

ISSN 0354-8651

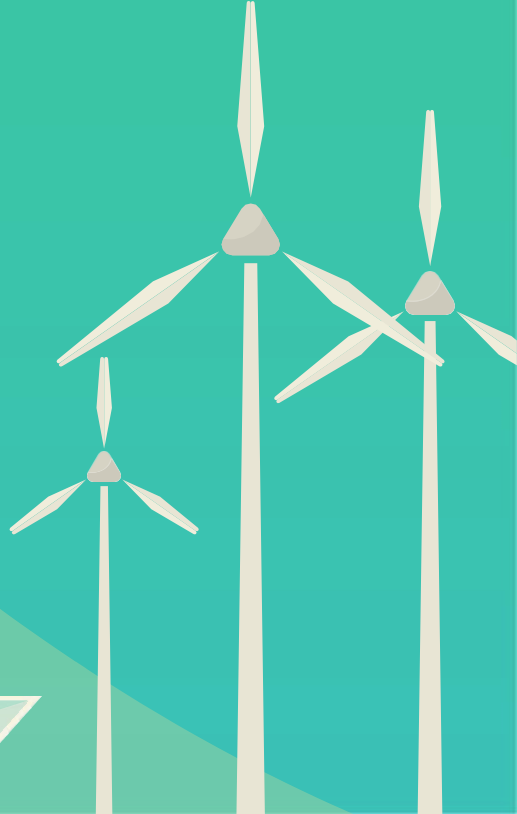


List Saveza energetičara

Broj 3 / Godina XXVII / Septembar 2025.

energija

| ekonomija | ekologija



energija

| ekonomija | ekologija



Energija / Ekonomija / Ekologija

Broj 3, Septembar 2025

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 Komatina, 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 Čirić, University of Agder, Norveška
prof. dr Nataša Markovska, MANU Skopje, Severna Makedonija
dr Stanko Janković, TenneT TSO GmbH, Savezna Republika Nemačka
prof. dr Mirza Kušljagić, 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
reprodukovano, presnimavano ili prenošeno bez
prethodne saglasnosti Izdavača.*



Sadržaj

- [01] Jelena NIKOLIĆ, Dušan GORDIĆ, Vladimir VUKAŠINOVIĆ, Davor KONČALLOVIĆ, Mladen JOSIJEVIĆ, Dubravka ŽIVKOVIĆ,
Energetska budućnost gradova: Šta je važno sa stanovišta različitih zainteresovanih strana / The Energy Future of Cities: What Matters from a Stakeholder Perspective

- [07] Nikola MILIVOJEVIĆ, Dejan DIVAC, Boban STOJANOVIĆ, Prvoslav MARJANOVIĆ, Brankica MAJKIĆ-DURSUN, Dragan STANKOVIĆ
Holistički pristup upravljanju HEPS Đerdap / A Holistic Approach to Managing the Iron Gate Hydropower and Navigation System

- [14] Biljana TRIVIĆ, Iva BATIĆ, Milan PETROVIĆ
Nova regulativa u oblasti strateškog razvoja energetskeg sektora u Republici Srbiji / New Regulation in the Field of Strategic Development of the Energy Sector in the Republic of Serbia

- [21] Branislav PETROVIĆ, Marija VASILEV, Miloš BANJAC
Proračun godišnje potrošnje energije toplotne pumpe metodom temperaturnih segmenata / Calculation of Annual Energy Consumption of a Heat Pump by the Bin-method

- [30] Miljana TODOROVIĆ, Zoran STOJANOVIĆ
Optimalna estimacija električnih parametara netransponovanih vodova korišćenjem sinhrofazorskih merenja / Optimal Untransposed Transmission Line Parameter Estimation Using Synchrophasors

- [38] Dunja GRUJIĆ, Jelisaveta KRSTIVOJEVIĆ, Jelena STOJKOVIĆ TERZIĆ
Izazovi energetske tranzicije u distributivnom sistemu: kritička analiza i predlozi za njihovo rešavanje / Energy Transition Challenges in the Distribution System: Critical Analysis and Proposals for Addressing Them

- [48] Mladen JOSIJEVIĆ, Dušan GORDIĆ, Vanja ŠUŠTERŠIČ, Vladimir VUKAŠINOVIĆ, Dubravka ŽIVKOVIĆ, Jelena NIKOLIĆ
Metodologija proračuna ugljeničnog otiska proizvoda na primeru mlekare / A Methodology for Calculating Product Carbon Footprint in the Case of a Dairy

- [56] Miodrag VUKOVIĆ, Željko V. DESPOTOVIĆ
Primena baterijskih sistema kod solarnih elektrana / Implementing Battery Systems in Photovoltaic Power Plants

- [64] Bojana PETROVIĆ RAIČEVIĆ
Energija iz otpada: pravni aspekt proizvodnje vodonika iz komunalnog otpada u Evropskoj uniji / Energy from Waste: Legal Aspects of Hydrogen Production from Municipal Waste in the European Union

- [73] Milan ĐERIĆ, Željko V. DESPOTOVIĆ, Miloš KOSTIĆ, Uroš ILIĆ
Eksplotaciona ispitivanja brzih punjačkih stanica za E-automobile snaga 120kW i 240kW / Exploitation Tests of Fast Charging 120KW and 240KW Power Stations for E-cars

Energetska budućnost gradova: Šta je važno sa stanovišta različitih zainteresovanih strana

Jelena Nikolić^{*,**}, Dušan Gordić^{*}, Vladimir Vukašinić^{*}, Davor Končalović^{*}, Mladen Josijević^{*}, Dubravka Živković^{*}

^{*} Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Srbija

^{**} Aalborg University, Danska

Rezime - Kako se u gradovima koristi gotovo 65% ukupno proizvedene finalne energije u svetu, oni predstavljaju nosioce energetske promene. Shodno tome, ovaj rad analizira uticaj nacrtane Strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine na kreiranje lokalnih politika i postizanja klimatske neutralizacije u gradovima. Metodologija koja se zasniva na skaliranju nacionalne strategije na nivo grada, primenjena je na primeru grada Kragujevca. U okviru ovog istraživanja korišćena je multikriterijumska analiza za evaluaciju i rangiranje mera predloženih Strategijom, uz analizu mišljenja ključnih zainteresovanih strana iz relevantnih oblasti, uključujući lokalne vlasti, stručnjake iz relevantnih oblasti, predstavnike civilnog društva, privatni sektor i građane. Rezultati istraživanja doprinose boljem razumevanju uticaja nacionalnih dokumenata na oblikovanje lokalnih politika, uz identifikaciju ključnih faktora za uspešno ostvarivanje energetske promene. Prikazani zaključci pružaju smernice za donošenje odluka koje su u skladu s lokalnim potrebama i prioritetima.

Ključne reči - energetske planiranje, energetske politike, gradovi, energetska tranzicija, MCDM

I UVOD

Smanjenje posledica globalnog zagrevanja, prouzrokovano povećanjem emisija gasova sa efektom staklene bašte, jedan je od glavnih izazova današnjice. Kako je povećanje emisije ugljen-dioksida (CO₂) najčešće povezano sa antropogenim delovanjem i kako u gradovima živi više od 50% svetske populacije [1], energetske aktivnosti u urbanim sredinama su od značaja. Shodno tome, ublažavanje klimatskih promena se ne može rešiti samo sa globalnog, ili nacionalnog nivoa, već su lokalne akcije i lokalne strategije od suštinske važnosti [2]. Međutim, napuštanje fosilnih goriva je proces koji zahteva vreme, određena novčana ulaganja, kao i građansko prihvatanje promena. Dok gradovi moraju da ispune energetske potrebe rastuće populacije, oni takođe moraju da učestvuju u sprovođenju politika za ispunjavanje klimatskih ciljeva. Na tom putu se gradovi i lokalne samouprave često suočavaju sa ograničenim resursima i budžetom i često su u senci nacionalnih krovnih regulativa. Zato je potrebno pronaći način za iskorišćenje prilika za delovanje unutar postojećih planova, kroz definisanje mehanizma za skaliranje nacionalnih strategija na lokalne nivoe, uz maksimalno iskorišćenje teritorijalno dostupnih obnovljivih

izvora energije (OIE). Pored toga, gradski energetske sistemi su identifikovani kao složeni društveno-tehnički sistemi [3], zbog čega planiranje energetske budućnosti treba da bude zasnovano na analizi dostupnih tehnologija i mogućnosti za njihovo korišćenje na lokalnom nivou u skladu sa aspektima društvene prihvatljivosti [4]. Dakle, dekarbonizacija u gradovima se zasniva na sveobuhvatnom pristupu, kroz analizu zakonodavnih okvira na nacionalnim nivoima, energetske potreba grada, kao i mogućnosti iskorišćenja potencijala OIE. Kako se razumevanje koncepta energetske tranzicije značajno razlikuje u zavisnosti od interesovanja i interesa građana [5], važno je pronaći način za obuhvatanje različitih mišljenja, čime se obezbeđuje održivost procesa energetske promene.

Shodno tome, u ovom radu je predstavljena metodologija za analizu uticaja nacionalnih energetske strategije na proces dekarbonizacije u gradu, primenjena na studiji slučaja grada Kragujevca. Metodologija uključuje analizu stavova različitih zainteresovanih strana, sa ciljem utvrđivanja važnosti različitih kriterijuma za usvajanje i implementaciju novih tehnologija, uzimajući u obzir ekonomske, društvene i kriterijume zaštite životne sredine. Na ovaj način omogućava se proces energetske promene u zemljama čiji se energetske sistem zasniva na upotrebi fosilnih goriva, na način koji je društveno prihvatljiv. Kako određivanje posledica lokalnih akcija na nacionalne i internacionalne energetske politike nije analizirano u dovoljno detalja [6], rezultati ovog rada doprinose proširivanju znanja iz oblasti energetske planiranja u gradovima i doprinose ostvarivanju sledećih ciljeva održivog razvoja [7]: 7 - dostupna i obnovljiva energija, 11 - održivi gradovi i zajednice, i 13 - klimatske akcije.

II KRATAK PREGLED ZNAČAJNIH POLITIKA

Ostvarivanje ciljeva energetske tranzicije, kroz promenu načina proizvodnje, distribucije i korišćenja energije, na nivou Evropske Unije postavljeno je kroz razvoj energetske politika i novih zakonodavnih okvira. Zajedno, oni predstavljaju regulatorni i strateški energetske okvir, kroz definiciju prioriteta i ostvarivanje energetske bezbednosti, uz obavezujuće standarde koji utvrđuju pravila za sprovođenje politika [8]. Evropski zeleni sporazum (eng. *European Green Deal*) [9] je krovna evropska strategija, sa dugoročnim ciljevima uspostavljanja klimatske neutralnosti u Evropi do 2050. godine, kroz kreiranje novih prilika za investicije i nove poslove, uz ostvarivanje energetske pravde i jednakih mogućnosti za sve građane. Sve zemlje članice, kao i

zemlje koje su kandidati za članstvo, su u obavezi da usaglasе svoje zakonodavne okvire sa novim zakonima predviđenim sporazumom i setom regulativa, koje za cilj imaju postizanje značajnog smanjenja emisije CO₂ - „Čista energija za sve Evropljane“ (eng. *Clean Energy for All Europeans*) [10], koji je stupio na snagu 2019. godine i „Prilagođeni za 55“¹ (eng. *Fit for 55*) koji je usvojen 2021. godine [11]. Kao rezultat toga, u avgustu 2024. godine, u Republici Srbiji je usvojen Integrirani nacionalni energetska i klimatski plan Republike Srbije za period do 2030. sa vizijom do 2050. godine [12], a u julu 2024. godine predstavljen je Nacrt Strategije Energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine [13]. Ovim dokumentima predloženi su koraci razvoja energetskog sistema Srbije, sa ciljem veće integracije OIE i smanjenja emisije CO₂.

Kada su u pitanju dokumenti na lokalnim nivoima, na osnovu Zakona o energetska efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije [14], sve lokalne samouprave u kojima živi više od 20.000 stanovnika su u obavezi da usvoje Programe energetske efikasnosti, kojima se promovira racionalna upotreba energije. Shodno tome, Kragujevac je u 2022. godine predstavio i usvojio Program energetske efikasnosti grada Kragujevca za period 2023-2025, kojim se „stvaraju preduslovi za izvršenje zakonskih obaveza grada Kragujevca u oblasti energetike, energetske efikasnosti i korišćenja OIE“ [15]. Ovim dokumentom su sistematično prikazane karakteristike grada, njegove trenutne energetske potrebe u javnim zgradama, kao i predložene mere za postizanje mogućih budućih ušteda. Međutim, uvid u predložene mere gotovo uopšte ne obuhvata OIE, što dovodi u pitanje realne ambicije ka procesu dekarbonizacije grada [4].

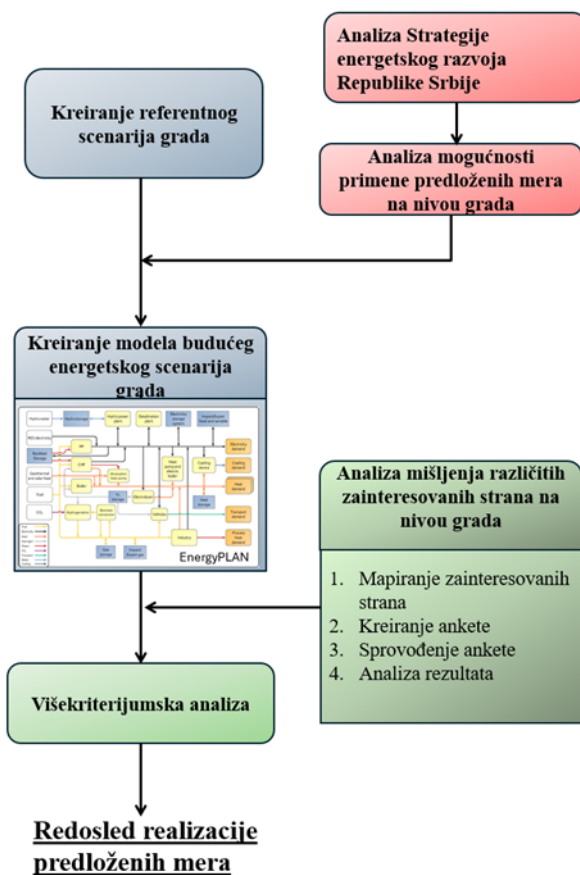
III METODOLOGIJA

Kako je cilj ovog rada utvrđivanje posledica nacionalne energetske strategije na dekarbonizaciju grada, kao i participativnog učešća zainteresovanih strana u procesu donošenja odluka o redosledu implementacije mera predloženim ovim dokumentom, metodologija u ovom radu (Slika 1.) se u osnovi zasniva na analizi energetskog modela grada Kragujevca.

