) \cdot \Delta t} + (G \cdot R \cdot Tininitb + B_2 \cdot R \cdot Thwiin + Q_t \cdot R) \cdot (1 - e^{-\left(\frac{1}{R \cdot c}\right) \cdot \Delta t}) \quad (5-18)$$

gdje je:

- $Tininitb$  – temperatura prostora u kojoj se nalazi bojler tople vode [°C]
- $Thw_t$  – temperatura vode u bojleru na kraju vremenskog koraka  $t$  [°C]
- $Thw_{t-1}$  – temperatura vode u bojleru u prošlom vremenskom koraku  $t-1$  [°C]
- $Thwinit$  – početna temperatura vode u bojleru [°C]
- $Thwiin$  – temperatura ulazne vode [°C]
- $Q_t$  – količina utrošene energije za grijanje vode [MJ/t]
- $G = \frac{SA}{R}$
- $SA$  – površina spremnika [m<sup>2</sup>]
- $R$  – termalna otpornost izolacije spremnika
- $B_2 = 8,34 \cdot F \cdot Cp$
- $C = V \cdot 8,34 \cdot C$
- $V$  – volumen [l]
- $F$  – protok tople vode [l/h]
- $Cp$  – specifični toplinski kapacitet vode [J/kg·K]
- $\Delta t$  – vremenski korak  $t$  [h].

Ograničenje temperature na koju se voda može zagrijati u bojleru definirano je relacijom (5-19):

$$Thw_{min} \leq Thw_t \leq Thw_{max} \quad (5-19)$$

Količina utrošene energije za grijanje vode definirana je relacijom (5-20):

$$Q_t = 3.4121 \cdot 1000 \cdot Phw \cdot Phwb_t \quad (5-20)$$

Procjena stanja napunjenosti za električni automobil za  $t=1$ , tj. za prvi sat na početku svakog horizonta planiranja definirana je relacijom (5-21):

$$SOCa_t = SOCa_0 + Pcha_t \cdot \eta_c \cdot b_{cha} - Pdcha_t \cdot \frac{1}{\eta_c} \cdot b_{cha} \quad (5-21)$$

Za ostale sate u danu vrijedit će relacija (5-22):

$$SOCa_t = SOCa_{t-1} + Pcha_t \cdot \eta_c \cdot b_{cha} - Pdcha_t \cdot \frac{1}{\eta_c} \cdot b_{cha} \quad (5-22)$$

gdje je:

- $SOCa_t$  - stanje napunjenosti baterijskog spremnika električnog automobila na kraju vremenskog koraka  $t$  [kWh]
- $SOCa_0$  - stanje napunjenosti baterijskog spremnika električnog automobila na početku prvog vremenskog koraka  $t_1$  [kWh]
- $SOCa_{t-1}$  - stanje napunjenosti baterijskog spremnika električnog automobila u prošlom vremenskom koraku  $t-1$  [kWh]

## 6. PRIMJENA PREDLOŽENOG MODELA AKTIVNOG KUPCA ZA SUDJELOVANJE U RAZLIČITIM PROGRAMIMA ODZIVA POTRAŽNJE

Optimizacijski model koji je predložen u radu razvijen je za dio DRP-a koji se temelje na cijeni. Provedene su simulacije s jednotarifnim modelom, dvotarifnim modelom i dinamičkim model naplate električne energije (cijena se mijenja svaki sat u danu).

### 6.1. Potrošnja električne energije aktivnog kupca

Mjerenjem je dobiven dnevni uzorak potrošnje električne energije aktivnog kupca. Potrošnja se odnosi samo na osnovnu potrošnju bez kućanskih uređaja koji se koriste u kućanstvu. Za potrošnju električne energije u kućanstvu za simulacije uzeti su podatci za dan 30.10.2021.

**Tablica 6.1.** Potrošnja električne energije po satu za dan 30.10.2021.

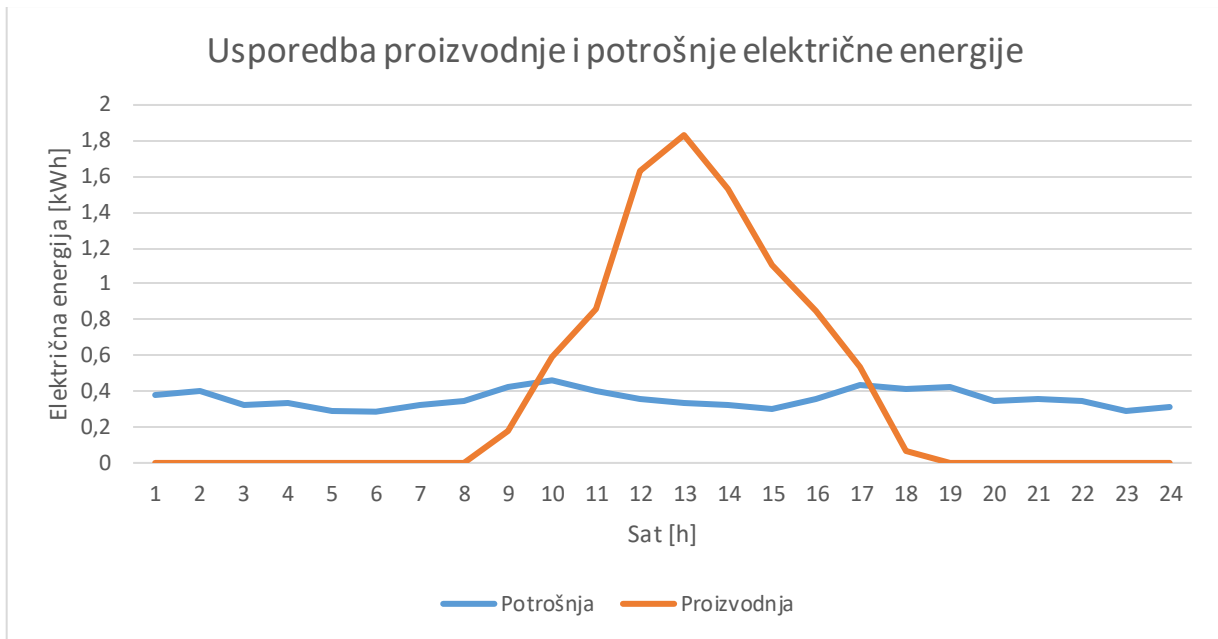
Sat u danu [h]:	Potrošnja električne energije po satu [kWh]:
1	0,382
2	0,404
3	0,321
4	0,337
5	0,292
6	0,286
7	0,321
8	0,341
9	0,429
10	0,461
11	0,406
12	0,356
13	0,335
14	0,329
15	0,298
16	0,353
17	0,436
18	0,410
19	0,423
20	0,344
21	0,357
22	0,341
23	0,290
24	0,316

## 6.2. Proizvodnja električne energije aktivnog kupca

Za potrebe provođenja simulacija potrebno je znati kolika je proizvodnja električne energije iz fotonaponske elektrane. Podatci za proizvodnju dobiveni su mjerenjem proizvodnje aktivnog kupca za dan 30.10.2021.

**Tablica 6.2.** Proizvodnja električne energije po satu za dan 30.10.2021.

Sat u danu [h]:	Proizvodnja električne energije po satu [kWh]:
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	0
8	0
9	0,180
10	0,592
11	0,860
12	1,634
13	1,832
14	1,532
15	1,102
16	0,846
17	0,533
18	0,072
19	0
20	0
21	0
22	0
23	0
24	0



**Slika 6.1.** Graf usporedbe proizvodnje i potrošnje električne energije za dan 30.10.2021.

Na slici 6.1. može se vidjeti graf na kojemu su prikazane i proizvodnja i potrošnja električne energije za dan 30.10.2021. godine. Može se vidjeti da je u razdoblju od 9 do 16 sati proizvodnja električne energije veća od osnovne potrošnje električne energije aktivnog kupca.

### 6.3. Cijene električne energije

Uz potrošnju i proizvodnju električne energije aktivnog kupca, cijene kupljene i prodane električne energije također se moraju definirati. Te cijene će se temeljiti na cijenama Hrvatske elektroprivrede (HEP) koji je glavni opskrbljivač električne energije u Hrvatskoj i cijenama s hrvatske burze električne energije CROPEX. Cijene će se definirati za jednotarifni model, dvotarifni model i dinamički model (cijena se mijenja svaki sat u danu). Cijene s CROPEX-a su uzete za dan 14.06.2023, prema [22].

**Tablica 6.3.** Cijene električne energije s CROPEX-a za dan 14.06.2023.

Sat u danu [h]	Cijena električne energije [€/kWh]
1	0,090
2	0,083
3	0,083
4	0,078
5	0,082
6	0,086
7	0,086
8	0,090
9	0,108
10	0,107
11	0,089
12	0,095
13	0,079
14	0,078
15	0,082
16	0,099
17	0,099
18	0,099
19	0,111
20	0,142
21	0,155
22	0,133
23	0,116
24	0,106



Kategorija		Tarifni model	Tarifni element							
			Radna energija [kWh]						Naknada za opskrbu [Mjeseč]	
			JT		VT		NT			
			Tarifne stavke							
		EUR	HRK	EUR	HRK	EUR	HRK	EUR	HRK	
Kućanstvo	Niski napon	Plavi	0,070276 (0,079412)	0,529495 (0,598329)	-	-	-	-	0,982 (1,110)	7,399 (8,361)
		Bijeli	-	-	0,074789 (0,084512)	0,563498 (0,636753)	0,036697 (0,041468)	0,276494 (0,312438)	0,982 (1,110)	7,399 (8,361)
		Crveni	-	-	0,074789 (0,084512)	0,563498 (0,636753)	0,036697 (0,041468)	0,276494 (0,312438)	0,982 (1,110)	7,399 (8,361)
		Crni	0,029000 (0,032770)	0,218501 (0,246906)	-	-	-	-	0,053 (0,060)	0,399 (0,451)

Slika 6.2. Tarifne stavke za kućanstvo [23]

Na slici 6.2. može se vidjeti koji sve tarifni modeli postoje u Hrvatskoj. Plavi tarifni model i bijeli tarifni model su modeli koji su standardni za upotrebu u kućanstvima. Plavi tarifni model ima samo jednu tarifu pa cijena navedena kod plavog tarifnog modela vrijedi za svaki sat tog dana. Kod bijelog tarifnog modela razlikuju se dvije tarife. Za ljetno razdoblje visoka tarifa traje od 8-22 sati, a niska tarifa od 22-8 sati. Za zimsko razdoblje visoka tarifa traje od 7-21 sati, a niska tarifa od 21-7 sati.

Kod izračuna cijene električne energije treba uzeti u obzir i tarifne stavke za distribuciju električne energije i tarifne stavke za prijenos električne energije te ih dodati cijenama za električnu energije navedenim na slici 6.2. Uz to, treba se dodati i „Naknada za obnovljive izvore i visokoučinkovitu kogeneraciju“ koja iznosi 0,013936 €/kWh i PDV.

Kategorija kupca		Tarifni model	Radna energija			Obracunsa vršna radna snaga [€/kW]	Prekomjerna jalova energija [€/kvarh]	Naknada za obračunsko mierno mjesto [€/mj]
			JT [€/kWh]	VT [€/kWh]	NT [€/kWh]			
			Tarifne stavke					
			1	2	3	4	5	6
Kućanstvo	Niski napon	Plavi	0,029199	-	-	-	-	1,540
		Bijeli	-	0,034508	0,015927	-	-	1,540
		Crveni	-	0,022563	0,010618	3,252	-	5,481
		Crni	0,018581	-	-	-	-	0,810

Slika 6.3. Tarifne stavke za distribuciju električne energije za kupce kategorije kućanstvo [24]

Kategorija kupca		Tarifni model	Radna energija			Obračunska vršna radna snaga	Prekomjerna jalova energija	Naknada za obračunsko mjesto
			JT	VT	NT			
			[€/kWh]	[€/kWh]	[€/kWh]	[€/kW]	[€/kvarh]	[€/m]
		Tarifne stavke						
		1	2	3	4	5	6	
Kućanstvo	Niski napon	Plavi	0,011945	-	-	-	-	
		Bijeli	-	0,017254	0,006636	-	-	
		Crveni	-	0,006636	0,002654	1,924	-	
		Cmi	0,006636	-	-	-	-	

**Slika 6.4.** Tarifne stavke za prijenos električne energije za kupce kategorije kućanstvo [24]

Za jednotarifno brojilo koje ima cijenu energije 0,070276 €/kWh kada se doda PDV, naknade za prijenos i distribuciju te naknada za obnovljive izvore i visokoučinkovitu kogeneraciju cijena iznosi:

$$C_{K,J} = (0,070276 + 0,029199 + 0,011945 + 0,013936) \cdot 1,13 = 0,142 \text{ €/kWh} \quad (6-1)$$

