

# Koncept i matematički model energetske samoodrživog domaćinstva

Miloš Stojanović, Milica Aščerić, Matej Mićović, Đorđe Lazović, Željko Đurišić

Katedra za elektroenergetske sisteme  
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet  
Beograd, Srbija

[stojanovic.milos.1996@gmail.com](mailto:stojanovic.milos.1996@gmail.com); [ascericmilica4@gmail.com](mailto:ascericmilica4@gmail.com); [micovicmatej@gmail.com](mailto:micovicmatej@gmail.com); [lazovic@etf.rs](mailto:lazovic@etf.rs); [djurisic@etf.rs](mailto:djurisic@etf.rs)

**Sažetak**—Lokalna proizvodnja energije je jedan od strateških ciljeva u razvoju globalne energetike. Predloženi koncept polazi od pretpostavke da je potrošnju električne i toplotne energije u domaćinstvu moguće u svakom trenutku zadovoljiti iz lokalne proizvodnje i skladištenja energije. Na osnovu poznatog profila potrošnje električne i toplotne energije izvršena je optimizacija lokalnih fotonaponskih sistema, solarnih kolektora i akumulatora električne energije i tople vode. Pored ovih sistema predviđen je i kotao na pelet, kao pomoćni sistem za proizvodnju zelene toplotne energije. Postavljeni optimizacioni model je strukturiran kao linearni model sa ograničenjima tipa nejednakosti, i rešavan je metodom mešovitog celobrojnog linearnog programiranja. U radu su prikazani rezultati i diskutovani pravci praktične optimizacije i implementacije predloženog koncepta.

**Ključne reči** - nulta emisija CO<sub>2</sub>; energetske samoodrživo domaćinstvo; obnovljivi izvori energije; MILP;

## I. UVOD

Poslednjih nekoliko decenija u svetu je primetan trend naglog industrijskog, naučnog i tehnološkog razvoja, što ima za posledicu sve veće naseljavanje gradova a samim tim i sve veće su potrebe za korišćenjem električne energije. Sagorevanjem fosilnih goriva u velikim termoelektranama oslobađaju se velike količine štetnih čestica i gasova, pre svega CO<sub>2</sub>, što za posledicu ima negativan uticaj na životnu sredinu. Rezerve uglja u Srbiji su na izmaku, a pri tome je sve manje kvalitetnog uglja, odnosno uglja visoke kalorijske moći. Kao prirodan sled takvih događaja u svetu, kao i kod nas poslednjih nekoliko godina je sve veći akcenat na korišćenju obnovljivih izvora energije. Svako domaćinstvo koje se odluči na ugradnju solarnih panela ili kolektora, daje značajan doprinos u integraciji obnovljivih izvora energije u sistem, odnosno zdravijoj i čistijoj sredini. Upravo jedno takvo domaćinstvo je analizirano u ovom radu. Glavni cilj je da se sve potrebe za električnom, odnosno toplotnom energijom obezbede iz sistema kolektora, solarnih panela, rezervoara za skladištenje toplotne energije i baterija za skladištenje električne energije, odnosno da se projektuje energetske održiv sistem u periodima najmanjeg solarnog zračenja. Posmatrani vremenski interval na kome se posmatrala analiza rada, održivost i ekonomičnost ovakvog sistema su zimski meseci decembar, januar i februar, kao najkritičniji iz uglja proizvodnje električne, odnosno toplotne energije. Za grejanje prostora je predviđeno korišćenje kotla na biomasu (pelet). U poglavlju II je detaljno opisana procedura estimacije energetskih parametara kuće, odnosno elemenata sistema proizvodnje električne energije, kao i modeli

potrošnje toplotne i električne energije. Poglavlje III se bavi opisom matematičkog modela za optimizaciju energetskih resursa domaćinstva. U poglavlju IV prikazani su rezultati dobijeni primenom softverskog alata Matlab. Na kraju, dat je osvrt na najvažnije prednosti i performanse predloženog idejnog rešenja, i utvrđeni su finansijski aspekti za izgradnju jednog energetski nezavisnog i samoodrživog prosečnog domaćinstva u Srbiji.

## II. ESTIMACIJA ENERGETSKIH PARAMETARA I KOMPONENTE ENERGETSKI SAMOODRŽIVOG DOMAĆINSTVA

### A. Idejno rešenje za energetske snabdevanje samoodrživog domaćinstva

U predloženom idejnom rešenju, sisteme za generisanje električne i toplotne energije čine fotonaponski moduli i solarni kolektori. S obzirom na postojanje debalansa između trenutne proizvodnje i potrošnje toplotne i električne energije, predviđena su skladišta u vidu baterija i rezervoara tople vode. Rezervoar ima ulogu da u zimskom periodu obezbedi sanitarnu toplu vodu, kao i toplotnu energiju neophodnu za grejanje objekta. Zagrevanje vode u rezervoaru moguće je vršiti pomoću solarnih kolektora, električnim grejačem i kotlom na pelet. Cilj je da se u potpunosti obezbede energetske potrebe samoodrživog domaćinstva korišćenjem tehnologija baziranih na obnovljivim izvorima energije.