Energetski sistem grada analiziran je simulacijom energetskog modela grada, primenom softverskog alata EnergyPLAN [16]. EnergyPLAN je simulacioni alat koji omogućava integraciju svih energetska sektora kroz optimizaciju tokova proizvodnje, konverzije, skladištenja i upotrebe energije, čime se ostvaruje koncept pametnih energetska sistema. Ova međusektorska integracija postiže se na časovnom nivou tokom cele godine, optimalnim angažovanjem svih postojećih tehnologija u sistemu, kao što su tehnologije centralizovane proizvodnje električne i toplotne energije, varijabilni obnovljivi izvori energije, toplotne pumpe i tehnologija za konverziju električne energije (tzv. *Power-to-X* tehnologije).

Simulacije se zasnivaju na tehničkim simulacijama koje istovremeno balansiraju upotrebu električne i toplotne energije, određivanjem prioriteta angažovanja tehnologija u sistemu daljinskog grejanja. Ovakva postavka prioritizuje upotrebu otpadne toplotne, kao i solarnih kolektora u sistemu daljinskog grejanja. Integracija značajnih kapaciteta (OIE) uz povećanje

mogućnosti njihove upotrebe i minimizaciju viškova proizvodnje energije omogućena je prvenstveno angažovanjem toplotnih pumpi. Toplotne pumpe smanjuju proizvodnju iz kombinovanih toplotnih i električnih postrojenja (TETO) usled smanjenja toplotnog opterećenja, čime se smanjuje i proizvodnja električne energije. Istovremeno, neiskorišćena toplotna energija može biti skladištena u sistemima za akumulaciju toplotne, omogućavajući maksimizaciju iskorišćenja proizvedene toplotne energije. Kada u sistemu postoji višak električne energije, ona se može skladištiti u formi vodonika primenom elektrolize, pri čemu otpadna toplota iz ovog procesa može biti korišćena u sistemu daljinskog grejanja. Takođe, električna energija se može skladištiti kroz integraciju električnih baterija, ili reverzibilnih elektrana. Energija će se skladištiti kada postoji višak proizvodnje, a koristiće se kada sistem ne proizvodi energiju iz OIE, čime se smanjuje uvoz energije ili angažovanje energetska jedinica koje koriste fosilna goriva. Pored toga, smanjenje uvoza ili redukcija proizvodnje viškova energije moguća je smanjenjem proizvodnje iz varijabilnih OIE, zamenom kotlova na fosilna goriva električnim kotlovima, ili smanjenjem proizvodnje električne energije iz TETO uz povećanje proizvodnje toplotne iz vršnih kotlova, pri čemu je moguće definisati redosled uspostavljanja ovih mera.



Slika 1. Šematski prikaz korišćene metodologije

Da bi simuliranje ponašanja sistema bilo moguće, neophodno je prvo definisati proizvodne kapacitete, gubitke sistema, kao i časovnu potrebu i proizvodnju energije. Nakon toga, EnergyPLAN prikazuje podatke o potrošnji primarne energije u

¹ Slobodan prevod autora rada

sistemu, emisijama CO₂, troškovima sistema, kao i sveobuhvatni energetski bilans.

Da bi se odredile posledice integracije novih mera dekarbonizacije, potrebno je kreirati model sadašnjeg, referentnog sistema. Kako energetske potrebe u gradu uključuju ne samo sektor zgrada, već i industriju i transport, neophodno je usvojiti određene pretpostavke kojima bi se omogućila ravnomerna i pravedna raspodela energetskih potreba u svim energetski intenzivnim sektorima na nivou države. Naime, u procesu dekarbonizacije nacionalnog energetskog sistema, gradovi treba da budu prepoznati kao delovi slagalice i nosioci energetskih promena. Kako se produkti sektora industrije ne koriste samo unutar gradova u kojima se fizički proizvode, uspostavljanje principa pravednosti zasniva se na ravnomernoj raspodeli potrošnje energenata u skladu sa udelom stanovnika u analiziranom gradu u poređenju sa ukupnim brojem stanovnika u Srbiji. Isti principi pravednosti usvojeni su i za sektor transporta, jer se očekuje da stanovnici često putuju i izvan geografskih granica samog grada. S tim u vezi, energetske potrebe u sektoru transporta i industrije definisane su na osnovu energetskog bilansa Republike Srbije za 2019. godinu. Ova godina je uzeta u obzir jer je poslednja godina sa dostupnim podacima koja ne uključuje kovid krizu, kao ni havarije u elektroenergetskom sektoru, koje su rezultirale neuobičajenim energetskim ponašanjem energetskog sistema. Sa druge strane, podaci o potrošnji energije u sistemu daljinskog grejanja, kao i podaci o energetskim potrebama svih javnih institucija, odgovaraju realnim potrošnjama u gradu tokom analizirane godine. Kako ne postoje precizni podaci o sistemu grejanja u individualnim ložištima, usvojeni su statistički podaci prikazani u radu [17].

Budući energetski scenario počiva na istim postulatima pravedne energetske raspodele, pri čemu se u obzir uzima predviđeni budući broj stanovnika u Srbiji i u gradu Kragujevcu za 2045. godinu. Takođe, kako Strategija energetskog razvoja Republike Srbije uzima u obzir dekarbonizaciju cele zemlje, potrebno je svesti je na nivo grada. Usaglašavanje nacionalnih strategija i lokalnih ciljeva je od važnosti, jer je samo kroz saradnju na različitim nivoima moguće ostvariti ciljano smanjenje emisije CO₂. Vodeći se pomenutim postulatima, Nacionalna strategija je svedena na nivo grada Kragujevca, usvajanjem odgovarajućih udela predloženih mera OIE, čije je izvođenje moguće na analiziranom lokalitetu. Dakle, očekivane promene u elektroenergetskom sistemu grada, koje su u skladu sa Strategijom energetskog razvoja RS, su:

- povećana potreba za električnom energijom u svim sektorima i njeno moguće uparivanje potražnje do 25% (tzv. fleksibilnost sistema);
- povećana energetska efikasnost u sektoru zgradarstva: 1% godišnje do 2030. i 2% godišnje od 2030. do 2045. za sektor domaćinstava; i 3% godišnje do 2030. i 6% godišnje nakon toga za sektor javnih zgrada;
- povećan udeo toplotnih pumpi (15% toplotnih potreba u domaćinstvima i 25% u javnim zgradama); u domaćinstvima toplotne pumpe zamenjuju individualna ložišta koja koriste lož ulje i ugalj, kao i 50% ložišta na prirodni gas i biomasu;
- povećan udeo električnih vozila; električna energija predviđena za potrebe transporta usvojena je na osnovu

udela predviđenih energetskih potreba iz bilansa prikazanog u Strategiji;

- 5% sanitarne tople vode zagrevaće se primenom solarnih kolektora;
- solarni kolektori će se koristiti i u sistemu daljinskog grejanja, prema predviđenom udelu;
- kapaciteti i produkcija OIE usvojeni su na osnovu mogućnosti korišćenja teritorijalno dostupnih OIE;
- kako je planirana izgradnja reverzibilne elektrane Bistrica, usvojen je udeo koji odgovara gradu, radi balansiranja instaliranog kapaciteta OIE;
- potreba za biogorivima usvojena je na osnovu tabele energetskog bilansa, uz napomenu da je upotreba biomase ograničena na količinu biomase koja se smatra globalno održivom (27 GJ/stanovnik godišnje), na osnovu preporuka prikazanih u [2,18,19].

Energetske potrebe sektora transporta, industrije i električne energije usvojene su prema udelu predviđenom broju stanovnika u gradu u poređenju sa predviđenim brojem stanovnika u Srbiji, na osnovu energetskog bilansa, prikazane u Tabeli A. 11. na strani 101 Energetske strategije Republike Srbije.

Redosled instaliranja predloženih mera (instalacija OIE, toplotnih pumpi i solarnih kolektora²) određen je na osnovu participativnog učešća zainteresovanih strana i primene višekriterijumske analize. Višekriterijumska analiza je u dosadašnjoj literaturi korišćena u procesu energetskog planiranja na više nivoa [20]. Prilikom donošenja odluka mogu se koristiti različite metode u okviru višekriterijumske analize. Za potrebe ovog rada, predložena je primena WSM metode (eng. *Weight Sum Method*), jer zbog jednostavne primene može da bude replicirana u različitim studijama slučaja i time doprinese učešću građana u procesu donošenja odluka. Rangiranje predloženih mera zasnovano je na jednačini 1:

$$R_i = \sum_{j=1}^n k_j \cdot \bar{n}_{ij} \quad \text{za } i=1 \text{ to } m \quad (1)$$

gde su:

R_i [–] rezultat WSM metode; veći rezultat ukazuje na prednost pri rangiranju,

n [–] broj kriterijuma,

m [–] broj predloženih mera,

k_j [%] težinski faktor za svaki od kriterijuma,

n_{ij} [–] normalizovani faktor za svaku predloženu meru.

Kako bi rangiranje predloženih mera bilo moguće, neophodno je usvojiti kriterijume. U ovom radu, u obzir su uzeti ekonomski kriterijumi (troškovi instalacije OIE, troškovi održavanja sistema); društveni kriterijumi (kreiranje novih radnih mesta tokom ugradnje tehnologije, kreiranje novih radnih mesta u toku radnog veka tehnologije i održavanja); tehnički kriterijumi (proizvodnja energije na godišnjem nivou; efikasnost tehnologije); kriterijumi zaštite životne sredine (godišnje smanjenje emisije CO₂). Dakle, ukupno je u obzor uzeto 7 kriterijuma. Normalizovani faktor za svaku od mera određen je u

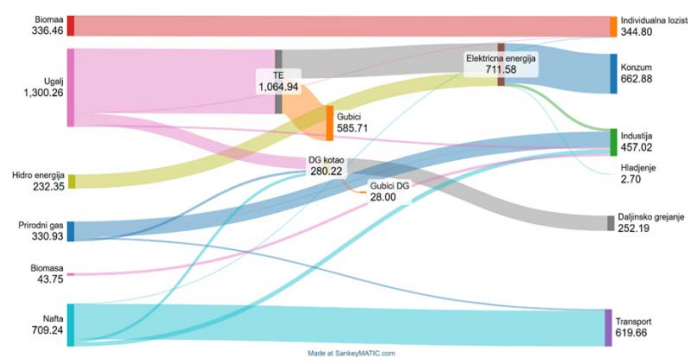
² U obzir su uzete samo pobrojane mere, jer se očekuje postepeni prelazak na električna vozila i napuštanje motora sa unutrašnjim sagorevanjem, kao i unapređenje energetske efikasnosti. Reverzibilna hidroelektrana Bistrica je od nacionalnog interesa, te se njena izgradnja svakako očekuje u analiziranom periodu.

zavisnosti od toga da li je poželjni rezultat najviši u opsegu rezultata dobijenih simulacijom, ili najniži. Kada je najniža vrednost najpoželjnija, normalizovana vrednost $\bar{n}_{ij}$ predstavlja odnos minimalne vrednosti svih predloženih mera i vrednosti dobijene za posmatranu meru. Kod kriterijuma gde je najviša vrednost najpoželjnija, normalizovana vrednost $\bar{n}_{ij}$ predstavlja odnos dobijene vrednosti za posmatranu meru i maksimalne vrednosti svih predloženih mera u okviru posmatranog kriterijuma.

Težinski faktori su određeni sprovođenjem ankete među zainteresovanim stranama na nivou grada uključujući sektor akademije, nevladinih organizacija, lokalne donosioca odluka i građane.

IV REZULTATI I DISKUSIJA

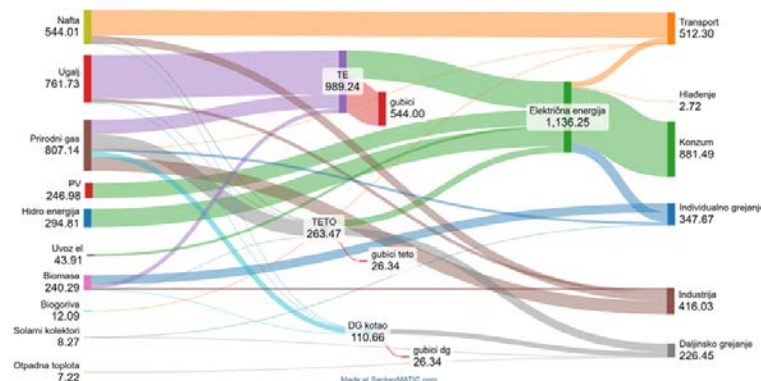
Rezultati energetskog modeliranja Referentnog modela grada Kragujevca (Slika 2.) pokazuju da je energetsko snabdevanje u gradu još uvek visoko zavisno od fosilnih goriva u svim sektorima, izuzev u individualnim ložištima, u kojima je najzastupljenija upotreba biomase. Međutim, individualna grejna tela karakteriše niska efikasnost, što rezultira korišćenjem biomase na način koji se ne može smatrati održivim.



Slika 2. Dijagram tokova referentnog energetskog scenarija

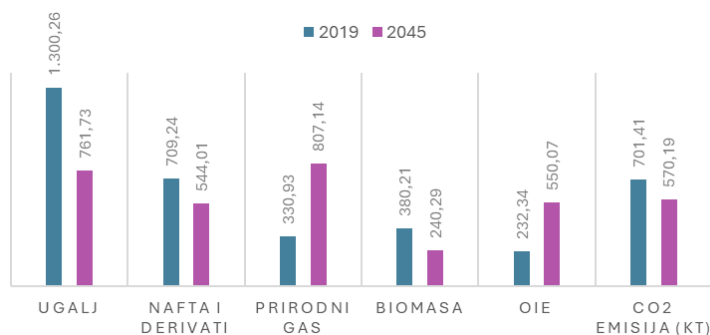
Analizom dijagrama tokova energije budućeg energetskog scenarija, prikazanom na na slici 3. uviđa se povećanje integracije OIE, prvenstveno solarnih panela. Napominje se da, iako strategija obuhvata instaliranje kapaciteta vetrogeneratora, oni su izuzeti iz analize na nivou grada, jer njihova instalacija nije moguća zbog karakteristika lokaliteta. Elektrifikacija dela transportnog sektora rezultira smanjenjem upotrebe fosilnih goriva. S druge strane, iako se u sektoru industrije očekuje povećanje elektrifikacije, takođe se zapaža povećana upotreba nafte i naftnih derivata, kao i prirodnog gasa. Shodno prikazanom, zaključuje se da sektor industrije predstavlja jedini sektor u kojem se u budućem periodu očekuje povećanje emisije CO₂. Kao takav predstavlja izazov za buduća energetska planiranja, ali i sektor koji pruža potencijale za primenu novih tehnologija, poput hvatanja i skladištenja ugljenika i njegove upotrebe prilikom proizvodnje goriva nove generacije (e-metan, e-metanol i sl.). Upotreba otpadne toplote iz industrije, kao i primena solarnih kolektora u sistemu DG smanjuju upotrebu fosilnih goriva u ovom sektoru. Takođe, zamena individualnih ložišta efikasnijim, kao i primena toplotnih pumpi, rezultiraju redukcijom emisije u sektoru zgradarstva. Ovakav pristup

rezultira i smanjenjem upotrebe biomase na neodrživ način, čime se omogućava korišćenje ovog energenta u sistemima sa većom efikasnošću.