Cijena prodane električne energije u mrežu dobije se kao vrijednost cijene same električne energije bez troškova distribucije i prijenosa uz unaprijed definirani koeficijent, a za jednotarifno brojilo iznosi:

$$C_{P,J} = 0,9 \cdot 0,070276 = 0,063 \text{ €/kWh} \quad (6-2)$$

Za dvotarifno brojilo kada je vrijeme više tarife (dnevna tarifa) cijena energije iznosi 0,074789 €/kWh pa je ukupna cijena kupljene električne energije:

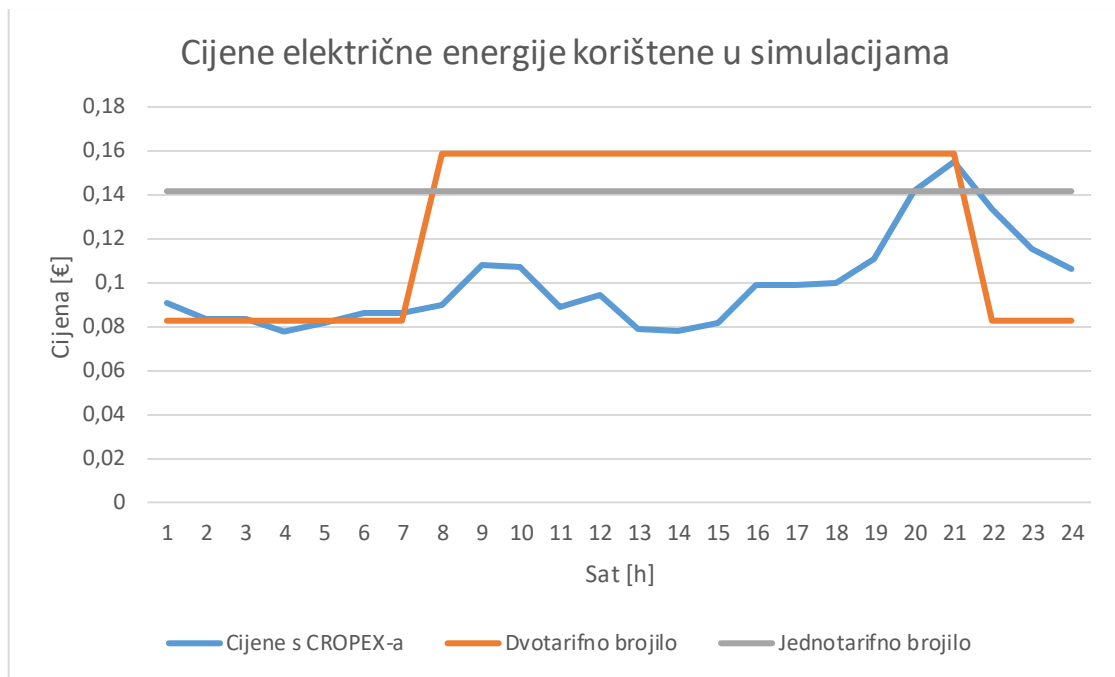
$$C_{D,V} = (0,074789 + 0,034508 + 0,017254 + 0,013936) \cdot 1,13 = 0,159 \text{ €/kWh} \quad (6-3)$$

Za dvotarifno brojilo kada je vrijeme niže tarife (noćna tarifa) cijena energije iznosi 0,036697 €/kWh pa je ukupna cijena kupljene električne energije:

$$C_{D,N} = (0,036697 + 0,015927 + 0,006636 + 0,013936) \cdot 1,13 = 0,083 \text{ €/kWh} \quad (6-4)$$

Cijena električne energije prodane u mrežu kada se koristi dvotarifno brojilo računa se da se unaprijed definirani koeficijent pomnoži s prosječnom cijenom električne energije koju kupac plaća opskrbljivaču za električnu energiju koju kupuje od opskrbljivača bez naknada za korištenje mreže, drugih naknada i PDV-a. Dolje je izračunata cijena električne energije prodane u mrežu uz pretpostavku da je aktivni kupac kupio 50% energije u višoj tarifi i 50% energije u nižoj tarifi. Cijena prodane električne energije iznosi:

$$C_{D,P} = 0,9 \cdot \frac{0,074789 + 0,036697}{2} = 0,050 \text{ €/kWh} \quad (6-5)$$



**Slika 6.5.** Usporedba cijena korištenih u simulacijama

Na slici 6.5. može se vidjeti usporedba cijena električne energije koje su korištene u simulacijama. Može se vidjeti da cijene s CROPEX-a iako su promjenjive one su i najniže jer se ne uzimaju u obzir naknade i PDV, a cijena kod jednotarifnog brojila kada bi se našla aritmetička sredina cijena s CROPEX-a i cijena dvotarifnog brojila bila bi najveća.

## 6.4. Električno vozilo – Tesla Model 3

Vozilo koje je korišteno u simulacijama je Tesla Model 3, a specifikacije su dane u tablici 6.4.

**Tablica 6.4.** Specifikacije vozila Tesla Model 3 [25]

<b>Tesla Model 3</b>			
<b>Ukupan napon:</b>	340 V	<b>Tehnologija punjenja:</b>	Litij-ionska
<b>Punjač u vozilu:</b>	Type 2-11 kW	<b>Priključak kod brzog punjenja:</b>	CCS-170 kW
<b>Kapacitet baterije:</b>	60 kWh		
<b>Punjenje baterije-kućna utičnica 230 V/10 A-2,3 kW -29,5h</b>			
<b>Punjenje baterije-vanjska punionica 230 V/16 A-3,7 kW- 18,5h</b>			
<b>Punjenje baterije-vanjska punionica 230 V/32 A-7,4 kW- 9,25h</b>			
<b>Punjenje baterije- vanjska punionica 400 V/32 A-11 kW-6,25h</b>			
<b>Punjenje baterije- priključak CCS 50 kW- 56min</b>			
<b>Punjenje baterije- priključak CCS 175 kW- 25 min</b>			

## 6.5. Punionica električnog vozila – Pulsar Type 2 – 11 kW

Postoji više vrsta punionica električnih vozila. Za potrebe simulacija je korištena WallBox Pulsar punionica, koja ovisno o snazi može biti jednofazna (za manje snage punjenja) ili trofazna (za veće snage punjenja). Punionica na koju je priključeno električno vozilo korišteno u simulacijama je Pulsar Type 2 snage 11 kW. Tehnički podatci o punionici dani su u tablici 6.5. [27].

**Tablica 6.5.** Tehnički podatci punionice Pulsar Type 2-11 kW [26]

<b>Punjač</b>	<b>Izmjenični</b>	<b>Priključak</b>	<b>Type 2-kW</b>
<b>Maksimalna snaga punjenja</b>	Type 1	7,4 kW(jednofazno)	
	Type 2	11 kW(trofazno)	
		22 kW(trofazno)	
<b>Maksimalna struja po fazi:</b>	Type 1	7,4 kW/32 A	
	Type 2	11 kW/16 A	
		22 kW/32 A	
<b>Mogućnost povezivanja na punionicu</b>	Bluetooth		Wi-fi

## 6.6. Baterijski spremnik – ARK 10.24XH

Baterijski spremnik koji je korišten u simulacijama je ARK 10.24XH. Taj spremnik služi kako bi se mogla trošiti energija iz njega kako se ne bi morala kupovati električna energija iz mreže po visokim cijenama. Specifikacije spremnika su dane u tablici 6.5. [27].

**Tablica 6.6.** Podatci baterijskog spremnika ARK 10.24XH [27]

<b>Napajajući modul:</b>	BDC 95045-A1
<b>Broj baterijskih modula:</b>	4
<b>Kapacitet baterije:</b>	10,24 kWh
<b>Maksimalna izlazna snaga:</b>	5 kW
<b>Vršna izlazna snaga:</b>	10 kW, 10s
<b>Nazivni napon:</b>	400V
<b>Tip baterije:</b>	Litij-željezo fosfat bez kobalta(LFP)
<b>Vrsta zaštite:</b>	IP 65
<b>Optimalna temperatura rada:</b>	Od -10°C do 50°C
<b>Hlađenje:</b>	Prirodno

## 6.7. GAMS programsko okruženje za razvoj optimizacijskog modela

Optimizacijski model aktivnog kupca s ciljem maksimizacije ušteda napravljen je u programskom okruženju GAMS. To je okruženje za algebarsko programiranje koji se koristi za modeliranje i

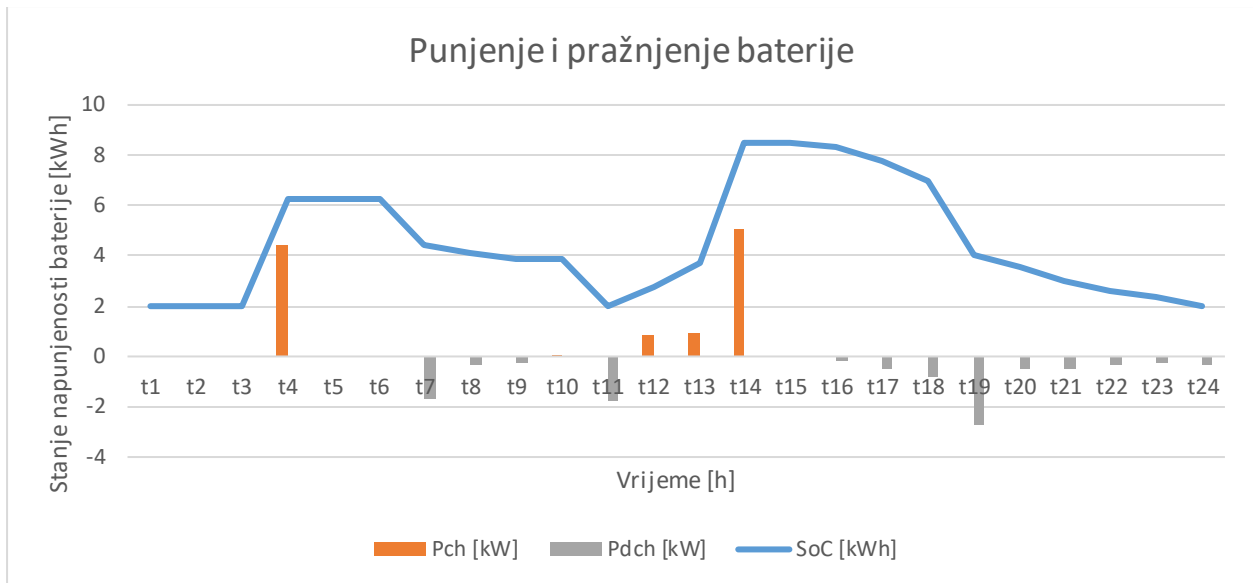
optimizaciju. Optimizacija se koristi kao snažan i sofisticiran okvir za rješavanje problema u stvarnom životu u znanosti i inženjerstvu. Cilj programa je poboljšati produktivnost modela, smanjiti troškove te povećati pouzdanost i ukupnu vjerodostojnost procesa modeliranja. Korisnici programa precizno definiraju svoje modele koristeći različite matematičke jednadžbe, ograničenja i funkcije, prema [28].

Za potrebe provođenja simulacija razvijen je model u kojem se koristi baterijski spremnik koji se puni i prazni u ovisnosti o cijeni električne energije, električni automobil koji ima mogućnost punjenja i pražnjenja, klima uređaj, perilica rublja, perilica suđa, bojler za grijanje tople vode te je instalirana fotonaponska elektrana. Ulazni podaci kod modela su: potrošnja električne energije, proizvodnja električne energije, cijena kupljene električne energije, cijena prodane električne energije, dostupnost vozila i vanjska temperatura. U programu je zadana maksimalna snaga koja se može kupiti iz mreže (13,8 kW) i maksimalna snaga koja se može prodati u mrežu (5 kW). U modelu su dana ograničenja za temperaturu koju klima uređaj mora održavati u prostoru, ograničenje za temperaturu tople vode, ograničenja u kojim vremenskim intervalima se moraju uključiti perilica suđa i perilica rublja. Za jednadžbu balansa snage važi da kada se zbroje sve snage (uključujući snage svih kućanskih uređaja, proizvodnju iz fotonaponske elektrane, osnovna snaga kućanstva, snage punjenja i pražnjenja automobila i baterije) u svakom vremenskom koraku moraju biti jednake razlici kupljene i prodane električne energije kako bi bio ostvaren balans snage. U modelu se mogu proizvoljno mijenjati ograničenja vezana za stanja napunjenosti automobila i baterije.

Provedene su tri simulacije gdje se u svakoj od simulacija mijenja cijena električne energije kako bi se moglo vidjeti u kojoj simulaciji će se ostvariti najveće uštede.

