

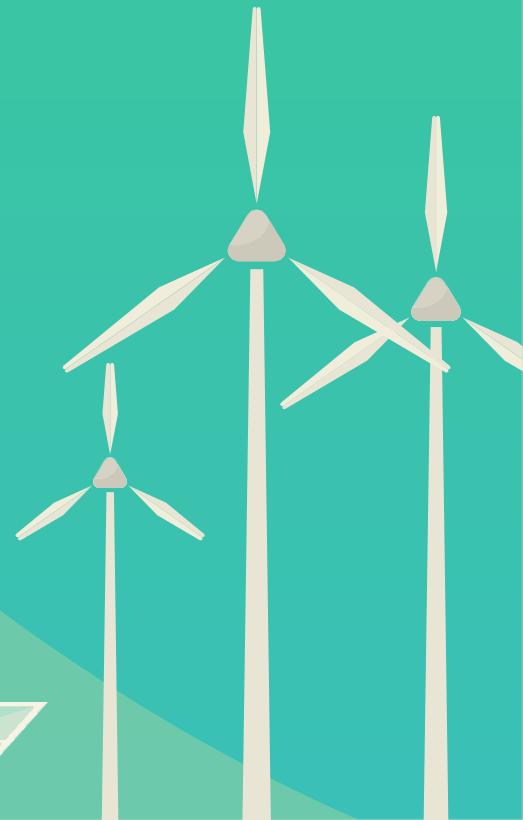
energija

ekonomija | ekologija

ISSN 0354-8651



List Saveza energetičara
Broj 3 / Godina XXVI / Septembar 2024.



Energija

ekonomija | ekologija

Energija / Ekonomija / Ekologija

Broj 3, Septembar 2024

Izdavač:

Savez energetičara
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11020 Beograd
e-mail: info@savezenergeticara.org
<http://www.savezenergeticara.org>

Suizdavači:

Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet,
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet,
Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Predsednik Saveza energetičara:
prof. dr Nikola Rajaković

Predsednik Skupštine Saveza energetičara:
prof. dr Milun Babić

Glavni i odgovorni urednik:

prof. dr Dušan Gordić, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

Uređivački odbor i izdavački savet:

prof. dr Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet, Beograda
prof. dr Dejan Ivezić, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
prof. dr Mirko Komatinia, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Miloš Banjac, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Vladimir Popović, Mašinski fakultet, Beograd
prof. dr Vladimir Stevanović, Mašinski fakultet, Beogradu
prof. dr Željko Despotović, Institut Mihailo Pupin, Beograd
prof. dr Vanja Šušteršić, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac
prof. dr Petar Đukić, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd
prof. dr Nenad Đajić, Akademija inženjerskih nauka Srbije
prof. dr Damir Đaković, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad
dr Vladimir Šiljkut, JP Elektroprivreda Republike Srbije
v. prof. dr Vladimir Vukašinović, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac
docent dr Tomislav Rajić, Elektrotehnički fakultet, Beograd
dr Iva Batić, Elektrotehnički fakultet, Beograd
prof. dr Jovica V. Milanović, The University of Manchester, Velika Britanija
prof. Vladimir Terzija, Humboldt Fellow, IEEE Fellow, EiC Elsevier IJEPES
prof. dr Adriana Sida Manea, Politehnica University Timisoara, Rumunija
prof. dr Neven Duić, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska
prof. dr Rade Ćirić, University of Agder, Norveška
prof. dr Nataša Markovska, MANU Skopje, Severna Makedonija
dr Stanko Janković, TenneT TSO GmbH, Savezna Republika Nemačka
prof. dr Mirza Kušljugić, Fakultet elektrotehnike, Tuzla, BiH
prof. dr Peter Virtič, Univerzitet u Mariboru, Slovenija
prof. dr Predrag Popovski, Mašinski fakultet Skopje, Severna Makedonija
dr Ilija Batas-Bijelić, Generalni sekretar Saveza, Institut tehničkih nauka SANU

Priprema, tehnička i jezička obrada:

Savez energetičara

Štamparija:

Mašinac, Kragujevac

Tiraž:

100

UDK

620.9
338:620.9
502:620.9

COBISS.SR-ID 108696839

Časopis izlazi četiri puta godišnje

Radovi su recenzirani uz tehničku obradu.
Nijedan deo ove publikacije ne može biti
reprodukovan, presnimavan ili prenošen bez
prethodne saglasnosti Izdavača.



Sadržaj

- [01] Nikola RAKIĆ, Vanja ŠUŠTERŠIĆ, Natalija ALEKSIĆ, Nebojša JURIŠEVIĆ, Dušan GORDIĆ
Postupak ko-/digestije: primeri, postavke i eksperimentalno izvođenje / Co-/Digestion Procedure: Examples, Settings and Experimental Performance
- [11] Đorđe DUKANAC
Uticaji refleksija i difrakcija talasa i modelovanog izvora i UHF davača pri lociranju parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru / Influences of Reflections and Diffractions of Waves and the Modelled Source and UHF Sensors When Locating Partial Discharges in a Power Transformer
- [21] Željko V. DESPOTOVIĆ, Boban ĐORĐEVIĆ
Primena i realizacija Čukovog DC/DC energetskog pretvarača u praćenju tačke maksimalne snage solarnog panela / Application and Realization of Čuk DC/DC Power Converter in MPPT of the Photovoltaic Panel
- [31] Darko ŠOŠIĆ, Goran DOBRIĆ, Mileta ŽARKOVIĆ
Ispitivanje održivosti različitih struktura kategorije kupac-proizvođač / Exploring the Profitability of Different Structures of the Prosumers
- [36] Angelina CVETANOVIĆ, Dubravka ŽIVKOVIĆ, Minja OBRADOVIĆ, Davor KONČALOVIĆ, Vladimir VUKAŠINOVIC, Mladen JOSIJEVIĆ, Nataša SEKULIĆ,
Održivi razvoj gradova – Da li su pametni gradovi nužno i održivi? / Urban Sustainable Development - Are Smart Cities Necessarily Sustainable?



- [43] Bojan IVANOVIĆ, Ilija BATAS BJELIĆ, Nikola RAJAKOVIĆ, Tomislav RAJIĆ
Planiranje i rad elektroenergetskog sistema u uslovima velike proizvodnje električne energije iz solarnih elektrana / Power System Planning and Operation in Case of High Electricity Production in Solar Power Plants
- [48] Srećko ĆURČIĆ, Aleksandar PEULIĆ
Izrada energetske mape raspoloživih biomasnih sirovina u geografskom informacionom sistemu (GIS) / Creation of an Energy Map of Available Biomass Raw Materials in a Geographic Information System (GIS)
- [52] Nikola TANASKOVIĆ, Iva BATIĆ, Tomislav RAJIĆ
Prenaponska zaštita objekata priključenih na niskonaponsku mrežu / Overvoltage Protection for Objects Connected to the Low-Voltage Network
- [58] Miloš JEČMENICA, Đorđe LAZOVIĆ
Tehno-ekonomска анализа пројекта ветропарка / Techno-Economic Analysis of the Wind Farm Project
- [63] Dunja GRUJIĆ, Dušan VUĆIĆ, Miloš KUZMAN
Uporedna анализа и могућности унапређења положаја купача-производача у Црној Гори и Републици Србији / Comparative Analysis and Possibilities of Improving the Status of Prosumers in Montenegro and the Republic of Serbia

Postupak ko-/digestije: primeri, postavke i eksperimentalno izvođenje

Nikola Rakić, Vanja Šušteršić, Natalija Aleksić, Nebojša Jurišević, Dušan Gordić

Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Rezime - Savremene tehnologije za tretiranje organskog otpada ubrajaju postupak ko-/digestije kao jedan od osnovnih. Ovaj rad daje pregled izvedenih ispitivanja na međunarodnom nivou, teorijske osnove i ključne parametre procesa ko-/digestije zaključno sa postavljenim i obavljenim eksperimentom. Ko-/digestija je predstavljena kao proces kojim se gotovo jednoznačno tretira kanalizacioni mulj ili životinjski stajnjak kao primarna podloga, i dodatni biorazgradivi materijal koji služi kao ko-supstrat. Zabeležen je širok opseg prinosu biogasa, od 118 ml CH₄/g VS do 1040 ml CH₄/g VS, za različite odnose inokulum/supstrat i supstrat/ko-supstrat. Navedeni su elementi standardnog protokola i osnovne faze anaerobne digestije. Teorijske postavke su obuhvatile parametre, inhibitorne supstance i predtretmane. Eksperimentalna procedura je sprovedena bazičnom opremom i standardnim metodama. Primarni kanalizacioni mulj i otpad od hrane su ispitivani u 4 različita odnosa (1/0; 3/1; 1/1; 1/3). Primećen je porast proizvodnje sa povećanjem udela ostataka hrane, dok je najstabilniji rad pokazala proporcija 1/1. Kod ko-digestije potvrđeni su sinergijski efekti od 7,1%, 12,8% i 17%, respektivno. Dokazano je da dodatak biorazgradivog otpada pozitivno utiče na prinos biogasa.

Ključne reči - ko-/digestija, kanalizacioni mulj, otpad od hrane, biogas, sinergija

I UVOD

U akcionom planu EU o cirkularnoj ekonomiji iz 2020. godine, poseban fokus stavljen je na postizanje klimatske neutralnosti do 2050. godine kroz efikasnu i konkurentnu ekonomiju i privredu. Sektor otpada od hrane ističe se kao važan aspekt angažmana. Anaerobna digestija identificuje se kao jedna od tehnologija koja će imati značajnu ulogu u budućnosti. Ova tehnologija igraće važnu ulogu u dekarbonizaciji privrede, pre svega zbog njene sposobnosti da tretira organski otpad, vratiti hranljive materije, i istovremeno proizvede biogas kao obnovljivo gorivo.

Anaerobna digestija se definije kao korišćenje mikroorganizama u odsustvu kiseonika radi stabilizacije organskih materija i pretvaranja u metan (CH₄) i neorganske proekte, uključujući ugljen-dioksid. Postupak koji se primenjuje već više od jednog veka, uspešno se koristi za stabilizaciju organskog mulja u postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda (komunalnih otpadnih voda) i za razgradnju organskih materija iz procesa proizvodnje i odlaganja hrane. Interesovanje za korišćenje ove tehnologije za obradu ostalih organskih čvrstih materija, kao što su organski otpad i energetski usevi, naglo je poraslo zbog novih i strožijih propisa o odlaganju organskog otpada, kao i potrebe za pronalaženjem novih izvora energije koji predstavljaju

alternativu fosilnim gorivima.

Ko-digestija se odnosi na istovremeno anaerobno razlaganje homogene smeše dva ili više supstrata. Ko-supstrati su organski supstrati koji se zajedno tretiraju sa glavnom sirovinom. Upotreba ko-supstrata ima pozitivan uticaj na proces digestije zahvaljujući uravnoteženju hranljivih materija, poboljšanoj transformaciji organske materije i stabilizaciji, što rezultira većim prinosom biogasa i ekonomičnijim procesom. Osim biogasa koji se već uspešno koristi za proizvodnju električne i toplotne energije, kao i za snabdevanje gasnih mreža (uz prečišćavanje), dodatni izvor prihoda predstavlja polu-čvrsti nus produkt. Zbog visokog sadržaja hranljivih materija, ovaj nus produkt može se direktno koristiti u poljoprivredi kao đubrivo, ili preraditi u kompost radi poboljšanja kvaliteta tla [1].

Dodatne prednosti procesa ko-digestije obuhvataju: (1) razblaživanje potencijalnih toksičnih jedinjenja, ukoliko su prisutna u bilo kojem od uključenih ko-supstrata; (2) kontrolisanje sadržaja vlage i pH vrednosti; (3) pružanje neophodnog pufer skog kapaciteta; (4) povećanje količine biorazgradivog materijala; (5) diversifikacija bakterijskih sojeva koji učestvuju u procesu. Sve ove prednosti doprinose poboljšanim performansama procesa.

Sve vrste biomase koje sadrže makro-hranljive sastojke poput ugljenih hidrata, belančevina, masti, ulja, celuloze i hemiceluloze pogodne su za proces biogasifikacije i koriste se kao podloga za ko-digestiju. Teorijski prinos biogasa varira u velikoj meri u zavisnosti od prisustva tri glavne makro-hranljive materije: lipida, ugljenih hidrata i proteina. Pored ovih, ligno-celulozni ostaci takođe su istraženi za primenu. Glavni nutrijenti prisutni u ovim ostacima su celuloza i hemiceluloza. Biološka razgradivost navedenih hranljivih materija značajno varira.

Lipidi najviše doprinose proizvodnji biogasa sa dužim vremenom retencije zbog manje biorazgradivosti, dok proteini i ugljeni hidrati pokazuju brže stope konverzije sa manjim prinosom biogasa. Proces ko-digestije dovodi do proizvodnje biogasa koja se može povećati korišćenjem različitih potencijalnih ko-supstrata u određenoj proporciji. Ipak, brojne studije [2, 3, 4,] pokazuju da optimalni uslovi rada u smislu procene ko-supstrata ne mogu biti jednoznačno definisani, već ih treba prilagoditi za svaki specifičan slučaj.

II IZVEDENA ISPITIVANJA

Anaerobna digestija ima značajan potencijal za ponovno korišćenje energije i stabilizaciju otpadne biomase [5]. Ipak, pojedinačna digestija u dugoročnim operacijama može imati negativne posledice vezane za karakteristike supstrata, odnosno neravnotežu hranljivih sastojaka u sistemu. Na primer, talog iz

kanalizacije ima nizak sadržaj organske čvrste materije, što rezultira smanjenom proizvodnjom metana. Životinjski stajnjak sadrži visoke koncentracije azota koje mogu inhibirati metanogene. Otpadna hrana ima visoke koncentracije natrijuma i nizak kapacitet pufera. Agroindustrijski otpad predstavlja sezonsku biomasu i često mu nedostaje azota. Otpad iz klanice karakterišu visoke koncentracije dugolančanih masnih kiselina i azota, što može zaustaviti proces. Stoga, anaerobna ko-digestija sirovina se ističe kao obećavajuća opcija za prevazilaženje nedostataka mono-digestije i za poboljšanje ekonomske održivosti postrojenja. Zbog toga je došlo do povećanog interesovanja za istraživanje ovog procesa, posebno u kontekstu korišćenja mulja/stajskog đubriva u kombinaciji sa agroindustrijskim ostacima, organskom frakcijom čvrstog komunalnog otpada, algama, uljem i mastima.

Tradicionalno, proces anaerobne digestije se sprovodi sa jednim supstratom. Međutim, nedavno je prepoznato da se stabilnost procesa poboljšava kada se poveća raznovrsnost supstrata koji se istovremeno primenjuju. Često se događa da se velika količina osnovnog supstrata (na primer, stajsko đubrivo ili mulj iz otpadnih voda) pomeša i digestira zajedno sa manjim količinama pojedinačnih ili različitih dodatnih supstrata. Korišćenje ko-supstrata obično povećava prinos biogasa iz anaerobnih digestora zbog pozitivnih sinergizama koji se uspostavljaju u mediju za obradu i zbog dodavanja nedostajućih hranljivih sastojaka samim ko-supstratima [6]. U određenom broju studija prikazane su moguće ekološke, tehnološke i ekonomske prednosti ko-digestije, kao što su poboljšana ravnoteža nutrijenata, visok kvalitet digestata i povećana i stabilna proizvodnja biogasa tokom sezona. Nadalje, ko-digestija organskog otpada sa muljem iz komunalnih otpadnih voda može povećati proizvodnju digestorskog gasa i obezbediti uštedu u ukupnim energetskim troškovima postrojenja [7].

U istraživanju [8] sprovedeni su testovi bio-hemijskog potencijala metana kako bi se utvrdila upotrebljivost četiri vrste supstrata otpada od hrane (ostaci crvenog mesa, piletine, brusnice i sladoleda). Proces ko-digestije sa ispranim stajnjakom od uzgoja muznih krava je vršen u odnosu od 3,2% otpada od hrane i 96,8% stajnjaka (po zapremini), što odgovara odnosu od 14,7% (sladoled) do 80,7% (piletina) isparljivih čvrstih supstanci (VS) koje se pripisuju otpadu od hrane. Svi tretmani su rezultirali povećanjem proizvodnje metana, u rasponu od 67,0% za otpad od sladoleda do 2.940% kod otpada od prerade piletine, u poređenju sa mono-digestijom stajnjaka. Ovi rezultati ukazuju na veliki potencijal proizvodnje metana prilikom dodavanja otpada od hrane, u poređenju sa relativno malim potencijalom proizvodnje metana ispranog stajnjaka od uzgoja muznih krava, čak i ako je ukupna količina dodatog otpada od hrane bila minimalna.

Prema rezultatima istraživanja koje su sproveli Hallaji i saradnici [9], anaerobna ko-digestija otpadnog aktivnog mulja sa mešanim voćnim otpadom i sirnom surutkom poboljšava proizvodnju metana i kvalitet digestiranog mulja u poređenju sa anaerobnom digestijom otpadnog aktivnog mulja, pojedinačno. Autori su zaključili da se odnos ugljenika i azota u mešavini otpadnog aktivnog mulja, voćnog otpada i sirne surutke značajno poboljšao, što je rezultiralo boljom aktivnošću anaerobnih

organizama. Procenom aktivnosti proteaze i celulaze, glavnih enzima koji hidrolizuju organsku materiju u anaerobnoj digestiji, pokazano je da ko-digestija otpadnog aktivnog mulja sa mešanim voćnim otpadom i surutkom povećava aktivnost ovih enzima za 22% i 9%, redom.

Najviša specifična proizvodnja metana postignuta u bioreaktoru koji je sadržao 85% otpadnog aktivnog mulja iznosila je 384,1 mL CH₄/g VS. Ovo je bilo 31% više u poređenju sa kontrolnim bioreaktorom sa 292,76 mL CH₄/g VS i 5% više u poređenju sa bioreaktorom koji je sadržao 90% otpadnog aktivnog mulja i 10% kombinovane surutke i voćnog otpada (sa 370,77 CH₄/g VS). Procenat metana tokom anaerobne digestije kretao se između 53 i 65%. Računanjem srednjih vrednosti sadržaja metana iz različitih bioreaktora, pokazano je da je srednja vrednost kod ko-digestivnih bioreaktora povećana za 3%, dostižući vrednost od 59%.

Anaerobna ko-digestija otpada od hrane predstavlja optimističnu alternativu deponovanju, kao još jedna od njenih prednosti. U istraživanju koje su sproveli Ebner i saradnici [10], analizirano je 11 vrsta komercijalnog otpada od hrane i 12 mešavina za procese ko-digestije. Koristeći testove bio-hemijskog potencijala metana, izračunati su biometanski potencijali, biodegradabilna frakcija i koeficijenti hidrolize prvog reda. Otkriveno je da su potencijali biometana u otpadu od hrane varirali od 165 do 496 mL CH₄/g VS. Ko-supstrati sa visokim udelom lipida ili lako razgradivih ugljenih hidrata pokazali su najbolje rezultate u proizvodnji metana. Prosečni biometanski potencijal za ko-digestirane smeše bio je u rasponu od 5% do 20% viši u odnosu na potencijal pojedinačnih supstrata. Koeficijenti stope hidrolize su se kretali od 0,19 d⁻¹ do 0,65 d⁻¹. Materijali koji su bili zajedno ko-digestirani pokazali su ubrzenu stopu hidrolize u poređenju sa prosečnim brzinama pojedinačnih supstrata. Ovi rezultati nude važne informacije o ključnim parametrima digestije, što može doprineti unapređenju metoda modeliranja i primene komercijalnog otpada od hrane u procesu anaerobne ko-digestije.

U istraživanju koje su sproveli Xie i njegovi saradnici [11], proučavani su procesi anaerobne mono-digestije i ko-digestije primarnog mulja sa dva različita organska otpada: otpadom od hrane i otpadom od papirne pulpe. Cilj je bio proceniti potencijal za proizvodnju metana i razumeti kako se odvija sinergijski efekat ovih procesa. Tokom mono-digestije, specifični prinosi metana su iznosili 159 mL/g VS za primarni mulj, 652 mL/g VS za otpad od hrane i 157 mL/g VS za otpad od papirne pulpe. Međutim, kada je primarni mulj kombinovan sa otpadom od hrane ili otpadom od papirne pulpe, specifični prinosi metana značajno su porasli, dostižući 799 mL/g VS i 368 mL/g VS, redom. U istraživanju nije primećena značajna promena pH vrednosti ni prisustvo inhibicionih jedinjenja u medijumu. Sinergijski efekti ko-digestije je potvrđen kroz analizu uklanjanja organske isparljive materije i hemijske potrošnje kiseonika (COD). Bilans COD-a je pokazao da je tokom ko-digestije primarnog mulja sa otpadom od hrane ili otpadom od papirne pulpe dodatnih 32%, odnosno 19%, COD-a pretvoreno u biogas. Kinetičko modeliranje je pokazalo da se konstanta stope prvog reda povećala sa 0,18 na 0,63 d⁻¹ tokom ko-digestije otpada od papirne pulpe, što se može pripisati visoko rastvorljivoj biodegradabilnoj frakciji papirne pulpe u primarnom

mulju. Ovi rezultati pružaju korisne informacije vezano za uspostavljanje metodologije za poboljšanje anaerobne digestije i efikasnije korišćenje organskog otpada u održivim procesima proizvodnje energije.

U istraživanju [12] analizirana je karakterizacija sadržaja lipida, proteina i ugljenih hidrata u sirovinama za ko-digestiju, kao i njihov uticaj na proizvodnju biogasa. Ispitano je deset različitih mešavina ko-/supstrata koje su pripremljene u varijabilnim odnosima otpada od hrane, masti i ulja, te otpadnog aktivnog mulja, koristeći testove bio-hemijskog metanskog potencijala. Takođe su sprovedeni procesi mono-digestije tri glavna supstrata. Rezultati su pokazali da je najniži prinos metana dobijen kod mono-digestije aktivnog mulja sa samo 118 mL CH₄/g VS. Sa druge strane, mešavina koja je sadržala 50% mulja i 50% masti i ulja, pri čemu su 85% te mešavine činili lipidi, a 15% proteini, pokazala je najveći prinos od 1040 mL CH₄/g VS. Uzorci bogati lipidima pokazali su se kao efikasniji u proizvodnji biogasa u poređenju sa uzorcima bogatim proteinima i ugljenim hidratima. Ipak, uzorci bogati proteinima i ugljenim hidratima ispoljili su bržu proizvodnju biogasa.

U studiji [13] za reakciju anaerobnog serijskog testa, pripremljena su tri različita tipa uzoraka:

1. uzorak koji sadrži otpad od hrane (50 mL) i inokulum (10 mL) za digestiju otpada od hrane,
2. uzorak koji sadrži aktivni mulj (50 mL) i inokulum (10 mL) za digestiju kanalizacionog mulja,
3. uzorak koji sadrži ostatke hrane (35 mL) sa aktivnim muljem (15 mL) i inokulumom (10 mL) za anaerobnu ko-digestiju.

Zapreminski odnos otpada od hrane prema aktivnom mulju za ko-digestiju bio je 7:3, dok je odnos zasnovan na isparljivoj suspendovanoj čvrstoj supstanci bio 100:5,7. pH vrednost je podešena na 7,0 pre inokulacije anaerobnom semenskom podlogom. Za podešavanje pH vrednosti korišćeni su rastvori NaHCO₃ i HCl.

Efekat prethodnog tretmana i anaerobne ko-digestije otpada od hrane i otpadnog aktivnog mulja procenjen je kroz smanjenje ukupne suspendovane čvrste materije, redukciju isparljivih suspendovanih čvrstih supstanci (VSS), uklanjanje COD-a i proizvodnju metana. Termička obrada i anaerobna digestija su spustile isparljive čestice do 43,4% za otpad od hrane i 43,1% u eksperimentu ko-digestije, što je povećalo rastvorljivost sirovine. Prinosi metana ultrazvučnim tretmanom su dostigli 206,4 (za digestiju hrane) i 326,3 (za ko-digestiju) mL CH₄/g VSS, što je bilo 50,5% odnosno 56,2% veće od prinosa kontrolnog uzorka. Rezultati su pokazali da je svaki predtretman imao poseban efekat na različite sirovine zbog njihovog različitog sastava.

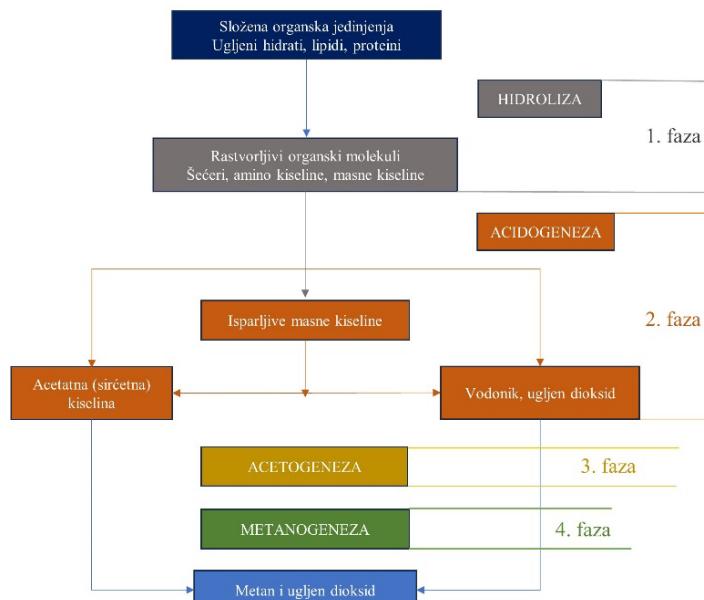
III TEORIJSKE POSTAVKE

Definisanje standardnog protokola za analizu biometanskog potencijala u procesu anaerobne degradacije predstavlja izazov zbog kompleksnosti tog procesa i povezanosti mikrobioloških, bio-hemijskih i fizičko-hemijskih aspekata. Zbog toga, stručnjaci iz istraživačke zajednice ističu potrebu za zajedničkim protokolom kako bi se jasno definisao test biometanskog

potencijala [14]. Pri karakterizaciji supstrata za anaerobnu digestiju, važno je odrediti ukupnu čvrstu materiju (TS), isparljive čvrste materije, kao i hemijsku potrošnju kiseonika, azot i ugljenik. Posebna pažnja se posvećuje i sadržaju celuloze, hemiceluloze i lignina, naročito kod energetskih useva i poljoprivrednog otpada. Veličina čestica ima ključnu ulogu u procesu anaerobne digestije jer manje čestice omogućavaju veću površinu za enzimske reakcije. Uvođenje većih čestica u supstrat može smanjiti brzinu iskorišćenja supstrata, ali i uticati na brzinu proizvodnje biogasa. Inokulum, koji se koristi kao semenski materijal, treba da bude homogen i svež, bez nečistoća poput kamena ili drveta. Osim toga, bitno je da koncentracija inokuluma bude veća od koncentracije supstrata, što može uticati na konačne rezultate procesa digestije, a odnos supstrata prema inokulumu je jedan od glavnih parametara koji utiču na rezultate anaerobnih ispitivanja [15]. Sve ove karakteristike i parametri važni su za uspostavljanje standardizovanog protokola za analizu biometanskog potencijala u anaerobnoj digestiji.

III-1 Faze anaerobne ko-/digestije

Otpad od hrane nije samo obična organska materija, već sadrži razne elemente u tragovima. Zbog toga je proces anaerobnog razlaganja otpada od hrane predmet intenzivnih istraživanja. Organska materija u otpadu od hrane pruža pogodno okruženje za rast mikroorganizama u odsustvu kiseonika [16]. Ovaj proces se može opisati kao biološki, gde mikroorganizmi razgrađuju kompleksne organske materije i pretvaraju ih u biogas. U većini istraživanja, proces anaerobnog razlaganja se obično deli na četiri faze: hidrolizu, acidogenezu, acetogenezu i metanogenezu. Međutim, prema drugim autorima poput Molino i saradnika [17], ovaj proces se može podeliti na tri faze: hidrolizu, acidogenezu i metanogenezu. Bez obzira na podele, svi ovi koraci obuhvataju ključne procese koji dovode do proizvodnje biogasa (Slika 1).



Slika 1. Faze anaerobne digestije

III-2 Parametri procesa ko-/digestije

Postoji nekoliko faktora koji mogu uticati na performanse

anaerobne digestije i potencijal proizvodnje biogasa. U okviru ove podsekcije, faktori i karakteristike procesa će biti kratko opisani.

pH vrednost sadržaja digestora je važan pokazatelj performansi i stabilnosti anaerobnog procesa. U dobro izbalansiranom procesu, gotovo svi produkti metaboličke faze se konstantno pretvaraju u sledeći produkt bez značajne akumulacije međuproizvoda (poput različitih masnih kiselina) koje bi uzrokovale pad pH vrednosti. Pri proizvodnji biogasa, različiti mikroorganizmi zahtevaju različite optimalne pH vrednosti, iako većina njih preferira neutralni pH. Za postizanje maksimalnog prinosa metana, mnogi istraživači su primetili da je poželjno održavanje pH vrednosti između 6,8 i 7,2. Hidrolizni i acidogeni mikroorganizmi preferiraju pH vrednosti u opsegu od 5,5-6,5 [18]. Međutim, optimalna pH vrednost za metanogene mikroorganizme je bliska 7,0. Proizvodnja isparljivih masnih kiselina u početnim fazama digestije smanjuje pH vrednost u digestoru i inhibira metanogenu aktivnost mikroorganizama. Alkalnost i pH u anaerobnoj digestiji mogu se prilagoditi korišćenjem nekoliko hemikalija poput natrijum-karbonata, kalijum-karbonata, kalcijum-karbonata (kreča), kalcijum-hidroksida (brzog kreča) i natrijum-nitrata. Dodavanje bilo koje odabrane hemikalije za prilagođavanje pH vrednosti treba obavljati polako, kako bi se sprečili bilo kakvi negativni efekti na bakterije.

Temperatura je jedan od najvažnijih parametara anaerobne ko-/digestije, jer utiče ne samo na metaboličke aktivnosti mikrobiološke populacije (aktivnost enzima i koenzima), već i na prinos metana (posebno brzine hidrolize i metanogeneze) i kvalitet digestata (efluenta). Generalno, anaerobne bakterije mogu rasti u psihrofilnim (10–30°C), mezofilnim (30–40°C) i termofilnim (50–60°C) uslovima. Efikasnost digestije, međutim, raste sa povećanjem temperature, ističući prednosti termofilnog rada sa većim metaboličkim stopama, većim specifičnim stopama rasta i većim stopama uništavanja patogena zajedno sa većom proizvodnjom biogasa. Potvrđeno je da je termofilna digestija manje inhibirana akumulacijom amonijaka nego mezofilna [19]. Ukazano je da se proizvodnja biogasa u termofilnim uslovima više nego udvostručuje u poređenju sa proizvodnjom u psihrofilnim. S druge strane, mezofilne bakterije su stabilnije i mogu tolerisati veće promene u okolnim parametrima, uključujući temperaturu. Manji digestori, loše izolovani digestori ili digestori u hladnim klimatskim uslovima podložni su ekstremnim fluktuacijama temperature, pa bi bilo korisno voditi digestor u mezofilnom opsegu kako bi se smanjila mogućnost pucanja sistema. Iako je potrebno duže vreme boravka, stabilnost mezofilnog procesa čini ga popularnijim u trenutnim postrojenjima za anaerobnu ko-digestiju.

Iako je bilo mnogo kontradikcija, istraživači su se složili da mešanje igra važnu ulogu u anaerobnoj digestiji čvrstog otpada. Agitacija osigurava adekvatan kontakt između dolaznog svežeg supstrata i održive bakterijske populacije, sprečavajući termalnu stratifikaciju i formiranje površinske pokorice u anaerobnom reaktoru [20]. Pored toga, mešanje osigurava da čvrsti materijal ostane u suspendovanom stanju i izbegava formiranje mrtvih zona sedimentacijom peska ili teških čvrstih čestica. Mešanje takođe omogućava smanjenje veličine čestica kako digestija napreduje i oslobođanje proizvedenog biogasa iz sadržaja

digestora [21]. Prema [22] mešanje se može izvoditi na nekoliko načina, kao što su mehanički mešači, recirkulacija mulja (digestivni mulj) ili ubrizgavanje proizvedenog biogasa. Mehanički sistemi za mešanje obično koriste kružne lopatice niskih brzina i najbolje odgovaraju digestorima sa fiksnim poklopциma. Mulj digestora se transportuje rotirajućim propelerom, čime se mešaju sadržaji digestione posude. Recirkulacija se obezbeđuje centrifugalnim pumpama, obično kroz unutrašnje ili spoljno cevno vratilo, kako bi se ostvarilo vertikalno mešanje. Ona se vrši izvlačenjem digestivnog mulja iz centra digestora. Zatim se mulj pumpa kroz spoljne izmenjivače toplote, gde se meša sa sirovim muljem i zagревa na željenu temperaturu. Nakon toga, mulj se pumpa nazad u digestorsku posudu kroz mlaznice na dnu ili vrhu digestora. Nedostatak ove metode je što je potrebna relativno visoka brzina recirkulacije da bi se osiguralo potpuno mešanje (stoga je potrebna velika količina energije). Recirkulacijom biogasa se izbegava formiranje korice.

Suviše visok ili nizak sadržaj ukupnih čvrstih materija može imati štetan uticaj na kontakt između sirovina, enzima i mikroorganizama u anaerobnim reaktorima. Takođe, može negativno uticati na hidrauličko vreme zadržavanja (HRT) smanjenjem razgradnje i specifične proizvodnje metana. Stoga, kraći HRT zahteva nizak sadržaj TS radi poboljšanja proizvodnje. Visok sadržaj TS takođe može narušiti kvalitet mešanja rezultirajući manjim kontaktom između sirovina i bakterija, što dovodi do dužih vremena tretmana ili niže stabilizacije mulja, u poređenju sa razblaženim sadržajem. Prikladan nivo TS unutar reaktora je u opsegu od 10-50 g TS/L. Međutim, treba napomenuti da se navedeni primeri TS odnose na mokru anaerobnu digestiju, dok je sadržaj TS u polu-suvim i suvim procesima anaerobne digestije >15%, obično 20-50% [21].

Isparljive čvrste materije se generalno tretiraju kao mera organske frakcije ukupnih čvrstih materija, iako bi precizniji opis bio količina materije u mulju koja se gubi tokom sagorevanja. Sadržaj isparljivih čvrstih materija određuje se sagorevanjem preostalih čvrstih materija dobijenih merenjem ukupnih čvrstih materija na 550°C, iako je tokom merenja ukupnih čvrstih materija već moglo doći do nekog isparavanja. Pored COD-a i VS se može tretirati kao mera organske materije u vodi, iako je prva tačnija mera. Međutim, obe mere se mogu koristiti kao osnova za određivanje organske opterećenosti digestora. Poput odnosa biološke i hemijske potrošnje kiseonika, smanjenje VS-a se takođe tretira kao mera efikasnosti digestora, i može se pojaviti kao komponenta drugih mera.

Hemijska potrošnja kiseonika je važan parametar u ciklusu upravljanja otpadom, posebno za praćenje procesa poput anaerobne ko-/digestije. Za analizu performansi digestora, neophodno je izračunati tačan maseni bilans na osnovu hemijske potrebe za kiseonikom koja ulazi i izlazi iz reaktora, što na kraju pruža bolje razumevanje sistema (jer se zna ukupna digestabilna materija). Poboljšan COD je povezan sa većom potencijalnom proizvodnjom biogasa u bio-hemijskim reaktorima, jer veći prinos metana (pri relativno konstantnom odnosu metan/biogas) implicira da su anaerobni organizmi konzumirali veće količine organske materije, rezultirajući nižim COD-om na kraju tretmana [22]. Zaista, COD je ključni parametar koji se pokazao korisnim

za procenu biodegradabilnosti ko/supstrata i energetskih tokova celokupnog procesa [23].

Hidraulično vreme zadržavanja je mera koja opisuje prosečno vreme koje određeni supstrat provede u digestoru.

$$HRT = \frac{V_r}{Q_W}, \left[\frac{m^3}{m^3 d^{-1}} \right] = d \quad (1)$$

U praksi, tipično vreme zadržavanja za digestiju komunalnog mulja iznosi oko 20 dana, tokom kojih se postiže uklanjanje isparljivih čvrstih materija (biodegradacija) od 25-60%. U digestoru sa kontinuiranim mešanjem, sadržaj reaktora ima uniformno vreme boravka. U ovom sistemu, minimalno vreme je određeno stopom rasta najsporije rastućeg neophodnog mikroorganizma u anaerobnoj bakterijskoj zajednici. Dalje, skraćivanje vremena boravka smanjuje veličinu digestora, što rezultira uštedama kapitalnih troškova. Osim toga, kraće vreme boravka daje veću stopu proizvodnje biogasa, ali treba očekivati nižu efikasnost razgradnje organske materije zajedno sa nižom stabilnošću procesa.

III-3 Inhibitorne supstance

Inhibicija u procesu anaerobne ko-/digestije sa prisustvom toksičnih supstanci može se javiti na nekoliko različitih nivoa, što može uzrokovati poremećaj proizvodnje biogasa i uklanjanja organske materije ili čak prestanak proizvodnje biogasa u digestoru. Ovi tipovi supstanci mogu se naći kao sastavni delovi ko-/supstratne materije (organski čvrsti otpad) ili kao nusproizvodi metaboličkih aktivnosti bakterijskih kolonija u digestoru. Publikacije o anaerobnoj ko-/digestiji pokazuju široku varijaciju nivoa inhibicije/toksiciteta za većinu supstanci.

Amonijak (NH_3) je hidrolitički produkt koji se formira tokom anaerobne digestije čvrstog otpada razgradnjom azotnih materija u obliku proteina, fosfolipida, azotnih lipida i nukleinskih kiselina. Mehanizmi inhibicije amonijakom dešavaju se zbog promene intracelularnog pH, povećanja potražnje za energijom kako bi se prevazišli toksični uslovi i inhibicije specifičnih enzimskih reakcija.

Formiranje inhibitora vodonik sulfida (H_2S) u anaerobnoj digestiji rezultat je redukcije oksidovanih sumpornih jedinjenja i disimilacije sumpornih aminokiselina, poput cisteina, od strane bakterija koje redukuju sulfate. Redukciju vrše dve velike grupe bakterija koje redukuju sulfate: nepotpuni oksidatori koji oksiduju jedinjenja poput laktata u acetat i CO_2 i potpuni oksidatori (acetoklastične bakterije koje redukuju sulfate) koje potpuno konvertuju acetat u CO_2 i HCO_3^- . Obe grupe koriste vodonik za redukciju sulfata.

Joni lakih metala, uključujući natrijum (Na^+), kalijum (K^+), kalcijum (Ca^{2+}) i magnezijum (Mg^{2+}), najčešće su prisutni u digestatu anaerobnih reaktora. Oni mogu nastati kao proizvod razgradnje organske materije u obliku supstrata ili dodavanjem hemikalija radi podešavanja pH vrednosti. Umerene koncentracije ovih jona su potrebne za stimulaciju rasta mikroorganizama, ali prekomerne količine ga usporavaju, dok još veće koncentracije mogu izazvati ozbiljnu inhibiciju ili toksičnost.

Slično kao joni lakih metala, prisustvo tragova teških metala stimuliše rast flore anaerobnog digestora. Međutim, za razliku od

drugih toksičnih supstanci, teški metali nisu biorazgradivi i mogu se nakupiti u potencijalno toksičnim koncentracijama. Opsežna studija o performansama anaerobnih reaktora pokazala je da je toksičnost teških metala jedan od glavnih uzroka poremećaja ili neuspela anaerobnog procesa [24]. Toksični efekat teških metala pripisuje se njihovoj sposobnosti da inaktiviraju širok spektar enzimskih funkcija i struktura vezivanjem metala za tiol (sulfhidril) i druge grupe na proteinima ili zamenom osnovnih metala u prostetskim grupama enzima.

Mnoga organska jedinjenja pokazala su potencijal za inhibiciju procesa anaerobne digestije. Nakupljanje hidrofobnih organskih zagađivača u bakterijskim membranama uzrokuje propuštanje ćelijske membrane, što na kraju dovodi do njenog pucanja. Rasponi toksičnih koncentracija organskih jedinjenja variraju široko i na njih utiču mnogi parametri, uključujući koncentraciju biomase, vreme izloženosti toksinima, starost ćelija mikroorganizama, raspored prihrane reaktora, aklimatizaciju i temperaturu. Neki od važnih organskih supstanci koje inhibiraju anaerobnu digestiju su: hlorofenoli, halogenisani alifati, azotom zamenjeni aromati, poli-masne kiseline, lignini i srodnii spojevi lignina.

III-4 Predtretmani

Predtretman organskih materija pre anaerobne ko-/digestije ima za cilj poboljšanu hidrolizu (tj. razdvajanje tečnih organskih materija od čvrstih) i time potpunije iskorišćenje sirovine od strane mikroorganizama. Predtretmani takođe mogu oslobođiti čestice iz njihove prethodne strukture i razbiti ćelijske zidove na način koji je pogodan za dalju hidrolizu. Poboljšana hidroliza doprinosi intenzivnjem procesu digestije, što dovodi do povećane proizvodnje biogasa i potpunog razlaganja sirovine. Odgovarajući predtretmani takođe mogu ubrzati mikrobiološke aktivnosti i izbeći ili prevazići inhibiciju procesa. Prethodni tretmani mogu uništiti patogene i neželjene mikroorganizme, kao i inaktivirati proces.

Mehaničkim predtretmanom razlažu se ili drobe čvrste čestice supstrata kako bi oslabili veze između ćelija i povećali specifičnu površinu kontaktta. Povećana površina omogućava bolji kontakt između supstrata i anaerobnih bakterija, čime se poboljšava anaerobni proces. Izumi i saradnici [25] proučavali su odnos između veličine čestica i akumulacije isparljivih masnih kiselina. Ustanovili su da se prinos metana povećavao za 28% kada je veličina čestica smanjena sa 0,843 mm na 0,391 mm. Međutim, ako je veličina čestice ispod prosečne, dolazi do prekomernog nakupljanja kiselina i smanjenja prinosa metana.

Termalni predtretmani koriste se za tretiranje aktivnog otpadnog mulja, stajnjaka i biodegradabilnog otpada sa fokusom na koncentrisanje materijala i razgradnju ili razbijanje struktura oslobođanjem vezane vode [26]. Termalni tretman takođe može intenzivirati aktivnost anaerobnih mikroorganizama. Mikrotalasi, γ -zračenje i ultrazvuk ciljaju na fizičko razbijanje ćelijskih struktura. Mikrotalasi, kao termalni predtretman, povećavaju viskoznost mulja kroz povećanu temperaturu, dok γ -zračenje utiče na pasterizaciju usled visokog energetskog sadržaja samih zraka.

Hemski predtretmani obično imaju za cilj razbijanje molekularnih struktura putem uvećanja pH dodavanjem baze,

dok neutralizacija takođe može razrediti hranljive materije. Biološki predtretmani se uglavnom vrše enzimima i inteziviraju proces anaerobne ko-/digestije povećanjem hidrolize u dodatnoj fazi, pre glavnog procesa digestije.

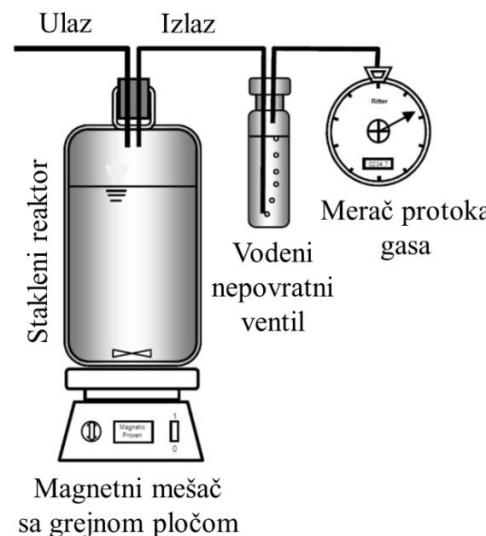
IV EKSPERIMENT

Eksperiment anaerobne ko-digestije kanalizacionog mulja i otpada od hrane sproveden je u laboratoriji Katedre za energetiku i procesnu tehniku Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu. Za šaržne testove, uzorci inokuluma i primarnog mulja su prikupljeni iz Sistema za pre i avanje otpadnih voda "Cvetojevac" / JKP "Vodovod i Kanalizacija" Kragujevac. Me avina mulja se u ovom objektu tretira u mezofilnim uslovima (približno 37°C) sa hidrauličkim vremenom zadržavanja od 21 dan. Efluent digestora je kori en kao inokulum. Otpad od hrane je dobijen iz doma Studentskog centra Kragujevac. Glavne komponente uključivale su nepojedenu hranu iz kantine i ostatke namirnica iz kuhinje. Otpad je podvrgnut mlevenju kako bi se dobio reprezentativan uzorak, nakon uklanjanja kostiju i nera adivih materijala, kao što su plastične kese i potrošački predmeti. Nakon homogenizacije, otpad od hrane je odložen malim posudama u zamrzivač na -18°C. Porcije su uzimane po potrebi, bez ugrožavanja integriteta celokupnog uzorka.

Je gro jedinice za posmatranje sastojalo se od Erlenmajerove boce i gumenog  epa sa dva centralna otvora. Reaktori su imali ukupan kapacitet od 5 L, sa radnom zapreminom od 4 L. Jedan otvor je omogućavao propuštanje gasa, dok je drugi, zatvoren poklopcom, služio kao cev za va enje uzorka za svakodnevnu analizu (Slika 2). Uzorkovanje reakcionih proizvoda je sprovedeno pomoću staklenog šprica, u početku za merenje pH vrednosti, a zatim i za pripremu alikvota COD-a. Uzimanje uzorka odvijalo se sa iste tačke unutar reaktora, koristeći gumeni crevo uba eno kroz cev za ekstrakciju na fiksnoj visini od vrha posude. Mešanje i zagrevanje unutar reaktora je postignuto kori enjem sistema za magnetno mešanje u kombinaciji sa grejnom pločom. Temperatura sadržaja je praćena dva puta dnevno pomoću termalne infracrvene kamere. Vodeni nepovratni ventil se sastojao od Erlenmajerove boce od 2 l,  epa i staklene cevi. Proizvodnja biogasa je kvantifikovana kori enjem vla nog mera  protoka gasa, uz kontinuirano snimanje podataka veb kamerom na svakih sat vremena. Sakupljanje gasa je izvedeno kori enjem vreća za uzorkovanje, pri  emcu su sve komponente bile međusobno povezane gumenim crevima.

Jednake zapremine su dodavane u reaktore tokom svake eksperimentalne faze, iako su odnosi primarnog mulja i otpada od hrane varirali. Četiri različita odnosa mulja i hrane (3/1, 1/1, 1/3 i 1/0 - digestija) su testirana u duplikatu. Sme e su formirane na osnovu zapremine ko-/supstrata. Prazni uzorci koji su sadržali samo inokulum su dopunjeni pi a om vodom kako bi se postigla zapremina od 4 L. Potencijal biogasa svakog uzorka je procenjen na osnovu specifičnog prinosa biogasa, izračunatog kao kumulativni proizvedeni biogas minus doprinos inokuluma iz praznih (semenских) uzoraka po ukupnoj količini isparljive supstance koja je dodata pre inokulacije (tj. mL biogasa/g VS). Da bi se spre ila ograničenja degradacije biomase, uzorci su pripremljeni sa odnosom inokuluma prema supstratu 2:1. Ukupan sadržaj čvrstih materija u svim pripremljenim uzorcima bio je manji od 7%. Inokulum iz digestora u punom obimu obezbedio

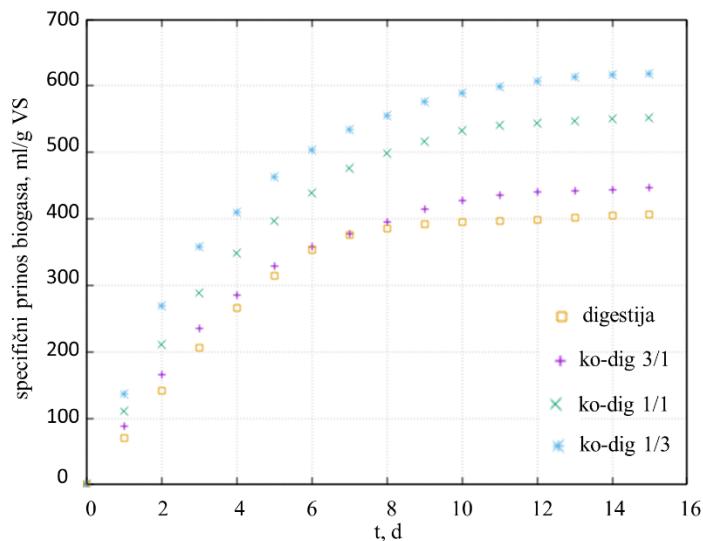
je osnovne potrebe za hranljivim materijama za anaerobne mikroorganizme, eliminu i potrebu za dodatnim spoljnim hranljivim materijama ili elementima u tragovima. Pre testiranja, pH vrednosti za svaki stakleni reaktor kretale su se od 7,2 do 7,35. Boce su isprane Ar, zapečaćene da bi se uspostavila anaerobna sredina i održavane u mezofilnim uslovima od $35 \pm 1^{\circ}\text{C}$. Vreme hidrauličkog zadržavanja je postavljeno na 15 dana.



Slika 2. Shema laboratorijskog postrojenja

IV-1 Rezultati šaržnih merenja

U optimizaciji procesa anaerobne ko-/digestije, odabir pravog izvora inokuluma i određivanje odnosa inokuluma prema supstratu su ključni operativni faktori za procenu anaerobne biorazgradivosti. Kori enje veće količine inokuluma ne povećava značajno proizvodnju biogasa iznad određenog praga. Umesto toga, prekomerna upotreba inokuluma dovodi do nepotrebнog povećanja zapremine digestora.



Slika 3. Normalizovane kumulativne proizvodnje biogasa

Prema odnosu inokulum/supstrat (ISR), početne zapremine

sirovina u smeši se određuju iz jednačina [27]:

$$V_I \cdot I_{VS} = ISR \cdot (V_{SS} \cdot S_{SS(VS)} + V_{FW} \cdot S_{FW(VS)}),$$

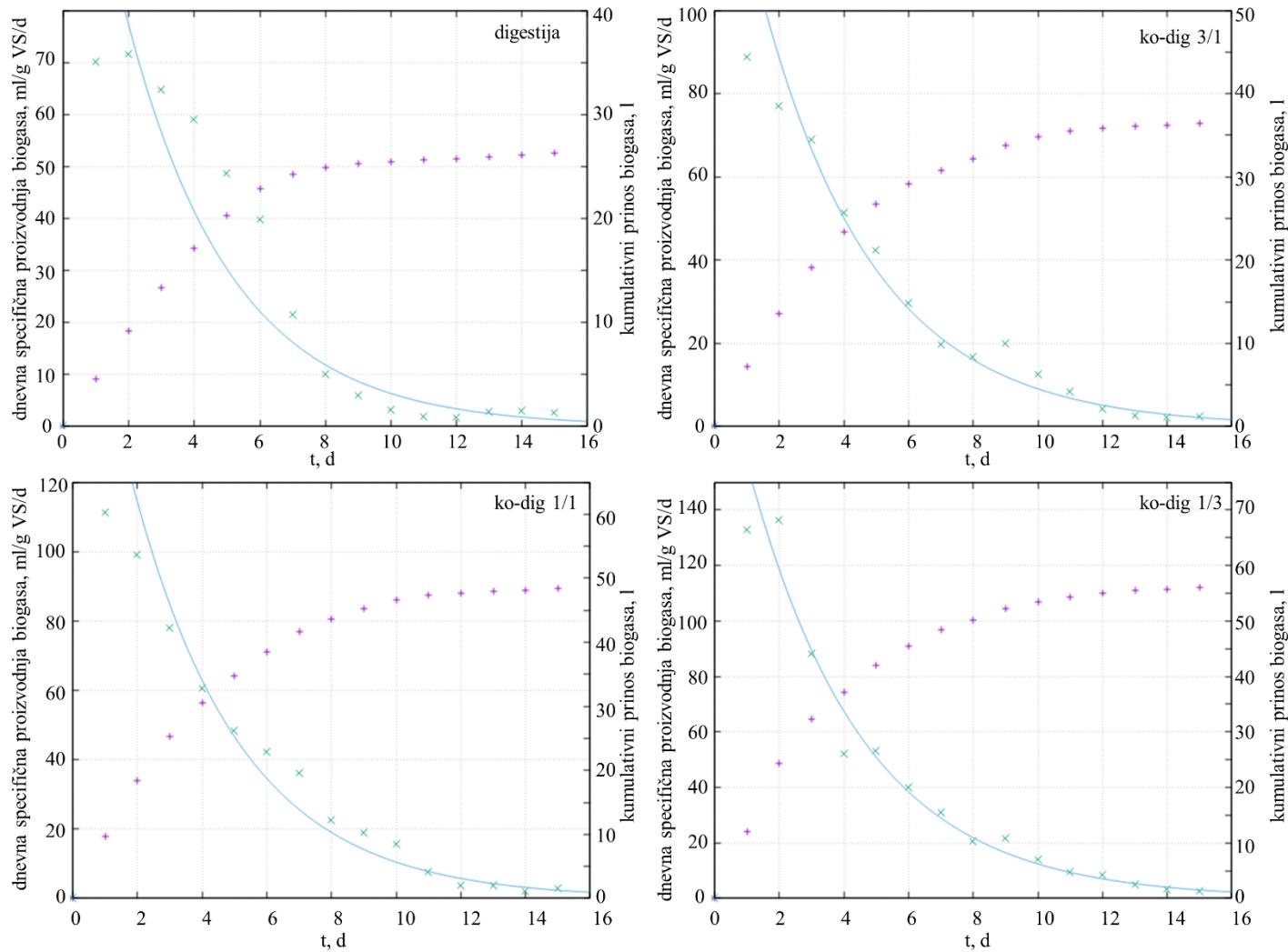
$$V = V_I + V_{SS} + V_{FW},$$

$$\frac{V_{SS}}{V_{FW}} = \frac{1}{0}, \frac{3}{1}, \frac{1}{1}, \frac{1}{3}.$$

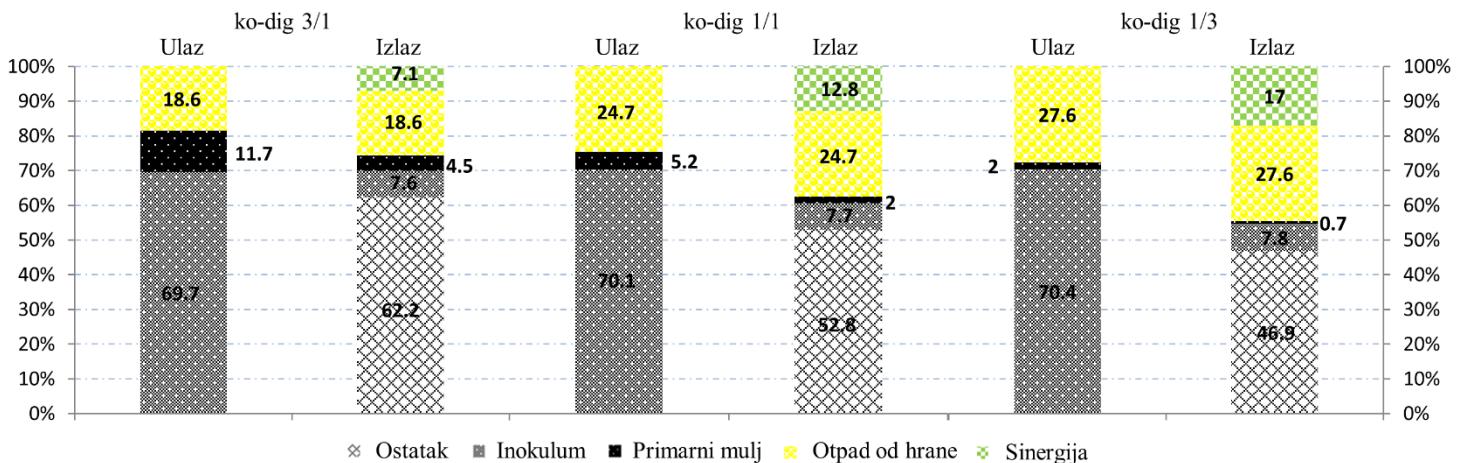
Kumulativna proizvodnja je standardizovana na već spomenuti način korišćenjem početnih isparljivih supstanci ko-/supstrata (mL/g VS). Isparljive čvrste supstance su pokazale prosečan sadržaj u ukupnim čvrstim materijama od 84% za ko-digestije i 78% za mono-digestiju, što ukazuje na značajan kapacitet za organsku transformaciju. Ko-digestije su napredovale u stabilnom režimu u svim odnosima, delimično pod uticajem karakteristika inokuluma koji je već bio prilagođen ovim vrstama ostataka.