Slika 3. Dijagram energetskih tokova grada Kragujevca za 2045. godinu

Usvajanje novih mera, predloženih Strategijom, dovodi do promena u energetskom miksu grada. Kao što je prikazano na Slici 3, svodenje nacionalne strategije na gradski nivo rezultira smanjenjem upotrebe uglja, kao i nafte i naftnih derivata. Međutim, usled zamene uglja prirodnim gasom u TE i TETO, očekuje se povećana upotreba ovog energenta.



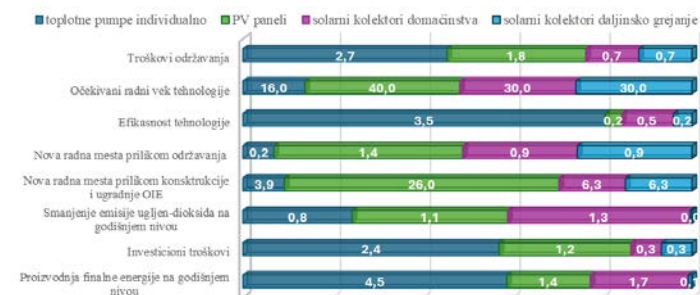
Slika 4. Upotreba finalne energije (GWh/godina) i emisija CO₂ u Kragujevcu u toku 2019. i 2045. godine

Sveobuhvatno, integracija svih predloženih mera u Strategiji rezultira smanjenjem emisije od 131 kt CO₂ na godišnjem nivou. Integracija analiziranih mera se višestruko odražava na sistem, ne samo u pogledu tehno-ekonomskih parametara, poput proizvodnje energije i smanjenja emisije CO₂, već utiče i na društvene kriterijume kreiranjem novih radnih mesta. Posledice instaliranja mera predloženih strategijom na svaki posmatrani kriterijum koji utiče na utvrđivanje redosleda instaliranja mera, prikazane su na Slici 5.

Kako prikazani proces predstavlja dugoročni plan i kako je neophodno prilagoditi energetsku tranziciju građanima, prilikom implementacije predloženih mera u obzir treba uzeti mišljenje svih zainteresovanih strana. Na ovaj način, učesćem u procesu donošenja odluka i prezentovanja različitih mogućnosti, građani postaju aktivni učesnici u kreiranju budućnosti svog grada.

Anketu, u kojoj su zainteresovane strane ocenjivale značaj kriterijuma, popunilo je 128 građana. Od prikupljenih odgovora,

20% pripada javnoj upravi i donosiocima odluka, 28% akademskoj zajednici, 11% nevladinom sektoru i 61% građanima.



Slika 5. Posledica implementacije jedinične snage predloženih mera na analizirane kriterijume³

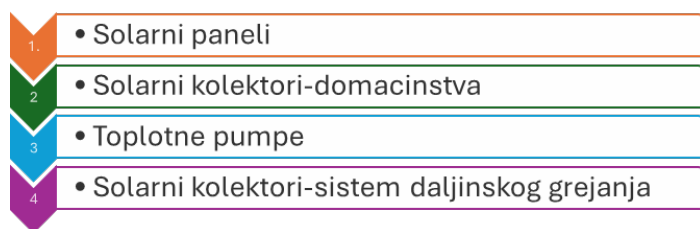
Normalizacijom odgovora, utvrđeni su težinski faktori za svaku od analiziranih grupa (Tabela 1.).

Tabela 1. Težinski faktori za svaki kriterijum iz ugla različitih zainteresovanih strana

	Proizvodnja finalne energije	Investicioni troškovi	Smanjenje emisije CO ₂	Nova radna mesta (izgradnja)	Nova radna mesta (o&m)	Efikasnost tehnologije	Očekivani radni vek tehnologije	Troškovi održavanja
akademija	13,42%	12,97%	12,52%	9,93%	10,04%	13,20%	13,99%	13,92%
građani	13,46%	12,51%	12,51%	10,50%	10,70%	13,80%	13,85%	12,66%
javna uprava	13,10%	12,37%	12,37%	11,64%	11,79%	13,25%	12,52%	12,95%
NVO	13,56%	12,50%	13,03%	11,44%	10,90%	12,77%	12,77%	13,03%

Na osnovu prikazanih podataka, uviđa se da je u svim ispitivanim kategorijama najvažnija godišnja produkcija energije, dok kreiranje novih radnih mesta ne predstavlja imperativ ni u jednoj grupi ispitanika.

Uzimajući u obzir težinske faktore i primenom formule (1), utvrđen je redosled implementacije novih mera za dekarbonizaciju grada (Slika 6).



Slika 6. Redosled implementacije novih mera energetske tranzicije, zasnovan na analizi mišljenja građana

Energetsku tranziciju u gradu poželjno je otpočeti sa instalacijom mera koje pružaju najbolji odnos troškova instalacije i

moгуćnosti proizvodnje energije na godišnjem nivou. Na osnovu analize prikupljenih podataka, kako bi energetska tranzicija u gradu bila u skladu sa nacionalnom strategijom, predlaže se instaliranje solarnih panela na krovovima domaćinstava i javnih zgrada, zatim instaliranje solarnih kolektora za zagrevanje sanitarne tople vode. Kako se u Srbiji za zagrevanje STV najčešće koriste električni grejači, ova mera će uticati na smanjenje potrošnje električne energije, čija proizvodnja predstavlja karbonski intenzivan sektor u Srbiji. Nakon toga se predlaže ugradnja toplotnih pumpi, kao zamena za neefikasna ložišta. Ova mera u sprezi sa solarnim panelima može da omogući bolju integraciju varijabilnih OIE na nivou grada. Solarni kolektori u sistemu daljinskog grejanja u Kragujevcu bi imali veći udeo u proizvodnji energije kada bi se sistem daljinskog grejanja koristio i za zagrevanje STV u domaćinstvima koja su deo mreže sistema daljinskog grejanja. Na ovaj način, solarni kolektori bi mogli da zadovolje deo energetskih potreba u letnjim mesecima, čime bi se uticalo na smanjenje proizvodnje električne energije.

V ZAKLJUČAK

Analiza uticaja nacionalne strategije na klimatsku neutralnost u gradu ukazuje na to da strateški okvir predviđa smanjenje emisije CO₂ u sektoru saobraćaja i zgradarstva. Međutim, izostanak očekivanog napretka u industrijskom sektoru sugerise da su potrebni dodatni napor, kako u pogledu inovacija, tako i u kreiranju specifičnih lokalnih politika koje bi podržale tranziciju industrije ka niskougljeničnom razvoju. Istovremeno, kako bi se podstakla energetska tranzicija na lokalnim nivoima, neophodno je uključiti sve zainteresovane strane. Mogući način za jačanje participativnog pristupa je uključivanje građana u proces vrednovanja predloženih rešenja za energetska budućnost grada. Rezultati pokazuju da građani najveću važnost pridaju kriterijumima koji garantuju tehničku i ekonomsku održivost, pre svega proizvodnji energije i očekivanom radnom veku instalirane tehnologije. S druge strane, kriterijumi poput kreiranja novih radnih mesta dobili su najmanji značaj, što ukazuje da građani trenutno više vrednuju funkcionalne i dugoročne koristi energetskih rešenja nego kratkoročne socioekonomske efekte.

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da na lokalnom nivou postoji značajan prostor za dalje unapređenje procesa dekarbonizacije, kako kroz povećanu institucionalnu podršku, tako i kroz intenzivnije uključivanje zajednice. Unapređenje komunikacije između lokalne vlasti i građana, jasnije definisanje ciljeva i koristi predloženih mera, kao i razvoj mehanizama za praćenje i evaluaciju implementacije, predstavljaju ključne korake za ubrzanje tranzicije ka klimatski neutralnom gradu.

LITERATURA

- [1] Share of the population living in urban areas. <https://ourworldindata.org/grapher/share-of-population-urban> [pristupljeno 23.01.2025]
- [2] Thellufsen, J.Z., Lund, H., Sorknaes, P., Østergaard, P.A., Chang, M., Drysdale, D., Nielsen, S., Djørup, S.R., Sperling, K. Smart energy cities in a 100% renewable energy context, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 129, 109922, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109922>
- [3] Gupta, K., Karlsson, K., Ahlgren, E.O. City energy planning: Modeling long-term strategies under system uncertainties, Energy Strategy Reviews, Vol. 56, 101564, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101564>

³ Količine proizvedene energije (GWh/godina), kao i smanjenje emisije CO₂ (kt) određeni su simulacijom energetskog modela budućeg scenarija. Troškovi instalacije mera usvojeni su na osnovu udela planiranih troškova prikazanih u Strategiji energetike, dok su troškovi održavanja usvojeni kao procentuani udeo investicionih troškova u skladu sa preporukama prikazanim u [21]. Faktor zapošljavanja i kreiranja novih radnih mesta usvojen je na osnovu [22]. Radni vek tehnologije određen je na osnovu očekivanog razvoja tehnologija za analiziranu 2045. godinu [22]

- [4] 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.org/10.46793/EEE23-2.22N>
- [5] Ristić, V., Žikić, M., Vujanović, D., Trkulja, I., Mijušković, O. Definisanje optimalnog proizvodnog miksa u dekarbonizovanom energetskom sistemu, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 22-27, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.22R>
- [6] Fuhr, H., Hickmann, T., Kern, K. The role of cities in multi-level climate governance: local climate policies and the 1.5 °C target, *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 30, pp. 1-6, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2017.10.006>
- [7] The 17 goals. United Nations n.d., <https://sdgs.un.org/goals> [pristupljeno 23.01.2025]
- [8] Pavlović, B., Madžarević, A., Ivezić, D., Živković, M., Mojić, D. Energetska tranzicija u domaćinstvima: analiza usaglašenosti Srbije sa paketom „Čista energija za sve Evropljane“, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 26, No. 1, pp. 51-58, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE24-1.51P>
- [9] European Green Deal. European Commission 2019. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en [pristupljeno 23.01.2025]
- [10] Clean energy for all Europeans 2019. <https://south.euneighbours.eu/wp-content/uploads/2022/07/Clean-energy-for-all-europeans-package-ENG-0-1.pdf> [pristupljeno 23.01.2025]
- [11] Fit for 55. European Council n.d. <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/> [pristupljeno 23.01.2025]
- [12] Integrisani nacionalni energetska i klimatski plan republike Srbije za period do 2030. sa vizijom do 2050. godine. <https://www.mre.gov.rs/tekst/1115/-integrisani-nacionalni-energetski-i-klimatski-plan-republike-srbije-za-period-do-2030-sa-vizijom-do-2050-godine.php> [pristupljeno 23.01.2025]
- [13] Javne konsultacije i javne rasprave o nacrtu Strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine. <https://www.mre.gov.rs/tekst/sr/5910/-javne-konsultacije-na-nacrt-strategije-razvoja-energetike-rs-do-2040-sa-projekcijama-do-2050godine-sa-pratecim-izvestajem-o-spu.php> [pristupljeno 26.01.2025]
- [14] Zakon o energetske efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije, Sl. glasnik RS, br. 35/2023, https://www.paragraf.rs/izmene_i_dopune/290423-zakon-o-izmenama-i-dopunama-zakona-o-koriscenju-obnovljivih-izvora-energije.html [pristupljeno 26.01.2025]
- [15] Program energetske efikasnosti grada Kragujevca za period 2023-2025. sa planom energetske efikasnosti za 2023. god. <https://kragujevac.ls.gov.rs/extfile/sr/481/81/Broj%2039A%2027.%20DEC%202022.pdf> [pristupljeno 26.01.2025]
- [16] Lund, H., Thellufsen, J.Z., Østergaard, P.A., Sorknæs, P., Skov, I.R., Mathiesen, B.V. EnergyPLAN - Advanced analysis of smart energy systems, *Smart Energy*, Vol. 1, 100007, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.segy.2021.100007>
- [17] Pavlović, B., Ivezić, D., Živković, M. Izazovi energetske tranzicije u sektoru individualnog grejanja, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 17-21, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.17P>
- [18] Lund, H., Thellufsen, J.Z., Sorknæs, P., Mathiesen, B.V., Chang, M., Madsen, P.T., Kany, M.S., Skov, I.R. Smart energy Denmark. A consistent and detailed strategy for a fully decarbonized society, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 168, 112777, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112777>
- [19] Lund, H., Skov, I.R., Thellufsen, J.Z., Sorknæs, P., Korberg, A.D., Chang, M., Mathiesen, B.V., Kani, M.S. The role of sustainable bioenergy in a fully decarbonised society, *Renewable Energy*, Vol. 196, pp. 195-203, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.026>
- [20] Shimray, B.A., Singh, K.M., Mehta, R.K. A survey of Multi-Criteria Decision Making Technique used in Renewable Energy Planning, *International Journal of Computer*, Vol. 25, No. 1, 2017. <https://doi.org/10.53896/ijc.v25i1.967>
- [21] Technology Catalogues. Energystyrelsen 2025. <https://ens.dk/en/analyses-and-statistics/technology-catalogues> [pristupljeno 26.01.2025]
- [22] Ram, M., Osorio-Aravena, J.C., Aghahosseini, A., Bogdanov, D., Breyer, C. Job creation during a climate compliant global energy transition across the power, heat, transport, and desalination sectors by 2050, *Energy*, Vol. 238, Part A, 121690, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121690>

AUTORI

Jelena Nikolić - istraživač saradnik, Aalborg University, Denmark, jelenan@plan.aau.dk, ORCID [0000-0001-6781-8059](https://orcid.org/0000-0001-6781-8059)

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

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)

Davor Koncalović - 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)

Mladen Josijević - docent, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, mladenjosijevic@gmail.com, ORCID [0000-0001-9619-0897](https://orcid.org/0000-0001-9619-0897)

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)

The Energy Future of Cities: What Matters from a Stakeholder Perspective

Abstract - As cities consume nearly 65% of the total final energy produced globally, they represent key drivers of energy transitions. Accordingly, this paper analyses the impact of the draft of Energy Sector Development of Republic of Serbia up to 2040 with projections up to 2050, on the creation of local policies and the achievement of climate neutrality in cities. The methodology, based on scaling the national strategy to the city level, was applied to the case study of the city of Kragujevac. This research utilized multi-criteria decision making to evaluate and rank the measures proposed by the Strategy, alongside an analysis of the opinions of key stakeholders from relevant fields, including local authorities, experts, representatives of civil society, the private sector, and citizens. The research findings contribute to a better understanding of the impact of national documents on shaping local policies, identifying key factors for the successful implementation of energy transitions. The presented conclusions provide guidelines for decision-making that align with local needs and priorities.

