

ANALIZA RADA KUPCA-PROIZVOĐAČA SA SOLARNOM ELEKTRANOM I TOPLOTNOM PUMPOM

ANALYSIS OF THE WORK OF THE PROSUMER WITH SOLAR POWER PLANT AND HEAT PUMP

Zoran SIMENDIĆ, CIRED Srbija, Srbija
Goran ŠVENDA, Fakultet tehničkih nauka Novi Sad, Srbija
Tatjana LATAS, Somborelektro d.o.o. Sombor, Srbija
Dalibor MRAOVIĆ, Aqua Flam Vent d.o.o. Sombor, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Integracija solarnih elektrana i toplotnih pumpi u domaćinstvima, ima ekspanziju u svetu, a zadnjih godina sve više i u Srbiji. Mogućnosti takvog integrisanog sistema, njegove prednosti i mane, pre svega njegova ekonomska opravdanost, u odnosu na klasične sisteme za grejanje i hlađenje domaćinstava, osnovna su tema ovog rada. Pod klasičnim sistemima se smatraju sistemi koji koriste samo električnu energiju iz distributivne mreže, koriste električnu energiju, gas i/ili pelete (uobičajeno za domaćinstva u Republici Srbiji), ili pored električne energije iz distributivne mreže imaju dodatne izvore energije (solarnu elektranu ili toplotnu pumpu). U skladu sa tim, kao osnovni pokazatelj ekonomske opravdanosti sistema istaknuti su troškovi njihove realizacije i troškovi njegovog korišćenja.

Mogućnosti integrisanog sistema su analizirane u dužem vremenskom periodu, na području Elektrodistribucije Sombor, u domaćinstvu koje ima toplotnu pumpu i solarnu elektranu sa kojom može da pokrije svoju celokupnu potrošnju. Podaci koji su izmereni u toku jedne godine upoređeni su sa podacima koji bi se u tom domaćinstvu dobili da se u istom periodu domaćinstvo grejalo i hladilo primenom nekog od klasičnih sistema. Za obračune su korišćene aktuelne cene i propisi u Srbiji.

Ključne reči: Kupac-proizvođač, Toplotna pumpa, Solarna elektrana

ABSTRACT

The integration of solar power plants and heat pumps in households is expanding in the world, and in recent years more and more in Serbia. The possibilities of such an integrated system, its advantages and disadvantages, and above all its economic justification, in relation to classic systems for heating and cooling households, are the main topics of this paper. Classic systems are considered to be systems that use only electricity from the distribution network, use electricity, gas and/or pellets (usually for households in the Republic of Serbia), or have additional sources of energy in addition to electricity from the distribution network (solar power plant or heat pump). In accordance with that, the costs of their realization and the costs of their use were highlighted as the basic indicator of the economic justification of the system.

The possibilities of the integrated system were analyzed over a long period of time, in the area of Elektrodistribucija Sombor, in a household that has a heat pump and a solar power plant with which it can cover its entire consumption. The data that were measured during one year were compared with the data that would have been received in that household if the household had been heated and cooled using one of the classic systems during the same period. Current prices and regulations in Serbia were used for calculations.

Key words: Prosumer, Heat pump, Solar power plant

1. UVOD

Priključenje solarnih elektrana na niski i srednji napon, električno što bliže potrošačima, predstavlja najefikasniji način njihove integracije u elektroenergetski sistem (EES) [1]. U tu svrhu Republika Srbija je izmenila Zakon o energetici [2] i donela više zakona među kojima je i zakon o energetskej efikasnosti [3]. Time je definisan novi učesnik na tržištu električne energije (el. en.) – kupac-proizvođač, kao pravno, ili fizičko lice, odnosno preduzetnik. Preduzetnik svoje potrebe za el. en. zadovoljava iz sopstvene proizvodnje (npr. iz solarne elektrane), i po potrebi, kada njegova proizvodnja nije dovoljna, iz distributivne mreže (DM). Ako preduzetnik ima višak proizvedene el. en. taj višak predaje u DM da bi kasnije mogao da ga iskoristi [3].

Za grejanje i hlađenje objekta, toplotna pumpa (TP) koristi energiju vazduha, zemlje i podzemnih voda i el. en. iz DM. Integracijom solarne elektrane i TP dodatno se smanjuje el. en. koju domaćinstvo¹ preuzeta iz DM (samim tim i račun korisnika), i generalno, povećava se proizvodnja i potrošnja zelene el. en. u EES. Investicije potrebne za realizaciju integrisanog sistema značajno su veće od investicija koje su potrebne za realizaciju klasičnih sistema, ali je zato njegova eksploatacija znatno povoljnija od eksploatacije klasičnih sistema. Upravo, odnos troškova instalacije i korišćenja integrisanog sistema, u odnosu na klasične sisteme osnovna su tema ovog rada.

Ovaj rad predstavlja nastavak istraživanja koja su objavljena u radu [5], a zasnivaju se na vrednostima, koje su u periodu jedne godina, izmerene kod kupca-potrošača na teritoriji Ogranka Elektrodistribucije Sombor.

Nakon uvoda, u drugom delu su prikazani osnovni podaci o TP, solarnoj elektrani, integrisanom sistemu, cenama energenata i kupcu-proizvođaču, potrebni za realizaciju ovog rada. Eksperiment i vrednosti jednogodišnjih merenja prikazane su u trećem delu. Rezultati analize ekonomske opravdanosti primene integrisanog sistema prikazani su u četvrtom delu. Nakon zaključka, referentno je navedena literatura korišćena za realizaciju ovog rada.

2. POSTAVKA PROBLEMA

U Srbiji se za grejanje i hlađenje domaćinstva najčešće koristi jedan od sledeća četiri sistema:

1. - samo el. en. (električni kotao, termoakumulaciona peć i klima uređaj);
2. - el. en. i TP;
3. - el. en. i gas;
4. - el. en. i pelet.

Za svaki od njih je razmatran uticaj nadogradnje sa solarnom elektranom. Tako je dobijeno još četiri sistema:

5. - samo el. en. (električni kotao, termoakumulaciona peć i klima uređaj) i SE;
6. - integrisani sistem (el. en., TP i SE);
7. - el. en., gas i SE;
8. - el. en., pelet i SE

Troškovi njihove izgradnje i eksploatacije porede se sa troškovima izgradnje i eksploatacije integrisanog sistema, koji koristi TP, solarnu elektranu i el. en. iz DM (sistem 7).

Toplotna pumpa

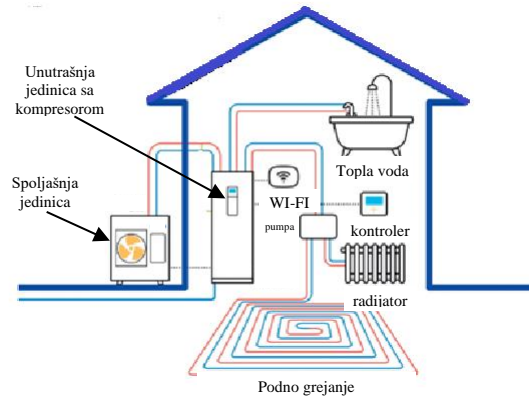
TP za grejanje i hlađenje domaćinstva i grejanje tople vode preuzima energiju iz spoljašnje sredine i el. en. iz DM. Ona ima tri osnovne jedinice: spoljašnju jedinicu (isparivač), unutrašnju jedinicu (kondenzator) i rashladni fluid, Slike 1 i 2. Razmena energije se vrši cirkulacijom rashladnog fluida između spoljašnje i unutrašnje jedinice, tako što pri grejanju objekta isparivač crpi energiju iz obnovljivog izvora (vazduh, voda, geotermalni, ili solarni izvor) prinudnom transformacijom tečnosti u gas. Kompresor komprimuje gas čime mu povećava temperaturu. Kondenzator prenosi toplotu sa gasa na grejni sistem, a gas se vraća u tečno stanje. Ekspanzioni ventil snižava pritisak rashladnog sredstva, što izaziva isparavanje i početak novog ciklusa. Prilikom hlađenja ovaj ciklus je obrnut, Slika 2 [6].