Producija biogasa iz mono-digestije primarnog mulja i ko-

digestija mešavina prikazana je na Slici 3. Serijski testovi su otkrili da je dodavanje otpada od hrane povećalo specifični prinos biogasa u poređenju sa samim muljem, koji je pokazao najnižu prosečnu kumulativnu proizvodnju. Poboljšana digestabilnost hrane verovatno je doprinela povećanju proizvodnih parametara smeša. Nakon 15 dana digestije, ispitivanje odnosa 3/1 (446,9 mL/g VS) pokazalo je prosečan specifični prinos biogasa za 10% veći od samog primarnog mulja (407,0 mL/g VS). Prosečna specifična proizvodnja biogasa pri odnosu 1/1 ko-digestije bila je 552,6 mL/g VS. Kao što je predstavljeno na Slici 3, najizdašniji odnos bio je 1/3 sa prosečnim prinosom biogasa od 618,7 mL/g VS. Ovo je predstavljalo povećanje od 52% i 38% u poređenju sa mono-digestijom i 3/1 ko-digestijom, respectivno. Što se tiče odnosa 1/1, specifični prinos biogasa u 1/3 ko-digestiji prikazao je prosečno povećanje od 12%. Najznačajniji skok proizvodnje uočen je između 3/1 i 1/1 ko-digestija, gde je prva činila približno 81% druge.



Slika 4. Dnevne specifične stope i kumulativna proizvodnja biogasa



Slika 5. Sadržaj i proizvodnja izražena preko COD

Slika 4 ilustruje prosečne dnevne prinose biogasa. Proizvodnja je počela odmah nakon punjenja reaktora u svim ciklusima. Maksimum proizvodnje biogasa zabeležen je drugog dana za ko-digestiju 1/3 i mono-digestiju, a prvog dana za 3/1 i 1/1 ko-digestiju. Tokom prva četiri dana eksperimenta, proizvodnja je bila značajno veća za sve postavke, čineći preko 62% ukupnog prinosa. Varijacije između dnevnih stopa proizvodnje bile su neznatne na kraju, ali su se značajno razlikovale na početku procesa. Stopa ko-digestije 1/1 (111 mL/g VS/d) bila je 25% viša od ko-digestije 3/1 (89 mL/g VS/d) i 20% niža od ko-digestije 1/3 (133 mL/g VS/d). U poređenju sa ko-digestijom 1/3, maksimalna dnevna specifična količina biogasa mono-digestije (70 mL/g VS/d) bila je 1,9 puta manja, što sugerira da se upotreba otpada od hrane kao ko-supstrata snažno preporučuje [28]. Na Slici 4 su punom linijom predstavljene eksponencijalne funkcije koje odgovaraju preko 96% dnevnim produkcijama za ko-digestije i 89% za digestiju.

IV.II Bilans COD-a i sinergijski efekat

COD, koji predstavlja stepen solubilizacije, ukazuje na sadržaj materijala koji može oksidovati, pružajući uvid u energetski sadržaj sirovine. Precizni proračuni COD-a na ulazu i izlazu sistema pomažu u analizi performansi digestora kroz masene tokove. Ukupna koncentracija COD-a, određena nakon dodavanja ko-supstrata u reaktor i inokulaciju, služi kao konačna i početna vrednost procesa. Sa udelom semenskog mulja od približno 70% ukupne hemijske potrošnje kiseonika u sve tri ko-digestivne smeše, proporcija COD-a između inokuluma i ko-supstrata je praktično konstantna. Ovo zapažanje sugerira da se COD značajno pripisuje otpadu od hrane i primarnom mulju u reaktoru, naglašavajući visok potencijal sirovine za tretiranje.

Nakon 8. dana kod svih ko-digestivnih eksperimenata, koncentracija COD-a je opala zajedno sa izlazom biogasa, stabilizujući se na konstantnom nivou. Međutim, vredi napomenuti da taložni digestat zadržava visok rezidualni COD, otporan na biorazgradnju. Sinergije u parovima supstrat/ko-supstrat su dokazane povećanom efikasnošću u eliminaciji hemijske potrošnje kiseonika, šta verovatno potiče od poboljšanja sastava organskih hranljivih materija.

Da bi se uzeli u obzir ko-metabolički sinergijski efekti, gde

proizvodnja biogasa iz sirovine za ko-digestiju prevazilazi zbir prinosa pojedinačnih komponenti, mora se uzeti u obzir bilans hemijske potrošnje kiseonika. Bilans COD-a koji se koristi za određivanje obima sinergije izražen je jednačinom:

$$COD_{In} + COD_{PS} + COD_{FW} = COD_{Gas} + COD_{RSD}$$

gde ulazni COD uključuje inokulum, primarni mulj i otpad od hrane, dok izlaz podrazumeva doprinos biogasa (izražen kao COD_{Gas}) i ostatak (COD_{RSD}). Biogas proizveden i pretvoren u COD_{Gas} predstavljen je narednom jednačinom sa ciljem da se proceni stepen sinergizma:

$$COD_{Gas} = COD_{G_{In}} + COD_{G_{PS}} + COD_{G_{FW}} + COD_{G_{Syn}}$$

On se može predstaviti kao zbir biogasa generisanog iz inokuluma, primarnog mulja i otpada od hrane iz mono-digestije, i dodatnog biogasa proizведенog usled sinergijskih reakcija [11].

Nakon 15 dana, sam inokulum je proizveo 189,1 mL/g COD-a, šta predstavlja nizak specifični prinos. Semeni mulj pretvoren je u biogas u rasponu od 11%. Preostali COD inokuluma smatra se čvrstim ostacima. Mono-digestija primarnog mulja dala je konačni specifični prinos biogasa od 396,0 mL/g COD-a. Račun bilansa pokazao je da je postignuta konverzija od 33% na osnovu unetog COD-a. Stepen degradacije otpada od hrane tokom anaerobne ko-digestije je prepostavljen kao potpuna konverzija (100%), pri čemu je usvojen specifični prinos biogasa od 652 mL/g COD-a [29]. Budući da stopa konverzije ne može biti veća od 1, sinergija se definiše kao razlika između izmerene i izračunate proizvodnje biogasa pri potpunoj konverziji otpada od hrane i delimičnoj konverziji primarnog mulja, uz dodatnu proizvodnju semenog mulja. Ko-digestija smeše muljeva (semenog inokuluma i sirovog primarnog) i otpada od hrane kao ko-supstrata izaziva sinergijski efekat, što je primećeno dodatnom proizvodnjom biogasa. Dodatni prinosi biogasa izračunati su kao 7,1%; 12,8% i 17% izlaznog COD-a, prepostavljajući iste parcijalne konverzije za ulazni COD.

V ZAKLJUČAK

U ovom radu prikazan je kratak pregled eksperimenata izvršenih po istoj proceduri i sa sličnim ili istim ko-supstratima upotrebљenim u našoj studiji. Osnovne teorijske postavke

obuhvataju faze hidrolize, koja se smatra ograničavajućom za čitav proces, acid i acetogeneze, i proizvodne metanogeneze. Takođe, prikazan je uticaj različitih parametara na proces ko-/digestije kao što su pH vrednost, temperatura, mešanje, čvrste isparljive materije i hemijska potrošnja kiseonika. Amonijak i vodonik sulfid su navedeni kao supstance koje usporavaju proces ko-/digestije dok su glavni predtretmani koji je podstiču mehanički i termalni. Na kraju je predstavljen šaržni ko-/digestivni eksperiment sa odnosom inokulum/ko-/supstrat 2, kojim je utvrđeno povećanje prinosa biogasa sa povećanim udelom otpada od hrane. Iako je maksimalna proizvodnja uočena kod odnosa primarnog mulja i ostataka hrane 1/3, kao optimalan odnos preporučen je 1/1, usled stabilnosti proizvodnje. Sinergijski efekti kao dodata proizvodnja biogasa na pojedinačnu, utvrđeni su za sve ko-digestivne smeše na osnovu bilansa hemijske potrošnje kiseonika. Sinergija je pripisana komplementarnom sastavu supstrata i ko-supstrata.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Rad je nastao zahvaljujući podršci Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije u okviru Ugovora za finansiranje naučnoistraživačkog rada zaposlenih u nastavi na akreditovanim visokoškolskim ustanovama u 2024. godini broj 451-03-65/2024-03/ 200107.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Rehl, T., Müller, J. Life cycle assessment of biogas digestate processing technologies, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 56, No. 1, pp. 92–104, 2011 <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2011.08.007>
- [2] Zhang, Q., Hu, J., Lee, D. J. Biogas from anaerobic digestion processes: Research updates, Renewable Energy, Vol. 98, pp. 108–119, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.029>
- [3] Li, C. *Using Anaerobic Co-Digestion With Addition of Municipal Organic Wastes and Pre-Treatment To Enhance Biogas Production From Wastewater*, Queen's University Kingston, Ontario, Canada, 2012. <https://doi.org/10.2166/wst.2013.738>
- [4] Li, M. S. C. *Wet and Dry Anaerobic Digestion of Biowaste and of Co-substrates*, Fakultät für Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2015. <https://db-nb.info/1068263415/34> [pristupljeno 15.04.2024]
- [5] Zhang, C., Su, H., Baeyens, J., Tan, T. Reviewing the anaerobic digestion of food waste for biogas production, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 38, pp. 383–392, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.038>
- [6] Mata-Alvarez, J., Dosta, J., Romero-Güiza, M. S., Fonoll, X., Peces, M., Astals, S. A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 36, pp. 412–427, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.03>
- [7] Maragkaki, A. E., Fountoulakis, M., Gypakis, A., Kyriakou, A., Lasaridi, K., Manios, T. Pilot-scale anaerobic co-digestion of sewage sludge with agro-industrial by-products for increased biogas production of existing digesters at wastewater treatment plants, Waste Management, Vol. 59, pp. 362–370, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.043>
- [8] Lisboa, M. S., Lansing, S. Characterizing food waste substrates for co-digestion through biochemical methane potential (BMP) experiments, Waste Management, Vol. 33, No. 12, pp. 2664–2669, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.004>
- [9] Hallaji, S. M., Kuroshkarim, M., Moussavi, S. P. Enhancing methane production using anaerobic co-digestion of waste activated sludge with combined fruit waste and cheese whey, BMC Biotechnology, Vol 19, No. 19, 2019. <https://doi.org/10.1186/s12896-019-0513-y>
- [10] Ebner, J. H., Labatut, R. A., Lodge, J. S., Williamson, A. A., Trabold, T. A. Anaerobic co-digestion of commercial food waste and dairy manure: Characterizing biochemical parameters and synergistic effects, Waste Management, Vol. 52, pp. 286–294, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.03.046>
- [11] Xie, S., Wickham, R., Nghiem, L. D. Synergistic effect from anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic wastes, International Biodeterioration and Biodegradation, Vol. 116, pp. 191–197, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.037>
- [12] Ohemeng-Ntiamoah, J., Datta, T. Evaluating analytical methods for the characterization of lipids, proteins and carbohydrates in organic substrates for anaerobic co-digestion, Bioresource Technology, Vol. 247, pp. 697–704, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.154>
- [13] Naran, E., Toor, U. A., Kim, D. J. Effect of pretreatment and anaerobic co-digestion of food waste and waste activated sludge on stabilization and methane production, International Biodeterioration and Biodegradation, Vol. 113, pp. 17–21, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.04.011>
- [14] Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., Van Lier, J. B. Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: A proposed protocol for batch assays, Water Science and Technology, Vol. 59, No. 5, pp. 927–934, 2009. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- [15] Neves, L., Oliveira, R., Alves, M. M. Influence of inoculum activity on the bio-methanization of a kitchen waste under different waste/inoculum ratios, Process Biochemistry, Vol. 39, No. 12, pp. 2019–2024, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2003.10.002>
- [16] Zhang, L., Jahng, D. Long-term anaerobic digestion of food waste stabilized by trace elements, Waste Management, Vol. 32, No. 8, pp. 1509–1515, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.03.015>
- [17] Molino, A., Nanna, F., Ding, Y., Bikson, B., Braccio, G. Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste, Fuel, Vol. 103, pp. 1003–1009, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.07.070>
- [18] Kusch, S., Schumacher, B., Oechsner, H., Schäfer, W. Methane yield of oat husks, Biomass and Bioenergy, Vol. 35, No. 7, pp. 2627–2633, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.02.044>
- [19] Sung, S., Liu, T. Ammonia inhibition on thermophilic anaerobic digestion, Chemosphere, Vol. 53, No. 1, pp. 43–52, 2003. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00434-X](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00434-X)
- [20] Meroney, R. N., Colorado, P. E. CFD simulation of mechanical draft tube mixing in anaerobic digester tanks, Water Research, Vol. 43, No. 4, pp. 1040–1050, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.11.035>
- [21] Kaparaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L., Angelidaki, I. Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies, Bioresource Technology, Vol. 99, No. 11, pp. 4919–4928, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.015>
- [22] Appels, L., Baeyens, J., Degrève, J., Dewil, R. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 34, No. 6, pp. 755–781, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2008.06.002>
- [23] Cazaudehore, G., Schrauwers, B., Peyrelasse, C., Laguet, C., Monlau, F. Determination of chemical oxygen demand of agricultural wastes by combining acid hydrolysis and commercial COD kit analysis, Journal of Environmental Management, Vol. 250, pp. 109464, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109464>
- [24] Chen, Y., Cheng, J. J., Creamer, K. S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review, Bioresource Technology, Vol. 99, No. 10, pp. 4044–4064, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.01.057>
- [25] Izumi, K., Okishio, Y. ki, Nagao, N., Niwa, C., Yamamoto, S., Toda, T. Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste, International Biodeterioration and Biodegradation, Vol. 64, No. 7, pp. 601–608, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.06.013>
- [26] Bougrier, C., Albasi, C., Delgenès, J. P., Carrère, H. Effect of ultrasonic, thermal and ozone pre-treatments on waste activated sludge solubilisation and anaerobic biodegradability, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, Vol. 45, No. 8, pp. 711–718, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2006.02.005>
- [27] Rakić, N., Šušteršić, V., Gordić, D., Josijević, M., Jurišević, N., Nikolić, J., Inoculum to substrate ratio: Calculating methods, in Proc. 35th International scientific conference Energetika 2020, Zlatibor, Serbia, pp. 285–291, 24–27 Jun 2020.
- [28] Rakić, N. *Povećanje energetske efikasnosti u postrojenjima za tretman otpadnih voda optimizacijom procesa kodigestije*, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac, 2023.

- [29] Angelidaki, I., Sanders, W. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants, *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, Vol. 3, No. 2, pp. 117–129, 2004.
<https://doi.org/10.1007/s11157-004-2502-3>

AUTORI/AUTHORS

dr Nikola Rakić, naučni saradnik, Fakultet inženjerskih nauka, nikola.rakic@fink.rs, ORCID [0000-0001-7755-849X](https://orcid.org/0000-0001-7755-849X)

dr Vanja Šušteršić – redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, vanjas@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-7773-4991](https://orcid.org/0000-0001-7773-4991)

msr Natalija Aleksić - mast. inž. zašt. živ. sred., istraživač saradnik, Fakultet inženjerskih nauka, natalija.aleksic@fink.rs, ORCID [0001-9341-7806](https://orcid.org/0001-9341-7806)

dr Nebojša Jurišević, naučni saradnik, Fakultet inženjerskih nauka, jurisevic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1609-6313](https://orcid.org/0000-0002-1609-6313)

dr Dušan Gordić – redovni profesor, Fakultet inženjerskih nauka, gordic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-1058-5810](https://orcid.org/0000-0002-1058-5810)

Co-/Digestion Procedure: Examples, Settings and Experimental Performance

Abstract – Modern technologies for the treatment of organic waste include the co-/digestion procedure as one of the basics. This paper provides an overview of the tests performed at the international level, the theoretical basis, and key parameters of the co-/digestion process, concluding with the experiment set up and performed. Co-/digestion is presented as a process that almost uniquely treats sewage sludge or animal manure as the primary substrate, and additional biodegradable material that serves as a co-substrate. A wide range of biogas yields was recorded, from 118 mL CH₄/g VS to 1040 mL CH₄/g VS, for different inoculum/substrate and substrate/co-substrate ratios. The elements of the standard protocol and the basic stages of anaerobic digestion are listed. Theoretical settings included parameters, inhibitory substances, and pretreatments. The experimental procedure was carried out with basic equipment and standard methods. Primary sewage sludge and food waste were tested in 4 different ratios (1/0; 3/1; 1/1; 1/3). An enhancement in production was observed with an increase in the proportion of food residues, while the most stable operation was shown by a ratio of 1/1. In co-digestion, synergistic effects of 7.1%, 12.8% and 17% were confirmed, respectively. It has been proven that the addition of biodegradable waste has a positive effect on the yield of biogas.

Index terms – Co-/Digestion, Sewage sludge, Food waste, Biogas, Synergy

Uticaji refleksija i difrakcija talasa i modelovanog izvora i UHF davača pri lociranju parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru

Dorđe Dukanac

Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd

Rezime - U ovom radu je pomoću šest simulacijskih modela energetskog transformatora ispunjenih mineralnim uljem detaljno analizirano prostiranje UHF elektromagnetskih (EM) talasa i određivanje mesta parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru. Ispitano je pet modela različite složenosti u Ansys HFSS-u i jedan pojednostavljeni model u MATLAB-u. Na osnovu rezultata njihovog poređenja izvedeni su odgovarajući zaključci. U modelima u Ansys HFSS-u uzeti su različiti činioci u obzir, uključujući broj i vrstu prisutnih komponenti transformatora. Ovi činioci bili su: 1) refleksije talasa od čeličnog suda, 2) refleksije talasa od i difrakcije oko magnetnog jezgra, 3) refleksije talasa od i difrakcije oko i kroz trofazne namotaje i 4) međusobni položaji i orientacije prijemnih antena prema predajnoj anteni. Oni su uticali na: a) izobličenja, veličine i kašnjenja prvih vrhova, i b) amplitude prvih paketa signala na različito postavljena četiri UHF davača, u odnosu na zamišljeni model kada je sud energetskog transformatora providan. Za izvor parcijalnih pražnjenja i UHF davače korišćene su dipolne antene. U modelu u MATLAB-u izvor je tačkast, dok su davači predstavljeni svojim faznim centrima. Pomoću modela u MATLAB-u procenjen je uticaj nesavršenih međusobnih položaja i prostorno nesimetričnih dijagrama ukupnih dobitaka predajne antene i prijemnih antena u modelima u Ansys HFSS-u, u pogledu dodatnog slabljenja prijemnih signala na davačima. Dimenzije suda i položaji izvora parcijalnih pražnjenja i UHF davača u modelima u Ansys HFSS-u bili su isti kao oni u MATLAB modelu.

Ključne reči - parcijalna pražnjenja, prostiranje signala, energetski transformator, UHF davač, prvi vrh, položaj izvora

I UVOD

Energetski transformatori spadaju u kritične elemente postrojenja za proizvodnju električne energije, sistema za prenos električne energije i velikih industrijskih postrojenja. Potrebno je da se vrši stalno nadziranje stanja energetskih transformatora, pre svega njegove električne izolacije, da bi se izbegli katastrofalni kvarovi transformatora, produžio njihov vek trajanja i obezbedilo neprekidno snabdevanje potrošača električnom energijom. Tokom uobičajenih uslova rada, izolacioni sistem, koga čini izolaciono ulje i izolacioni papir, podleže različitim reakcijama usled toplotnog i električnog naprezanja u energetskom transformatoru. Među tim reakcijama su: oksidacija, hidroliza, piroliza, parcijalna pražnjenja i varničenje. Parcijalna pražnjenja tokom dužeg vremenskog perioda mogu da oslabi kvalitet električne izolacije do te mere

da dođe do potpunog kvara transformatora. Iz tog razloga, trebalo bi da se što je pre moguće odrede svi tipovi oštećenja unutrašnje izolacije u energetskom transformatoru. Istovremeno, pojava parcijalnih pražnjenja može da se koristi za procenu stanja električne izolacije u energetskom transformatoru i određivanje mesta nedostatka u izolaciji. Parcijalna pražnjenja uopšte mogu da nastanu na naponima većim od 5 kV.

Otkrivanje parcijalnih pražnjenja pomoću Ultra-High Frequency (UHF) metode je važno sredstvo za procenu stanja kvaliteta visokonaponske izolacije energetskog transformatora [1–3] i određivanje mesta nedostatka u električnoj izolaciji [4,5]. Ona ima neke prednosti u odnosu na konvencionalnu metodu kao što su: 1) širok opseg učestanosti, 2) suzbijanje šuma i 3) signali na izlazu UHF davača nisu galvanski povezani za vod pod visokim naponom. Na signal na izlazu UHF davača utiču: a) oblik strujnog impulsa izvora parcijalnih pražnjenja, b) položaji izvora i prijemnih UHF antena u svu transformatoru, c) slabljenje signala na putu prostiranja od izvora parcijalnih pražnjenja do UHF davača i d) frekventni odziv UHF davača.

U [6] je opisan izvedeni eksperiment na energetskom transformatoru snage 300 MVA i 420 kV radi procene slabljenja signala na putu od predajne antene (ugrađenog veštačkog izvora parcijalnih pražnjenja) do prijemne antene, u slučaju njihovih različitih međusobnih položaja, kako bi se pronašli optimalni položaji UHF davača. Da bi se isto postiglo, u radu [7], opisane su simulacije izvedene uz pomoć Monte Karlo metode i softvera CST (Computer Simulation Technology) microwave studio.

Da bi uporedili rezultate simulacije i eksperimenta, autori su u radu [8] koristili distributivni transformator snage 630 kVA, da prikažu svoju tehniku modelovanja širenja elektromagnetskih (EM) talasa unutar transformatora korišćenjem softvera CST microwave studio. Ustanovili su razumno slaganje u vremenima prostiranja, kumulativnim energijama i amplitudama signala.

U [9] su simulirani napreci u prostiranju UHF signala parcijalnih pražnjenja od pobudnog izvora u obliku sonde do dve prijemne tačke korišćenjem FDTD (Finite Difference Time Domain) tehnike u modelu monofaznog energetskog transformatora.

U [10], za simulaciju širenja EM talasa parcijalnih pražnjenja unutar malog distributivnog transformatora, napravljeni su algoritmi u softveru C++ zasnovani na FDTD metodi koji su pokazali dobro slaganje sa rezultatima dobijenim korišćenjem CST softvera. Primljeni UHF signali su imali niže energije i vršne vrednosti za impulse parcijalnih pražnjenja sa strmijim

vremenima čela impulsa, iako je najveća vrednost pobudnog impulsa ostala ista.

Trofazni transformator 230/69 kV, 180 MVA je trodimenzionalno (3D) modelovan u [11]. Korišćeni su CST softver, četiri sonde električnog polja i metod binarne optimizacije rojem čestica za lociranje izvora parcijalnih pražnjenja u transformatoru.

Zaključak izvučen u [12] je da će količine električnog polja dostići maksimum na uglovima suda zbog superpozicije višestrukih (sa više putanja) EM talasa. Shodno tome, ovi uglovi su najbolja mesta za postavljanje UHF davača za povećanje osetljivosti otkrivanja EM talasa emitovanih iz izvora parcijalnih pražnjenja.

U radu [4], korišćenjem MATLAB-a u pojednostavljenom modelu energetskog transformatora sa četiri UHF davača, pod pretpostavkom da je dielektrična permitivnost mineralnog ulja 2,2 u sudu transformatora, simulirani su granični talasni oblici parcijalnih pražnjenja koji iz izvora dospevaju na davače i određivan je položaj izvora. Pretpostavljeni su uticaji: prosečnog slabljenja signala u ulju, Gausovog belog šuma i odabiranja signala digitalnim osciloskopom.

U radovima [13–16] vršena su poređenja rezultata sa grafika snimljenih signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima i na osnovu njih dobijenih grešaka položaja izvora. Pretpostavljen je pobudni signal učestanosti od [0–1] GHz za tri modela energetskog transformatora različite složenosti u Ansys HFSS-u.

U ovom radu:

- Razmatra se 5 modela energetskog transformatora različite složenosti u Ansys HFSS-u i jedan uprošćeni model u MATLAB-u, istih dimenzija suda i položaja izvora i UHF davača, u smislu analize signala i određivanja mesta parcijalnih pražnjenja. Svi modeli su sa mineralnim uljem u sudu. Upoređuju su modeli i daju njihove prednosti i mane;
- Posmatra se transparentni sud u prvom uprošćenom modelu energetskog transformatora u Ansys HFSS-u prema kome mogu da se odrede tačna trajanja signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1–4. Razlog tome je što nema odbijenih talasa od metalnog suda i aktivnih delova, kao ni difrakcije talasa kroz ili oko aktivnih delova energetskog transformatora koji se superponiraju pri prijemima signala na davačima, kao što je to slučaj u ostala četiri modela transformatora u Ansys HFSS-u složenije konstrukcije;
- U 4. modelu u Ansys HFSS-u, razmatra se posebno i kombinovani uticaj metalnog suda, magnetnog jezgra i niskonaponskog (NN) namotaja energetskog transformatora na prijemne signale i određivanje mesta parcijalnih pražnjenja;
- Prepostavlja se drugo mesto nedostatka u električnoj izolaciji koje dovodi do parcijalnih pražnjenja, a koje se nalazi između diskova NN namotaja naspram magnetnog jezgra;
- Uzima se veći opseg učestanosti pobudnog signala parcijalnih pražnjenja od [0–1,5] GHz;
- 3D dijagram ukupnog dobitka dipolne antene se određuje za veće rastojanje, u zapremini kocke stranice 2 m koja okružuje antenu u centru kocke;

- Vrši se poređenje oblika pobudnih impulsata predajne antene (izvora) u različitim modelima u Ansys HFSS-u;
- Vrši se poređenje S_{11} parametara refleksije izvorne antene i S_{21} parametara prenosa signala od izvorne antene prema prijemnim UHF antenama 1–4 u različitim modelima u Ansys HFSS-u;
- U Ansys HFSS-u razmatra se i uticaj refleksija i difrakcija talasa zbog elemenata konstrukcije transformatora na veličine prvih vrhova signala 1–4 koji su presudni pri određivanju mesta parcijalnih pražnjenja;
- Poredi se 1. uprošćeni model u Ansys HFSS-u sa modelom u MATLAB-u radi procene uticaja slabljenja signala na davačima usled specifičnog uzajamnog položaja i usmeravanja izvora u obliku antene u odnosu na prijemne antene.

II ELEMENTI KORIŠĆENIH MODELA U SIMULACIJAMA PROSTIRANJA UHF SIGNALA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA I ODREĐIVANJA MESTA IZVORA

U ovom poglavlju će biti predstavljeni pretpostavljeni izvor parcijalnih pražnjenja i četiri UHF davača koji su u pet modela energetskog transformatora u Ansys HFSS-u različitog oblika u odnosu na model u MATLAB-u, radi simulacija prenosa UHF signala parcijalnih pražnjenja od njihovog izvora do UHF davača 1–4 i određivanja mesta izvora. Biće razmatrani modeli različite složenosti malog trofaznog energetskog transformatora snage 5 MVA, sa odnosom transformacije 66/11 kV. Dimenzije suda transformatora su: 2300 mm x 880 x 2800 mm.

II.1 Modeli za simulacije u Ansys HFSS-u

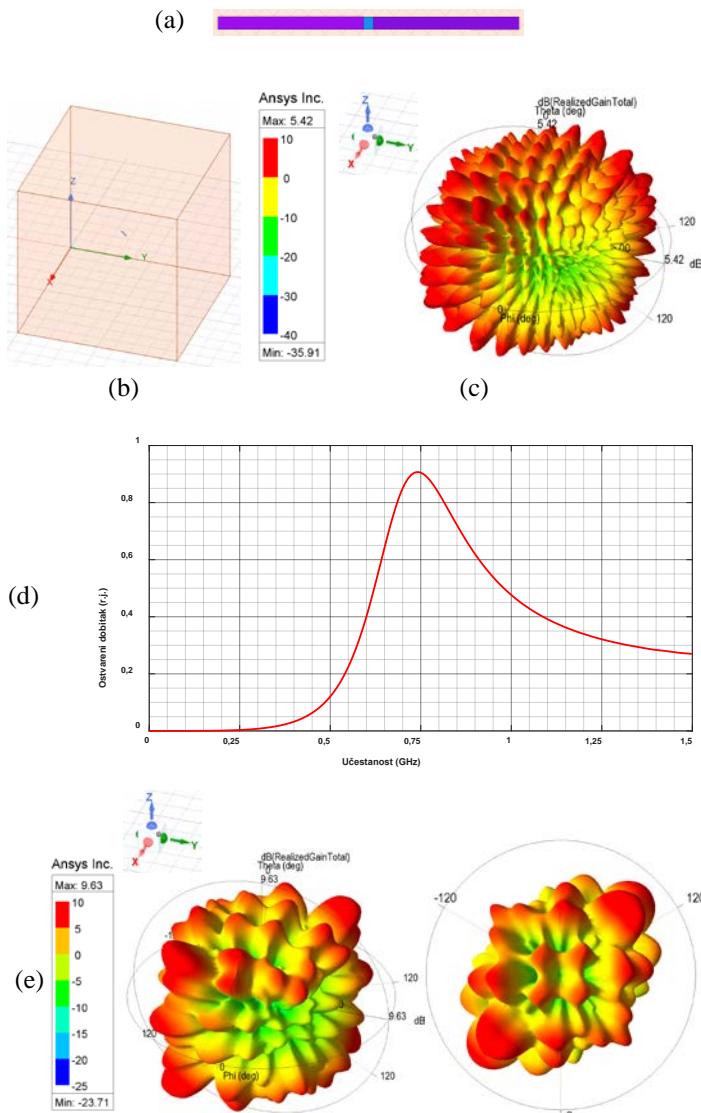
U ovom odeljku će biti predstavljeni izvor parcijalnih pražnjenja i četiri UHF davača koji su primenjivani u pet različitih modela energetskog transformatora različite složenosti u Ansys HFSS-u. Usvojeni položaji (centralne tačke) prijemnih UHF antena su: $A_1=(65; 65; 2750)$ mm, $A_2=(1150; 440; 2758)$ mm, $A_3=(2235; 815; 2755)$ mm i $A_4=(70; 810; 2760)$ mm [13–16].

Pretpostavljen je izvor parcijalnih pražnjenja u tački: $G = (1985; 295; 1485)$ mm. Nalazi se sa zadnje strane 1. stuba jezgra, u gornjem delu 1. faze namotaja. Postavljen je između namotaja niskog napona (NN) i magnetnog jezgra, bliže namotaju NN i to dosta zalazeći između 37. i 38. diska namotaja NN.

II.1.1 Izvor parcijalnih pražnjenja i UHF davači u simulacijama u Ansys HFSS-u

U Ansys HFSS-u, dipolnom antenom, prikazanom na slici 1a), simuliraju se izvor parcijalnih pražnjenja i UHF davači za potrebe pobude i prijema signala parcijalnih pražnjenja, respektivno. Krakovi antene su sastavljeni od bakra i imaju dimenzije 60 mm sa 5 mm [13–16]. Na slici 1b) prikazana je opisana dipolna antena čije je proračunavano zračenje ograničeno kockom transparentnih zidova, dužine stranice od 2 m, koja je napunjena mineralnim uljem dielektrične konstante $\epsilon_r = 2,2$. Položaj antene je (1; 1; 1) m. Izvor parcijalnih pražnjenja je oponašan širokopojasnim Gausovim impulsom u opsegu učestanosti [0–1,5] GHz i sa amplitudom od 1 V. Na slici 1c) prikazan je polarni dijagram ukupnog dobitka UHF dipolne antene sa slike 1b), izražen u decibelima [dB], pri 1,5 GHz. Na slici 1d) prikazan je dvodimenzionalni dijagram ostvarenog

dubitka antene u zavisnosti od učestanosti sa maksimumom 0,907 r.j. pri 740,65 MHz, što je 3,36 puta veće nego za 1,5 GHz. Ostvareni dobitak antene se izračunava uzimajući u obzir ukupnu efikasnost antene, zajedno sa njenom usmerenošću. Efikasnost antene je odnos snage zračenja prema ulaznoj snazi. Dobitkom prijemne antene opisuje se koliko dobro antena pretvara radio talase koji stižu ka njoj iz određenog pravca u električnu snagu i obrnuto za predajnu antenu. Na slici 1e) prikazani su 3D polarni dijagrami ukupnog dobitka antene, u [dB], pri 740,65 MHz, u trimetrijskom izgledu i pri pogledu odozgo. Centar antene je u središtu 3D dijagrama.



Slika 1. (a) Dipolna antena dimenzija 124 x 5 mm [13–16].
(b) Zadata dipolna antena u kocki za ograničavanje zračenja sa trimetrijskom orijentacijom. (c) 3D polarni dijagram ukupnog dobitka antene u [dB] pri 1,5 GHz u trimetrijskom izgledu.
(d) Ostvareni dobitak antene u zavisnosti od učestanosti.
(e) 3D polarni dijagrami ukupnog dobitka antene, u [dB], pri 740,65 MHz, u trimetrijskom izgledu i pri pogledu odozgo

Na slika 1c) i 1e) jasno je da obe snage zračenja na

odgovarajućim učestanostima koje emituje ili prima dipolna antena nisu jednake po svim pravcima u odnosu na središte antene. Vidi se, za obe učestanosti, da 3D dijagrami ukupnih dobitaka oko dipolne antene, koja simetrično prolazi kroz njihovo središte, značajno odstupaju od idealnog sfernog oblika. Izuzetno su geometrijski neujednačeni i prilično spljošteni duž uzdužne ose antene, u pravcu koje je na površini oba dijagrama ukupni dobitak minimalan. Primećuju se niži intenziteti ukupnog dobitka antene označeni većim brojem svetlo narandžastih i svetlo zelenih zona na polarnim dijagramima, posebno na površinama dijagrama s prednje, odnosno zadnje strane.

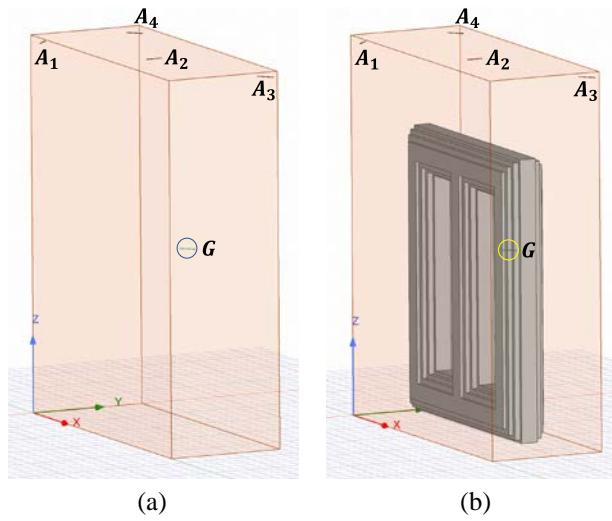
Na prvi pogled, ima više svetlo narandžastih i svetlo zelenih zona na 3D dijagramu pri 740,65 MHz nego pri 1,5 GHz, ali su skale ukupnih dobitaka različite. Na 3D dijagramu pri 740,65 MHz te zone su u opsegu [-5–5] dB, pri čemu je maksimum ukupnog dobitka 9,63 dB, a minimum -23,71 dB. Na 3D dijagramu pri 1,5 GHz te zone su u opsegu [-20–0] dB, pri čemu je maksimum ukupnog dobitka 5,42 dB, a minimum -35,91 dB.

II.1.2 Pet različitih modela malog trofaznog energetskog transformatora u Ansys HFSS-u

Razmatraju se sledeći modeli malog energetskog transformatora u Ansys HFSS-u: uprošćeni, prost, složeniji, složeni i tipični, kako bi se procenio i analizirao uticaj stvarne konstrukcije energetskog transformatora na prostiranje UHF signala od izvora parcijalnih pražnjenja do prijemnih UHF antena i utvrdilo mesto izvora u svakom od tih modela. Na slici 2a), sud transformatora napunjen mineralnim uljem predstavlja:

- 1) prvi uprošćeni model energetskog transformatora sa spoljnim transparentnim površinama suda, ali uzetim za granicu zračenja zbog proračuna, i
- 2) drugi prost model energetskog transformatora sa spoljnim površinama zidova suda od nerđajućeg čelika 304.

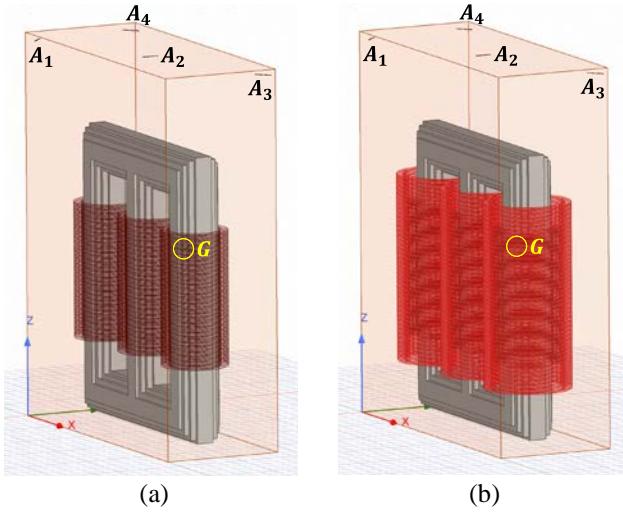
Na slici 2b) prikazan je treći složeniji model energetskog transformatora. Predstavljen je sa sudom transformatora od nerđajućeg čelika 304, koji je ispunjen mineralnim uljem i u kome se nalazi trostubno magnetno jezgro.



Slika 2. (a) Prvi uprošćen, odnosno drugi prost model transformatora, ali sa odgovarajućim zidovima suda, providnim odnosno čeličnim. (b) Treći složeniji model transformatora

Na slici 3a) prikazan je četvrti složeni model energetskog transformatora. U odnosu na model na slici 2b) sadrži i trofazni bakarni NN namotaj obmotan oko stubova jezgra.

Na slici 3b) prikazan je peti tipični model energetskog transformatora. U odnosu na model na slici 3a) sadrži i trofazni bakarni VN namotaj obmotan oko stubova jezgra i NN namotaja.



Slika 3. (a) Četvrti složeni model transformatora.
(b) Peti tipični model transformatora

II.1.3 POJEDNOSTAVLJENJA I OGRANIČENJA 4. I 5. SIMULACIJSKOG MODELA U ANSYS HFSS-U

Zbog ograničenih mogućnosti računara (prvenstveno procesora i memorije sa slučajnim pristupom) i softvera Ansys HFSS, neophodna pojednostavljenja i ograničenja 4. i 5. modela energetskog transformatora su:

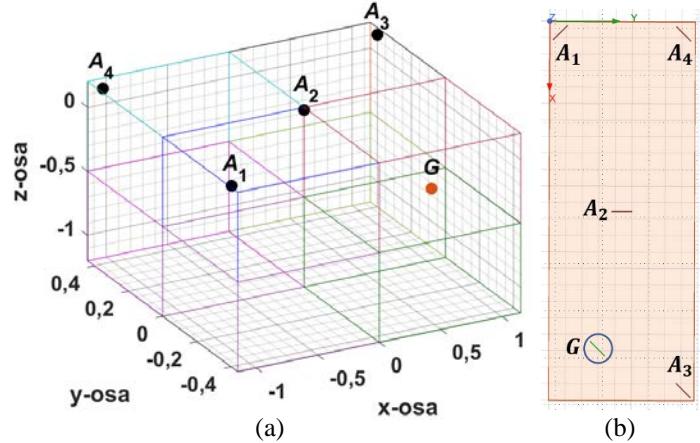
- 1) Pošto su i papirna izolacija i prešpanska međuizolacija trofaznih namotaja NN i VN impregnirani uljem, što smanjuje dielektričnu konstantu tih izolacija, njihova stvarna dielektrična konstanta se zamenjuju onom od mineralnog ulja.
- 2) Međuizolacija između susednih navoja svakog od 42 odgovarajuća NN ili VN diska u radijalnom pravcu, debljine 1,2 mm, ne uzima se u obzir i smatra se da je bakar. Svaki VN disk je podeljen na dva dela duž vertikalne ose sa razmakom od 1,2 mm, iako bi trebalo da bude sastavljen od četiri dela.
- 3) Zbog nedostatka preciznih podataka i dodatnog usložnjavanja konstrukcije energetskog transformatora, ne uzimaju se u obzir manje prisutni i uticajni: a) izolacioni delovi kao što su: izolacioni odstojnici, trake, čaure itd. i b) metalni delovi, uključujući: zavrtnje, delove za pričvršćivanje namotaja, okvire za stezanje jezgra, izlazne vodove na namotajima, itd.

Slabljenje signala je nešto veće kada se dva razmaka od 1,2 mm po vertikalnom pravcu u svakom disku VN namotaja zanemare. 1,2 mm je mali otvor za EM talas u mineralnom ulju (sa $\epsilon_r = 2,2$) koji ima talasnu dužinu od 27,31 cm pri 740,65 MHz, a 13,48 cm pri 1,5 GHz. Zbog difrakcije talasa na tako malom otvoru, talasni snop koji prolazi kroz njega gubi intenzitet u različitim pravcima u odnosu na sam otvor, odnosno snaga signala opada u pravcu koji je najbliži datom UHF davaču.

II.2 Model za simulacije u MATLAB-u

Na slici 4a), prikazan je uprošćeni model energetskog transformatora u MATLAB-u, gde sud napunjen mineralnim uljem ima iste dimenzije kao u bilo kom Ansys HFSS modelu. Pored toga, položaji četiri UHF davača i izvora u odnosu na sud su isti, ali se njihove koordinate razlikuju od onih kod Ansys HFSS modela, jer se koordinatni početak ne nalazi na istom mestu. Umesto u prednjem levom temenu donje strane suda, on se nalazi u središtu suda u MATLAB modelu, pa je: $A_1 = (-1,085; -0,375; 1,35)$ m, $A_2 = (0; 0; 1,358)$ m, $A_3 = (1,085; 0,375; 1,355)$ m, $A_4 = (-1,08; 0,37; 1,36)$ m i $G = (0,835; -0,145; 0,085)$ m. Izvor parcijalnih pražnjenja je tačka, što je najbliže stvarnom slučaju. UHF antene su približno predstavljene samo svojim faznim centrima. Tačne udaljenosti od izvora parcijalnih pražnjenja do UHF davača 1–4 su: 2,311 m, 1,529 m, 1,395 m i 2,358 m.

Na slici 4 b) prikazan je pogled odozgo na prvi uprošćeni model transformatora u Ansys HFSS-u. Izvor parcijalnih pražnjenja i UHF davači predstavljeni su dvopolnim antenama.



Slika 4. (a) Uprošćeni model transformatora u MATLAB-u.
(b) Pogled odozgo na prvi uprošćeni model transformatora u Ansys HFSS-u

III ANALIZE SIMULACIJA PROSTIRANJA TALASA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA I DOBIJENIH SIGNALA NA UHF DAVAČIMA

U ovom odeljku će biti predstavljeni rezultati simulacija prostiranja talasa parcijalnih pražnjenja od izvora G do UHF davača A₁ – A₄ i analizirani signali na UHF davačima primenom Ansys HFSS i MATLAB modela energetskog transformatora.

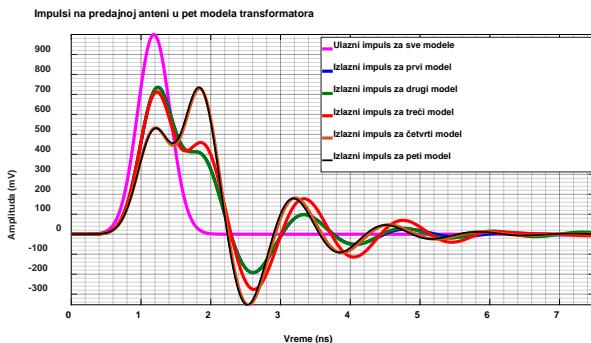
III.1 Simulacije zasnovane na modelima u Ansys HFSS-u

U Ansys HFSS-u koristi se metod konačnih elemenata (FEM). Ovo je numerička tehnika koja se koristi da se približno odredi rešenje diferencijalnih jednačina sa graničnim vrednostima. Osnovni zadatak koji se ovde postavlja je problem visoke frekvencije, a ne niskofrekventni ili kvazistatički problem. Za svaki model transformatora su vršene punotalasne EM simulacije stvaranja, prenošenja i prijema EM UHF talasa parcijalnih pražnjenja.

U Ansys HFSS modelima uzimaju se u obzir sve moguće refleksije i difrakcije EM talasa iz izvora parcijalnih pražnjenja, izazvane uticajima metalnih delova energetskog transformatora.

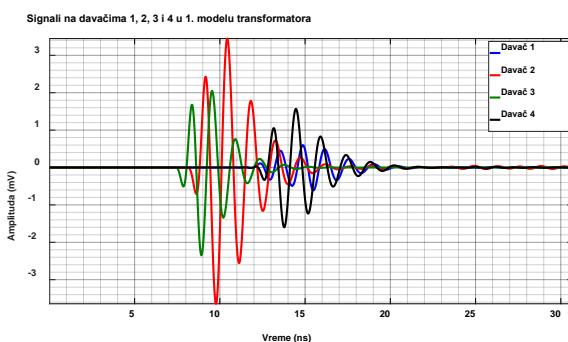
Tačnije rečeno, uzimaju se u obzir sva odbijanja talasa od zidova suda, trofaznog magnetnog jezgra i trofaznih namotaja NN i VN. Obuhvaćene su i sve difrakcije (savijanja) talasa oko aktivnih metalnih komponenti (jezgra i namotaja) i kroz male procepe između metalnih delova namotaja NN i VN.

Na slici 5 su prikazani izlazni pobudni impulsi predajne antene koji se više ili manje razlikuju, ali njen prikazani ulazni pobudni impuls ostaje nepromjenjen za svih pet modela transformatora u Ansys HFSS-u: uprošćeni, prosti, složeniji, složeni i tipični. Zbog blizine metalnih komponenti, tj. diskova NN namotaja predajnoj anteni i refleksija od njih, maksimumi izlaznih pobudnih signala četvrtog i petog modela kasne za oko 0,59 ns u odnosu na izlazne pobudne impulse prvog, drugog i trećeg modela transformatora.



Slika 5. Pobudni ulazni impuls i pobudni izlazni impulsi predajne antene za različite modele transformatora

Na slici 6 prikazani su snimljeni izlazni signali na UHF davačima 1–4 u raznim bojama za prvi uprošćeni model energetskog transformatora, koji je prethodno prikazan na slici 2a) u obliku suda sa mineralnim uljem i sa providnim zidovima sa zadatim rasporedom izvora i davača. Sa slike 6 može da se primeti da, od trenutka pojave do prigušenja u blizine nule, signali parcijalnih pražnjenja na davačima imaju trajanje od oko 9 ns.

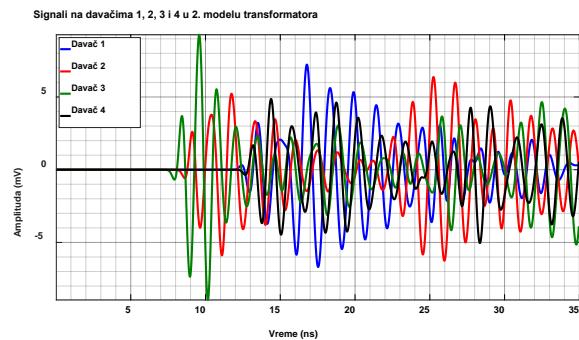


Slika 6. Izlazni signali na UHF davačima 1–4 u različitim bojama, za prvi uprošćeni model energetskog transformatora u obliku suda gde granicu zračenja čine providni zidovi

Na slici 7 prikazani su snimljeni izlazni signali na UHF davačima 1–4 u raznim bojama za drugi prosti model energetskog transformatora u obliku suda sa metalnim zidovima koji je napunjen mineralnim uljem i koji je već predstavljen sa zadatim rasporedom izvora i davača na slici 2a).

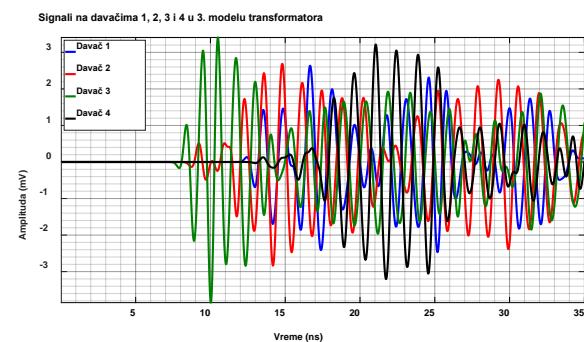
Sa slike 7, primećuju se dejstva EM talasa parcijalnih pražnjenja

koji se odbijaju od strana suda od nerđajućeg čelika u drugom prostom modelu transformatora. U poređenju sa slikom 6 može da se zaključi da, posle približno 9 ns od početka signala na svakom davaču, više ne vredi da se analiziraju direktni signali od izvora parcijalnih pražnjenja ka UHF davačima, i da ostaju samo efekti indirektno nastalih signala na davačima. U prvom paketu svakog signala može da se primeti povećanje njihove maksimalne amplitude, što je posebno veliko kod davača 1 (11,87 puta), a zatim kod davača 3 i 4 (3,95 i 3,04 puta), kao rezultat odbijanja EM talasa od metalnog suda. Povećanje najveće amplitude u prvom paketu signala od 1,62 puta kod davača 2 znači da je najmanji uticaj čeličnih zidova suda na prijemni signal za taj davač. Mnogo su manji uticaji odbijenih EM talasa parcijalnih pražnjenja na prvi vrh signala na svakom davaču, jer je potrebno određeno vreme da mnogi odbijeni talasi stignu na mesto svakog od davača (najveći je uticaj opet na 1. davaču).



Slika 7. Izlazni signali na UHF davačima 1–4 prikazani u različitim bojama, za drugi prosti model energetskog transformatora sa zidovima od nerđajućeg čelika

Na slici 8 prikazani su snimljeni izlazni signali na UHF davačima 1–4 u nizu boja za treći složeniji model energetskog transformatora sa čeličnim sudom napunjени mineralnim uljem i sa trostubnim magnetnim jezgrom, koji je prethodno predstavljen sa zadatim rasporedom izvora i davača na slici 2b).

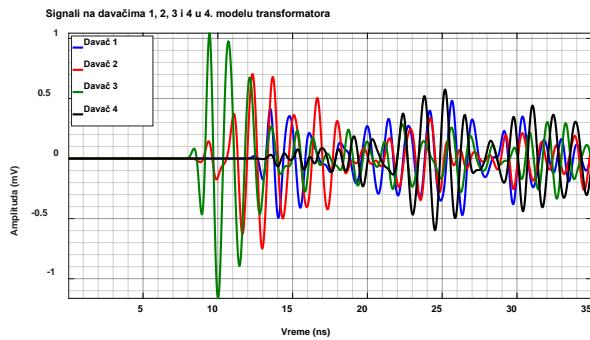


Slika 8. Izlazni signali na UHF davačima 1–4, predstavljeni u različitim bojama, za treći složeniji model transformatora koji u odnosu na drugi model sadrži i trostubno magnetno jezgro

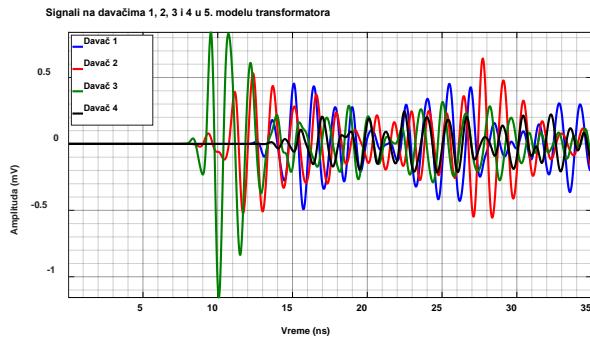
Na slici 8 je prikazan dodatni uticaj magnetnog jezgra na izglede izlaznih signala na davačima 1–4, u odnosu na drugi prosti model energetskog transformatora, što je uzrokovano povećanim refleksijama (odbijanjima) od, kao i pojmom difrakcija (skretanja, savijanja) talasa oko sastavnih delova magnetnog

jezgra. Kao rezultat toga, u poređenju sa slikom 7, na slici 8 može da se vidi smanjenje maksimalne amplitude u prvom paketu svih signala u opsegu od 1,51 put za 4. signal, do 2,74 puta za 1. signal.