Index terms - Energy planning, Energy policy, Cities, Energy transition, MCDM

Holistički pristup upravljanju HEPS Đerdap

Nikola Milivojević*, Dejan Divac*, Boban Stojanović**, Prvoslav Marjanović*, Brankica Majkić-Dursun*, Dragan Stanković***

* Institut za vodoprivredu Jaroslav Černi, Beograd

** Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Kragujevcu, Kragujevac

*** Akcionarsko društvo Elektroprivreda Srbije, Beograd

Rezime - Hidroenergetsko plovidbeni sistem Đerdap čine HEPS „Đerdap 1” i HEPS „Đerdap 2” koji imaju ne samo veliki uticaj na nivoe reke Dunav u dužini od preko 300 km već i na režime podzemnih voda u širokom području priobalja, zatim na funkcionisanje i promene ekosistema u zoni uspora, a istovremeno predstavljaju i zonu retenzije i akumulacije nanosa i raznih vrsta zagađenja sa svih uzvodnih delova sliva koje Dunav i pritoke transportuju na svom putu do Đerdapa. Izgradnjom HEPS „Đerdap 1” i „Đerdap 2” došlo je do trajne promene prirodnih uslova u akumulacijama i priobalju, sa određenim negativnim posledicama. To su: povišenje nivoa podzemnih voda u priobalju, koje ugrožavaju naseljena mesta, industrijske, komunalne i saobraćajne objekte i dovode do prevlađivanja poljoprivrednog zemljišta, povišenja nivoa vode usled taloženja nanosa, ugrožavanje stabilnosti odbrambenih nasipa i visokih obala, izmene u rečnoj biocenozi, itd. U radu se daju principi holističkog pristupa upravljanju kako bi se, pored energetske eksploatacije kao osnovne namene, dalo na značaju i upravljanju svim drugim aspektima: režimom podzemnih voda u priobalju, režimom nanosa, kako po pitanju količina tako i po pitanju kvaliteta i dr. Pristup upravljanju se definiše uzimajući u obzir sve postojeće tehničke sisteme koji su relevantni za datu problematiku. U skladu sa definisanim principima, u radu se daje i struktura softversko/hardverskog sistema za podršku upravljanju koja je bazirana na postojećim tehničkim sistemima koji obuhvataju veliki broj međusobno povezanih komponenti hardvera, softvera, mernih instrumenata i korisnika.

Ključne reči - upravljanje hidroenergetskim sistemima, holistički pristup, sistemi za podršku upravljanju

I UVOD

Na zajedničkom srpsko-rumunskom sektoru Dunava izgrađena su dva hidroenergetska i plovidbena sistema: HEPS „Đerdap 1” (km 943+000) i HEPS „Đerdap 2” (km 862+800). Ovi sistemi su najznačajniji sistemi za proizvodnju hidroenergije u Srbiji (pokrivaju preko 50% hidroenergetske proizvodnje, odnosno oko 18% ukupne proizvodnje električne energije). Sistemi HEPS „Đerdap 1” i HEPS „Đerdap 2” imaju ne samo veliki uticaj na nivoe reke Dunav u dužini od preko 300 km već i na funkcionisanje i promene ekosistema u zoni uspora, a istovremeno predstavljaju i zonu retenzije i akumulacije nanosa i raznih vrsta zagađenja sa svih uzvodnih delova sliva koje Dunav i pritoke transportuju na svom putu do Đerdapa. U cilju racionalnog korišćenja raspoloživog hidroenergetskog

potencijala Dunava, rad hidroelektrana sistema HEPS „Đerdap 1” i HEPS „Đerdap 2” i način evakuacije vode Dunava preko prelivnih brana je planiran i koordiniran između srpske i rumunske strane. Racionalno upravljanje složenim sistemima HEPS „Đerdap 1” i HEPS „Đerdap 2” podrazumeva zadovoljenje zahteva energetske Srbije i Rumunije, koji se razlikuju u pogledu snage i vremena, uz zadovoljenje niza ograničenja na kontrolnim profilima na Dunavu koja su definisana međudržavnim dokumentima.

Pored operativne komponente upravljanja, koja predstavlja najznačajniji aspekt korišćenja HEPS Đerdap, upravlja se, ili se u najmanju ruku vrši praćenje i niza drugih procesa koji na različite načine utiču na prirodno okruženje i društvo. Ove aktivnosti su se usled duge istorije razvoja sistema, uslova rada i upravljanja, promena u društvu i sl., razvijale različitim dinamikom i često su nedovoljno harmonizovane. Stoga je potrebno razmotriti holistički pristup upravljanju HEPS Đerdap koji naglašava važnost naprednog operativnog upravljanja HEPS kao osnovne komponente holističkog pristupa, ali takođe ističe i komponente holističkog pristupa koje su u funkciji održivosti životne sredine, bezbednosti i ublažavanja rizika, angažovanja zainteresovanih strana, finansijske odgovornosti i tehnoloških inovacija. Usklađivanjem ovih aspekata, hidroenergetske operacije mogu postići povećanu efikasnost i bezbednost, dok doprinose održivom razvoju energetike i dobrobiti zajednice. Strateški pristup izložen u ovom radu ima za cilj da osigura da objekti HEPS Đerdap ne samo da u kontinuitetu obezbeđuju značajnu obnovljivu energiju, već i da štite jedinstveni ekosistem reke i priobalja i da nastave da podstiču regionalni razvoj.

U dugoj istoriji eksploatacije HEPS Đerdap razvijen je niz tehničkih sistema za podršku upravljanju koji su u vreme uspostavljanja bili u skladu sa savremenim tehničkim rešenjima i primereni tadašnjim potrebama. Da bi se efikasno upravljalo ovako složenim sistemom neprestano je vršena integracija različitih tehničkih sistema u cilju dobijanja celovitih informacija. Hidroinformacioni sistem Đerdap, razvijen od strane Instituta Jaroslav Černi, predstavlja najobimniji tehnički sistem u upotrebi na HEPS Đerdap. Ovaj sistem integriše veliki broj raznorodnih podataka (eksploatacionih, meteoroloških, hidroloških, hidrogeoloških i dr.) i operativnih matematičkih modela (1D model neustaljenog tečenja, hidroenergetski model elektrane i dr.) koji se koriste na automatizovan način i čime je praktično formiran hidraulički digitalni blizanac akumulacije. Oslanjajući se na dosadašnji razvoj, dat je predlog odgovarajućeg tehničkog sistema koji u budućnosti treba u potpunosti formirati,

čime bi se stvorili uslovi za efikasno upravljanje bazirano na holističkom pristupu.

II HOLISTIČKI PRISTUP UPRAVLJANJU KOMPLEKSNIH HIDROENERGETSKIM SISTEMIMA

Holistički pristup upravljanju velikim hidroenergetskim sistemima (HES) integriše više dimenzija – tehničke, ekološke, društvene i ekonomske – radi optimizacije efikasnosti i dugoročne održivosti. Za razliku od tradicionalnih strategija upravljanja koje se prvenstveno fokusiraju na proizvodnju energije, ovaj pristup nastoji da uravnoteži više, često konkurentnih prioriteta i procesa.

Holističko upravljanje velikim hidroenergetskim sistemima je neophodno zbog:

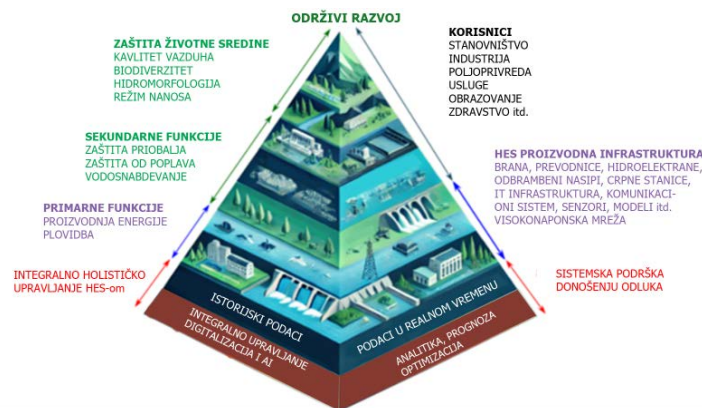
- sve veće potražnje za održivom energijom (optimizacije proizvodnog procesa, prilagođavanja klimatskim promenama, povećanje efikasnosti, optimizacije održavanja, minimizacije rizika po proizvodni proces, itd.);
- značaja ekonomske efikasnosti i dugoročne finansijske održivosti (energetskog tržišta, politike cena, uloge HES u optimizaciji proizvodnje energije iz drugih obnovljivih i neobnovljivih izvora – “hidro-baterije” i sl.)
- složenosti upravljanja sa više zainteresovanih strana, posebno u prekograničnim rečnim sistemima, širokog spektra i heterogene struktura zainteresovanih strana, međunarodnog pravno-političkog okvira u vidu sporazuma, konvencija, direktiva itd., povezanost sa drugim energetskim sistemima i interakcije, energetske zajednice i dr.
- zaštite životne sredine i rečnih ekosistema (upravljanje režimom voda – količinom i kvalitetom, upravljanje režimom nanosa – količinom i kvalitetom, unapređenja biodiverziteta – hidromorfologija, migratorne vrste, kontinuitet i sl., unapređenje i očuvanje ekosistemskih usluga).

Ovakav pristup osigurava da HES budu ne samo efikasni proizvođači energije, već i da doprinose zaštiti ekosistema, društvenom razvoju i finansijskoj stabilnosti.

Kompleksnost holističkog upravljanja HES, pre svega, zahteva postojanje i primenu izuzetno visokog stepena digitalizacije i digitalnih alata (hardversko-softverskih rešenja) za podršku donošenju pravovremenih i optimalnih upravljačkih odluka u realnom vremenu, ali i za podršku kratkoročnom i dugoročnom planiranju u svim domenima upravljanja sistemom (analitičke i prognostičke modele i sl.). U ovom kontekstu od posebnog značaja je postojanje digitalnih sistema koji omogućavaju dubinsku analizu istorijskih iskustava i podataka od značaja za prognozu budućih stanja sistema i blagovremeno planiranje u odnosu na optimizaciju budućeg rada sistema (Slika 1).

Razvoj pomenutih sistema u praksi je iterativan i dugotrajan i odvija se u fazama. Po pravilu, u početnim fazama razvoja prioritet se daje svim onim delovima sistema koji podržavaju optimizaciju proizvodnog procesa hidroenergije i drugih uobičajenih primarnih funkcijama HES-a (na primer plovidba i odbrana od poplava) a tek u kasnijim fazama razvoja posvećuje

se pažnja ostalim domenima upravljanja sistemom kao što je zaštita životne sredine (režim nanosa, kvalitet voda, i sl.).



Slika 1. Holističko upravljanje hidroenergetskim sistemima

Kod HES izgrađenih na međunarodnim vodotocima holističko upravljanje HES-ma postaje još kompleksnije i odvija se unutar međunarodnog pravnog okvira koji uključuje bilateralne/multilateralne sporazume i ugovore, međunarodne konvencije, zakone i propise i dr. Pored navedenog treba imati u vidu i činjenicu da su HES i upravljanje njima pod uticajem dodatnih pravila i ograničenja dinamičkog karaktera usled brojnih promena u nacionalnim i međunarodnom pravnom okviru (na primeru Đerdapa: promena društvenog uređenja u Republici Srbiji i Rumuniji, pristupanje Rumunije EU i kandidatura Srbije za članstvo u EU, stupanje na snagu više relevantnih Direktiva EU, promena vlasničke strukture Rumunskog investitora i mnogi drugi faktori) i novih suštinskih zahteva i pravila koja se moraju primenjivati u upravljanju HES.

III AKTUELNI PRISTUP UPRAVLJANJU HEPS ĐERDAP

U cilju racionalnog korišćenja raspoloživog hidroenergetskog potencijala Dunava, rad hidroelektrana sistema HEPS „Đerdap 1” i HEPS „Đerdap 2” i način evakuacije vode Dunava preko prelivnih brana je planiran i koordinisan između srpske i rumunske strane. Racionalno upravljanje složenim sistemima HEPS „Đerdap 1” i HEPS „Đerdap 2” podrazumeva zadovoljenje zahteva energetskih sistema R. Srbije i Rumunije, koji se razlikuju u pogledu snage i vremena, uz niz ograničenja na kontrolnim profilima na Dunavu, koja su definisana međudržavnim dokumentima.

Sporazumi, konvencije, protokoli i ugovori vezani prvo za HEPS „Đerdap 1”, a zatim za proširenje saradnje u korišćenju hidroenergetskog potencijala reke Dunav i izgradnju HEPS „Đerdap 2” potpisivani su konsekvntno počevši od druge polovine 50-tih XX veka [1]. Pojedina pitanja regulisana su ugovorima između srpskog i rumunskog investitora. Ratifikacijom dve Vlade ovi akti postali su pravno obavezujući. Svi ovi dokumenti moraju se posmatrati integralno. Ovaj složeni pravni okvir uvek je bio pod lupom šire međunarodne zajednice s obzirom na značaj Dunava kao međunarodne reke i međunarodnog plovnog puta.

Sporazumom iz 1963. godine [2] i usvojenim Statutom formirana je Jugoslovensko-rumunska mešovita komisija za Đerdap (danas Srpsko-rumunska mešovita komisija za Đerdap). Mešovita

komisija kao mešoviti organ dveju vlada, u okviru svojih nadležnosti, obezbeđuje ostvarivanje stalne saradnje, koordinacije i primene odredaba navedenih sporazuma, konvencija, protokola kao i ugovora potpisanih između srpskog i rumunskog investitora u vezi sa HEPS „Đerdap 1“ i „Đerdap 2“.

Aktuelna eksploatacija sistema HEPS „Đerdap 1“ i HEPS „Đerdap 2“ je regulisana Konvencijom iz 1998. [3], a detaljnije Pravilnikom o organizaciji i radu ZDSE (Pravilnik ZDSE) [4] i Pravilnikom o organizaciji i radu ZDSP (Pravilnik ZDSP) [5], odnosno Pravilnikom o organizaciji i načinu rada KZP (Pravilnik KZP) [6].

Eksploatacijom hidropotencijala, kao primarnom funkcijom HEPS „Đerdap“, upravlja se kroz kontinualni rad Zajedničke dispečerske službe za energetiku. Ovaj mešoviti organ je nadležan je da prati režim eksploatacije i podelu potencijala između srpske i rumunske strane. Zadaci Zajedničke dispečerske službe za energetiku (ZDSE) definisani su tako da je ovaj organ nadležan za: izradu prognoze dotoka vode u akumulaciono jezero „Đerdap 1“, određivanje raspoloživog hidropotencijala oba sistema „Đerdap 1“ i „Đerdap 2“, definisanje dnevnih planova i režima rada hidroelektrana, koordinaciju rada hidroelektrana, evidenciju o osmotrenim relevantnim podacima i dr.