Današnje TP podnose izuzetno niske temperature. One imaju pun kapacitet do -15°C bez upotrebe grejača, odnosno do -25°C sa upotrebom grejača. TP omogućava da se osim unutrašnjih prostorija zagreva i sanitarna voda. Primenom fabrički isporučenog softvera omogućeno je da se na samom uređaju, ili putem mobilnog telefona [7], u realnom vremenu izvrši nadzor sistema i upravljanje radnim i servisnim parametrima, odnosno da se po potrebi promeni rad svih komponenti TP. Cena TP se godinama smanjuje tako da one postaju sve više konkurentne u odnosu na ostale sisteme za grejanje i hlađenje objekata.

¹ Pod domaćinstvo se smatra individualna gradnja (kuća), bez centralnog grejanja i protočne tople vode.



Slika 1 – Unutrašnja jedinica sa kompresorom i spoljašnja jedinica

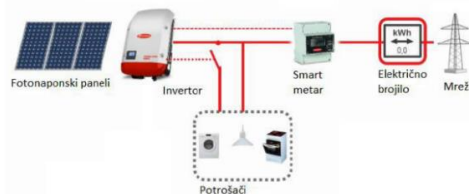


Slika 2 – Šematski prikaz rada TP

Solarna elektrana

U oblasti fotonaponskih sistema za domaćinstva mogu da se realizuju sledeći sistemi [8]:

- Sistem na mreži (on grid), koji se gradi paralelno sa DM, i zavistan je od nje. On predstavlja više od 90% tržišta fotonaponskih sistema. Važno je da svaki inverter kao sistem ne degradira kvalitet snabdevanja el. en. u tački konekcije. Cilj je proizvodnja el. en. za sopstvene potrebe uz vraćanje viška u DM, da bi se ista kasnije koristila. Najčešće se iza mernog uređaja (električno brojilo) ugrađuje uređaj za merenje tokova el. en. Na osnovu tih merenja se u svakom trenutku može pratiti rad solarne elektrane. Primer solarne elektrane koja je instalirana kod kupca-proizvođača (domaćinstvo, industrija) prikazan je na Slici 3.
- Kućni hibridni sistem (on grid, ili off grid), koji koristi više izvora el. en. (solarne elektrane, punjive baterije, ili vetrogeneratore).
- Minigrid sistem (off grid), koji se gradi gde DM nije dostupna, i/ili može da snabdeva više domaćinstava.
- Ostrvski sistem (off grid), koji se gradi gde DM nije dostupna, i za domaćinstva koja povremeno troše el. en.



Slika 3 – On grid solarna elektrana [9]

Cene

Za potrebe ovog rada korišćene su cene energenata koje su u Srbiji važile u toku februara 2024. godine:

- el. en. zelena zona 7,9706 RSD, plava zona 11,9558 RSD i crvena zona 23,9117 RSD bez PDV;
- gas: 1 kWh iznosi 5,5611 RSD sa PDV; za 1 kWh potrebno je 0,09126 m³ gasa (račun Sombor gas);
- pelet: za 1 kWh iznosi 8,661 RSD sa PDV; za 1 kWh potrebno je 0,244 kg peleta prosečne kalorijske vrednosti; 1 t peleta iznosi 35.300 RSD [9,10]);
- 1 € = 117,171 RSD srednji kurs, na dan 9.2.2024. (kupovni 116,820 RSD, prodajni 117,523 RSD) [11];
- u zavisnosti da li se TP koristi za grejanje, grejanje i hlađenje, ili grejanje, hlađenje i zagrevanje vode njena projektantska cena je od 4.000 do 13.000 € (za domaćinstvo veličine 200 m²), za proračune koji slede usvojeno je 9.800 €;
- cena isporuke i ugradnje električnog kotla za domaćinstvo veličine 200 m² je od 1.500 do 4.000 €, za proračune koji slede usvojeno je 2.500 €;
- cena isporuke i ugradnje gasnog kotla za domaćinstvo veličine 200 m² je od 3.000 do 7.000 €, za proračune koji slede usvojeno je 5.300 €;
- cena isporuke i ugradnje kotla na pelet za domaćinstvo veličine 200 m² je od 2.000 do 5.000 €, za proračune koji slede usvojeno je 3.000 €;
- cena isporuke i ugradnje 3 klime za hlađenje za domaćinstva veličine 200 m² od 24.000, 18.000 i 12.000 BTU iznosi 4.000 €;
- cena isporuke i ugradnje solarne elektrane je od 600 do 1.000 € za 1 kW panela (kWp), za proračune koji slede usvojeno je 600 € za solarne elektrane preko 10 kWp, i 700 € za solarne elektrane ispod 10 kWp.

Kupac-proizvođač

Kupac-proizvođač je krajnji kupac koji je na unutrašnje instalacije priključio sopstveni objekat za proizvodnju el. en. iz obnovljivih izvora, pri čemu se proizvedena el. en. koristi za snabdevanje sopstvene potrošnje, a njen višak se predaje u DM [2]. Višak el. en. koja je predata u DM se akumulira i računa u bilansu ukupne godišnje potrošnje el.en. kupca-proizvođača. Na osnovu Zakona o korišćenju obnovljivih izvora el. en. kao i Uredbe o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupca-proizvođača i snabdevača [12], Elektrodistribucija Srbije je donela neophodnu proceduru za sticanje statusa kupca-proizvođača [13].

Kupci-proizvođači se dele u tri kategorije: 1) domaćinstva sa direktnim merenjem, i objekti koji nisu domaćinstva i stambene zajednice, instalirane snage fotonaponskih modula do 10,8 kW; 2) objekti koji nisu domaćinstva i stambene zajednice, a imaju instalirane snage fotonaponskih modula od 10,8 do 50 kW i 3) stambene zajednice. Za svaku kategoriju definisana je posebna procedura priključenja. Na primer, za prvu kategoriju, koja je od interesa za razmatranja u ovom radu, sticanje statusa kupca-proizvođač se vrši po pojednostavljenoj proceduri. U tu svrhu, Elektrodistribucija Srbije definisala je Opšte uslove za priključenje fotonaponskih modula na unutrašnje instalacije postojećeg objekta kupca [14].

3. INTEGRISANI SISTEM

U domaćinstvu koje ima integrisani sistem, solarnu elektranu i TP, kretanje el. en. kroz električno brojilo je u oba smera u zavisnosti od potrošnje domaćinstva i proizvodnje el. en. solarne elektrane. Kada je proizvodnja solarne elektrane veća od potrošnje u domaćinstvu, el. en. se kreće prema DM. Kada je proizvodnja solarne elektrane manja od potrošnje domaćinstva, el. en. se kreće od DM prema domaćinstvu. Potrošnja TP je uvrštena u ukupnu potrošnju domaćinstva.