Na slici 9 predstavljeni su snimljeni izlazni signali na UHF davačima 1–4 u nizu boja za četvrti složeni model energetskog transformatora sa čeličnim sudom, trostubnim magnetnim jezgrom i trofaznim NN namotajem, koji je prethodno prikazan na slici 3a). Sa slike 9 mogu da se vide pojačani efekti slabljenja signala na davačima 1–4 usled dejstva NN namotaja u poređenju sa prethodnim trećim složenijim modelom energetskog transformatora, pri čemu dolazi do dodatnih pojačanih refleksija od i difrakcija oko i kroz metalne komponente NN namotaja. Zbog toga je 13,91 put manja amplituda prvog paketa signala 4. Ostala slabljenja amplituda prvih paketa signala 1, 2 i 3 su 5,34, 3,78 i 3,31 puta. Ovolika slabljenja signala su posledica položaja predajne antene koja je postavljena dosta zalazeći između 37. i 38. diska NN namotaja, naspram magnetnog jezgra. Pri tome dolazi do odbijanja talasa parcijalnih pražnjenja od tih diskova nazad ka anteni na bliskom rastojanju, što dovodi do stvaranja kontra elektromotornih sila u anteni i slabljenja intenziteta izlaznog impulsa. Na prethodnoj slici 5 vidi se pomeranje glavnog maksimuma izlaznog impulsa za 0,59 ns, dok je prvi maksimum posle 1,24 ns za 180 mV slabiji nego u 3. modelu transformatora.



Slika 9. Različito obojeni izlazni signali na UHF davačima 1–4, za četvrti složeni model energetskog transformatora koji u odnosu na treći model sadrži i trofazni NN namotaj



Slika 10. Izlazni signali u različitim bojama na UHF davačima 1–4, za peti tipični model energetskog transformatora koji u odnosu na četvrti model sadrži i trofazni VN namotaj

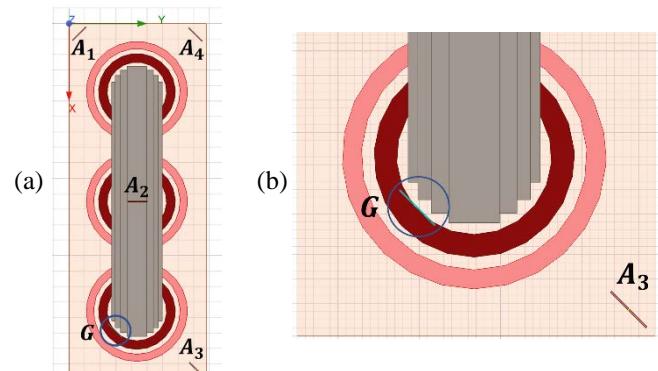
Na slici 10 predstavljeni su snimljeni izlazni signali na UHF

davačima 1–4 u različitim bojama za peti tipični model energetskog transformatora sa čeličnim sudom, trostubnim magnetnim jezgrom i trofaznim namotajima NN i VN, koji je prethodno prikazan na slici 3b). Sa slike 10 može da se vidi mali uticaj VN namotaja na slabljenja maksimalnih amplituda u prvih paketima signala na davačima 1, 3 i 4 od 1–1,13 puta u poređenju sa prethodnim četvrtim modelom energetskog transformatora. Veći uticaj je zabeležen pri slabljenju maksimuma prvog paketa signala na 2. davaču 1,41 put.

U Tabelama 1–3 sažeto su prikazani trenuci pojave i vrednosti prvih vrhova, kao i amplitude prvih paketa signala parcijalnih pražnjenja na UHF davačima 1–4, sa slika 6–10, za pet modela energetskog transformatora u Ansys HFSS-u.

Tabela 1. Trenuci pojave prvih vrhova signala parcijalnih pražnjenja na davačima 1–4 za pet modela transformatora

Model	t_1 [ns]	t_2 [ns]	t_3 [ns]	t_4 [ns]
model 1	12,3694	8,6217	7,8640	12,6049
model 2	12,4178	8,6167	7,9171	12,6510
model 3	12,4360	8,7401	7,9070	12,9965
model 4	12,5037	8,8367	8,4159	13,0297
model 5	12,5985	8,8163	8,3419	13,0729



Slika 11. Položaj antene izvora u odnosu na NN namotaj u petom tipičnom modelu transformatora prikazanom: (a) pri pogledu odozgo i (b) sa uvećanim detaljem mesta izvora.

Tabela 2. Prve vršne vrednosti signala parcijalnih pražnjenja na davačima 1–4, za pet modela energetskog transformatora

Model	U_{p1} [mV]	U_{p2} [mV]	U_{p3} [mV]	U_{p4} [mV]
model 1	0,1102	-0,7044	-0,5077	-0,3318
model 2	0,3140	-0,5757	-0,6802	-0,3502
model 3	0,1339	-0,1337	-0,1648	-0,0308
model 4	0,0265	-0,0302	0,0823	-0,0042
model 5	0,0169	-0,0208	0,0410	-0,0014

Na slici 11 se vidi da je VN namotaj od manjeg uticaja na prijemne signale na davačima nego samo magnetno jezgro ili posebno magnetno jezgro i NN namotaj, jer je udaljeniji od antene izvora u odnosu na jezgro i NN namotaj između čijih diskova ona dosta zalazi. Pritom su svi davači postavljeni u gornjem delu suda.

Tabela 3. Amplitude prvih paketa signala parcijalnih pražnjenja na davačima 1–4 za pet modela transformatora

Model	U_{m1} [mV]	U_{m2} [mV]	U_{m3} [mV]	U_{m4} [mV]
model 1	-0,6091	-3,6444	-2,3484	-1,5985
model 2	7,2270	-5,8901	9,2772	4,8664
model 3	2,6341	-2,8360	-3,8485	3,2148
model 4	-0,4937	-0,7493	-1,1636	-0,2311
model 5	-0,4928	0,5310	-1,1564	0,2048

Uticaji međusobnih položaja i usmeravanja prijemnih antena prema predajnoj anteni, u prvom modelu, mogu da se vide na primerima signala na UHF davačima 4 i 1 u tabeli 3. Iako se rastojanja od izvora parcijalnih pražnjenja do UHF davača 4 i 1 (2 i 3) malo razlikuju 1,02 (1,1) put, najveće amplitude u prvim paketima signala na ovim davačima se razlikuju 2,62 (1,55) puta a prvi vrhovi 3,01 (1,39) puta. Ovo ukazuje da zbog svoje nepravilne orientacije u odnosu na predajnu antenu (izvor parcijalnih pražnjenja), UHF davač 1 (davač 3) prima znatno manju snagu signala od davača 4 (davač 2) iako je na bližem rastojanju od izvora. Pomoću prethodno prikazanih slika 1e), 2a) i 4b) može da se zaključi da su predajni talasni frontovi antene izvora sa jačim dobitkom bliži prijemnoj anteni 4 (2) i njenim prijemnim talasnim frontovima sa jačim dobitkom, nego anteni 1 (3).

U 2. modelu, uz dodatak metalnog suda transformatora, javljaju se efekti izobličenja prvih vrhova signala na sva četiri davača. U odnosu na model 1, zbog toga su, u tabeli 1, za signale 1, 3 i 4 prvi vrhovi na vremenskoj osi pomereni unapred za oko 0,5 ns (0,484 ns, 0,531 ns i 0,461 ns) a za signal 2 je prvi vrh pomeren unazad za 0,005 ns. Zbog refleksije, u tabeli 2, prvi pikovi su mogli da budu veći 2,84, 1,34 i 1,06 puta za signale 1, 3 i 4 ili je prvi pik mogao da bude manji 1,22 puta za signal 2 u modelu 2 u odnosu na model 1.

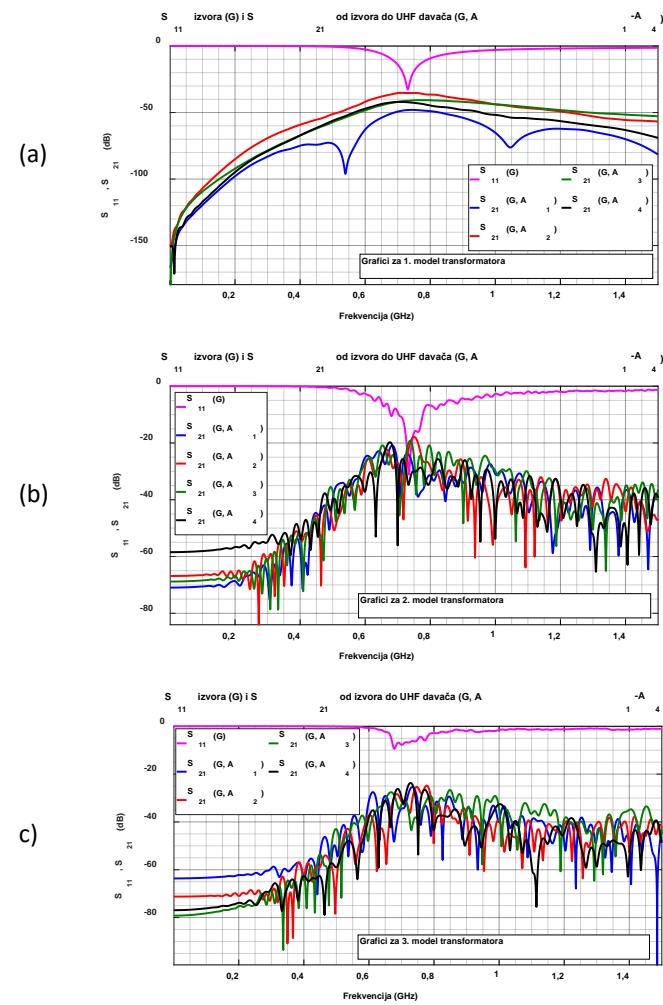
U 3. modelu, uz dodatak trostubnog jezgra transformatora, postoje nova dejstva na izobličenja prvih vrhova signala na sva četiri davača. U odnosu na model 2, zbog toga su, u tabeli 1, za signale 1, 2 i 4 prvi vrhovi na vremenskoj osi pomereni unapred (0,018 ns, 0,123 ns i 0,345 ns), a za signal 3 je prvi vrh pomeren unazad za 0,01 ns. Najveća odstupanja su za signale 4 i 2, a najmanja za signale 3 i 1. Zbog difrakcija i dodatnih refleksija EM talasa u odnosu na model 2, u tabeli 2, prvi vrh se očekivano najviše smanjio za signal 4 11,37 puta, a zatim za signale 2, 3 i 1: 4,31, 4,13 i 2,34 puta. Magnetno jezgro ima najmanji uticaj na slabljenje prvog vrha, ali i najveći uticaj na maksimum prvog paketa signala koji dolazi do 1. davača, dok je za signal davača 4 obrnuto (videti opis slike 8, tj. tabelu 3).

U 4. modelu, uz dodatak trofaznog NN namotaja, javljaju se novi efekti izobličenja prvih vrhova signala na sva četiri davača. U odnosu na model 3, zbog toga su, u tabeli 1, za signale 1, 2, 3 i 4 prvi vrhovi na vremenskoj osi pomereni unapred (0,068 ns, 0,097 ns, 0,5089 ns i 0,033 ns). Najveće je odstupanje za signal 3. Zbog difrakcija i dodatnih refleksija EM talasa u odnosu na model 3, u tabeli 2, prvi vrh se očekivano najviše smanjio za signal 4 7,333 puta, a zatim za signale 1, 2 i 3: 5,053, 4,427 i 2,002 puta. U istom poretku se javljaju i uticaji na maksimume

prvih paketa signala na davačima (videti opis slike 9, tj. tabelu 3).

U 5. modelu, uz dodatak trofaznog VN namotaja, javljaju se novi efekti izobličenja prvih vrhova signala na sva četiri davača. U odnosu na model 4, zbog toga su, u tabeli 1, za signale 1 i 4 prvi vrhovi na vremenskoj osi pomereni unapred (0,095 ns i 0,043 ns), a za signale 2 i 3 su prvi vrhovi pomereni unazad (0,020 ns i 0,074 ns). Zbog difrakcija i dodatnih refleksija EM talasa u odnosu na model 4, u tabeli 2, prvi vrh se najviše smanjio za signal 4 3 puta, a zatim za signale 3, 1 i 2: 2,007, 1,570 i 1,452 puta.

S_{11} parametar za izvor parcijalnih pražnjenja i S_{21} parametri za prenos signala između izvora i UHF davača 1–4 prikazani su na slici 12 za 1., 2. i 3. model, a na slici 13 za 4. i 5. model u Ansys HFSS-u.



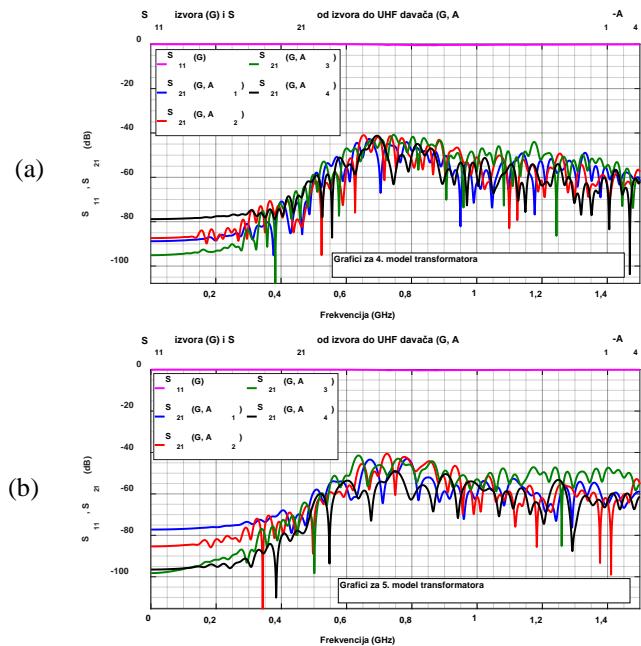
Slika 12. Parametar S_{11} za izvor parcijalnih pražnjenja i S_{21} parametri za prenos signala između izvora i UHF davača 1–4 za (a) 1., (b) 2. i (c) 3. model transformatora u Ansys HFSS-u

Za 1. model, sa slike 12 a) može da se vidi da se maksimumi krivih za S_{21} parametre signala ne poklapaju, tj. najveći je maksimum za 2. davač -35,19 dB pri 711 MHz, a najmanji za prvi davač -48,02 dB pri 742,5 MHz. Maksimalne vrednosti

parametara S_{21} za signale 1, 2, 3 i 4, u odnosu na vrednosti S_{21} pri 1,5 GHz, veće su za 33,49 dB, 21,48 dB, 12,14 dB i 27,03 dB, tj. 47,26, 11,86, 4,05 i 22,46 puta, respektivno. Najmanja vrednost S_{11} parametra iznosi -32,7 dB, pri 731,25 MHz. Sa slika 12b) i 12a) može da se vidi da za 2. model u odnosu na 1. model transformatora postoje povećane maksimalne vrednosti parametara S_{21} signala, zbog pojačanih efekata reflektovanih talasa od čeličnog suda koji se superponiraju pri prijemu na davačima. Ovo povećanje amplituda je od 17,35 dB (7,37 puta) za signal 2 do 27,13 dB (22,74 puta) za signal 1 u zajedničkom opsegu učestanosti [675,75–765] MHz. Najmanja vrednost S_{11} parametra je neznatno veća -31,14 dB, pri 734,25 MHz.

Na slikama 12 c) i 12 b) primećuju se za 3. model u odnosu na 2. model transformatora slabljenja maksimalnih vrednosti S_{21} parametara signala, zbog pojačanih efekata odbijenih talasa od magnetnog jezgra i njihovih difrakcija oko jezgra koji se superponiraju pri prijemu na davačima. S_{21} se smanjuje od 3,94 dB (1,57 puta) za signal na davaču 4 do 7,39 dB (2,34 puta) za signal na davaču 3 u zajedničkom opsegu učestanosti [675,75–849] MHz. Najmanja vrednost S_{11} parametra se zbog blizine jezgra predajnoj anteni znatno povećala za 21,70 dB (12,17 puta).

Sa slika 13a) i 12b) može da se vidi da za 4. model u odnosu na 3. model transformatora postoje značajna smanjena maksimalnih vrednosti S_{21} parametara signala, zbog pojačanih dejstava reflektovanih talasa od i njihovih difrakcija oko i kroz metalne delove NN trofaznog namotaja. S_{21} se smanjuje od 14,18 dB (5,12 puta) za signal na davaču 3 do 17,55 dB (7,54 puta) za signal na davaču 4 u zajedničkom opsegu učestanosti [653,25–849] MHz. Najmanja vrednost S_{11} parametra se zbog blizine diskova NN namotaja predajnoj anteni povećala za 8,96 dB (2,81 puta).



Slika 13. Parametar S_{11} za izvor parcijalnih pražnjenja i S_{21} parametri za prenos signala između izvora i UHF davača 1–4 za (a) 4. i (b) 5. model energetskog transformatora u Ansys HFSS-u

Sa slika 13b) i 13a) može da se vidi da za 5. model u odnosu na 4. model transformatora postoji manje smanjenje maksimalnih vrednosti S_{21} parametara signala 1, 2 i 4, zbog dejstva odbijenih talasa od i njihovih difrakcija oko i kroz metalne delove VN trofaznog namotaja. S_{21} se osetno smanjuje samo za signal na davaču 4 za 7,8 dB (2,45 puta), a za signal na davaču 3 se čak povećava za 0,379 dB (1,04 puta) u zajedničkom opsegu učestanosti [636,75–785,25] MHz. Najmanja vrednost S_{11} parametra je ostala približno ista, povećala se svega 1,02 puta.

III.2 SIMULACIJE ZASNOVANE NA MODELU U MATLAB-U

Što se tiče neposrednog širenja EM talasa od izvora parcijalnih pražnjenja do sva četiri UHF davača, bez dejstava odbijanja i difrakcija talasa, model u MATLAB-u sličan je prvom modelu u Ansys HFSS-u. Razlike su u pravljenju modela izvora i prijemnih davača.

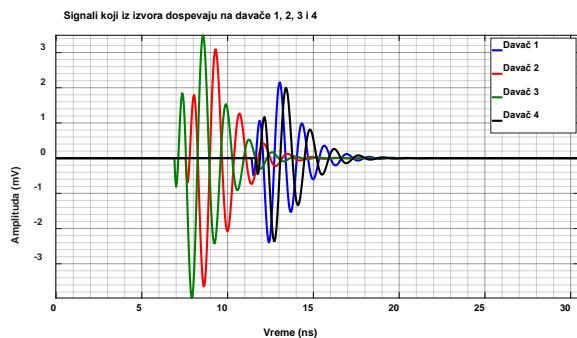
U modelu u MATLAB-u, pošto su izvor i davači tačkasti, a sud prazan i providan, na amplitude primljenih signala na davačima je uticalo samo njihovo slabljenje u ulju, a ne i položaji prijemnih antena prema predajnoj anteni kao u 1. modelu u Ansys HFSS-u. Prvo je procenjeno da antenski davač 2 u 1. modelu u Ansys HFSS-u ima najbolji prijem signala, amplitudu od -3,64 V, tj. da je za njega najmanji uticaj međusobnog položaja i usmeravanja u odnosu na predajnu antenu. Zatim je pretpostavljeno da i signal na tačkastom davaču 2 u modelu u MATLAB-u ima istu amplitudu i približno isti talasni oblik. Prema talasnom obliku signala na davaču 2 u Ansys HFSS-u, u simulacijama u MATLAB-u pretpostavljaju se dvostruko eksponencijalno opadajući oscilatori UHF signali, koji polaze od izvora parcijalnih pražnjenja, pri $t = 0$, ka odgovarajućim davačima 1–4, sa amplitudom napona $U_m = 63,69 \text{ mV}$ i odgovarajućim prosečnim učestanostima $f_j = (742,5; 711; 765; 708) \text{ MHz}$, kao što sledi u jednačini (1):

$$U_j(t) = A \cdot U_m \cdot \left(d_1 \cdot e^{-\frac{r_1 \cdot (t-T_j)}{\tau_1}} - d_2 \cdot e^{-\frac{r_2 \cdot (t-T_j)}{\tau_2}} \right) \cdot \sin(2\pi \cdot f_j \cdot 10^6 \cdot (t - T_j)) \quad (1)$$

gde je j oznaka za odgovarajući davač ($j = 1, 2, 3$ ili 4); A je srednji odnos gubitka napona od 0,8 po metru u mineralnom ulju u sudu transformatora, što odgovara slabljenju signala od -2 dB/m ; T_j je vreme za koje signal iz izvora stiže na davač j (gde je $t \geq T_j$); f_j je učestanost signala na davaču j ; konstante su $d_1 = 0,95$, $d_2 = 1,05$, $r_1 = 3,99$ i $r_2 = 3,79$; vremenske konstante opadanja su $\tau_1 = 4,35 \cdot 10^{-9} \text{ s}$ i $\tau_2 = 2,79 \cdot 10^{-9} \text{ s}$.

Na slici 14 prikazani su snimljeni izlazni signali na UHF davačima 1–4 u raznim bojama za uprošćeni model energetskog transformatora u MATLAB-u, koji je prethodno predstavljen na slici 4a). Na osnovu slika 6 i 14, grubo je procenjeno koliko su u 1. modelu u Ansys HFSS-u amplitude signala na davačima 1, 3 i 4 manje usled uticaja međusobnih položaja i usmeravanja ovih prijemnih antena u odnosu na predajnu antenu, u poređenju sa modelom u MATLAB-u gde tog uticaja nema. Tako je dobijeno da je smanjenje amplitude signala za davač 1 3,93 puta, za davač 3 1,69 puta, a za davač 4 1,47 puta. Ovi rezultati pokazuju da davač 1 ima najnepovoljniju orijentaciju i položaj u prostoru u

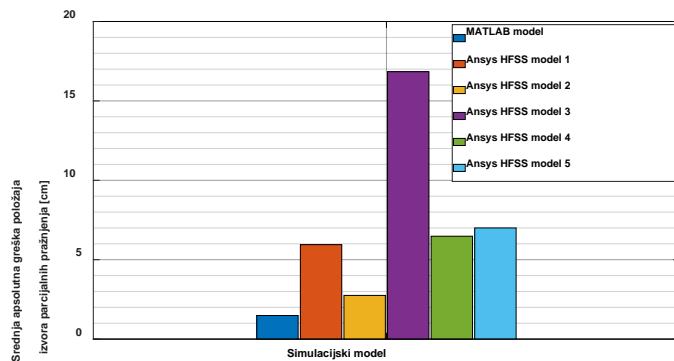
odnosu na izvor parcijalnih pražnjenja u Ansys HFSS modelima transformatora.



Slika 14. Različito obojeni izlazni signali na UHF davačima 1–4, postavljeni u uprošćenom modelu transformatora u MATLAB-u

IV POREĐENJA GREŠAKA U LOCIRANJU IZVORA PARCIJALNIH PRAŽNJEWA U RAZMATRANIM MODELIMA TRANSFORMATORA

Na slici 15 prikazane su srednje apsolutne greške položaja izvora parcijalnih pražnjenja za model u MATLAB-u i pet modela energetskog transformatora u Ansys HFSS-u.



Slika 15. Srednje apsolutne greške položaja izvora parcijalnih pražnjenja za MATLAB model modele transformatora u Ansys HFSS-u

Kao što se sa slike 15 vidi, najveća greška u položaju izvora je za treći model transformatora u Ansys HFSS-u. Ona je 2,83, 6,12, 2,6 i 2,41 put veća nego za 1., 2., 4. i 5. model transformatora u Ansys HFSS-u, respektivno, kao i 11,33 puta veća nego u MATLAB modelu. Može da se zaključi, da magnetno jezgro u 3. modelu u Ansys HFSS-u dovodi do najvećih grešaka među vremenima pristizanja signala do prijemnih antena u odnosu na sve ostale modele transformatora, i kada ima još više i kada ima još manje metalnih prepreka i kada su izvor i antene tačkasti.

Greška položaja izvora parcijalnih pražnjenja u modelu 1 u Ansys HFSS-u je 4 puta veća, zbog uticaja međusobnih usmerenja i položaja prijemnih antena u odnosu na predajnu antenu, nego u modelu u MATLAB-u. Greška položaja izvora u modelu 1 je 2,16 puta veća nego u modelu 2 u Ansys HFSS-u, uprkos dodatnom uticaju odbijenih talasa sa metalnih zidova suda na ukupne signale na prijemnim antenama, zbog povoljnijih

vrednosti vremenskih razlika u prispelosti signala na UHF davačima 1–4. Vidi se da je trofazni VN namotaj uticao na povećanje greške položaja izvora za 1,08 puta u 5. modelu u odnosu na 4. model u Ansys HFSS-u.

V ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada bio je da se ispita:

- 1) konstrukcija energetskog transformatora koja utiče na odbijanja, difrakcije, a time i slabljenje i izobličenje talasa parcijalnih pražnjenja koji dospevaju na UHF davač;
- 2) nesavršene orientacije i položaji prijemnih antena u odnosu na predajnik (izvor), koji utiču na dodatna slabljenja EM talasnih oblika parcijalnih pražnjenja primljenih na UHF davačima u modelima transformatora u Ansys HFSS-u, jer nije moguće ravnomerno dobro da se usmeri predajnik ka svakoj od četiri prijemne antene tako da primljeni signali na ovim antenama imaju optimalnu jačinu; i
- 3) kombinacija svih ovih činilaca, koji utiču na tačnost određivanja mesta izvora parcijalnih pražnjenja.

Zbog svih ovih činilaca trebalo je da se, u modelima transformatora u Ansys HFSS-u, analiziraju: (1) kašnjenja i vrednosti prvih vrhova signala na davačima 1–4, (2) amplitude prvih paketa signala na UHF davačima 1–4, (3) S_{11} parametar refleksije za izvor parcijalnih pražnjenja i (4) S_{21} parametri za prenos signala između izvora i UHF davača 1–4. Što se tiče tumačenja ili procene stanja električne izolacije usled pojave parcijalnih pražnjenja, može da se zaključi da prikazani rezultujući signali na UHF davačima mogu da budu dodatno oslabljeni kada se koristi tipični Ansys HFSS model, najpričiniji stvarnoj konstrukciji transformatora, jer je izvor parcijalnih pražnjenja modelovan kao antena, a ne kao tačka sa ujednačenim UHF EM zračenjem u svim pravcima u odnosu na stvarno stanje koje bi moglo da nastane u transformatoru pri radu u postrojenju. Međutim, ako se odredi i mesto izvora parcijalnih pražnjenja, slabljenja primljenih signala na davačima mogu da se preciznije procene korišćenjem MATLAB simulacije za uprošćeni model transformatora.

Stvarna merenja na energetskom transformatoru sa istim osobinama nisu bila na raspolaganju za vrednovanje simulacija u ovom radu. Za izvođenje ovakvih eksperimenata na stvarnom energetskom transformatoru, veštački izvor mora biti generator impulsa velike snage ili antena koje je teško privremeno postaviti u namotaje zbog njihove složene čvrste strukture i mineralnog ulja u sudu. Pored toga, UHF davači bi bili u fiksnim pozicijama i ne bi mogli da budu usklađeni sa odgovarajućim pravcima najjačih EM talasa.

Za razliku od Ansys HFSS simulacija, u realnom energetskom transformatoru na terenu, iako je izvor parcijalnih pražnjenja tačkasti izvor sa ujednačenim zračenjem u svim pravcima, njegov položaj i tip nisu unapred poznati. Zbog toga su simulacije odličan način da se istražuju oblici, amplitude prvih vrhova i amplitude prvih paketa i slabljenja signala parcijalnih pražnjenja, i odredi položaj njihovog izvora, za različito postavljene UHF davače i prepostavljeni izvor u modelu energetskog transformatora, jer bi to bilo teško da se uradi na stvarnom energetskom transformatoru u postrojenju ili oglednom transformatoru u laboratoriji.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Dukanac, Đ. Otkrivanje i analiza signala parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru UHF metodom, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 22, No. 1-2, pp. 96-101, 2020. <https://doi.org/10.46793/EEE20-1-2.096D>
- [2] Dukanac, D. Analysis of partial discharge signal detected by the UHF sensor in the power transformer, in Proc. *3rd CIGRE SEERC Online-Conference*, Vienna, Austria, pp. 1-9, paper no. 1189, 30 November, 2021.
- [3] Dukanac, D. Extraction of partial discharge signal in predominant VHF range in the presence of strong noise in power transformer, *Electrical Engineering*, Vol. 105, No. 5, pp. 3001-3018, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00202-023-01855-x>
- [4] Dukanac, D. Application of UHF Method for Partial Discharge Source Location in Power Transformers, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 25, No. 6, pp. 2266-2278, 2018. <https://doi.org/10.1109/TDEI.2018.006996>
- [5] Dukanac, Đ. Lociranje parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru primenom UHF tehnike, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 2, pp. 73-78, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-2.73D>
- [6] Beura, C. P., Bettle, M., Tenbohlen S. Positioning of UHF PD Sensors on Power Transformers Based on the Attenuation of UHF Signals, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 34, No. 4, pp. 1520-1529, 2019. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2909588>
- [7] Jangjoo, M.A., Allahbakhshi, M., Mirzaei, H.R. UHF sensors positioning on the power transformer tank to enhance the partial discharge localization accuracy, *Electric Power Systems Research*, Vol. 218, Article 109174, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109174>
- [8] Umemoto, T., Tenbohlen, S. Novel Simulation Technique of Electromagnetic Wave Propagation in the Ultra High Frequency Range within Power Transformers, *Sensors*, Vol. 18, No. 12, pp. 4236, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18124236>
- [9] Xu, B., Li, Y., Zhao, J., Wang, X., Zhang, R. Simulation of propagation characteristic of ultra high frequency signals in power transformers using finite difference time domain method, in Proc. *5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT)*, Changsha, China, pp. 1591-1594, 26-29 November 2015.
- [10] Shirdel, N., Akbari, A., Mirzaei, H.R., Abrishamian, M.S. Three-Dimensional Simulation of UHF Signal Propagation in Transformer using FDTD Method, in Proc. *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, Torremolinos (Málaga), Spain, pp. 1-6, 11-13 May 2011. <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2011.6036463>
- [11] Nobrega, L. A. M. M., Costa, E. G., Serres, A. J. R., Xavier, G. V. R., Aquino, M. V. D. UHF Partial Discharge Location in Power Transformers via Solution of the Maxwell Equations in a Computational Environment, *Sensors*, Vol. 19, No. 15, pp. 3435-3448, 2019. <https://doi.org/10.3390/s19153435>
- [12] Liu, M., Li, Y., Zhou, Q., Yan, N., Zou, J. Study of EM Wave Propagation for Transformer PD Monitoring Using FDTD Method, *Advanced Materials Research*, Vol. 614/615, pp. 1153-1157, 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.614-615.1153>
- [13] Dukanac, D. Determination of the Location of Partial Discharges in the Power Transformer Model Using UHF Sensors, in Proc. *4th CIGRE SEERC Conference*, Istanbul, Türkiye, pp. 192-202, Art. ID: 87, 11-12 October 2023.
- [14] Dukanac, Đ. Power Transformer Numerical Modelling to Locate Partial Discharge Source Using the UHF Technique, *B&H Electrical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 24-31, 2023. <https://sciendo.com/pl/article/10.2478/bhee-2023-0009> [pristupljeno 06.03.2024]
- [15] Dukanac, Đ. Analiza uticaja aktivnih delova energetskog transformatora na prostiranje signala od izvora parcijalnih pražnjenja ka UHF davačima, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 74-80, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.74D>
- [16] Dukanac, Đ. Numeričko modelovanje energetskih transformatora u svrhu procene mesta parcijalnih pražnjenja UHF metodom, in Proc. *16. savjetovanje BH K/O CIGRE*, Neum, Bosna i Hercegovina, strane 1-10, R.A2.01., 22-25.10.2023.

AUTOR/AUTHOR

Dorde Dukanac – doktor elektrotehnike i računarstva, Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd, djordje.dukanac@ems.rs, ORCID [0000-0002-1090-3129](https://orcid.org/0000-0002-1090-3129)

Influences of Reflections and Diffractions of Waves and the Modelled Source and UHF Sensors When Locating Partial Discharges in a Power Transformer

Abstract – In this paper, the propagation of ultra-high frequency (UHF) electromagnetic (EM) waves and the determination of the location of partial discharges (PDs) in the power transformer were analysed in detail using six simulation models of the power transformer filled with mineral oil. Five models of varying complexity were tested in Ansys HFSS and one simplified model in MATLAB. Based on the results of their comparison, appropriate conclusions were drawn. Various factors were taken into account in the models in Ansys HFSS, including the number and type of transformer components present. These factors were 1) wave reflections from the steel tank, 2) wave reflections from and diffractions around the magnetic core, 3) wave reflections from and diffractions around and through the three-phase windings, and 4) mutual positions and orientations of the receiving antennas to the transmitting antenna. They affected: a) the distortions, values and delays of the first peaks, and b) the amplitudes of the first signal packets at the four UHF sensors placed differently, in relation to the imaginary model when the tank of the power transformer is transparent. Dipole antennas were used for the PD source and UHF sensors. In the MATLAB model, the source is a point, while the sensors are represented by their phase centres. Using the model in MATLAB, the influence of imperfect mutual positions and spatially non-symmetrical total gain diagrams of the transmitting antenna and receiving antennas in the models in Ansys HFSS, in terms of additional attenuation of the received signals at the sensors, was evaluated. The dimensions of the tank and the position of the PD source and UHF sensors in the models in Ansys HFSS were the same as those in the MATLAB model.

Index terms – Partial discharges (PDs), Signal propagation, Power transformer, Ultra-high frequency (UHF) sensor, First peak, Source location

Primena i realizacija Ćukovog DC/DC energetskog pretvarača u praćenju tačke maksimalne snage solarnog panela

Željko V. Despotović, Boban Đorđević

Institut „Mihajlo Pupin“, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

Rezime - U radu je prikazana jedna moguća realizacija sistema solarni panel-Ćukov DC/DC energetski pretvarač sa implementacijom algoritma praćenja tačke maksimalne snage solarnog panela. Solarni panel se odlikuje izrazito nelinearnom I-U karakteristikom, dok se Ćukov DC/DC energetski pretvarač odlikuje širokim opsegom promene ulaznog napona. Iz ovih razloga sprega ova dva podistema se pokazala kao zadovoljavajuće rešenje u „Off-Grid“ solarnim sistemima napajanja. U radu su predstavljene ključne karakteristike sistema kao i rezultati testiranja dobijeni pri različitim opterećenjima.

Ključne reči - Energetski pretvarač, obnovljivi izvori energije, DC/DC napajanje, Ćuk pretvarač, solarni panel

I UVOD

Porast potreba za električnom energijom je u mnogome uslovjen rastom industrijskog razvoja, a samim tim i porastom populacije. Ovaj oblik energije je jako pogodan, jer se lako može konvertovati u druge oblike (najčešće mehaničku), u zavisnosti od uređaja koji je koriste: u kućni aparati, domaćinstva, velike mašine i industrijska postrojenja. Ova energija se takođe može koristiti za pokretanje električnih motora u vozilima. Na osnovu ovoga može se konstatovati da je moderni svet u stvari usko povezan sa upotrebom električne energije.

Fosilna goriva, pre svega ugalj, su jedan od izvora koji omogućavaju proizvodnju električne energije. Fosilni izvori pružaju stabilnost elektroenergetskom sistemu, ali uz porast količine električne energije koja je potrebna za zadovoljavanje današnjih potreba stanovništva, negativan uticaj ovih izvora energije na okolinu se više postaje dominantan. Dodatno, poznato je da su ovi izvori neobnovljivi, tako da u ne tako dalekoj budućnosti, će biti prisutan scenario u kome dobijanje električne energije iz ovih izvora više neće biti prihvatljiva opcija.

Budućnost čovečanstva povezana je sa optimalnim korišćenjem resursa. Ako govorimo o obnovljivim izvorima energije (OIE), u pitanju je efikasno dobijanje električne energije iz ovih izvora i smanjenje gubitaka pri konverziji.

Solarna energija je, kao jedan od bitnih OIE, jako pogodna zbog brojnih prednosti koje nudi: čist oblik energije, dostupna svima, solarni paneli koji pretvaraju svetlosnu energiju u električnu rade bez buke i bez emisija, dok je njihovo održavanje jednostavno i što je takođe bitno, njihov životni vek relativno dug.

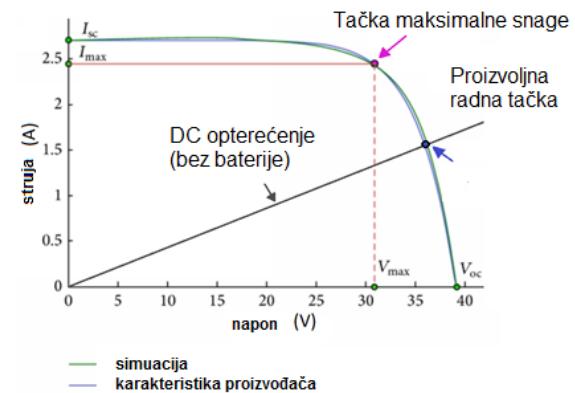
Najveći eksploatacionalni problem solarnih panela je njihova efikasnost. Solarni paneli koji su trenutno dostupni imaju

efikasnost između 13 % i 18 %. To je glavni razlog zbog kojeg su potrebni DC/DC energetski pretvarači koji imaju relativno visoku energetsку efikasnost, kao i MPPT algoritmi koji bi omogućili maksimalno iskorišćenje snage koju panel može da pruži [1-2]. U suprotnom, bez obzira na to što je solarna energija dostupna svima, što solarni paneli rade bez emisije i buke, investicije u solarne elektrane ne bi bile isplativo.

Iz tog razloga je proistekla motivacija za istraživanjem u ovom radu. Tema ovog rada je projektovanje uređaja koji ima dovoljno visoku energetsku efikasnost i koji uz implementaciju odgovarajućeg algoritma praćenja tačke maksimalne snage solarnog panela (tzv. „Maximum Power Point Tracking - MPPT) može na optimalan način iskoristiti snagu koju solarni panel može da obezbedi.

II EKSPLOATACIONE KARAKTERISTIKE PV PANELA I MPPT ALGORITMI

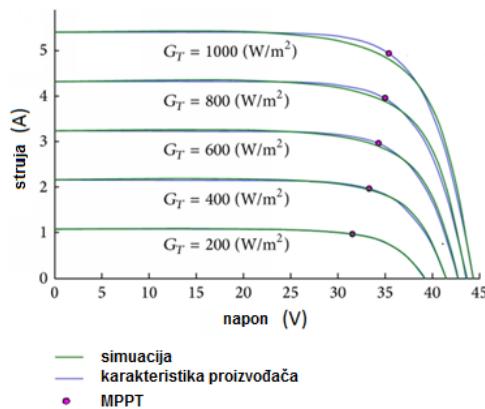
Solarni panel ili niz solarnih panela koji su izloženi sunčevom zračenju odgovarajućeg intenziteta ima strujno-naponsku karakteristiku (I-U) kao što je prikazano na Slici 1. Na grafiku se može uočiti jedinstvena tačka koja se naziva tačkom maksimalne snage, MPP (eng. „Maximum Power Point“). Kada se radna tačka niza panela nalazi u ovoj tački, ili u njenoj neposrednoj blizini, tada sistem radi sa najvećom efikasnošću i isporučuje maksimalnu snagu potrošaču [3-6].



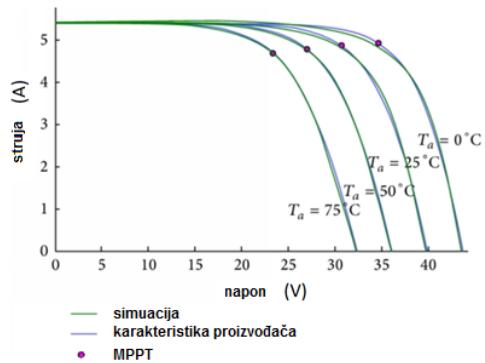
Slika 1. MPPT karakteristika tipičnog PV panela (simulaciona i realna karakteristika)

Ukoliko se na niz solarnih panela direktno poveže opterećenje, radna tačka niza biće u preseku krivih koje predstavljaju karakteristiku niza i karakteristiku opterećenja, kao što je prikazano na Slici 1.

U opštem slučaju, radna tačka niza solarnih panela, u ovakvom sistemu, ne poklapa se sa tačkom maksimalne snage. Posledica ovoga je upotreba dodatnih solarnih panela, ili niza solarnih panela, kako bi se opterećenju isporučila neophodna snaga. Kako bi se izbegli dodatni troškovi, rešenje ovog problema nalazi se u upotrebi energetskog DC/DC pretvarača (MPPT regulatora), koji se postavlja između sistema solarnih panela i opterećenja, a koji obezbeđuju da se radna tačka solarnih panela uvek nalazi u blizini tačke maksimalne snage. Ovi regulatori koriste neki od MPPT algoritama [1-3], kako bi obezbedili efikasno prenošenje snage od panela do opterećenja. Ukoliko se uspešno implementira, MPPT regulator uspeva da približi radnu tačku solarnog panela tački maksimalne snage. Tačka maksimalne snage nije prethodno poznata. Situaciju dodatno komplikuje činjenica da ona zavisi od intenziteta sunčevog zračenja, odnosno insolacije izražene u $[W/m^2]$, kao i od temperature kojima su solarni paneli izloženi. Ove vrednosti se menjaju u toku dana. Dodatno, treba imati u vidu da se pomenute vrednosti menjaju i tokom godine. Tako na primer, u zimskom periodu su temperature niže, a nagibni ugao Zemljine ose je pod drugačijim uglom, te je i intenzitet sunčevog zračenja slabiji. U letnjem periodu su temperature više, nagibni ugao je veći, a i intenzitet sunčevog zračenja je veći.



Slika 2. I-U karakteristike tipičnog PV panela (familija karakteristika u zavisnosti od intenziteta sunčevog G [W/m^2] kao parametra)

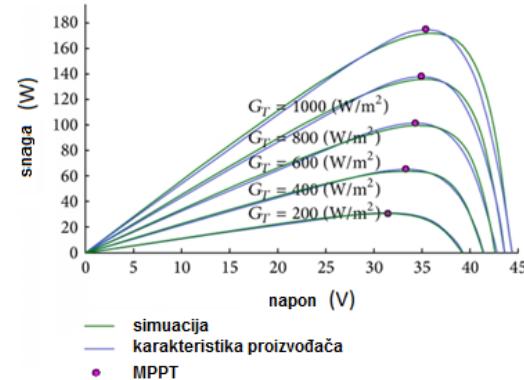


Slika 3. I-U karakteristike tipičnog PV panela (familija karakteristika u zavisnosti od temperature kao parametra)

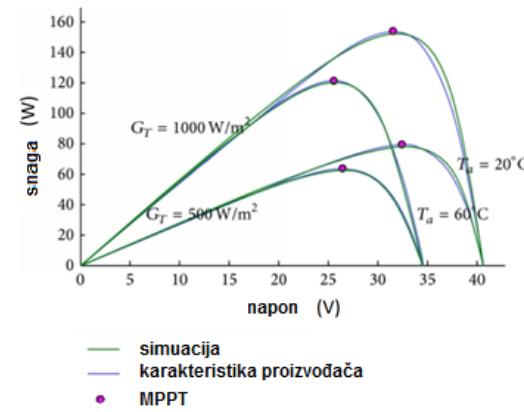
Na Slikama 2 i 3 su prikazane tipične familije I-U karakteristika u zavisnosti od intenziteta sunčevog zračenja i temperature,

respektivno. Takođe na ovim familijama su označene MPPT radne tačke.

Na Slikama 4 i 5 su prikazane tipične familije karakteristika snage P/U u zavisnosti od intenziteta sunčevog zračenja i temperature, respektivno. Takođe, na ovim familijama su označene MPPT radne tačke. Za praktičnu primenu i implementaciju u DC/DC naponskih i strujnih regulatora od ključnog interesa je karakteristika P/U prikazana na Slici 5.



Slika 4. P/U karakteristike tipičnog PV panela (u zavisnosti od intenziteta G [W/m^2] kao parametra)



Slika 5. P/U karakteristike tipičnog PV panela (u zavisnosti od dva parametra: intenziteta i temperature)

Trenutno, postoji nekoliko popularnih i primenljivih MPPT algoritama koji se koriste za praćenje tačke maksimalne snage [7-13]. Zbog implementacije i jednostavnog hardvera koji zahtevaju, u ovom poglavlju su razmatrane sledeće metode:

- „Perturb and Observe“ algoritam (P&O)
- „Incremental conductance“ algoritam (INC)

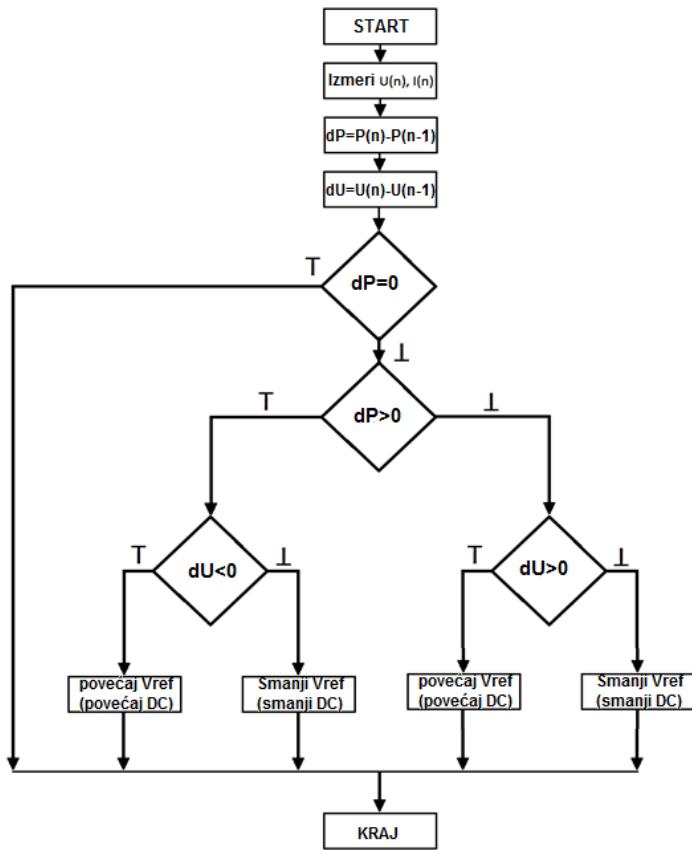
Oba algoritma spadaju u grupu koja određuje MPP tako što se „penju“ uz P/U krivu. Mana navedenih algoritama je to što ove metode ne mogu da uvek da „pogode“ MPP tačku, već krenu da osciluju oko nje. U ovim slučajevima realna MPP tačka vrlo blizu teorijske [14-15].

P&O algoritam se najčešće koristi u praksi zbog jednostavne implementacije. Prema Slici 4 se uočava da različitim intenzitima sunčevog (pri konstantnoj temperaturi) odgovaraju različite MPP

tačke. Princip rada ovog algoritma u kontekstu primene DC/DC energetskog pretvarača je sledeći: neka se u početnom stanju trenutna radna tačka na grafiku nalazi levo u odnosu na MPP. U trenutnom stanju, zapamte se vrednosti snage panela $P(n)$ i radnog napona panela $U(n)$. Izvrši se perturbacija radnog napona panela, preko promene referentnog napona, odnosno preko koeficijenta radnog režima („duty cycle“) DC/DC regulatora. U novom stanju, izmeri se trenutna snaga $P(n+1)$ pri novom radnom naponu $U(n+1)$. Na osnovu ovih vrednosti, vrši se proračun promene snage $\Delta P = P(n+1) - P(n)$.

Ukoliko je priraštaj snage pozitivan (znači da se radna tačka panela pomerila ka MPP tački), tada je potrebno obaviti perturbaciju u istom smeru, tako što se nastavlja sa porastom (inkrementiranjem) referentnog napona, odnosno koeficijenta radnog režima pretvarača, tzv. parametra „duty cycle“.

Ukoliko se ustanovi da je priraštaj snage bio negativan, a to znači da se radna tačka panela udaljila od MPPT tačke, tada je u sledećoj iteraciji potrebno promeniti smer perturbacije. Ukoliko je referentni napon, ili „duty cycle“ parametar bio inkrementiran, potrebno ga je smanjiti. Ukoliko je referentni napon ili „duty cycle“ parametar bio dekrementiran, potrebno ga je uvećati. Za konkretnu informaciju o smeru, pored promene snage panela, potrebno je pratiti i promenu radnog napona panela, kao što se vidi na dijagramu toka algoritma, koji je dat na Slici 6 [13].



Slika 6. Principski dijagram toka P&O algoritma

Iako se jednostavno implementira, mane ovog algoritma su ograničenja koja utiču na efikasnost pri pronalaženju MPPT tačke. Prvo takvo ograničenje se može uočiti na karakteristikama sa Slika 4 i 5. Pri manjem intenzitetu sunčevog zračenja,

karakteristika P/U postaje ravnija. Ovo znači da će se za veću promenu radnog napona solarnog panela, detektovati jako mala promena snage panela. Drugo ograničenje potiče od algoritma, jer je jako teško utvrditi da li je „pogođena“ tačka MPP. Umesto toga, doći će do oscilovanja radne tačke oko MPP tačke, uz promenu znaka perturbacije nakon svakog izmerenog priraštaja snage. Ovaj problem je najizraženiji u oblačnim danima, kada se oblaci pomeraju i uzrokuju da se intenzitet svetlosti koja dolazi do panela, neprestano menja.

Jedan predložen dodatak ovom algoritmu bila bi funkcija čekanja, koja bi se aktivirala, ukoliko bi se detektovala uzastopna promena znaka perturbacije, što bi bio indikator da je dostignuta MPP tačka. Ovo bi smanjilo oscilacije oko MPP tačke, ali bi zato usporilo algoritam i dodatno pogoršalo stanje u oblačnim danima.

Dруги предложен додатак би био памћење стања. Потребно је запамтити пар (U_1, P_1) , затим пар након пертурбације (U_2, P_2) и након тога поново подесити радни напон соларног панела на вредност U_1 , како би се измерила снага панела P_x . Поредењем P_x са P_1 , се лако може закљућити да ли се менја интензитет зрачења. Ово поново успорава алгоритам, захтева памћење претходних стања и повећава комплексност алгоритма.

Метод инкременталне кондуктансе (INC) се заснива на проналаženju таčке максимума криве на основу одређивања извода карактеристике криве P/U :

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(UI)}{dU} = I + U \frac{dI}{dU} = 0 \quad (1)$$

Далјим извођењем се добија:

$$-\frac{I}{U} = \frac{dI}{dU} \quad (2)$$

Iraz sa leve стране jednakosti представља suprotnu по знаку вредност тренутне кондуктансе соларних панела. Са десне стране jednakosti, налази се инкрементална кондуктанса. У MPP таčki, ова два израза морају имати исти интензитет, само suprotan znak. Уколико се радна таčka система не поклапа са MPP таčkom, могуће је извести сет једначина (3)-(5), које одређују да ли је тренутни радни напон система панела изнад или испод радног напона MPP таčke:

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U}; \left(\frac{dP}{dU} = 0 \right) \quad (3)$$

$$\frac{dI}{dU} > -\frac{I}{U}; \left(\frac{dP}{dU} > 0 \right) \quad (4)$$

$$\frac{dI}{dU} < -\frac{I}{U}; \left(\frac{dP}{dU} < 0 \right) \quad (5)$$

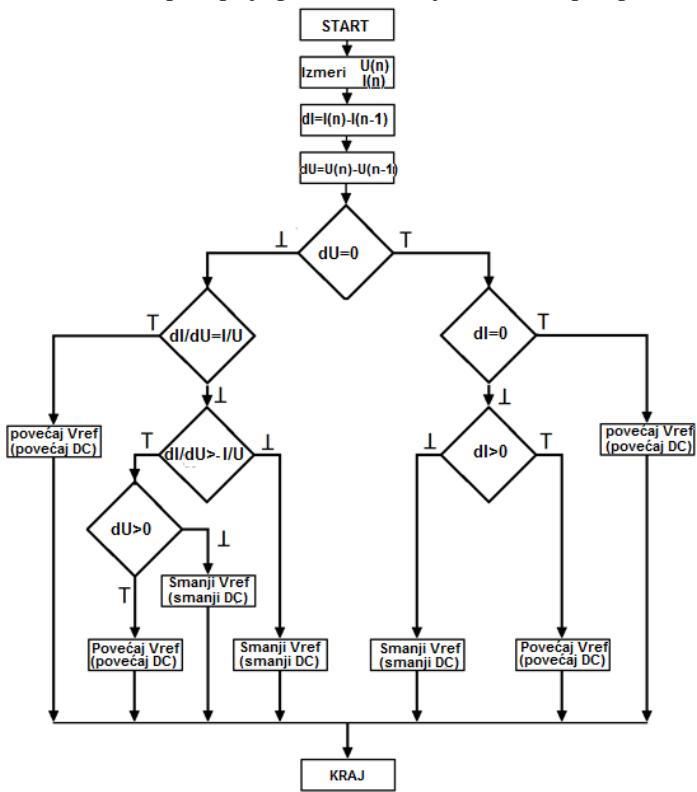
Једначина (2) и (3)-(5) služe као показателј кога знака би пертурбација требало да буде, како би се радна таčka система померила ка MPP таčki. Кораке је потребно понављати, све док једначина (2) не буде задовољена. Уколико се радна таčka поклапа са MPP таčkom, систем наставља да ради без пертурбације, све док се не промени интензитет sunčevog zračenja, што ће изазвати промену струје панела.