Obezbeđenjem uslova za plovidbu, kao druga primarna funkcija sistema, upravlja se kroz rad Zajedničke dispečerske službe za plovidbu (ZDSP). Ovaj mešoviti organ vrši operativno upravljanje plovidbom u sektoru između km D 936 i km D 949, kao i u sektoru između km D 858 i km D 868 u skladu sa Pravilnikom ZDSP i posebnim pravilima plovidbe na Dunavu.

Harmonizaciju upravljanja u cilju ispunjenja navedenih funkcija vrši Zajednički organ za koordinaciju (ZOK) čiji članovi su predstavnici srpske i rumunske energetske kompanije, predstavnici organa plovidbe i vodoprivrede obe zemlje. Suštinski ZOK koordinira između energetske proizvodnje i plovidbe, a kada se pojave vodoprivredna pitanja, u rad ZOK uključuju se i delegati vodoprivrede obe zemlje.

U vezi sekundarnih funkcija HEPS „Đerdap“, vrši se praćenje rada, efekata i uticaja sistema kroz rad Komisije za praćenje ponašanja Sistema Đerdap 1 i Đerdap 2 (KZP). KZP je ustanovljena radi praćenja ponašanja glavnih objekata i akumulacionih jezera oba sistema. Ovaj organ Mešovite komisije, na predlog dva investitora, utvrđuje Programe osmatranja i merenja od zajedničkog interesa koje treba sistematski da sprovede EPS AD i Hidroelectrica SA za: režim nanosa i morfoloških promena korita, za hemijske, biološke, termičke i radiološke promene voda Dunava na glavnim objektima, u zoni glavnih objekata, u akumulacionim jezerima i priobalnom području akumulacionih jezera. KZP ima zadatak i da prati i analizira sve pojave od uticaja na stabilnost i funkcionalnost glavnih objekata oba sistema, stabilnost obala, promene morfologije korita kao i kvalitet voda Dunava u akumulacionim jezerima ovih sistema, na osnovu dokumentacije koju joj investitori stave na raspolaganje. Pored navedenog zadatak KZP je da utvrđuje na predlog investitora, potrebna dopunska merenja na osnovu interpretaciji dobijenih rezultata,

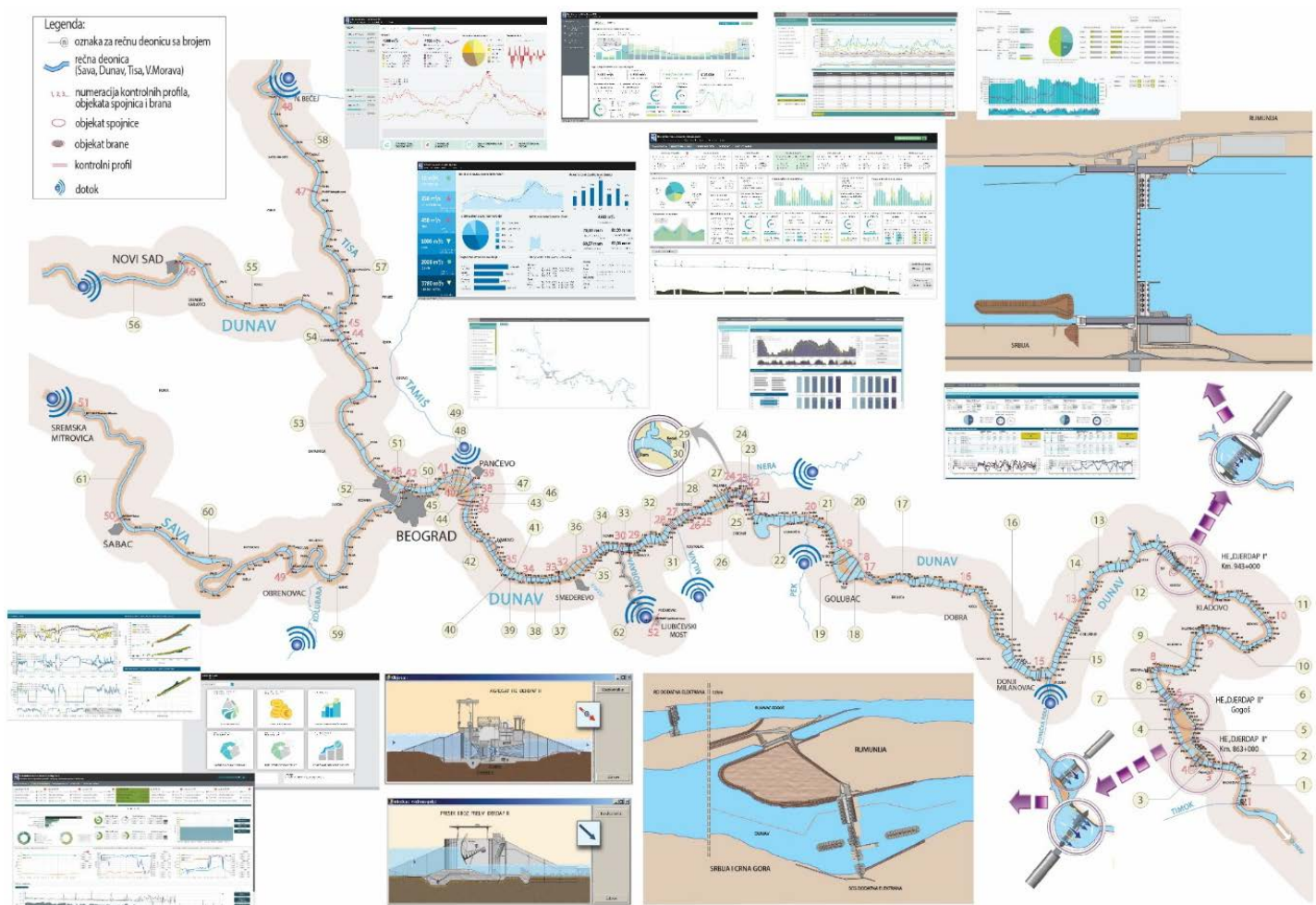
prilikom poplava, ledostaja, zemljotresa itd. Isti organ je zadužen i da utvrđuje, na predlog investitora, metodologiju osmatranja i merenja koja će obezbediti podatke za ocenu ponašanja HEPS Đerdap 1“ i HEPS „Đerdap 2“, te da razmatra dokumentaciju i izveštaje o interpretaciji rezultata merenja i osmatranja, koje podnose srpska i rumunska elektroenergetska kompanija i predlaže potrebne mere. Pravna sekcija i KRR se aktiviraju u slučaju potrebe.

Uspešna eksploatacija HEPS Đerdap podrazumeva potrebu za što preciznijim osmatranjem, pouzdanom procenom i prognozama velikog broja parametara: hidroloških (nivoi vode, protok, kvalitet), zatim režima nanosa (količine i kvalitet), eksploatacionih parametara vezanih za rad agregata i evakuacionih organa i dr. Stoga je srpska strana u obavezi da neprestano ulaže u merne sisteme i niz tehničkih sistema za podršku odlučivanju u različitim aspektima eksploatacije HEPS Đerdap.

Upravljanje hidroelektranama se zasniva na praćenju eksploatacionih podataka. Za tu svrhu veoma razvijen je složen tehnički sistem merenja i akvizicije u vidu SCADA sistema. U zoni objekata Đerdap 1, Đerdap 2 i brane Gogoš prikupljaju se eksploatacioni podaci o: nivoima vode u neposrednoj blizini agregata, protoku, aktivnim i reaktivnim snagama agregata i proizvodnji energije. Na srpskoj strani Đerdapa 1, prate se podaci sa prelivne brane (otvor ustava, protoci), hidroelektrane (6 agregata), kao i nivoi vode uzvodno i nizvodno od brane. Na srpskoj strani Đerdapa 2, slični podaci se prate za osnovnu i dodatnu hidroelektranu (8 i 2 agregata), kao i na meteorološkoj stanici. Na rumunskoj strani Đerdapa 1 i 2 prikupljaju se podaci sa prelivne brane, osnovne hidroelektrane, i profila brane. Slični podaci se prikupljaju na brani Gogoš za dodatnu hidroelektranu. Podaci iz SCADA sistema se koriste u planiranju proizvodnje, podeli potencijala i utvrđivanju „penala“ u slučaju narušavanja ograničenja definisanih Pravilnikom ZDSE.

Usled obaveza srpske strane koje slede iz Pravilnika ZDSE [4] i potreba operativnog upravljanja hidroelektranama Đerdap 1 i Đerdap 2, unutar Ogranka HE „Đerdap“ je razvijen namenski tehnički sistem za podršku upravljanju eksploatacijom hidropotencijala [7]. Kroz više faza razvoja formiran je moderan sistem za podršku upravljanju koji obuhvata veliki broj međusobno povezanih komponenti hardvera, softvera, mernih objekata i instrumenata i korisnika sistema (Slika 2). Ovaj tehnički sistem predstavlja kompleksnu hardversko/softversku platformu sa orijentacijom ka: korisniku (korisničke aplikacije), sistemskom izvršavanju u realnom vremenu (servisi), kao i specijalizovanom upravljanju sistemom (administratorski alati). Rad i korišćenje sistema se zasniva na hidrauličko-hidroenergetskom modelu HES „Đerdap“ koji omogućava proračune u realnom vremenu i dugoročne analize potrebne za odlučivanje.

U praksi sistem se koristi pri planiranju proizvodnje, obračunavanju podele potencijala i provere zadovoljenosti ograničenja u realizaciji planova. Pored toga, sistem omogućava i dugoročne hidroenergetske i hidrauličke proračune i analize koje su deo obaveza srpske strane u okviru rada KZP i ZDSE.



Slika 2. Tehnički sistem za podršku upravljanju hidropotencijalom – HIS Đerdap

IV HOLISTIČKI PRISTUP UPRAVLJANJU HEPS ĐERDAP

Kao odgovor na izazove klimatskih promena i globalnog zagrevanja u svetu i Evropskoj uniji, poslednjih decenija dešavaju se krupne promene u energetske sektoru koje se najčešće opisuju kao „energetska tranzicija” [8]. Donošenjem Strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine [9], koja ima za cilj postizanje značajnog smanjenja negativnog antropogenog uticaja energetske sektora na prirodu i životnu sredinu, posebno u smislu smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte, država Srbija se obavezala da prati energetske tranziciju. Usklađenost sa zakonskim zahtevima, inicijative za obnovu i novi standardi održivosti pozicioniraju hidroenergiju kao ključnog igrača u tranziciji EU prema čistoj energiji, dok se suočavaju sa izazovima očuvanja biodiverziteta i životne sredine.

U navedenom kontekstu poseban izazov predstavljaju zahtevi za usklađenošću sa novim tehničkim standardima što podrazumeva da operateri hidroenergetskih sistema moraju da se pridržavaju tehničkih i ekoloških standarda, uključujući i zahteve za digitalno praćenje efekata svoga rada, odnosno implementaciju naprednih tehnologija monitoringa za merenje ekoloških i hidroloških uticaja. Republika Srbija kao zemlja kandidat za pristupanje EU, je svoje zakonodavstvo u velikoj meri uskladila sa pravnim

tekovinama EU ili je u završnoj fazi tog usklađivanja, pa se očekuje i nameće potreba da se i rad HEPS „Đerdap 1“ i „Đerdap 2“ uskladi sa novim i reformisanim pravnim okvirom, kako u Srbiji tako i u Rumuniji.

Novi zakonodavni okviri i evropske direktive u oblasti voda, energetike i zaštite životne sredine, te prelazak sa klasično energetske na holističko upravljanje, postavljaju pred elektroenergetske kompanije nove zahteve, koji će neminovno zahtevati dalji razvoj postojeće platforme sa jedne strane i prikupljanje novih podataka sa druge.

Pored navedenog, moguća izgradnja RHE Đerdap 3 dodatno će usložiti upravljanje čitavim sistemom i doneti nove zahteve u vezi sa upravljanjem i izveštavanjem kao i u odnosu sa rumunskom stranom. Za očekivati je da se prošire i nadležnosti postojećih organa Mešovite komisije ili da se formiraju novi, kao i da se postojeći bilateralni akti reviduju i ažuriraju.

U kontekstu holističkog upravljanja hidroenergetskim sistemima, savremeni izazovi koji proizilaze iz velikog broja međusobno povezanih i često suprotstavljenih ciljeva zahtevaju integrisan i višeslojan pristup odlučivanju. Da bi donosioci odluka mogli efikasno upravljati ovim kompleksnim sistemima u realnom vremenu, neophodna je visoka automatizacija procesa kroz upotrebu naprednih softversko-hardverskih rešenja. Holistički

koncept upravljanja podrazumeva razvoj i primenu savremenih sistema podrške odlučivanju (DSS) koji integrišu podatke iz različitih domena — hidrometeoroloških, hidrogeoloških, hidroenergetskih i ekoloških — u jedinstvenu informacionu platformu. Ovakav DSS ne samo da obezbeđuje podatke i alate za analizu i optimizaciju upravljanja, već ima i ulogu u uspostavljanju koordinacije i saradnje među relevantnim akterima, edukaciji stručnog kadra i uključivanju javnosti u procese upravljanja i zaštite vodnih resursa.

U tom smislu, digitalni blizanci (Digital Twins) predstavljaju ključnu tehnologiju za implementaciju holističkog upravljanja. Oni funkcionišu kao dinamički, digitalni prikazi fizičkog sistema, zasnovani na kombinaciji realnih merenja (putem SCADA sistema, IoT senzora itd.), numeričkih simulacija i algoritama za analitiku i optimizaciju [10-11]. U hidroenergetskom sektoru, digitalni blizanci omogućavaju kontinuirano praćenje, predikciju ponašanja sistema i donošenje odluka koje su usklađene sa tehničkim, ekonomskim i ekološkim ograničenjima i standardima.