Tokovi el. en. prate se sa pet mernih uređaja i mobilnom aplikacijom invertora i TP, Slika 4:

MU-1 – merenje potrošene el. en. TP;

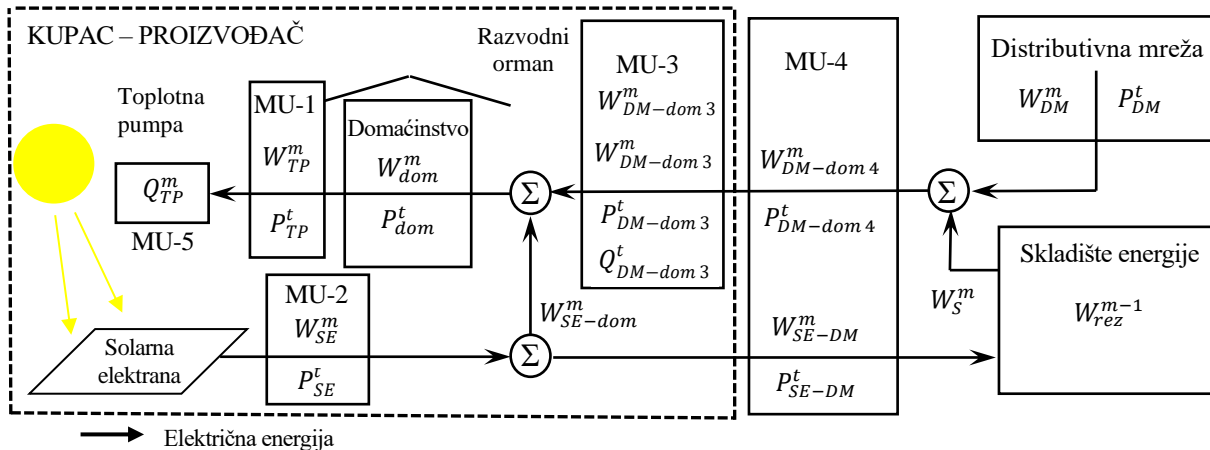
MU-2 – merenje proizvedene el. en. na solarnoj elektrani; interno merenje invertora;

MU-3 – merenje preuzete el. en. i snage iz DM u domaćinstvo;

MU-4 – merenje preuzete el. en. iz DM, na brojilu; zvanično merno mesto Elektrodistribucije i

MU-5 – merenje proizvedene toplotne energije TP.

MU-1 i MU-3 snimaju jedno-minutne srednje vrednosti modula struja, snaga i napona, i protok el. en. MU-2 je ugrađen u solarnu elektranu i snima dnevne i mesečne podatke koji se mogu preuzeti putem mobilne aplikacije (petominutne srednje vrednosti snage se dobijaju sa servera uvoznika opreme na koji je vezana mobilna aplikacija). MU-5 je ugrađeno u toplotnu pumpu i pamti ukupnu dnevnu proizvodnju Q_{TP}^m (mesečni podaci se očitavaju putem mobilne aplikacije TP). Odnos proizvedene i potrošene el. en. TP (W_{TP}^m) – koeficijent učinka TP je k_{COP} (COP – coefficient of performance).



Slika 4 – Kretanje el. en. kod kupca-proizvođača

Merenja snage i energije naznačeni su sa P i W , respektivno. Sa superskriptom t i m naznačene su njihove trenutne i mesečne vrednosti, respektivno. Sa subskriptom neznane su sledeće vrednosti:

- TP – potrošnja toplotne pumpe, izmerena sa MU-1;
- dom – ukupna potrošnja kupca-proizvođač i TP, izračunato, izraz (4);
- SE – proizvodnja solarne elektrane, izmerena sa MU-2;
- $SE-dom$ – deo proizvodnje solarne elektrane koju preuzima kupac-proizvođač sa TP, izmerena sa MU-2;
- DM – snaga i energija koju kupac-proizvođač preuzima direktno iz DM, izmerene sa MU-3;

- DM-dom* – ukupna snaga i energija koju kupac-proizvođač preuzima iz DM, izmerene sa MU-3;
S – potrošnja kupac-proizvođač kompenzovana iz skladišta el. en., izračunata (1);
SE-DM – proizvodnja solarne elektrane isporučena u DM (za kupca to je godišnje skladište el. en.), izmerena sa MU-4;
rez – rezervna el. en. kupca-proizvođača skladištena u DM, izračunato, izrazi (6), (7) i (8).

Na osnovu Slike 4, za mesec *m*, definisane su relacije za energiju koju solarna elektrana proizvede, W_{SE}^m , energiju koju domaćinstvo preuzima iz DM, $W_{DM-dom\ 3}^m$ (i $W_{DM-dom\ 4}^m$), i energiju ukupne potrošnje domaćinstva, W_{dom}^m :

$$W_{SE}^m = W_{SE-dom}^m + W_{SE-DM}^m, \quad \rightarrow \quad W_{SE-dom}^m = W_{SE}^m - W_{SE-DM}^m \quad (1)$$

$$W_{DM-dom\ 4}^m = W_{DM}^m + W_S^m, \quad (2)$$

$$W_{DM-dom\ 3}^m = W_{DM-dom\ 4}^m, \quad (3)$$

$$W_{dom}^m = W_{DM-dom\ 3}^m + W_{SE-dom}^m = W_{DM-dom\ 4}^m + W_{SE-dom}^m \quad (4)$$

$$W_{TP}^m = Q_{TP}^m * k_{COP} \quad (5)$$

U zavisnosti od odnosa vrednosti potrošnje domaćinstva i toplotne pumpe, i proizvodnje solarne elektrane, moguća su sledeća tri slučaja:

$$W_{SE-DM}^m + W_{rez}^m > W_{DM-dom\ 4}^m, \quad (6)$$

$$(W_{DM}^m = 0, \quad W_S^m = W_{DM-dom\ 4}^m, \quad W_{rez}^m = W_{SE-DM}^m + W_{rez}^{m-1} - W_{DM-dom\ 4}^m),$$

$$W_{SE-DM}^m + W_{rez}^m = W_{DM-dom\ 4}^m, \quad (7)$$

$$(W_{DM}^m = 0, \quad W_S^m = W_{DM-dom\ 4}^m, \quad W_{rez}^m = 0),$$

$$W_{SE-DM}^m + W_{rez}^m < W_{DM-dom\ 4}^m, \quad (8)$$

$$(W_{DM}^m = W_{DM-dom\ 4}^m - W_{SE-DM}^m - W_{rez}^{m-1}, \quad W_S^m = W_{SE-DM}^m + W_{rez}^{m-1}, \quad W_{rez}^m = 0).$$

U uredbi o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja [12], definisani su sledeći pojmovi za obračun el. en. (aktivna el. en.) u toku jednog meseca, u kWh:

- preuzeta el. en. – el. en. koju kupac-proizvođač preuzme iz DM ($W_{DM-dom\ 4}^m$, Slika 13);
- isporučena el. en. – el. en. koju kupac-proizvođač isporuči u DM (W_{SE-DM}^m , Slika 13);
- neto el. en. – razlika preuzete i isporučene el. en. kupca-proizvođača u DM, na osnovu očitavanja brojila el. en., koja ispunjavaju propisane meteorološke zahteve i utvrđuje se po vremenima primene tarifa za aktivnu energiju zasebno, u skladu sa ovom uredbom.