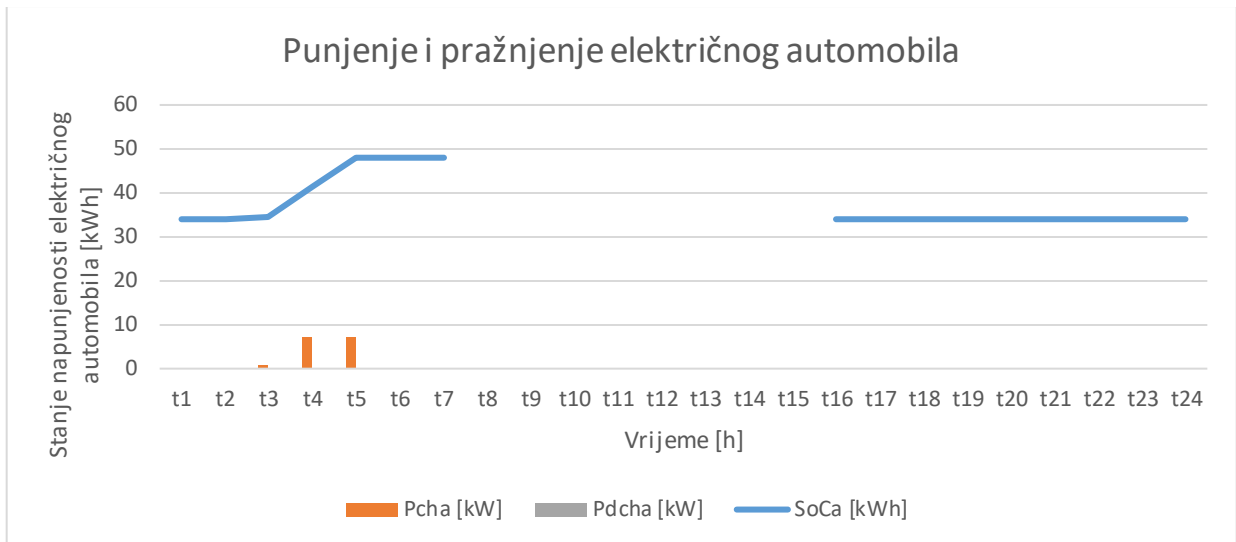
### **6.8. Simulacija 1: Cijena električne energije se mijenja svaki sat**

U ovoj simulaciji cijene električne energije su preuzete sa službene stranice CROPEX-a. Baterija koja je korištena ima mogućnost punjenja i pražnjenja kako bi se ostvarila ušteda, tj. kako bi se moralo kupiti što manje električne energije iz mreže po visokim cijenama. Povećanju ušteda pomaže i fotonaponska elektrana koja je instalirana na kući i smanjuje potrebu za kupljenom električnom energijom iz mreže. Električno vozilo ima zadan uvjet da se mora napuniti do 07:00 h, nakon čega se koristi za potrebu odlaska na posao gdje pravi 70 km u oba smjera. Vozilo se vraća u 15:00 h s manjom napunjenošću jer je korišteno u vožnji. Učinkovitost punjenja i pražnjenja i baterije i vozila iznosi  $\eta=95\%$ .



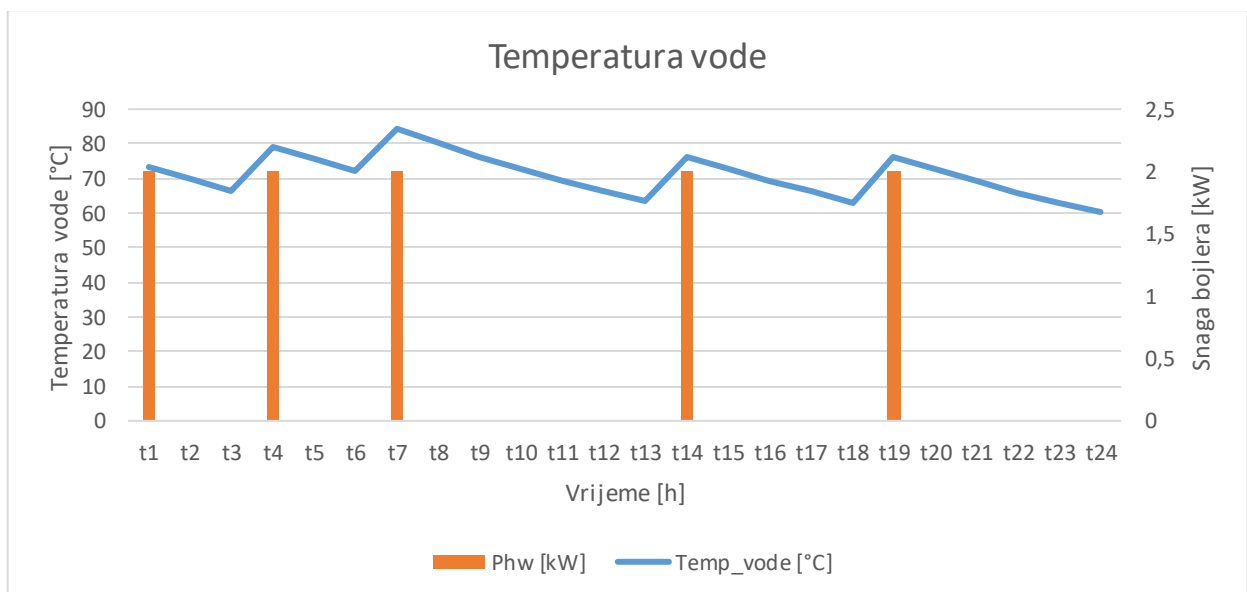
**Slika 6.6.** Punjenje i pražnjenje baterije

Na slici 6.6. se može vidjeti optimalno punjenje i pražnjenje baterije kada se cijena električne energije mijenja svaki sat. Kada se cijena električne energije mijenja iz sata u sat baterija se puni u različitim razdobljima dana kada postoji manja potrošnja električne energije te kada je niža cijena električne energije. Prvo se puni tijekom noći u vremenu  $t_4$  te onda u vremenu  $t_{10}$ ,  $t_{12}$ ,  $t_{13}$  i  $t_{14}$ , a kada se povećava potrošnja počne se prazniti i kada je cijena visoka. Baterija se prazni kada dođe razdoblje velike potrošnje električne energije i kada cijena električne energije počne rasti. Baterija se počne prazniti u  $t_7$  kada se počinje povećavati potrošnja električne energije. Baterija ima povećano pražnjenje i u  $t_{10}$  te u  $t_{19}$  kada su i razdoblja najveće potrošnje električne energije prema grafu na slici 6.1. Stanje napunjenosti za svako doba dana prikazano je na slici gore te se ondje može pratiti koliko je baterija napunjena u svakom dobu dana.



**Slika 6.7.** Punjenje i pražnjenje električnog automobila

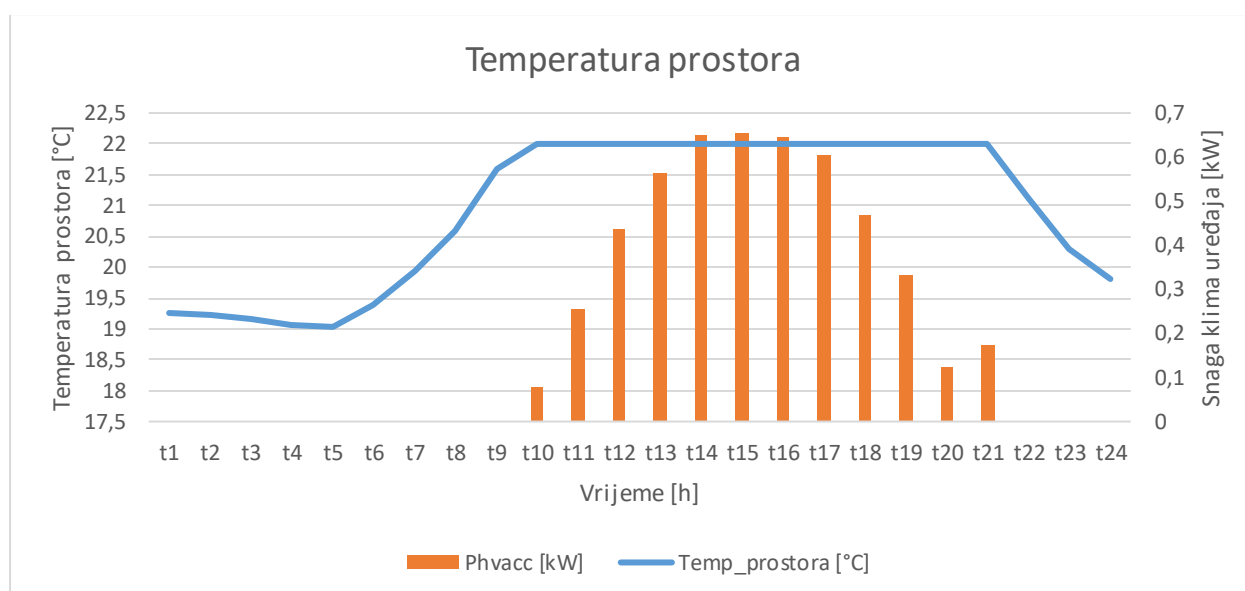
Na slici 6.7. može se vidjeti optimalno punjenje i pražnjenje električnog automobila. Automobilu je zadano da bude napunjen ujutro u  $t_7$  stoga se on puni preko noći. Automobil se preko noći puni u onim vremenskim razdobljima kada je cijena električne energije najniža, što znači da se automobil puni u vremenu  $t_3$ ,  $t_4$  i  $t_5$  kako bi punjenje bilo optimalno i ušteda električne energije što veća. Automobil se koristi za odlazak na posao i kada se vrati kući dođe s manjom napunjenošću baterije, ali se preko dana ne puni ponovno do kraja jer je visoka cijena električne energije i ne bi se ostvarila nikakva ušteda tako. Kada se automobil ponovno priključi na punjač u vremenu  $t_{16}$  on se više ne puni, zbog gore navedenog razloga.



**Slika 6.8.** Temperatura vode u bojljeru

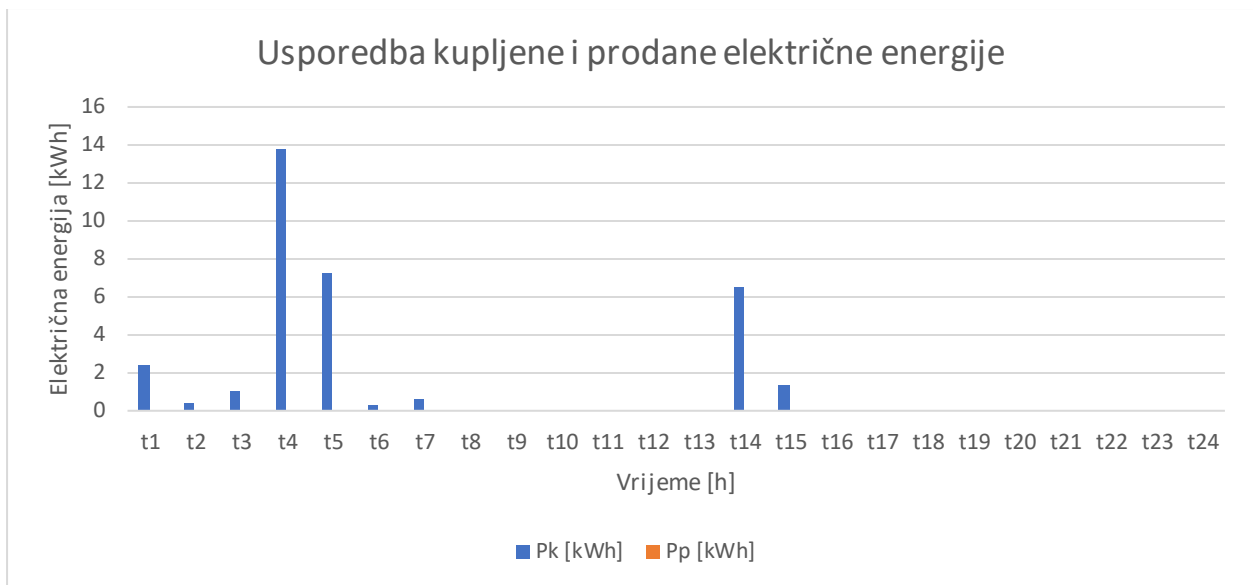


Na slici 6.8. se može vidjeti kako se kretala temperatura vode u bojleru tijekom dana. Iz priloženog grafa koji se nalazi na slici se vidi da se temperatura povećavala 5 puta u danu čime se može zaključiti da se bojler palio 5 puta u danu i to u vremenima  $t_1$ ,  $t_4$ ,  $t_7$ ,  $t_{14}$  i  $t_{19}$ . Vidi se da se zadnji put bojler upalio u vremenu  $t_{19}$  i nakon toga se više nije palio u danu jer su kasnije bile jako velike cijene električne energije i nije bilo optimalno da se pali te je ostvarena veća ušteda ako se on nije palio više nakon vremena  $t_{19}$ . Upravo zbog toga se bojler upalio više puta tijekom noći u kraćem vremenskom razdoblju jer je bilo optimalno da zagrije vodu na veću temperaturu dok ima nižu cijenu električne energije, nego da se pali pri višoj cijeni električne energije.