На основу карактеристика на Slici 5, закљуčује се да ће повећани интензитет зрачења имати за последицу померање MPP таčke у десно. Ово зnači da bi требало повеćati радни напон панела, како

bi se pomerili ka MPP tački. Ukoliko se, pak, intenzitet smanji, to će rezultirati pomeranjem MPP tačke u levo, pa će biti potrebno smanjiti radni napon panela [13].

Na Slici 7 je prikazan dijagram toka INC algoritma. Trenutne i prethodne vrednosti struja i napona se koriste pri proračunu dI i dU . Pri ovome mogu nastupiti tri karakteristična slučaja:

- ako su obe promene dI i dU jednake nuli, atmosferski uslovi se nisu promenili i radna tačka je i dalje u MPP tački;
- ako je $dU=0$, a $dI>0$, došlo je do povećanja intenziteta sunčevog zračenja, što rezultira pomeranjem MPP tačke u desno, a samim tim i povećanjem radnog napona panela;
- ako je $dU=0$, a $dI<0$, intenzitet se smanjio, a sa njim i MPP napon, pa je potrebno smanjiti i radni napon panela.



Slika 7. Principski dijagram toka INC algoritma

Ukoliko postoje promene u struci i naponu panela, onda se na osnovu jednačina (4) i (5) može odrediti smer u kome je potrebno napraviti perturbaciju, kako bi se radna tačka približila MPP tački. Ukoliko važi jednačina (4), to znači da je radna tačka sistema sa leve strane MPP tačke, pa je potrebno povećati radni napon sistema panela. Ukoliko važi jednačina (5), radna tačka sistema je sa desne strane MPP tačke, pa je potrebno smanjiti radni napon sistema panela.

Ovo je suštinska prednost INC algoritma u odnosu na P&O algoritam, jer INC algoritam daje tačnu informaciju u kom smeru je potrebno napraviti perturbaciju, kako bi se radna tačka približila MPP tački. Dodatno, INC algoritam, za razliku od P&O algoritma, može da zaključi da se radna tačka sistema nalazi u MPP. Dodatno, u promenljivim atmosferskim uslovima, INC algoritam ne može da ode u pogrešnom smeru, kao što je to slučaj kod P&O algoritma. Iz ovog razloga je ovaj algoritam

usvojen za dalju razradu i praktičnu hardversku i softversku implementaciju u PV sistemu baziranom na Čukovom DC/DC energetskom pretvaraču. U nastavku je da detaljniji opis implementacije ovog pretvarača u solarnom sistemu sa praćenjem tačke maksimalne snage PV panela.

III TEHNIČKI OPIS REALIZOVANOG ENERGETSKOG PRETVARAČA

Topologija DC/DC koja je implementirana u MPPT solarnom sistemu je bazirana na Čukovom DC/DC pretvaraču. Električna šema realizovanog DC/DC pretvarača je data na Slici 8. Energetski pretvarač se sastoji od dva kalemata L1A i L1B, od kojih se prvi nalazi na ulazu, a drugi na izlazu energetskog pretvarača, zatim kondenzatora u paralelnoj sprezi CS-IN1...5 koji služe za transfer energije i dva prekidačka elementa, MOSFET tranzistora M i prekidačke ultrabrzne diode D.

Pošto se prekidački MOSFET M nalazi u analognom (energetskom) delu kola, potrebno je pobudno (dravversko) kolo, koje će obezbediti galvansku izolaciju između gejta MOSFET prekidača i digitalnog upravljačkog sklopa. U okviru projekta energetskog pretvarača je predviđeno standardno pobudno kolo IR2100 proizvodnje International Rectifier-IRF (videti električnu šemu na Slici 11). Ovom kolu je potrebno obezbediti analogno napajanje od 10 V, kako bi se obezbedilo efikasno uključenje i isključenje prekidačkog tranzistora preko PWM porta označenog sa M1PWM na električnoj šemi na Slici 8.

Senzor za merenje intenziteta ulazne i izlazne struje energetskog pretvarača je ACS712 (2 kom.). Ovaj senzor radi na principu Holovog efekta. Dobra osobina ovog senzora je izuzetno niska ulazna otpornost, što omogućava merenje struje, u oba smera, u opsegu 0 ± 20 A. Na svom izlazu, koji je opet galvanski odvojen od struje koju meri, senzor daje izlazni napon, sa korakom od 100 mV/1A. Pri ulaznoj struci od 0 A, izlaz senzora je 2,5 V. Ukoliko struja raste u pozitivnom smeru, raste i napon na izlazu senzora uz definisani korak, u odnosu na 2,5 V.

Ukoliko struja raste u negativnom smeru, napon na izlazu senzora opada u odnosu na referentnu vrednost od $V_{ref}=2,5$ V. Potrebno je obezbediti napajanje od 5 V za funkcionisanje senzora. Isti tip senzora se nalazi na ulazu i izlazu energetskog pretvarača, kako bi se merile ulazna i izlazna struja. Dodatno, na izlazu pretvarača je predviđeno rele RL1, koje će, ako su ispunjeni odgovarajući uslovi, prespojiti izlaz energetskog pretvarača sa baterijom. Uključivanjem i isključivanjem releja RL1, upravlja mikrokontroler koji upravlja radom pretvarača.

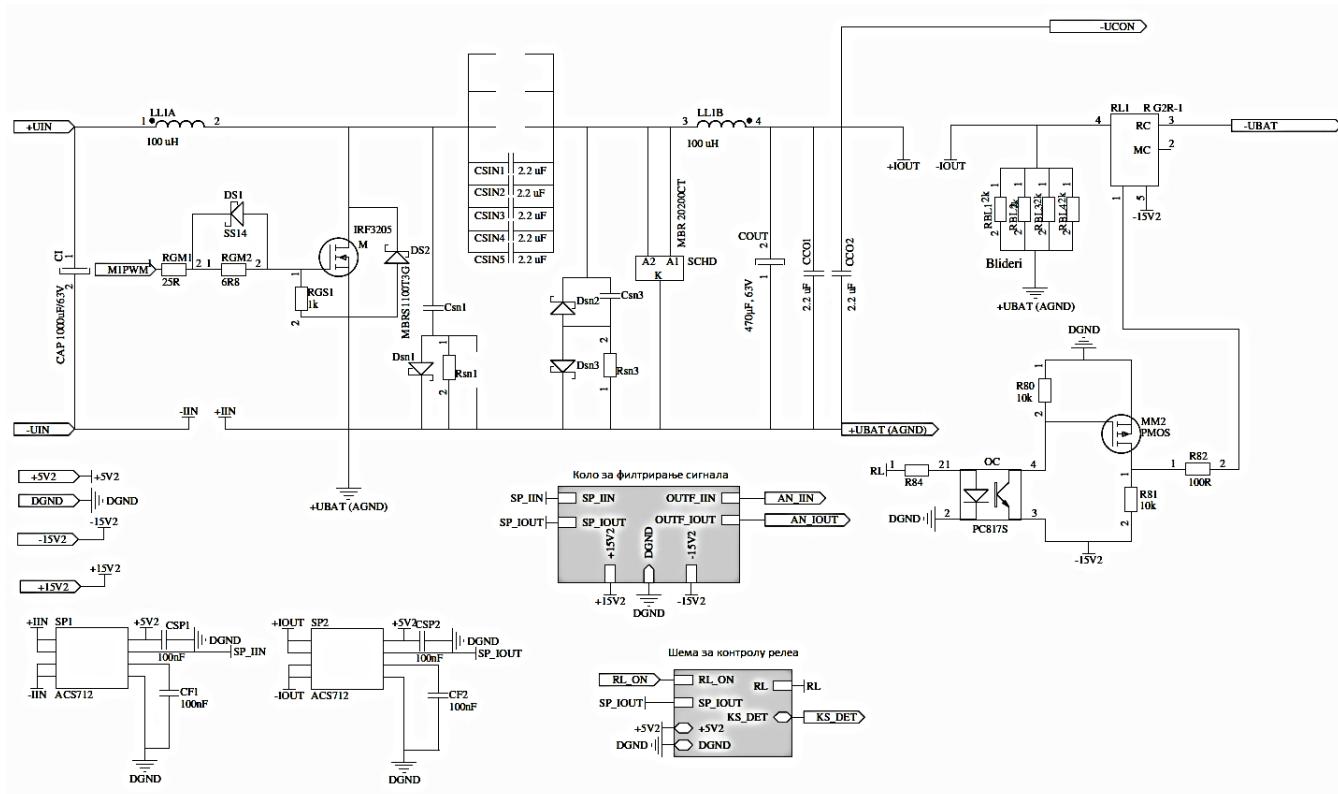
Senzori za merenje struja su zbog svog dizajna obezbeđuju galvansko odvajanje od energetskog dela kola. U okviru kola za filtriranje, izlazi senzora struja se samo propuštaju kroz filtre koji ublažavaju brze promene signala, u odnosu na očekivano sporije promene struja.

Kada su merenja napona u pitanju, svaki od signala „-UCON“, „-UBAT“ i „UIN“ se vodi (preko odgovarajućeg naponskog razdelnika) na izolacioni operacioni pojačavač HCPL7840 (na izlaz svakog HCPL7840 kola se povezuju kola sa operacionim pojačavačima, čija je namena pojačanje signala).

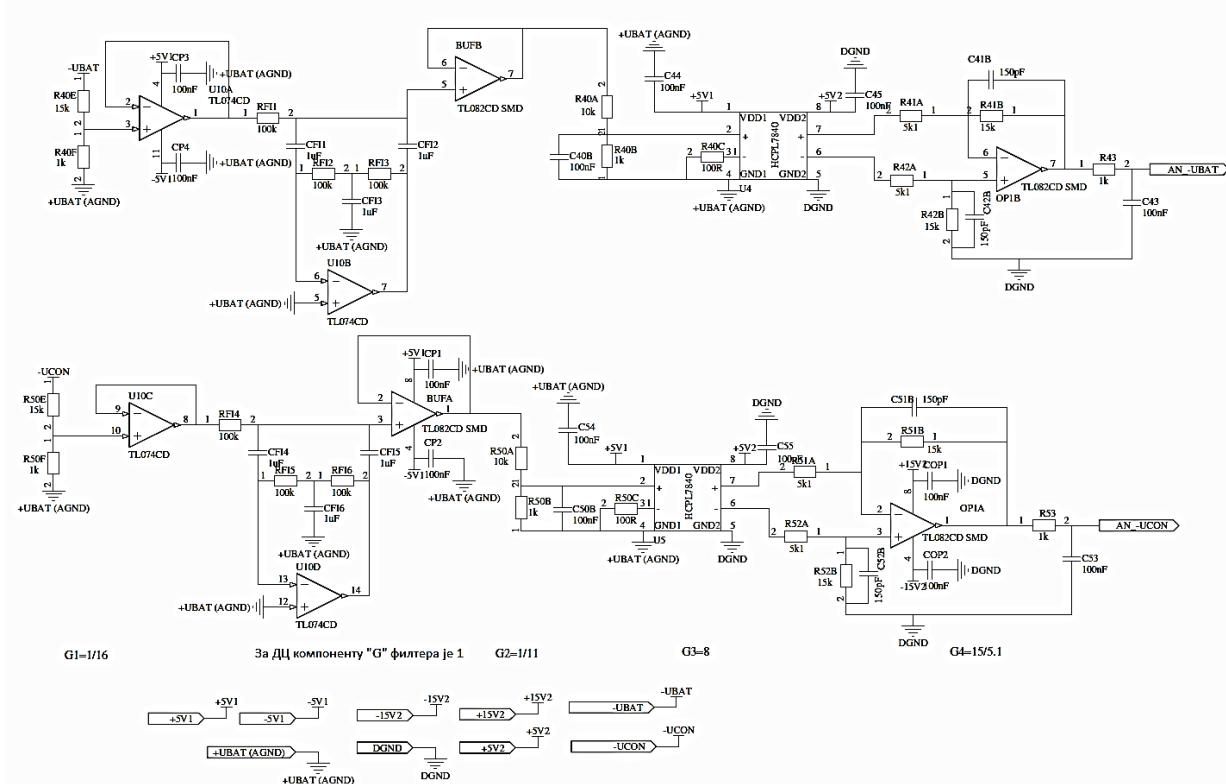
Električna šema mernog kola je data na Slici 9. Ovo kolo galvanski odvaja merene napone od veličina koje će biti njihovi

predstavnici koji se dalje vode ka ulazima za merenje na mikrokontroleru. Na ovaj način je, uz razdvojeno napajanje,

obezbeđeno potpuno galvansko razdvajanje kola za upravljanje (digitalni deo) od energetskog kola (analogni deo).

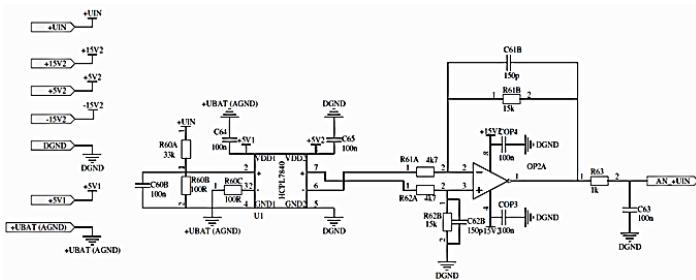


Slika 8. Električna šema realizovanog DC/DC Čukovog energetskog pretvarača



Slika 9. Električna šema za merenje napona baterije i izlaznog napona

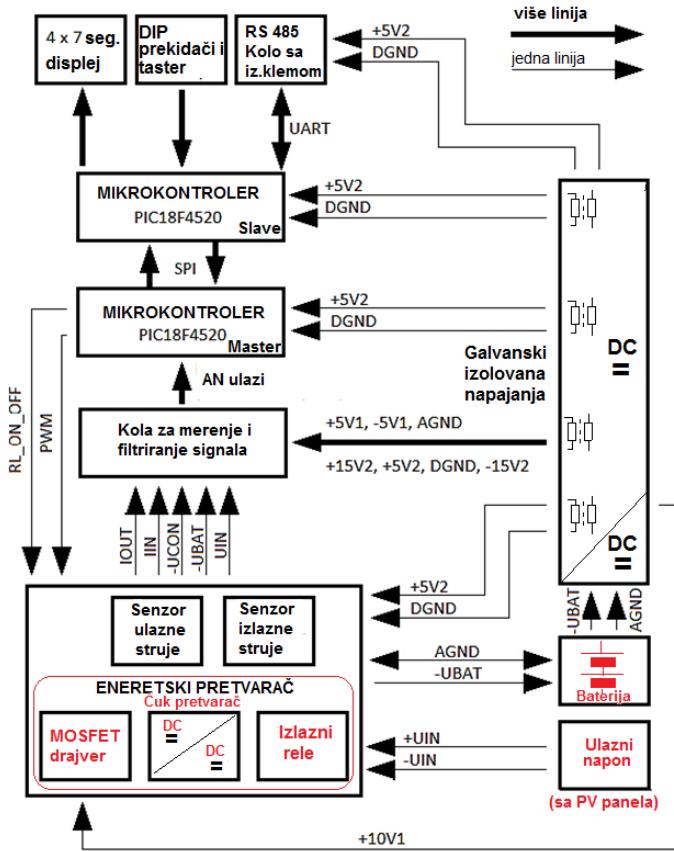
Električna šema koja se koristi kod merenja ulaznog napona energetskog pretvarača je data na Slici 10.



Slika 10. Električna šema za merenje ulaznog napona

IV UPRAVLJAČKI SISTEM

Upravljanje radom celokupnog uređaja realizovano je preko mikrokontrolera PIC18F4520 firme Microchip, u daljem tekstu MASTER kontroler. Konkretni mikrokontroler je izabran zbog jake dobrog odnosa cena/performanse, kao i zbog periferija koje poseduje. Blok šema upravljanja sistemom je data na Slici 11. Električna šema mikrokontrolerske ploče i drajverskog dela prekidačkog MOSFET-a je data na Slici 12.



Slika 11. Blok šema upravljačkog dela sistema

Periferije potrebne za realizaciju uređaja su: (1) Analogni ulazi za AD konverziju, (2) PWM izlaz, (3) SPI port, (4) UART port, (5) digitalni ulazno-izlazni portovi. Premda ima samo jedan AD konvertor, ovaj mikrokontroler ima mogućnost multipleksiranja analognih ulaza. Potrebno je samo pri svakom merenju obezbediti informaciju sa kog kanala se prosleđuje signal. Od

mogućih trinaest kanala, upotrebljeno je pet kanala ovog mikrokontrolera

MASTER mikrokontroler ima ugrađene PWM izlaze (impulsno širinska modulacija), čiji je rad automatizovan. Uloga korisnika je da ih podesi pri inicijalizaciji uređaja i da po potrebi (preko odgovarajućeg registra) menja dužinu trajanja impulsa („duty cycle“), preko kojeg se vrši upravljanje.

Dok upravlja radom uređaja, MASTER kontroler povremeno šalje informacije o stanju uređaja SLAVE kontroleru, preko SPI porta. Istovremeno, zbog prirode SPI komunikacije, može da dobija informacije o korigovanju rada.

Dodatni PIC18F4520 mikrokontroler je predviđen kao SLAVE i koristi se za komunikacije sa periferijama. Ideja za ovu primenu je bila da SLAVE kontroler preko SPI porta razmenjuje informacije

sa master kontrolerom i da ih po potrebi može proslediti preko svog UART porta. Na UART sleva povezan je odgovarajući hardver koji omogućuje komunikaciju sa spoljnim svetom realizovanu preko RS-485 interfejsa, što daje mogućnost za implementaciju MODBUS protokola.

U okviru sistema je predviđen DIP prekidač, kojim se mogu izvršiti podešavanje rada uređaja (da radi kao punjač baterije, ili kao izvor napajanja, uz modifikaciju u kojoj ne postoji rele, pri čemu bi bilo moguće izabrati neke standardne vrednosti napona) koje SLAVE kontroler prosleđuje MASTER kontroleru. Dodatno, predviđeno je i postojanje četiri sedmosegmentna displeja preko kojih se prikazuje neka od merenih veličina, čiji prikaz korisnik tasterom može izabrati.

SLAVE kontroler, sedmosegmentni displeji, taster i prekidači se nalaze na posebnoj „piggy-back“ pločici, koja nije neophodna za rad uređaja. U slučaju izostajanja ove pločice, predviđen je poseban režim rada uređaja u kome bi on samo punio bateriju.

V MERENJA I LABORATORIJSKA ISPITIVANJA

U ovom poglavljiju su dati rezultati testiranja efikasnosti energetskog pretvarača i verifikacija implementiranog P&O algoritma. Pri ovim testovima je korišćena sledeća merna oprema:

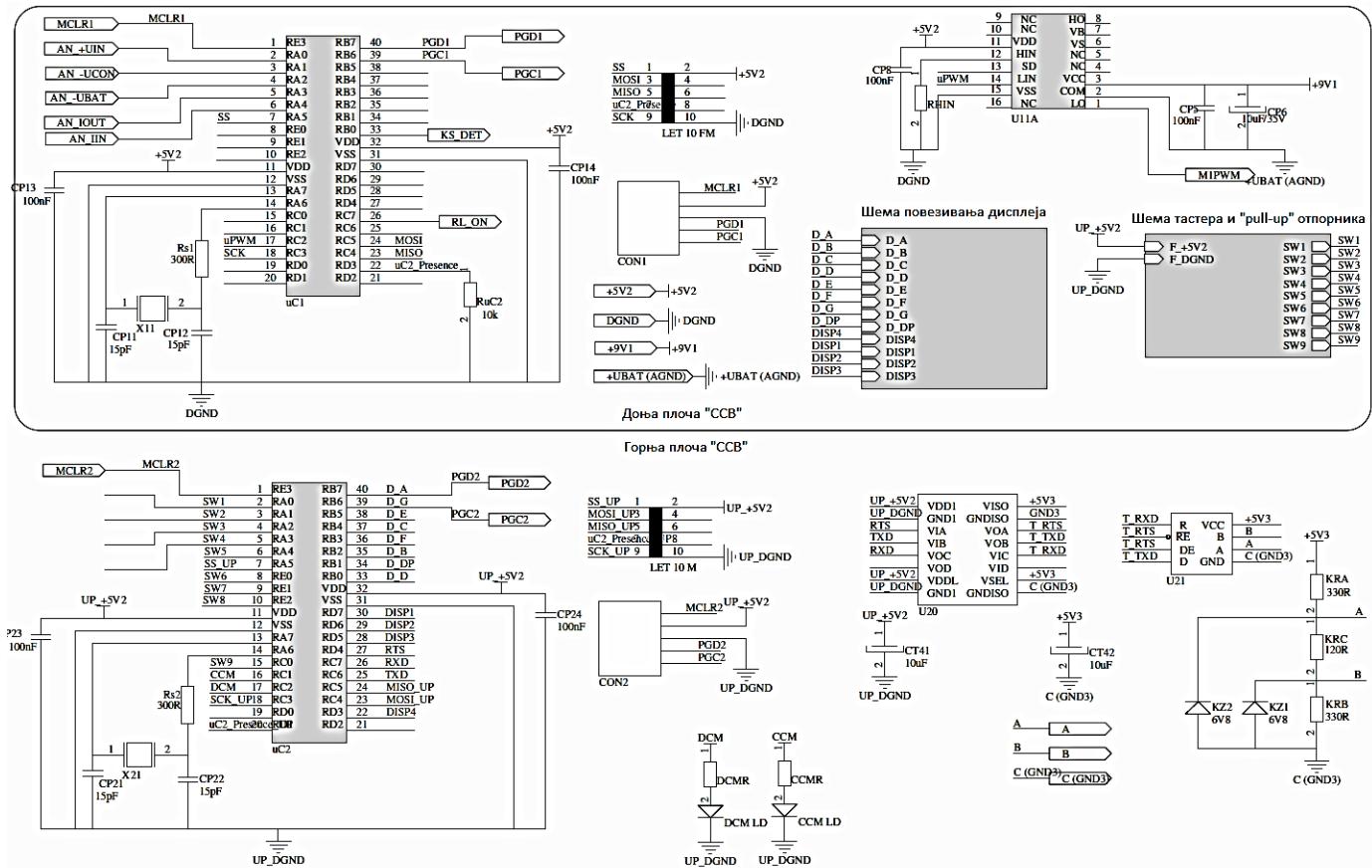
- multimetar EXTECH EX330 i opsezi napona koji su korišćeni pri merenju napona: opseg 0÷4 V, rezolucija 0,01 V, preciznost $\pm (0,5\% + 2 \text{ cifre})$; opseg 0 V - 40 V, rezolucija 0,1 V, preciznost $\pm (0,5\% + 2 \text{ cifre})$; opseg 0 V - 400 V, rezolucija 1 V, preciznost $\pm (0,5\% + 2 \text{ cifre})$,
- strujna klešta FLUKE i30 korišćena za merenje ulazne i izlazne struje, Opseg 5 mA - 30 A DC, 100 mV/A, preciznost $\pm 1\%$ očitavanja ± 2 mA,
- osciloskop INSTRUSTAR ISD205A: Rezolucija 8 bita, vertikalno odstupanje 10 mV/div - 10 V/div u 10 koraka, horizontalno odstupanje 10 ns/div - 1 s/div u 27 koraka.

Merenje efikasnosti energetskog pretvarača

Merenja su dobijena pri podešenom ulaznom naponu od 40.7 V, odnosno 12 V respektivno, i pri različitim opterećenjima na izlazu DC/DC pretvarača. Kao opterećenje su korišćeni otpornici nazivnih vrednosti 30 Ω , 24 Ω , 12 Ω snage 10 W, tolerancije

10%, a ekvivalentna otpornost je dobijana kombinacijom njihove paralelne sprege. U Tabeli 1 su data merenja za konfiguraciju podizača napona

spuštača napona, dok su u Tabeli 2 data merenja za konfiguraciju podizača napona.



Slika 12. Električna šema mikrokontrolera MASTER i drajverskog sklopa za pobudu prekidačkog tranzistora

Tabela 1. Merenja za konfiguraciju spuštača napona

U_{IN} [V]	I_{IN} [A]	U_{CC} [V]	I_{CC} [A]	P_{IN} [W]	$P_{OUT} + P_{RBL}$ [W]	η [%]	R_{LOAD} [Ω]
40,70	0,62	14,24	1,46	25,23	21,15	83,85	10,00
40,70	1,09	14,24	2,62	44,36	37,67	84,93	5,45
40,70	1,57	14,23	3,79	63,89	54,30	84,98	3,75
40,70	1,80	14,23	4,37	73,26	62,55	85,39	3,24
40,60	2,05	14,23	4,93	83,23	70,52	84,70	2,85
40,60	2,25	14,20	5,39	91,35	76,90	84,18	2,60
40,60	2,44	14,20	5,86	99,06	83,58	84,36	2,34

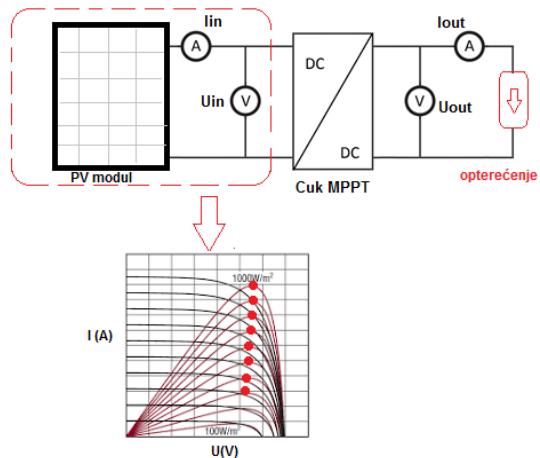
Tabela 2. Merenja za konfiguraciju podizača napona

U_{IN} [V]	I_{IN} [A]	U_{CC} [V]	I_{CC} [A]	P_{IN} [W]	$P_{OUT} + P_{RBL}$ [W]	η [%]	R_{LOAD} [Ω]
12,02	0,72	14,19	0,52	8,59	7,67	89,59	30,00
12,00	1,37	14,20	0,99	16,38	14,49	88,45	15,00
11,99	2,01	14,20	1,47	24,10	21,19	87,93	10,00
11,97	2,83	14,20	2,06	33,87	29,61	87,42	7,10
11,96	3,68	14,20	2,64	44,10	37,85	86,00	5,45
11,90	5,34	14,20	3,80	63,55	54,32	85,48	3,75

Verifikacija MPPT algoritma

U cilju verifikacije MPPT algoritma je formirana laboratorijska postavka čija je blok šema prikazana na Slici 13. Testiranje je

izvršeno za jedan PV 18 V/80 W i za rednu vezu dva takva panela.



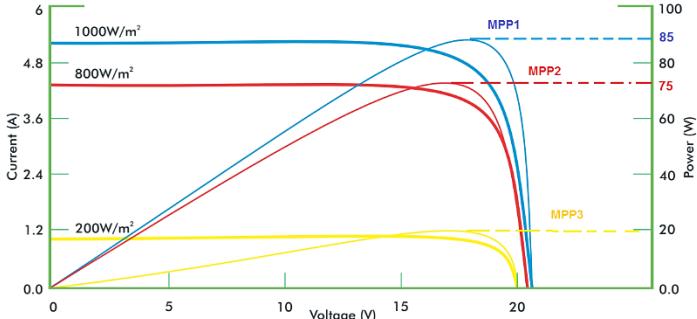
Slika 13. Principski prikaz laboratorijskog setupa za verifikaciju implementiranog MPPT algoritma

U eksperimentu su mereni ulazni napon i ulazna struja u tački maksimalne snage i izlazni napon i izlazna struja opterećenja. U Tabeli 3 su dati eksperimentalni rezultati za slučaj primene INC

algoritma, za komercijalni solarni panel CENTSYS nominalnog napona 18V i nominalne snage 80 W, čiji su detaljni tehnički podaci dati na linku:

<https://www.centsys.com.au/pdf/Solar/0.07.B.0133%2080W%20Solar%20Panel%20Specifications%20sheet-29062015-NG.pdf>

Sva merenja su vršena u toku tipičnog letnjeg dana počev od maksimalne insolacije 850 W/m^2 (podne) do minimalne vrednosti 200 W/m^2 (sutan). Na Slici 14 su date kataloške karakteristike $I-U$ i $P-U$ korišćenog solarnog panela.



Slika 14. Karakteristike solarnog panela CENTSYS 18V/80W

Izlazni napon na opterećenju je održavan posredstvom Ćukovog DC/DC pretvarača na vrednost 14,2 V. Ovo je tipična vrednost napona koja se koristi u primenama sa solarnim baterijama.

Tabela 3. Verifikacija MPPT algoritma za solarni panel CENTSYS 18V/80W

Red. br	$U_{MPPT \text{ MES}}$ [V]	I_{IN} [A]	P_{IN} [W]	U_{OUT} [V]	I_{OUT} [A]	P_{OUT} [W]
1	17,50	1,10	19,25	14,20	1,10	15,48
2	17,60	1,40	24,64	14,10	1,43	20,20
3	17,80	2,40	42,72	14,20	2,56	36,30
4	17,90	3,60	64,44	14,30	3,83	54,77
5	18,00	4,40	79,20	14,20	5,00	70,10

U Tabeli 4 su date izmerene vrednosti za sistem sa dva redno vezana solarna panle CENTSYS nominalnog napona 18V i nominalne snage 80W.

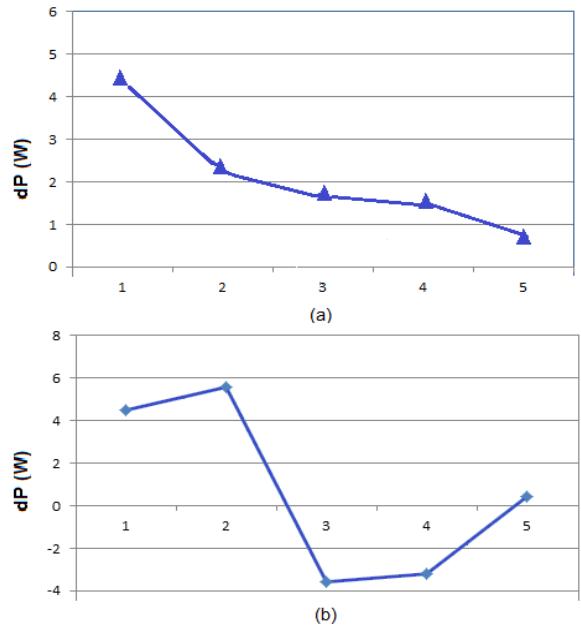
Tabela 4. Verifikacija MPPT algoritma za solarni modul sačinjen od 2x CENTSYS 18V/80W

Red. br	$U_{MPPT \text{ MES}}$ [V]	I_{IN} [A]	P_{IN} [W]	U_{OUT} [V]	I_{OUT} [A]	P_{OUT} [W]
1	35,80	4,40	157,52	14,40	9,30	134
2	35,70	3,30	117,84	14,30	7,00	100,00
3	35,60	2,50	89,00	14,20	5,20	73,87
4	35,60	1,25	44,50	14,10	2,62	37,00
5	35,20	1,00	35,20	14,20	2,03	28,80

Na osnovu eksperimentalnih rezultata prikazanih u Tabelama 3 i 4, koje su dobijene nakon implementacije MPPT INC algoritma, se vidi da izmerene vrednosti maksimalnih snaga solarnih panela sa odgovaraju vrednostima tačaka maksimalnih snaga koje su date na I-U karakteristici. Na Slici 15 su prikazana odstupanja izmerenih vrednosti maksimalnih snaga u odnosu na kataloške vrednosti (koje su date na Slici 14).

Na Slici 15(a) je data srednja vrednost odsupanja izmerenih

vrednosti u odnosu na kataloške vrednosti, za slučaj jednog solarnog panela, dok je na Slici 15(b) data srednja vrednost odstupanja za slučaj dva redno vezana solarna panela (solarni modul snage 160W).



Slika 15. Srednja vrednost odstupanja MPPT snage; (a) PV panel CENTSYS 18V/80W, (b) redna veza dva PV panela

Testiranje DC/DC pretvarača u ustaljenom i prelaznim režimima

U ovom delu su dati rezultati testiranja DC/DC pretvarača u stacionarnom stanju i u dinamičkom režimu, pri naglim promenama opterećenja (verifikacija funkcije „load regulation“).

Na Slici 16 je prikazan osciloskopski snimak izlaznog napona DC/DC pretvarača, pri ulaznom naponu 36V i opterećenju od 30W, pri podešenom izlaznom naponu od 14.2 V kada je energetski pretvarač radio u režimu naponskog izvora, kao spuštač napona.



Slika 16. Talasni oblik izlaznog napona pri opterećenju 30 W, osciloskop podešen na 2 V/div, 100 ms/div, $U_{IN} = 36 \text{ V}$

Na Slici 17 je prikazan osciloskopski snimak pri ulaznom naponu 36 V i opterećenju od 140W, pri podešenom izlaznom naponu od 14.2 V. Male oscilacije u talasnom obliku napona su posledica PID regulacije.



Slika 17. Talasni oblik izlaznog napona pri opterećenju 140 W, osciloskop podešen na 2 V/div, 100 ms/div, $U_{IN} = 36$ V

Na Slici 18 je prikazan talasni oblik odziva izlaznog napona, pri ulaznom naponu od 36 V i nagloj promeni opterećenja sa 30W na 140 W. Izlazni napon je iznosio 1,2 V. Na snimku se može uočiti efekat nagle promene opterećenja na kratkotrajni propad izlaznog napona, kao i efekat regulacije ovog poremećaja (tzv. „load regulation“). Ovaj prelazni rečim je trajao oko 100 ms.



Slika 18. Talasni oblik izlaznog napona pri promeni opterećenja sa 30W na 140W, osciloskop podešen na 2 V/div, 100 ms/div, $U_{IN} = 36$ V

Na Slici 19 je prikazan prikazan talasni oblik izlaznog napona, pri ulaznom naponu od 36 V i naglom rasterećenju na izlazu sa 140W na 30W, pri podešenom izlaznom naponu od 14,2 V. Na snimku se može uočiti očekivan porast izlaznog napona, dok se stabilizacija izlaznog napona ostvaruje u intervalu od 100 ms.



Slika 19. Talasni oblik izlaznog napona pri rasterećenju sa 140 W na 30 W, osciloskop podešen na 2 V/div, 100 ms/div, $U_{IN} = 36$ V

pretvarača, koji je primjenjen u solarnom MPPT sistemu i za široki raspon ulaznih naponova od 10 V do 40 V, maksimalne ulazne struje 4A, izlaznog napona u opsegu 12 V do 15V za punjenje solarnih baterija AGM VRLA i maksimalne izlazne struje 10 A. U ovoj aplikaciji je implementiran relativno jednostavan i praktičan INC algoritam u cilju praćenja tačke maksimalne snage solarnih panela. INC algoritam je detaljno objašnjen i prikazan dijagramom toka. Ograničenja sistema u primeni naprednijih MPPT algoritama je pre svega bila sama arhitektura primjenjenog mikrokontrolera, koji je osmobiljan i dizajniran za rad sa celim brojevima. Iz ovih razloga bi implementacija složenijih algoritama bila neefikasna i neprecizna. Nakon izvršenih testiranja i merenja utvrđeno je da je realna efikasnost Čukovog DC/DC energetskog pretvarača primjenjenog u MPPT solarnom sistemu oko 87% (režim spuštača napona), pri nominalno opterećenom izlazu pretvarača od 140W i pri izlaznom naponu 14.4V. Pri naglim promenama opterećenja (opseg 20W-140W), softverskom implementacijom i primenom PID algoritma u sklopu naponskog regulatora je postignuta zadovoljavajuća stabilizacija izlaznog napona.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Istraživanje u ovom radu je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija republike Srbije u okviru krovnog projekta pod Ugovorom br. 451-03-66/2024-03/200034.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Zeman, M., Solar Cells, Chapter 1: Introduction to photovoltaic solar energy, Chapter 3: Semiconductor materials for solar cells, Chapter 4: Operational principles, Chapter 5: Solar cell conversion efficiency limits. <https://mikro.elfak.ni.ac.rs/wp-content/uploads/Solar-Cells-Miro-Zeman.pdf> [pristupljeno 24.03.2024]
- [2] Jakhran, A.Q., Samo, S., Kamboh, S.A., Labadin, J. An improved mathematical model for computing power output of solar photovoltaic modules, International Journal of Photoenergy, 2014, 346704, 9 pages, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/346704>
- [3] Belkaid, A., Colak, I., Kayisli, K., Bayindir, R. Design and implementation of a cuk converter controlled by a direct duty cycle inc-mppt in pv battery system, International Journal of Smart Grid, Vol.3, No.1, 2019. <https://www.ijsmartgrid.org/index.php/ijsmartgridnew/article/view/37/pdf> [pristupljeno 24.03.2024]
- [4] Putri, R.I., Wibowo, S. Maximum power point tracking for photovoltaic using incremental conductance method, Energy procedia, Vol. 68, pp. 22-30, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.228>
- [5] Rivera-Espinosa, M.R, Alejandre-López, A.Y., Pedraza-Barrón, J.E., García-Vite, P.M., Robles-Campos, H.R. A high step-up DC-DC converter with MPPT for PV application, in Proc. 2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC), Ixtapa, Mexico, pp. 1-6, 08-10 November 2017. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8261610> [pristupljeno 24.03.2024]
- [6] Ghassami, A.A., Sadeghzadeh, S.M., Soleimani, A. A high performance maximum power point tracker for PV Systems, Electric Power Energy Systems, Vol. 53, pp. 237-243, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.04.017>
- [7] Mukerjee, A.K., Dasgupta, N. DC power supply used as photovoltaic simulator for testing MPPT algorithms, Renewable Energy, Vol. 32, No. 4, pp. 587-592, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.02.010>
- [8] Veerachary, M. Power tracking for nonlinear PV sources with coupled-inductor SEPIC converter, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 41, pp. 1019-1029, 2005. <https://ieeexplore.ieee.org/document/1541446> [pristupljeno 24.03.2024]
- [9] Safari, A., Mekhilef, S. Simulation and hardware implementation of incremental conductance MPPT with direct control method using Cukconverter, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No.4,

VI ZAKLJUČAK

U radu je prikazana praktična realizacija Čukovog DC/DC

- pp. 1154-1161, 2011. <https://ieeexplore.ieee.org/document/5456214> [pristupljeno 24.03.2024]
- [10] Majstorović, M., Mršević, D., Đurić, B., Milešević, M., Stević, Z., Despotović, Ž.V. Implementation of MPPT Methods with SEPIC Converter, in Proc. *19th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, pp. 1-6, 2020. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9066296> [pristupljeno 24.03.2024]
- [11] Chung, T.M., Daniyal, H., Sulaiman, M.H., Bakar, M.S. Comparative study of P&O and modified incremental conductance algorithm in solar maximum power point tracking, in Proc. *4th IET Clean Energy and Technology Conference (CEAT 2016)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 14-15 November 2016. <https://doi.org/10.1049/cp.2016.1300>
- [12] Patel, A., Tiwari, H. Implementation of INC-PIMPPT and its comparison with INC MPPT by direct duty cycle control for solar photovoltaics employing zeta converter, in Proc. *2017 International Conference on Information, Communication Instrumentation and Control (ICICIC)*, Indore, India, pp. 1-6, 17-19 August 2017. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8279173> [pristupljeno 24.03.2024]
- [13] Djordjević, B., Despotović, Ž.V. Digital Implementation of MPPT Algorithm in Cuk DC/DC Power Converter Based on PIC18F4520
- Microcontroller, in Proc. *2022 21st International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH)*, East Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, pp. 1-6, 16-18 March 2022. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9751278> [pristupljeno 24.03.2024]
- [14] Lekić, A., Aroudi, A.E., Stipanović, D. Polytopic Control of a PV-Fed SEPIC DC-DC Converter, in Proc. *2019 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Sapporo, Japan, pp. 1-5, 26-29 May 2019. <https://doi.org/10.1109/ISCAS.2019.8702076>
- [15] Esram, T., Chapman, P.L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 22, No. 2, pp. 439-449, June 2007. <https://doi.org/10.1109/TEC.2006.874230>

AUTORI/AUTHORS

dr Željko V. Despotović, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710)
Boban Đorđević - master strukovnih studija, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, boban.djordjevic@pupin.rs, ORCID [0009-0006-6093-8406](https://orcid.org/0009-0006-6093-8406)

Application and Realization of Ćuk DC/DC Power Converter in MPPT of the Photovoltaic Panel

Abstract – The paper presents one possible realisation of the solar panel-Ćuk DC/DC power converter system with the implementation of the algorithm for the maximum power point tracking (MPPT) of the solar panel. The solar panel is characterized by a highly nonlinear I-U characteristic, while Ćuk's DC/DC power converter is characterized by a wide range of input voltage. For these reasons, the coupling of these two subsystems proved to be a satisfactory solution in off-grid solar power supply systems. The paper presents the key characteristics of the proposed system as well as the test results obtained at different loads.

Index terms – Power converter, RES, DC/DC power, Ćuk converter, PV module

Ispitivanje održivosti različitih struktura kategorije kupac-proizvođač

Darko Šošić, Goran Dobrić, Mleta Žarković

Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet

Rezime - U ovom istraživanju će se detaljno analizirati implementacija koncepta kupca-proizvođača u distributivni sistem električne energije, s posebnim naglaskom na finansijsku isplativost i održivost modela. Glavni fokus će biti na formiraju mesečnog računa za električnu energiju, što zahteva temeljnu evaluaciju potrošnje i proizvodnje na mesečnom nivou, uzimajući u obzir tarife i operativne faktore. Analiziraće se finansijski, operativni i društveni aspekti ovog modela kako bi se procenila dugoročna isplativost i održivost. Posebna pažnja će biti posvećena promenljivoj prirodi proizvodnje iz obnovljivih izvora, poput PV sistema, i ispitaće se isplativost uvođenja skladišta električne energije kao dodatne komponente u ovom modelu. Takođe će se analizirati operativni aspekti uvođenja ovog modela u distributivni sistem, kao i mogući problemi koji mogu nastati u slučaju nepravilne primene. Ključno je izvršiti sveobuhvatnu analizu održivosti i isplativosti ovog modela na dugoročnom nivou, uzimajući u obzir širok spektar faktora koji mogu uticati na uspeh i prihvaćenost ovog koncepta u elektroenergetskom sektoru.

Ključne reči - Distributivni sistem, obnovljivi izvori, skladište električne energije, isplativost, kupci–proizvođači

I UVOD

Električna energija je od suštinskog značaja za moderno društvo. Svaka sfera života zasniva se na sigurnom, pouzdanom i jeftinom snabdevanju električnom energijom. Društvene, ekonomске pa i ekološke koristi mogu da budu izuzetno velike. Ipak, i pored velikog značaja električne energije ne postoji jasna društvena svest o potrebama za istom. Jedan od razloga je svakako i neopipljivost električne energije kao robe, i osobine njenog ponašanja. Zbog toga su za društvo potrebni opipljivi događaji, poput prekida u snabdevanju, vremenskih nepogoda, energetskih kriza, da bi električna energija dobila i socio-tehničke a ne samo fizičke osobine. Upotreboom fizike moguće je opisati proces proizvodnje i prenosa električne energije, međutim to će imati izuzetno mali uticaj na način upotrebe električne energije prosečnog čoveka.

Nove tehnološke inovacije, zabrinutost za ekologiju, i na kraju liberalizacija tržišta menjaju paradigmu proizvodnje i potrošnje električne energije. Decentralizacija elektroenergetskog sektora je omogućila prisustvo većeg broja učesnika u procesu proizvodnje električne energije. Ekološke promene, zagađenost vazduha mogu doprineti ubrzanoj promeni same proizvodne strukture elektroenergetskog sistema. Bez obzira na novu proizvodnu strukturu većinu krajnjih potrošača će zanimati samo dostupnost električne energije. Da bi se ovaj efekat postigao potrebno je obezrediti dovoljnu proizvodnju iz obnovljivih izvora energije. Dodatna prednost bi se ostvarila kada bi ti izvori

bili distribuirani, odnosno locirani što je moguće bliže potrošačima. Kao logično rešenje nameće se kategorija kupaca–proizvođača koja će biti razmatrana u ovom radu.

Pored dobre volje potrebna su i značajna novčana sredstva da bi neko postao kupac–proizvođač. Pošto je ovo relativno novi pristup većina potrošača nije dovoljno informisana, a samim tim ni svesna svojih potreba za električnom energijom. Sa druge strane, neki izvođači radova su isključivo zainteresovani za svoju zaradu, tako da će savetovati klijente da podnesu zahtev za najveću dozvoljenu snagu PV sistema. Gledano sa strane distributivne mreže mali broj ovakvih kupaca–proizvođača neće imati veliki uticaj na način poslovanja. Međutim, kada bi se takav trend nastavio na malom delu mreže to bi nedvosmisleno dovelo do pogoršanja rada tog dela distributivne mreže.

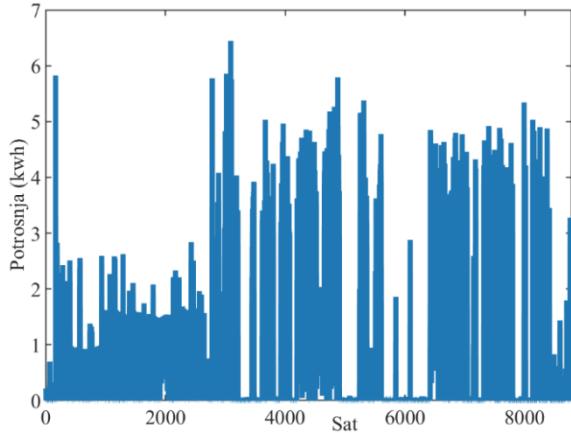
U ovom radu će se analizirati kupac–proizvođač, odnosno posmatraće se isplativost poduhvata prelaska sa pasivnog na aktivnog korisnika distributivne mreže. Pored mogućnosti povećanja/smanjenja broja modula u zavisnosti od količine predate energije, razmatraće se i mogućnost modularnog dodavanja skladišta električne energije.

II MESEČNI RAČUN ZA ELEKTRIČNU ENERGIJU

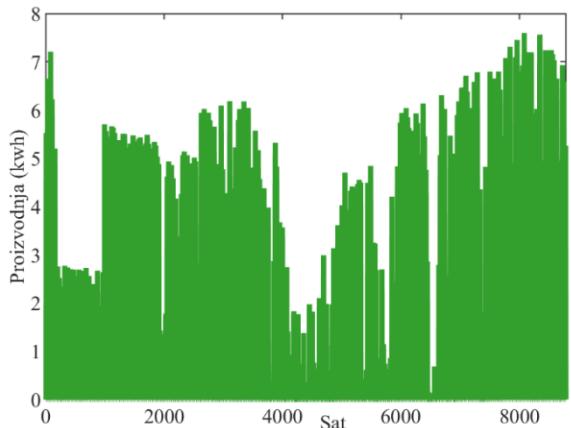
Da bi se formirao račun za električnu energiju neophodno je poznavati najmanje satni profil potrošnje i proizvodnje razmatranog kupca proizvođača. Detaljnijim pregledom merenja može se uočiti da u jednom razmatranom trenutku vremena postoji i potrošnja i proizvodnja. Ovakva pojava je prisutna samo kada postoji proizvodnja iz PV sistema. Razlog za postojanje proizvodnje i potrošnje u jednom vremenskom intervalu je njihova intermitentnost. U nekim trenucima unutar razmatranog intervala proizvodnja će biti dominantna, i to će se smeštati u interni registar, dok će u drugim trenucima potrošnja biti dominantna što se smešta u zaseban registar. Na kraju svakog intervala, koji najčešće iznosi sat vremena, izvršće se usrednjavanje, odnosno, zabeležiće se najmanje i najveće vrednosti, kao i ukupna proizvedena i potrošena energija. Na slikama 1 i 2 prikazana su merenja godišnje preuzete i predate energije jednog kupca–proizvođača. Može se primetiti da na nekim intervalima nije beležena potrošnja, usled prekida komunikacije ili nekog drugog razloga, ali to ni u kom slučaju značajno ne utiče na rezultate sprovedene analize.

Prvi korak se ogleda u razvrstavanju podatka: po mesecima, višoj i nižoj tarifi preuzete električne energije, kao i podeli te energije po zonama. Na osnovu zvaničnog objašnjenja računa za električnu energiju [1] formirana je funkcija koja uvažava sve relevantne parametre. Prema Zakonu o korišćenju obnovljivih izvora energije [2] operator distributivnog sistema je dužan da preuzme svu proizvedenu energiju kupca–proizvođača. Ta

preuzeta energija se koristi za umanjivanje računa za električnu energiju u narednom obračunskom mesecu. Jednu razliku od ovog pravila predstavlja kraj meseca marta kada se sva „skladištena“ energija briše.



Slika 1. Godišnja preuzeta energija razmatranog kupca–proizvođača

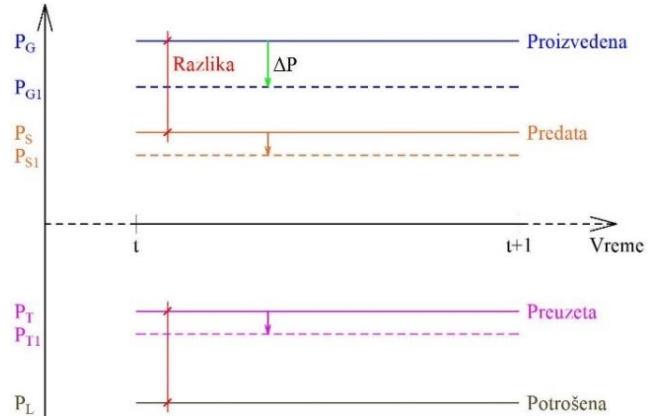


Slika 2. Godišnja predata energija razmatranog kupca–proizvođača

Da bi se analizirala promena veličine fotonaponskih sistema potrebno je usvojiti neke pretpostavke. Naime, pošto se brojilom meri predata i preuzeta energija stvarna potrošnja i proizvodnja nisu poznate. Pitanje proizvodnje se može rešiti upotrebom baze podataka koja je dostupna na sajtu PVGIS [3]. Na pomenutom sajtu moguće je odabrati željenu lokaciju, period i rezoluciju odabiranja od interesa, kao i veličinu fotonaponskog sistema i efikasnost invertora. Na osnovu te krive i krive predate električne energije moguće je rekonstruisati krivu potrošnje posmatranog kupca–proizvođača, kao što je prikazano na slici 3.

Prilikom promene veličine fotonaponskog sistema menja se i snaga proizvodnje. U gornjem delu računa za električnu energiju figuriše samo utrošena električna energija koja se umanjuje za iznos koju je distributivno preduzeće „skladište“ za razmatranog kupca–proizvođača iz prethodnog perioda. U mesecima sa velikom proizvodnjom ovaj deo računa može da bude prazan. Međutim u dugom delu računa figuriše celokupno preuzeta električna energija i na nju se plaćaju sve dažbine

(porez, akcize, ...). Zbog neposedovanja dovoljno sitnog odabiranja stvarnog dijagrama potrošnje i proizvodnje potrebno je nekako odrediti koliko će se energije predati, a koliko uzeti iz mreže za novonastalo stanje. U ovom radu je usvojena pretpostavka da se na osnovu razlike proizvedene i pdate snage/energije, kao i procentualnog smanjenja proizvodnje, ΔP , može odrediti nova predata i preuzeta snaga/energija. Oznake u izrazima (1–3) odgovaraju oznakama na slici 3.



Slika 3. Procena predate i preuzete energije

$$\Delta P = P_{G1} / P_G, \quad (1)$$

$$P_{S1} = P_S \Delta P, \quad (2)$$

$$P_{T1} = P_T + Razlika(1 - \Delta P). \quad (3)$$

Na osnovu ovako dobijenih vrednosti za predatu i preuzetu električnu energiju moguće je na već opisani način formirati mesečni račun.

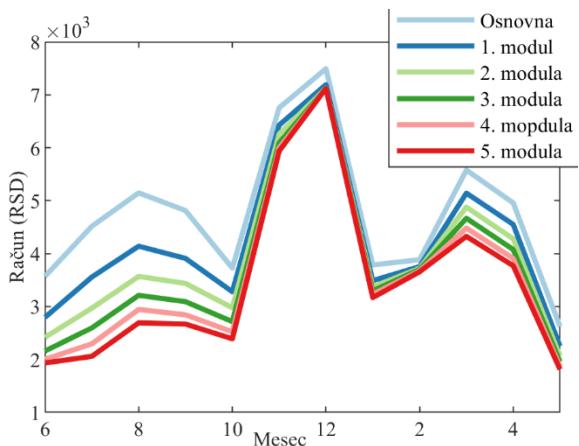
III ANALIZA I REZULTATI

Pored promene mesečnog računa za električnu energiju razmatranog kupca proizvođača, svetlo plava kriva na slici 4, prikazano je još pet scenarija. U svakom od scenarija sukcesivno je dodavan po jedan modul skladišta električne energije. Za kapacitet jednog modula usvojena je vrednost od 3,28 kWh, koja je preuzeta iz kataloga jednog od proizvođača ove opreme.

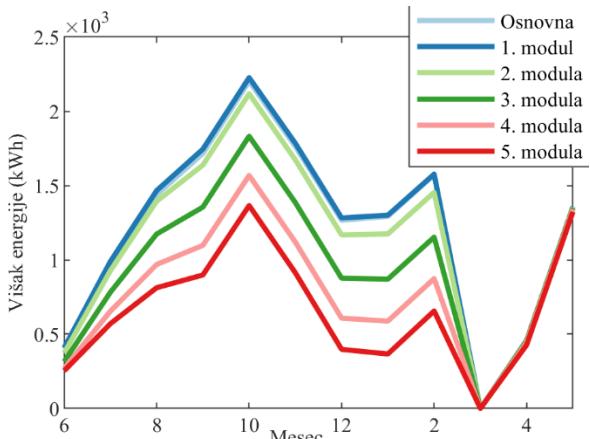
Usvojena je pretpostavka da se proizvedena energija u nekom intervalu predaje skladištu sve dok se ne dostigne gornja granica. Da bi se pravilno kreirao račun sa novim elementom potrebno je izvršiti određene korekcije. Kao prvo, potrebno je modifikovati podatke o predatoj snazi ako je došlo do skladištenja energije u razmatranom intervalu. Pored toga, usvojena je pretpostavka da će se energija prvo potraživati iz sopstvenih izvora pa tek onda iz distributivne mreže. Ovo praktično znači da ako skladište poseduje neku količinu energije, ta energija će se trošiti u narednom periodu sve dok se ne dostigne minimalni kapacitet skladišta.