Napomena: utrošena el. en. se za svaki obračunski period, kupcu-proizvođaču obračunava kao pozitivna vrednost razlike neto el. en. (utvrđene po vremenima primene tarife za aktivnu el. en.) i viška el. en. iz prethodnog perioda W_{DM}^m , koja je akumulisana u DM, (utvrđene po vremenima primene tarife za aktivnu el. en.).

Generalno, optimalno dimenzionisanje TP i solarne elektrane sa invertorom, u skladu sa ukupnom potrošnjom razmatranog domaćinstva (potrošnja, grejanje, hlađenje), ključno je za smanjenje troškova početnih ulaganja u realizaciju integrisanog sistema [4].

4. EKSPERIMENT

Tokovi el. en. praćeni su godinu dana kod kupca-proizvođača u Gradu Somboru, čija je jednospratna kuća, stambene površine 260 m² izgrađena 2002. Do 2022. objekat je imao status domaćinstva sa merenom snagom i elektroenergetsku saglasnost od 27,6 kW (grejanje putem električnog kotla snage 18 kW; najviše je bilo uključeno 12 kW). Za ovako veliku snagu domaćinstvo je moralo da napravi poseban izvod iz transformatorske stanice. Pored električnog kotla, tokom leta i zime je radila i inverterska klima, snage 12 kW. Podešena temperatura u prizemlju objekta je bila 22°C, tako da je u kući bila neujednačena temperatura. U 2021. potrošnja domaćinstva je bila 33.909 kWh [5], više od 30.000 kWh, tako da je domaćinstvo trebalo da pređe iz kategorije garantovanog snabdevanja u komercijalnog kupca, što bi dodatno povećalo već velike račune. Prosečna potrošnja od 130 kWh/m² ukazuje na standardno izolovano domaćinstvo.

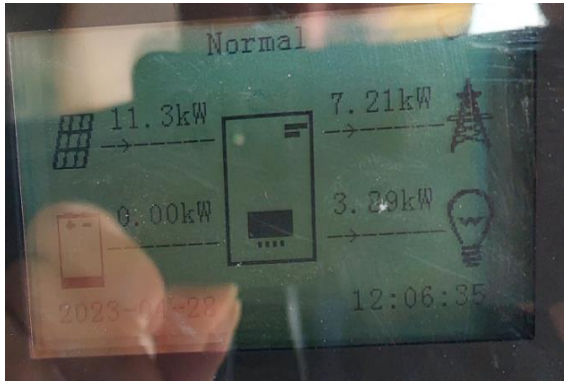
Spoljašnji izgled stambenog objekta, kao i raspored postavljenih solarnih panela, prikazani su na Slici 5.



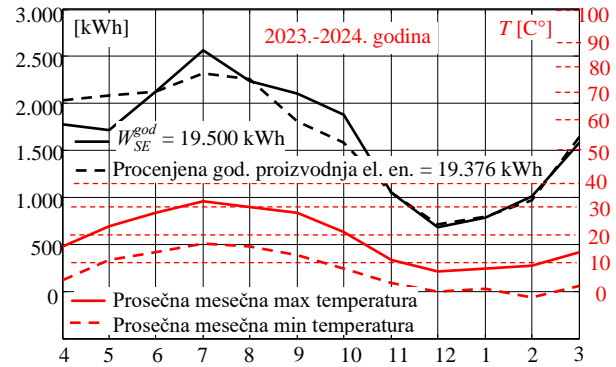
Slika 5 – Spoljašnji izgled stambenog objekta



Slika 6 – Slika solarne elektrane



Slika 7 – Kretanje snage u domaćinstvu (displej invertora)



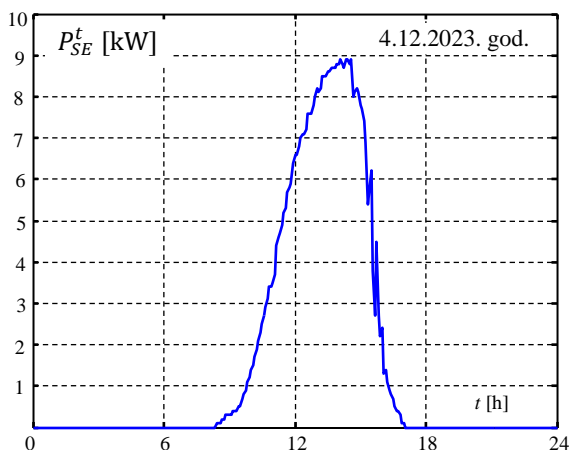
Slika 8 – Procenjena i ostvorena mesečna proizvodnja solarne elektrane

Krajem 2022. u domaćinstvo je ugrađena trofazna bešumna TP [7] snage 20 kW, sa kompresorom u unutrašnjoj jedinici. Ovaj znatno efikasniji sistem omogućio je znatno više temperature u sistemu grejanja putem radijatora, Slika 1. TP je podešena da cele godine održava temperaturu od 25°C, i da priprema toplu sanitarnu vodu. U istom periodu, postavljena je i solarna elektrana, snage 15,2 kWp, Slike 5, 6 i 7. Ugrađen je inverter 20 kW, nešto veće snage da bi se omogućilo proširenje kapaciteta solarne elektrane, za potrebe električnog automobila i sistema skladištenja el. en. Očekivana proizvodnja solarne elektrane, na razmatranom objektu, od aprila 4.2023. do marta 2024, prikazana je na Slici 8, crna isprekidana linija. Za grad Sombor, 40 solarnih panela snage po 380 W, postavljeni na krovu, nagib panela 40°, azimut 25°C uz gubitak sistema solarne elektrane od 6% [15], očekivana proizvodnja bila je 19.376 kWh/mes. Ostvorena proizvodnja solarne elektrane, u istom periodu naznačena je sa crnom punom linijom, prosečno 19.500 kWh/mes. Prosečno godišnje odstupanje iznosi 2,8%, a maksimalno odstupanje 21%, u maju kada je bilo loše vreme. Najveća proizvodnja solarne elektrane je bila u julu (sedmi mesec) 2.600 kWh, kada je bila maksimalna prosečna temperatura 32°C. Prosečna maksimalna i minimalna mesečna temperature naznačene su sa punom i isprekidanom crvenom linijom, respektivno.

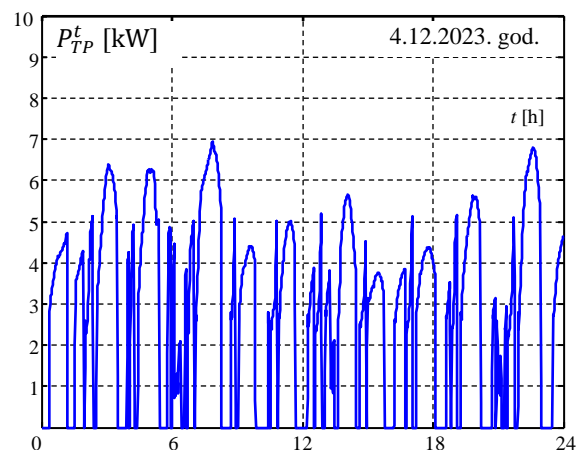
Prilikom projektovanja i izgradnje integrisanog sistema korišćena su iskustva jedne od prvih solarnih elektrana [16]. Po završetku radova, kupac je 11.4.2023. prešao iz statusa kupca u status kupac-proizvođač.