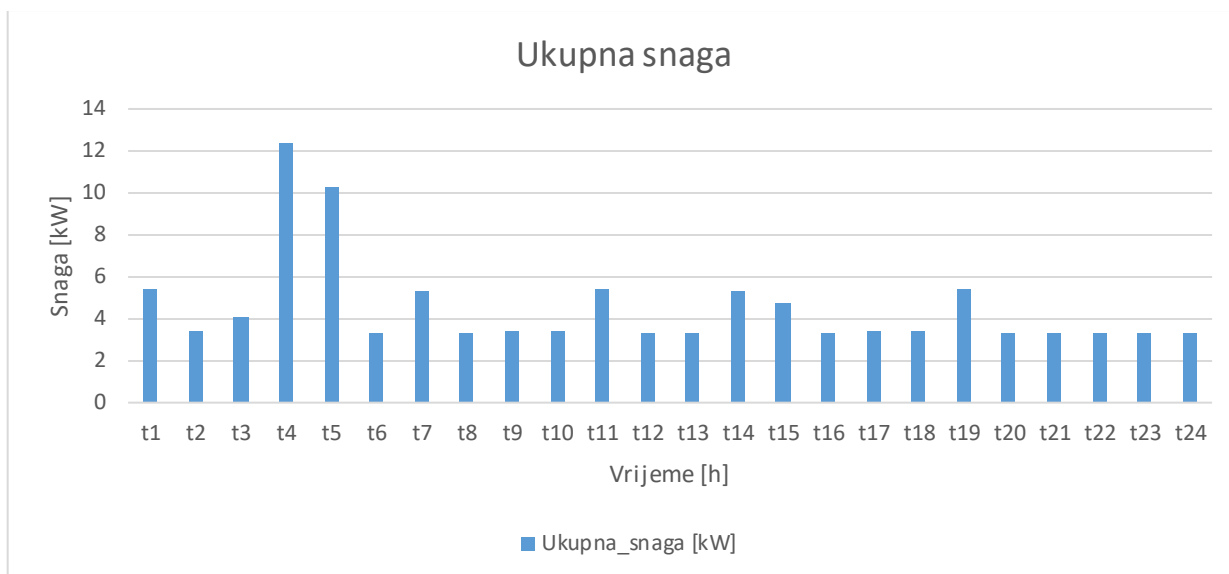
**Slika 6.9.** Temperatura prostora

Na slici 6.9. se vidi kako se kretala temperature u prostoru. Iz grafa koji se nalazi na slici može se vidjeti da se klima uključila ujutro kada je vanjska temperatura počela rasti. Klima uređaj je radio tijekom dana bez prestanka jer je održavao temperaturu konstantom kako je i zadano. Kada je vanjska temperatura bila viša kao u periodu od  $t_{13}$  do  $t_{18}$  trošilo se više električne energije na hlađenje prostora. U modelu je zadano da unutarnja temperatura bude između  $18^{\circ}\text{C}$  i  $22^{\circ}\text{C}$  te je klima uređaj održavao temperaturu na najvišoj temperaturi tj.  $22^{\circ}\text{C}$  kako bi trošio što manje električne energije jer kada bi hladio prostor na  $18^{\circ}\text{C}$  utrošio bi više energije.



**Slika 6.10.** Usporedba kupljene i prodane električne energije

Na slici 6.10. je graf koji pokazuje usporedbu kupljene i prodane električne energije. Na grafu se nalazi samo kupljena električna energija jer se električna energija nije prodavala zbog toga što se ne isplati prodavati onu električnu energiju koja se proizvede jer je cijena po kojoj se ona prodaje u mrežu niža nego cijena kupovne energije s Cropex-a (cijena prodajne električne energije je ista kao i kod dvotarifnog brojila). Kako bi se ostvarila ušteda električne energije, energija koju proizvede fotonaponska elektrana na kući se iskoristi za upotrebu u kućanstvu te za punjene baterije koja se kasnije onda prazni. Za slučaj kada se cijena mijenja svaki sat može se vidjeti da se najviše električne energije kupuje tijekom noći dok ne postoji velika potrošnja električne energije te je niža cijena električne energije, a manji dio električne energije se kupi i tijekom dana dok je manja cijena električne energije. Najviše električne energije je kupljeno u vremenima  $t_4$ ,  $t_5$  i  $t_{14}$  jer je tada i najniža cijena električne energije. Tijekom dana se ne kupuje električna energija jer fotonaponska elektrana proizvodi energiju, a uz to koristi se i energija pohranjena u bateriji. Na ovaj način se štedi električna energija i novac tako da se iskoristi sva energiju koja se proizvede iz fotonaponske elektrane uz minimalnu kupnju električne energije.



**Slika 6.11.** Ukupna snaga kućanstva tijekom dana

Na slici 6.11. nalazi se graf koji prikazuje ukupnu snagu u vremenskom koraku  $t$  na priključnom mjernom mjestu u kućanstvu. Vidi se da je najviše snage na mjernom mjestu u noćnim satima tj. u vremenu  $t_4$  i  $t_5$  jer se u tom razdoblju puni baterija u kućanstvu i puni se baterija električnog automobila. Kod grafa ukupne snage uzeti su u obzir svi potrošači električne energije u kućanstvu te su punjenja i pražnjenja baterije u kućanstvu i baterije električnog automobila uzeti u obzir.

**Tablica 6.7.** Rezultati simulacije 1

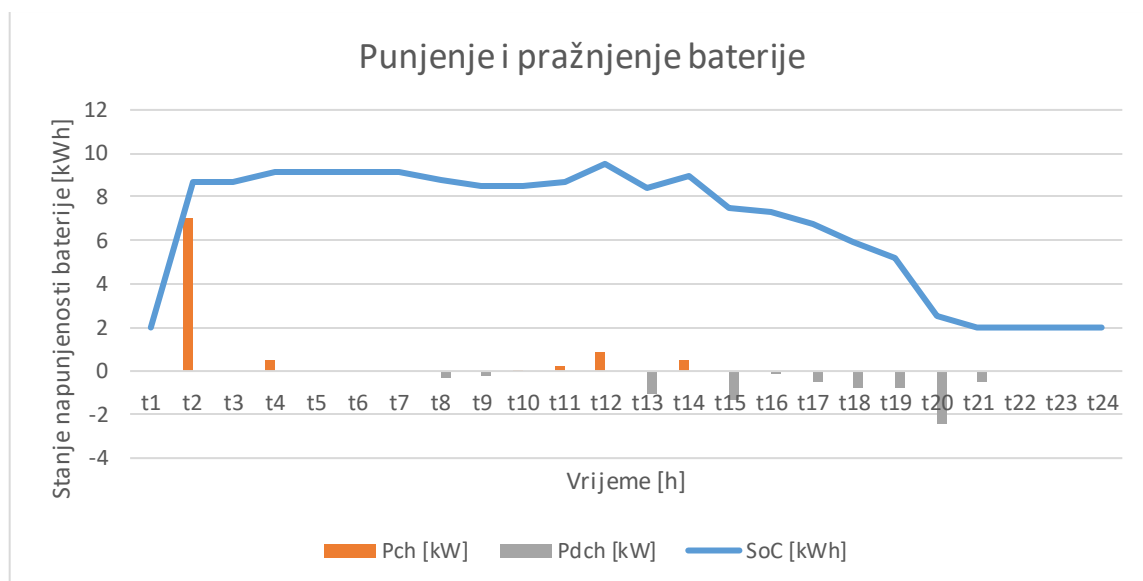
	Kupljena električna energija u kWh	Trošak kupljene električne energije u €	Cijena električne energije €/kWh	Snaga perilice suđa [kW]	Snaga perilice rublja [kW]	Snaga bojlera [kW]	Snaga klima uređaja [kW]
t1	2,382	0,215	0,090			2,000	
t2	0,404	0,034	0,083				
t3	1,058	0,088	0,083				
t4	13,800	1,073	0,078			2,000	
t5	7,292	0,595	0,082				
t6	0,286	0,025	0,086				
t7	0,640	0,055	0,086			2,000	
t8			0,090				
t9			0,108				
t10			0,107				0,080
t11			0,089		2,000		0,255
t12			0,095				0,439
t13			0,079				0,564
t14	6,513	0,508	0,078			2,000	0,651
t15	1,353	0,111	0,082	1,500			0,657
t16			0,099				0,644
t17			0,099				0,607
t18			0,099				0,468
t19			0,111			2,000	0,334
t20			0,142				0,124
t21			0,155				0,175
t22			0,133				
t23			0,116				
t24			0,106				

U tablici 6.7. vide se rezultati prve simulacije kod koje se cijena električne energije mijenja svaki sat. U modelu je zadano da se perilica suđa mora uključiti u vremenskom koraku od  $t_{15}$  do  $t_{19}$ , a vidi se da se ona uključila u  $t_{15}$  kako bi se ostvarila što veća ušteda električne energije i jer je niža cijena električne energije. Perilica rublja se morala uključiti u vremenskom koraku između  $t_7$  i  $t_{11}$ , a ona se uključila u  $t_{11}$  jer tada bilo optimalno da se uključi. Iz tablice se vidi da se bojler uključivao pet puta kao što je i rečeno na temelju slike 6.8. Klima uređaj je radio i održavao konstantnu temperaturu od  $t_{10}$  do  $t_{21}$  zbog toga jer je trebao održavati temperaturu unutar zadanih granica i jer je vanjska temperatura u tome razdoblju bila veća od zadane minimalne temperature u kući od

22°C, a nakon toga se klima uređaj isključio. Nakon isključenja klima uređaja temperatura prostora je počela padati jer je vanjska temperatura bila niža i nije bilo potrebe da klima uređaj hladi prostor. Na način na koji su paljeni uređaji u kućanstvu ostvarila se puno veća ušteda električne energije i novca nego da su paljeni od strane aktivnih kupaca jer su ovako paljeni u vrijeme kada je to bilo optimalno kako bi se ostvarila što veća ušteda električne energije.

## 6.9. Simulacija 2: Cijena električne energije se mijenja prema dvotarifnom modelu

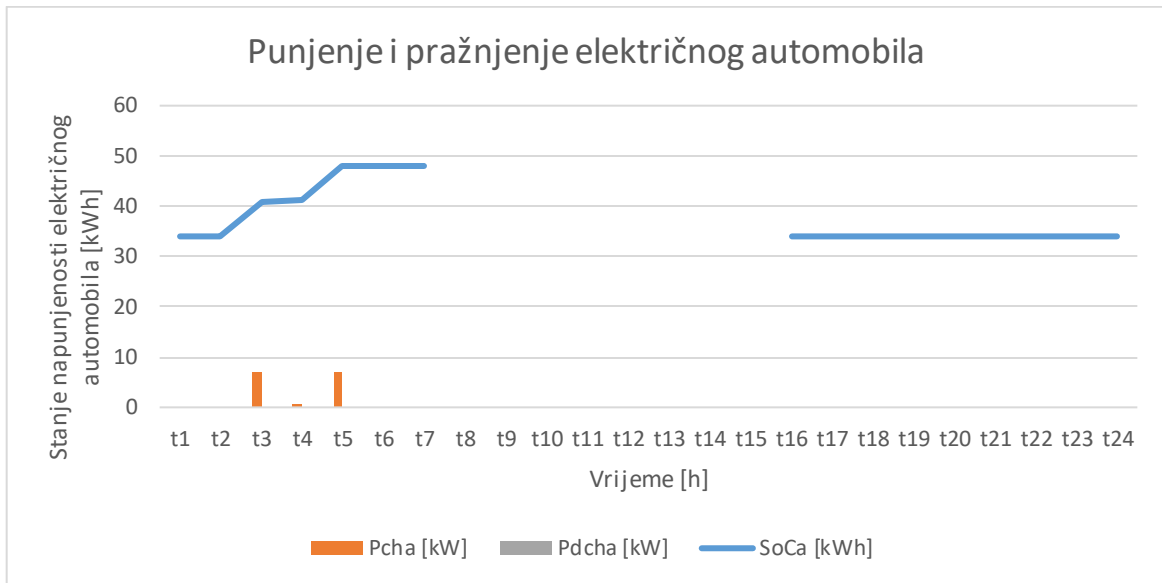
U ovoj simulaciji kao i u prethodnoj koriste se isti kućanski uređaji istih snaga, te se koristi ista baterija i isti električni automobil koji imaju mogućnost punjenja i pražnjenja. Vozilo se kao i u prethodnoj simulaciji koristi od 07:00 h do 15:00 h i ima postavljen uvjet da se napuni do 80 % ukupnog kapaciteta, a da se ne smije isprazniti ispod 20 %. Razlika od prethodnog slučaja je samo cijena jer se u ovom slučaju koristi cijena prema dvotarifnom modelu tj. postoji viša i niža tarifa po kojoj se cijena električne energije može kupiti.