### B. Fotonaponski moduli

Fotonaponski paneli predstavljaju sisteme za pretvaranje solarnog zračenja u električnu energiju. U radu se analizira domaćinstvo u okolini Niša, u mestu Lalinac, sa godišnjom horizontalnom insolacijom 1378 kWh/m<sup>2</sup>. Kako su za dimenzionisanje sistema od značaja zimski meseci zbog svojih nižih vrednosti solarne insolacije za datu lokaciju se za decembar ima vrednost mesečne insolacije 35,6 kWh/m<sup>2</sup> sa prosečnom temperaturom ambijenta 2,3°C, za januar 43,7 kWh/m<sup>2</sup> i 0,6°C, dok se za mesec februar imaju vrednosti 63,3 kWh/m<sup>2</sup> i 2,8°C. Posmatrani objekat na analiziranoj lokaciji ima krov na dve vode, pri čemu je orijentacija jedne strane krova potpuno južna sa azimutnim uglom 0°, i nagibom obe strane krova od po 35°. Za ovako orijentisani objekat je ekonomski prihvatljivo postavljati solarne module samo na južno orijentisanoj strani krova pod nagibnim uglom samog krova.

### C. Solarni kolektori

Solarni kolektori pretvaraju solarnu energiju u toplotnu. Kada solarno zračenje dospe na površ apsorbera, veliki deo te energije se apsorbuje i prenosi na radni fluid, koji tu energiju odnosi do akumulatora. Što veća energija Sunčevog zračenja zagreje radni fluid, to je kolektor efikasniji. Ova transformacija treba da bude maksimalna pri predviđenim radnim temperaturama i vremenskim uslovima. Za razmatrano idejno rešenje usvojeni su vakuumski kolektori, koji imaju dobre performanse za velike temperaturne razlike između radnog fluida i okoline. Ovi kolektori mogu raditi i pri slabom Sunčevom zračenju, dok su toplotni gubici malo osetljivi na povećanje razlike temperatura radnog fluida i okoline. Radni fluid je mešavina glikola i vode, kako ne bi došlo do mržnjenja u spoljašnjem delu instalacije solarnog kruga. Ovakav fluid ne sme doći u kontakt sa vodom iz rezervoara, pa se prenos toplotne energije do akumulatornog rezervoara vrši preko razmenjivača.

Korisna snaga izražena preko temperature vode u akumulatornom rezervoaru [1] data je sa:

$$Q_k = AF \left[ G\tau\alpha - a_1(t_A - t_a) - a_2(t_A - t_a)^2 \right] = AF \left[ \tau\alpha G - U(t_A - t_a) \right] \quad (1)$$

gde je:

$G\tau\alpha$  - deo upadne solarne energije koja je apsorbovana u kolektoru;

$A$  - površina kolektora;

$F$  - modifikovani faktor odnošenja toplote, uzima u obzir postojanje razmenjivača;

$a_1, a_2$  - linearni i kvadratni koeficijent toplotnih gubitaka;

$t_A, t_a$  - temperatura vode u rezervoaru i temperatura ambijenta;

$U$  - nagib krive efikasnosti kolektora

### D. Baterije za skladištenje električne energije

Obzirom na intermitentnost u proizvodnji obnovljivih izvora energije, sistemi za skladištenje energije su neophodni ukoliko želimo pouzdano i neprekidno napajanje. Imajući u vidu da se u predloženom konceptu domaćinstva koriste resursi koji proizvode zelenu energiju, u upotrebi će biti i baterije koje su manje toksične i ekološki prihvatljivije. Litijum-fosfatne baterije imaju prednosti u performansama kao što su: velika specifična energija, mala stopa samopražnjenja, mogućnost brzog punjenja i pražnjenja, veliki broj ciklusa, rad u širokom opsegu temperatura [2]. Zbog niskog procenta samopražnjenja u toku meseca ova pojava je zanemarena u proračunu. Litijum-fosfatne baterije su skuplje od olovnih baterija, ali uzimajući u obzir njihovu dugovečnost i efikasnost, isplativije su.

### E. Kotao na pelet

Budući da je u zemljama Unije energija dobijena sagorevanjem biomase ubrojana u obnovljivu, podsticajnim merama Vlade Republike Srbije podržano je sagorevanje biomase za proizvodnju toplotne i električne energije [3]. Izgaranjem peleta stvara se ista količina CO<sub>2</sub> koliku je drvo koristilo prilikom svog rasta, te je sa aspekta emisije gasova CO<sub>2</sub> upotreba kotla na pelet neutralna. Kilogram peleta može proizvesti oko 5kWh toplotne energije. Izabrana snaga kotla od 4kW zadovoljava potrebe za grejanjem i sanitarnom toplom vodom posmatranog domaćinstva.