U zavisnosti od razvijenosti mernih sistema, modela i alata za obradu podataka, digitalni blizanci se razvijaju kroz različite nivo „zrelosti“ — od osnovne digitalizacije procesa, preko interaktivnih modela sa dvosmernom komunikacijom između digitalnog i fizičkog domena (nivo 2), do naprednih autonomnih sistema koji su još uvek predmet istraživanja. Holistički pristup uvođenju digitalnih blizanaca podrazumeva transdisciplinarni razvoj koji povezuje tehničke, organizacione i društvene aspekte, sa ciljem ostvarivanja održivog, adaptivnog i transparentnog upravljanja hidroenergetskim resursima [12-16]:

- **Nivo 0 – Fizički sistem.** Predstavlja osnovu sistema bez ikakvog digitalnog modela. Upravljanje i nadzor su isključivo manuelni, lokalni i izolovani, bez podrške za integraciju ili širu optimizaciju.
- **Nivo 1 – Digitalni model.** Statički prikaz fizičkog sistema, često u vidu CAD ili BIM modela. Koristi se u fazama projektovanja, ali ne sadrži podatke u realnom vremenu. Podrška za holističko upravljanje je minimalna i neintegrovana.
- **Nivo 2 – Digitalna senka (Digital Shadow).** U ovom nivou uspostavlja se jednosmerna veza: podaci iz fizičkog sistema se prenose u digitalni model, ali bez povratne kontrole. Omogućava monitoring u realnom vremenu, ali bez automatskog reagovanja ili povezivanja sa drugim sektorima (npr. energija–životna sredina).
- **Nivo 3 – Digitalni blizanac (Digital Twin).** Karakteriše ga dvosmerna interakcija između fizičkog i digitalnog sveta. Sistem može da simulira, predviđa i optimizuje ponašanje fizičkog sistema, kao i da donosi preporuke ili upravlja izvršnim komponentama. Omogućava integraciju više domena, poput vode, energije i infrastrukture.
- **Nivo 4 – Kognitivni blizanac.** Predstavlja inteligentnog digitalnog blizanca sa sposobnostima učenja, adaptacije i donošenja odluka zasnovanih na veštačkoj inteligenciji i mašinskom učenju. U realnom vremenu optimizuje rad sistema uz balansiranje višestrukih ciljeva (proizvodnja, očuvanje resursa, zaštita životne sredine).
- **Nivo 5 – Sistemski blizanac (System-of-Systems Twin).**

Najnapredniji nivo zrelosti koji integriše više digitalnih blizanaca u jedan složen sistem. Omogućava višeslojno i višesektorsko upravljanje — npr. koordinaciju hidroenergetskih objekata u slivu, povezivanje sa distributivnim mrežama i integraciju sa politikama upravljanja resursima. Obezbeđuje potpunu sistemsku sinergiju i strateško planiranje.

Oslanjajući se na obimne tehničke sisteme koji se nalaze u upotrebi u HEPS Đerdap, sa jedne strane, kao i ranije pomenute potrebe integralnog pristupa upravljanju ovim sistemom, može se definisati struktura odgovarajućeg sistema za podršku u upravljanju HEPS Đerdap (Slika 3.).

Prvi element predstavlja fizički domen, odnosno prostor koji HEPS Đerdap obuhvata, priobalje na koje sistem direktno utiče kao i objekte brana i hidroelektrana. U tom sloju se nalaze i svi senzori, merni i akvizicioni sistemi, osmatračići i sl.

Drugi element čini sistem za upravljanje podacima, počevši od komunikacionog sloja u kome se realizuje prenos podataka iz fizičkog domena do softverskih komponenti koje upravljaju podacima i čine sloj sa podacima. Osim podataka o vremenskim serijama, u centralnoj bazi podataka se čuvaju i podaci o sistemu za osmatranje i prikupljanje podataka koji mogu biti od važnosti za tumačenje podataka vremenskih serija. Tako je, u maniru digitalnog blizanca, omogućeno skladištenje i održavanje podataka o mernim instrumentima, mernim mestima i mestima osmatranja, što omogućava potpunije sagledavanje prostornih odnosa i postupaka merenja u sistemu. Softverske komponente vrše koordinaciju, distribuciju, sinhronizaciju i skladištenje podataka, kao i upravljanja pristupom podacima i servisima.

U okviru holističkog upravljanja HEPS „Đerdap“, matematički modeli i proračunski servisi čine suštinski deo digitalnog blizanca — dinamičkog digitalnog modela fizičkog sistema koji omogućava sinhronizaciju realnih podataka, simulacija i odluka u realnom vremenu. Kao što je prikazano na slici 3, ovaj sloj funkcioniše kao središnji element između fizičkog domena i alata za operativno i strateško odlučivanje.

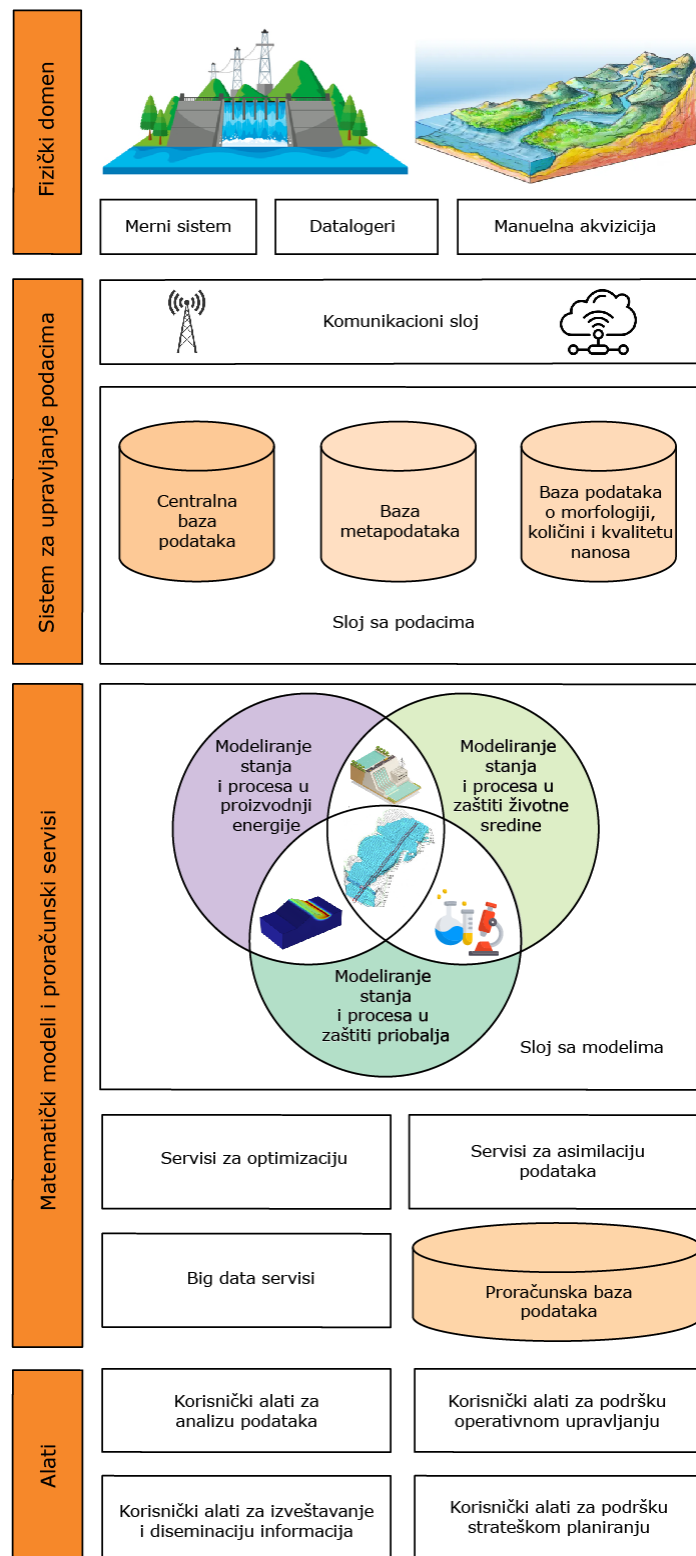
Matematičko-modelski deo je organizovan u vidu funkcionalnih podsistema koji pokrivaju različite aspekte modeliranja:

- proizvodnja energije,
- upravljanje nanosom i morfologijom akumulacije,
- zaštita životne sredine i
- modeliranje režima podzemnih voda u priobalju.

Upravo ova višedimenzionalna strukturisanost omogućava uspostavljanje holističkog pristupa, gde svi aspekti rada hidroenergetskog sistema — tehnički, ekološki i bezbednosni — bivaju razmatrani paralelno kroz međusobno povezana modelovanja i servise.

Hidrauličko-hidroenergetski model predstavlja centralni deo i omogućava simulaciju tokova vode i proizvodnje energije u realnom vremenu, uključujući spregnute proračune preko numeričkog solvera. Ovi proračuni koriste se ne samo za analizu trenutnog stanja, već i za generisanje optimalnih planova eksploatacije u skladu sa ograničenjima sistema i zahtevima elektroenergetskog tržišta. Pored toga, modeli transporta nanosa (1D, 2D i 3D), kvaliteta vode i zagađenja omogućavaju naprednu

analizu promena morfologije rečnog korita, sedimentacije i lokalnih efekata u zoni brane, dok hidrogeološki modeli omogućavaju procene infiltracije i dinamike podzemnih voda u priobalju.



Slika 3. Struktura sistema za podršku integralnom upravljanju

U okviru istog sloja, servisi za asimilaciju merenja omogućavaju automatsko ažuriranje modelskog stanja u realnom vremenu na

osnovu ulaznih podataka iz mernog sistema (SCADA, IoT, manualna akvizicija), dok servisi za optimizaciju obezbeđuju donošenje odluka uzimajući u obzir višekriterijumske ciljeve (npr. maksimizacija proizvodnje, minimizacija rizika, balansiranje zaliha). Ovi servisi direktno komuniciraju sa proračunskom bazom podataka i korisničkim alatima.

Konačno, korisnički alati omogućavaju interaktivnu analizu, operativno upravljanje, dugoročno planiranje i diseminaciju informacija — čineći tako digitalni blizanac ne samo tehničkim alatom, već i platformom za donošenje odluka u kontekstu održivog razvoja, zaštite vodnog okruženja i energetske tranzicije.

V ZAKLJUČAK

Savremeni pristup u upravljanju hidroenergetskim sistemima podrazumeva da njihovo korišćenje doprinosi društvenom razvoju uz dugoročno očuvanje prirodnih resursa. Primenom holističkog pristupa u upravljanju ovim sistemima kroz uvođenje sistema za podršku integralnom upravljanju može se obezbediti usaglašenost upravljačkih odluka sa društvenim i ekološkim ograničenjima na način kako to ranije nije bilo moguće bez integracije podataka, matematičkih modela i namenskih alata.

Postojeći sistem za podršku odlučivanju koji se nalazi u primenu na objektima HEPS Đerdap predstavljaju zaokruženo rešenje za upravljanje podacima koje omogućava korišćenje podataka u proračunima u uslovima bliskim realnom vremenu, dok se podaci mogu koristiti i za dugoročne analize i what-if scenarije. Zahvaljujući detaljnom hidrauličko-hidroenergetskom modelu i mehanizmima asimilacije podatka u modele može se reći da ovaj sistem odlikava ponašanje objekata HEPS „Đerdap 1“ i „Đerdap 2“, pa se na taj način može klasifikovati kao digitalni blizanac pomenutih objekata u pogledu hidroenergetike.

Proširenjem obuhvata na osmatranja vezana za režim podzemnih voda u priobalju i količine i kvalitet nanosa i druge ekološke pokazatelje, kao i razvojem odgovarajućih matematičkih modela koji modeliraju relevantne procese, sistem se može približiti konceptu opšteg digitalnog blizanca koji može pružiti informacije potrebne za donošenje odluka u svim važnim aspektima upravljanja HEPS „Đerdap“.

Koristi razvoja i primene ovakvog sistema mogu biti višestruke, a posebno u pogledu usaglašenosti, pouzdanosti i ponovljivosti numeričkih proračuna na osnovu kojih se mogu donositi upravljačke odluke. Dodatno, u pogledu donošenja strateških odluka u pogledu razvoja sistema mogu se efikasno usaglašavati različita ograničenja i uzeti u obzir i promene u vodnim režimima i zahtevima tržišta, a sve u cilju obezbeđivanja zaštite ekosistema, održivog društvenog razvoja i finansijske stabilnosti.

LITERATURA

- [1] Rešenje o odobrenju Protokola o zaključcima Delegacija Jugoslavije i Rumunije o iskorišćavanju voda Dunava u Đerdapskom sektoru, Međunarodni ugovori FNRJ, Sveska br. 75, 1957. str. 65-66 (potpisanog u Oršavi 1956. godine). http://arhiviranisajt.msp.gov.rs/sr/images/stories/bilateral_ugovori/rumunija_vazeci.pdf [pristupljeno 12.02.2025]
- [2] Sporazum između SFR Jugoslavije i SR Rumunije o izgradnji i eksploataciji Hidroenergetskog i plovidbenog sistema Đerdap na reci Dunav, potpisanog 30. novembra 1963. godine, ratifikovanog dana 17. juna

1964. godine, koji je stupio na snagu 16.7.1964. godine, Dodatak Sl. lista br. 11/1964; Zbirka ugovora OUN, Sveska 512.
http://arhivisanisajt.msp.gov.rs/sr/images/stories/bilateral_ugovori/rumunija_vazeci.pdf [pristupljeno 12.02.2025]
- [3] Zakon o potvrđivanju Konvencije između Savezne vlade Savezne Republike Jugoslavije i Vlade Rumunije o eksploataciji i održavanju hidroenergetskih i plovidbenih sistema Đerdap I i Đerdap II sa priložim., Sl. list SRJ - Međunarodni ugovori, br. 7/1998-19, od 16. maja 1998. godine.
http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/t2006_03/t03_0112.htm [pristupljeno 12.02.2025]
- [4] Pravilnik o organizaciji i radu ZDSE, 1998.
- [5] Pravilnik o organizaciji i radu ZDSP, 1988.
- [6] Pravilnik o organizaciji i načinu rada KZP, 1999.
- [7] Milivojević, N., Milivojević, V., Tripković, V., Prodanović, D., Marjanović, D. General platform for hydroinformatics systems – a review of concept, in Proc. *Contemporary Water Management: Challenges and Research Directions, International Scientific Conference in the Honour of 75 Years of the Jaroslav Černi Water Institute*, Belgrade, Serbia, October 19-20, pp. 249-267, 2022.
https://grafar.grf.bg.ac.rs/handle/123456789/2832?locale-attribute=sr_RS [pristupljeno 14.02.2025]
- [8] Kabeyi, M.J., Olanrewaju, O.A. Sustainable Energy Transition for Renewable and Low Carbon Grid Electricity Generation and Supply, *Frontiers in Energy Research*, Vol. 9, 743114 2022.
<https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.743114>
- [9] Strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine. <https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgr/skupstina/strategija/2024/94/1> [pristupljeno 14.02.2025]
- [10] Tao, F., Qi, Q., Liu, A., Nee, A.Y.C.. Digital Twins and Cyber-Physical Systems Toward Smart Manufacturing and Industry 4.0: Correlation and Comparison, *Engineering*, Vol. 5, No. 4, pp. 653-661, 2019.
<https://doi.org/10.1016/j.eng.2019.01.014>
- [11] Hydropower Digital Twins Solution Helps with Operator Challenges. <https://www.pnnl.gov/news-media/hydropower-digital-twins-solution-helps-operator-challenges> [pristupljeno 21.02.2025]
- [12] Grieves, M., Vickers, J. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems, in Kahlen, F.-J., Flumerfelt, S., Alves, A. (Eds.), *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*, Springer, Cham, pp. 85-113, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-319-38756-7_4
- [13] Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., Sihn, W. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 51, No. 11, pp. 1016-1022, 2018.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- [14] Fuller, A., Fan, Z., Day, C., Barlow, C. Digital Twin: Enabling technologies, challenges and open research, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 108952-108971, 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- [15] Boschert, S., Rosen, R. Digital Twin - The Simulation Aspect, in: Hehenberger, P., Bradley, D. (Eds.), *Mechatronic Futures*, Springer, Cham, pp. 59-74, 2016. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32156-1_5
- [16] Madni, A.M., Madni, C.C., Lucero, S.D. Leveraging Digital Twin Technology in Model-Based Systems Engineering, *Systems*, Vol. 7, No. 1, pp. 7, 2019. <https://doi.org/10.3390/systems7010007>