Slika 6.12. Punjenje i pražnjenje baterije

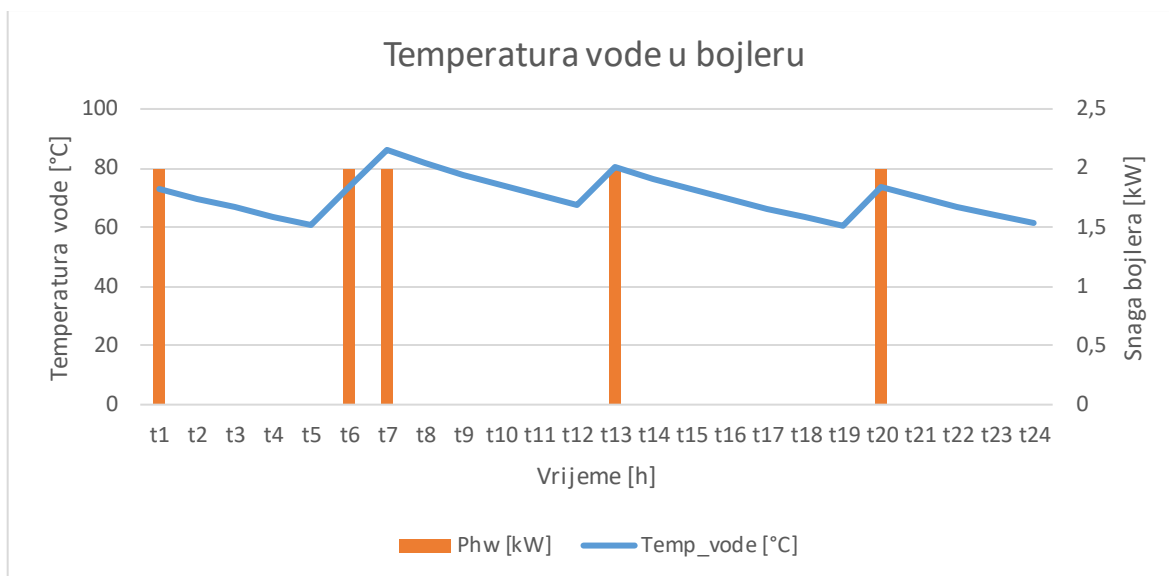
U slučaju kada postoji situacija sa dvotarifnim brojiлом, tj. da se cijena električne energije računa prema nižoj i višoj tarifi dobije se drugačije ponašanje baterije koja se koristi u kućanstvu. Kao što se vidi na slici 6.12. baterija se više puni u razdoblju kada je cijena električne energije niža nego kada je cijena električne energije viša tj. najviše se baterija punila u vremenskom koraku  $t_2$ . U ovom slučaju baterija se napuni tijekom noći te se preko dana samo malo nadopunjava. Baterija se tijekom dana prazni polagano cijeli dan, a najviše se prazni u  $t_{20}$ . Može se vidjeti da se baterija

više praznila kada je prestala proizvodnja iz fotonaponske elektrane koja se nalazi na kući jer se tijekom dana potrošnja pokrivala iz proizvodnje fotonaponske elektrane, a kada je proizvodnja prestala onda se potrošnja počela pokrivati iz baterije. Punjenje baterije tijekom dana je ostvareno s energijom proizvedenom u fotonaponskoj elektrani jer je bilo viška proizvedene električne energije te se stoga ta energija iskoristila za punjenje baterije. Navedeni graf koji je prikazan na slici gore pokazuje optimalnu situaciju za dvotarifno brojilo. Tako je ostvarena ušteda električne energije uz minimalnu kupnju električne energije.



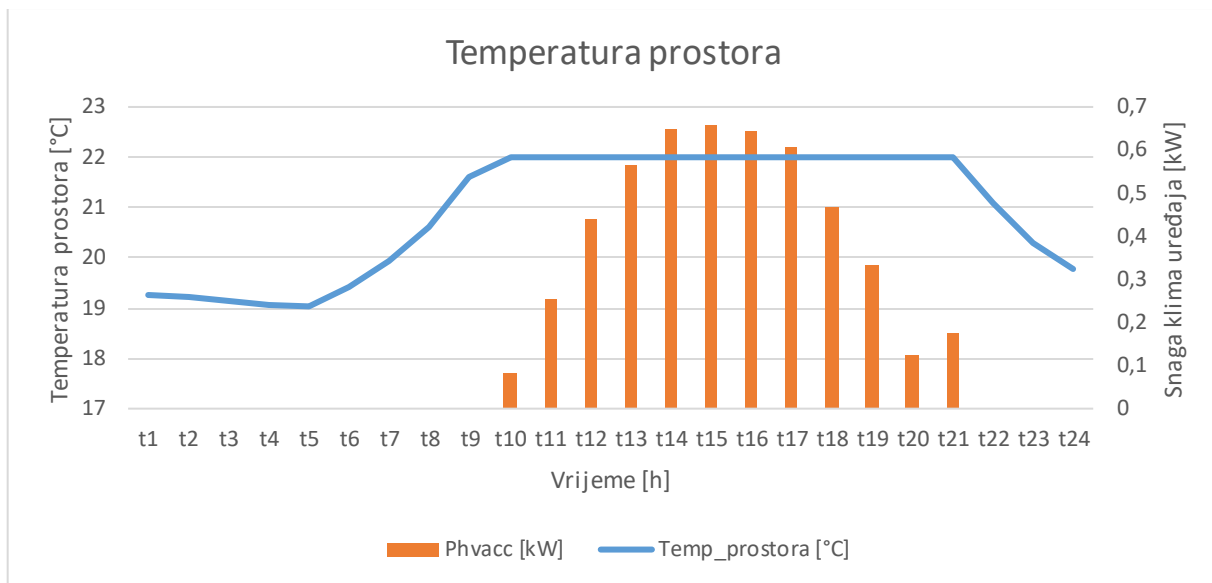
**Slika 6.13.** Punjenje i pražnjenje električnog automobila

Optimalno punjenje i pražnjenje automobila za simulaciju kada se koristi dvotarifno brojilo prikazano je na slici 6.13. Kao što je ranije naglašeno automobil se mora napuniti do  $t_7$  pa se stoga automobil puni u onom vremenskom periodu kada se cijena električne energije računa prema nižoj tarifi. Automobil se najviše punio u vremenskim koracima  $t_3$  i  $t_5$  jer je tada bila i najmanja potrošnja prema grafu na slici 6.1. te je bila niža cijena električne energije. Vidi se da se automobil u noćnim satima napuni na zadanu vrijednost te nakon uporabe preko dana vrati se sa smanjenom napunjenošću. Nakon što se automobil ponovno priključi na punjač više se ne puni taj dan jer nije optimalno da se puni tada zbog više cijene električne energije prema višoj tarifi tijekom dana te veće potrošnje električne energije u vremenu  $t_{22}$  i  $t_{23}$  već će se ponovno puniti idući dan u noćnim satima.



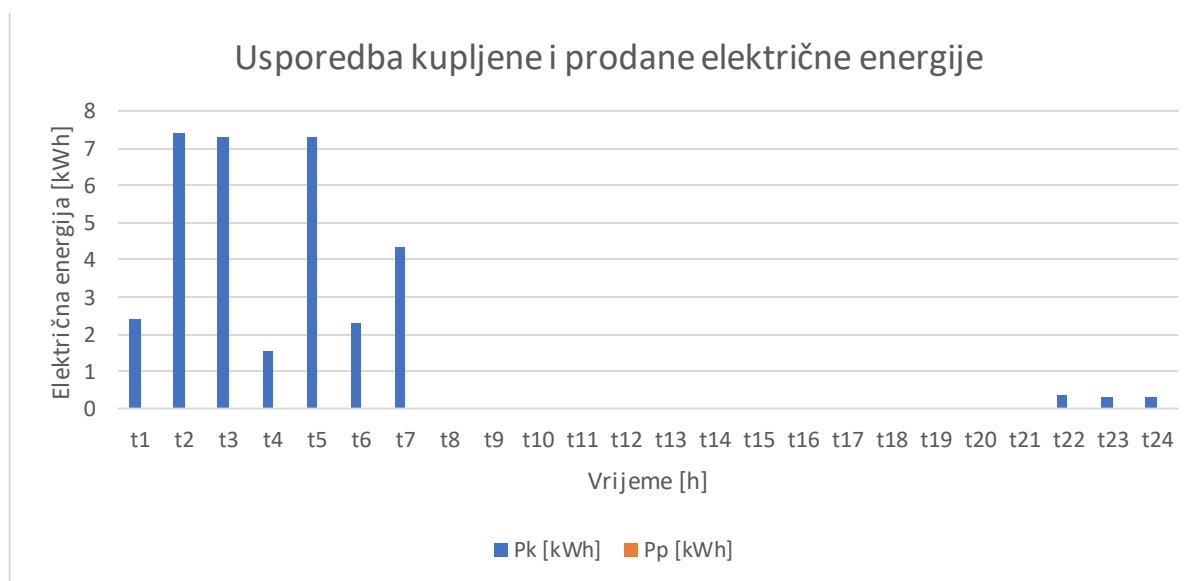
**Slika 6.14.** Temperatura vode u bojleru

Iz priložene slike 6.14. koja prikazuje temperaturu vode u bojleru vidi se da se bojler palio 4 puta, ali je u jednom trenutku radio dva vremenska koraka  $t_6$  i  $t_7$  i grijao vodu te se stoga može zaključiti da je bojler radio pet vremenskih koraka. Može se vidjeti da je bojler periodički svakih nekoliko vremenskih koraka zagrijavao vodu, a u razdobljima kada je bila najveća potrošnja električne energije bojler se nije uključivao kako bi smanjio potrošnju u razdoblju najveće potrošnje električne energije i tako ostvario uštedu. Bojler se uključivao prvo u noćnim satima  $t_1$ ,  $t_6$  i  $t_7$  kako bi što više zagrijao vodu i kako se ne bih morao paliti kada se cijena električne energija računa po višoj tarifi. Vidi se da se bojler upalio 2 puta kada se cijena električne energije računala po višoj tarifi u  $t_{13}$  i  $t_{20}$ , a 3 puta kada se cijena električne energije računala po nižoj tarifi iz čega se može zaključiti da je ostvarena ušteda električne energije i novca.



**Slika 6.15.** Temperatura prostora

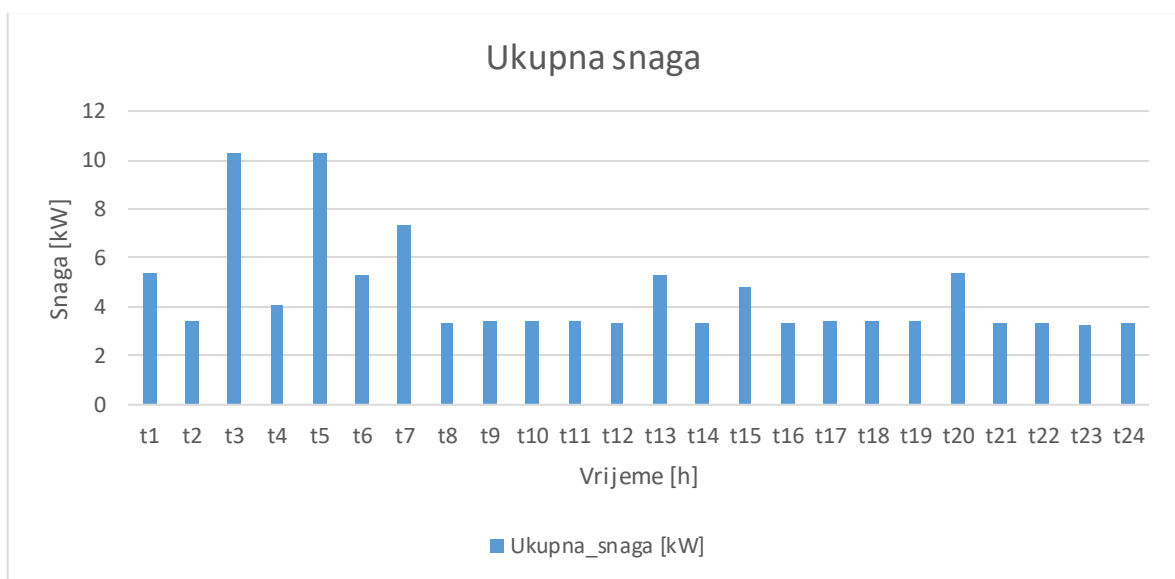
Na slici 6.15. nalazi se graf koji prikazuje temperaturu prostora te se vidi kolikom snagom je klima uređaj radio u određenim vremenskim razdobljima. Kada je vanjska temperatura porasla klima uređaj se uključio kao u prethodnoj simulaciji u  $t_{10}$  i radio dok vanjska temperatura nije počela padati tj. do  $t_{21}$ . Kao i u prethodnoj simulaciji temperatura je održavana na gornjoj granici zadane temperature kako bi se ostvarila što veća ušteda električne energije i novca. Snaga kojom je klima uređaj radio je jednaka snazi i u prvoj simulaciji jer je vanjska temperatura bila ista te je mogao raditi istom snagom. Električna energija koju je klima uređaj koristio za hlađenje prostora je korištena iz baterije i iz proizvodnje fotonaponske elektrane.