### F. Rezervoar za skladištenje tople vode

Akumulacija toplotne energije se ostvaruje povećanjem temperature fluida skladištenog u rezervoaru. Pošto je u pitanju domaćinstvo željena temperatura akumulirane vode se kreće u opsegu 45-60°C. Idući duž visine rezervoara postoje slojevi fluida različite temperature, pri čemu je na vrhu najveća vrednost, a na dnu najmanja [4]. Uvažavanje pojave stratifikacije zahteva složenu termičku analizu. U okviru rada se razmatra potpuno izmešana voda sa konstantnom temperaturom po celoj zapremini. U literaturi se mogu naći preporučene vrednosti akumulirane vode u rezervoaru po m<sup>2</sup> kolektora, upravo da bi se izbegle visoke radne temperature cirkulacionog fluida koje bi smanjile efikasnost kolektora. Korišćen je multivalentni rezervoar koji poseduje priključke za više izvora toplotne energije. Koeficijent toplotnih gubitaka rezervoara ka okolini je stalan i iznosi 0.08 °C.

### G. Potrošnja električne energije

Pri formiranju dijagrama potrošnje električne energije korišćeni su mereni satni podaci domaćinstva u Nemačkoj [5]. Merene vrednosti spomenutog domaćinstva sadrže i satne vrednosti potrošnje određenih kućnih električnih uređaja, poput mašine za pranje veša i sudomašine. Kako je kod takvog domaćinstva prosečna mesečna potrošnja skoro dva puta manja nego za prosečno domaćinstvo u Srbiji [6], merene satne vrednosti su skalirane a potom umanjene za deo električne energije koju troše grejači u mašini za pranje veša, sudomašini i akumulatornom bojleru. Struktura potrošnje tople vode kod takvih uređaja je preuzeta iz [7].

### H. Potrošnja toplotne energije

Proračun potrebne toplotne energije za grejanje kuće izvršen je prema ASHRAE priručniku [8]. Prema ovom priručniku uvažava se prenos, odnosno gubitak toplote kroz zidove, prozore i krov i to sve uz uvažavanje orijentacije zidova i prozora. Za proračun je korišćena CLTD metoda. Ulazni podaci za proračun su konstrukcija (materijalizacija) zidova, krova i prozora, njihove termičke provodnosti ( $U$  vrednosti), CLTD vrednosti, unutrašnja (željena) temperatura kuće, satne ambijentalne temperature, kao i vrednosti površina zidova, krova i prozora. U analizama je usvojeno da je unutrašnja temperatura 20°C, da su prozori od duplog stakla između kojih je izolacioni sloj debljine 12.7mm od argona. Zid je od cigle debljine 100mm, 100mm izolacije i betonskih blokova debljine 200mm (puni beton bez šupljina). Satne ambijentalne temperature su dobijene iz softvera PVsyst.

Za formiranje dijagrama potrošnje sanitarne tople vode korišćene su ukupne satne vrednosti utrošene toplotne energije domaćinstava u Hrvatskoj priključenih na gradske toplovođe. [9]. Usvojeno je da su navike prosečnog potrošača u Srbiji slične našim susedima u Hrvatskoj, te su vrednosti potom izražene u procentima učešća svakog sata u odnosu na ukupno potrošenu tog dana. Za nominalnu dnevnu potrošnju četvoročlanog domaćinstva je korišćena vrednost od 160l tople vode, odnosno 40l po članu domaćinstva [10]. Usvojena prosečna temperatura potrošne tople vode je 50°C [11], a sanitarne hladne vode 15°C [12].

### III. MATEMATIČKI MODEL ZA OPTIMIZACIJU RESURSA ENERGETSKI SAMOODRŽIVE KUĆE

#### Ulazne veličine:

$i, j, I$  - vremenski intervali u trajanju od 1h i 2h i vremenski horizont na kom se vrši optimizacija

$c_{pv}, c_{bat}, c_{tank}$  - cena jediničnog kapaciteta fotonaponskog panela, baterije i rezervoara tople vode

$c_p$  - penalizacioni faktor kojim se množi izlazna toplotna snaga peći na pelet

$P_{pv,i}, P_{el,i}$  - proizvodnja aktivne snage fotonaponskog panela jedinične snage i potrošnja električne energije pasivne kuće u satu  $i$

$\overline{P}_{grid}$  - maksimalna aktivna snaga preuzeta iz distributivne mreže

$\overline{W}_{grid}$  - maksimalna kumulativno preuzeta električna energija iz mreže tokom intervala  $I$

$\overline{P}_{heat}$  - nominalne snage grejača u rezervoaru i peći na pelet

$\overline{W}_p$  - maksimalna kumulativno proizvedena električna energija iz peći na pelet tokom intervala  $I$

$\overline{P}_{disch}, \overline{P}_{ch}$  - maksimalna snaga pražnjenja i maksimalna snaga punjenja jedne baterije

$C_{nom}, V_{nom}$  - nominalni kapacitet i nominalni napon jedne baterije

$\underline{SOC}, \overline{SOC}$  - minimalni i maksimalni stepen napunjenosti baterije

$Q_{coll,i}, Q_{heat,i}$  - proizvodnja toplotne energije jednog sistema solarnih kolektora i potrošnja toplotne energije za zagrevanje objekta u satu  $i$

$Q_{hot\_w,i}, Q_{cold\_w,i}$  - toplotna energija utrošene sanitarne tople vode i toplotna energija dodate hladne vode u rezervoar tokom sata  $i$