AUTORI

dr Nikola Milivojević, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, nikola.milivojevic@jcerni.rs, ORCID [0000-0001-5330-1219](https://orcid.org/0000-0001-5330-1219)
prof. dr Dejan Divac, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, dejan.divac@jcerni.rs, ORCID [0000-0002-1578-1431](https://orcid.org/0000-0002-1578-1431)
prof. dr Boban Stojanović, Prirodno-matematički fakultet Univerziteta u Kragujevcu, boban.stojanovic@pmf.kg.ac.rs, ORCID [0000-0003-2901-0061](https://orcid.org/0000-0003-2901-0061)
prof. dr Prvoslav Marjanović, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, prvoslav.marjanovic@jcerni.rs, ORCID [0009-0002-2446-0418](https://orcid.org/0009-0002-2446-0418)
dr Brankica Majkić-Dursun, Institut za vodoprivredu “Jaroslav Černi”, brankica.majkic-dursun@jcerni.rs, ORCID [0000-0003-1518-5557](https://orcid.org/0000-0003-1518-5557)
Dragan Stanković - Akcionarsko društvo Elektroprivreda Srbije, dragan.stankovic@eps.rs

A Holistic Approach to Managing the Iron Gate Hydropower and Navigation System

Abstract - The Iron Gate Hydropower and Navigation System (composed of HPP “Iron Gate 1” and HPP “Iron Gate 2”) not only greatly influences water levels along a more than 300 km stretch of the Danube River but also affects groundwater regimes in wide coastal areas and the functioning and changes of ecosystems in the impounded zone. At the same time, it acts as a retention area for sediment and various types of pollutants originating from upstream parts of the basin, transported by the Danube and its tributaries. The construction of the Iron Gate 1 and Iron Gate 2 hydropower and navigation systems permanently altered the natural conditions within the reservoirs and in the surrounding coastal areas, leading to certain negative consequences. These include increased groundwater levels in the coastal zone, threatening settlements, industrial, municipal, and transport infrastructure, and causing waterlogging of agricultural land; raised flood levels due to sediment deposition within the reservoir; threats to the stability of flood defence dikes and high banks; and changes in the river biocenosis, among others. From the outset, the highly complex task of managing these transboundary systems and their impact on the environment has required significant efforts to regulate interstate and international obligations, as well as to reconcile often conflicting interests. This paper presents the principles of a holistic management approach, which, in addition to the primary purpose of energy production, emphasizes handling all other relevant aspects: groundwater regimes in the riparian land, sediment management—both in terms of quantity and quality—and more. The management approach is defined by considering all existing technical systems relevant to these issues. In accordance with the defined principles, the paper also presents the structure of a software/hardware management support system based on existing technical systems that encompass a large number of interconnected hardware and software components, measuring instruments, and users.

Index terms - Hydropower system management, Holistic approach, Decision support systems

Nova regulativa u oblasti strateškog razvoja energetskeg sektora u Republici Srbiji

Biljana Trivić*, Iva Batić*, Milan Petrović**

* Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beograd, Bulevar kralja Aleksandra br. 73, 11000 Beograd

** Agencija za energetiku Republike Srbije, Terazije br. 5, 11000 Beograd

Rezime - U Republici Srbiji je 2024. godina označila ambiciozno otpočinjanje nove etape razvoja energetskeg sektora. Krajem jula 2024. godine u Republici Srbiji je usvojen Integrisani nacionalni energetske i klimatske plan (INEKP) za period do 2030. godine, sa projekcijama do 2050. godine. Donošenjem INEKP-a Republika Srbija je dobila važan strateški dokument, koji je usklađen sa vizijom Evropske unije u pogledu dekarbonizacije energetskeg sektora. Ovaj dokument predstavlja mapu puta Republike Srbije u energetskej tranziciji koji će pomoći i u ostvarivanju cilja spajanja tržišta električne energije sa jedinstvenim tržištem Evropske unije. U skladu sa zahtevima iz INEKP-a u Srbiji se planiraju velika investiciona ulaganja do 2030. godine u obnovljive izvore energije, sa oko 3,5 GW novih elektrana na sunce i vetar (koja će se priključiti na elektroenergetsku mrežu), sa ciljem povećanja sigurnosti snabdevanja potrošača, uz povećanje učešća čistih izvora energije i veću zaštitu životne sredine. Drugi važan strateški dokument u oblasti razvoja energetskeg sektora je Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine koja je usvojena u novembru 2024. godine, a pored toga u decembru 2024. godine su usvojene i izmene i dopune Zakona o energetici, sa ciljem ispunjenja obaveza iz Ugovora o osnivanju Energetske zajednice. U ovom radu autori će dati osvrt na sve novine koje nam donose prethodno navedeni strateški dokumenti, kao i na to šta nam donose izmene i dopune Zakona o energetici.

Ključne reči – OIE, energetskej tranzicija, dekarbonizacija, regulativa.

Uvod

Energetski sistem svake države predstavlja siguran oslonac privrednog i društvenog razvoja. Tradicionalni energetski sistemi su se u svim državama oslanjali na fosilna goriva. Međutim, zbog klimatskih promena i globalnog zagrevanja u poslednjih nekoliko decenija dešavaju se krupne promene u energetskej sektoru. Da bi energetski sistem to ostao i ubuduće, on mora suštinski da se menja i prilagođava privrednom i društvenom razvoju, posebno u pogledu održivosti. Sve te promene se najčešće opisuju pojmom „energetskej tranzicija” [1], [2].

Šire posmatrano, energetskej tranzicija je proces koji ima za cilj postizanje značajnog smanjenja negativnog uticaja energetskeg sektora na prirodu i životnu sredinu. Ovo se posebno odnosi na težnju za smanjenjem emisije gasova sa efektom staklene bašte.

To u užem smislu podrazumeva napuštanje fosilnih goriva kao osnovnog izvora energije i prelazak na obnovljive izvore energije (OIE). Takođe, proces energetskej tranzicije podrazumeva korišćenje novih tehnologija i materijala, inovacije, digitalizaciju, digitalnu integraciju i pametno upravljanje energetskeim procesima. Na ovaj način se, pored promene u izvorima energije, menjaju i procesi transformacije energije, transporta, distribucije i potrošnje. Ovo podrazumeva i podizanje energetske efikasnosti u svim delovima energetskeg lanca kao i promenu svesti svih aktera u energetskej sektoru, pa i u društvu u celini.

Budući energetski sistem biće veoma drugačiji od današnjeg. Kako se energetski sistem sve više oslanja na OIE, on mora u svim svojim segmentima da se prilagodi za sve te promene. Pored toga da bi energetskej tranzicija bila ostvariva, neophodno je definisati odgovarajući investicioni okvir kojim će se promovisati dekarbonizacija sektora. Proces sprovođenja energetskej tranzicije mora biti postepen, transparentan, stručno, socijalno i ekonomski utemeljen, ali i zasnovan na međunarodnim obavezama i prihvatljivim rešenjima koja će pre svega osigurati sigurno snabdevanje energijom, poštovanje standarda zaštite životne sredine i ljudskih prava.

Električna i toplotna energija se u Srbiji još uvek proizvodi korišćenjem fosilnih goriva u zastarelim i energetske neefikasnim proizvodnim postrojenjima. Oko 70% električne energije se dobija iz termoelektrana koje rade na uglj, a ostalih 30% se dobija iz hidroelektrana. Procenjuje se da se svega 4% električne energije dobija iz obnovljivih izvora energije. Posledice toga su brojne, kao na primer, visoke emisije gasova staklene bašte (GHG emisije), povećano zagađenje vazduha, kao i lokalno zagađenje životne sredine. Vlada Republike Srbije je prepoznala solarni energetski potencijal naše zemlje i za cilj postavila povećanje učešća OIE u bruto finalnoj potrošnje energije, kao i poboljšanje energetske efikasnosti u svim sektorima [3].

Republika Srbija je prihvatila put energetskej tranzicije. Potpisivanjem Sporazuma iz Pariza [4], 2015. godine Republika Srbija je prihvatila da aktivno deluje u pravcu smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte. Zatim je potpisivanjem Sofijske deklaracije o Zelenoj agendi za Zapadni Balkan [5] 2020. godine Republika Srbija prihvatila da, zajedno sa EU, radi na ostvarenju cilja da Evropa do 2050. bude „ugljenično“ neutralan kontinent.

Republika Srbija se članstvom u Energetskej zajednici obavezala na usklađivanje i implementaciju relevantnog pravnog okvira i

pravnih tekovina EU u oblasti energetike, zaštite životne sredine, korišćenja OIE i energetske efikasnosti, kao i pojedinih klimatskih aspekata. Pored toga je bilateralnim sporazumom sa EU o stabilizaciji i pridruživanju, Republika Srbija potvrdila tekovine EU u oblasti energetike i zaštite životne sredine.

Tehnički iskoristiv energetski potencijal OIE u Republici Srbiji veoma je značajan i procenjen je na preko 4,3 miliona tona ekvivalentne nafte (toe) godišnje, od čega se oko 2,7 miliona toe godišnje nalazi u iskorišćenju biomase, 0,6 miliona toe godišnje u neiskorišćenom hidropotencijalu, 0,2 miliona toe godišnje u postojećim geotermalnim izvorima, 0,2 miliona toe godišnje u energiji vetra i 0,6 miliona toe godišnje u iskorišćenju sunčevog zračenja [6].

Početkom 2022. godine došlo je do velikih promena u međunarodnim odnosima u energetske sektoru na evropskom kontinentu zbog rata između Rusije i Ukrajine. Došlo je do prekida ustaljenog načina snabdevanja Evrope prirodnim gasom i naftom. Zbog toga je u svim državama u Evropi, pa tako i u Srbiji u fokus došlo pitanje energetske bezbednosti u smislu obezbeđenja dovoljnih količina energije i energenata za funkcionisanje privrede i društva. To je dovelo do toga da pored navedenih ciljeva energetske tranzicije i unapređenje energetske bezbednosti i postizanje maksimalno moguće energetske nezavisnosti, ostaju najbitniji ciljevi energetske politike svih država Evrope, pa i Republike Srbije.

II DOKUMENTA KOJA REGULIŠU BUDUĆI RAZVOJ ENERGETSKOG SEKTORA U EVROPI

Evropska Komisija je 2019. godine usvojila dugoročnu viziju energetske tranzicije pod nazivom Evropski zeleni dogovor (*European Green Deal*) čiji je cilj postizanja klimatske neutralnosti do 2050. godine [7], [8]. Pojam klimatske neutralnosti (*Net-Zero Greenhouse Gas Emissions*) označava da emisija gasova sa efektom staklene bašte iznosi nula, odnosno da ne postoji [9], [10]. To je zapravo „neto nula“ što ne podrazumeva da se apsolutno nikakav CO₂ ne emituje, već da je ukupna količina emitovanih gasova izjednačena sa količinom koja se uklanja iz atmosfere. Za dostizanje ovog cilja predviđen je i jedan međukorak, odnosno međucilj kojim se zahteva se u 2030. godini emisija gasova sa efektom staklene bašte smanji za 55% u poređenju sa nivoima iz 1990. godine. U skladu sa ovim planovima 2030. godinu, Evropska komisija je 2021. godine donela je paket regulativa pod nazivom *Fit for 55* [11], [12] koje će pomoći da se ovaj cilj za 2030. godinu dostigne. Ovaj paket regulativa se odnosi na obnovljive izvore energije, energetske efikasnost, energetske performanse zgrada, kao na prirodni gas i vodonik, a obuhvata set novih regulativa kao i reviziju već postojećih regulativa. Za razliku od ostalih goriva, poput nafte, prirodnog gasa i uglja, vodonik je obnovljiv i netoksičan. On ima veoma veliki potencijal kao ekološki prihvatljivo gorivo i u smanjenju uvoza energetskih resursa [13].

Obnovljivi izvori energije

Obnovljiva energija je kamen temeljac energetske tranzicije EU. U 2021. godini, udeo OIE u potrošnji energije u EU bio je 21,8% [14]. Ovaj udeo se prati u tri sektora: električna energija, grejanje i hlađenje i transport. Kada je u pitanju proizvodnja iz obnovljivih izvora, najveći deo obnovljive energije dolazi iz

bioenergije, kao što je biomasa (55,7%), zatim iz vetra (13,6%), hidroenergije (12,3%), solarne energije (7,5%), toplotnih pumpi (6,2%) i iz geotermalne energije (2,8%).

Direktiva o obnovljivoj energiji, koja je revidirana 2023. godine i koja se sada naziva *Renewable Energy Directive III* (RED III) [15], [16] postavila je cilj za OIE u potrošnji energije u EU od 42,5% do 2030. godine. Ovaj cilj se odnosi na prosek EU, dok države članice postavljaju sopstvene nacionalne ciljeve. Neke države članice EU imaju znatno veći udeo od trenutnog proseka EU (koji je trenutno oko 22%, kako je rečeno ranije), a na vrhu su Švedska (62,6%), Finska (43,1%) i Letonija (42,1%). Većina država članica je ispod proseka EU, a Belgija, Irska, Holandija, Malta i Luksemburg beleže najniži udeo obnovljivih izvora energije (svi ispod 13%). RED III takođe postavlja dodatne ciljeve za sektore transporta, građevinarstva, odnosno zgrada, industrije i sektora grejanja i hlađenja. Što se tiče transporta, države članice mogu da biraju između obavezivanja na smanjenje intenziteta gasova staklene bašte od 14,5% ili obezbeđivanja udela OIE od najmanje 29% do 2030. godine. Cilj za godišnji porast udela OIE u industriji za sve države članice iznosi 1,6%, sa dodatnim ciljevima za obnovljivi vodonik (42% do 2030. godine i 60% do 2035. godine). Za grejanje i hlađenje za sve države članice zadat je cilj povećanja udela OIE od 0,8% na godišnjem nivou do 2026. godine, nakon čega sledi godišnji porast od 1,1% do 2030. godine. Indikativni, odnosno neobavezujući cilj za udeo OIE u sektoru građevinarstva, tj. zgrada je 49% do 2030. godine.