**Slika 6.16.** Usporedba kupljene i prodane električne energije



Na slici 6.16. nalazi se graf koji prikazuje usporedbu kupljene i prodane električne energije. Kao i u prethodnoj simulaciji nema električne energije koju se prodaje zbog premale otkupne cijene električne energije i ne isplati ju se prodavati nego ju je bolje maksimalno iskoristiti. Iz grafa se vidi da je najviše električne energije kupljeno u vremenu od  $t_1$  do  $t_7$  jer se tada punila baterija električnog automobila te baterija koja se koristi u kućanstvu. Najviše energije je kupljeno tada jer je tada električna energija obračunavana po nižoj cijeni i stoga je ostvarena ušteda velike količine novca. Tijekom dana kada se energija obračunavala prema višoj tarifi nije kupovana električna energija već je korištena energija proizvedena u fotonaponskoj elektrani i tako je ostvarena ušteda električne energije jer je energija proizvedena u fotonaponskoj elektrani maksimalno iskorištena.



**Slika 6.17.** Ukupna snaga kućanstva tijekom dana

Na slici 6.17. može se vidjeti graf koji prikazuje ukupnu snagu tijekom dana na mjernom mjestu. Vidi se da je najveća snaga bila u vremenu  $t_3$  i  $t_5$ , a to je i razdoblje kada se punila baterija električnog vozila. Kod proračuna su se kao i u prethodnoj simulaciji u obzir uzeti svi potrošači te punjenja i pražnjenja baterije u kućanstvu i baterije električnog automobila.

**Tablica 6.8.** Rezultati simulacije 2

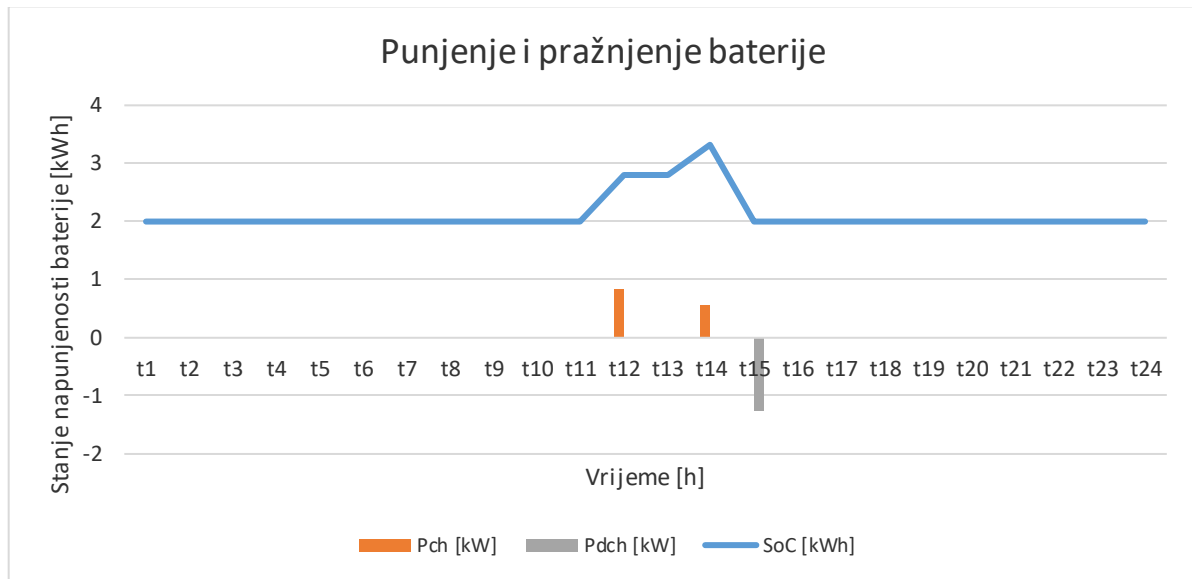
	Kupljena električna energija u kWh	Trošak kupljene električne energije u €	Cijena električne energije €/kWh	Snaga perilice suđa [kW]	Snaga perilice rublja [kW]	Snaga bojlera [kW]	Snaga klima uređaja [kW]
t1	2,382	0,197	0,083			2,000	
t2	7,404	0,612	0,083				
t3	7,321	0,606	0,083				
t4	1,557	0,129	0,083				
t5	7,292	0,603	0,083				
t6	2,286	0,189	0,083			2,000	
t7	4,321	0,357	0,083		2,000	2,000	
t8			0,159				
t9			0,159				
t10			0,159				0,080
t11			0,159				0,255
t12			0,159				0,439
t13			0,159			2,000	0,564
t14			0,159				0,651
t15			0,159	1,500			0,657
t16			0,159				0,644
t17			0,159				0,607
t18			0,159				0,468
t19			0,159				0,334
t20			0,159			2,000	0,124
t21			0,159				0,175
t22	0,341	0,028	0,083				
t23	0,290	0,024	0,083				
t24	0,316	0,026	0,083				

U tablici 6.8. nalaze se rezultati druge simulacije kod koje su korištene cijene prema dvotarifnom modelu. Vidi se da je električna energija kupovana kada se cijena računala prema nižoj tarifi kako bi se ostvarila što veća ušteda novca, ali i električne energije. Perilica suđa se u ovoj simulaciji uključila u  $t_{15}$  što je isto kao i u prethodnoj simulaciji jer postoji proizvodnju iz fotonaponske elektrane te se ta energija koristila odmah za rad perilice suđa. Perilica rublja se uključila u vremenu  $t_7$ . Bojler se uključivao četiri puta, ali kao što je objašnjeno ispod slike 6.14. radio je jedno vrijeme dva vremenska koraka konstantno dok se cijena računala prema nižoj tarifi kako bi se manje uključivao tijekom razdoblja računanja cijene prema višoj tarifi te kako bi se ostvarila

ušteda električne energije i novca. Klima uređaj je kao i u prethodnoj simulaciji radio isto vremensko razdoblje te je utrošio jednaku količinu energije.

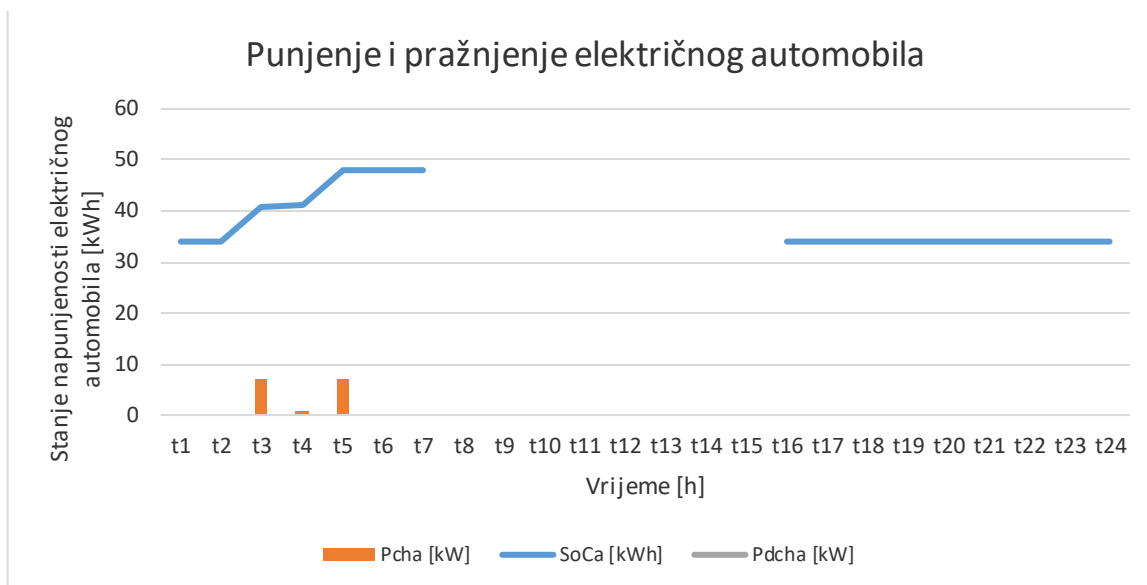
### 6.10. Simulacija 3: Cijena električne energije prema jednotarifnom modelu

Kod ove simulacije svi podaci su isti kao i u prethodne dvije simulacije, jedina razlika je u cijeni električne energije koja je određena za jednotarifni model, tj. cijena električne energije je iste za svaki sat u danu.



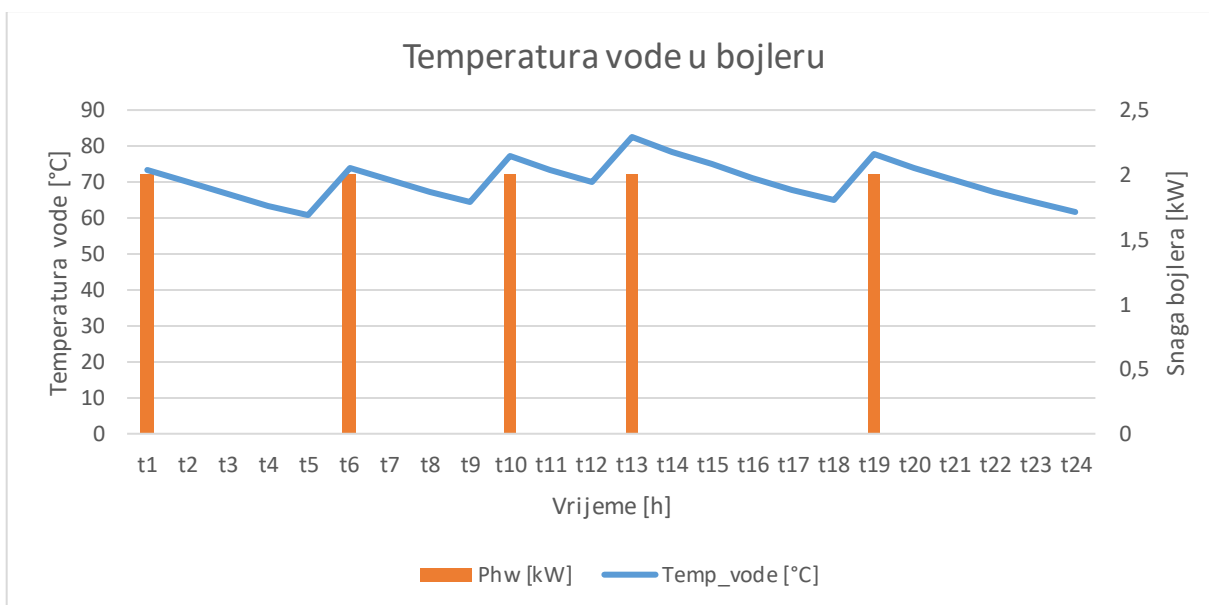
Slika 6.18. Punjenje i pražnjenje baterije

Na slici 6.18. nalazi se graf koji prikazuje optimalno punjenje i pražnjenje baterije kada se cijena električne energije računa prema jednotarifnom modelu. Na grafu se može vidjeti da se baterija punila u dva vremenska razdoblja  $t_{12}$  i  $t_{14}$ , a praznila se u  $t_{15}$ . Kod sustava koji ima jednaku cijenu električne energije ne postoji neko posebno pravilo kada će se baterija puniti i prazniti jer je cijena električne energije jednaka cijelo vrijeme. Jedini parametar koji može utjecati na punjenje i pražnjenje baterije je proizvodnja iz fotonaponske elektrane pa se stoga ovdje može vidjeti da kada postoji proizvodnja iz fotonaponske elektrane (prema slici 6.1.), baterija se malo punila jer je tada bilo viška električne energije pa se ona iskoristila za punjenje baterije. Baterija se ispraznila čim je nastupila manja proizvodnja iz fotonaponske elektrane i ona nije bila dovoljna za pokrivanje potreba kućanstva.