Na osnovu usvojenih pretpostavki vrši se modifikacija dijagrama potrošnje i proizvodnje razmatranog kupca–proizvođača za svaki pojedinačni scenario. Za tako dobijene dijagrame sprovedena je ista procedura podele po mesecima, tarifama i zonama nakon čega je vršeno određivanje visine računa za električnu energiju. Kao što se sa slike 4 može primetiti najveći uticaj skladišta je u

letnjem periodu, dok je u zimskim mesecima skoro zanemarljiv. Jedan od mogućih uzročnika za ovakvo stanje je upotreba električne energije za zagrevanje domaćinstva.



Slika 4. Mesečni račun za električnu energiju razmatranog kupca–proizvođača u prisustvu skladišta

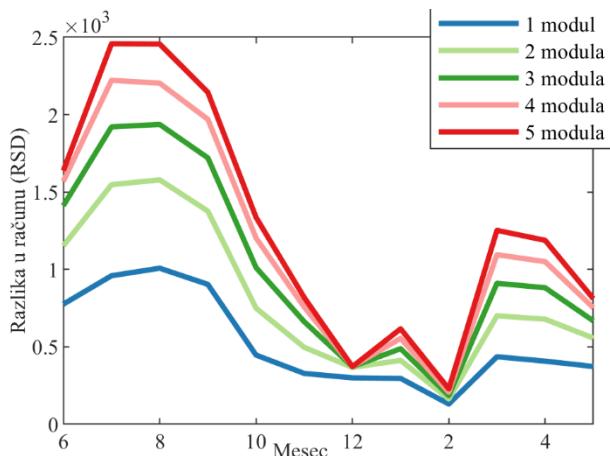


Slika 5. Količina električne energije koja se „skladišti“ u mreži

Pored visine računa praćena je i promena količine energije koja se predaje na čuvanje, slika 5. Razlika u količini energije koja se preda distributivnoj mreži bez skladišta i sa jednim modulom je izuzetno mala tako da dolazi do preklapanja ovih krivih. Veća razlika je uočljiva tek kada su prisutna tri modula skladišta.

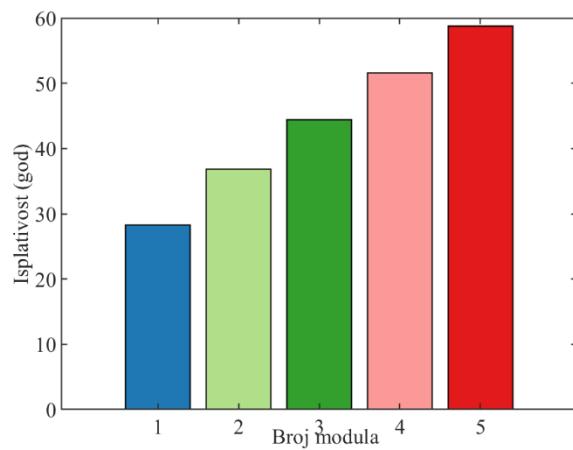
Da bi se sprovedla analiza isplativosti potrebno je videti koliko svaki modul doprinosi umanjenju mesečnog računa. Na slici 6 prikazana je razlika u visini računa za osnovni slučaj bez ugrađenog skladišta električne energije i svakog razmatranog scenarijusa. Prikazani rezultati potvrđuju ono što je intuitivno jasno, odnosno da sa većim stepenom autonomije kupca–proizvođača račun za električnu energiju će biti niži.

Da bi sprovedena analiza bila korektna potrebno je uvažiti i troškove ugradnje skladišta električne energije. U ovoj analizi nisu razmatrani troškovi ugradnje PV sistema i sve neophodne prateće opreme, odnosno usvojena je pretpostavka da je ova oprema već prisutna. Usvojena je dodatna pretpostavka da cena jednog modula skladišta iznosi 1500 €, odnosno 180 000 RSD. Pošto su na raspolaganju podaci samo iz jedne kalendarske godine neophodno je usvojiti pretpostavku da će ušteda na godišnjem nivou usled ugradnje skladišta biti ista.



Slika 6. Uticaj skladišta električne energije na smanjenje mesečnog računa za električnu energiju

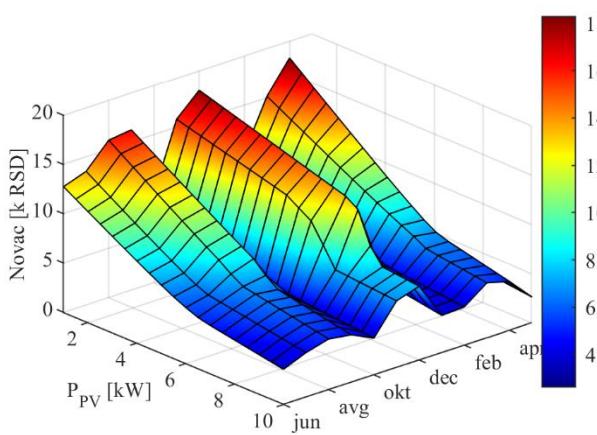
Na osnovu svega navedenog može se izračunati period isplativosti ugradnje skladišta električne energije, što je prikazano na slici 7. Sa ove slike se može primetiti da je period otplate izuzetno dugačak. Dobijeni rezultati su validni za usvojene pretpostavke, sa nižim cenama skladišta period otplate bi sigurno bio kraći. Takođe, ovde je potrebno napomenuti da životni vek skladišta nije uziman u razmatranje, kao i broj ciklusa rada skladišta. Iz sprovedene analize se može zaključiti da ugradnja skladišta nije opravdana ukoliko ne dođe do značajne promene u načinu naplate električne energije kupcima–proizvođačima. Prema trenutnoj praksi regularni potrošači subvencionisu kupce–proizvođače i plaćaju njihov deo gubitaka električne energije koji nastaje zbog predaje proizvedene električne energije u distributivnu mrežu. U slučaju da dođe do promene uslova poslovanja, odnosno do naplate „mrežarine“ i za predatu električnu energiju, postoji verovatnoća da će ugradnja skladišta postati isplativa. Ovakva analiza bi zahtevala detaljno poznavanje prilika u svim distributivnim preduzećima Republike Srbije kao i spremnost da se te promene izvrše, što prevazilazi okvire ovog rada.



Slika 7. Isplativost ugradnje skladišta

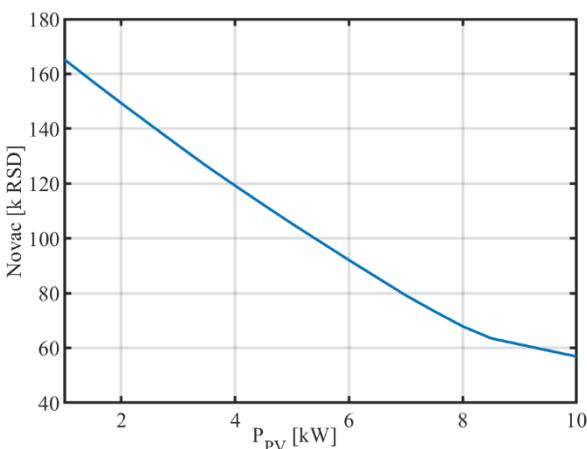
Razmatrani kupac–proizvođač ima PV sistem instalisane snage 10 kWp. Zbog toga je bilo potrebno pomoću izraza (1–3) odrediti predatu i preuzetu energiju za druge vrednosti maksimalne snage

proizvodnje.



Slika 8. Visina računa u zavisnosti od veličine PV sistema

Na slici 8 prikazana je promena visine računa za dvanaest mjeseci, podaci su počeli da se beleže u junu, u zavisnosti od veličine PV sistema. Iz oblika dijagrama može se zaključiti da je dominantna potrošnja u zimskim mjesecima, što znači da se domaćinstvo greje električnim putem. Upravo u tim mjesecima su korisniku stizali najviši računi, oko 18000 RSD. Nagli pad računa se može primetiti pri veličini panela od 8 kWp, nakon čega ide blaže smanjivanje istog. Da bi se ovo bolje sagledalo na slici 9 je prikazana ukupna količina novca koju je potrebno izdvojiti na godišnjem nivou za kupovinu električne energije u zavisnosti od veličine PV sistema.

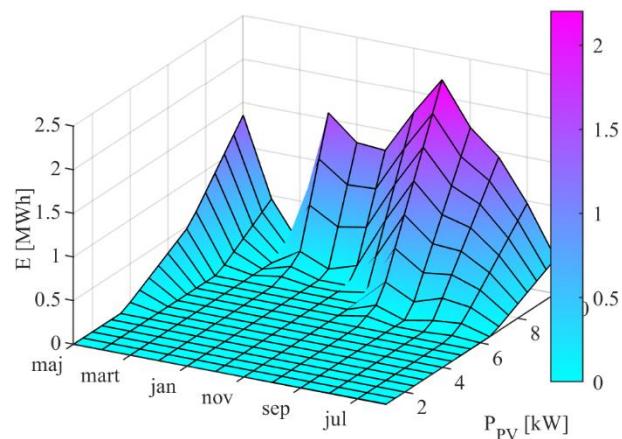


Slika 9. Godišnji troškovi nabavke električne energije u zavisnosti od veličine PV sistema

Na kraju, na slici 10 prikazana je promena energije koja se predaje na čuvanje na kraju svakog mjeseca. Pošto, prema ugovoru koji su kupci-proizvođači potpisali, na kraju marta dolazi do ponistiavanja brojača ovi dijagrami ponovo kreću od nulte vrednosti. Upravo pomenutih 8 kWp predstavljaju prekretnicu kada posmatrani kupac-proizvođač počinje da gubi proizvedenu energiju.

Vreme otplate PV sistema se može ubrzati ako bi se pristupilo procesu virtuelnih elektrana i upotrebi blockchain tehnologije

[4]. Ovaj pristup bi zahtevao dodatnu deregulaciju tržista električne energije, pri čemu pojedini kupci proizvođači ne bi samostalno učestvovali već bi se automatski agregirali u virtuelnu elektranu.



Slika 10. Količina energije koja se skladišti u mreži u zavisnosti od veličine PV sistema

U slučaju da postoji veliki broj kupaca-proizvođača na jednom delu mreže može se očekivati problem zagušenja, odnosno preopterećenja pojedinih delova mreže. U [5] je predložen metod za modelovanje aggregirane proizvodnje/potrošnje kako bi se izbegao pomenuti problem, pri čemu su autori razmatrali postojanje nodalnih cena u distributivnoj mreži.

IV ZAKLJUČAK

Sprovedene analize ukazuju na značajne posledice primene fotonaponskih sistema kod kupaca-proizvođača koji se priključuju na niskonaponsku mrežu. Primećeno je da sa tačke gledišta kupca-proizvođača postoji više koristi u zimskim mjesecima nego u letnjim. Dominantna potrošnja električne energije u zimskim mjesecima, verovatno uzrokovanu korišćenjem električne energije za grejanje domaćinstava, može imati ključnu ulogu u donošenju odluka o optimalnoj veličini fotonaponskih sistema. Promena u količini energije koja se predaje na čuvanje varira u zavisnosti od veličine PV sistema, pri čemu postoji tačka preokreta gde kupac-proizvođač počinje da gubi proizvedenu energiju. Da bi se izbegao preveliki gubitak energije razmatrana je isplativost ugradnje skladišta električne energije. Međutim, period isplativosti ugradnje skladišta električne energije pokazao se kao izuzetno dug, što naglašava potrebu za dodatnim promenama u načinu naplate električne energije ili znatnim smanjenjem cena skladišta kako bi se investicija opravdala.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Ovaj rad je finansijski podržan od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije pod ugovorom broj: 451-03-65/2024-03/200103.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Objasnjenje računa, www.eps.rs/lat/snabdevanje/Stranice/objasnjenje-racuna.aspx [pristupljeno 01.02.2024]

- [2] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije. "Sl. glasnik RS", br. 40/2021 i 35/2023 <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-korisencenju-obnovljivih-izvora-energije.html> [pristupljeno 01.02.2024]
- [3] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en [pristupljeno 01.02.2024]
- [4] Cioara, T., Antal, M., Mihailescu, V. T., Antal, C. D., Anghel, I. M., Mitrea, D. Blockchain-based decentralized virtual power plants of small prosumers, IEEE Access, Vol. 9, pp. 29490-29504, 2021 <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3059106>
- [5] Hu, J., Wu, J., Ai, X., Liu, N. Coordinated Energy Management of Prosumers in a Distribution System Considering Network Congestion, IEEE

Transactions on Smart Grid, Vol. 12, No. 1, pp. 468–478, 2021.
<https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3010260>

AUTORI/AUTHORS

- dr Darko Šošić** – vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, soscic@etf.rs, ORCID [0000-0001-9029-8979](https://orcid.org/0000-0001-9029-8979)
- dr Goran Dobrić** - vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, dobric@etf.rs, ORCID [0000-0002-1747-6211](https://orcid.org/0000-0002-1747-6211)
- dr Mileta Žarković** - vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, mileta@etf.rs, ORCID [0000-0001-5855-6595](https://orcid.org/0000-0001-5855-6595)

Exploring the Profitability of Different Structures of the Prosumers

Abstract – In this study, the implementation of the prosumer concept in the distribution system of electrical energy will be thoroughly analysed, with a specific focus on the financial feasibility and sustainability of the model. The main emphasis will be on the formation of the monthly electricity bill, which requires a detailed evaluation of consumption and production on a monthly basis, taking into account tariffs and operational factors. Financial, operational, and societal aspects of this model will be analysed to assess its long-term viability and sustainability. Special attention will be given to the variable nature of production from renewable sources, such as PV systems, and the feasibility of introducing electrical energy storage as an additional component in this model will be examined. Additionally, operational aspects of implementing this model in the distribution system will be scrutinized, as well as potential issues that may arise from improper implementation. Conducting a comprehensive analysis of the sustainability and profitability of this model in the long run is crucial, considering a wide range of factors that may influence the success and acceptance of this concept in the electrical energy sector.

Index terms – Distribution system, Renewable sources, Electrical energy storage, Profitability, Prosumer

Održivi razvoj gradova – Da li su pametni gradovi nužno i održivi?

Angelina Cvetanović*, Dubravka Živković*, Minja Obradović**, Davor Končalović*, Vladimir Vukašinović*, Mladen Josijević*, Nataša Sekulić*

* Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

** GrIT, Beograd

Rezime – Intenzivan porast svetske populacije u 20. i 21. veku i širenje gradova ukazuju na značaj koji oni sada imaju na društveno-ekonomski razvoj. Samim tim, gradovi postaju segment društva čija je održivost nužna za postizanje šire održivosti planete. U tim naporima, poseban naglasak se stavlja na pametne gradove (one koji aktivno prihvataju nove tehnologije) kao potencijalno rešenje urbane održivosti. Zbog više razloga, nedostatka znanja kako da lokalne samouprave primene ideju pametnog grada, kao i zbog nedostatka evaluacije rezultata održivosti koje su postigli pametni gradovi još uvek nije jasno da li prakse pametnih gradova vode ka ekološkoj, ekonomskoj i socijalnoj održivosti. Ovaj rad ima za cilj da osvetli pitanje da li gradovi mogu postati pametni, a da u tom procesu zadrže svoju neodrživost. Kroz sistematski pregled literature o pametnim i održivim gradovima, analizirano je postojeće stanje u razvijenom svetu i identifikovane su mogućnosti, pretnje, prednosti i slabosti u smislu implementacije koncepta održivog razvoja kroz pametne gradove.

Ključne reči - održivi razvoj gradova, pametni gradovi

I UVOD

Održivi razvoj (engl. *Sustainable Development*) predstavlja ključni element savremene teorije razvoja i zasniva se na pametnom, održivom i inkluzivnom rastu. Multidisciplinarni i višedimenzionalni koncept održivog razvoja nastao je krajem osamdesetih godina prošlog veka [1], mada se u zemljama u razvoju, iako prepoznat, još uvek smatra relativno novim pristupom razvoja. Održivi razvoj se najjednostavnije može definisati kao sposobnost zajednice da zadovolji sopstvene potrebe sa ograničenim resursima, na način koji neće ugroziti sposobnost budućih generacija pri zadovoljenju svojih potreba [2]. Navedeni način razvoja naglašava značaj balansa između ekonomskih, socijalnih i ekoloških ciljeva kako bi se osiguralo dugoročno blagostanje zajednice i očuvanje resursa za buduće generacije. Osim u kontekstu razvoja, danas se termin održivosti koristi u različitim aspektima života, industrije i društva, a u svrhu ostvarivanja sedamnaest globalnih ciljeva održivosti. Globalni ciljevi održivog razvoja su definisani u *Agendi 2030* 2015. godine i naglašavaju trodimenzionalni aspekt održivosti:

- ekonomski rast,
- socijalnu inkluziju i
- zaštitu životne sredine [3,4].

Svaki utvrđen cilj specifično je povezan sa jednom od oblasti: planeta, društvo, prosperitet, mir i partnerstvo (slika 1). Istovremeno, ciljevi održivog razvoja (skr. COR), posvećeni su

principima i praksama u međuljudskim odnosima, međusektorskim organizacijama i međunarodnim institucijama.

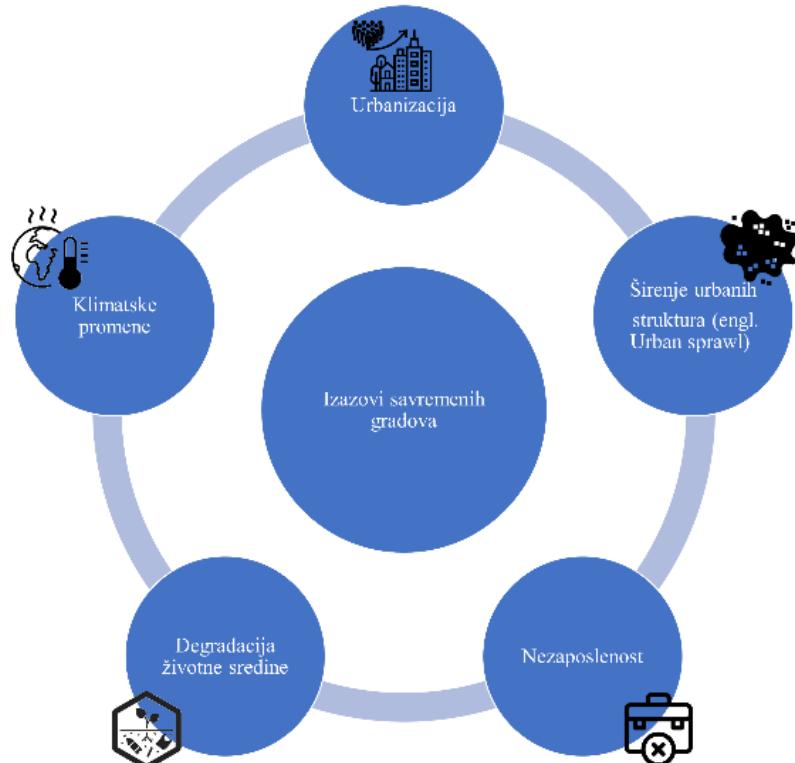
Na osnovu slike 1, zaključuje se da je jedan od globalnih COR-a uspostavljanje održivih gradova i zajednica, koji je moguće ostvariti ukoliko se na adekvatan način planira i upravlja gradskim dobrima i proizvodima, koji se klasificuje u tri osnovne grupe: resursi, infrastruktura i gradska dobra i usluge [5]. Važnost razvoja inovativnih rešenja za uspostavljanje održivih gradova i zajednica su jasno definisani u okviru samog cilja broja 11. Brojni su promoteri primene naprednih informaciono-komunikacionih tehnologija u zaštiti životne sredine, optimizaciji efikasnosti resursa, unapređenju infrastrukture, promovisanju društveno-ekonomskog razvoja i unapređenju ljudskog znanja u gradovima širom sveta [6]. S obzirom na to da se danas gradovi posmatraju kao ključna ekonomska čvorista globalne zajednice, bitno je postaviti pitanje kako gradovi izgledaju u 21. veku i sa kojim osnovnim izazovima se suočavaju?

Slika 2 ilustrativno prikazuje primarne izazove savremenih gradova. Najpre, urbanizacija se ističe kao jedan od najvažnijih trendova 21. veka, koji se karakteriše procesom urbane koncentracije i činjenicom da danas oko 56 % svetske populacije živi u gradskim sredinama, da gradovi generišu 80% ukupnog BDP-a i da se u njima emituje 70% emisija ugljen dioksida [7], [8]. Sa druge strane, kao savremeni trendovi uočavaju se i suburbanizacija kroz umrežavanje predgrađa, ali i širenje urbanih izgrađenih struktura. Klimatske promene i degradacija okoline su evidentni izazovi sa kojima se svaka urbana sredina suočava (zagadenje vazduha, vode i zemljišta; ograničeni broj lokaliteta javnih parkova i zelenih površina, itd.). Globalna stopa nezaposlenosti, koja trenutno iznosi 5,4 % [9] i socijalne, ali i ekonomske nejednakosti su izazovi sa kojima se gradovi suočavaju u okviru socijalne i ekonomske dimenzije.

Da bi se postigao COR uspostavljanja održivih gradova i zajednica, naporu se moraju fokusirati na implementaciju inkluzivnih, otpornih i održivih politika i praksi urbanog razvoja koje daju prioritet pristupu osnovnim uslugama, pristupačnom stanovanju, efikasnoj mobilnosti i dostupnim zelenim površinama. U tu svrhu, posebna pažnja se usmerava prema pametnim gradovima kao potencijalnom rešenju za urbani održivi razvoj. Ovde treba naglasiti da se iz analizirane, naučne i akademске literature, može izvući zaključak da gradovi prvo treba da postanu održivi da bi se smatrali zaista pametnim [10]. U tom smislu, pametne gradove je moguće posmatrati kao sisteme koji podstiču održivi razvoj i visok kvalitet života, ali da li je to tako u praksi? U ovom radu je kroz pregled literature, razmatrano da li su sadašnji pametni gradovi nužno i održivi.



Slika 1. Globalni ciljevi održivog razvoja [3]



Slika 2. Izazovi savremenih gradova

II PAMETNI GRADOVI – KORAK KA ODRŽIVOJ BUDUĆNOSTI?

Gradovi širom sveta se sve više susreću sa izazovima koji onemogućavaju uspostavljanje održivog razvoja. Stoga je formiran model pametnog grada (engl. *Smart City*), koji se promoviše kao instrument za upravljanje različitim urbanim problemima. Pametni gradovi se promovišu kao rešenje za brojne izazove urbanizacije, uključujući zagađenje, nedostatak resursa, transport, upotrebu energije i brojen druge socijalne, ekonomske i ekološke probleme. Međutim, samo usvajanje informacionih i komunikacionih tehnologija (IKT) ne garantuje održivost. Održivost zahteva promišljen pristup koji teži da uspostavi balans između ekološkog, ekonomskog i socijalnog razvoja. Većina gradova pokušava to da postigne definisanjem posebnih strategija za transport, urbanističko planiranje, privredni razvoj, zaštitu životne sredine, itd. S obzirom da se gradovi razlikuju po klimi, veličini, demografskoj strukturi, stepenu privrednog razvoja, istoriji, kulturi, arhitekturi, rešenja za pametne gradove moraju uzeti u obzir i sve ove različite zahteve [11]. Strategija razvoja pametnog grada trebalo bi da omogući istovremenu realizaciju svih pojedinačnih zahteva, ciljeva i planova kroz dugoročne dokumente, inicijative i projekte održivog urbanog razvoja.

Trenutno popularan koncept pametnog grada datira još iz 1960. godine pod onim što se tada nazivalo „kibernetički planiranim gradovima“ [12,13], ali njegova savremena konceptualizacija i praksa je još uvek u razvoju [14]. U naučnoj i stručnoj literaturi su se susretali različiti pojmovi, od kojih su najzastupljeniji bili održivi i pametni gradovi, sve do 2013. godine, od kada je najčešće korišćen termin pametni grad [15].

Ne postoji jedinstvena i opšteprihvачena definicija pojma pametnog grada budući da se one razlikuju u zavisnosti od domena njegove implementacije (tehnologija, ekonomija, društvo, životna sredina, upravljanje, itd.).

Sa stanovišta urbane ekološke održivosti, pametni gradovi se posmatraju kao povezivanje visokotehnoloških ekoloških strategija sa tradicionalno zelenim intervencijama (zelene površine, parkovi, urbana poljoprivreda, zelene zgrade, itd.) [10]. Drugi pak, vide pametne gradove kao lokalitete sa nultim ili niskim emisijama ugljenika [16]. Na primer, ukoliko se posmatra ekološka održivost gradova, strategijom pametnog grada se može smanjiti potrošnja energije kroz implementaciju pametne rasvete, ali mora se imati u vidu da taj proces može imati i negativne ekološke posledice (degradacija zelenih površina zbog instalacije savremenih infrastruktura). Nesumnjivo, pametni gradovi pospešuju socijalnu održivost kroz poboljšanje dostupnosti javnih usluga i informacija, ipak potrebno je da donosioci odluka, naročito u zemljama u razvoju, budu svesni rizika da tehnološki napredak neće biti dostupan svim građanima i da se na taj način omogućava stvaranje digitalne podele, koja je već zastupljena širom sveta.

Analizirani koncept pametnog grada, prvenstveno je nastao kao odgovor na ekološke urbane izazove [10], ali trenutne prakse pametnog grada su uglavnom jednodimenzionalne sa fokusom na tehnologiji [17], pa se iz tog razloga dolazi do zaključka da se pod pametnim gradom podrazumeva integracija pametnih

tehnologija, poput Internet stvari (engl. *Internet of Things - IoT*) i informaciono-komunikacionih tehnologija, u cilju unapređenja kvaliteta života građana u urbanim sredinama. Strategija pametnog grada obično podrazumeva širi koncept koji obično uključuje sledeće elemente:

- pametno planiranje (pametni urbanizam),
- pametni privredni razvoj (inovacije i preduzetništvo)
- pametno upravljanje (donošenje odluka zasnovano na podacima),
- pametna i održiva životna sredina,
- pametna energetika (pametna proizvodnja i upotreba energije, energetska efikasnost, obnovljivi izvori energije, pametne mreže),
- pametno korišćenje resursa (cirkularna ekonomija)
- pametna saradnja i upravljanje,
- pametna mobilnost/informisanost/bezbednost,
- pametno zdravstvo, itd. [15].

Pametni gradovi obećavaju poboljšanje ekonomske, socijalne i ekološke situacije kroz povezanost gradskih usluga i infrastrukture digitalnim tehnologijama, ali postoji malo dokaza o njihovoj sposobnosti da poboljšaju socijalno blagostanje, izgrade pravedne i ravnopravne zajednice, smanje potrošnju resursa i generisanje otpada, poboljšaju kvalitet životne sredine ili smanje emisije gasova staklene baštne [18]. Trenutna praksa je takva da je većina pametnih gradova povezana sa ekonomskom održivošću, dok se ekološka i socijalna održivost ne uključuju u značajno meri [8]. Takođe, pregledom literature uočena je tehnocentrčnost pametnih gradova (konceptualizacije i prakse koja su u velikoj meri usredsredene na primenu IKT tehnologija), složenost primene pametnih gradova (veoma kompleksne ili čak neizvodljive prakse), ad-hoc konceptualizacija pametnih gradova (potpuno odsustvo ili veoma ograničeno sistemsko planiranje rada na izazovima održivosti pametnih gradova) [10]. Na način na koji se primenjuje koncept pametnog grada, značajan uticaj, globalno, imaju u velike međunarodne kompanije iz oblasti inženjerstva, izgradnje, tehnologije, itd. Iako je njihovo učešće u realizaciji koncepta pametnog grada potrebno i poželjno, njihov uticaj na donosioce odluka predstavlja mogući sukob interesa, što onda može uticati na pogrešne investicije ograničenih javnih sredstava [10].

Pametni održivi grad je novi tehno-urbani fenomen. Prema [19] da bi pametni grad bio i održiv, potrebno je da zadovoljava potrebe svojih sadašnjih i budućih stanovnika, ne prekoračujući lokalna i planetarna ograničenja životne sredine, a pri tom podržavajući primenu informaciono-komunikacionih tehnologija. Model pametnog i održivog grada (engl. *Smart Sustainable Cities - SSC*) treba posmatrati kao interdisciplinarni model, u kome je potrebno planirati urbanu sredinu uporedo promovišući pametni, održivi i inkluzivni rast primenom informaciono-komunikacionih tehnologija. Takav vid planiranja podrazumeva izradu, procenu i predviđanje organizovanog, koordinisanog i standardizovanog fizičkog uređenja urbanih sredina i osnova infrastrukturnih sistema, procesa, funkcija i usluga, odnosno izgrađenih formi (zgrade, ulice, kvartovi, stambeni i poslovni prostori, parkovi itd.), urbane infrastrukture (transport, vodosнabdevanje, komunikacioni sistemi, distribuirane mreže itd.), usluge ekosistema (energija, sirovine, voda, vazduh, hrana,

itd.), usluge građanima (javne službe, socijalne službe, kulturni objekti, itd.), i administracije [13]. Sistemska integracija eko-grada, grada znanja i digitalnog grada može rezultirati pametnim urbanističkim pristupom. Shodno tome, kroz uvođenje

informaciono-komunikacionih tehnologija, održivi gradovi mogu poboljšati različite aspekte svog urbanog planiranja i upravljanja (slika 3).



Slika 3. Ključne oblasti kojima se treba baviti u pametnom gradu prema principima održivosti [20]

Pregledom literature, može se zaključiti da primarni problem implementacije koncepta pametnih održivih gradova jeste nedostatak znanja kako da lokalne samouprave primene ideju pametnog grada, koja se zasniva na principima održivosti. Kategorizacija pametnih održivih gradova bi se vršila na osnovu rangiranja grada u različitim oblastima:

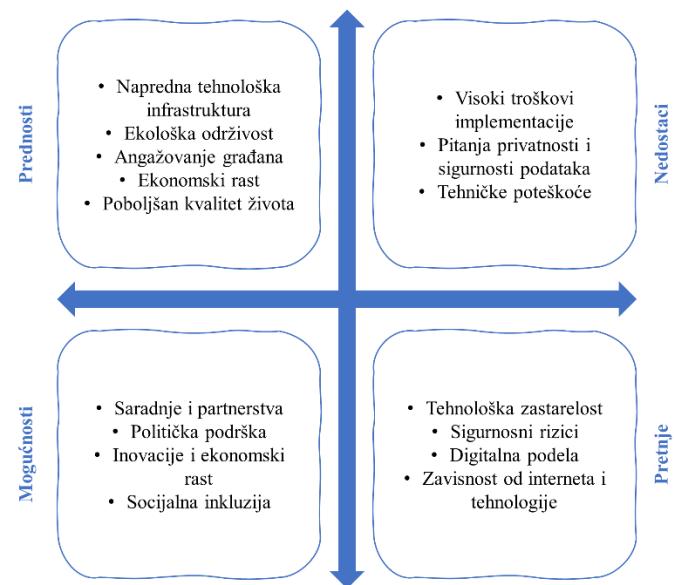
- razvoj i tehnološki napredak,
- ekološka, društvena i ekomska održivost,
- ekonomski i socijalni razvoj,
- kvalitet vazduha,
- energetska tranzicija ka obnovljivim izvorima energije,
- kvalitet života,
- količine generisanog otpada po glavi stanovnika,
- održivost vode,
- infrastruktura i umrežena tržišta,
- ekološke, ekomske i upravne performanse (engl. *Environmental, Social and Governance - ESG*)
- inteligentni gradski sistem.

Kako bi savremeni gradovi, zadovoljili što veći broj kriterijuma iz prethodno pobjrojanih oblasti, preporučuje se da pametni održivi gradovi treba da usvoje i model cirkularne ekonomije.

DISKUSIJA I SWOT ANALIZA PAMETNIH ODRŽIVIH GRADOVA

Pri analizi pametnih gradova, moguće je identifikovati različite prednosti, slabosti, šanse i pretnje, odnosno moguće je izvršiti SWOT analizu (engl. *Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats*) [21]. Kreirana SWOT matrica je prikazana na sliци 4. Na osnovu analiza stanja i procene rizika, koji su definisani u SWOT matrici na slici 4, zaključuje se koji su osnovni domeni u kojima je koncept pametnog grada napredovao (prednosti i

matrici na slici 4, zaključuje se koji su osnovni domeni u kojima je koncept pametnog grada napredovao (prednosti i mogućnosti), ali i oni domeni u kojima su potrebna značajna poboljšanja (nedostaci i pretnje).



Slika 4. SWOT faktori pametnog grada

Na osnovu analiza stanja i procene rizika, koji su definisani u SWOT matrici na slici 4, zaključuje se koji su osnovni domeni u kojima je koncept pametnog grada napredovao (prednosti i

mogućnosti), ali i oni domeni u kojima su potrebna značajna poboljšanja (nedostaci i pretnje).

Pod osnovnim *prednostima pametnog grada* smatra se napredna tehnološka infrastruktura, koja se već koristi (IoT, veštačka inteligencija, tehnologije velikih podataka) za poboljšanje efikasnosti i održivosti u različitim sektorima. Osim toga, ovi gradovi daju prioritet obnovljivim izvorima energije, smanjenju generisanja otpada, zelenim površinama i opcijama održivog transporta, što dovodi do smanjenog ekološkog otiska i negativnog uticaja na životnu sredinu. Prednost pametnog grada se ogleda i u angažovanju građana pomoću brojnih digitalnih platformi, omogućavajući im učestvovanje u procesima donošenja odluka i inicijativama koje imaju za cilj poboljšanje uslova života i sveukupne održivosti. Implementacija inovativnih, inteligentnih i održivih rešenja donosi ulaganja i različite investicije čime se kreiraju prilike za zapošljavanje u industrijskim sektorima koji se odnose na tehnologiju, održivost i urbanizaciju, zeleni razvoj. Sve navedeno za krajnji cilj ima unapređenje ukupnog kvaliteta života stanovnika u urbanim sredinama. Sa druge strane, pametni gradovi imaju i svoje *nedostatke*. Kao primarni nedostaci se svakako ističu visoki troškovi implementacije pametne infrastrukture i tehnologije, koji su naročito izraženi u gradovima sa ograničenim finansijskim resursima. Pametni održivi gradovi se zasnivaju na prikupljanju i korišćenju podataka, a što izaziva zabrinutost za prava na privatnost i ličnu bezbednost građana. Tehničke poteškoće mogu predstavljati barijeru pri razvoju pametnih gradova. Pod osnovnim *mogućnostima pametnih gradova* se svako izdvajaju brojne saradnje i partnerstva. Takođe, vlade i međunarodne organizacije sve više daju prioritet održivom urbanom razvoju, nudeći podsticaje i regulatorne okvire za podršku tranziciji ka pametnim i održivim gradovima. Implementacija pametnih tehnologija u cilju ostvarivanja održivosti u urbanim sredinama, može dovesti do inovacija, uštede troškova, stvaranja prihoda i novih poslovnih prilika utičući na ostvarivanje ekonomskog rasta. Socijalna inkluzija u pametnim i održivim gradovima predstavlja priliku za rešavanje društvenih nejednakosti. Brzi napredak u tehnologiji predstavlja *pretnju* za pametne urbane sredine, budući da se iz tog razloga zahteva kontinuirano ulaganje u istraživanje i već postavljenju infrastrukturnu. Sigurnosni rizici se ogledaju u kršenju privatnosti, krađi podataka, pokušajima sajber napada, itd. Pretnja pri razvoju pametnih gradova jeste i česta digitalna podela, odnosno nemoguće je omogućiti da svi stanovnici imaju pristup digitalnim tehnologijama ili da će biti digitalno obrazovani. Ono što predstavlja veliki problem u analiziranoj oblasti jeste što postoji konstantna zavisnost od interneta i tehnologije [22,23].

Što se tiče situacije u Republici Srbiji, osnovna zakonska regulativa na nacionalnom nivou postoji (Strategija održivog urbanog razvoja Republike Srbije do 2030. godine), i usaglašena je sa ciljevima održivog razvoja [24]. Predmet nastavka istraživanja bi moglo da bude praćenje primene Strategija na lokalnom nivou za šta u literaturi postoje i predlozi metodologiju koje bi mogle da se primene u Srbiji [8].

Kada su u pitanju pametni gradovi, u Srbiji ne postoji predlog takvog pristupa, ali bi trebalo obratiti pažnju na Strategiju razvoja veštačke inteligencije u Republici Srbije za period 2020.-

2025. godine [25] koja može biti korisna za prepoznavanje oblasti koje se mogu unaprediti kao i za kreiranja korisnih rešenja upotrebom veštačke inteligencije. Naravno uz striktno praćenje čuvanja i bezbednosti podataka, kao i ostalih do sada pobjrojanih nedostataka i pretnji kada su u pitanju pametni gradovi.

Sa druge strane, uočeno je da se u praksi odvijaju dva paralelna procesa: *centralizovani* (eng. *top-down*) kao što je memorandum sa Huavejem [26] ili nacionalni projekat *Cloud based smart city* [27,28] i *lokalne inicijative* koje se realizuju kroz lokalne projekte (eng. *bottom-up*) kao što je inicijativa grada Pirota i Stalne konferencije gradova i opština (SKGO) [29]. Ono što je zajedničko za oba procesa je da i o jednim i o drugim inicijativama zvaničnih podataka gotovo da nema.

III ZAKLJUČAK

Kao što je već napomenuto u prethodnom izlaganju, stiče se utisak da se primenom koncepta i implementacijom projekata pametnih gradova, fokus premešta sa postizanja ciljeva održivog razvoja na generisanje tehnocentričnih rešenja.

Uticak je i da se Srbija teško odupire lobiranju velikih tehnoloških kompanija koje nude IKT kao univerzalni lek i koje nude ideje za razvoj projekata pametnih gradova, ali ono što ohrabruje je stav lokalnih aktera i donosilaca odluka i njihovo razumevanje koncepta pametnog grada [30]. Iako se vidi napredak, podaci koji su digitalni i u smislenoj formi, u Srbiji se pronalaže u tragovima, što otežava edukaciju i predlaganje održivih i pametnih projekata od strane lokalnih samouprava.

Na osnovu sprovedene analize literature, može se istaći potreba za politikama koje promovišu saradnju i zajedničke ciljeve na lokalnom nivou, kako bi se pametne tehnologije usmerile ka stvarnoj održivosti i naglasila važnost pristupa razvoju pametnih gradova koji ne samo da se oslanjaju na tehnološke inovacije, već i na promišljenu političku volju i strateško planiranje usmereno na konkretne privredne, socijalne i ekološke izazove sa kojima se zajednice suočavaju. Ovakav pristup zahteva da se politike i inicijative za pametne gradove ne razvijaju izolovano ili samo na visokom, centralizovanom nivou, već da se aktivno uključuju lokalne zajednice, gradovi i regioni u definisanje problema koji su im specifični, kao i u traženju najprikladnijih rešenja. Ključ leži u priznavanju da pametne tehnologije same po sebi nisu univerzalni lek, već alati koji, ako se pravilno upotrebe, mogu doprineti ostvarivanju širih ciljeva održivosti. To podrazumeva uspostavljanje političkih okvira koji omogućavaju i podstiču učešće građana, transparentnost procesa donošenja odluka, kao i usklađivanje tehnoloških rešenja sa ekološkim i socijalnim potrebama gradova. Ovakav pristup zahteva promišljanje o načinu na koji se tehnologija primenjuje, sa ciljem kreiranja pametnih gradova koji su zaista održivi, pravedni i inkluzivni.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Rad je nastao zahvaljujući podršci Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije u okviru Ugovora za finansiranje naučnoistraživačkog rada zaposlenih u nastavi na akreditovanim visokoškolskim ustanovama u 2024. godini broj 451-03-65/2024-03/ 200107.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Pejanović, R. Održivi razvoj i visoko obrazovanje, Letopis naučnih radova Poljoprivrednog fakulteta, Vol. 38, No. 1, pp. 5-18, 2014. <https://scindeks-clanci.ceon.rs/data/pdf/0546-8264/2014/0546-82641401005.pdf> [pristupljeno 23.03.2024]
- [2] Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future Towards Sustainable Development. Part II. Common Challenges Population and Human Resources, <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf> [pristupljeno 05.04.2024]
- [3] United Nations - Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development, <https://sdgs.un.org/2030agenda> [pristupljeno 05.04.2024]
- [4] Raković, R., Petrović Bećirević, S. Energetski menadžment i ciljevi održivog razvoja, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 2, pp. 46-53, 2022. <https://doi.org/10.46793/eee22-2.46r>
- [5] U4SSC - A guide to circular cities, 2020, https://unicef.org/sites/default/files/2021-01/2020_A-Guide-to-Circular-Cities.pdf [pristupljeno 05.04.2024]
- [6] Sharifi, A., Allam, Z., Elias Bibri, S., Reza Khavarian-Garmsir, A. Smart cities and sustainable development goals (SDGs): A systematic literature review of co-benefits and trade-offs, Cities, Vol. 146, pp. 104659, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2023.104659>
- [7] World Bank - Urban Development 2023, <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview#2> [pristupljeno 05.04.2024]
- [8] Cai, M., Kassens-Noor, E., Zhao, Z., Colbry, D. Are smart cities more sustainable? An exploratory study of 103 U.S. cities, Journal of Cleaner Production, Vol. 416, pp. 137986, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137986>
- [9] United Nations - The Sustainable Development Goals Report 2023: Towards a Rescue Plan for People and Planet, <https://digitallibrary.un.org/record/4014344?ln=en&v=pdf> [pristupljeno 05.04.2024]
- [10] Yigitcanlar, T., Kamruzzaman, M., Foth, M., Sabatini-Marques, J., Da Costa, E., Ioppolo, G. Can cities become smart without being sustainable? A systematic review of the literature, Sustainable Cities and Society, Vol. 45, pp. 348-65, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.11.033>
- [11] Milošević, M., Milošević, D., Stević, D., Stanojević, A. Smart City: Modeling Key Indicators in Serbia Using IT2FS, Sustainability, Vol. 11, No. 13, pp. 3536, 2019. <https://doi.org/10.3390/su11133536>
- [12] Gabrys, J. Programming environments: Environmentality and citizen sensing in the smart city, Environment and Planning D: Society and Space, Vol. 32, No.1, pp. 30-48, 2014. <https://doi.org/10.1068/d16812>
- [13] Bibri, S., Krogstie, J. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review, Sustainable Cities and Society, Vol. 31, pp.183-212, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.02.016>
- [14] Bouzguenda, I., Alalouch, C., Fava, N. Towards smart sustainable cities: A review of the role digital citizen participation could play in advancing social sustainability, Sustainable Cities and Society, Vol. 50, pp.101627, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101627>
- [15] Trindade, E., Farias Hinnig, M., Moreira Da Costa, E., Sabatini Marques, J., Cid Bastos, R., Yigitcanlar, T. Sustainable development of smart cities: a systematic review of the literature, Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, Vol. 3, No.3, pp.1-14, 2017. <https://doi.org/10.1186/s40852-017-0063-2>
- [16] Kim, K-G. *Low-Carbon Smart Cities: Tools for Climate Resilience Planning*, Springer International Publishing, 2018. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-59618-1>
- [17] Yigitcanlar, T. *Technology and the City: Systems, applications and implications*, Routledge, London, 2016. <https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9781315739090>
- [18] Evans, J., Karvonen, A., Luque-Ayala, A., Martin, C., McCormick, K., Raven, R., Voytenko Palgan, Y. Smart and sustainable cities? Pipedreams, practicalities and possibilities, Local Environment, Vol. 24, No. 7, pp. 557-64, 2019. <https://doi.org/10.1080/13549839.2019.1624701>
- [19] Höjer, M., Wangel, J. Smart sustainable cities: Definition and challenges. ICT Innovations for Sustainability. Advances in Intelligent Systems and Computing, Vol. 310, pp. 333-49, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7_20
- [20] Belli, L., Ciffone, A., Davoli, L., Ferrari, G., Adorni, P., Di Nocera F., Dall Olio, A., Pellegrini, C., Mordacci, M., Bertolotti, E. IoT-Enabled Smart Sustainable Cities: Challenges And Approaches, Smart Cities Vol. 3, No. 3, pp. 1039-71, 2020. <https://doi.org/10.3390/smartcities3030052>
- [21] Nikolić, J., Gordić, D., Vukašinović, V., Josijević, M., Živković, D. Planiranje energetske budućnosti grada: SWOT analiza – Studija slučaja grada Kragujevca, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 25, No. 2, pp. 22-28, 2023. <https://doi.ub.kg.ac.rs/doi/10.46793/eee23-2-22n/>
- [22] Urdabaev, M., Utkelbay, R. SWOT analysis of smart city projects in capital cities of Russia and Kazakhstan, R-Economy, Vol. 7, No. 4, pp. 235-43, 2021. <https://doi.org/10.15826/recon.2021.7.4.021>
- [23] Mupfumira, P., Mutingi, M. A SWOT Analysis of Smart Cities Frameworks, in Proc. 4th African International Conference on Industrial Engineering and Operations Management, Lusaka, Zambia, April 4-6, 2023.
- [24] Strategija održivog urbanog razvoja Republike Srbije do 2030. godine, <https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SIGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/vlada/strategija/2019/47/1/reg> [pristupljeno 09.04.2024]
- [25] Strategija razvoja veštačke inteligencije, <https://www.srbija.gov.rs/tekst/437277> [pristupljeno 09.04.2024]
- [26] "Pametni gradovi" Srbije po kineskim standardima, <https://www.slobodnaevropa.org/a/pametni-gradovi-srbije-po-kineskim-standardima/31096262.html> [pristupljeno 08.04.2024]
- [27] Project | KSP(Knowledge Sharing Program), <https://www.ksp.go.kr/english/pageView/info-eng?listCount=10&page=0&srchText=&nationCd=RS> [pristupljeno 08.04.2024]
- [28] Razvoj pametnih gradova u Srbiji upotreboom modernih tehnologija, <https://www.srbija.gov.rs/vest/631987/razvoj-pametnih-gradova-u-srbiji-upotreboom-modernih-tehnologija.php> [pristupljeno 08.04.2024]
- [29] Pametnim rešenjima do pametnog grada - Započela izrada Strategije za uspostavljanje pametnog grada u Pirotu, <https://skgo.org/vesti/detaljno/3182/pametnim-resenjima-do-pametnog-grada-zapocela-izrada-strategije-za-uspostavljanje-pametnog-grada-u-pirotu> [pristupljeno 09.04.2024]
- [30] Pametni gradovi Srbije - Inovativnost i rezilijentnost lokalnih zajednica u Srbiji 2021. <https://www.freiheit.org/sr/western-balkans/pametni-gradovi-srbije> [pristupljeno 09.04.2024]

AUTORI/AUTHORS

- Angelina Cvetoanović** - istraživač-saradnik, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, angelina.pavlovic@uni.kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-5249-1102](https://orcid.org/0000-0001-5249-1102)
- dr Dubravka Živković** - docent, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, dubravka@uni.kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-0266-456X](https://orcid.org/0000-0002-0266-456X), autor za korespondenciju
- Minja Obradović** - diplomirani ekonomista, GrIT, obradovic[minya@gmail.com, ORCID [009-0007-0370-5558](https://orcid.org/009-0007-0370-5558)
- dr Davor Končalović** - vanredni profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, davor.koncalovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0003-1207-2653](https://orcid.org/0000-0003-1207-2653)
- dr Vladimir Vukašinović** - vanredni profesor, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, vladimir.vukasinovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6489-2632](https://orcid.org/0000-0001-6489-2632)
- dr Mladen Josijević** - docent, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, mladenjosijevic@gmail.com, ORCID [0000-0001-9619-0897](https://orcid.org/0000-0001-9619-0897)
- Nataša Sekulić** - diplomirani inženjer elektrotehnike, GrIT, nataša.sekulic@grit2022.rs, ORCID [0009-0008-3845-8689](https://orcid.org/0009-0008-3845-8689)

Urban Sustainable Development - Are Smart Cities Necessarily Sustainable?

Abstract – The intensive growth of the world's population in the 20th and 21st centuries and the expansion of cities indicate the importance they now have on socio-economic development. Therefore, cities become a segment of society whose sustainability is necessary to achieve the wider sustainability of the planet. In these efforts, special emphasis is placed on smart cities (those that actively embrace new technologies) as a potential solution to urban sustainability. Due to several reasons, the lack of knowledge of how local governments should apply the idea of a smart city, as well as the lack of evaluation of the sustainability results achieved by smart cities, it is still not clear whether smart city practices lead to environmental, economic and social sustainability. This paper aims to shed light on the question of whether cities can become smart while maintaining their unsustainability in the process. Through a systematic review of the literature on smart and sustainable cities, the current situation in the developed world was analysed and opportunities, threats, advantages and weaknesses were identified in terms of the implementation of the concept of sustainable development through smart cities.

Index terms – Urban sustainable development, Smart cities

Planiranje i rad elektroenergetskog sistema u uslovima velike proizvodnje električne energije iz solarnih elektrana

Bojan Ivanović*, Ilija Batas Bjelić**, Nikola Rajaković***, Tomislav Rajić***

* Elektroprivreda Srbije, Beograd, Srbija

** Institut tehničkih nauka SANU, Beograd, Srbija

*** Univerzitet u Beogradu-Elekrotehnički fakultet, Beograd, Srbija

Rezime - Pad cena solarnih panela na svetskom tržištu je doveo do izgradnje velikog broja solarnih elektrana u relativno kratkom vremenskom periodu. Zbog toga se ovaj tip obnovljivih izvora električne energije gradi znatno intenzivnije od drugih tipova elektrana. Instalirane snage solarnih elektrana variraju od onih najmanjih reda nekoliko kW koje se priključuju na distributivnu niskonaponsku mrežu, do onih velikih reda stotinu MW koje se priključuju na prenosni sistem. Ekspanzija izgradnje solarnih elektrana u Evropi i svetu menja dosadašnji profil proizvodnje električne energije i otvara pitanja balansiranja takve proizvodnje, njenog plasmana kao i buduće cene. Upravo je buduća tržišna cena električne energije koja će se proizvoditi u solarnim elektranama pitanje koje najviše interesuje investitore i na koje je najteže dati odgovor. S druge strane, postavlja se pitanje rada elektroenergetskog sistema u uslovima velike i promenljive proizvodnje solarnih elektrana. U radu se sagledava i sumira jedan broj pitanja vezanih za rad elektroenergetskog sistema u jugoistočnoj Evropi u uslovima velike proizvodnje električne energije iz solarnih elektrana.

Ključne reči – solarna elektrana, prenosni sistem, distributivni sistem, planiranje, balansiranje, varijabilna proizvodnja

I UVOD

Solarne elektrane (SE) karakteriše dnevno varijabilna učitavom opsegu instalirane snage i teško predvidiva proizvodnja na mesečnom i sezonskom nivou. Učešće elektrana sa varijabilnom proizvodnjom u visokom procentu u radu intekonekcije izaziva oscilacije sistemske učestanosti [1]. Relativno brzi pad cena solarnih panela doveo je do toga da mnoge države u svetu razmatraju scenarije u kojima će proizvodnja električne energije iz solarnih panela dostići čak 50% ukupne proizvodnje [2]. Upravo su ove činjenice koje otežavaju planiranje razvoja i rada kao i upravljanje elektroenergetskim sistemom (EES).

Planiranje razvoja EES u prisustvu velike instalirane snage SE na svim naponskim nivoima predstavlja poseban izazov jer se osim adekvatnog razvoja elektroenergetske mreže mora obezbediti odgovarajuće upravljanje sistemom. Osim regulacije varijabilne proizvodnje u SE putem konvencionalnih regulacionih elektrana, pre svih hidroelektrana (HE) i reverzibilnih HE, ovo upravljanje mora obuhvatiti i upravljanje potrošnjom i instalaciju skladišta energije, najčešće baterijskih skladišta. Razlog za to je što se u EES ne može obezbediti dovoljno regulacione energije u konvencionalnim regulacionim elektranama za instalirane snage

SE reda nekoliko hiljada MW. U Planu razvoja prenosnog sistema Republike Srbije za period 2023-2032 [3] predstavljeni su rezultati analize obezbeđenja potrebne balansne rezerve za dva scenarija: „prihvatljivi“ i „ambiciozni“.

Analizirana je mogućnost plasmana i izvoza velike snage iz obnovljivih izvora u EES Srbije u različitim scenarijima sa aspekta mogućnosti prenosne mreže [4]. Situacija u regionu jugoistočne Evrope, pa i šire, je utoliko složenija jer skoro sve države razmatraju izgradnju velikih instaliranih kapaciteta u SE i veliki izvoz električne energije iz svojih regulacionih oblasti reda nekoliko hiljada MW. Staviše, Mađarska na primer, već ima izgrađenih oko tri hiljade MW u SE. Put plasmana energije oвolike snage iz jugoistočne Evrope je još uvek prepostavka.

Trenutna situacija u prenosnim mrežama država jugoistočne Evrope je takva da se javljaju vrednosti napona iznad gornjih dozvoljenih granica [3]. Dakle, u velikom broju režima rada sistema u osnovnom stanju su narušena naponska ograničenja. Zbog toga nema nikakvog smisla govoriti o sigurnosti rada sistema i zadovolenju „N-1“ kriterijuma sigurnosti jer se ovaj kriterijum ispituje tek kada ne postoje preopterećenja grana mreže i narušenja naponskih ograničenja u osnovnom stanju. Pojava nedozvoljeno visokih napona ugrožava opremu kako operatora tako i korisnika sistema i traje već više od deset godina. Za priključenje novih korisnika velikih snaga neophodno je osnovne sistemske veličine, napone i struje (u ovom slučaju napone), dovesti u propisane granice. U suprotnom, sistem može biti doveden u mnogo teže stanje u kom su još veća narušenja propisanih ograničenja i u kom je sistemska oprema još ugroženija.