Ostvoreni rezultati

Kao primer rada integrisanog sistema, u ovom delu su prikazane i analizirane vrednosti koje su izmerene za jedan radni dan, 04.12.2023. Proizvodnja solarne elektrane, sa periodom očitavanja pet minuta (MU-2), prikazana je na Slici 9. Vrh proizvodnje od 9 kW, ostvaren je u 15 h (krov je okrenut prema zapadu). U prolećnom periodu proizvodnja je dostizala 14 kW [5]. Maksimalna potrošnja TP u zimskom periodu je bila 7 kW Slika 10, a tokom proleća samo 4 kW [5].



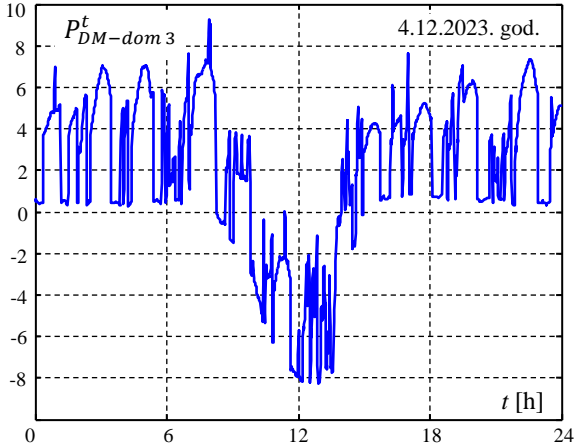
Slika 9 – Aktivna snaga solarne elektrane (MU-2)



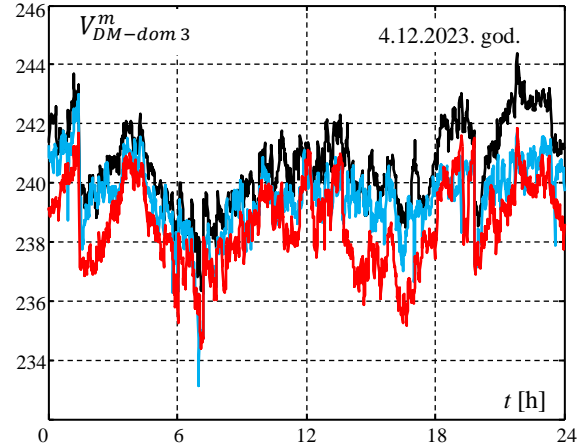
Slika 10 – Potrošnja toplotne pumpe (MU-1)

Aktivna snaga koja se iz domaćinstva šalje u DM (MU-1) prikazana je na Slici 11. Velike oscilacije snage su posledica dominantnog učešća TP u ukupnoj potrošnji domaćinstva. Deo proizvodnje el. en., koji je veći od ukupne potrošnje domaćinstva, šalje se u DM (MU-3), Slika 11. Usled velikih oscilacija u tokovima snage, velike su i oscilacije vrednosti napona (MU-3), Slika 12. Dodatni problem su i razlike vrednosti napona po fazama, npr. jedna faza je dostizala 244 V, dok je u drugoj bilo 233 V. Generalno, takve oscilacije mogu da utiču na kvalitet el. en.

sa kojom se napajaju potrošače na istom izvodu. Za razmatrani primer to nije slučaj jer je kupac-proizvođač povezan na transformatorsku stanicu sa posebnim kablovskim priključkom.



Slika 11 – Tok aktivne snage (MU-3): iz DM u domaćinstvo (+), iz domaćinstva u DM (-)

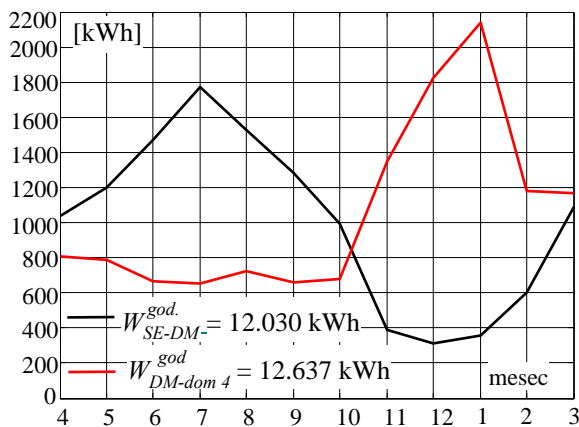


Slika 12 – Promena vrednosti modula napona (MU-3)

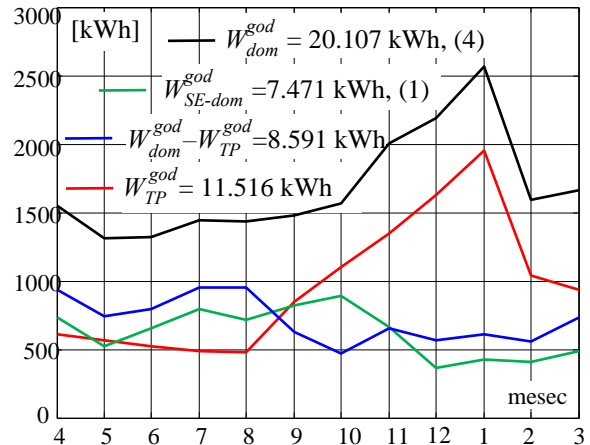
Podaci za obračun kupca-proizvođača (računi EPS Snabdevanja) prikazani su u Tabeli 1. Veličine $W_{DM-dom 4}^m$ i W_{SE-DM}^m su očitane na mernom mestu Elektrodistribucije (MU4), a veličine W_{DM}^m i W_{rez}^m su izračunate na osnovu izraza (6), (7) i (8). Samo u februaru i martu 2024. proizvodnja solarne elektrane nije mogla da pokrije ukupnu potrošnju domaćinstva ($W_{DM}^m > 0$). Za to bi bilo potrebno da se ugradi još jedan kWp solarnih panela.

Tabela 1 – Obračun Elektrodistribucije – na osnovu merenja MU-3

Mesec	Preuzeta el. en.	Isporučena el. en.	Višak el. en. iz predhodnog perioda	Utrošena el. en. iz DM	Višak el. en. za sledeći period
	$W_{DM-dom 4}^m$ [kWh]	W_{SE-DM}^m [kWh]	W_{rez}^{m-1} [kWh]	W_{DM}^m [kWh]	W_{rez}^m [kWh]
4-april	810	1.038	0	0	228
5-maj	791	1.201	228	0	638
6-jun	665	1.467	638	0	1.440
7-jul	651	1.771	1.440	0	2.560
8-avgust	723	1.527	2.560	0	3.364
9-septembar	662	1.281	3.364	0	3.983
10-oktobar	679	994	3.983	0	4.298
11-novembar	1.345	392	4.298	0	3.345
12-decembar	1.822	312	3.345	0	1.835
1-januar	2.136	355	1.835	0	54
2-februar	1.183	602	54	527	0
3-mart	1.170	1.090	0	80	0
Ukupno	12.637	12.030	21.365	607	21.365



Slika 13 – Dijagram tokova energije kroz (MU-4)



Slika 14 – Dijagram vrednosti potrošnje domaćinstva

Na Slici 13 je prikazana el. en. koju je domaćinstvo sa integrisanim sistemom preuzelo iz DM (crvena linija) i el. en. koju je domaćinstvo isporučilo u DM (crna linija). Vrednosti su izmerene na mernom mestu Elektrodistribucije (MU-4). Ukupna preuzeta i isporučena el. en. na nivou godinu dana (april-mart, ceo ciklus kupca-proizvođača), su veoma bliske, 12.637 i 12.030 kWh, respektivno. Raspodela potrošnje el. en. u domaćinstvu za isti period, prikazana je na Slici 14. Prikazane su vrednosti potrošnje domaćinstva (crna linija), potrošnje TP (crvena linija), deo proizvodnje solarne elektrane koju preuzima domaćinstvo (zelena linija), i potrošnja domaćinstva bez TP (plava linija). Domaćinstvo sa TP troši prosečno oko 1.500 kWh, a tokom zime dostiže i do 2.500 kWh. Za godinu dana TP je potrošila 11.516 kWh el. en. (MU-1) i proizvela 30.932 kWh toplotne energije (MU-5). Odnos proizvedene i potrošene el. en. TP – koeficijent učinka k_{COP} za celu godinu iznosi 2,69, što znači da za uloženi 1 kWh TP daje energiju ekvivalentnu 2,69 kWh.