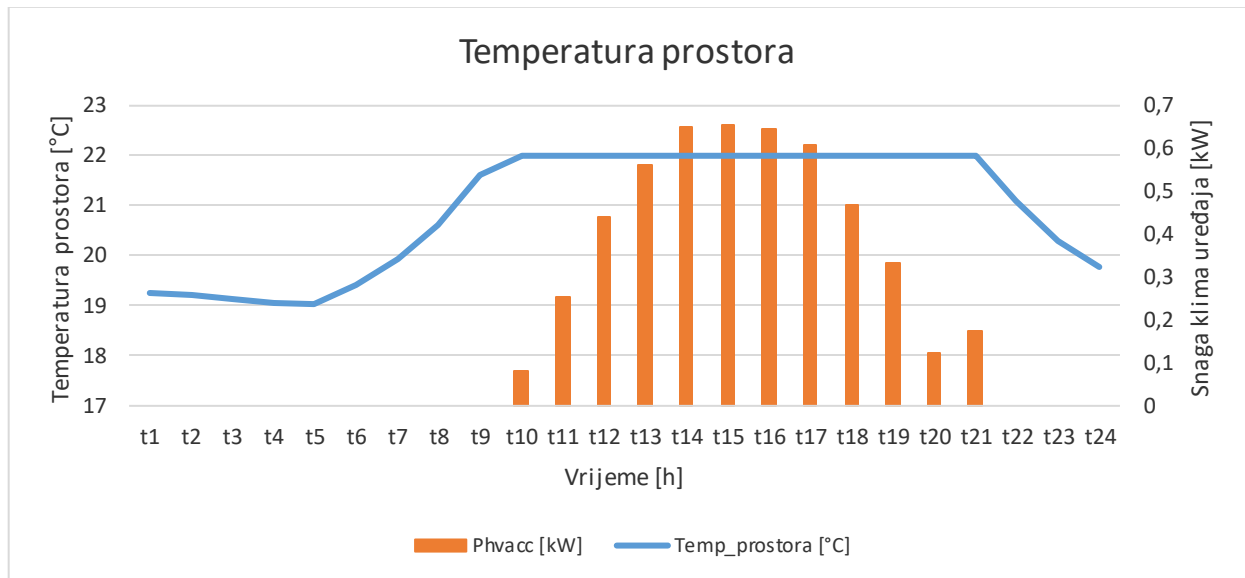
**Slika 6.19.** Punjenje i pražnjenje električnog automobila

Na slici 6.19. se može vidjeti graf koji prikazuje optimalno punjenje i pražnjenje električnog automobila. Kao i u prethodnim simulacijama automobil se morao napuniti do  $t_7$  i nakon toga je bio korišten za odlazak na posao. Vidi se da se automobil punio u vremenima  $t_3, t_4, t_5$ . Tijekom dana kada je automobil ponovno priključena na mrežu, on se više nije punio.



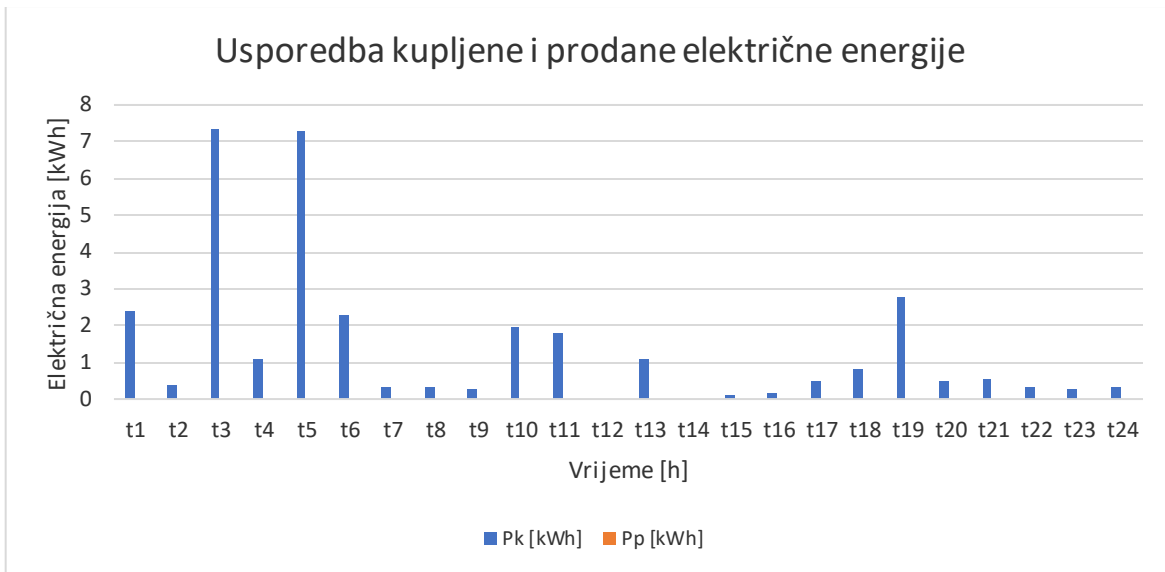
**Slika 6.20.** Temperatura vode u bojleru

Prema slici 6.20. može se vidjeti kako se kretala temperatura vode u bojleru tijekom dana. Bojler se uključio pet puta i uključivao se svakih nekoliko sati neovisno cijeni električne energije. Može se vidjeti da se bojler uključio dva puta  $t_{10}$  i  $t_{13}$  kada je postojala proizvodnja električne energije iz fotonaponske elektrane te se tako ostvarila ušteda električne energije u kućanstvu.



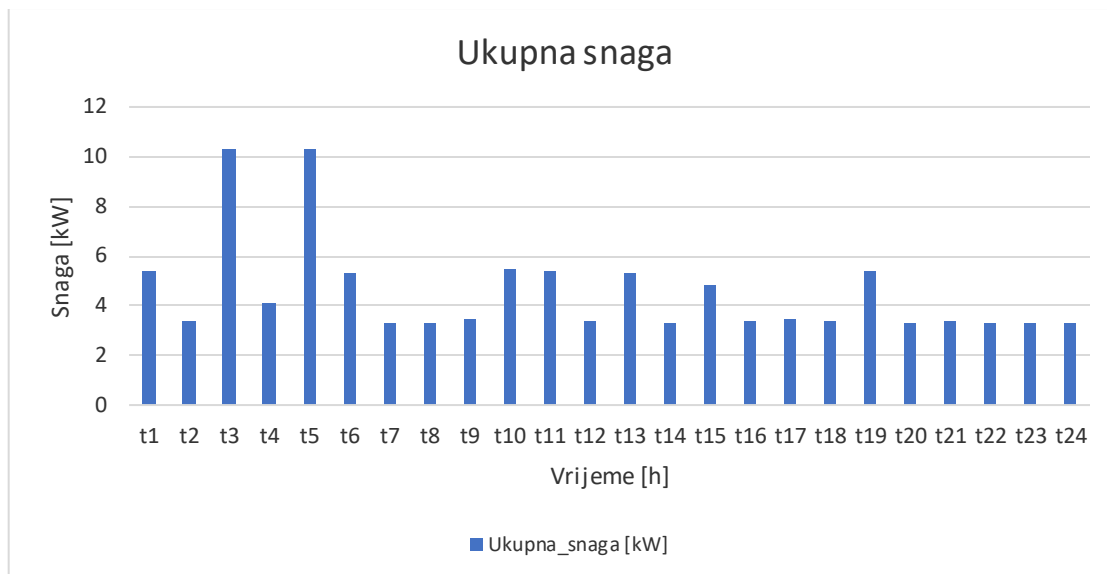
**Slika 6.21.** Temperatura prostora

Slika 6.21. prikazuje temperaturu prostora te snagu koju je klima uređaj utrošio za rashlađivanje prostora. Kao i u prethodnim simulacijama kada je vanjska temperatura porasla klima uređaj se upalio, a ugasio se kada je vanjska temperatura pala. Klima uređaj je temperaturu održavao na 22°C jer je to gornja granica zadane temperature te zbog održavanja temperature na toj gornjoj granici ostvarena je ušteda električne energije.



**Slika 6.22.** Usporedba kupljene i prodane električne energije

Promatrajući graf kupljene i prodane električne energije prikazan na slici 6.22. može se vidjeti da je električna energija kupovana gotovo svaki sat, a ni jedan sat nije prodavana. Električna energija nije kupovana u vremenskim koracima  $t_{12}$  i  $t_{14}$  jer je tada bilo viška električne energije proizvedene iz fotonaponske elektrane. Ta energija koja je u to vrijeme bila višak se iskoristila za punjenje baterije iako se mogla prodati. Višak energije nije prodan jer je otkupna cijena premala i ne bi bilo isplativo da je u tim satima, kada je bilo viška proizvodnje električne energije, ona prodana po nižoj cijeni i onda po većoj cijeni kupljena pa se stoga punila baterija. Vidi se da je najviše električne energije kupljeno u  $t_3$  i  $t_5$  jer se tada punila baterija električnog automobila te je bilo potrebno kupiti veliku količinu električne energije.



**Slika 6.23.** Ukupna snaga kućanstva tijekom dana

Na slici 6.23 prikazana je ukupna snaga na mjernom mjestu tijekom dana. Vidi se da je najveća snaga bila u vremenu kada se baterija automobila punila. Kao u prethodnim simulacijama u obzir su uzeti svi potrošači kao i punjenja i pražnjenja baterije u kućanstvu i baterije automobila.

**Tablica 6.9.** Rezultati simulacije 3

	Kupljena električna energija u kWh	Trošak kupljene električne energije u €	Cijena električne energije €/kWh	Snaga perilice suđa [kW]	Snaga perilice rublja [kW]	Snaga bojlera [kW]	Snaga klima uređaja [kW]
t1	2,382	0,337	0,142			2,000	
t2	0,404	0,057	0,142				
t3	7,321	1,037	0,142				
t4	1,074	0,152	0,142				
t5	7,292	1,033	0,142				
t6	2,286	0,324	0,142			2,000	
t7	0,321	0,045	0,142				
t8	0,341	0,048	0,142				
t9	0,249	0,035	0,142				
t10	1,950	0,276	0,142			2,000	0,080
t11	1,801	0,255	0,142		2,000		0,255
t12			0,142				0,439
t13	1,068	0,151	0,142			2,000	0,564
t14			0,142				0,651
t15	0,098	0,014	0,142	1,500			0,657
t16	0,150	0,021	0,142				0,644
t17	0,509	0,072	0,142				0,607
t18	0,806	0,114	0,142				0,468
t19	2,757	0,391	0,142			2,000	0,334
t20	0,467	0,066	0,142				0,124
t21	0,533	0,075	0,142				0,175
t22	0,341	0,048	0,142				
t23	0,290	0,041	0,142				
t24	0,316	0,045	0,142				

U tablici 6.9. nalaze se rezultati treće simulacije kada je jednaka cijena električne energije cijelo vrijeme. Iz rezultata se može vidjeti da se perilica suđa upalila u vremenu  $t_{15}$ , a perilica rublja u vremenu  $t_{11}$ . Bojler koji se palio pet puta se palio u vremenskim koracima  $t_1$ ,  $t_6$ ,  $t_{10}$ ,  $t_{13}$  i  $t_{19}$ . Klima uređaj koji je radio u istom vremenu kao i u prethodnim simulacijama je utrošio istu količinu snage za hlađenje prostora kao i u prethodnim simulacijama. U rezultatima se može vidjeti isto što i na grafovima a to je da je električna energija kupovana gotovo svaki sat u danu osim u ona dva sata kada je postojao višak proizvodnje iz fotonaponske elektrane pa se punila baterija.



## 6.11. Usporedba rezultata

Tablica 6.10. Usporedba rezultata nakon provedenih simulacija

	Kupljena električna energija kada je cijena različita svaki sat [kWh]	Trošak kupljene električne energije kada je cijena različita svaki sat [€]	Kupljena električna energija kada je cijena prema dvotarifnom sustavu [kWh]	Trošak kupljene električne energije kada je cijena prema dvotarifnom sustavu [€]	Kupljena električna energija kada je cijena prema jednotarifnom sustavu [kWh]	Trošak kupljene električne energije kada je cijena prema jednotarifnom sustavu [€]
t1	2,382	0,215	2,382	0,197	2,382	0,337
t2	0,404	0,034	7,404	0,612	0,404	0,057
t3	1,058	0,088	7,321	0,606	7,321	1,037
t4	13,800	1,073	1,557	0,129	1,074	0,152
t5	7,292	0,595	7,292	0,603	7,292	1,033
t6	0,286	0,025	2,286	0,189	2,286	0,324
t7	0,640	0,055	4,321	0,357	0,321	0,045
t8					0,341	0,048
t9					0,249	0,035
t10					1,950	0,276
t11					1,801	0,255
t12						
t13					1,068	0,151
t14	6,513	0,508				
t15	1,353	0,111			0,098	0,014
t16					0,150	0,021
t17					0,509	0,072
t18					0,806	0,114
t19					2,757	0,391
t20					0,467	0,066
t21					0,533	0,075
t22			0,341	0,028	0,341	0,048
t23			0,290	0,024	0,290	0,041
t24			0,316	0,026	0,316	0,045
Ukupno:	33,728	2,703	33,511	2,772	32,757	4,640

Nakon provedenih simulacija u tablici 6.10. je prikazana usporedba rezultata nakon provedenih simulacija. U tablici se može vidjeti za svaku simulaciju količina kupljene energije za svaki sat i

ukupna količinu kupljene energije za svaku simulaciju. Još je u tablici prikazan i trošak te energije koja je kupovana. Trošak je računat prema cijenama koje su naveden u poglavlju 6.3. Kada se pogleda koliko iznosi ukupni trošak kupljene električne energije vidi se da je najveći trošak kod cijene prema jednotarifnom modelu, i iznosi 4,640 €. Kod cijene prema dvotarifnom modelu trošak električne energije je 2,772 €, a najniži trošak je kod simulacije kada se cijena mijenja svaki sat i iznosi 2,703 €.