$c_{water}$  - specifični toplotni kapacitet vode izražen u  $kWh/kg \cdot K$

$V_{tank} \cdot \overline{N}_{tank}$  - zapremina rezervoara jediničnog kapaciteta i maksimalan broj rezervoara jediničnog kapaciteta

$\underline{T}_{tank}, \overline{T}_{tank}$  - minimalna i maksimalna dozvoljena temperatura vode u rezervoaru

#### Promenljive stanja i zavisne promenljive:

$P_{disch,i}, P_{ch,i}$  - snaga pražnjenja i punjenja baterijskog skladištenja u satu  $i$

$N_{pv}, N_{bat}, N_{tank}$  - potrebna količina: fotonaponskog panela jedinične snage, baterija i rezervoara tople vode jedinične zapremine

$P_{heat,i}, P_{grid,i}, P_{curt,i}$  - aktivna snaga električnog zagrevanja rezervoara, snaga preuzeta iz distributivne mreže i odsečena proizvodnja fotonaponskog sistema u satu  $i$

$d_i, c_i$  - binarne promenljive koje definišu režim rada baterije u satu  $i$  ( $d_i = 1$  - pražnjenje;  $c_i = 1$  - punjenje)

$Pd_i, Pc_i$  - pomoćne promenljive kojim se linearizuje proizvod  $d_i \cdot P_{disch,i}$  i  $c_i \cdot P_{ch,i}$ , respektivno

$W_{bat,i}$  - količina energije u baterijskom skladištu u satu  $i$

$Q_{curt,i}, \Delta Q_{tank,i}$  - promena toplotne energije u rezervoaru tople vode tokom sata  $i$

$Q_{hot\_w,i}, Q_{cold\_w,i}$  - toplotna energija utrošene sanitarne tople vode i toplotna energija dodate hladne vode u rezervoar tokom sata  $i$

$T_{tank,i}$  - temperatura vode u rezervoaru tokom sata  $i$

$b_j$  - binarna promenljiva koja uzima vrednost 1 ukoliko je optimalan broj rezervoara jediničnog kapaciteta jednak  $j$ , u suprotnom 0

$NT_i$  - pomoćne promenljive kojima se linearizuje proizvod  $N_{tank} \cdot T_{tank,i}$

Matematički model kojim će se opisati promena svih relevantnih fizičkih veličina uz sagledavanje potrebnih kapaciteta energetskih resursa za rad pasivne kuće baziran je na linearnom programiranju [13]. Kriterijumska funkcija u predloženom matematičkom modelu svodi se na minimizaciju investicije u resurse za proizvodnju i skladištenje električne i toplotne energije, pri čemu je usvojen težinski faktor koji množi snagu peći na pelet:

$$\min \left\{ c_{pv} \cdot N_{pv} + c_{bat} \cdot N_{bat} + c_{tank} \cdot N_{tank} + c_p \sum_{i=1}^I Q_{p,i} \right\} \quad (2)$$

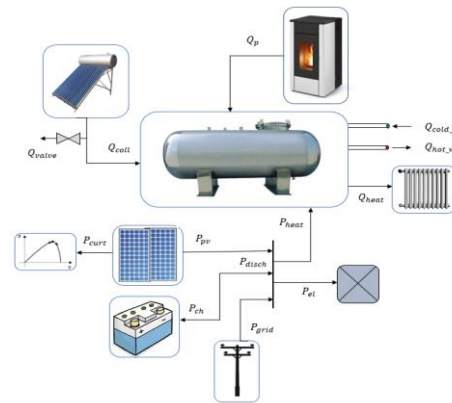
Na Sl.1 dat je pregled osnovnih komponenti predloženog idejnog rešenja energetski samoodržive kuće, sa označenim tokovima električne (simbol  $P$ ) i toplotne energije (simbol  $Q$ ). Vremenska rezolucija koja je usvojena iznosi 1h, pa je vrednost satne energije ekvivalentna satnoj snazi, i u narednim relacijama član 1h će biti izuzet radi jednostavnosti. Vremenska rezolucija od 1h je zadovoljavajuća i sa aspekta robusne optimizacije energetskih potreba domaćinstva, i sa aspekta zanemarenja termičkih prelaznih procesa (na kraju svakog sata pretpostavka je da se dešava kvazistacionarno stanje).

#### A. Ograničenja vezana za tokove električne energije:

Relacija koja povezuje sve aktivne snage u sistemu je balansna jednačina, i ona ukazuje na jednakost ukupne proizvodnje i potrošnje:

$$P_{el,i} + P_{heat,i} = P_{grid,i} + (N_{pv} \cdot P_{pv,i} - P_{curt,i}) + (d_i \cdot P_{disch,i} - c_i \cdot P_{ch,i}) \quad (3)$$

Električna snaga kojom se dogreva rezervoar može biti jednaka 0 ili nominalnoj snazi grejača:



Slika 1. Tokovi električne i toplotne energije za predloženo idejno rešenje energetski samoodržive kuće

$$P_{heat,i} = h_i \cdot \bar{P}_{heat} \quad (4)$$

U razmatranom modelu, dodatno, analizirano je da se rezervno napajanje može obezbediti iz distributivne mreže, čiji prenos je limitiran snagom dozvoljenog priključka:

$$0 \leq P_{grid,i} \leq \bar{P}_{grid} \quad (5)$$

Sa druge strane, uvešće se ograničenje da je količina kumulativno preuzete električne energije iz mreže ograničena:

$$\sum_{i=1}^I P_{grid,i} \leq \bar{W}_{grid} \quad (6)$$

Limitiranje aktivne snage proizvodnje fotonaponskog panela neophodno je u slučaju dostizanja maksimalne napunjenosti baterije i maksimalne temperature rezervoara tople vode:

$$0 \leq P_{curt,i} \leq N_{pv} \cdot P_{pv,i} \quad (7)$$

Ukupne snage punjenja i pražnjenja sistema od  $N_{bat}$  baterija, ograničene su tehničkim limitima koje definiše proizvođač baterije:

$$0 \leq P_{disch,i} \leq N_{bat} \cdot \bar{P}_{disch} \quad (8)$$

$$0 \leq P_{ch,i} \leq N_{bat} \cdot \bar{P}_{ch} \quad (9)$$

Kako bi se postiglo da baterija tokom jednog vremenskog intervala može biti samo u jednom režimu rada, potrebno je da važi:

$$c_i + d_i \leq 1 \quad (10)$$

Pošto u relaciji (3) figurišu proizvodi binarnih  $d_i/c_i$  i kontinualnih promenljivih  $P_{disch,i}/P_{ch,i}$ , to ih je potrebno linearizovati uvođenjem novih kontinualnih promenljivih stanja  $Pd_i/Pc_i$  uz dodatna četiri ograničenja tipa nejednakosti:

$$Pd_i \leq P_{disch,i} \text{ i } Pc_i \leq P_{ch,i} \quad (11)$$

$$Pd_i \leq M \cdot d_i \text{ i } Pc_i \leq M \cdot c_i \quad (12)$$

$$Pd_i \geq P_{disch,i} - M(1-d_i) \text{ i } Pc_i \geq P_{ch,i} - M(1-c_i) \quad (13)$$

$$Pd_i \geq 0 \text{ i } Pc_i \geq 0 \quad (14)$$

,gde je M veliki pozitivan broj.

Promena količine uskladištene energije u baterijama, uz uvažavanje efikasnosti procesa punjenja/pražnjenja, data je sa:

$$W_{bat,i} = W_{bat,i-1} + 0.95Pc_i - 1.05Pd_i \quad (15)$$

Konačno, u svakom trenutku mora da važi ograničenje po stanju napunjenosti baterije:

$$N_{bat} \cdot \left( \frac{C_{nom} \cdot V_{nom}}{1000} \right) \cdot \underline{SOC}(r,j) \leq W_{bat,i} (kWh) \leq N_{bat} \cdot \left( \frac{C_{nom} \cdot V_{nom}}{1000} \right) \cdot \overline{SOC} \quad (16)$$

### B. Ograničenja vezana za tokove toplotne energije:

Kako bi se odredila promena temperature tople vode u rezervoaru, neophodno je poznavati balans toplotnih energija u određenom trenutku:

$$Q_{coll,i} + P_{heat,i} - (Q_{hot\_w,i} - Q_{cold\_w,i}) - 1.1 \cdot Q_{heat,i} + Q_{p,i} = \Delta Q_{tank,i} \quad (17)$$

U prethodnoj relaciji uvežene se prosečne vrednosti gubitaka u sistemima za prenos toplotne energije.

Toplotna energija kojom se dogreva rezervoar iz peći na pelet može biti jednaka 0 ili nominalnoj snazi peći.

$$Q_{p,i} = P_j \cdot \bar{Q}_p \quad (18)$$

Gubitak energije iz rezervoara prilikom potrošnje sanitarne tople vode zapremine  $V_{water,i}$ , a uz pretpostavku da je hladna voda koja se dopunjuje temperature 15 °C, može se opisati sa:

$$(Q_{hot\_w,i} - Q_{cold\_w,i}) = 1000 \cdot V_{water,i} \cdot c_{water} (T_{tank,i} - 15) \quad (19)$$

Po istom principu, promena temperature tople vode u rezervoaru, uz usvojeni prosečni gubitak temperature rezervoara od 0.08°C/h, data je sa:

$$T_{tank,i} = T_{tank,i-1} + \frac{\Delta Q_{tank,i}}{1000 \cdot V_{tank} \cdot c_{water} \cdot N_{tank}} - 0.08 \quad (20)$$

Ako se izraz (20) pomnoži sa  $N_{tank}$  dobija se relacija koja se može prevesti u linearnu formu:

$$N_{tank} \cdot T_{tank,i} = N_{tank} \cdot T_{tank,i-1} + \frac{\Delta Q_{tank,i}}{1000 \cdot V_{tank} \cdot c_{water}} - 0.08 N_{tank} \quad (21)$$