5. EKONOMSKA OPRAVDANOST PRIMENE INTEGRISANOG SISTEMA

Ekonomski opravdanost primene integrisanog sistema upoređena je sa drugim sistemima za grejanje i hlađenje domaćinstva. Tokom 2021. godine potrošnja el.en. razmatranog domaćinstva grejane putem električnog kotla i hlađene putem klima uređaja je iznosila 33.909 kWh, sa zadatom temperaturom u objektu 22°C [5]. Ukupna potrošnja el. en. domaćinstva (sa potrošnjom TP W_{dom}^{god}), za period merenja od april 2023. do marta 2024, bila je 20.107 kWh, Slika 14, izraz (4).

Na osnovu merenja MU-5, poznata je vrednost energije Q_{TP}^{god} koju je proizvela TP za hlađenje, toplu vodu, i grejanje, Tabela 2. Isto tako na osnovu merenja MU-3 poznata je ukupna potrošena el. en. TP. Na osnovu COP u Tabeli 2 je procenjeno koji je deo el. en. TP potrošila za grejanje, hlađenje i toplu vodu. Izmerena proizvedena energija (MU-5) za grejanje iznosi 25.665 kWh. U Tabeli 3 su procenjene količine energenata koje bi bile potrebne da se tokom celog perioda održava temperatura 25°C primenom jednog od klasičnih sistema: 1. - samo el. en.; 2 - el. en. i TP; 3 - el. en. i gas; i 4) el. en. i pelet. Procena je izvršena na osnovu odnosa kalorijskih vrednosti i cena koje su date u delu Cene. Isto tako količina energije za hlađenje i toplu vodi iznosi 5.381 kWh.

Tabela 2 – Izmerena potrošnja energije i proizvodnja integrisanog sistema, za temperaturu domaćinstva 25°C

Energija	W_{dom}^{god}	W_{TP}^{god} (MU-3)		Q_{TP}^{god} (MU-5)
	kWh	Funkcija	kWh	kWh
20.107	20.107	Grejanje	9.515	25.595
		Hlađenje i topla voda	2.001	5.381
Ukupno	20.107		11.516	30.976

Tabela 3 – Procena godišnjih potreba za energentima i el. en., za temperaturu domaćinstva 25°C

Godišnje potrebe za	1. el. en.	2. TP	3. Gas		4. Pelet	
	kWh	kWh	kWh	m ³	kWh	t
	2	1	3	4 = 2*0,09126	5	6 = 2*0,244
Grejanje	25.665	9.515	–	2.342	–	6,262
Hlađenje i topla voda	5.381	2.001	5.381	–	5.381	–
Domaćinstvo, bez grejanja, hlađenja, tople vode	8.591	8.591	8.591	–	8.591	–
Ukupno	39.427	20.107	13.972	2.342	13.972	6,262

Troškovi instalacije i korišćenja sistema

Cene instalacije i korišćenja razmatranih sistema, prikazani su u Tabelama 4 i 5. Naznačene su vrednosti potrošnje energije i proizvodnje, na godišnjem nivou, izraženo u kWh. U zavisnosti od sistema prvo su prikazane "Početne investicija [€]" – cene potrebne za kupovinu i instalaciju kotla, TP, solarne elektrane i klima uređaja (u skladu sa cenama koje su date u delu Cene). El. en. koju domaćinstvo za godinu dana preuzima iz DM, osim energije za dodatne izvore energije, prikazana je redu "Potrošnja domaćinstva", kolone "Potrošnja". Ako sistem osim el. en. koristi dodatne izvore energije (TP, solarna elektrana, gas, pelet) njihov doprinos u vidu potrošnje i proizvodnje energije prikazan je u vrsti "Dodatni izvori energije". Njihova dodatna potrošnja je naznačena u kolonama "Potrošnja", a energija koju ti sistemi generišu u kolonama "Proizvodnja". Za TP i solarnu elektranu proizvodnja i potrošnja su naglašene u kWh, a za gas i pelet u m³ i tonama, odnosno u ekvivalentnim kWh. Vrednosti ukupne potrošnje i proizvodnje sistema, u ekvivalentnim kWh, prikazane su u vrsti "Σ energija [kWh]". Ukupna očekivana potrošnja el. en. preuzeta iz DM, i njena cena prikazani su u vrstama "Σ energija [kWh]" i "Račun EPS Snabdevanje [RSD]", respektivno. Cena ukupne očekivane potrošnje dodatnih energenata (gas i pelet) prikazana je u vrsti "Dodatni izvori energije", kolone "Potrošnja". i "Dodatni izvori energije [RSD]", respektivno. U poslednjoj vrsti prikazani su ukupni troškovi korišćenja sistema "UKUPNO [RSD]", kolone "Potrošnja". U istoj vrsti, u kolonama

"Proizvodnja" naznačena je ukupna dobit sistema (smanjenje troškova) usled korišćenja dodatnog izvora energije. Napomena: Za sve razmatrane sisteme smatra se da domaćinstvo ima postavljen sistem za centralno grejanja, bez kotla. U skladu sa tim, cena radijatora i cevi, i cena njihovog postavljanja, su jednake za sve sisteme, i one nisu uzete u obzir.

Tabela 4 – Godišnje potrebe u energijama četiri osnovna sistema grejanja i hlađenja, bez solarnih elektrana

	1. - samo el. en.		2. - el. en. i TP		3. - el. en. i gas		4. - el. en. i pelet	
	Potrošnja	Proizvod.	Potrošnja	Proizvod.	Potrošnja	Proizvod.	Potrošnja	Proizvod.
Početna investicija [€]	6.500	/	9.800	/	9.300	/	7.000	/
Potrošnja domaćinstva [kWh]	39.427	/	8.591	/	13.972	/	13.972	/
Dodatni izvori energije	/	/	11.516 kWh	30.976 kWh	2.342 m ³	25.665 kWh	6,262 t	25.665 kWh
Σ energija [kWh] ($W_{DM-dom4}^{god}$ -potr.)	39.427	/	20.107	/	13.972	/	13.972	/
Račun EPS Snabdevanje [RSD]	916.000	/	351.000	/	222.000	/	222.000	/
Dodatni izvori energije [RSD]	/	/	11.516	645.000	170.000	/	221.000	520.000
UKUPNO [RSD]	916.000	/	351.000	645.000	392.000	520.000	443.000	520.000

U Tabeli 5 su prikazana četiri osnovna sistema nadograđena sa SE da bi pokrili potrošnju domaćinstva. Veća snaga od 20 kW je teško ostvarljiva zbog veličine krovova i ograničena je maksimumom u energetske saglasnosti:

- sistem 1. + SE 20 kW = sistem 5;
- sistem 2. + SE 15,2 kW = sistem 6;
- sistem 3. + SE 10 kW = sistem 7;
- sistem 4. + SE 10 kW = sistem 8.