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu je predložen optimizacijski model aktivnog kupca s ciljem povećanja ušteda sudjelovanjem u različitim DRP-ima. Kako bi se pokazalo kolike uštede se mogu ostvariti provedeno je nekoliko simulacija. U simulacijama su se koristili kućanski uređaji kao klima uređaj, bojler, perilica rublja, perilica suđa, a još su korišteni i baterija, električni automobil te je postojala proizvodnja električne energije iz fotonaponske elektrane.

Sudjelovanje u različitim DRP-ima korisno je za osiguravanje ušteda. Sudjelovanjem u takvim programima omogućuje se opskrbljivačima električne energije da upravljaju električnom energijom u kućanstvima. U takvim programima se koriste pametni kućanski uređaji koji se mogu isprogramirati kada će se koji uređaj paliti. Pogodno je koristiti i bateriju u koju se može pohranjivati električna energija bilo da se ona kupi iz mreže ili osigura iz fotonaponske elektrane. Pohranjenu električnu energiju iz baterije je moguće iskoristiti kada je visoka cijena električne energije kako bi se moralo kupiti što manje električne energije po tim cijenama.

Nakon provedenih simulacija, uspoređeni su rezultati i moglo se zaključiti koliko je električne energije kupljeno u kojem slučaju i koliki je bio ukupni trošak električne energije za svaki slučaj. Iz usporedbe rezultata se vidi da se kod jednotarifnog modela kupljena električna energija najviše plati jer je cijena električne energije ista za svaki sat te onda ne postoji vrijeme s nižom cijenom za kupnju energije i punjenje baterije. U tom slučaju baterija se punila samo kada je postojao višak proizvodnje energije iz fotonaponske elektrane. Kod dvotarifnog modela trošak je bio manji jer je energija kupovana kada je bila niža cijena električne energije tj. kada se cijena obračunavala po nižoj tarifi te se s tom energijom punio automobil i baterija. Baterija je punjena i kada je postojao višak proizvodnje iz fotonaponske elektrane. Električna energija iz baterije se kasnije trošila u razdoblju kada se cijena električne energije obračunavala po višoj tarifi i tako se nije morala kupovati električnu energiju po višoj tarifi. Najveća ušteda je ostvarena kod dinamičkog modela gdje je različita cijena električne energije svaki sat. U tom slučaju je ostvaren najmanji ukupni trošak električne energije. Ostvarena je najveća ušteda jer je energija kupovana u onim satima kada je cijena bila niža te je s tom energijom punjen električni automobil i baterija. Baterija se još punila i s viškom električne energije iz fotonaponske elektrane.

Na temelju rezultata se vidi da je korisno kada aktivni kupci sudjeluju u DRP-ima te da je najmanji trošak postignut kada se cijena električne energije mijenja svaki sat jer se električna energija kupuje u razdobljima najnižih cijena.

## 8. SAŽETAK

Cilj ovog rada je razviti optimizacijski model koji će služiti za optimalno korištenje električne energije u kućanstvu aktivnog kupca koje ima instaliranu fotonaponsku elektranu, bateriju za pohranu električne energije, električni automobil, kućanske uređaje (klima uređaj, bojler, perilica suđa, perilica rublja) te sudjeluje u DRP-ima.

U teorijskom dijelu obrađen je sustav upravljanja električnom energijom te je dana arhitektura i infrastruktura HEMS-a. Prikazani su i obrađeni DRP-i kao i tehnike planiranja rada uređaja u HEMS-u.

Funkcija cilja koja je postavljena u radu bila je minimizacija troškova električne energije kućanstva aktivnog kupca uz određena ograničenja koja su na određen način utjecala na udobnost korisnika kućanstva. Optimizacijski model za optimalno korištenje uređaja koji koriste električnu energiju aktivnog kupca razvijen je u GAMS programskom okruženju. Nakon razvoja modela provedene su tri simulacije. Prikazani su rezultati simulacija u grafovima, slikama i tablicama. Komentirani i obrađeni su rezultati svake od simulacija. Na kraju je dana usporedba troškova električne energije po simulacijama kako bi se moglo vidjeti na koji način se mogu ostvariti najveće uštede.

Ključne riječi: optimizacijski model, fotonaponska elektrana, baterijski sustav za pohranu energije, električni automobil, aktivni kupac, programi odziva potražnje

## **9. ABSTRACT**

The aim of this paper is to develop an optimization model for the optimal utilization of electricity in the household of a prosumer who has installed a photovoltaic power plant, an energy storage battery, an electric vehicle, and household appliances (air conditioner, boiler, dishwasher, washing machine) and participates in Demand Response Programs (DRPs).

The theoretical part of the paper covers the energy management system, the architecture, and the infrastructure of the Home Energy Management System (HEMS). It also discusses DRPs and the techniques for planning the operation of devices within the HEMS.

The objective function established in the paper was to minimize the costs of the prosumer, subject to certain constraints that influence the user's comfort. The optimization model for the optimal utilization of electricity by the prosumer was developed using the GAMS programming environment. After developing the model, three simulations were conducted. The results of each simulation are discussed and analyzed. Finally, a comparison of electricity costs from the simulations is provided to determine how the greatest savings can be achieved.

Keywords: optimization model, photovoltaic power plant, battery energy storage system, electric vehicle, prosumer, Demand Response Program

## LITERATURA

- [1] Hussain Shareef, Maytham S. Ahmed, (Student Member, IEE), Azah Mohamed, (Senior Member, IEE) i Eslam AlHassan: Review on Home Energy Management System Considering Demand Responses, Smart Technologies, and Intelligent Controllers, IEE Access, svibanj 2018
- [2] Bin Zhou, Wentao Li, Ka Wing Chan, Yijia Cao, Yonghong Kuang, Xi Liu i Xiong Wang: Smart home energy management systems: Concept, configurations, and scheduling strategies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, broj 61, 2016
- [3] Puppala Rajendhar i Belwin Edward Jeyaraj: Application of DR and co-simulation approach for renewable integrated HEMS: a review, IET Journals, svibanj 2019, doi: 10.1049/iet-gtd.2018.5791
- [4] Alain Aoun, Hussein Ibrahim, Mazen Ghandour i Adrian Ilinca: Supply Side Management vs. Demand Side Management of a Residential Microgrid Equipped with an Electric Vehicle in a Dual Tariff Scheme, Energies, broj 12, svibanj 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/en12224351>
- [5] Sonja Kallio i Monica Siroux: A Review – Home Renewable Energy Management Systems in Smart Grids, IOP Publishing Ltd, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1050/1/012001
- [6] Xuan Hou, Jun Wang, Tao Huang, (Member, IEE), Tao Wang, (Member, IEE) i Peng Wang (Fellow, IEE): Smart Home Energy Management Optimization Method Considering Energy Storage and Electric Vehicle, IEE Access, listopad 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2944878
- [7] Francesco Giordano, Alessandro Ciocia, Paolo Di Leo i A. Mazza: Vehicle-to-Home Usage Scenarios for Self-Consumption Improvement of a Residential Prosumer With Photovoltaic Roff, IEE Transactions on Industry Applications, ožujak 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2978047
- [8] Sonja Kallio i Monica Siroux: Hybrid renewable energy systems based on micro - cogeneration, Energy Reports, broj 8, travanj 2022, stranice 762-769, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.158>
- [9] Arindom Chakraborty, Monirul Islam, Fahim Shahriyar, Sharnali Islam, Hasan U. Zaman i Mehedi Hasan: Smart Home System: A Comprehensive Review, Journal of Electrical and Computer Engineering, ožujak 2023, <https://www.hindawi.com/journals/jece/2023/7616683/>
- [10] S. Pelka, E.J.L. Chappin, M. Klobasa, L.J. de Vries: Participation of active consumers in the electricity system: Design choices for consumer governance, Energy Strategy Reviews, broj 44, studeni 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.esr.2022.100992>
- [11] Sharif Naser Makhadmeh, Ahamad Tajudin Khader, Mohammed Azmi Al-Betar, Syibrah Naim, Ammar Kamal Abasi i Zaid Abdi Alkareem Alyasser: Optimization methods for power scheduling problems in smart home: Survey, Renewable and Sustainable Energy Reviews, broj 115, 2019
- [12] ResearchGate – službena stranica, Arhitektura HEMSA, dostupno na: [https://www.researchgate.net/figure/Overall-architecture-of-a-HEMS\\_fig1\\_342494330](https://www.researchgate.net/figure/Overall-architecture-of-a-HEMS_fig1_342494330), (pristupljeno 28.06.2023)
- [13] ZDNet - službena stranica, Najbolje baterije za kućanstva, dostupno na: <https://www.zdnet.com/home-and-office/energy/best-home-battery/>, (pristupljeno 28.06.2023)

- [14] VEKA - službena stranica, Centralna kontrolna jedinica HEMS-a, dostupno na: <https://www.veka.de/media/info-centre/modern-living-and-working-in-the-smart-home.html> , (pristupljeno 28.06.2023)
- [15] Wikipedija - slobodna enciklopedija, Pametno brojilo, dostupno na: [https://en.wikipedia.org/wiki/Smart\\_meter](https://en.wikipedia.org/wiki/Smart_meter) (pristupljeno 28.06.2023)
- [16] Huawei - službena stranica, Zigbee komunikacija, dostupno na: <https://forum.huawei.com/enterprise/en/iot-what-is-zigbee/thread/667247560093483009-667213859104108544> ,(pristupljeno 28.06.2023)
- [17] IQ Air Conditioners - službena stranica, Pametni klima uređaji, dostupno na: [http://www.iqairconditioners.co.za/iq\\_supreme.html](http://www.iqairconditioners.co.za/iq_supreme.html) , (pristupljeno 28.06.2023)
- [18] BBC Top Gear - službena stranica, Top 20 električnih automobila, dostupno na: <https://www.topgear.com/car-news/electric/top-gears-top-20-electric-cars> , (pristupljeno 28.06.2023)
- [19] Safeer Appliances Ltd - službena stranica, Hladnjak, dostupno na: <https://www.safeerappliances.co.uk/products/siemens-iq-500-ka90ivi20g-american-fridge-freezer-stainless-steel-a-rated> , (pristupljeno 28.06.2023)
- [20] Nenad Bolf: Kemija u industriji, broj 70, 2021.godina, dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/file/382926> , (pristupljeno 06.07.2023)
- [21] Franjo Kamenečki: Agronomski glasnik: Glasilo Hrvatskog agronomskog društva, broj 13, 1963.godina, dostupno na: <https://hrcak.srce.hr/166819> , (pristupljeno 06.07.2023)
- [22] CROPEX – službena stranica, Cijene električne energije za dan 14.06.2023, dostupno na: <https://www.cropex.hr/hr/trgovanja/unutardnevno-trziste/rezultati-unutardnevnog-trzista.html> , (pristupljeno 14.06.2023)
- [23] HEP - Hrvatska Elektroprivreda, Tarifne stavke – cijene električne energije, dostupno na: <https://www.hep.hr/elektra/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/1547> , (pristupljeno 11.07.2023)
- [24] HEP – Hrvatska Elektroprivreda, Tarifne stavke – troškovi distribucije i prijenosa, dostupno na: <https://www.hep.hr/ods/kupci/kucanstvo/tarifne-stavke-cijene/160> , (pristupljeno 11.07.2023)
- [25] EV Database - službena stranica, Tesla Model 3 - specifikacije, dostupno na: <https://ev-database.org/car/1555/Tesla-Model-3> , (pristupljeno 18.07.2023)
- [26] Wallbox - službena stranica, Punionica električnog vozila, dostupno na: [https://wallbox.com/en\\_catalog/pulsar](https://wallbox.com/en_catalog/pulsar) , (pristupljeno 23.07.2023)
- [27] Growatt - službena stranica, Baterija za kućanstvo - specifikacije, dostupno na: <https://www.ginverter.com/products/ark-xh-battery> , (pristupljeno 18.07.2023)
- [28] GAMS - službena stranica, GAMS dokumentacija, dostupno na: <https://www.gams.com/> , (pristupljeno 18.07.2023)

## ŽIVOTOPIS

Renato Funjak je rođen 21.09.1999. godine u Osijeku, Hrvatska. Trenutno stanuje u Punitovcima, malom mjestu u blizini Đakova. Završio je Osnovnu školu Josipa Kozarca u Josipovcu Punitovačkom. Nakon toga upisuje Elektrotehničku i prometnu školu Osijek, u Osijeku te ju završava 2018. godine s odličnim uspjehom. Nakon srednje škole upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, preddiplomski studij elektrotehnike. Završenim preddiplomskim studijem 2021. godine sječe naziv univ. bacc. ing. el. techn. inf. i upisuje diplomski studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika, modul elektroenergetski sustavi.

Potpis autora

-----