II BALANSIRANJE EES

Ustanovljeno je da su postojeći proizvodni kapaciteti u EES Srbije u mogućnosti da na zadovoljavajući način obezbede potrebnu balansnu rezervu za nivo kapaciteta obnovljivih izvora od 5800 MW [3]. Pri tom treba pomenuti da su, za obezbeđenje sekundarne i tercijarne rezerve, u obzir uzeti svi postojeći termokapaciteti na lignit koji bi u rezervi učestovali sa preko 1000 MW uz pretpostavku da je kvalitet energenta, odnosno uglja, nesporan. Ugalj u kolubarskom basenu je sve lošijeg kvaliteta jer su centralna ležišta izeksploatisana i se sada koriste tzv. obodna ležišta. Stoga pretpostavka nespravnog kvaliteta uglja u budućnosti nije opravdana. S druge strane, računato je da se veliki deo instalirane snage protočnih elektrana koristi za obezbeđivanje sekundarne i tercijarne rezerve. Na primer, za HE „Đerdap 1“ se uzima da učestvuje u ukupnoj rezervi sa 660 MW,

sto je više od polovine njegove instalisane snage. Kada je protok vode na Dunavu veći od $8000 \text{ m}^3/\text{s}$, što je obično u aprilu i maju kada se tope snegovi na planinama, HE „Đerdap 1“ bi sasvim sigurno morao da preliva kako bi održao ovu rezervu. A to, sa aspekta elektroenergetike kao celine, znači svesno neiskorišćavanje jednog obnovljivog resursa zarad rezerviranja drugog. Slična je situacija i sa HE „Bajina Bašta“ gde je računato da je kapacitet rezerve 343 MW što je 82% od ukupne instalisane snage ove elektrane ($4 \times 105 = 420 \text{ MW}$).

Nije opravdano poći od prepostavke ni da akumulacione i reverzibilne HE mogu da koriste svoj pun kapacitet za potrebe balansiranja jer se deo ovog kapaciteta mora koristiti i u druge svrhe. Međutim, svakako se može računati da veći deo kapaciteta ovih elektrana bude iskorišćen za potrebe balansiranja. Drugi deo balansnih kapaciteta se može obezbediti iz skladišta električne energije, prevashodno baterijskih, a treći deo u načinu eksploracije obnovljivih izvora tako da se uvek ostavi prostor za regulaciju, a ne da elektrana radi u skladu sa maksimalno raspoloživim resursom.

III TRENUTNO STANJE MREŽE 400 kV EES SRBIJE

Strateško razvojno opredeljenje po pitanju prenosne mreže je da se prenosna mreža 220 kV više ne razvija i da se stara 220 kV zamjenjuje 400 kV mrežom. S tim u vezi se očekuje i prelazak 220 kV mreže u zapadnoj Srbiji na 400 kV. Zbog toga će 400 kV mreža imati glavnu ulogu u perspektivi za prenos električne energije u Republici Srbiji.

Trenutno stanje opterećenosti prenosne 400 kV mreže u Republici Srbiji je takvo da je veći broj dalekovoda (DV) 400 kV, internih i interkonektivnih, slabo opterećen čak i u režimima rada maksimalnog opterećenja. U tekstu koji sledi je analizirano opterećenje DV 400 kV u režimima maksimalnog i minimalnog opterećenja u 2024. godini. Analiza je urađena na osnovu modela za proračun tokova snaga i naponskih prilika koji se u EMS-u prave za 24 sata za dan unapred. Za režim maksimalnog opterećenja je odabran najhladniji zimski dan u 19:30 (zimski večernji vrh), dok je za režim minimalnog opterećenja odabran 1. maj u 3:30 koji već godinama unazad va i kao dan sa najnižim konzumom. Između ova dva granična re ima rada EES nalaze se svi ostali režimi, tako da analizirajući opterećenja vodova 400 kV u ova dva re ima sti e se slika opsega u kojima se u toku godine kreće opterećenje vodova 400 kV.

Najniža temperatura u Beogradu, kao najvećem konzumnom području u Republici Srbiji je zabeležena 11. januara ove godine i iznosila je -7.1 C. Konzum Republike Srbije bez KiM u 19:30 je bio 5383 MW. Opterećenja DV 400 kV u prenosnoj mreži Srbije u 19:30 tog dana i njihove maksimalno dozvoljene struje prikazani su u narednoj tabeli. Ostaje nejasno zašto je maksimalno dozvoljena struja DV 400 kV TS „Subotica 3“ – TS „Sombor 3“ ograničena na 600 A. Vodovi su sortirani u opadajućem redosledu po nivou opterećenja. U tabeli nisu navođeni kratki DV 400 kV između pojedinih transformatorskih stanica (TS) i razvodnih postrojenja (RP), kao što su DV 400 kV TS „Obrenovac“ – RP „Mladost“ ili TE „Nikola Tesla B“ – RP „Mladost“. Ovi kratki DV 400 kV imaju male kapacitivnosti i samim tim mali uticaj na naponske prilike. Prikazana su

opterećenja 27 DV 400 kV. Najopterećeniji vod u sistemu je DV 400 kV HE „Đerdap 1“ – TS „Bor 2“ u iznosu od 50%.

Tabela 1. Opterećenja DV 400 kV u prenosnoj mreži Srbije u režimu maksimalnog opterećenja.

DV	I _{max} [A]	Optere�enje [%]
HE Đerdap 1 – TS Bor 2	1800	50
TS Bor 2 – TS Ni� 2	1920	38
TS Obrenovac – TS Kragujevac 2	1920	35
TS Pan�evo 2 – PRP Čibuk	1920	33
PRP Čibuk – RP Drmno	1920	30
TS Novi Sad 3 – TS Srbobran	1920	30
RP Drmno – TS Smederevo 3	1920	26
RP Mladost – TS Novi Sad 3	1920	23
TS Srbobran – TS Subotica	1920	21
TS Ni� 2 – TS Leskovac 2	1920	18
TS Beograd 8 – TS Beograd 20	1920	18
TS Kragujevac 2 – TS Jagodina 4	1920	17
TS Obrenovac – TS Beograd 8	1920	17
HE Đerdap 1 – RP Drmno	1800	16
TS Smederevo 3 – TS Beograd 8	1920	15
TS Sremska Mitrovica 2 – TS Ugljevik	1920	14
RP Mladost – TS Sremska Mitrovica 2	1920	13
TS Leskovac 2 – TS Vranje 4	1920	12
TS Sremska Mitrovica 2 – TS Ernestinovo	1920	12
TS Subotica 3 – TS Sombor 3	600	12
TS Vranje 4 – TS Štip	1920	10
TS Ni� 2 – TE Kosovo B	1920	7
TS Ni� 2 – TS Jagodina 4	1920	7
TS Subotica 3 – TS Šandorfalva	1920	7
TS Kragujevac 2 – TS Kraljevo 3	1920	6
TS Beograd 20 – TS Pan�evo 2	1899	4
TS Ni� 2 – TS Sofija	1920	3

Iz prethodne tabele se vidi da je 6 DV 400 kV opterećeno ispod 10%, opterećenje 7 DV je opsegom od 10% do 15%, a 5 DV je opterećeno u opsegu od 15% do 20%, dok je 9 DV opterećeno iznad 20%. Dakle, jedna trećina od ukupnog broja DV 400 kV je opterećena iznad 20%.

Poznata je činjenica da se podoptere eni, a relativno dugački, DV 400 kV ponašaju kapacitivno tako da injektiraju reaktivnu snagu u sistem podižući napone. Tako se, na primer, DV 400 kV TS „Subotica 3“ – TS „Sombor 3“ dužine oko 55 km, injektira oko 36 Mvar u TS „Subotica 3“ pri toku aktivne snage od 36 MW prema TS „Sombor 3“. Drugim re ima, tokovi aktivne i reaktivne snage po ovom DV 400 kV su skoro isti ali suprotnih smerova. Situacija sa velikim injektiranjem reaktivne snage u 400 kV mrežu je slična i na DV 400 kV TS „Leskovac 2“ – TS „Vranje 4“. Za tok aktivne snage od 150 MW iz pravca Leskovca prema Vranju tok reaktivne snage je oko 77 Mvar u suprotnom smeru.

U ovom režimu rada, na osnovu rezultata proračuna tokova snaga i naponskih prilika, nije bilo narušenja naponskih ograničenja.

Konzum Republike Srbije bez KiM u 3:30 je iznosio 2478 MW, što je oko 45% konzuma u režimu maksimalnog opterećenja (11. januar u 19:30). Opterećenja DV 400 kV sortirana u opadajućem redosledu u ovom režimu rada prikazana su u sledećoj tabeli.

Tabela 2. Opterećenja DV 400 kV u prenosnoj mreži Srbije u režimu minimalnog opterećenja.

DV	I _{max} [A]	Opterećenje [%]
TS Pančevac 2 – PRP Čibuk	1920	30
TS Beograd 20 – TS Pančevac 2	1899	29
RP Drmno – TS Smederevo 3	1920	26
TS Obrenovac – TS Beograd 8	1920	26
RP Mladost – TS Sremska Mitrovica 2	1920	26
TS Smederevo 3 – TS Beograd 8	1920	23
HE Đerdap 1 – TS Bor 2	1800	19
PRP Čibuk – RP Drmno	1920	18
TS Bor 2 – TS Niš 2	1920	17
TS Novi Sad 3 – TS Srbobran	1920	15
TS Beograd 8 – TS Beograd 20	1920	14
RP Mladost – TS Novi Sad 3	1920	13
TS Niš 2 – TS Jagodina 4	1920	12
TS Srbobran – TS Subotica	1920	11
TS Niš 2 – TE Kosovo B	1920	11
TS Sremska Mitrovica 2 – TS Ernestinovo	1920	9
TS Subotica 3 – TS Sombor 3	600	9
TS Sremska Mitrovica 2 – TS Ugljevik	1920	8
TS Subotica 3 – TS Šandorfalva	1920	8
TS Kragujevac 2 – TS Kraljevo 3	1920	8
TS Obrenovac – TS Kragujevac 2	1920	7
HE Đerdap 1 – RP Drmno	1800	7
TS Vranje 4 – TS Štip	1920	7
TS Kragujevac 2 – TS Jagodina 4	1920	6
TS Niš 2 – TS Leskovac 2	1920	5
TS Niš 2 – TS Sofija	1920	5
TS Leskovac 2 – TS Vranje 4	1920	2

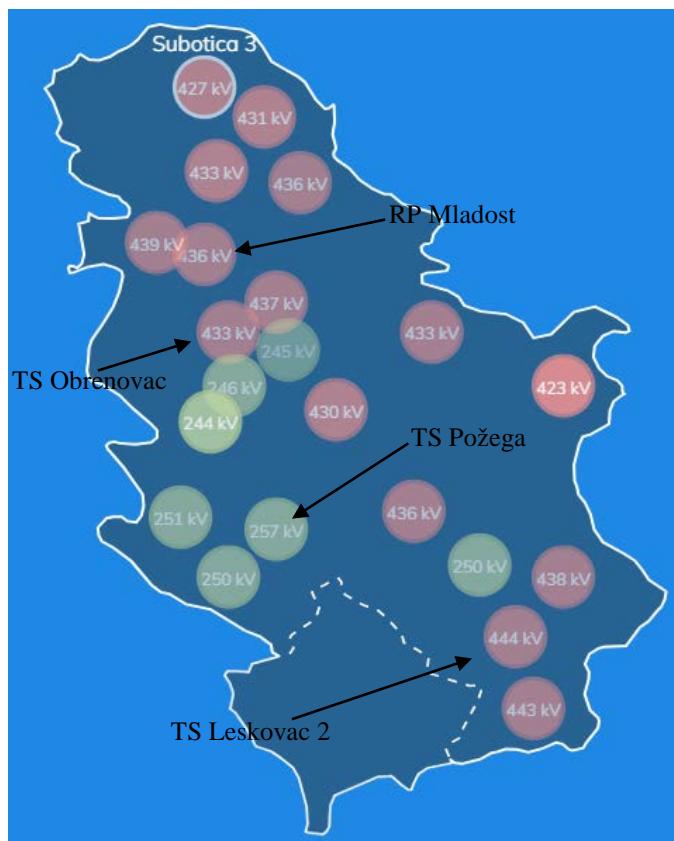
Najopterećeniji DV 400 kV u prenosnoj mreži je TS „Pančevac 2“ – priključno RP (PRP) „Čibuk“ u iznosu od 30%. Dvanaest DV 400 kV je opterećeno ispod 10%, 6 je opterećeno u opsegu između 10% i 15%, 3 u opsegu od 15% do 20%, dok je 6 DV opterećeno preko 20%.

U ovom režimu rada zabeležena su narušenja gornjih naponskih ograničenja koja nisu velika. Na primer, najveća vrednost napona je na 400 kV sabirnicama TS 400/110 kV „Beograd 20“ i iznosi približno 424 kV što je 4 kV više od gornje dozvoljene vrednosti od 420 kV [5]. Za nijansu manje ali vrlo blisko narušenje gornjeg naponskog ograničenja od oko 4 kV je i na 400 kV sabirnicama TS 400/220 kV „Beograd 8“.

Vrednosti napona koje su dobijene proračunom se u dobroj meri razlikuju od onih koje su zabeležene merenjima i koje se mogu naći na službenom EMS-ovoј sajtu, odnosno na aplikaciji Energy Flux (<https://ems.energyflux.rs/#voltage-profiles>). Na narednoj slici su prikazane naponske prilike u 400 kV i 220 kV prenosnoj mreži za 1. maj u 4:00. Slika je preuzeta iz arhive Energy Flux aplikacije. U svim čvorovima prenosne mreže naponi su iznad gornjih dozvoljenih vrednosti.

Najveća izmerena vrednost napona u 400 kV mreži je TS „Leskovac 2“ i iznosi 444 kV, dok je najveća izmerena vrednost napona u 220 kV mreži u TS „Požega“ i iznosi 257 kV. Proračunata vrednost napona na 400 kV sabirnicama TS „Leskovac 2“ iznosi 421 kV, a na 220 kV sabirnicama TS „Požega“ iznosi 242 kV. Apsolutne razlike izmerenih i proračunatih napona su velike: za 400 kV sabirnice TS

„Leskovac 2“ ova razlika je 23 kV, a 17 kV za 220 kV sabirnice TS „Požega“. U relativnom iznosu razlika izmerenih i proračunatih vrednosti se kreće do 8%.



Slika 1. Naponi u prenosnoj mreži Republike Srbije dana 1.5.2024. u 4:00.

Razlog postojanja razlike proračunatih i izmerenih vrednosti mogu biti neadekvatno zadate vrednosti napona u PV čvorovima u simulacionom modelu ili loša merenja. Merenja su svakako pod znakom pitanja jer je prema njima napon na 400 kV sabirnicama u TS „Obrenovac“ 433 kV, a u RP „Mladost“ 436 kV. Ova dva čvora su električno bliska jer su povezana sa dva DV 400 kV dužine oko 5.3 km i razlika napona između njih je u opsegu 0.3-0.5 kV, što je za red veličine manje od one koja se dobija merenjem. Proračunata vrednost napona 1. maja 2024. u 3:30 na 400 kV sabirnicama TS „Obrenovac“ je 419.6 kV, a u RP „Mladost“ 420 kV.

EMS je doneo odluku, radi regulacije previsokih napona, da se prilikom projektovanja novih TS, RP i PRP predviđi prostor za ugradnju prigušnica [3]. S druge strane, Elektroprivreda Srbije ugrađuje kondenzatorske baterije za kompenzaciju reaktivne snage radi popravke faktora snage. Kondenzatorske baterije se skoro automatski ugrađuju u sve nove TS 10(20)/0.4 kV radi kompenzacije reaktivne energije samog transformatora koji se ponaša kao prigušnica. Drugim rečima, operator prenosnog sistema (OPS) ugrađuje prigušnice radi snižavanja napona dok operator distributivnog sistema (ODS) ugrađuje kondenzatorske baterije koje povećavaju napon. Treba reći da se radi o jednom sistemu i da je podela na OPS i ODS veštačka o čemu najbolje govori to da linija razgraničenja između ovih operatora skoro nigde u Evropi nije ista.

Pre razmatranja perspektivnih scenarija razvoja prenosne mreže u kojima bi se integrisao visok nivo OIE neophodno je srediti stanje u postojećoj mreži tako da naponi budu u propisanim granicama i da bude zadovoljen kriterijum sigurnosti. U suprotnom, može se napraviti situacija mnogo lošija od postojeće u kojoj će elektrane ispadati sa sistema usled previšokih napona [6] i gde će oprema operatora i korisnika biti permanentno degradirana.

Regionalnom studijom regulacije napona, koja nije javno dostupna, izabran je tzv. „OPS pristup“ u kom svaki OPS kompenzuje samog sebe po pitanju reaktivne snage u svojoj prenosnoj mreži i određeno da se na 400 kV sabirnice u TS 400/110 kV „Vranje 4“ ugradi promenljiva šant prigušnica instalisane snage 100 Mvar. Napon je lokalne prirode što znači da regulacija napona u jednom čvoru nema velikog efekta na električno udaljene čvorove. U sledećoj tabeli je dat prikaz kako prigušnica, instalisane snage 100 Mvar i priključena na 400 kV sabirnice TS „Vranje 4“, menja napon na 400 kV sabirnicima TS „Vranje 4“, TS „Leskovac 2“ i TS „Niš 2“ u jednom režimu rada.

Tabela 2. Uticaj prigušnice snage 100 Mvar.

TS	U [kV] (pre uključenja)	U [kV] (nakon uključenja)	ΔU [kV]
TS Vranje 4	418.6	411.1	7.5
TS Leskovac 2	415.1	411.3	3.8
TS Niš 2	412.6	410.7	1.9

Iz prethodne tabele se vidi da prigušnica snage 100 Mvar snižava napon na 400 kV sabirnicama TS „Vranje 4“ za 7.5 kV, dok je njen uticaj na sniženje napona u TS „Niš 2“ manji od 2 kV. To znači da ova prigušnica neće rešiti pitanje visokih napona u južnoj Srbiji jer je, na primer, za dovođenje napona na 400 kV sabirnicama u TS „Leskovac 2“ sa 444 kV (slika 1) na 420 kV potrebno sniziti napon za 24 kV dok ga prigušnica instalirana na 400 kV sabirnice u TS „Vranje 4“ snižava nešto manje od 4 kV.

IV PLASMAN ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ PERSPEKTIVNIH OBNOVLJIVIH IZVORA

Integracija perspektivnih SE i vetroelektrana (VE) velike instalisane snage u Republici Srbiji u različitim scenarijima za 8784 sata (prestupna godina od 366 dana) analizirana je pomoću softvera EnergyPLAN i CASE [4]. Softver EnergyPLAN je korišćen za definisanje scenarija koji se uvoze u softver CASE radi raspodele zbirne proizvodnje pojedinih tipova elektrana (HE, VE, SE ...) po pojedinačnim elektranama u simulacionom modelu i proračune tokova snaga i naponskih prilika. Aspekti balansiranja nisu razmatrani već tokovi snaga i naponske prilike u EES Srbije za plasman snage iz obnovljivih izvora, odnosno SE i VE, u iznosima od 4000 MW do 9000 MW [4]. Za balansnu elektranu oblasti kojom je regulisan zadati nivo razmene odabrana je HE „Đerdap 1“ a sve elektrane su modelovane kao izvori na svojim visokonaponskim sabirnicama. Zaključeno je, između ostalog, da se iz EES Srbije može izvesti snaga od 5000 MW u različitim scenarijima uz ukupno angažovanje SE i VE u iznosu od približno 6000 MW. Ovaj rezultat je blizak onom koji je dobijen kada je analizirana mogućnost integracije obnovljivih izvora sa aspekta balansiranja [3].

Put plasmana, odnosno pravac i smer tokova snaga, velikih

količina električne energije iz obnovljivih izvora u regionu jugoistočne Evrope je dobrim delom u domenu prepostavke. Imajući u vidu pad broja stanovnika u svim državama jugoistočne Evrope kao i pad industrijske potrošnje za očekivati je da će se viškovi električne energije iz jugoistočne Evrope plasirati van ovog regiona. Ako dođe do masovnog prelaska sa automobila sa unutrašnjim sagorevanjem na elektromobile onda će značajan i najveći konzum električne energije u Evropi činiti upravo elektromobili. Pošto je inicijativa za ovaj prelazak najsnaznija u naprednim državama Evropske Unije (Nemačka, Holandija, Belgija, Francuska ...) očekuje se da bi pravac i smer tokova snaga iz jugoistočne Evrope mogao biti najveći delom prema severu. Manjim delom bi se plasirao preko podmorskih jednosmernih kablova između Crne Gore i Italije, čiji je trenutni kapacitet 500 MW a očekuje se da bude 1000 MW u konačnoj fazi, i Grčke i Italije kapaciteta 500 MW.

Cenu električne energije u budućnosti, ako dođe do masovne izgradnje SE, je teško predvideti ali se može očekivati da dođe do njenog pada pogotovo u dnevnim režimima kada su sunčani dani u čitavom regionu. Zbog toga će skladišta električne energije i postrojenja za proizvodnju vodonika imati veliku ulogu u jednom ovakovom scenaru razvoja. Ono što je sigurno je to da će ekonomski aspekti odrediti veličinu i put plasmana električne energije iz obnovljivih izvora.

Trenutni tok snage u 400 kV mreži u jugoistočnoj Srbiji je od HE „Đerdap 1“ preko TS „Bor 2“ prema TS „Niš 2“ i TS „Leskovac 2“ u svim režimima rada, od režima maksimalnog do režima minimalnog opterećenja. Drugim rečima, u trenutnom stanju snaga kroz 400 kV mrežu u jugoistočnoj Srbiji teče u smeru sever-jug. Pošto južna Srbija ima dobar stepen insolacije i jeftino zemljište za očekivati je da se u ovom delu Srbije grade SE velikih instalisanih snaga. To znači da će ove SE rasteretiti 400 kV mrežu jugoistočnoj Srbiji imajući u vidu da će se sva proizvodnja veća od nivoa za podmirenje lokalne potrošnje plasirati na sever. Takođe se može očekivati da solarne elektrane iz Severne Makedonije plasiraju snagu u ovom pravcu i smeru. To je još jedan razlog zbog kog se očekuje rasterećenje 400 kV mreže u jugoistočnoj Srbiji i eventualno promena smera toka snaga kroz nju.

V ZAKLJUČAK

U radu je prikazana problematika rada postojećeg EES Srbije sa aspektima nedozvoljeno visokih napona. U prenosnoj mreži EES Srbije se svakodnevno, bez obzira na režim rada, javljaju naponi iznad gornjih dozvoljenih ograničenja. Nedozvoljeno visoki naponi degradiraju opremu operatora i korisnika sistema i ugrožavaju siguran rad. Ugradnja jedne prigušnice od 100 Mvar na 400 kV sabirnicama u TS „Vranje 4“ neće rešiti problem nedozvoljeno visokih napona u EES Srbije.

Naponi u postojećoj prenosnoj mreži Republike Srbije se moraju dovesti u dozvoljene opsege da bi se mogla planirati integracija novih izvora velikih instalisanih snaga. U suprotnom, stanje u sistemu može postati lošije nego što je sada sa bitno smanjenim skupom operativnih i planerskih mera koje se mogu preduzeti radi dovođenja prenosnog sistema u stanje normalnog rada.

Naponske prilike u sistemu se ne mogu rešiti ugradnjom

nekoliko prigušnica u određenim tačkama zbog lokalne prirode napona. To mora biti sveobuhvatna akcija OPS-a, ODS-a, postojećih i perspektivnih elektrana i korisnika sistema kako bi se na nivou čitavog sistema postigao efekat.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Janković, S., Ivanović, B. Implementacija i razvoj pravila za priključenje generatorskih jedinica koje su preko invertora povezane na mrežu u Nemačkoj, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 23, No. 4, pp. 59-63, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-4.59J>
- [2] Frew, B., Cole, W., Denholm, P., Frazier, A.W., Vincent, N., Margolis, R. Sunny with a Chance of Curtailment: Operating the US Grid with Very High Levels of Solar Photovoltaics, iScience, Vol. 21, pp. 436-447, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2019.10.017>
- [3] EMS AD. Plan razvoja prenosnog sistema Republike Srbije za period 2023-2032, Beograd, jun 2023, <https://ems.rs/wp-content/uploads/2024/03/Plan-razvoja-pren.-sistema-2023-2032-finalx.pdf> [pristupljeno 23.04.2024]
- [4] Rajaković, N., Ivanović, B., Batas Bjelić, I., Rajić, T. Sprega simulacionog planerskog alata sa alatom za proračun tokova snaga: Studija slučaja Republike Srbije, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 25, No. 2, pp. 16-21, 2023, <https://doi.org/10.46793/EEE23-2.16R>
- [5] EMS AD, Pravila o radu prenosnog sistema, Beograd, 2017. <https://ems.rs/pravila-o-radu-prenosnog-sistema-2/> [pristupljeno 23.04.2024]
- [6] EMS AD. Plan razvoja prenosnog sistema Republike Srbije za period 2021-2030, Beograd, jan. 2022, <https://ems.rs/wp-content/uploads/2022/07/Plan-razvoja-prenosnog-sistema-2.pdf> [pristupljeno 23.04.2024]

AUTORI/AUTHORS

- dr Bojan Ivanović**, ODS Elektroprivreda Srbije, bojan.b.ivanovic@ods.rs, ORCID [0009-0008-4743-8559](https://orcid.org/0009-0008-4743-8559)
- dr Ilija Batas Bjelić**, naučni saradnik, Institut tehničkih nauka SANU, iliija.batas-bjelic@itn.sanu.ac.rs, ORCID [0000-0002-4747-7186](https://orcid.org/0000-0002-4747-7186)
- prof. dr Nikola Rajaković**, redovni profesor u пензији, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija, rajakovic@etf.rs, ORCID [0009-0004-2268-4631](https://orcid.org/0009-0004-2268-4631)
- dr Tomislav Rajić**, docent, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija, rajic@etf.rs, ORCID [0000-0003-4796-4117](https://orcid.org/0000-0003-4796-4117)

Power System Planning and Operation in Case of High Electricity Production in Solar Power Plants

Abstract – Drop of solar panels prices at the world marked has caused construction of large number of solar power plants in relatively short time period. That is the reason why this type of renewable electricity sources is constructed far intensively than the other types of power plants. Capacities of solar power plants vary from those of several kW that are connected to distribution low voltage grid, to large ones, the capacities of which are order of magnitude of hundreds of MW, connected to transmission system. Expansion of solar power plants construction in Europe and world changes current electricity production profile opening questions of balancing of such production, its evacuation and future price. Future market price of electricity produced in solar power plants is the issue the investors are the most interested in and which is the most difficult to answer. On the other side, issue is raised about power system operation in conditions of large and variable solar power plants production. The paper considers and summarizes a number of issues related to power system operation in Southeast Europe in case of large electricity production in solar power plants.

Index terms – Solar power plant, Transmission system, Distribution system, Planning, Balancing, Variable production

Izrada energetske mape raspoloživih biomasnih sirovina u geografskom informacionom sistemu (GIS)

Srećko Ćurčić*, Aleksandar Peulić**,***

* Fakultet tehničkih nauka, Čačak, Univerzitet u Kragujevcu

** Geografski fakultet, Univerzitet u Beogradu

*** Prirodno matematički fakultet, Univerzitet u Kragujevcu

Rezime - Za racionalnu upotrebu raspoloživih biomasnih resursa za energetsko korišćenje, potrebno je: prikupljanje, priprema i transport u periodu je energetski potencijal najveći. Dobijanje informacija o vrsti, lokaciji i količini raspoloživih energenata bez razvijene ENERGETSKE MAPE je vrlo sporo i nepouzdano. Zbog toga je značajno kreiranje ENERGETSKE MAPE na definisanoj teritoriji, koja bi služila za potrebe zainteresovanih kompanija i lokalnih samouprava. U ovom radu koristi se besplatan softver QGIS i Geo Python za formiranje tabele koja se stalno ažurira s ciljem kreiranja GIS energetske mape raspoloživih biomasnih sirovina. Primena ove metodologije omogućava efikasnu analizu i upravljanje resursima biomase. Kreirana mapa pruža važne informacije o dostupnosti i lokacijama biomasnih sirovina, omogućavajući bolje planiranje i odlučivanje u vezi s upotrebotom ovih resursa u energetske svrhe. U radu je opisana procedura formiranja forme za korisnike raspoloživih biomasnih sirovina u cilju dobijanja zavisnosti energetskog potencijala od procenta vlažnosti za izvorne resurse i interpretacija rezultata kroz dobijanje ažurnih podataka o vrsti, energetskim potencijalima otpadnih biomasnih sirovina na izvornim lokacijama.

Ključne reči – Biomasa, energetska masa, GIS

I UVOD

U današnjem svetu, u kojem se suočavamo sa sve većim izazovima u vezi sa energetskom održivošću i zaštitom životne sredine, pronalaženje efikasnih načina korišćenja obnovljivih izvora energije postaje od suštinskog značaja. Jedan od ključnih resursa koji se ističe svojom potencijalnom ulogom u održivom energetskom lancu je biomasna energija. Biomasna energija, koja se dobija iz organskih materijala kao što su biljke, šumske biomase i otpadni materijali, predstavlja važan resurs za proizvodnju električne energije, grejanje i druge energetske potrebe. Međutim, optimalno iskorišćenje ovih resursa zahteva detaljno razumevanje njihove dostupnosti, lokacija i potencijala.

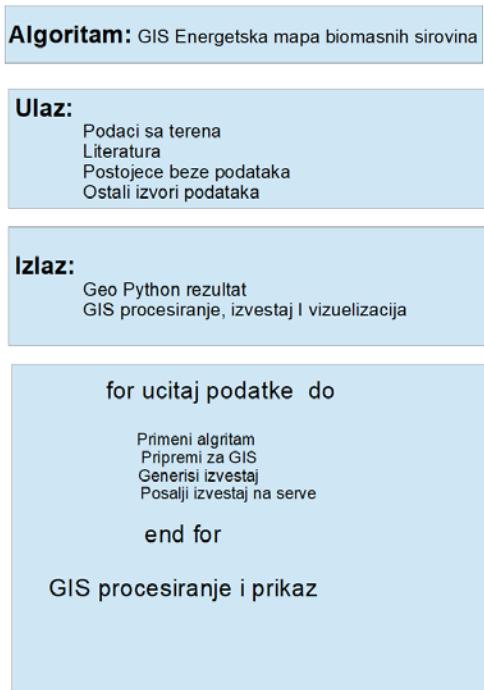
U ovom radu istražuje se metodologija za kreiranje GIS energetske mape raspoloživih biomasnih sirovina kao ključnog alata u optimizaciji korišćenja biomasne energije. Fokusira se na proces prikupljanja, analize i vizualizacije podataka o biomasnim resursima kako bismo omogućili efikasno planiranje i upravljanje ovim ključnim energetskim izvorima. Kroz primenu besplatnog softvera poput QGIS i Geo Python, pružamo praktičan pristup kreiranju dinamične i ažurirane GIS energetske mape koja će biti od koristi zainteresovanim kompanijama, lokalnim

samoupravama i drugim relevantnim akterima. Ovaj rad takođe istražuje načine interpretacije rezultata, pružajući konkretne smernice za efikasno korišćenje biomasnih resursa u cilju postizanja energetske održivosti i zaštite životne sredine. Kroz integraciju geoprostornih tehnologija i energetske strategije, ovaj rad doprinosi razumevanju i promociji održivih energetskih rešenja koja su ključna za budućnost našeg društva. Na teritoriji Republike Srbije postoje razni izvori otpadnih biomasnih sirovina. Izvori otpadnih biomasnih sirovina stvaraju se: održavanjem puteva, u primarnoj i sekundarnoj poljoprivrednoj proizvodnji, u rečnim vodotocima, kod privrednih i komunalnih sistema, u redovnoj seći šuma (panjevi i granje), u industriji prerade drveta, u klanici industriji itd [1]. Za racionalnu upotrebu raspoloživih resursa potrebno je obezbediti: prikupljanje, pripremu i transport kada je energetski potencijal za korišćenje najveći. Problem u regionu je neupotreba ili neracionalna upotreba otpadnih biomasnih sirovina. Primer: Nakon branja malina i kupina u Srbiji, imamo rezniče koje se vrlo malo ili uopšte ne koriste za energetske svrhe. Dostupne količine rezniča nakon branja maline od voćnjaka na oko 18.000 hektara u Srbiji svake godine su oko $35 \cdot 10^6$ kg [2]. Energetski potencijal ovih resursa je blizu energetskog potencijala bukve i hrasta. Korišćenje otpadnih biomasnih sirovina značajno bi uticalo na podizanje tehnološkog nivoa u energetskom sektoru, mašinogradnji i prehrambenoj industriji. Takođe, korišćenjem ovih resursa može se uticati na pospešivanje razvoja nedovoljno razvijenih regiona koji se može postići kroz: investicionu realizaciju, zapošljavanje lokalne radne snage, otvaranje novih radnih mesta, poboljšanje lokalne infrastrukture i ostvarivanje prihoda kroz različite proizvodne poslove. Kreiranje GIS energetske mape raspoloživih biomasnih sirovina, treba da omogući odgovarajućim privrednim subjektima pristup ažurnim podacima o: raspoloživim vrstama, količinama i lokaciji otpadnih biomasnih sirovina. Na osnovu dobijenih podataka kompanije na različitim nivoima, će analizirati mogućnost otkupa po odgovarajućoj ceni i definisanom vremenu isporuke. Takođe, u direktnoj komunikaciji sa vlasnikom raspoloživih resursa definiše se model organizacije pripreme i preuzimanja sirovina. Danas se u Srbiji biomasni ostaci vrlo malo ili uopšte ne koriste, što se direktno odražava na značajno zagađenje životne sredine [2,3]. Navedeni ostaci mogu se prvenstveno koristiti kao izvor energije, ali i za neke druge namene. Korišćenjem ovih ostataka, emisija CO₂ i drugih štetnih gasova bi se značajno smanjila, a imali bi i energente čija bi cena bila znatno niža u odnosu na konkurențe. Realizacija projektnih aktivnosti zahtevaće definisanje svih lokacija na kojima se javljaju otpadne drvene i

poljoprivredne sirovine na definisanoj teritoriji, a do njih se može doći, radom na terenu i korišćenjem odgovarajućih literaturnih i softverskih izvora za prikupljanje podataka za odgovarajuće sirovine. Na osnovu prikupljenih podataka i obradom u Geo Python-u kreiraće se baza koja je dostupna za analizu korišćenje besplatnog GIS alata, Qgis. Kreirana baza predstavljaće osnovu za proširenje novim podacima [4,5]. Kada se definišu, lokacije, vrste i količine ulaznih sirovina korišćenjem kreirane Geo Python aplikacije i GIS alata, biće omogućeno definisanje logističke veze za njihovo odgovarajuće racionalno korišćenje. Takođe, za racionalno korišćenje raspoloživih resursa, kreiranjem baze podataka biće omogućeno definisanje pripremnih tehnologija.

II METOD

Na slici 1. prikazan je dijagram toka definisane procedure.



Slika 1. Dijagram toka prdlozenog algoritma

Definisanu bazu podataka, mogu da korise odgovarajuće kompanije koje će analizirati mogućnost otkupa po odgovarajućoj ceni i definisanim vremenu isporuke raspoloživih enerenata. Takođe, u direktnoj komunikaciji sa vlasnikom raspoloživih resursa definiše se model organizacije pripreme i preuzimanja sirovina. Primena razvijenog koncepta smanjiće se troškovi nabavke za odgovarajuću kompaniju koja je zainteresovana za otkup raspoloživih sirovina. Sasvim je realno, da će opravdanost korišćenja odgovarajućih otpadnih biomasnih sirovina na definisanoj teritoriji, za odgovarajuće korišćenje, pokazati opravdanost kroz finansijsko-ekonomsku analizu opravdanosti, Ekološku opravdanost korišćenja (smanjenje emisije ugljen dioksida i drugih štetnih gasova u atmosferu), omogućiće se zapošljavanje radne snage za realizaciju predviđenih aktivnosti za korišćenje raspoloživih resursa. Raspoloživi otpadni biomasni ostaci mogli bi da se koriste za razne namene.

III REZULTATI

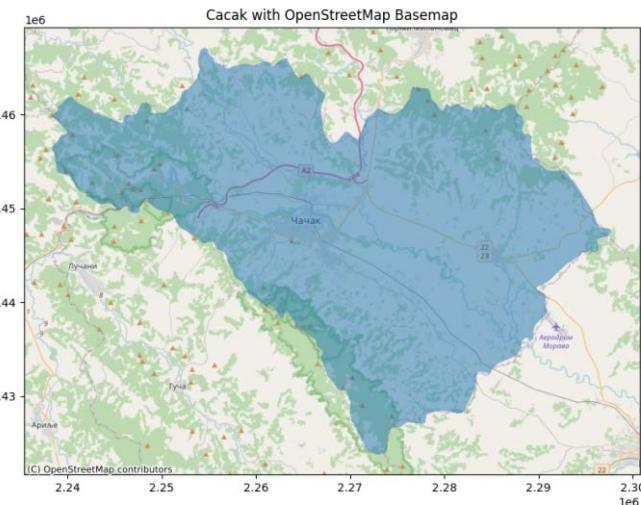
Na teritorijama lokalnih samouprava Moravičkog imamo raspoložive energetske potencijale od otpadne drvene i biljne biomase i to:

- za Čačak oko 10 TJ/god,
- za Ivanjicu oko 15 TJ/god,
- za Lučane oko 10 TJ/god,
- za Gornji Milanovac oko 10 TJ/god.

Do gore navedenih podataka došlo se proučavanjem naučnih radova i studija, bez uvida gde nastaju izvori sirovina sa količinama i vrstama. Za potrebe ovog rada prikazana je obrada podataka na teritoriji opštine Čačak. Za učitavanje i obradu podataka koristi se aplikacija napisana korišćenjem bestplatnog softvera, Python i odgovarajućih biblioteka. Biblioteka Geopandas omogućava rad sa geoprestornim podacima I definisanje geografskog područja na kome se analiziraju potencijali bio mase. Slika 2. prikazuje učitvanje definisane geografske lokacije, što je u ovom radu područje opštine Čačak.



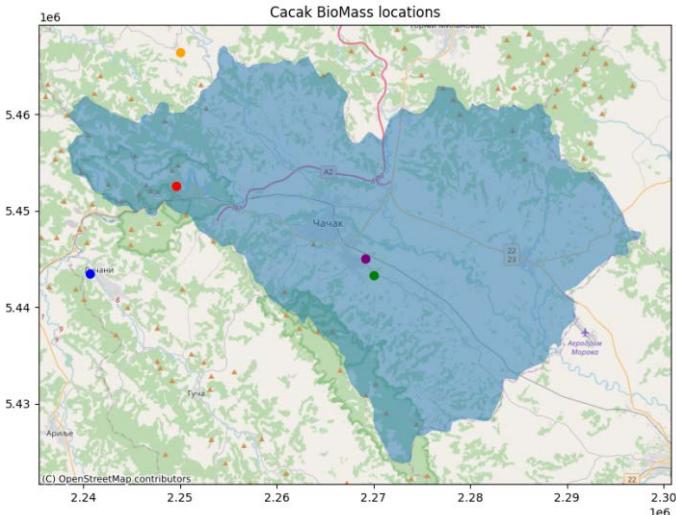
Slika 2. Geografska pozicija regiona istraživanja



Slika 3. Geografska pozicija regiona istraživanja na OpenStreetMap podlozi

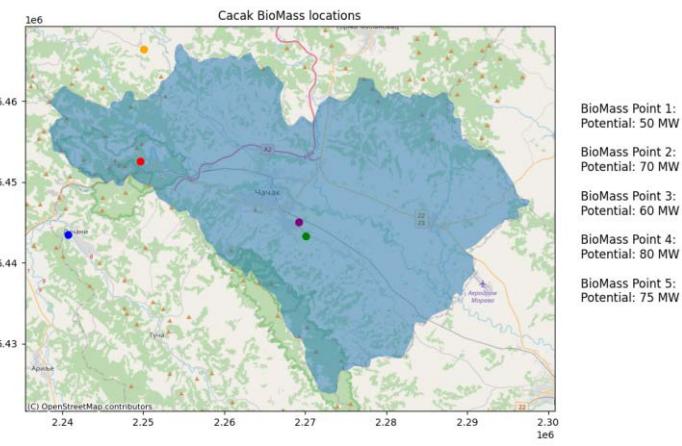
U ovom radu akcenat se stavlja na korišćenje besplatnog

softvera, pa se za podlogu koristi OpenStreetMap podloga, koja se automatski učitava u aplikaciju, nakon definisanja koordinatnog sistema za Republiku Srbiju, samim tim i opštine Čačak. Na slici 3. prikazana je teritorija od interesa na OpenStreetMap podlozi.



Slika 4. Geografska pozicija definisanih lokacija biomase na OpenStreetMap podlozi

Implementacijom definisanih algoritama za procenu i analizu potencijala bio mase u Geo Python aplikaciju, moguće je izračunati energetski potencijal bio mase za svaku definisaniu lokaciju, koje predstavljaju test u cilju demonstracije predložene implementacije, kao prvi rezultat na slici 5. prikazan je potencijal bio mase na reprezentativnom uzorku za potrebe ovog rada.

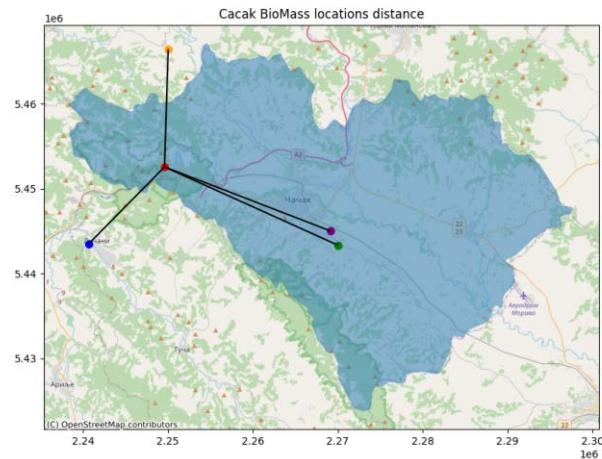


Slika 5. Potencijal resursa bio mase na test lokacijama

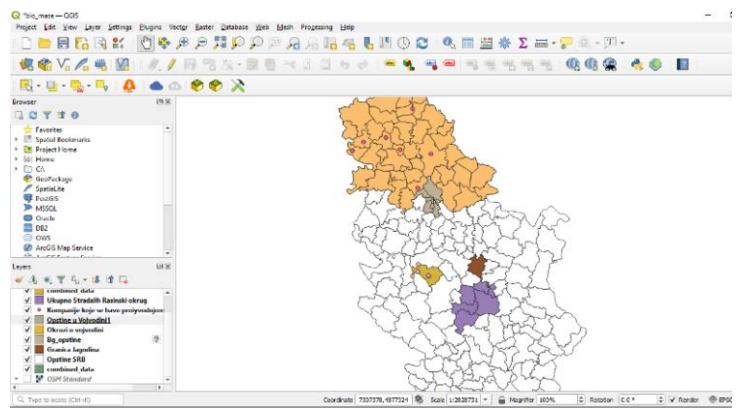
Terenskim istraživanjem, korišćenjem savremenih tehnoloških sistema za definisanje lokacije, čuvanje i prenos podataka za obradu, definisano je nekoliko testnih lokacija. Za prikazivanje lokacija biomase u opštini Čačak na mapi, prvo se učitava geoprostorni podatak koji sadrži geometriju opštine Čačak. Zatim se definišu koordinate tačaka koje predstavljaju lokacije biomase, kao što su a primer, bukva, višnja, malina, vinograd i klanica. Nakon toga, kreiran je GeoDataFrame koji sadrži ove lokacije.

Rayličite boje su definisane za svaku lokaciju što omogućava vizuelnu preglednost. Zatim je kreirana mapa koja prikazuje geometriju opštine Čačak sa podacima transformisanim u odgovarajući koordinatni referentni sistem, sa transparentnošću od 0.5. Nakon toga, dodaju se tačke na mapu za svaku definisaniu lokaciju biomase, sa odgovarajućom bojom i veličinom markera, kao i pozadinska mapa sa OpenStreetMap servisa i postavlja se naslov mape, Slika 4.

Vizualizacija udaljenosti između regiona u cilju planiranja transporta na primer predstavlja još jedan rezultat analize. Ova udaljenost je predstavljena linijama koje povezuju tačke na mapi i predstavlja udaljenost u kilometrima u konkretnom slučaju. Ovaj prikaz udaljenosti omogućava bolje razumevanje prostornih odnosa između lokacija biomase u opštini Čačak. Detaljni prikaz ovog aspekta koda možete videti na slici 6.



Slika 6. Prikaz prostornog odnosa i udaljenosti



Slika 7. Prikaz energetske mape na test lokacijama

Za realizaciju kompletne energetske baze koristi se odgovarajući GIS softver, QGIS, koji pristupa bazi podataka realizovanih za svaku potencijalnu lokaciju na teritoriji Republike Srbije korišćenjem opisane aplikacije realizovane pomoću Geo Python resursa. Na slici 7. prikazan je primer učitanih i prikazanih resursa bio mase na teritoriji Republike Srbije, za teritoriju opštine Čačak, Jagodina, Vojvodina i Beograd. Na ovaj način

prikazan je koncept predložen u ovom radu na nekoliko regionalnih podataka i ažuriranje energetske mape.

III ZAKLJUČAK

Za racionalno korišćenje raspoloživih resursa u odgovarajuće energetske svrhe, digitalizacija sektora je nasušna potreba da bi se izgradila pametna energetska infrastruktura ukojоj je decentralizacija proizvodnje jedanod važnih principa, a ona će omogućiti da lokalno proizvedeni zeleni kWh električne energije ne opterećuju prenosne mreže. Održiva strategija rasta ne treba da je vezana s eksploracijom istrošivih resursa. Posebno je to važno za našu zemlju i za region. Održivost energetskog sektora ostaje trajni cilj zajedno sa poznatim konceptima sigurnosti isporuke i razvoja konkurentnosti u energetskom sektoru.

ZAHVALNICA / ACKNOWLEDGEMENT

Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS, ugovor br. 451-03-66 / 2024-03 / 200132 čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerzitet u Kragujevcu/

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Zekić, V., Rodić, V., Jovanović, M. Potentials and economic viability of small grain residue use as a source of energy in Serbia, Biomass and bioenergy, Vol. 34, No. 12, pp. 1789-1795, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.07.012>
- [2] Ćurčić, S., Gavrilović, R., Nikolić, D., Trifunović, I. Raspoloživi energetski potencijali od drvene i biljne bio-mase sa teritorije Opštine Čačak, Energija, ekologija, ekonomija, Vol. 18, No 3-4, pp. 331-339, 2016.
- [3] Ćurčić, S., Blagojević, M., Analiza i predviđanje energetskog potencijala od drvene i poljoprivredne biomase primenom veštačkih neuronskih mreža, Energija, ekologija, ekonomija, Vol. 20, No 1-2, pp. 623-626, 2018.
- [4] Rey, S. J., Anselin, L. PySAL: A Python Library of Spatial Analytical Methods, in Fischer, M., Getis, A. (Eds.). *Handbook of applied spatial analysis*, pp. 175-193, Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [5] McClain B. P., *Python for geospatial data analysis*, O'Reilly Media, 2023

AUTORI/AUTHORS

dr Srećko Ćurčić, redovni profesor, Fakultet tehničkih nauka Čačak, Univerzitet u Kragujevcu, srecko.curcic@ftn.kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-6632-293X](https://orcid.org/0000-0002-6632-293X)

dr Aleksandar Peulić, redovni profesor, Geografski fakultet, Univerzitet u Beogradu, Prirodno matematički fakultet, Univerzitet u Kragujevcu aleksandar.peulic@gef.bg.ac, ORCID [0000-0003-3043-6879](https://orcid.org/0000-0003-3043-6879)

Creation of an Energy Map of Available Biomass Raw Materials in a Geographic Information System (GIS)

Abstract – For the rational utilisation of available biomass resources for energy production, it is crucial to collect, process, and transport them at times when the energy potential is highest. Obtaining information on the type, location and quantity of available energy sources is slow and unreliable without a developed ENERGY MAP. Therefore, the creation of an ENERGY MAP for a given area is of great importance and serves the needs of interested companies and local self-governments. In this paper, the GIS software QGis and Geo Python are used to create a table that is constantly updated to create a GIS energy map of available biomass resources. The application of this methodology enables efficient analysis and management of biomass resources. The generated map provides important information about the availability and locations of biomass resources, allowing for better planning and decision making regarding their utilisation for energy purposes. The paper describes the process of creating a form for users of available biomass feedstocks to determine the dependence of energy potential on the moisture content of the source resources, and the interpretation of the results by obtaining up-to-date data on the type and energy potential of waste biomass feedstocks at the source sites.

Index Terms – Biomass, Energy map, GIS

Prenaponska zaštita objekata priključenih na niskonaponsku mrežu

Nikola Tanasković, Iva Batić, Tomislav Rajić

Univerzitet u Beogradu-Elekrotehnički fakultet

Rezime - Atmosferska pražnjenja predstavljaju prirodnu pojavu sa kojom se ljudi suočavaju još od svog nastanka. U pogledu uticaja na elektroenergetsku mrežu i elektronske uređaje predstavljaju negativan efekat zbog velike energije koju pražnjenje sa sobom nosi. Kako je elektroenergetski sistem (EES) sve razgranatiji i rasprostiraniji, tako je i mogućnost potencijalnih udara u njegove elemente sve veća. Atmosferska pražnjenja se ne mogu spreciti, ali adekvatnim poznavanjem mehanizma pražnjenja možemo uticati na njihovo kontrolisanje, odnosno pravilnim projektovanjem prihvavnog sistema i izborom zaštitnih uređaja možemo u dobroj meri spreciti veće štetne posledice. Cilj ovog rada je da ponudi pregled zaštitnih uređaja koji štite od prenapona, odvodnika prenapona u elektroenergetskom sistemu. Sve je veća potreba za automatizacijom pri izboru odvodnika prenapona, te shodno tome raste i broj softverskih alata koji se baziraju na konceptima koji predlažu vodeći svetski proizvođači. U radu je prikazan i koncept zaštite objekata u niskonaponskim mrežama, kao i prateći softverski alat za automatizovan izbor zona zaštite i gromobranske instalacije.

Ključne reči - atmosferska pražnjenja, odvodnici prenapona, distributivna mreža

I UVOD

Atmosferska pražnjenja predstavljaju prirodnu pojavu sa kojom se ljudi suočavaju još od svog nastanka. U pogledu uticaja na elektroenergetsku mrežu i električne (elektronske) uređaje predstavljaju negativan efekat zbog velike energije koju pražnjenje sa sobom nosi. Kako je elektroenergetski sistem (EES) sve razgranatiji, tako je i mogućnost potencijalnih udara u njegove elemente sve veća [1]. Atmosferska pražnjenja se ne mogu spreciti, ali adekvatnim poznavanjem mehanizma pražnjenja može se uticati na njihov efekat, odnosno pravilnim projektovanjem prihvavnog sistema i izborom zaštitnih uređaja možemo u dobroj meri spreciti veće štetne posledice.

Cilj ovog rada jeste da se ponudi pregled zaštitnih uređaja koji štite od prenapona – odvodnika prenapona (kompletan postupak/algoritam izbora u zavisnosti od svih ključnih parametara) u elektroenergetskom sistemu [2]. Sve je veća potreba za automatizacijom pri izboru odvodnika prenapona, što će u radu biti potkrepljeno softverskim alatima koji se baziraju na konceptima koji predlažu vodeći svetski proizvođači. Nakon toga, biće predviđeni i koncepti zaštite objekata u niskonaponskim mrežama [3, 4], kao i prateći softverski alat za automatizovan izbor zona zaštite i gromobranske instalacije.

U drugom poglavlju biće prikazan princip odabira odvodnika prenapona na visokom naponu. Ovo je važno za zaštitu

energetskih transformatora prenosnog odnosa X/0,4 kV. Treća poglavje daje odgovor na pitnje kako se izvodi spoljašnja gromobranska instalacija kod niskonaponskih objekata. Selekcijski nivo zaštite je posebna tema koja je obrađena u četvrtom poglavlju. U petom poglavlju su prikazani rezultati softvera koji je kreiran u MATLAB okruženju zarad automatizacije odabire potrebnog nivio gromobranske zaštite. Na kraju je dat zaključak i korišćena literatura.

II IZBOR ODVODNIKA PRENAPONA U DISTRIBUTIVnim MREŽAMA

Odvodnici prenapona predstavljaju uređaje (aparate) koji imaju nelinearne otpornike (varistore) vezane prema zemlji. Pri nailasku prenapona smanjuju svoju otpornost i na taj način odvode deo energije u zemlju. Nestankom prenapona, otpornost im se vraća na prvobitnu vrednost. Danas su u upotrebi metaloksidni odvodnici prenapona (MOP), jer za razliku od klasičnih silicijum-karbidičnih (SiC) imaju jednostavniju konstrukciju, i ispoljavaju bolje zaštitne karakteristike [2]. Neke od glavnih prednosti su nepostojanje iskrišta i povoljniji oblik naponsko-strujne (U-I) karakteristike.

Da bi odgovarajući delovi sistema bili pravilno zaštićeni od prenapona (atmosferskih i sklopnih), mora se izvršiti adekvatan izbor odvodnika prenapona na osnovu parametara mreže koji podrazumevaju najviši radni napon mreže, njenu konfiguraciju, način uzemljenja (efikasno uzemljena, mreža sa izolovanom neutralnom tačkom, uzemljena preko impedanse), kao i trajanje privremenih prenapona koji se u toj mreži pojavljuju. Odabir odvodnika prenapona je bitan za zaštitu energetskih transformatora X/0,4 kV.