SE su predviđene da pokriju potrošnju domaćinstava osim u sistemu 1. gde je maksimalno predviđena snaga SE. Tabela 5 integrisani sistem vrsta "Dodatni izvori energije-Kotlovi" potrošnja označava koliko je TP potrošila el. en., a proizvodnja koliko je proizvela el. en.

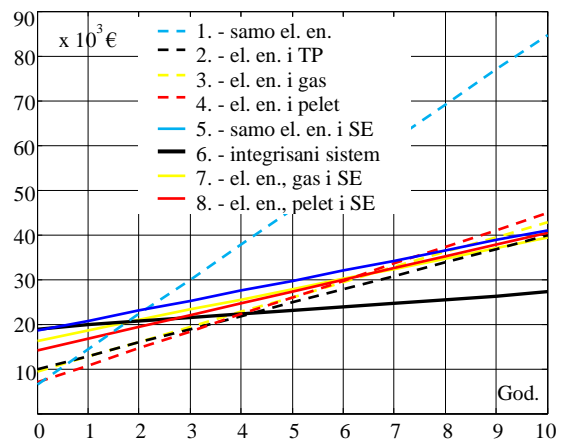
Kumulativni troškovi domaćinstva na nivou deset godina ("Početna investicija" + godišnji troškove za energente – "Σ energija/Potrošnja"), za razmatrane sisteme, prikazani su na Slici 15. Nije računato promena, povećanje cene energenata tokom godina, amortizacija sistema, održavanje sistema, itd.

Tabela 5 – Godišnje potrebe u energijama četiri osnovna sistema grejanja, hlađenja i tople vode sa SE

	5.- samo el. en. i SE		6. - integrisani sistem		7. - el. en., gas i SE		8. - el. en., pelet i SE	
	Potrošnja	Proizvod.	Potrošnja	Proizvod.	Potrošnja	Proizvod.	Potrošnja	Proizvod.
Početna investicija [€]	6.500	12.000	9.800	9.120	9.300	7.000	7.000	7.000
Potrošnja domaćinstva [kWh]	39.427	/	8.591	/	13.972	/	13.972	/
Dodatni izvori energije	Kotlovi	/	11.516 kWh	30.976 kWh	2.342 m ³	25.665 kWh	6,262 t	25.665 kWh
	SE [kWh]	/	/	19.500	/	13.241	/	13.241
Σ energija [kWh] ($W_{DM-dom4}^{god}$ -potr.)	12.927	/	607	/	731	/	731	/
Račun EPS Snabdevanje [RSD]	263.000	/	96.000	/	99.000	/	99.000	/
Dodatni izvori energije [RSD]	/	560.000	/	1.065.000	170.000	819.000	221.000	819.000
UKUPNO [RSD]	263.000	560.000	96.000	1.065.000	269.000	819.000	320.000	819.000

Na osnovu Tabela 4 i 5 i Slike 15, može se uočiti sledeće:

- početne investicije su najveće kod integrisanog sistema (sistem 6.), a najmanje kod sistema koji koristi samo el. en. bez dodatnih izvora energije (sistem 1.);
- primena integrisanog sistema je značajno jeftinija od bilo kog drugog sistema, a najskuplja je primena sistema koji koristi samo el. en. bez dodatnih izvora energije, razlika u ceni primene ta dva sistema je preko 800.000 din./god., odnosno više od deset puta;
- primenom integrisanog sistema smanjena je potrošnja el. en. koju domaćinstvo preuzima iz DM u odnosu na: 1) sistem 1. - samo el. en. za 38.820 kWh/god. što odgovara emisiji 18,2 t CO₂/god.; 2) sistem 3. - el. en. i gas za 13.365 kWh/god. što odgovara emisiji 6,3 t CO₂/god.; 3) sistem 4. - el. en. i pelet za 13.365 kWh/god. što odgovara emisiji 6,3 t CO₂/god.;
- dodavanjem samo solarne elektrane na klasične sisteme značajno smanjuje potrošnju el. en. koju domaćinstvo preuzima iz DM, npr. kod sistema 1. - samo el. en., 3. - el. en. i gas i 4. - el. en. i pelet, u razmatranom



Slika 15 – Troškovi investicija i potrošnje domaćinstva sa različitim sistemima grejanja sa današnjim cenama energenata

domaćinstvo dodavanjem solarne elektrane potrošnja el. en. se smanjuje za 26.500, 13.241 i 13.241 kWh/god. respektivno;

- posle četiri godine najjeftiniji je integrisani sistem, bez obzira na najveće početne investicije.
 - na nivou 10 godina integrisani sistem je 3 puta jeftiniji od sistema 1, i 50% jeftiniji od svih drugih sistema.
- Za očekivati je da će se u narednim godinama cene solarne elektrane i TP značajno smanjiti, a cene energenata povećavati, što će povećati opravdanost ulaganja u integrisane sisteme, odnosno smanjiti rokove njihove isplativosti. U prilog tome govore sledeće činjenice, u zadnjih pet godina:
- cena električne energije se povećala za 35,9 %, sa 0,0983 na 0,1336 € u Srbiji, a u Evropi za 26,8 %, sa 0,1984 na 0,2517 €.
 - cena gasa se povećala za 42,9%, sa 0,0342 na 0,0489 € u Srbiji, a u Evropi za 43,8 %, sa 0,0782 na 0,1125 € [18].

Metoda neto sadašnja vrednost

Za dodatnu analizu komercijalne isplativosti investicije u zamenu postojećeg električnog kotla novim sistemom grejanja posmatrano u periodu od 10 godina primenjena je metoda neto sadašnje vrednosti (NSV) i metoda perioda povrata investicije [19].

NSV prikazuje sposobnost projekta da vrati uložena sredstva, odnosno predstavlja razliku između sadašnje vrednosti neto priliva i sadašnje vrednosti investicionih ulaganja. Izračunava se kao zbir diskontovanih budućih novčanih tokova umanjanih za troškove početne investicije:

$$NSV = \frac{\text{Novčani tokovi}}{(1+d)^t} - \text{Početna investicija}, \quad (8)$$

gde je sa d naznačena diskontna stopa, a sa t broj godina posmatranog perioda.

Diskontna stopa se obično procenjuje kao oportunitetni trošak kapitala. Diskontnom stopom se sve buduće vrednosti svode na sadašnju vrednost, odnosno na vrednost u vreme donošenja odluke o investiranju.

Pozitivna NSV prikazuje koliko će projekat u posmatranom periodu vratiti više od uložene i obrnuto, negativna NSV prikazuje koliko će gubitak generisati projekat. Dobijena NSV govori koliko svaki projekat odbaci nove vrednosti nakon otplate početne investicije.

Period povrata investicije prikazuje vremenski period koji je potreban da se povрати početna investicija kroz neto prilive koje generiše projekat. Drugim rečima, to je vremenski period u kome se suma neto priliva izjednačava sa visinom početne investicije.