Dodatno, temperatura vode unutar rezervoara uvek mora biti unutar dozvoljenih granica:

$$\underline{T}_{tank} \leq T_{tank,i} \leq \bar{T}_{tank} \quad (22)$$

Proizvod celobrojne  $N_{tank}$  i kontinualne promenljive  $T_{tank,i}$  može se zameniti novom promenljivom  $NT_i$ , uz dodatno uvođenje binarnih promenljivih  $b_1, b_2, \dots, b_{N_{tank}}$  i ograničenja:

$$\sum_{k=1}^{\bar{N}_{tank}} b_k = 1 \quad (23)$$

$$\sum_{k=1}^{\bar{N}_{tank}} k \cdot b_k = N_{tank} \quad (24)$$

$$\sum_{k=1}^{\bar{N}_{tank}} k \cdot b_k \cdot T_{tank,i} = NT_i \quad (25)$$

Relacije (23) i (24) ukazuju da broj kojim se multiplicira rezervoar jedinično odabrane zapremine mora biti jedinstven, dok (15) definiše  $NT_i$ . Kako u (25) figurišu proizvodi binarne  $b_k$  i kontinualne  $T_i$  promenljive, to ih je potrebno linearizovati prema prethodno opisanom postupku.

## IV. REZULTATI

Kako bi se testirao predloženi model energetski samoodrživog domaćinstva, u ovom poglavlju prikazani su rezultati dobijeni simulacijama na osnovu dijagrama proizvodnje i potrošnje električne i toplotne energije dobijenih u poglavlju II. Pregled usvojenih ulaznih parametara dat je u Tabeli I. Analizom ulaznih podataka ustanovljeno je da je sa aspekta dimenzionisanja kapaciteta resursa neophodnih za energetski nezavisan rad domaćinstva, kritičan mesec decembar, i rezultati će biti prikazani samo za ovaj mesec. Potrebna površina solarnih kolektora iznosi 4 m<sup>2</sup>, i dobijena je analizom potreba domaćinstva za sanitarnom toplom vodom tokom letnjeg perioda. Prilikom optimizacije usvojeno je da nivo napunjenosti baterije i temperatura u rezervoaru na kraju

meseca odgovara početnim vrednostima. Određivanje optimalnog broja komponenti sistema će biti rađeno za:

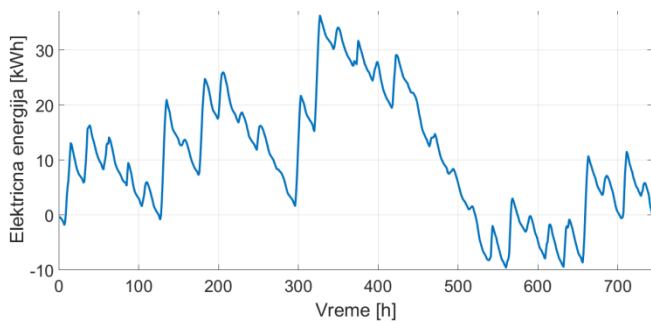
- Scenario 1: energetski samoodrživo domaćinstvo u pogledu potrošnje električne energije
- Scenario 2: energetski samoodrživo domaćinstvo u pogledu potrošnje električne i toplotne energije

TABELA I. PREGLED ULAZNIH PODATAKA

$c_{pv}(\text{€/kWp})$	900	SOC <sub>0</sub>	0.6	$\bar{T}_{tank}(\text{°C})$	60
$c_{bat}(\text{€})$	970	$\overline{\text{SOC}}$	0.95	$T_{tank}(\text{°C})$	45
$V_{bat}(\text{V})$	12.8	$\underline{\text{SOC}}$	0.1	$\bar{p}_p(\text{kW})$	4
$C_{bat}(\text{Ah})$	195	$V_{tank}(\text{m}^3)$	0.4	$\bar{p}_g(\text{kW})$	10
$\bar{p}_{ch}(\text{kW})$	1.25	$c_{tank}(\text{€})$	400	$\bar{p}_{heat}(\text{kW})$	3
$\bar{p}_{disch}(\text{kW})$	1.25	$T_{tank,0}(\text{°C})$	53		

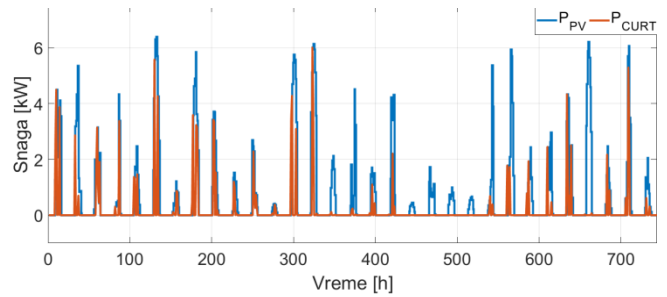
### A. Scenario 1

Konzervativni pristup dimenzionisanja skladištenja električne energije podrazumeva da se za mesec sa najmanjom insolacijom iz lokalne proizvodnje zadovolje potrebe domaćinstva za potrošnjom električne energije i pokriju gubici u baterijama. Određivanjem dijagrama snage debalansa (Sl.2), i njegovim integraljenjem dobija se potrebna veličina električnog skladišta. Primenom ovog pristupa, potrebna instalisana snaga PV panela iznosi 5,9 kWp, dok potreban broj baterija minimalno iznosi 22, i ova vrednost je dobijena uz optimalno početno stanje napunjenosti baterije