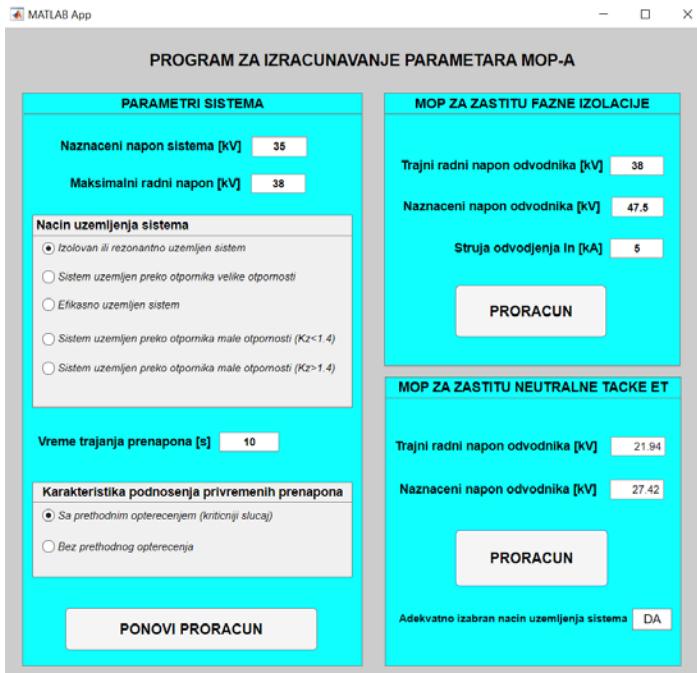
Izbor MOP-a vrši se u tri koraka [2]:

1. određivanje parametara sistema,
2. provjeru uslova rada pri havarijskim uslovima,
3. izbor trajnog radnog napona odvodnika i naznačenog napona odvodnika prenapona.

Najvažniji parametar koji opisuje sistem jeste maksimalni dozvoljeni radni napon koji je obično (5-20) % viši od naznačenog (nominalnog) napona sistema. On predstavlja efektivnu vrednost međufaznog (linijskog) napona. Pod privremenim prenaponima podrazumevaju se naponi koji su veći od maksimalno dozvoljenog radnog napona industrijske učestanosti. Nazivaju se još i kvazistacionarni ili povremeni (u engleskoj literaturi Temporary Overvoltages - TOV). Javljuju se pri zemljospojevima (u mrežama sa izolovanom neutralnom tačkom), naglom rasterećenju sistema, usled ferorezonantnih pojava u kolima sa izraženim nelinearnim karakteristikama magnetećenja transformatora, ili pri prekidu jedne ili dve faze.

Pod uslovima rada pri havarijskim uslovima se podrazumeva da

u uzemljenom sistemu može doći do pojave viših prenapona od očekivanih na neoštećenim faznim provodnicima. Ovaj slučaj se može javiti pri razemljivanju neutralnih tačaka transformatora koji rade u paraleli, što predstavlja neefikasno uzemljenje sistema.



Slika 1. Prozor programa za izbor odvodnika prenapona prema uputstvu firme ABB

Prema postupku proračuna koji predlaže ABB, bira se trajni radni napon U_c , a zatim na osnovu njegove vrednosti i kataloških podataka, sledi izbor naznačenog napona odvodnika U_r . U zavisnosti od načina uzemljenja neutralne tačke sistema, trajni radni napon U_c se određuje na sledeće načine [2]:

1) Izolovan ili rezonantno uzemljen sistem:

$$U_c \geq U_s. \quad (1)$$

2) Sistem uzemljen preko otpornika velike vrednosti otpornosti:

$$U_c \geq \frac{U_s}{K_{TOV,c}}, \quad (2)$$

gde je $K_{TOV,c}$ – koeficijent podnošenja privremenih prenapona.

3) Sistem uzemljen preko otpornika male vrednosti otpornosti ili efikasno uzemljen sistem ($K_Z < 1.4$):

$$U_c \geq \frac{K_Z U_s}{K_{TOV,c} \sqrt{3}} = \frac{1.4 U_s}{K_{TOV,c} \sqrt{3}}. \quad (3)$$

4) Sistem uzemljen preko otpornika male vrednosti otpornosti koji nema ravnometerno vrednost $K_Z < 1.4$. U ovim okolnostima, trajni radni napon se određuje kao u slučaju 2. Ako je struja kvara mala, pa nema automatskog isključenja, trajni radni napon odvodnika prenapona se može odrediti na osnovu relacije:

$$U_c \geq U_s. \quad (4)$$

5) Sistem uzemljen preko otpornika male vrednosti otpornosti za $K_Z > 1.4$

$$U_c \geq \frac{1.05 * U_s}{K_{TOV,c}}, \quad (5)$$

gde 1,05 predstavlja faktor rezerve u izboru trajnog radnog napona odvodnika prenapona.

U svih pet slučajeva, na osnovu određenog trajnog radnog napona U_c , bira se prva veća vrednost iz kataloga, a na osnovu nje i odgovarajuća kataloška vrednost naznačenog napona odvodnika prenapona U_r .

Na Slici 1 prikazan je prozor programa, realizovan u MATLAB okruženju.

Program je realizovan u cilju automatskog odabira odvodnika prenapona. Kreiran je prateći uputstvo izbora koji predlaže ABB. U ovom programu može se preciznije definisati način uzemljenja sistema (potrebno je izabrati jedan od pet mogućih načina koji su teorijski objašnjeni). Vremensko trajanje prenapona i u ovom slučaju, treba stavljati na 10 s jer se radi o distributivnim mrežama, a takođe je omogućen izbor karakteristike podnošenja privremenih prenapona u skladu sa prethodnim opterećenjem.

III SPOLJAŠNJA GROMOBRANSKA INSTALACIJA

U prethodnom poglavljiju su predstavljeni odvodnici prenapona kao i kompletan postupak za njihov izbor, kao bitan segment zaštite od prenapona u distributivnim mrežama. Kao nastavak zaštite od prenapona, u ovom poglavljju će pažnja biti posvećena zaštiti niskonaponskih potrošača (objekata) od direktnog atmosferskog pražnjenja predstavljanjem spoljašnjeg sistema gromobranske instalacije. Sačinjavaju je:

- prihvativi sistem,
- spusni provodnici,
- sistem uzemljenja.

Osnovna funkcija prihvativog sistema jeste prihvatanje atmosferskog pražnjenja. Postojanjem prihvativog sistema značajno se smanjuje verovatnoća direktnog atmosferskog pražnjenja u štićeni prostor. Prihvativi sistemi mogu biti izrađeni od bilo koje kombinacije sledećih elemenata [3]:

- štapnih hvataljki ili štapnih hvataljki sa pojačanim dejstvom,
- razapetih žica,
- mreže provodnika.

U praksi su najčešće primenu našli prihvativi sistemi sastavljeni od mreže provodnika. Kod ovakve primene, mreža se deli na okca odgovarajućih dimenzija koje zavise od potrebnog nivoa zaštite objekta. U Tabeli 1 su prikazane potrebne dimenzije okca, u zavisnosti od zone zaštite (I-IV).

Tabela 1. Maksimalne dozvoljene dimenzije okaca mreže provodnika u zavisnosti od zaštitnog nivoa

Nivo zaštite	Dimenzije okca [m]
I	5x5
II	10x10
III	15x15
IV	20x20

Uloga spusnih provodnika jeste da vrši sponu između prihvativog sistema i sistema uzemljenja, odnosno da sprovede energiju atmosferskog pražnjenja između dva sistema.

Ukoliko se prihvati sistem sastoji od mreže provodnika, spusni provodnici treba da se rasporede po obimu štićenog prostora, tako da između svakog spusnog provodnika bude približno jednak rastojanje koje je određeno klasom (nivoom zaštite). U Tabeli 2 su navedene vrednosti potrebnog rastojanja među spusnim provodnicima, a sve u zavisnosti od nivoa zaštite.

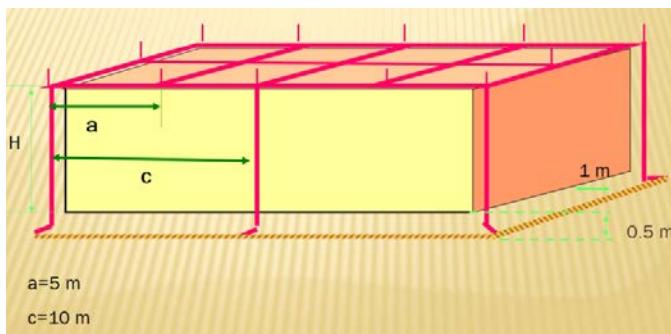
Spusni provodnici mogu se postaviti na sledeće načine:

- ako je zid izrađen od nezapaljivog materijala, mogu biti postavljeni na ili u zidu,
- ako je zid izrađen od zapaljivog materijala, mogu biti postavljeni na zidu, pod uslovom da povećanje temperature spusnih provodnika tokom provođenja struje atmosferskog pražnjenja nije opasno za materijal zida, i
- ako je zid izrađen od zapaljivog materijala i ako je povećanje temperature spusnog provodnika opasno za materijal zida, rastojanje između spusnih provodnika i najbližih delova štićenog prostora mora da bude duže od 10 cm (nosači za učvršćenje, izrađeni od metala, mogu biti u kontaktu sa zidom) [4].

Već postojeći elementi objekta se mogu iskoristiti kao prirodni spusni provodnici: metalne mase, metalni kostur objekta, povezane čelične armature objekta, elementi fasada, profili i nosači metalnih fasada. Na Slici 2 može se primetiti da pošto je u pitanju nivo zaštite I, dimenzije okaca mreže su 5×5 m ($a=5$ m), a maksimalno dozvoljeno prosečno rastojanje između susednih spusnih provodnika je $c=10$ m.

Tabela 2. Maksimalno dozvoljeno rastojanje između susednih spusnih provodnika

Nivo zaštite	Razmak između spusteva [m]
I	10
II	10
III	15
IV	20



Slika 2. Primer postavljenih okaca mreže kao elemenata prihvativnog sistema i spusnih provodnika za klasu zaštite I

Sistem uzemljenja predstavlja poslednji deo spoljašnje gromobranske instalacije. Osnovna funkcija sistema uzemljenja jeste da energiju atmosferskog pražnjenja odvede u okolnu zemlju. Najbolje rešenje i kompletну zaštitu od atmosferskih pražnjenja i zaštitu električnih instalacija niskog napona pruža integrisana sjedinjena struktura raznih sistema uzemljenja. Ukoliko iz određenih razloga, sistemi uzemljenja moraju biti

odvojeni, u takvim okolnostima mora se izvršiti njihovo međusobno povezivanje korišćenjem provodnika za izjednačenje potencijala, pri čemu se primenjuju odgovarajući propisi i standardi. Neki od najčešće korišćenih tipova uzemljivača su [3]:

- radijalni uzemljivači,
- temeljni uzemljivači,
- vertikalni uzemljivači,
- jedan ili više prstenastih uzemljivača.

Instalacije uzemljivača: Spoljašnji prstenasti uzemljivač bi trebalo da bude najmanje na 0,5 m dubine i najmanje 1 m udaljen od zidova objekta (Slika 2). Uzemljivači se moraju postaviti izvan štićenog prostora i rasporediti što pravilnije, najmanje 0,5 m ispod površine, tako da se međusobna dejstva svedu na minimum. Uzemljivači moraju biti postavljeni tako da za vreme izvođenja dopuštaju kontrolu.

IV ODREĐIVANJE POTREBNOG NIVOA ZAŠTITE OBJEKTA

U ovom delu biće obrađen algoritam za određivanje potrebnog nivoa zaštite objekata, koji kasnije direktno ukazuje na koji način treba modelovati gromobransku instalaciju i njene elemente, a sve u cilju zaštite objekta u okviru zaštitne zone kojoj objekat pripada. Ono što svaku zonu zaštite definiše je potrebna računska efikasnost gromobranske instalacije, i označava se sa *Er*.

Prvi korak

Izračunavanje učestalosti direktnog udara groma u objekat je moguće izvršiti na osnovu sledeće relacije:

$$N_d = N_g * A_e * C_d * 10^{-6} \text{ [broj udara/god]} \quad (6)$$

gde su:

N_g [broj udara/km²] – prosečna gustina atmosferskog pražnjenja za određenu geografsku oblast na kojoj se objekat nalazi,

A_e [m²] – ekvivalentna prihvativa površina objekta,

C_d – faktor lokacije objekta koji daje informaciju o blizini posmatranog objekta i drugih objekata.

Parametar N_g se najčešće izračunava primenom relacije:

$$N_g = 0,1 * T_d \quad (7)$$

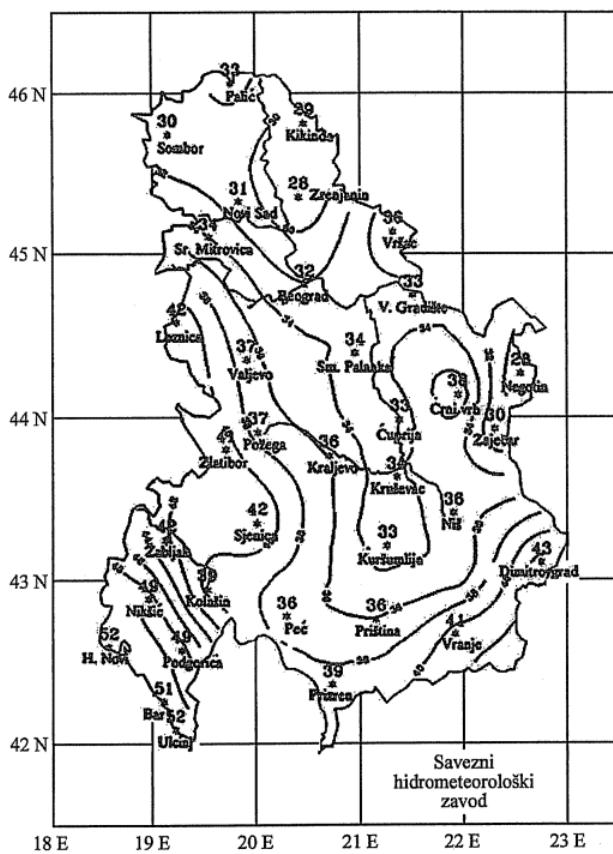
gde je: T_d – prosečan broj dana sa grmljavinskom aktivnošću karakterističan za neku geografsku oblast, i određuje se sa posebno formiranim izokerauničkim karata jednostavnim očitavanjem za lokaciju od interesa (Slika 3).

Za usamljene objekte, ekvivalentna prihvativa površina predstavlja oblast ograničenu punom linijom na slici 4. Za objekte različitog geometrijskog oblika i karakteristika postoje eksperimentalni izrazi u funkciji dimenzija samog objekta (dužina, širina, visina). Konkretno za objekat sa ravnim krovom, čije su dimenzije: dužina – L , širina – W , visina – H , može se upotrebiti sledeći izraz za izračunavanje ekvivalentne prihvativne površine:

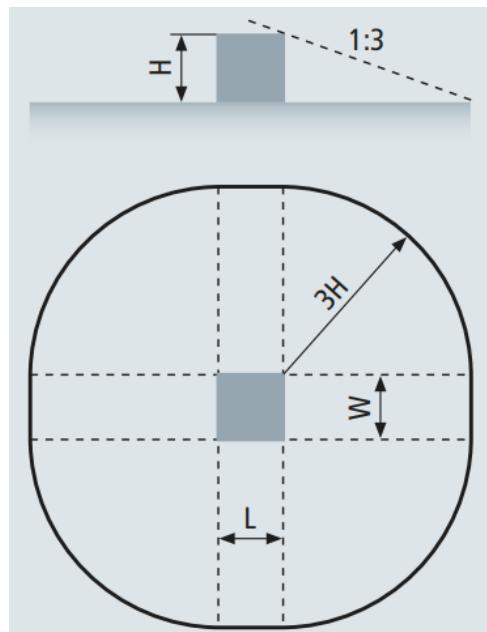
$$A_e = L * W + 6H(L + W) + 9\pi * H^2 \quad (8)$$

Odgovarajući ilustrativni primer određivanja ekvivalentne prihvativne površine, nalazi se na Slici 4. Parametar C_d može imati

vrednosti 0,25, 0,5, 1 ili 2 u zavisnosti da li je usamljen ili okružen visokim objektima.



Slika 3. Izokeraunička karta SR Jugoslavije u periodu 1950 – 1981 [7]



Slika 4. Ekvivalentna prihvativa površina objekta sa ravnim krovom [6]

Cilj drugog koraka jeste izračunavanje usvojene vrednosti udara groma – N_c , na osnovu analize opasnosti od štete koju atmosfersko praznjenje može izazvati. Vrednost ovog parametra određuje se na osnovu koeficijenata koji daju informaciju o konstrukciji objekta i njegovog krova, sadržaju objekta i njegove zapaljivosti, nameni objekta i posledice udara groma na objekat i uticaja na okolinu. Vrednosti svih koeficijenata nalaze se u Tabelama 3-6 [3, 4].

Tabela 3. Vrednosti koeficijenta C_1 u zavisnosti od konstrukcije objekta i vrste krova

Vrsta konstrukcije objekta			
Konstrukcija objekta/Krov	Metalni	Kombinovani	Zapaljivi
Metalna konstrukcija	0,5	1	2
Kombinovana	1	1	2,5
Zapaljiva	2	2,5	3

Tabela 4. Vrednosti koeficijenta C_2 u zavisnosti od sadržaja objekta

Sadržaj objekta	
Bez vrednosti i nazapaljiv	0,5
Mala vrednost ili uglavnom zapaljiv	1
Veća vrednost ili naročito lako zapaljiv	2
Izvanredno velika vrednost, nenadoknadiva šteta, vrlo zapaljiv ili eksplozivan	3

Tabela 5. Vrednosti koeficijenta C_3 u zavisnosti od namene objekta

Namena objekta	
Nezaposednut	0,5
Uglavnom nezaposednut	1
Teška evakuacija ili opasnost od panike	3

Tabela 6. Vrednosti koeficijenta C_4 u zavisnosti od posledica udara groma u objekat

Posledice od udara groma u objekat	
Nije obavezna neprekidnost pogona i bez uticaja na okolinu	1
Obavezna neprekidnost pogona, ali bez uticaja na okolinu	5
Uticaj na okolinu	10

Na osnovu određenih vrednosti koeficijenata C_1 – C_4 , može se napisati relacija pomoću koje se određuje parametar N_c :

$$N_c = \frac{3 \cdot 10^{-3}}{C_1 C_2 C_3 C_4} \quad (9)$$

Na osnovu realizovanog prvog, a zatim i drugog koraka dolazi se do poznatih vrednosti parametara N_d i N_c . Sada na osnovu ova dva parametra se može napisati relacija kojom se određuje računska efikasnost gromobranske instalacije, a na osnovu nje i odgovarajuće zone zaštite objekata:

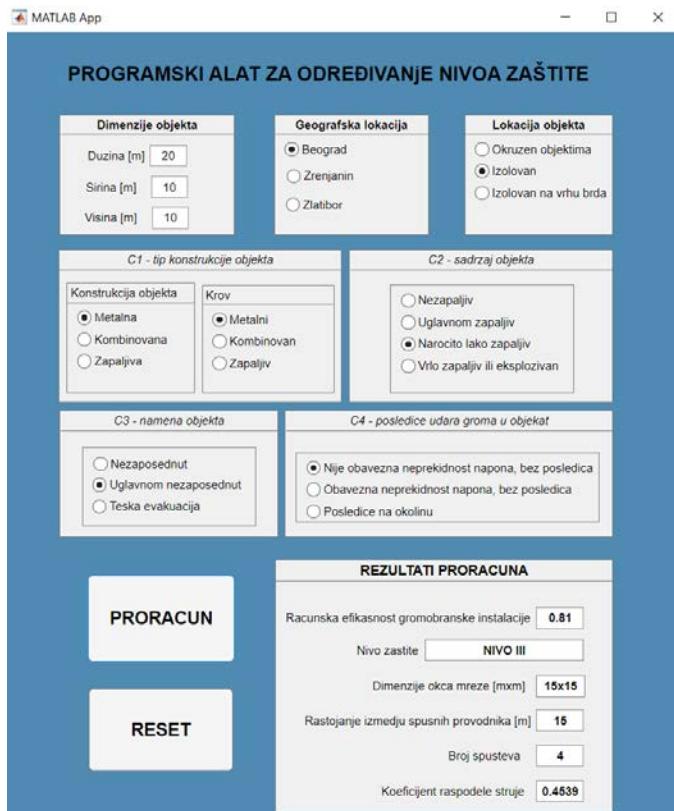
$$E_r = \frac{N_d - N_c}{N_d} = 1 - \frac{N_c}{N_d} \quad (10)$$

Tabela 7. Nivo zaštite objekata u funkciji računske efikasnosti E_r

Računska efikasnost	Odgovarajući nivo zaštite
$E_r > 0,98$	Nivo I sa dodatnim merama
$0,98 \geq E_r > 0,95$	Nivo I
$0,95 \geq E_r > 0,90$	Nivo II
$0,90 \geq E_r > 0,80$	Nivo III
$0,80 \geq E_r > 0$	Nivo IV

V PROGRAMSKI ALAT ZA ODREĐIVANJE NIVOA ZAŠTITE OBJEKTA

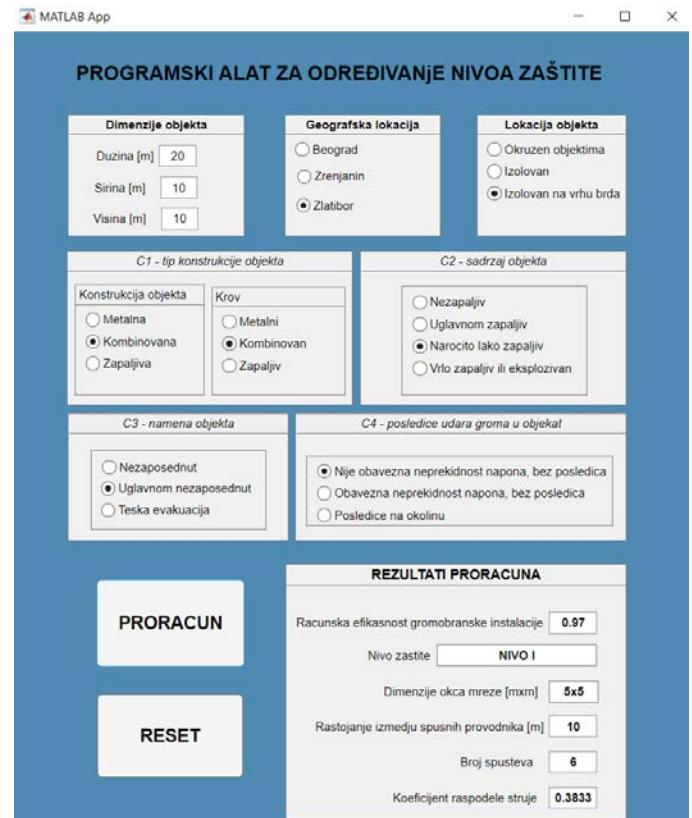
Cilj ovog poglavlja jeste da se predstavi programski alat koji korisniku omogućuje određivanje zaštitnog nivoa objekta na osnovu svih potrebnih parametara [8]. Grafički interfejs i programski kod su kreirani upotrebom softverskog paketa MATLAB, korišćenjem AppDesigner-a.

**Slika 8.** Prikaz rezultata na grafičkom interfejsu za primer 1

Kada se program otvori, na samom početku je potrebno uneti dimenzije analiziranog objekta sa ravним krovom – dužinu, širinu i visinu. Na osnovu učitanih vrednosti vrši se određivanje ekvivalentne prihvratne površine objekta, koja je potrebna pri izračunavanju parametra N_d . Zatim se nudi izbor geografske lokacije objekta. Ponuđena su tri mesta preko kojih se određuje broj grmljavinskih dana u toku godine: Beograd – kao reprezent srednje vrednosti očitane sa izokerauničke karte, Zrenjanin i Zlatibor kojima odgovaraju ekstremne vrednosti broja grmljavinskih dana u toku godine (minimalna i maksimalna, respektivno). Na osnovu tabela 3 – 6 kreirane su odgovarajuće grupe parametara koje određuju vrednosti koeficijenata C_1 – C_4 . Vrednosti ovih koeficijenata su od značaja prilikom određivanja

parametra N_c . Pritiskom na dugme *proračun* izvršava se programski kod. U programskom kodu napisan je kompletan postupak zasnovan na prvom i drugom kriterijumu određivanja potrebnog nivoa zaštite objekta E_r .

Na osnovu određene vrednosti efikasnosti gromobranske instalacije E_r , program izračunava potrebeni nivo zaštite tako što dobijenu vrednost upoređuje sa vrednostima iz tabele 7 koja je implementirana u programskom kodu. Na osnovu nivoa zaštite objekta, moguće je odrediti odgovarajuće parametre gromobranske instalacije i izvršiti dimenzionisanje prihvavnog sistema postavljenog u obliku mrežeprovodnika, kao i sistema spusnih provodnika. Odgovarajućim pravilnicima i standardima određene su dimenzije okaca koji formiraju mrežu provodnika i maksimalna dozvoljena prosečna rastojanja između spusnih provodnika za svaku od prethodno određene potrebne zaštitne zone, što je takođe implementirano u kodu. Na osnovu ovih vrednosti, program izračunava potrebne dimenzije okca koji čini mrežu, i razmak između spusteva za dati objekat, a zatim i broj spusnih provodnika koje je potrebno postaviti, na osnovu kog je moguće odrediti i koeficijent raspodele struje groma usled postojanja paralelnih spusnih provodnika – k_c .

**Slika 9.** Prikaz rezultata na grafičkom interfejsu za primer 2

Sve izračunate vrednosti su date u okviru panela – Rezultati proračuna. Pritiskom na dugme *reset* moguće je ponovo izvršiti učitavanje novih (drugačijih) vrednosti za neki sledeći objekat.

Grafički interfejs programa prikazan je na slikama 8 i 9, za dva primera. U oba primera dimenzije objekta su identične. Ono što se razlikuje jeste geografska lokacija objekta (u prvom primeru objekat se nalazi u Beogradu, a u drugom na Zlatiboru), kao i

sama lokacija objekta u odnosu na druge objekte. Takođe su odabrane i drugačije vrednosti za materijale konstrukcije objekta/krova, dok su vrednosti koeficijenata kojima se predstavlja namena, sadržaj i uticaj (posledica od udara groma u objekat) ostali nepromenjeni.

Upoređivanjem dobijenih rezultata, u prvom primeru je potreban III nivo zaštite, dok je u drugom primeru potreban I nivo zaštite. Vidi se da na različit nivo zaštite objekta istih dimenzija u ovim primerima, prvenstveno utiče to što su za odabir konstrukcije objekta i krova izabrani kombinovani materijali (primer 2), u odnosu na metalne (primer 1). Kako su određeni različiti nivoi zaštite, tako se razlikuju i ostale vrednosti koje određuju dimenzije okca mreže, rastojanje između spusteva i njihov broj.

VI ZAKLJUČAK

U radu je prikazan detaljan postupak za izbor metaloksidnih odvodnika prenapona u distributivnim mrežama, jer samo pravilnim izborom opreme možemo štititi EES i njegove delove od prenaponskih pojava. Objasnjen je formirani softverski alat koji korisniku predlaže preliminarni izbor MOP-a, u zavisnosti od brojnih parametara, i na taj način znatno olakšava i ubrzava proceduru primene. Rad nudi detaljan uvid u spoljašnju gromobransku instalaciju, kao i određivanje potrebnog nivoa zaštite objekata priključenih na niskonaponsku mrežu. Kreiran je program koji na osnovu zadatog problema, predlaže nivo zaštite objekta, a zatim i vrši dimenzionisanje spoljašnje gromobranske instalacije za prethodni određeni nivo zaštite, a sve u skladu sa propisima i standardima.

Cilj rada je bio da početnim uočavanjem prirodnog fenomena u vidu atmosferskog pražnjenja koji se ne može spreciti, a sa druge

strane može izazvati velike posledice na EES, prikaže modelovanje, izbor i softverske alate, a sve u svrsi zaštite EES-a, njegovih elemenata i krajnjih potrošača.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Stojković, Z., Savić, M. *Tehnika visokog napona – atmosferski prenaponi*, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2001.
- [2] Stojanović, Z., Stojković, Z. *Monitoring i dijagnostika metaloksidnih odvodnika prenapona*, Akadembska misao, Beograd, 2014.
- [3] Vićović, D., Hadžić, Z. *Zaštita objekata od atmosferskog pražnjenja*, Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera i tehničara Srbije (SMEITS), Beograd, 2008
- [4] Kostić, M. *Teorija i praksa projektovanja električnih instalacija*, Akadembska misao, Beograd, 2014.
- [5] Đurić, M., Ilić, V. *Visokonaponska razvodna postrojenja*, AGM Knjiga, Beograd, 2017.
- [6] DEHN + SÖHNE – *Lightning Protection Guide*, 2014. <https://www.dehn-international.com/sites/default/files/media/files/lpg-2015-e-complete.pdf> [pristupljeno 24.04.2024]
- [7] Standard: N.B4.803:1996 <https://iss.rs/en/project/show/iss:proj;14508> [pristupljeno 24.04.2024]
- [8] Tanasković, N. *Zaštita od atmosferskih prenapona u distributivnim mrežama i programski alat za određivanje nivoa zaštite objekata*, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2023.

AUTORI/AUTHORS

Nikola Tanasković, dipl. inž. el. i rač, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Srbija, tane99tane@gmail.com, ORCID [0009-0003-6978-1538](https://orcid.org/0009-0003-6978-1538)

dr Iva Batić, naučni saradnik, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Srbija, iva@etf.rs, ORCID [0000-0003-0150-3235](https://orcid.org/0000-0003-0150-3235)

dr Tomislav Rajić, docent, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija, rajic@etf.rs, ORCID [0000-0003-4796-4117](https://orcid.org/0000-0003-4796-4117)

Overvoltage Protection for Objects Connected to the Low-Voltage Network

Abstract – Lightnings are a natural phenomenon that people have been dealing with since the beginning of time. In terms of the impact on the power grid and electronic devices, they represent a negative effect due to the high energy that the discharge carries with it. As the electric power system is increasingly branched and spread out, the possibility of potential impacts to its elements is also increasing. Lightnings cannot be prevented, but with an adequate knowledge of the mechanism of the discharge, we can influence their control, that is, by properly designing the receiving system and selecting protective devices, we can largely prevent major harmful consequences. The aim of this paper is to offer an overview of protective devices that protect against overvoltage, surge arresters in the power system. There is an increasing need for automation in the selection of surge arresters, and accordingly the number of software tools that are based on the concepts proposed by the world's leading manufacturers is also increasing. The paper also presents the concept of protection of objects in low-voltage networks, as well as the accompanying software tool for the automated selection of protection zones and lightning protection installations.

Index Terms – Lightnings, Surge arresters, Distribution network

Tehno-ekonomska analiza projekta vetroparka

Miloš Ječmenica, Đorđe Lazović

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Rezime - Pored ispunjenosti uslova odabira optimalne lokacije poput geografske lokacije, meteoroloških parametara, kao i uslova za priključenje na elektroenergetsku mrežu, tehn-ekonomska analiza predstavlja značajan aspekt prilikom planiranja, razvoja i eksploracije projekata iz oblasti obnovljivih izvora energije. Konkretno, na primeru vetroparka u Republici Srbiji prikazana je tehn-ekonomska analiza sa osnovnim pokazateljima isplativosti i opravdanosti investicije. Kroz ove pokazatelje sprovedena je analiza investicije vetroparka ukupne instalisane snage 150 MW priljučenog na prenosnu mrežu. Cilj sprovedene analize je dobijanje osnovnih finansijskih indikatora koji mogu biti značaja pri odabiru lokacije, planiranju investicije i održivoj eksploraciji ovakvih i sličnih elektroenergetskih projekata.

Ključne reči - obnovljivi izvori energije, vetropark, tehn-ekonomska analiza, analiza isplativosti

I UVOD

U skladu sa preuzetim obavezama koje proističu iz međunarodnih ugovora, među kojima se u najznačajnije ubrajaju Pariski sporazum [1] i Zelena agenda za Zapadni Balkan [2], Republika Srbija se trenutno nalazi u procesu sveobuhvatne transformacije energetske politike i elektroenergetskog sistema sa ciljem dekarbonizacije sektora energetike, smanjenja emisije gasova sa efektom staklene baštne i povećanja proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora energije (OIE). Prema postojećoj strategiji razvoja energetike Republike Srbije [3], u bliskoj budućnosti se očekuje realizacija velikog broja projekata vetroparkova i njihovo priključenje na elektroenergetski sistem. Tehno-ekonomska analiza predstavlja ključan proces za donošenje odluka u vezi razvoja i implementacije ovih projekata.

Tehno-ekonomska analiza vetroparka je procena tehničke izvodljivosti i isplativosti projekta vetroparka. Ona kombinuje tehničke i ekonomske aspekte, uključujući investicione troškove, operativne troškove i prihode od prodaje proizvodene električne energije. Cilj analize predstavljene u radu je da na konkretnom primeru utvrdi da li će investicija u projekat vetroparka biti ekonomski održiva tokom predviđenog životnog veka. Ova analiza je od značaja jer pruža temeljne informacije i podatke od koristi investitorima u proceni isplativosti i izvodljivosti projekta, kao i potom, u proceni rizika. U cilju što jasnijeg predstavljanja, u radu je data uprošćena tehno-ekonomska analiza sa predloženim koracima koje je potrebno uzeti u razmatranje prilikom realizacije projekta vetroparka u Republici Srbiji, priključenog na prenosni sistem.

U radu su objašnjeni osnovni finansijski pokazatelji isplativosti projekta i definisani su ključni faktori za utvrđivanje tehničkih

preduslova izgradnje jednog vetroparka. Takođe, dat je pregled procenjenih komponenti troškova koji su u vezi sa procesom izgradnje i eksploracije vetroparka. Pored toga numerički su definisani najvažniji ekonomski pokazatelji koji omogućavaju procenu isplativosti i poređenje različitih investicionih odluka. Izvršena je estimacija prihoda od prodaje proizvedene električne energije vetroparka. Potom, izvršene su analize isplativosti investicije vetroparka instalisane snage 150 MW, i predstavljeni su dobiveni rezultati sa diskusijom.

II OSNOVNI FINANSIJSKI POKAZATELJI

Cilj tehn-ekonomske analize koja će biti sprovedena u radu je dobijanje odgovora na pitanje investitora: da li se ulaganja u analizirani projekat vetroparka mogu povratiti i ostvariti finansijski benefiti tokom životnog veka projekta?

Shodno tome, osnovni finansijski pokazatelji su:

- *investicioni ili kapitalni troškovi* (eng. *capital expenses*, skr. *CAPEX*) uključuju sve troškove koji su potrebni da se vetropark izgradi i pusti u rad, što obuhvata troškove same lokacije, troškove imovinsko-pravne prirode, troškove projektovanja i ishodovanja svih neophodnih dozvola, izgradnju nedostajuće infrastrukture (pristupni putevi, priključno-razvodno postrojenje, transformatorska stanica), nabavku, transport, izgradnju i priključenje vetrogeneratora na prenosnu mrežu, i ostale troškove neophodne za realizaciju ovog tehnički i organizaciono zahtevnog projekta. Na samom početku projekta, troškovi razvoja projekta obuhvataju troškove izrade planske i projektno-tehničke dokumentacije, administrativne troškove u postupku ishodovanja dozvola, troškove geomehaničkih istražnih radova, troškove geodetskih radova, izrade katastarsko-topografskih podloga, troškove arheoloških istraživanja, troškove postavljanja i održavanja mernog (anemometarskog) stuba, troškove izrade studije o proceni uticaja na životnu sredinu, troškove izrade studije priključenja na prenosni sistem, troškove u postupku priključenja na prenosni sistem, one usled monitoringa životinskog sveta, izrade studije o nivou buke, studije treperenja senke, kupovine i zakupa zemljišta, itd. Troškovi izgradnje infrastrukture uključuju izgradnju interne kablovske mreže unutar vetroparka, priključka na prenosni elektroenergetski sistem (npr. izgradnju dalekovoda, postavljanje kablova, transformatorske stanice i priključno-razvodnog postrojenja), pristupnih puteva do lokacije vetroparka i putne mreže unutar vetroparka, postrojenja za eventualno skladištenje energije i pratećih objekata. Nabavka, transport i instalacija vetrogeneratora na samoj lokaciji

predstavlja jedan od najvećih investicionih troškova;

- *operativni troškovi* (eng. *operating expenses*, skr. *OPEX*) predstavljaju troškove projekta koji uključuju monitoring i upravljanje radom vetroparka, održavanje vetrogeneratora, transformatorske stanice, priključno-razvodnog postrojenja, prateće infrastrukture, eventualnog zakupa zemljišta, troškove sopstvene potrošnje elektrane, osiguranja, i slično. Ovi troškovi variraju tokom eksplotacionog perioda i utiču na profitabilnost projekta;
- *procena bruto proizvodnje električne energije* (eng. *energy yield assessment*, skr. *EYA*) je procena proizvodnje električne energije u relaciji sa karakteristikama odabrane lokacije na kojoj se planira izgradnja vetroparka, poput analize brzine, smera i turbulentnosti vetra, topografije terena i ostalih geografskih i meteoroloških faktora. Na osnovu ovih parametara vrši se odabir visine stuba, modela i tipa pojedinačnih vetroagregata u okviru vetroparka, sa ciljem postizanja maksimalne specifične proizvodnje električne energije. U praksi, procena očekivane proizvodnje električne energije vrši se korišćenjem specijalizovanih softvera (poput WasP [4], WindSim [5]);
- *procena neto proizvodnje električne energije* vrši se tako što se od bruto proizvodnje električne energije oduzmu gubici usled pojave efekta zavetrine i gubici koji se javljaju u samom vetroparku, poput onih usled neraspoloživosti vetroparka, usled pojave prejakog vetra, električni gubici sve do mesta priključenja na prenosni sistem, i ostali gubici koji su karakteristični za pogone ovog tipa;
- *prihodi od prodaje električne energije* (eng. *income*, skr. *I*) nastaju plasiranjem proizvedene električne energije osnovu Ugovora o otkupu električne energije (eng. *power purchase agreement*, skr. *PPA*), koga između ostalog karakteriše cena po megavat-času (€MWh) i imaju ključnu ulogu u određivanju prihoda vetroparka i analizi isplativosti istog.

S obzirom na neizvesnost u proceni troškova održavanja, stope diskontovanja i cene električne energije za budući vremenski period od 25 godina, razmatraće se više različitih pokazatelja:

- *inflacija i kamatne stope*; analiza uzima u razmatranje inflaciju i kamatne stope kako bi se pravilno diskontovali budući prihodi i troškovi u današnju vrednost, što utiče na *neto sadašnju vrednost* (eng. *net present value*, skr. *NPV*) projekta;
- *interna stopa povraćaja kapitala* (eng. *internal rate of return*, skr. *IRR*) je diskontna stopa koja *NPV* projekta svodi na nulu. Dakle, ukoliko bi diskontna stopa bila jednaka *IRR*, tada bi *NPV* bio jednak nuli;
- *period povraćaja investicije* (eng. *return of investment*, skr. *ROI*) je period za koji će godišnji neto prihodi (razlika između uloženog *CAPEX* i *OPEX* troška i dotadašnjeg *I*) povratiti uložena sredstva u projekat vetroparka;
- *svedeni trošak proizvodnje električne energije* (eng. *levelized cost of electricity*, skr. *LCOE*) ima ulogu u evaluaciji aktuelizovanog troška proizvodnje jedinične količine električne energije iz vetroelektrane.

Pored prethodnih finansijskih pokazatelja, za detaljniju finansijsku analizu potrebno je uvažiti i sledeće:

- *promenu cene električne energije* koja može značajno uticati na prihode vetroparka i analiza je potrebno da razmotri ove fluktuacije i njihov uticaj na dugoročnu profitabilnost projekta;
- *regulativne i poreske faktore*, kao i podsticaje koji mogu značajno uticati na finansijsku isplativost projekta vetroparka, pa ovi faktori treba da budu pažljivo analizirani; i
- *analizu osetljivosti* koja se koristi za testiranje kako bi promene u određenim finansijskim varijablama (poput cene električne energije ili operativnih troškova) mogle uticati na isplativost projekta.

Sve ove pokazatelje je potrebno pažljivo analizirati u razmatranje pre odluke o započinjanju investicije.

III TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA

Prihodi vetroparka zasnivaju se na proizvedenoj električnoj energiji i njenim finansijskim plasmanom na tržištu. U skladu sa analizom potencijala vetra (mernih podataka preuzetih sa ispitnog anemometarskog stuba na potencijalnoj lokaciji budućeg vetroparka), izradom studije o proceni proizvodnje može se proceniti očekivana proizvodnja električne energije vetroparka, koja je stohastičke prirode zbog same karakteristike vetra. Postoji dosta faktora koji utiču na nesigurnost proračuna očekivane proizvedene električne energije vetroparka, gde je potrebno uvrstiti i verovatnoću u analizu. U ekonomskim analizama najčešće se na osnovu neke vrednosti verovatnoće traži odgovarajuća granična vrednost (prag) proizvodnje, a koja će biti prebačena sa tom, zadatom, verovatnoćom. Uobičajeni nivoi procene verovatnoće definisani su na sledeći način:

- *W(P50)* – sa kojom će neto godišnja proizvodnja električne energije biti ostvarena (ili prebačena) sa verovatnoćom do 50%;
- *W(P75)* – sa kojom će neto godišnja proizvodnja električne energije biti ostvarena (ili prebačena) sa verovatnoćom do 75%; i
- *W(P90)* – sa kojom će neto godišnja proizvodnja električne energije biti ostvarena (ili prebačena) sa verovatnoćom do 90%.

Ovi nivoi procene verovatnoće su od značaja jer se na osnovu njih mogu proceniti rizici u pogledu odstupanja godišnje energije koju će vetroelektrana proizvesti tokom eksplotacije u odnosu na procenjenu proizvodnju dobijenu u fazi projektovanja. Investitori često prilikom proračuna ekonomskih parametara koriste pokazatelje *W(P75)* i *W(P90)*, umesto *W(P50)*, čime se ide na stranu sigurnosti. Ukoliko je procena nesigurnosti prosečne godišnje proizvodnje energije kod vetroelektrane mala (što se svodi na tačnost procene meteoroloških podataka vetra na odabranoj lokaciji), tada je mala i razlika između vrednosti pokazatelja *W(P50)*, *W(P75)* i *W(P90)*. Na prikazanom primeru u nastavku rada, neće biti predstavljena analiza procene bruto i neto proizvedene električne energije, već će biti prikazani samo osnovni koraci koji se sprovode prilikom izrade tehnoekonomske analize. Detaljan proračun proizvodnje električne energije, kao i postupak za određivanje nivoa verovatnoće pri

proizvodnji je neizostavan korak prilikom izrade realne studije proizvodnje vetroelektrane i više informacija o tome se može naći u [6].

Varijanta I – Osnovna analiza isplativosti

Proračunom predstavljenih finansijskih pokazatelja može se dobiti analiza isplativosti projekta izgradnje vetroparka. U tabeli 1 prikazani su procenjeni investicioni troškovi vetroparka ukupne instalisane snage 150 MW. U njih spadaju troškovi razvoja projekta, eventualna kupovina zemljišta, nabavke i instalacije vetroagregata, izgradnje temelja za stubove, realizacije pristupnih i internih puteva unutar vetroparka, kao i izgradnje potrebne energetske infrastrukture za priključenje vetroparka na elektroenergetski sistem.

Tabela 1. Procena investicionih troškova (CAPEX)

Opis pozicije	Količina	Jedinična cena u EUR	Ukupna cena u EUR
Vetroagregat 6 MW	25	6.000.000	150.000.000
Temelji vetroagregata	25	500.000	12.500.000
Pristupni i interni putevi po km	35	200.000	7.000.000
Transformatorska stanica 35/110 kV	1	3.000.000	3.000.000
PRP 110 kV	1	5.000.000	5.000.000
Dalekovod 110 kV	1	3.000.000	3.000.000
Ostali troškovi razvoja vetroparka po MW	150	100.000	15.000.000
UKUPNO			195.500.000

Operativni troškovi vetroparka podrazumevaju troškove održavanja i servisiranja opreme u vetroparku, eventualnog zakupa zemljišta, troškove osiguranja kao i ostale troškove neophodne za funkcionisanje pogona. U tabeli 2 su prikazani procenjeni operativni troškovi ovog vetroparka.

Tabela 2. Procena operativnih troškova (OPEX)

Opis pozicije	Kol.	Jedinična cena u EUR	Ukupna cena u EUR
Godišnji zakup zemljišta cca. po ha	100	500	50.000
Godišnja plata zaposlenog stručnog osoblja na održavanju	4	75.000	300.000
Premija osiguranja cca 0.5% Capex-a	1	977.500	977.500
Ostali troškovi (rezervni delovi, oprema za održavanje, transport, itd.)	1	100.000	100.000
UKUPNO			1.427.500

Rezultati studije [7] o proceni proizvodnje električne energije u velikom broju slučajeva pokazuju da efektivno vreme rada vetroagregata sa nominalnom snagom iznosi oko 2500 časova godišnje, odnosno da je njegov faktor iskoršćenja kapaciteta oko 28,5%. Iste vrednosti biće usvojene u nastavku. Takođe, ako se pretpostavi da će se prodaja električne energije obavljati po ceni

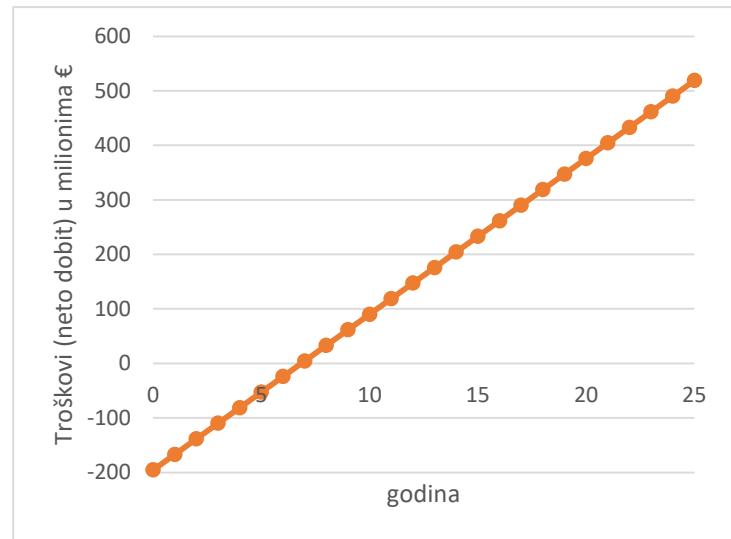
od 80 €MWh, može se dobiti procena prihoda od plasmana električne energije, predstavljeni u tabeli 3

Tabela 3. Procena prihoda od prodaje električne energije

Opis pozicije	Vrednost
Efektivno vreme rada	2500 h/god
Instalisana snaga vetroparka	150 MW
Ukupna godišnja proizvedena električna energija	375.000 MWh
Cena električne energije po MWh	80 EUR
Ukupno godišnji prihodi (I)	30.000.000 EUR
Radni vek vetroparka	25 god
UKUPNO PRIHODI	750.000.000 EUR

Ukupni prihodi tokom radnog veka vetroparka su izračunati na osnovu efektivnog vremena rada, projektovanog radnog veka, ukupne instalisane snage vetroparka i jedinične cene električne energije. U praksi, životni vek vetroelektrane premašuje projektovanih 25 godina, pa uvedene pretpostavke su na strani investicione sigurnosti.

Na osnovu procenjenih investicionih i operativnih troškova, kao i estimiranih prihoda vetroelektrane, formiran je uprošćeni dijagram novčanih tokova (eng. cash flow diagram), prikazan u tabeli 4 i na slici 1. Ovaj dijagram daje uvid o novčanim prihodima i rashodima tokom životnog veka projekta i pomaže u proceni njegove likvidnosti i održivosti. Sprovedena uprošćena analiza od interesa je pri brzoj proceni isplativosti investicije.

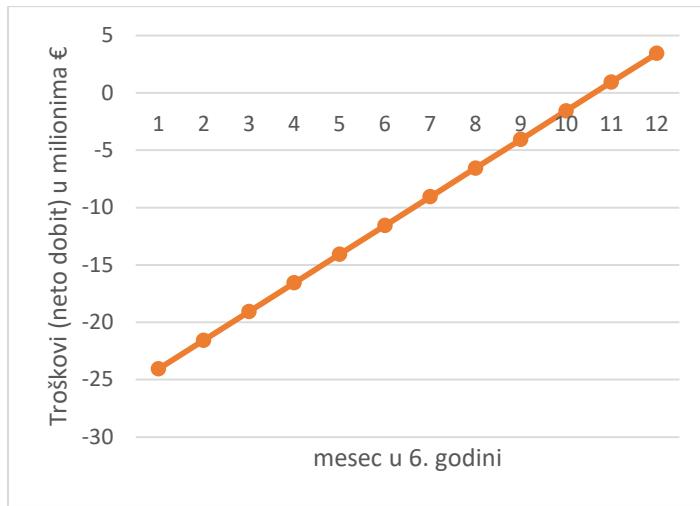


Slika 1. Dijagram novčanih tokova projekta

Procenjena neto dobit na kraju životnog veka projekta, u navedenom primeru, iznosi oko 520 miliona EUR. Sa dijagraama novčanih tokova može se odrediti i prelomna tačka investicije tj. period povraćanja investicije (ROI). Na slici 2 bliže je definisan mesec u godini kada će se ova investicija i otplatiti. Uz aproksimaciju ravnomernog priliva neto prihoda, određeno je da je prelomna tačka projekta u desetom mesecu 6. godine projekta.

Tabela 4. Osnovna analiza isplativosti investicije

Godina	CAPEX u EUR	OPEX u EUR	Godišnji prihod u EUR	Rekapitulacija u EUR
1	195.500.000	1.427.500	30.000.000	-166.927.500
2	/	1.427.500	30.000.000	-138.355.000
3	/	1.427.500	30.000.000	-109.782.500
4	/	1.427.500	30.000.000	-81.210.000
5	/	1.427.500	30.000.000	-52.637.500
6	/	1.427.500	30.000.000	-24.065.000
7	/	1.427.500	30.000.000	4.507.500
8	/	1.427.500	30.000.000	33.080.000
9	/	1.427.500	30.000.000	61.652.500
10	/	1.427.500	30.000.000	90.225.000
...
24	/	1.427.500	30.000.000	490.240.000
25	/	1.427.500	30.000.000	518.812.500

**Slika 2.** Dijagram novčanih tokova u 6. godini projekta

U praksi, pri izradi tehnno-ekonomske analize u oblasti obnovljivih izvora energije, u koje spada i analizirana izgradnja vetroparka, vrši se detaljniji ekonomski proračuni koji će biti izloženi u nastavku.

Varijanta II - Analiza isplativosti metodom ekvivalentne sadašnje vrednosti i ekonomičnosti investicije

Cilj ekonomske analize koja će biti sprovedena u ovom poglavlju je da se dobije odgovor na pitanje investitora: Da li se ulaganja u analiziranu elektranu i pridruženi troškovi mogu povratiti tokom životnog veka projekta? Obzirom na neizvesnost u proceni mnogih ulaznih parametara, razmatraće se više različitih ekonomskih pokazatelja [8].

Pokazatelj NPV pretvara sve novčane tokove ostvarene tokom celog životnog veka u ekvivalentnu vrednost vezanu za sadašnji vremenski trenutak i za projekat koji se analizira se definiše

sledećim izrazom:

$$NPV = -C_I - \sum_{n=1}^N \frac{C_{O\&M}}{(1+i)^n} + \sum_{n=1}^N \frac{P}{(1+i)^n} [\text{€}] \quad (1)$$

gde su: C_I ukupna vrednost investicije (CAPEX), $C_{O\&M}$ godišnji troškovi održavanja (OPEX), N životni vek elektrane, a i stopa aktuelizacije. U pogledu analize pokazatelja NPV , projekat vetroelektrane je prihvatljiv za definisanu stopu aktuelizacije (eng. *interest rate*, skr. i), ukoliko je pokazatelj NPV pozitivan, a veće vrednosti ovog pokazatelja ukazuju na veću ekonomsku dobit investitora.

Za razliku od metode ekvivalentne sadašnje vrednosti, gde se prepostavlja da je stopa aktuelizacije i konstanta i gde se mera ekonomičnosti investicije izražava u ekvivalentnom novčanom iznosu, u IRR metodi mera ekonomičnosti investicije je stopa aktuelizacije koja balansira jednačinu aktuelizovanih novčanih tokova, odnosno za koju je sadašnji novčani ekvivalent jednak nuli. Ona se definiše sledećim izrazom:

$$IRR = i, \text{ za koje je}$$

$$NPV = -C_I - \sum_{n=1}^N \frac{C_{O\&M}}{(1+i)^n} + \sum_{n=1}^N \frac{P}{(1+i)^n} = 0 [\%/\text{god}] \quad (2)$$

Kako bi se ovom metodom utvrdilo da li je projekat vetroelektrane isplativ, njegova interna stopa povraćaja kapitala se upoređuje kriterijumskom stopom (eng. *minimal attractive rate of return*, skr. $MARR$). Projekat zadovoljava uslove ekonomičnosti kada je $IRR \geq MARR$ mada se smatra da on može biti prihvatljiv za realizaciju za svaku pozitivnu vrednost IRR . Pored rentabilnosti projekta, IRR pokazuje i najveću kamatu stopu na kredite koju investitor može prihvatiti, a da ne ostvaruje gubitak.

Tabela 5. Ekonomski pokazatelji investicije u vetropark

Opis pozicije	Vrednost
Ukupna vrednost investicije C_I [€]	195.500.000
Operativni godišnji troškovi $C_{O\&M}$ [€/god]	1.427.500
Godišnji prihod I [€/god]	30.000.000
Stopa aktuelizacije i [%]	5
Neto sadašnja vrednost NPV [€]	207.200.000
Interna stopa povraćaja kapitala IRR [%]	14
Period povraćaja investicije ROI [god]	12,2

Pokazatelj $LCOE$ ima značenje aktuelizovanog troška proizvodnje jedinične energije i definiše se sledećim izrazom:

$$LCOE = \frac{C_I + \sum_{n=1}^N \frac{C_{O\&M}}{(1+i)^n}}{\sum_{n=1}^N \frac{W_1}{(1+i)^n}} [\text{€}/\text{kWh}] \quad (3)$$

gde W_1 predstavlja ukupnu godišnju proizvedenu električnu energiju vetroelektrane.