Imajući u vidu da se u narednom periodu u Srbiji može očekivati povećanje cena energenata², kao i da je cena energije u EU značajno viša od cena u Srbiji, urađen je test osetljivosti na povećanje cena. U tu svrhu, analiziran je scenario u kojem su cene energenata na nivou prosečnih cena energenata u EU (cene su preuzete iz [20] – el.en., [21] – gas, izvor Eurostat, i [22] – pelet, izvor GWMI). Cene, korišćene za proračune, prikazane su u Tabeli 6.

Tabela 6 – Vrednosti cene energenata potrebne za proizvodnju 1 kWh, u RSD, februar 2024.

	cene u Srbiji	prosečne cene u EU
el. en.	10,26	29,49
gas	5,56	13,18
pelet	8,66	13,81

NSV i period povrata investicije za razmatrane sisteme i cene u Srbiji, i prosečne cene u EU, prikazani su u Tabeli 7. Vrednosti su izračunate na osnovu početnih investicija, godišnjih troškova korišćenja sistema i neto uštede u potrošnji energije koju sistem donosi u odnosu na sistem 1. - samo el. en. (Tabele 4 i 5). Prilikom vrednovanja početnih investicija nisu razmatrane mogućnosti finasiranja projekata (kamate, subvencije, itd.). Primenjena je diskontna stopa od 6,5%.

Tabela 7 – Neto sadašnja vrednost i period povrata investicije

	cene u Srbiji		prosečna cena u EU	
	NSV	period povrata investicije	NSV	period povrata investicije
2. - el. en. i TP	24.865	2,0	25.158	2,0
3. - el. en. i gas	22.849	2,1	16.003	2,6
4. - el. en. i pelet	22.020	1,7	17.316	2,1
5. - samo el. en. i SE	21.564	3,3	29.450	2,8
6. - integrisani sistem	31.390	2,7	51.322	1,9
7. - el. en., gas i SE	23.396	3,0	32.961	2,4
8. - el. en., pelet i SE	22.567	2,8	34.275	2,1

² Na osnovu "stand by" aranžman iz decembra 2022. god., čije je produženje najavljeno za naredne dve godine, predviđeno je sukcesivno povećanje cena el. en. i gasa [23].

Sa aspekta NSV, investicija u integrisani sistem donosi najveću dobit u periodu od 10 godina u oba posmatrana slučaja. Dok, sa aspekta perioda povrata investicije, investicija u sistem 4. - el. en. i pelet najbrže vraća uloženi novac po aktuelnim cenama, dok u analiziranom slučaju – cena energenata na nivou prosečnih cena energenata u EU, najbrže se vraća investicija u sistem 6. - integrisani sistem.

Početne investicije u integrisani sistem su veće od istih za sve ostale razmatrane sisteme (veće su od 420 do 11.920 €), ali ne i period njihove otplate koji je pocenama u Srbiji 2,7 godina, a po cenama u EU samo 1.9 godine. Konačno, trend značajnog poskupljenja energenata, favorizuje integrisani sistem jer je njegovo korišćenje praktično ne zavisi od cena energenata na tržištu.

6. ZAKLJUČAK

U radu se razmatraju mogućnosti primene solarne elektrane integrisane sa toplotnom pumpom, za grejanje i hlađenje domaćinstava, i grejanje vode kupca-proizvođača, kao novog pravnog lica na tržištu električne energije, u odnosu na primenu drugih sistema koji se koriste u Republici Srbiji (samo el.en.; el. en. i TP; el. en. i gas, i el. en. i pelet, svaki od njih sa i bez solarne elektrane).

Mogućnosti integrisanog sistema, njegove prednosti i mane, i ekonomska opravdanost su analizirane u dužem vremenskom periodu, na području Elektrodistribucije Sombor, u domaćinstvu koje ima toplotnu pumpu i solarnu elektranu sa kojom može da pokrije svoju celokupnu potrošnju. U radu su prikazani, analizirani podaci koji su na nivou jedne godine izmereni u domaćinstvu. Ti podaci su upoređeni sa podacima koji bi se dobili da se to domaćinstvo, u istom periodu grejalo i hladilo primenom nekog drugog sistema. Za obračune su korišćene aktuelne cene i propisi u Srbiji.

I pored velikih početnih ulaganja, integrisani sistem se pokazao kao najisplativiji sistem. Njegovom primenom omogućeno je stvaranje energetski efikasnog domaćinstva, koje je potpuno nezavisno od upotrebe fosilnih goriva. U skladu sa tim, primena integrisanog sistema je više nego korisna kako za domaćinstvo, tako i za celokupan EES i kao takav treba da se ekonomski podrži od strane države.

LITERATURA

- [1] N.Rajaković, 2021, Da li je pravo vreme za izgradnju velike solarne elektrane u Srbiji, 36 Međunarodno savetovanje Energetike, Zlatibor, T1-192
- [2] Vlada Republike Srbije, 2021, Zakon o energetici. Sl. glasnik RS. br. 145/2014. 95/2018 i 40/2021
- [3] Vlada Republike Srbije, 2021, Zakon o energetskej efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije, Sl. Gl. RS 40/2021
- [4] Z.Simendić, Z.Majstorović, S.Miljanić, D.Mraović, 2023, Rezultati rada solarnih elektrana na području Vojvodine, CIGRE Srbije, C6-19
- [5] Z.Simendić, G.Švenda, T.Latas, D.Mraović, 2023, Energetska efikasnost domaćinstva sa toplotnom pumpom i solarnom elektranom, Energija, ekonomija, ekologija, 3, str. 30-38
- [6] <https://www.msinstalacije.rs/oprema/toplotne-pumpe/toplotna-pumpa-vazduh-voda-evi-serija.html>
- [7] <https://www.wemportal.de>
- [8] M.Vuković, B.Ostojić, 2021, Koncept korišćenja mini solarnih centrala u domaćinstvu, 36 Energetika, Zlatibor, T4-175
- [9] <http://www.ugalj-prodaja.rs/>
- [10] <https://agroinfonet.com/poljoprivreda/ratarstvo/pelet-za-zimu>
- [11] <https://www.kursna-lista.com/kursna-lista-nbs>
- [12] Vlada Republike Srbije, 2022, Uredba o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupca – proizvođača i snabdevača, Službeni glasnik RS, br. 83/2021 i 74/2022
- [13] <https://elektrodistribucija.rs/>
- [14] <https://elektrodistribucija.rs/pdf/Opsti%20uslovi.pdf>
- [15] https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html
- [16] V.Katić, Z.Čorba, D.Milićević, B.Dumnić, B.Popadić, 2015, Realizacija krovne fotonaponske elektrane na Fakultetu tehničkih nauka u Novom Sadu, Tehnika-Elektrotehnika 64 (2015) 4
- [17] N.Miloradović, 2019, Uticaj spoljne temperature na način rada toplotnog izvora, Zbornik Međunarodnog kongresa o KGH, v 34, n.1, p 155-162
- [18] <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/home>
- [19] L. Barjaktarović, Z. Jović and M. Milojević, 2021, *Poslovne finansije*, Univerzitet Singidunum, Beograd
- [20] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_204__custom_11668781/default/table?lang=en
- [21] <https://www.globalwoodmarketsinfo.com/pellet-prices-in-europe-continue-to-decline-at-the-beginning-of-2023/>
- [22] https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_pc_202/default/table?lang=en&category=nrg.nrg_price.nrg_pc
- [23] <https://www.imf.org/en/Publications/CR/Issues/2023/12/20/Republic-of-Serbia-Second-Review-Under-the-Stand-By-Arrangement-and-Request-for-542671>