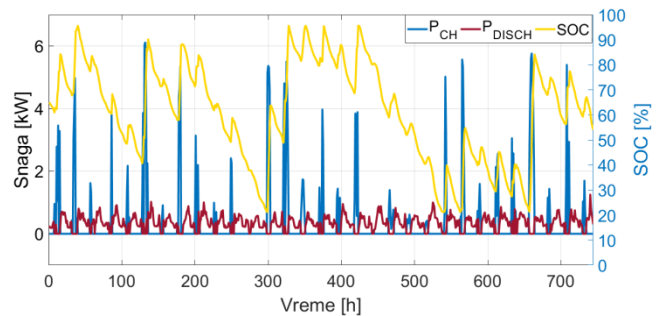
Slika 2. Integral snage debalansa

Razvijeni matematički model za optimalno rešenje daje instalisanu snagu PV panela od 8,9 kWp i broj baterija 16, čime se čini ušteda od oko 3100 € u odnosu na konzervativni pristup. Broj baterija je značajno redukovan, i posledica je veće količine lokalno proizvedene energije u dužim periodima male insolacije. Sa druge strane, PV panel je predimenzionisan, ali sa mogućnošću limitiranja izlazne snage. Na Sl.3 prikazan je dijagram proizvedene i odsećene proizvodnje PV panela.



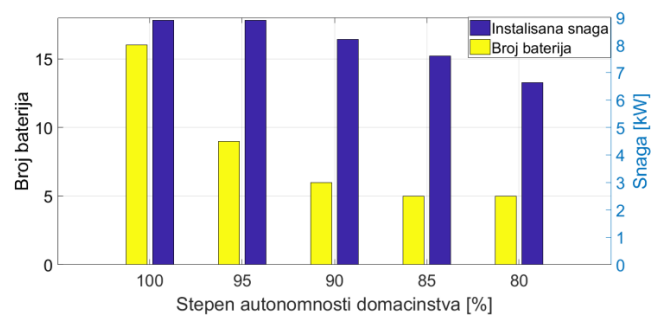
Slika 3. Dijagram proizvedene i odsećene proizvodnje PV panela

Dijagram snage punjenja i pražnjenja, kao i promena stanja napunjenosti baterijskog skladišta dati su na Sl.4. Može se zaključiti da se periodi punjenja i pražnjenja smenjuju ciklično shodno proizvodnji PV panela, kao i da su sva radna ograničenja baterija zadovoljena.



Slika 4. Snaga punjenja/pražnjenja i stepen napunjenosti baterijskog skladišta

Sa ciljem da se utvrdi u kojoj meri rezervno napajanje iz distributivne mreže utiče na potrebne instalisane kapacitete PV panela i baterija, analiza je dodatno rađena za različite nivoe autonomnosti domaćinstva (Sl. 5). Nivo autonomnosti od npr. 95% podrazumeva da se 5% mesečne potrošnje električne energije može preuzeti iz mreže. Ako se ovaj parametar sa 100% obori na 90%, broj potrebnih baterija je značajno redukovan. Daljim smanjenjem nivoa autonomnosti do 80%, prisutno je smanjenje instalisane snage PV panela, dok broj baterija ostaje nepromenjen.



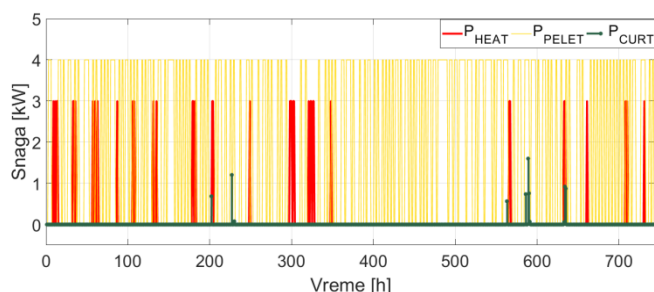
Slika 5. Zavisnost instalisanih kapaciteta PV panela i baterija od stepena autonomnosti domaćinstva

### B. Scenario 2

Prethodne analize su pokazale da se optimalnim predimenzionisanjem instalisane snage PV panela, uz korišćenje mogućnosti limitiranja njegove izlazne snage, mogu postići značajne uštede sa aspekta potrebnih kapaciteta za skladištenja električne energije. S obzirom da se na ovaj način gubi određena količina proizvedene električne energije, u radu

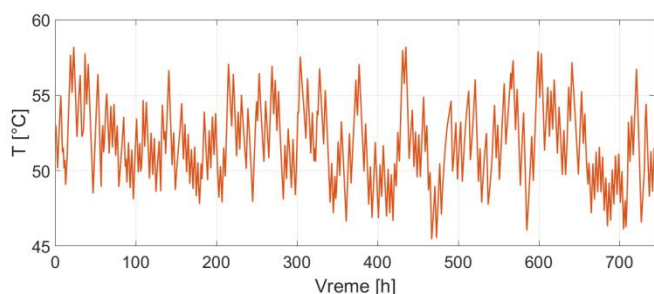
je predložen koncept kojim bi se ovaj višak koristio za zagrevanje rezervoara tople vode. Prošireni matematički model kao optimalno rešenje daje instalisanu snagu PV panela od 8,9 kWp, broj baterija 16 i zapreminu rezervoara od 1,2 m<sup>3</sup>.