Specifični investicioni troškovi vetroelektrane ukupne instalisane snage 150 MW iznose oko 1300 €/kW (tabela 1). Na osnovu podatka o godišnjim operativnim troškovima elektrane (tabela 2),

kao i podatka o ukupnoj godišnjoj proizvedenoj električnoj energiji (tabela 3), izvršen je proračun svedenih troškova proizvodnje električne energije, poput:

$$LCOE = 40,8 \text{ €MWh}$$

U tabeli 5 su predstavljene vrednosti preostalih ekonomskih pokazatelja. Za stopu aktualizacije usvojena je vrednost od 5%. *NPV* pokazatelj je pozitivan i iznosi 207.200.000 € dok je *IRR* projekta jednak 14%. Prema ovoj metodi period povraćaja investicije je nešto duži i iznosi 12,2 godina.

IV REZULTATI

Dobijeni rezultati osnovne analize isplativosti predstavljeni u varijanti I u radu, ukazuju da je period otplate investicije u 10. mesecu 6. godine rada vetroparka, a da je procenjena neto dobit projekta oko 520 miliona EUR. Ovakvi proračuni daju nešto optimističnije rezultate, ali su jednostavniji i mogu se koristiti pri početnim procenama ekonomske isplativosti ulaganja u neku investiciju. Za detaljniju i realniju procenu isplativosti investicije, kao i realnije procene rizika ulaganja u projekat, od interesa je analiza predstavljena kroz varijantu II. U njoj su sprovedene analize na osnovu kojih se može zaključiti sledeće:

- pokazatelj *LCOE* ukazuje da je specifični trošak proizvodnje 1 MWh električne energije iz vetroparka jednak 40,8 €MWh. *LCOE* predstavlja ekonomski parametar koji determiniše ekonomsku opravdanost investicije u realnim tržišnim uslovima. Ukoliko je cena otkupa električne energije iz vetroparka ka prenosnoj mreži veća od vrednosti *LCOE* onda je projekat ekonomski opravдан;
- period otplate investicije vetroparka je procenjen do 12,2 godine, pa se troškovi investicionih i operativnih troškova mogu povratiti tokom životnog veka vetroparka;
- vrednosti pokazatelja *NPV* iznosi 207.200.000 €. Pozitivna vrednost ovog parametra ukazuje na to da će ova investicija obezbediti očuvanje kupovne sposobnosti uloženih sredstava i prihvatljiv nivo prinosa; i
- vrednost pokazatelja *IRR* pokazuje da će vrednost *NPV* biti veća od nule za bilo koju bilo stopu aktualizacije manju od 14%.

V ZAKLJUČAK

U ovom radu je predstavljena tehnno-ekonomska analiza sa procenom isplativosti projekta vetroparka ukupne instalisane snage 150 MW u Republici Srbiji. Identifikovani su investicioni i operativni troškovi pri izgradnji i eksploataciji ovog elektroenergetskog objekta. Izvršena je procena prihoda od proizvodnje električne energije. Predstavljen je proračun osnovne analize isplativosti, kao i analize isplativosti metodom ekvivalentne sadašnje vrednosti i metodom ekonomičnosti investicije. Izvršeno je poređenje rezultata ovih metoda i date su preporuke za njihovo korišćenje. Autori sugerisu da je sagledavanje neizvesnosti pri proceni realne proizvodnje vetroparka, neophodno u cilju dobijanja šireg skupa finansijskih pokazatelja ove investicije, a samim tim i pouzdanije procene rizika što će biti predmet budućeg istraživanja autora.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Zakon o potvrđivanju Sporazuma iz Pariza, „Službeni glasnik RS – Međunarodni ugovor“, broj 4 od 30. 03. 2017. godine, <https://www.paragraf.rs/dnevne-vesti/030321/030321-vest12.html> [pristupljeno 28.04.2024]
- [2] European Commision, Guidelines for the Implementation of the Green Agenda for the Western Balkans, Brussels, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020SC0223> [pristupljeno 28.04.2024]
- [3] Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine, "Službeni glasnik RS", broj 101 od 08. 12. 2015. godine <https://otvorenavlada.rs/strategija-energetika124-lat-doc-2/> [pristupljeno 28.04.2024]
- [4] WAsP Software, <https://www.wasp.dk/software> [pristupljeno 08.05.2024]
- [5] WindSim Software, <https://windsim.com/software/> [pristupljeno 08.05.2024]
- [6] Đurišić, Ž.R. *Vjetroelektrane*, Akademska misao, Beograd, 2019.
- [7] International Renewable Energy Agency (IRENA). *Renewable energy prospects for Central and South-Eastern Europe Energy Connectivity (CESEC)*, Abu Dhabi, 2020. <https://www.irena.org/Publications/2020/Oct/Renewable-Energy-Prospects-for-Central-and-South-Eastern-Europe-Energy-Connectivity-CESEC> [pristupljeno 10.05.2024]
- [8] Calović, M.S., Sarić, A.T., Stefanov, P.Č. *Planiranje elektroenergetskih sistema*, Beopres, Beograd, 2000.

AUTORI/AUTHORS

- Miloš Ječmenica** – doktor nauka elektrotehnike i računarstva, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, jecmenica@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6345-5000](https://orcid.org/0000-0001-6345-5000)
- Dorde Lazović** – master inženjer elektrotehnike i računarstva, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, lazovic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-9736-9810](https://orcid.org/0000-0002-9736-9810)

Techno-Economic Analysis of the Wind Farm Project

Abstract – In addition to fulfilling the conditions for choosing the optimal location, such as geographical location, meteorological parameters, as well as conditions for connection to the power grid, the techno-economic analysis represents an important aspect when planning, developing and exploiting projects in the field of renewable energy sources. Concretely, on the example of a wind park in the Republic of Serbia, a techno-economic analysis with basic indicators of the profitability and justification of the investment is presented. Through these indicators, an investment analysis of a wind park with a total installed capacity of 150 MW connected to the transmission network was carried out. The goal of the conducted analysis is to obtain basic financial indicators that can be important when choosing a location, planning an investment and sustainable exploitation of this and similar power projects.

Index Terms – Renewable energy sources, Wind park, Techno-Economic analysis, Profitability analysis

Uporedna analiza i mogućnosti unapređenja položaja kupaca-proizvođača u Crnoj Gori i Republici Srbiji

Dunja Grujić*, Dušan Vučić**, Miloš Kuzman***

* Elektroprivreda Srbije, Republika Srbija

** Crnogorski operator tržišta električne energije, Crna Gora

*** Udruženje za pravo energetike Srbije, Republika Srbija

Rezime - Usled potrebe za smanjenjem zagađenja životne sredine, usporavanja globalnog zagrevanja i sve manje količine raspoloživih fosilnih goriva, poslednjih godina svedočimo intenzivnom razvoju proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora, kao i razvoju tržišta električne energije. U okviru ovog rada biće izvršena uporedna analiza učesnika na tržištu električne energije u Crnoj Gori i Republici Srbiji, kao i njihovog uticaja na distributivni elektroenergetski sistem. Posebna pažnja biće posvećena kupcima-proizvođačima. Biće prikazani modeli obračuna električne energije kupaca-proizvođača i mogućnosti za njihove dodatne uštede kako energetske, tako i finansijske. Na kraju rada biće date preporuke za buduću lakšu integraciju kupaca-proizvođača i proizvođača električne energije iz obnovljivih izvora energije u distributivni elektroenergetski sistem kroz modele agregiranja, skladištenja i upravljanja proizvodnjom i potrošnjom

Ključne reči - obnovljivi izvori energije, tržište električne energije, kupac-proizvođač, distributivni sistem

I UVOD

Kako svaki razvoj ekonomije i industrije dovodi do povećanja potreba za električnom energijom, usled sve većih zahteva za smanjenje emisije ugljen dioksida i ostalih štetnih gasova, traže se rešenja za uvećanje udela obnovljivih izvora energije u podmirivanju bruto potrošnje. U Republici Srbiji tek oko 30% ukupne proizvedene električne energije je iz obnovljivih izvora [1], a u Crnoj Gori oko 55% [2]. Proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora put je prema održivom razvoju i energetskoj nezavisnosti. Osim mogućnosti sticanja statusa povlašćenog proizvođača i podsticaja putem „feed in“ tarife, u Crnoj Gori i Republici Srbiji na osnovu zakonske regulative omogućeno je korisnicima sistema da vrše razmenu na mestu konekcije, odnosno da imaju status kupca-proizvođača, koji je u evropskoj legislativi poznat pod nazivom „prosumer“. Kako je cilj da „lokalna“ proizvodnja bude što bliže mestu potrošnje distribuirana proizvodnja postaje sve privlačnija s tačke gledišta operatora sistema, a kroz sisteme podsticaja i korisnicima sistema.

Krajnji kupci prelaze iz pasivne uloge potrošača u aktivnu ulogu kupca-proizvođača koji korišćenjem novih tehnologija mogu upravljati svojom potrošnjom na način da prvenstveno iz svog proizvodnog objekta podmiruju sopstvene potrebe. Ovo za cilj ima uštedu na računima za električnu energiju, ali i manju zavisnost od naponskih prilika u mreži i cena električne energije.

Takođe, kako bi se smanjili negativni uticaji proizvodnje električne energije iz varijabilnih izvora energije koji su sve zastupljeniji i u Republici Srbiji i u Crnoj Gori (sunce, vetar) potrebno je tražiti što veći oslonac u novim korisnicima sistema kao što su npr. sistemi za skladištenje i agregatori koji mogu značajno pomoći lakšoj integraciji obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem.

Pored navedenog potrebno je imati u vidu i operatore distributivnih sistema kao zamajce i glavne nosioce energetske tranzicije. Veće učešće distribuiranih izvora dovodi operatore distributivnih sistema pred brojne izazove o kojima će biti reči u nastavku ovog rada. Takođe, biće predložena i rešenja za date izazove, kao i za unapređenja modela kupca-proizvođača kako bi pozitivne efekte imali i sami kupci-proizvođači, ali i snabdevači, operatori sistema, kao i svi ostali korisnici sistema.

II ZAKONSKI OKVIR

Sekretarijat Energetske zajednice objavio je Smernice za postupanje s kupcima-proizvođačima u februaru 2018. godine [3]. Smernice se, između ostalog, odnose na pravni i regulatorni okvir, ispunjenje kriterijuma vezanih za tehnologiju, šeme sopstvene potrošnje, način obračuna proizvedene i utrošene električne energije i način priključenja na distributivnu mrežu. Republika Srbija i Crna Gora imaju obavezu transponovanja evropskih direktiva, uz aktivnu pomoć Energetske zajednice.

Kupac-proizvođač u Republici Srbiji regulisan je prvi put 2021. godine i to u izmenama i dopunama Zakona o energetici [4], Zakonu o korišćenju obnovljivih izvora energije [5], Zakonu o energetskoj efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije [6], Uredbi o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupca – proizvođača i snabdevača [7], Uredbi o uslovima isporuke i snabdevanja električnom energijom [8] i Pravilniku o načinu vodenja registra kupaca - proizvođača priključenih na prenosni, distributivni, odnosno zatvoreni distributivni sistem i metodologiji za procenu proizvedene električne energije u proizvodnom objektu kupca – proizvođača [9]. Kupac-proizvođač je definisan kao krajnji kupac koji je na unutrašnje instalacije priključio sopstveni objekat za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije, pri čemu se proizvedena električna energija koristi za snabdevanje sopstvene potrošnje, a višak proizvedene električne energije predaje u prenosni, distributivni, odnosno zatvoreni distributivni sistem.

U Crnoj Gori Zakonom o energetici [10] kao kupac-proizvođač definisan je krajnji kupac koji za sopstvene potrebe proizvodi

električnu energiju iz obnovljivih izvora ili visokoefikasne kogeneracije, sa povremenom predajom viška proizvedene električne energije u distributivni sistem.

Kupci-proizvođači električnu energiju prvenstveno preuzimaju iz sopstvenog proizvodnog objekta. U slučaju kada proizvodnja nije dovoljna da zadovolji potrebe za električnom energijom kupca-proizvođača, električna energija se preuzima iz distributivnog sistema. U slučaju kada je proizvodnja veća od potreba kupca-proizvođača on ima pravo da višak električne energije isporučuje u distributivni sistem ili da ga skladišti i koristi prema potrebi.

II-1 Priključenje kupca-proizvođača na elektroenergetski sistem

Kupci-proizvođači po uslovima za sticanje statusa i načina obračuna u Republici Srbiji dele se na domaćinstva, stambene zajednice i ostale. Proizvodni objekti priključuju se na unutrašnje instalacije kupaca-proizvođača, izuzev u slučaju stambenih zajednica kod kojih se priključuju direktno na distributivni sistem [4, 5, 7]. U Crnoj Gori svi kupci-proizvođači proizvodne objekte priključuju na svoje unutrašnje instalacije [10].

U Republici Srbiji u cilju priključenja što većeg broja kupaca-proizvođača, kupcima-proizvođačima iz grupe „domaćinstva“ i „ostali“ sa snagom proizvodnog objekta do 10,8 kW, omogućeno je priključenje na elektroenergetski sistem po pojednostavljenoj proceduri. Ona podrazumeva adaptaciju mernog mesta, proveru tehničkih parametara elektrane i zaključenje ugovora o snabdevanju. Kupci-proizvođači sa snagom proizvodnog objekta od 10,8 kW do 50 kW imaju pravo na delimično pojednostavljenu proceduru koja podrazumeva izradu separata [5, 7]. Ostali kupci-proizvođači sa instalisanom snagom proizvodnog objekta većom od 50 kW i stambene zajednice u Republici Srbiji, kao i svi kupci-proizvođači u Crnoj Gori, nemaju pojednostavljene uslove za priključenje. [5, 7, 10, 11]

U obe zemlje na mestu razgraničenja operatora distributivnog sistema i kupca-proizvođača postavlja se napredni dvosmerni merni uređaj sa mogućnostima daljinskog očitavanja i beleženja petnaestominutnih vrednosti [4, 5, 7, 8, 10, 12, 13]. Merni uređaj obavezno ima mogućnost merenja aktivne električne energije u dve tarife, a u slučaju da je snaga veća od 34,5 kW u Crnoj Gori [11], odnosno 43 kW u Republici Srbiji, pored aktivne električne energije vrši se i registrovanje maksimalne snage i reaktivne električne energije [8]. Operator distributivnog sistema meri količinu električne energije koju je kupac-proizvođač preuzeo iz distributivnog sistema, odnosno u njega isporučio [4, 5, 10].

Da bi se mogla registrovati ukupna proizvedena električna energija kupca - proizvođača, u Crnoj Gori može se ugraditi i dodatni merni uređaj koji će registrovati ukupnu proizvedenu električnu energiju proizvodnog objekta ili se može vršiti procena iste [10], dok se u Republici Srbiji ukupna proizvedena električna energija proračunava po algoritmu koji je definisan propisima [9].

II-2 Proizvodni objekat kupca-proizvođača

U obe zemlje potrebno je da proizvodni objekat koji grade krajnji kupci u postupku sticanja statusa kupac-proizvođač proizvodi električnu energiju iz obnovljivih izvora. Pored navedenog, u Crnoj Gori dozvoljeno je da proizvodni objekat bude visokoefikasna kogeneracija [4, 5, 7, 10]. Maksimalna snaga

proizvodnog objekta kupca-proizvođača u obe zemlje jednak je odobrenoj snazi priključka kupca-proizvođača [5, 7, 10]. Pored navedenog, u Republici Srbiji postoje dodatna ograničenja, tj. maksimalna snaga proizvodnog objekta:

- stambene zajednice jednak je jednovremenoj snazi zajedničke potrošnje i priključaka stanova čiji vlasnici učestuju u izgradnji zajedničkog proizvodnog objekta,
- ne može biti veća od ekvivalentne snage koja odgovara struji od 10 A, ako priključak na sistem nije trofazni; 10,8 kW ako je kupac - proizvođač domaćinstvo; 150 kW ako kupac - proizvođač nije domaćinstvo [5, 7].

Do kraja 2023. godine na elektroenergetski sistem Republike Srbije priključeno je ukupno 2.611 kupaca-proizvođača, ukupne instalirane snage proizvodnih objekata 41,5 MW [14]. U Crnoj Gori status kupca-proizvođača steklo je više od 2.000 krajnjih kupaca, ukupne snage preko 20 MW. Svi kupci-proizvođači su izabrali solarnu elektranu za sopstveni proizvodni objekat [14] što je i očekivano zbog relativno niskih troškova investicije, jednostavne tehnologije, minimalnih potreba za održavanjem i malih troškova amortizacije.

II-3 Obračun električne energije za kupca-proizvođača

Svi kupci-proizvođači i u Republici Srbiji i u Crnoj Gori sa izabranim snabdevačem zaključuju ugovore o potpunom snabdevanju [5, 7, 10]. Prema tome, snabdevač je dužan da isporučuje kupcu-proizvođaču ukupnu potrebnu količinu električne energije, kao i da otkupljuje višak proizvedene električne energije koji se isporuči u distributivni sistem. Takođe, snabdevač preuzima odgovornost za uređenje pristupa sistemu i balansnu odgovornost za mesta primopredaje kupca-proizvođača koja snabdeva. Ugovor o pristupu zaključuju snabdevač i operator sistema. Operator sistema snabdevaču obračunava pristup sistemu. Balansnu odgovornost snabdevač može urediti zaključenjem ugovora sa operatorom prenosnog sistema i tako postati balansno odgovorna strana, ili preneti balansnu odgovornost na drugu balansno odgovornu stranu [4, 5, 10, 15, 16].

Po pravilu, obračunski period u obe zemlje je kalendarski mesec [17, 18]. Operator distributivnog sistema, i u Republici Srbiji i u Crnoj Gori, na mesečnom nivou prikuplja podatke sa mernih uređaja kupaca-proizvođača o ukupnoj preuzetoj i isporučenoj električnoj energiji i podatke dostavlja snabdevaču koji vrši obračun po principu netovanja [5, 10]. Neto električna energija predstavlja razliku ukupne preuzete i ukupne isporučene električne energije kupca-proizvođača u prenosni, distributivni, odnosno zatvoreni distributivni sistem u toku jednog meseca, utvrđene u kWh na osnovu očitavanja brojila električne energije koja ispunjavaju propisane metrološke zahteve [5, 7, 10].

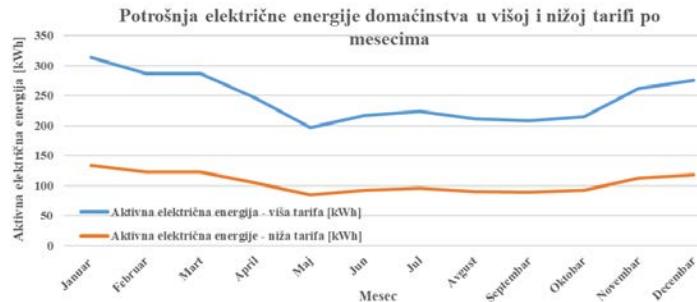
U Republici Srbiji domaćinstva i stambene zajednice sa snabdevačem zaključuju ugovore o potpunom snabdevanju sa neto merenjem, a ostali sa neto obračunom [5, 7]. U Crnoj Gori svi kupci-proizvođači imaju identične uslove obračuna koji odgovaraju neto merenju u Republici Srbiji [5, 7, 10]. Neto merenje je način obračuna neto električne energije, pri kom se viškom isporučene električne energije, u toku jednog obračunskog perioda, umanjuje neto količina električne energije u toku narednog obračunskog perioda [5, 7]. Neto obračun, definisan u Republici Srbiji, način je obračuna neto električne

energije, pri kome se vrednost viška predate električne energije, u toku jednog obračunskog perioda, obračunava i naplaćuje na osnovu ugovora između kupca-proizvođača i snabdevača [5, 7]. Neto električna energija i višak električne energije u obe zemlje se obračunavaju po vremenima primena tarifa, tj. posebno za višu, posebno za nižu tarifu [5, 7, 10, 17, 18].

Višak električne energije se obračunava u toku perioda za poravnanje potraživanja i obaveza između kupca-proizvođača i snabdevača koji počinje 01. aprila i završava se 31. marta [5, 7, 10]. 01. aprila višak se svodi na 0 kWh i obračun kreće ispočetka u obe zemlje. U Republici Srbiji kupac-proizvođač nema pravo na potraživanja za količinu isporučene električne energije koja je veća od količine preuzete električne energije u periodu za poravnanje potraživanja, tj. predaje je snabdevaču bez naknade [5, 7], dok je u Crnoj Gori snabdevač dužan da taj višak električne energije plati kupcu-proizvođaču po prodajnoj ceni električne energije [10].

III OBRAČUN ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA KUPCE-PROIZVOĐAČE KOJI SU DOMAĆINSTVA

U okviru ovog rada analiziran je položaj kupaca-proizvođača koji su domaćinstva u Republici Srbiji i Crnoj Gori. Ostali kupci-proizvođači slobodno ugovaraju uslove snabdevanja sa svojim snabdevačem, dok su cene za domaćinstva unapred definisane. U Republici Srbiji domaćinstva i mali kupci imaju pravo na garantovano snabdevanje, koje je regulisano i na čije cene [19] regulatorna agencija daje saglasnost i donosi metodologiju za njihovo određivanje [20]. Cene garantovanog snabdevača su značajno niže od tržišnih cena. U Crnoj Gori definisani su različiti tarifni modeli a snabdevači su dužni unapred da objave cene električne energije za domaćinstva [10, 21, 22].



Slika 1. Potrošnja električne energije posmatranog domaćinstva u višoj i nižoj tarifi po mesecima

U cilju analize posmatrano je jedno prosečno domaćinstvo, odobrene snage 17,25 kW, koje troši prosečno 350 kWh mesečno, odnosno 4.200 kWh godišnje. Pretpostavljeno je da je raspodela potrošnje domaćinstva po mesecima ista kao raspodela ukupne raspoložive električne energije po mesecima u distributivnom sistemu Republike Srbije [23]. Takođe, pretpostavljeno je da posmatrano domaćinstvo u višoj tarifi troši 70% ukupne električne energije, a 30% u nižoj. Na slici 1 prikazana je potrošnja posmatranog domaćinstva po mesecima.

Kako bi se videle razlike modela kupca-proizvođača, kao i uštede koje model kupca-proizvođača donosi krajnjim kupcima, prvo su izračunati godišnji troškovi domaćinstva kao krajnjeg kupca, a potom kao kupca-proizvođača.

III-1 Obračun električne energije za domaćinstvo kao krajnjeg kupca i kupca-proizvođača

Domaćinstvima kao krajnjim kupcima obračunava se u:

- Republici Srbiji trošak garantovanog snabdevača (koji je fiksni po mernom mestu), preuzeta električna energija, pristup sistemu (za odobrenu snagu i aktivnu električnu energiju), naknada za unapređenje energetske efikasnosti i naknada za podsticaj povlašćenih proizvođača koje su u vezi sa potrošnjom električne energije, akciza u iznosu od 7,5% i PDV u iznosu od 20%,
- Crnoj Gori preuzeta električna energija, pristup sistemu (angažovanje mrežnog kapaciteta i gubici u mreži koji su u vezi sa potrošnjom električne energije i fiksni deo mrežnog kapaciteta koji je fiksni po mernom mestu), naknada za obnovljive izvore energije samo za potrošnju preko 300 kWh i PDV u iznosu od 21% [17, 18, 20, 22].

Domaćinstvima nakon sticanja statusa kupac-proizvođač po modelu neto merenja obračunava se u:

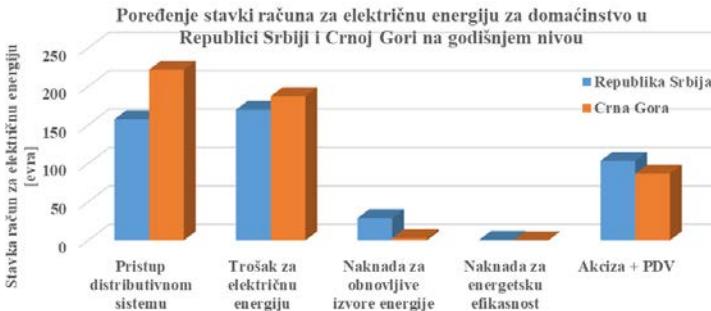
- Republici Srbiji pristup distributivnom sistemu (za odobrenu snagu i ukupnu preuzetu električnu energiju), naknada za podsticaj povlašćenih proizvođača i naknada za energetsku efikasnost za ukupnu preuzetu električnu energiju, neto električna energija, akciza u iznosu 7,5% i PDV u iznosu 20%.
- Crnoj Gori pristup distributivnom sistemu (za angažovanje distributivnog kapaciteta i gubitke za neto električnu energiju i fiksni deo mrežnog kapaciteta), neto električna energija i naknada za obnovljive izvore za neto električnu energiju veću od 300 kWh i PDV od 21% [17, 18, 20, 22].

Iz navedenog se može primetiti da se pristup distributivnom sistemu obračunava na različite načine. Maksimalno odobreni prihod operatora sistema, između ostalog, u obe zemlje obuhvata operativne troškove, troškove amortizacije i troškove za nadoknadu gubitaka. Ukupan maksimalno odobreni prihod operatora sistema u Republici Srbiji alocira se na tarife za pristup sistemu što je npr. za domaćinstva aktivna električna energija i odobrena snaga. U Crnoj Gori maksimalni prihod se takođe alocira na tarife za pristup sistemu s tim što su one podeljene na angažovanje mrežnog kapaciteta i gubitke u mreži koji su vezani za potrošnju električne energije i fiksni deo mrežnog kapaciteta koji je fiksni po mernom mestu. Iako su stavke naknade za pristup distributivnom sistemu različito manifestovane suština je ista u oba sistema [17, 18].

III-2 Troškovi za električnu energiju domaćinstava kao krajnjih kupaca

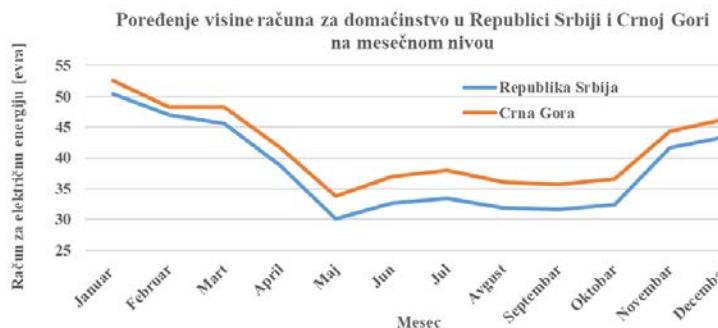
Analizirani su troškovi za električnu energiju domaćinstava sa potrošnjom prikazanom na slici 1. Za proračun u Crnoj Gori korišćene su cene iz osnovnog tarifnog paketa [21, 22] i cene za pristup distributivnom sistemu Crne Gore [24], a za proračun u Republici Srbiji cene garantovanog snabdevača [19, 20] i cene pristupa distributivnom sistemu Republike Srbije [17, 25]. Na slici 2 prikazana je visina stavki računa za električnu energiju na godišnjem nivou, a na slici 3 prikazana je visina mesečnih računa za posmatrano domaćinstvo u Republici Srbiji i Crnoj Gori. Troškovi su i u Republici Srbiji i u Crnoj Gori koncipirani na

principu utroška električne energije te se po mesecima prate, s tim što su u Crnoj Gori viši na godišnjem nivou za 8,6% (498 € u Crnoj Gori, 459 € Srbiji).



Slika 2. Poređenje stavki računa za električnu energiju za domaćinstva na godišnjem nivou

Sa slikama 2 i 3 može se primetiti da su u Republici Srbiji viši troškovi akcize i PDV i naknada za podsticaj povlašćenih proizvođača i unapređenje energetske efikasnosti, dok su u Crnoj Gori viši troškovi aktivne električne energije i pristupa sistemu. Najznačajnija razlika je u troškovima pristupa sistemu koji su u Republici Srbiji niži za čak 30%, što je za operatora sistema, kao i za razvoj mreže, upravljanje sistemom, njegovu fleksibilnost i dalju integraciju obnovljivih izvora veoma nepovoljno, dok je za samog kupca-proizvođača to povoljnije.



Slika 3. Poređenje visine računa po mesecima

III-3 Određivanje optimalne snage proizvodnog objekta kupaca-proizvođača koji je domaćinstvo

U postupku sticanja statusa kupac-proizvođač domaćinstvo iz poglavlja 3.2. je u obavezi da izgradi proizvodni objekat. U skladu sa poglavljem 2.2 očekivano je da proizvodni objekat kupaca-proizvođača bude solarna elektrana što je pretpostavljeno i u datom primeru.

Kako je navedeno u poglavlju 2.3, u Crnoj Gori višak koji kupac-proizvođač ima 01. aprila snabdevač plaća po prodajnoj ceni aktivne električne energije, dok kupac-proizvođač u Republici Srbiji višak predaje snabdevaču bez naknade. Upravo zbog toga, u Republici Srbiji je od presudnog značaja za isplativost projekta dobro odrediti optimalnu snagu proizvodnog objekta tj. instalirati objekat koji na godišnjem nivou proizvodi onoliko električne energije koliko kupac-proizvođač potroši na godišnjem nivou u višoj tarifi [26]. Pošto se u Crnoj Gori višak koji preostane 01. aprila kupcu-proizvođaču plaća, optimalna snaga proizvodnog objekta nije od presudnog značaja za isplativost investicije.

Za proračun optimalne snage proizvodnog objekta posmatranog domaćinstva korišćene su baze podataka programskog paketa PVGIS [27]. U konkretnom slučaju, optimalna snaga solarne elektrane za posmatrano domaćinstvo, koja proizvodi onoliko električne energije koliko kupac-proizvođač potroši u višoj tarifi je 2,49 kW. U okviru ovog rada izvršen je proračun ušteda za posmatrano domaćinstvo nakon sticanja statusa kupca-proizvođača i to ukoliko je instalisana snaga proizvodnog objekta optimalna tj. 2,49 kW, kao i maksimalno dozvoljena tj. 10,8 kW prema propisima Republike Srbije [5].

III-4 Analiza troškova, ušteda i prihoda kupaca-proizvođača koji su domaćinstva

U okviru ovog rada analizirani su troškovi za električnu energiju posmatranog domaćinstva nakon sticanja statusa kupca-proizvođača. Način obračuna opisan je u poglavlju 3.1.



Slika 4. Poređenje troškova kupca-proizvođača koji je domaćinstvo, sa proizvodnim objektom instalisane snage 2,49 kW, odnosno 10,8 kW, u Republici Srbiji i Crnoj Gori

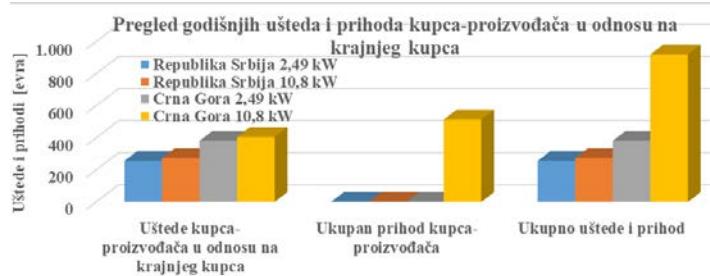
Iz programskega paketa PVGIS preuzeti su satni podaci o proizvodnji predmetnih solarnih elektrana od 2,49 kW i 10,8 kW. Kako bi se izračunala preuzeta i isporučena električna energija pretpostavljeno je da se u objektu kupca-proizvođača potroši ukupna proizvedena električna energija u nižoj tarifi, 40% proizvedene električne energije u višoj tarifi u slučaju proizvodnog objekta optimalne instalisane snage, odnosno 10% u slučaju maksimalne. Ostatak proizvedene električne energije se isporučuje u distributivni sistem. Na osnovu podataka o preuzetoj i isporučenoj električnoj energiji izvršen je proračun troškova kupca-proizvođača sa solarnom elektranom instalisane snage 2,49 kW, odnosno 10,8 kW, u Republici Srbiji i Crnoj Gori. Rezultati su prikazani na slici 4. Sa slike 4 može se primetiti da je trošak kupca-proizvođača sa solarnom elektranom instalisane snage 10,8 kW tek neznatno niži od troškova kupca-proizvođača sa solarnom elektranom instalisane snage 2,49 kW tj. za 8% manji u Republici Srbiji, odnosno 20% u Crnoj Gori. Navedeno je posledica činjenice da se, usled relativno male potrošnje električne energije posmatranog domaćinstva, u oba slučaja približno ista količina proizvedene električne energije potroši u objektu kupca-proizvođača, dok se ostatak isporuči u distributivni sistem. Najveća razlika u troškovima javlja se u nižoj tarifi, jer elektrana od 10,8 kW proizvede više električne energije te je samim tim i neto električna energija u nižoj tarifi manja nego u slučaju elektrane od 2,49 kW. Smanjenje troškova je izraženje u Crnoj Gori jer je odnos između cena više i niže tarife 1:2 dok je u Republici Srbiji 1:4 te značajno manje utiče na smanjenje troškova. [19, 21, 24, 25] Takođe, kako je objašnjeno u poglavlju 3.1, u Republici Srbiji naknada za pristup sistemu se obračunava na kompletan preuzetu električnu energiju, dok se u

Crnoj Gori obračunava na neto električnu energiju te postoji značajno smanjenje troškova i po ovom osnovu.

Kako bi se odredile uštede koje sticanje statusa kupac-proizvođač donosi krajnjem kupcu koji je domaćinstvo na slici 5 prikazani su troškovi domaćinstva kao krajnjeg kupca i kupca-proizvođača sa proizvodnim objektom od 2,49 kW i 10,8 kW. Može se primetiti da su po pitanju naknada za pristup sistemu i naknada za obnovljive izvore značajnije uštede u Crnoj Gori što je i očekivano jer se navedene naknade obračunavaju na neto električnu energiju a ne na celokupnu, kao što je to slučaj u Republici Srbiji. Što se tiče troškova za električnu energiju oni su značajno smanjeni u obe zemlje u odnosu na period pre sticanja statusa. Kao posledica prethodno iznetog, smanjenje poreza je izraženije u Crnoj Gori u odnosu na Republiku Srbiju jer je i celokupan račun manji. Smanjenje troškova sticanjem statusa kupac-proizvođač u odnosu na krajnjeg kupca u Republici Srbiji je oko 55% u slučaju proizvodnog objekta snage 2,49 kW, odnosno 60% u slučaju snage 10,8 kW, dok je smanjenje u Crnoj Gori 75%, odnosno 80%.



Slika 5. Poređenje troškova krajnjeg kupca i kupca-proizvođača koji je domaćinstvo, sa proizvodnim objektom instalisanom snage 2,49 kW, odnosno 10,8 kW, u Republici Srbiji i Crnoj Gori



Slika 6. Pregled godišnjih ušteda i prihoda kupca-proizvođača u odnosu na krajnjeg kupca

Međutim, najveća razlika se javlja upravo po pitanju viška električne energije. Višak nakon 01. aprila se u Crnoj Gori plaća kupcu-proizvođaču po prodajnoj ceni električne energije dok se u Republici Srbiji predaje snabdevaču bez naknade. U slučaju elektrane od 2,49 kW ne postoji višak, što je optimalno po propisima u Republici Srbiji. U slučaju elektrane od 10,8 kW postoji višak u višoj tarifi od 9.798 kWh. Na slici 6 prikazane su ukupne godišnje uštede domaćinstva nakon sticanja statusa kupac-proizvođač u slučaju elektrane od 2,49 kW i 10,8 kW u odnosu na period pre sticanja statusa, kao i prihodi od viška električne energije u oba slučaja.

Ukoliko se prepostavi da je vrednost investicije za elektranu od

2,49 kW oko 2.200 € a od 10,8 kW oko 9.700 € period povrata investicije u Republici Srbiji za elektranu od 2,49 kW je oko 8,5 godina, a u Crnoj Gori oko 6 godina, dok je za elektranu od 10,8 kW u Republici Srbiji 35 godina, a u Crnoj Gori oko 10 godina. Imajući u vidu da je životni vek elektrane oko 25 godina, uštede i prihodi nakon perioda povrata investicije u Republici Srbiji za elektranu od 2,49 kW su oko 4.000 € u Crnoj Gori oko 7.000 € dok su za elektranu od 10,8 kW u Crnoj Gori oko 13.000 € U Republici Srbiji predmetna elektrana od 10,8 kW je potpuno neisplativa jer je period otplate duži od životnog veka elektrane.

IV MOGUĆNOSTI ZA UNAPREĐENJE MODELA KUPCA-PROIZVOĐAČA U REPUBLICI SRBIJI I CRNOJ GORI

Kao što se može videti iz poglavlja 3 za domaćinstva kao krajnje kupce obračun električne energije je veoma sličan i u Republici Srbiji i u Crnoj Gori s tim što su cene nešto više u Crnoj Gori, a naročito za pristup distributivnom sistemu. Veći troškovi pristupa sistemu su sasvim opravdani s obzirom na ulogu operatora distributivnog sistema u energetskoj tranziciji.

Što se tiče obračuna kupcima-proizvođačima i on je sličan, izvodi se putem neto merenja, ali ipak postoje bitne razlike u smislu povoljnijih uslova za kupce-proizvođače u Crnoj Gori u odnosu na Republiku Srbiju, koji se pre svega ogledaju u sledećem:

- višak 01.04 se plaća po prodajnoj ceni,
- pristup sistemu se naplaćuje samo za neto električnu energiju,
- naknada za energetsku efikasnost ne postoji, a naknada za obnovljive izvore se plaća na neto električnu energiju i to tek za veću od 300 kWh.

Navedeno značajno smanjuje period otplate proizvodnog objekta, donosi veće uštede krajnjim kupcima koji se odluče da steknu status kupca-proizvođača, a takođe motiviše krajnje kupce da instaliraju proizvodne objekte veće instalisanе snage u cilju veće uštede i dodatnih prihoda što za posledicu ima bržu promenu energetskog miksa i ubrzanje energetske tranzicije.

Nasuprot tome, kako je opisano u delu 2.1, kupci-proizvođači u Crnoj Gori imaju značajno komplikovanije uslove za priključenje na distributivni sistem od kupaca-proizvođača u Republici Srbiji. Autori stoga predlažu analizu propisa i u Republici Srbiji i u Crnoj Gori u smjeru olakšavanja procedura priključenja.

U Republici Srbiji definisano je da kupci-proizvođači imaju prioritetni pristup distributivnom sistemu i nemaju pravo na fidin tarifu, garancije porekla i druge mehanizme podsticaja [4, 5] što bi bilo celishodno navesti u budućim propisima Crne Gore.

Uvođenje instituta kupac-proizvođač može doneti brojne izazove operatorima distributivnog sistema u obe države, a koji su vezani za kapacitete i stanje distributivne mreže, među kojima su i promena tokova snaga, otežano upravljanje sistemom, povećani gubici, potrebe za intenzivnim razvojem elektroenergetskog sistema i tržišta električne energije, investicijama u modernizaciju i automatizaciju mreže i dodatnim balansnim kapacitetima. Navedeno je posledica varijabilnog karaktera proizvodnje iz sunca i veta što može stvoriti tehničke probleme na mreži među kojima su i naponske neprilike u sistemu i veliki upliv električne energije u trenucima kada su uslovi za

proizvodnju najpovoljniji. S obzirom na navedeno neophodno je dužnu pažnju i sredstva usmeriti na operatora distributivnog sistema kako bi distributivni elektroenergetski sistem bio u mogućnosti da bude pokretač, a ne kočnica energetske tranzicije. Dodatno, neophodno je što pre oživeti tržište pomoćnih usluga [28] koje će omogućiti lakšu integraciju obnovljivih izvora u elektroenergetski sistem.

Neophodno je u budućnosti pronalaziti unapređene modele za obračun pristupa kako bi operator sistema mogao optimalno da se nosi sa izazovima koje sa sobom nosi energetska tranzicija. Pre svega predlaže se uvođenje G komponente u obračun tarifa za pristup distributivnom sistemu u Republici Srbiji, koje u Crnoj Gori postoje. [24] Pored toga, kako bi se zaštitio distributivni sistem potrebno je u obe zemlje razmotriti upotrebu dinamičkih tarifa [29] kojima bi se implicitno upravljalo potrošnjom i proizvodnjom. Povoljnijim cenama promovisala bi se potrošnja električne energije u periodima kada je distributivni sistem manje opterećen, a skupljim cenama podsticala štednja električne energije u periodima kada je sistem veoma opterećen, odnosno stimulisala veća proizvodnju u tim periodima.

Sa istim ciljem, predlaže se preciziranje maksimalno dozvoljene snage proizvodnih objekata kupaca-proizvođača u Crnoj Gori (npr. 150 kW kao što je slučaj u Republici Srbiji [5]) kako ne bi ugrožavali rad sistema i poslovanje snabdevača npr. promenama opterećenja i naponskih prilika u sistemu i velikim troškovima debalansa za snabdevača usled iznenadnih promena u proizvodnji i potrošnji. Predlaže se da se u propisima Crne Gore, u cilju zaštite distributivnog sistema, definisu razlike između neto obračuna i neto merenja i ko i pod kojim uslovima može da koristi koji model. Takođe, predlaže se da se u Republici Srbiji izmeni regulativa u smislu plaćanja kupcu-proizvođaču viška električne energije na 01. april, kao i obračuna pristupa sistemu i naknada i poreza samo na neto električnu energiju.

Pored navedenog, predlaže se analiza koncepta viška električne energije za kupce-proizvođače tako da se višak ne prenosi po tarifama u kojim nastaje već da se npr. dve trećine viška prenose u nižu tarifu a jedna trećina u višu tarifu. Navedeno će kupcima-proizvođačima doneti mogućnost većih ušteda u nižoj tarifi, a takođe neće podsticati potrošnju u višoj tarifi u zimskom periodu kada je distributivni sistem inače jako opterećen.

Takođe, predlaže se razvoj modela obračuna koji bi motivisao kupce-proizvođače da što više električne energije koju proizvedu sami i potroše kako bi što manje opterećivali distributivni sistem i bili što nezavisniji [30]. Navedeno naročito dobija na značaju usled značajnog povećanja cena električne energije što bitno povećava uštede na troškovima za električnu energiju. Pored navedenog, potrebno je regulativom i subvencijama podsticati i lokalne samouprave i građane da pokreću različite vidove udruživanja npr. u zajednice obnovljivih izvora [31], energetske zadruge, kao i agregatore [32] jer se energetska tranzicija može sprovesti isključivo ukoliko se svaki pojedinac savesno, u skladu sa svojim finansijskim i operativnim mogućnostima, uključi u njen provođenje.

V ZAKLJUČAK

Usled sve izraženijih posledica zagađenja životne sredine

nameće se zaključak da je energetska tranzicija sa tradicionalnih izvora energije na obnovljive neophodna. Prema dosadašnjim istraživanjima obe zemlje poseduju značajne resurse obnovljivih izvora energije. Danas, zahvaljujući znatnom smanjenju troškova tehnologije i povećanju cena električne energije, potrošači su motivisani da postanu aktivni učesnici energetske tranzicije kroz različite zakonski prepoznate koncepte kao što su kupac-proizvođač, zajednice obnovljivih izvora ili aggregatori, i to ne samo zbog zaštite životne sredine već i zbog uštede na troškovima za električnu energiju.

Pored aktiviranja svakog pojedinca u energetskoj tranziciji neophodno je brinuti i o elektroenergetskom sistemu kako bi mogao da podrži neminovne promene. Operatori sistema imaju ulogu da obezbede sigurnu i pouzdanu distribuciju električne energije i da garantuju rad i sigurnost distributivnog sistema. Zbog toga je neophodno voditi računa o potrebnim investicijama u elektroenergetsku infrastrukturu, kao i o budućim zakonskim rešenjima vezanim za nove učenike na tržištu kako bi doprinisili energetskoj tranziciji uz što manje negativnih posledica po sistemu.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Godišnji izveštaj o nacionalnom rezidualnom miksu za Srbiju za 2022. godinu, EMS AD, <https://ems.rs/wp-content/uploads/2023/06/Godisnji-izvestaj-o-nacionalnom-rezidualnom-miksu-2022.pdf> [pristupljeno 13.03.2024]
- [2] Godišnji izveštaj o nacionalnom rezidualnom miksu Crne Gore za 2022. godinu, COTEE DOO, <https://cotee.me/wp-content/uploads/2021/09/Godisnji-izvjestaj-o-NRM-za-2022.-g.pdf> [pristupljeno 13.03.2024]
- [3] Policy Guidelines by the Energy Community Secretariat on the Grid Integration of Prosumers, PG 01/2018/5 Feb 2018
- [4] Zakon o energetici ("Sl. glasnik RS", br. 145/2014, 95/2018 - dr. zakon i 40/2021), https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_energetici.html [pristupljeno 13.03.2024]
- [5] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije ("Službeni glasnik RS", br. 40/21 i 35/2023), https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_korisenju-obnovljivih-izvora-energije.html [pristupljeno 13.03.2024]
- [6] Zakon o energetskoj efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije ("Službeni glasnik RS", br. 40/21), <https://www.aens.rs/propisdetalj.php?br=201> [pristupljeno 13.03.2024]
- [7] Uredba o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupca – proizvođača i snabdevača ("Službeni glasnik RS", br. 83/2021 od 27.8.2021. godine), <https://www.propisi.net/uredbu-o-kriterijumima-uslovima-i-nacinu-obracuna-potrazivanja-i-obaveza-izmedju-kupca-proizvodjaca-i-snabdevaca/> [pristupljeno 13.03.2024]
- [8] Uredba o uslovima isporuke i snabdevanja električnom energijom ("Sl. glasnik RS", br. 84/2023), https://www.paragraf.rs/propisi/uredba_o_uslovima_isporuke_i_snabdevanja_elektricnom_energijom.html [pristupljeno 13.03.2024]
- [9] Pravilnik o načinu vođenja Registra kupaca – proizvođača priključenih na prenosni, distributivni, odnosno zatvoreni distributivni sistem i metodologiji za procenu proizvedene električne energije u proizvodnom objektu kupca – proizvođača („Službeni glasnik RS“, broj 33 od 11. marta 2022. godine) https://srda.rs/wp-content/uploads/eko-pravo/energetika/zakon_o_korisenju_obnovljivih_izvora_energije/pravilnik_o_nacinu_vodenja_registra_kupaca_proizvodjaca_prikljucenih_na_prenosni_distributivni_odnosno_zatvoreni_distributivni_sistem.pdf [pristupljeno 14.03.2024]
- [10] Zakon o energetici ("Službeni list Crne Gore", br. 005/16 od 20.01.2016, 051/17 od 03.08.2017, 082/20 od 06.08.2020, 029/22 od 18.03.2022 i 152/22 od 30.12.2022) https://regagen.co.me/wp-content/uploads/2021/12/20230109_Zakon-o-energetici-precisceni-tekst.pdf [pristupljeno 14.03.2024]
- [11] Pravila za funkcionisanje distributivnog sistema električne energije

- ("Službeni list Crne Gore", br. 072/22 od 11.07.2022),
https://regagen.co.me/wp-content/uploads/2022/07/20220711_EE_PR_AROS_Pravila-za-funkcionisanje-distributivnog-sistema-elektricne-energije.pdf [pristupljeno 14.03.2024]
- [12] Funkcionalni zahtevi i tehničke specifikacije AMI/MDM sistema, sveska 1, Tehničke specifikacije brojila električne energije i komunikacionih uređaja, verzija 4.0, 2019.,
https://elektrodistribucija.rs/interni_standardi/pravila/Specifikacija_verzija_%204.0_Sveska_1_Usvojeno_na_TSS_EPSD_07022019_objaviti.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [13] Nova multifunkcionalna brojila, <https://cedis.me/nova-multifunkcionalna-brojila/> [pristupljeno 13.03.2024]
- [14] Registrar kupaca-proizvođača, Elektrodistribucija Srbije:
http://edbnavavke.edb.rs/registrar_kupaca/domacinstva/domacinstva.pdf,
http://edbnavavke.edb.rs/registrar_kupaca/stambena_zajednica/stambena_zajednica.pdf,
http://edbnavavke.edb.rs/registrar_kupaca/ostali_kp/ostali_kp.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [15] Pravila o radu tržista električne energije, novembar 2022. godine
<https://ems.rs/wp-content/uploads/2022/12/Pravila-o-radu-trzista-elektricnic-1.pdf> [pristupljeno 13.03.2024]
- [16] Tržišna pravila Crna Gora ("Službeni list CG", br. 025/19 od 30.04.2019)
<https://cotee.me/wp-content/uploads/2021/09/Trzisna-pravila.pdf> [pristupljeno 13.03.2024]
- [17] Metodologija za određivanje cena pristupa sistemu za distribuciju električne energije („Službeni glasnik RS“, broj 105/12),
<http://aers.rs/FILES/Metodologije/2012-10-31%20Metodologija%20distribucija%20EE%20SG%20105-12.pdf> [pristupljeno 13.03.2024]
- [18] Metodologija za utvrđivanje regulatorno dozvoljenog prihoda i cijena za korišćenje distributivnog sistema električne energije ("Službeni list Crne Gore", broj 71/2022 od 08.07.2022. godine), http://www.cedis.me/wp-content/uploads/2018/11/cedis_metodologija za_rdp_precisceni_tekst-metodologije_sa_svim_odeljkama_o_izmjeni.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [19] Cena električne energije za garantovano snabdevanje.
https://www.aers.rs/FILES/Odluke/OCenama/20230926_Odluka%20o%20regulisanju%20cenih.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [20] Metodologija za određivanje cene električne energije za javno snabdevanje.
http://aers.rs/FILES/Metodologije/2014-08-08_Metodologija%20javno%20snabdevanje%20EE%20SG%2084-14.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [21] Cene snabdevanja za domaćinstva u Crnoj Gori
https://www.epcg.com/sites/admin.epcg.com/files/multimedia/main_pages/files/2021/10/cijene za_snabdijevanje_krajnjih_kupaca_elektricne_energije_priklijencih_na_distributivni_sistem_2.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [22] Pravilnik o tarifama za električnu energiju "Službeni list RCG", br. 47/2005, 50/2005, 42/2007, "Službeni list CG", br. 6/2007 i 54/2009.
https://www.epcg.com/sites/epcg_drupal-testing.bildhosting.com/files/multimedia/main_pages/files/2013/08/pravilnik_o_tarifama_za_elektricnu_energiju.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [23] Godišnji izveštaj Elektrodistribucije Srbije za 2022. godinu,
https://elektrodistribucija.rs/o-nama/informacije/dokumenta/GI_2022.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [24] Odluka o utvrđivanju regulatorno dozvoljenog prihoda i cijena za korišćenje distributivnog sistema električne energije za 2024. i 2025. godinu,
https://regagen.co.me/wp-content/uploads/2023/11/2023.11.28_CEDIS_Odluka-RDP-i-cijene-za-2024.-i-2025.-1.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [25] Cena pristupa sistemu za distribuciju električne energije,
https://www.aers.rs/FILES/Odluke/OCenama/2021-10-01_ED%20Cenovnik%20-%20distribucija.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [26] Grujić, D., Kuzman, M. Modeli korišćenja električne energije kupaca-proizvođača, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 1, pp. 8-16, 2022.
<https://doi.org/10.46793/EEE22-1.08G>
- [27] Climate online baze podataka PVGIS,
https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ [pristupljeno 13.03.2024. godine]
- [28] Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj> [pristupljeno 24.03.2024]
- [29] Dynamic network tariffs - an opportunity for the energy transition, in Proc. CIRED, Rome, Italy, 12-15 June, 2023
- [30] Grujić, D., Kuzman, M., Đurišić, Ž. Novi model obračuna električne energije kupaca-proizvođača, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 25, No. 2, pp. 57-67, 2023 <https://doi.org/10.46793/EEE23-2.57G>
- [31] Kuzman, M., Grujić, D. Uloga zajednica obnovljivih izvora energije u energetskoj tranziciji, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 25, No. 1, pp. 40-50, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-1.40K>
- [32] Grujić, D., Kuzman, M. Uloga aggregatora u razvoju tržista električne energije, Electric Power Industry Journal, Vol. 1 No. 1, Article 2, pp. 15-29, 2023. <https://doi.org/10.18485/epij.2023.1.1.2>

AUTORI/AUTHORS

Dunja Grujić - Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd
 dunja.grujic@ods.rs, ORCID [0000-0001-9298-6249](https://orcid.org/0000-0001-9298-6249)

Dušan Vučić - Crnogorski operator tržista električne energije, dusan.vucic@cotee.me, ORCID [0009-0005-8824-6308](https://orcid.org/0009-0005-8824-6308)

Miloš Kuzman - Udruženje za pravo energetike Srbije, Beograd
 milos.kuzman@upes.rs, ORCID [0000-0002-9769-9713](https://orcid.org/0000-0002-9769-9713)

Comparative Analysis and Possibilities of Improving the Status of Prosumers in Montenegro and the Republic of Serbia

Abstract - Due to the need to reduce environmental pollution, the slowing of global warming and the decreasing amount of available fossil fuels, in recent years we have witnessed the intensive development of electricity generation from renewable sources, as well as the development of the electricity market. Comparative analysis of the participants in the electricity market in Montenegro and the Republic of Serbia, as well as their impact on the distribution system will be shown in this paper. Special attention will be paid to prosumers. The electricity billing models for prosumers and the possibilities for their additional energy and financial savings will be presented as part of this paper. As a conclusion, recommendations for easier future integration of prosumers and producers of electricity from renewable energy sources into the distribution system through models of aggregation, storage and management of production and consumption will be given.

Index Terms - Renewable energy sources, Electricity market, Prosumer, Distribution system

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

621.3

ENERGIJA, ekonomija, ekologija : list Saveza
energetičara / glavni i odgovorni urednik Dušan Gordić
. - God. 1, br. 1 (1996)- . - Beograd : Savez energetičara,
1996- (Kragujevac : Mašinac). - 29 cm

Tromesečno. - Drugo izdanje na drugom medijumu:
Energija, ekonomija, ekologija (Online) = ISSN 2812-7528
ISSN 0354-8651 = Energija (Beograd)
COBISS.SR-ID 108696839



www.savezenergeticara.org