Dijagram odsečene proizvodnje PV sistema kao i dijagrami izlazne snage električnog grejača i kotla na pelet dati su na Sl. 6. U odnosu na Scenario 1, količina odsečene električne energije je manja za oko 95 %, i javlja se samo u periodima kada njen plasman u električno i toplotno skladište nije moguć. Na slici se može uočiti da u periodu slabe insolacije električni grejač nije uključen, dok se kotao na pelet uključuje periodično. Ostvarena ušteda peleta za mesec decembar iznosi 10%, pri čemu se veće vrednosti uštede mogu očekivati u mesecima sa većom insolacijom.



Slika 6. Dijagrami odsečene proizvodnje PV sistema, izlazne snage grejača i kotla na pelet

Promena temperature tople vode u rezervoaru posledica je bilansa proizvodnje i potrošnje toplotne energije u svakom trenutku. Sa Sl. 7 može se zaključiti da ona uvek pripada definisanom radnom opsegu.



Slika 7. Promena radne temperature tople vode u rezervoaru

## V. ZAKLJUČAK

U ovom radu dat je predlog koncepta energetski samoodrživog i nezavisnog domaćinstva, i razvijen je matematički model kojim se vrši optimalno dimenzionisanje resursa potrebnih za snabdevanje potrošača električnom i toplotnom energijom. Osnovne komponente predloženog rešenja su: solarni kolektori, fotonaponski moduli, baterije za skladištenje električne energije i rezervoar za skladištenje toplotne energije. U zimskom periodu, kada je efikasnost solarnih kolektora mala, predložena je dodatna upotreba kotla na biomasu kojim bi se vršilo zagrevanje tople vode u rezervoaru. Rezultati koji su dobijeni daju bolje rezultate u odnosu na konzervativni pristup dimenzionisanja električnog skladišta, jer se više isplati u određenoj meri predimenzionisati

PV panel, nego ulagati u velike kapacitete baterija. Kako bi se dodatno poboljšale performanse ovog sistema, predviđeno je i električno grejanje rezervoara tople vode čime bi se iskoristili viškovi proizvedene električne energije. Na ovaj način postignuta je energetska samoodrživost domaćinstva tokom zimskog perioda. U narednim istraživanjima autori će ispitati primenu razvijenog optimizacionog modela na nivou cele godine, sa ciljem da se utvrde njegove performanse za prelazni i letnji period. Jedno od rešenja kojim bi se viškovi električne i toplotne energije mogli iskoristiti u letnjem periodu, podrazumeva upotrebu čilera namenjenih za hlađenje objekta.

## LITERATURA

- [1] M. Gojak, N. Radonja, "Solarni termički sistemi" Mašinski fakultet Beograd 2020.
- [2] Ž. Đurišić, J. Mikulović "Solarna energetika", Beograd 2019.
- [3] Odbor za energetiku SANU, "Razvoj elektroenergetike Republike Srbije do 2050. godine"
- [4] Lj. Majdandžić, "Solarni sustavi", Hrvatska 2010.
- [5] [https://data.open-power-system-data.org/household\\_data/2020-04-15](https://data.open-power-system-data.org/household_data/2020-04-15), april 2020.
- [6] <https://www.stat.gov.rs/media/345275/energy-consumption-in-households-in-republic-of-serbia-2020.pdf>, Beograd 2020.
- [7] Željko Đurišić, Dimitrije Kotur, Nenad Šijaković, Aleksandra Sretenović Hibridni solarno-električni sistemi za unapređenje energetske efikasnosti u pripremi i korišćenju sanitarne tople vode u domaćinstvima, 17th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, 21-23 March 2018
- [8] ASHRAE, (1997), *ASHRAE Handbook-Fundamentals*, Atlanta, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- [9] <https://data.open-power-system-data.org/when2heat/2019-08-06>
- [10] Soteris A. Kalogirou Solar Energy Engineering Processes and Systems, Second Edition, Elsevier 2014
- [11] <https://www.gov.uk/government/publications/measurement-of-domestic-hot-water-consumption-in-dwellings>
- [12] <https://doi.org/10.3390/w12041049>
- [13] The MOSEK Optimization Tools Version 9.2. Dostupno na: <http://www.mosek.com>.

## ABSTRACT

Local small-scale energy generation is one of the main concepts in global power industry transition. The proposed concept starts from the assumption that the consumption of electricity and heat in the household can be met at any time from local energy production and storage. Based on the known profile of electricity and heat consumption, the optimization of local photovoltaic systems, solar collectors, as well as accumulators of electricity and hot water was performed. In addition to these systems, a pellet boiler is also planned, as an auxiliary system for the production of green thermal energy. The set optimization model is structured as a linear model with inequality type constraints and is solved by the method of mixed-integer linear programming. The paper presents the results and discusses directions of practical optimization and implementation of the proposed concept.

## CONCEPT AND MATHEMATICAL MODEL OF ENERGY SELF-SUSTAINABLE HOUSEHOLD

Miloš Stojanović, Milica Aščerić, Matej Mićović, Đorđe Lazović, Željko Đurišić