Ciljevi EU za specifične obnovljive izvore takođe su postavljeni su u drugim EU dokumentima. Tako je 2022. godine usvojena Strategija za solarnu energiju [17], koja postavlja cilj od preko 320 GW novih fotonaponskih kapaciteta do 2025. godine i skoro 600 GW do 2030. godine. Predložene si i razne inicijative i mere koje će pomoći u postizanju ovog cilja, kao što je Evropska inicijativa za solarne krovove, partnerstvo EU za solarnu energiju velikih razmera, EU solarna industrijska alijansa i predlog nove regulative o dozvolama za projekte solarne energije [17]. Sa druge strane, u oktobru 2023. godine pokrenut je evropski paket za energiju vetra [18] čiji je cilj da se identifikuju izazovi u sektoru energije vetra u EU i da se pomogne postizanje dogovorenog cilja EU od približno 111 GW kapaciteta iz vetra na moru do 2030. godine. Paket uključuje aktivnosti na daljem ubrzanju izdavanja dozvola, poboljšanju sistema aukcija širom EU, pristupu lancu snabdevanja, veštinama i finansijama.

Energetska efikasnost

„Energetska efikasnost na prvom mestu“ je vodeći princip u politici EU kako bi se osiguralo da se proizvodi samo energija koja je zaista potrebna i da se potražnjom za energijom upravlja na održiv način. Takođe, smanjena potrošnja energije pomaže da se smanje troškovi za domaćinstva i industriju.

Revidirana Direktiva o energetske efikasnosti, usvojena 2023. godine [19] postavlja obavezujući cilj EU za smanjenje potrošnje finalne energije (ukupne energije koju potroše krajnji korisnici) na 11,7% do 2030. godine (u poređenju sa 2022. godini ovaj procenat je iznosio 23%). Države članice EU moraju postići prosečnu uštedu energije od 1,5% godišnje do 2030. godine.

Veći cilj je postavljen za javni sektor (smanjenje potrošnje

finalne energije od 1,9% svake godine), uz obavezu renoviranja najmanje 3% ukupne površine zgrada koje su u vlasništvu javnih organa i njihove transformacije u zgrade sa skoro nultom potrošnjom energije ili zgrade sa nultom emisijom gasova sa efektom staklene bašte.

Energetske performanse zgrada

Zgrade čine oko 40% potrošnje energije u EU i proizvode približno 36% emisija gasova staklene bašte. Grejanje i hlađenje, struja i topla voda čine većinu energije koja se troši u zgradama. Oko 35% zgrada u EU je starije od 50 godina, a skoro 75% zgrada u EU nije energetska efikasna.

Predložena je revizija Direktive o energetske karakteristika zgrada [20] u kojoj su postavljeni novi ciljevi za renoviranje zgrada u cilju dekarbonizacije. Predložene mere uključuju nultu emisiju svih novih zgrada u EU do 2030. godine, a svih novih javnih zgrada do 2027. godine i postavljanje minimalnih standarda energetske performansi.

Države članice EU moraju uspostaviti nacionalne planove za renoviranje zgrada, sa indikativnim prekretnicama za 2030, 2040. i 2050. godinu.

Ekološki dizajn proizvoda

Uspeh energetske tranzicije zavisi i od navika potrošača i podsticaja za proizvođače da proizvode energetska efikasna proizvode. Predložena je Uredba o ekološkom dizajnu proizvoda [21] koja uspostavlja okvir za postavljanje zahteva za ekološki dizajn proizvoda. Fokus je na aspektima proizvoda kao što su trajnost i pouzdanost, mogućnost ponovne upotrebe, efikasnost energije i resursa. Takođe, poboljšaće se i transparentnost uticaja proizvoda na životnu sredinu.

Upravljanje energetskom unijom i klimatskim akcijama

Uredba o upravljanju energetskom unijom i klimatskim akcijama iz 2018. godine [22], postavlja pravila za izveštavanje i praćenje sprovođenja energetske tranzicije i klimatskih ciljeva EU. Revizija Uredbe o upravljanju energetskom unijom i klimatskim akcijama planirana je za početak 2024. godine, kako bi se uzeli u obzir ciljevi paketa *Fit for 55* [11], [12].

Ova Uredbe predviđa da svaka Država članica mora da izradi desetogodišnji integrisani nacionalni energetska i klimatska plan (INEKP) [23].

Prirodni gas, vodonik i električna energija

Prirodni gas emituje manje CO₂ od ostalih fosilnih goriva i dugo se smatrao nekom vrstom prelaznog goriva na putu ka klimatskoj neutralnosti, posebno u kontekstu prelaska sa uglja. Međutim zbog geopolitičke situacije u poslednjih godina, odnosno zbog rata Rusije i Ukrajine, EU je uložila napore da ubrza prelazak sa prirodnog gasa na obnovljive i nisko-ugljenične gasove.

III DOKUMENTA KOJA REGULIŠU BUDUĆI RAZVOJ ENERGETSKOG SEKTORA U REPUBLICI SRBIJI

Zakon o energetici Republike Srbije

Izmenama i dopunama Zakon o energetici Republike Srbije iz 2021. godine predviđeno je da se energetska politika Republike Srbije bliže razrađuje i sprovodi sledećim dokumentima:

Integrisanim nacionalnim energetska i klimatska planom Republike Srbije (INEKP) [24], Strategijom razvoja energetike Republike Srbije (Strategija) [19] i Programom za ostvarivanje Strategije razvoja energetike (POS) [25].

Pored donošenja i sprovođenja navedenih dokumenata iz oblasti energetike, vrlo je bitno da promene koje će se dešavati u energetici Republike Srbije prati usaglašavanje sa strateškim dokumentima i aktivnostima i u ostalim sektorima, kao što su rudarstvo, industrija, saobraćaj, turizam, građevinarstvo i stanovanje, prostorno planiranje, urbanizam, informaciono-komunikacione tehnologije, poljoprivreda, zaštita životne sredine i dr. Energetska sektor, klimatske akcije i održivi razvoj samo su delovi jednog novog koncepta nisko-ugljenične ekonomije i društva Republike Srbije.

Integrisani nacionalni energetska i klimatska plan (INEKP)

Da bi ispratila Evropu na putu energetske tranzicije, odnosno klimatske neutralnosti i dekarbonizacije do 2050. godine, Republika Srbija je ratifikovala i potpisala niz međunarodnih akata. Ratifikacijom Sporazuma iz Pariza [4] u okviru Ujedinjenih nacija o klimatskim promenama iz 2015. godine, Srbija je preuzela obavezu smanjenja emisije gasova sa efektom staklene bašte i prihvatila potrebu sprovođenja mera i aktivnosti u cilju učešća u dostizanju klimatske neutralnosti, dok je potpisivanjem Ugovora o Energetskoj zajednici i Sofijske deklaracije o Zelenoj agendi za Zapadni Balkan [5], preuzela obaveze izrade INEKP-a.

INEKP je ključni strateški dokument u energetskom sektoru, koji u pogledu obnovljivih izvora energije, energetske efikasnosti i smanjenja emisija gasova sa efektom staklene bašte definiše ciljeve za 2030. godinu i predviđa veoma konkretne i mere za njihovo dostizanje [24].

INEKP je donet u julu 2024. godine od strane Vlade Republike Srbije. Proces izrade Strategije vodilo je Ministarstvo rudarstva i energetike, kao nadležna institucija u Republici Srbiji.

Sadržaj INEKP je propisan ranije pomenutom Uredbom (EU) 2018/1999 [23]. Saglasno ovoj Uredbi, INEKP ima dva Odeljka - A i B. Odeljak A definiše nacionalne ciljeve i mere za njihovo sprovođenje. Odeljak B sadrži opis scenarija razvoja energetska sektora, od kojih je jedan referentni, a postoje i napredni scenariji. Takođe, dati su rezultati razvoja energetska sektora za svaki scenario.

Svi ciljevi u INEKP-u se, u skladu sa Uredbom (EU) 2018/1999, sagledavaju u pet ključnih dimenzija [23], [24]:

- dekarbonizacija (emisija gasova sa efektom staklene bašte i obnovljiva energija),
- energetska efikasnost,
- energetska sigurnost,
- unutrašnje energetska tržište i
- istraživanje, inovacije i konkurentnost.

Glavni stubovi INEKP-a se odnose na povećan udeo OIE u energetskom miksu Republike Srbije i na mere energetske efikasnosti usmerene na smanjenje finalne potrošnje energije.

Povećani udeo OIE je jedan od najvažnijih ciljeva INEKP-a. Planirano je dostizanjem udela od 33,6% u bruto finalnoj

potrošnji energije. OIE će se smatrati glavnim domaćim izvorom električne energije sa udelom koji prelazi 45% u proizvodnji električne energije u 2030. godine, koji će biti ostvaren uglavnom putem najekonomičnije eksploatacije raspoloživog potencijala energije vetra i solarne energije.

Efikasno regionalno tržište električne energije, spajanje regionalnog tržišta električne energije sa evropskim tržištem električne energije, pojednostavljenje i ubrzanje postupka izdavanja dozvola, digitalizacija energetskog sistema, unapređenje i proširenje postojeće elektroenergetske mreže i njenih interkonekcija, unapređenje tržišta skladištenja energije, OIE na distributivnoj mreži i resursi upravljanja potrošnjom, kao i postepena elektrifikacija i energetsko povezivanje sektora finalne potrošnje smatraju se preduslovima za maksimalno učešće OIE.

Jedan od prioriteta je podsticanje velikog nivoa elektro mobilnosti, koja će se u velikoj meri oslanjati na proizvodnju električne energije iz OIE, uz značajne uštede energije, što će istovremeno doprineti i postizanju ciljeva energetske efikasnosti. Dalja eksploatacija OIE za potrebe za grejanja i hlađenja, kao i promovisanje naprednih biogoriva u sektoru saobraćaja predstavljaju dodatne prioritete u okviru INEKP-a za dalje uvođenje OIE.

Unapređenje energetske efikasnosti predstavlja jedan od ključnih prioriteta INEKP-a. Poboljšanje energetske efikasnosti proizvodi dodatne višestruke koristi, kao što su smanjenje emisija gasova sa efektom staklene bašte, smanjenje troškova za energiju, poboljšanje nivoa komfora u zgradama, poboljšanje konkurentnosti preduzeća, smanjenje siromaštva i povećanje vrednosti stambenog fonda.

Promocija istraživanja i inovacija će takođe biti prioritet. Davaće se podrška inovativnim tehnologijama, koje će doprineti ispunjenju energetskih i klimatskih ciljeva.

Ova putanja energetske tranzicije ka čistoj energiji usmerena je na unapređenje energetske sigurnosti zemlje, smanjenje njene energetske zavisnosti, istovremeno osiguravajući smanjenje upotrebe lignita, doprinoseći značajnom smanjenju emisija gasova sa efektom staklene bašte do 2030. godine. Očekuje se smanjenje emisije gasova sa efektom staklene bašte od 33,3% do 2030. u odnosu na 1990. godinu.

Strategija razvoja energetike Republike Srbije

Strategija razvoja energetike Republike Srbije, doneta je u novembru 2024. godine i odnosi se na period do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine [19]. Proces njene izrade vodilo je Ministarstvo rudarstva i energetike (kao nadležna institucija u Republici Srbiji). Ova Strategija razvoja energetike je nastala kao rezultat uspešne stručne saradnje sa svim relevantnim zainteresovanim stranama (kao što su organi državne uprave, javni i privatni sektor, organizacije civilnog društva i dr.).

U pogledu scenarija energetskog razvoja i nacionalnih ciljeva, Strategija i INEKP su međusobno usaglašeni. INEKP je krovni dokument, koji definiše nacionalne ciljeve i mere za njihovo sprovođenje, dok Strategije detaljnije razrađuje određene ciljeve.

Strategija sadrži sledeće oblasti:

- karakteristike proizvodnje i potrošnje energije u Republici Srbiji,
- realizacija osnovnih strateških ciljeva iz prethodne strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine, doneta 2015. godine [26],
- energetske resursi Republike Srbije i ocena mogućnosti njihovog korišćenja,
- razvoj energetike Republike Srbije do 2040. godine,
- razvoj energetskih sektora do 2040. godine,
- vodonik u energetskej tranziciji,
- nuklearna energija,
- okvir i ocena uticaja mogućih promena međunarodne pozicije Srbije i integracionih procesa na energetski razvoj,
- analiza efekata sprovođenja Strategije i
- energetika Republike Srbije nakon 2040. godine.

Kada su u pitanju energetske resursi Republike Srbije i ocena mogućnosti njihovog ponovnog korišćenja, neophodno je zbog realizacije procesa dekarbonizacije da se postepeno teži ka napuštanju proizvodnje električne energije iz fosilnih goriva. Međutim, imperativ u energetici je sigurnost snabdevanja energijom, pa će dinamika rada termoelektrana zavisiti pre svega od energetske bezbednosti, kako ona ni u jednom trenutku ne bi bila ugrožena u Republici Srbiji.

U Strategiji je navedeno da postojeće rezerve uglja u Kolubarskom i Kostolačkom basenu mogu da obezbede rad termoelektranih kapaciteta do 2050. godine, a u slučaju potrebe i nakon toga.

Rad termoelektrana biće prilagođen trenutnim potrebama za električnom energijom. Tako će neki blokovi raditi u maksimalno, dok će neki blokovi raditi sa smanjenom snagom ili biti u statusu rezerve. S obzirom da ovi blokovi nastavljaju sa radom, potrebno je u budućnosti primenjivati tehnologije za prikupljanje i skladištenje ugljendioksida.

U periodu do 2030. godine, sa mreže će biti povučene četiri bloka u TE Kolubara A, dok će se za TE Morava razmotriti stavljanje u hladnu rezervu ili povlačenje. Njihovo povlačenje neće bitno uticati na količinu električne energije koja se proizvodi jer će biti usklađeno sa puštanjem u rad novih proizvodnih kapaciteta prvenstveno iz OIE.

Što se tiče gasnih elektrana, zbog povlačenja Panonskih TE-TO, planirana je izgradnja gasne na području Novog Sada, snage 350 MW električne energije i 100 MW toplotne energije. Pored pomenute nove elektrane na lokaciji postojeće u Novom Sadu, moguća je i izgradnja i gasne elektrane u okolini Niša. Predviđeno je da ova elektrana ima kapacitet od 150 MW električne i 100 MW toplotne energije.

Urađena studijska istraživanja ukazuju na mogućnost da se dodatno iskoristi potencijal velikih vodotokova. Kada su hidroelektrane u pitanju, osnovna namera je očuvanje svih izgrađenih kapaciteta uz revitalizacije sa eventualnim povećanjem snaga, a zatim i dogradnja postojećih i izgradnja novih kapaciteta. U periodu 2030 - 2040. godine cilj je iskorišćenje hidropotencijala Drine, Ibra i Morave. Planirano je da izgradnja novog hidroenergetskog sistema Gornja Drina bude

završena do 2032. godine. To uključuje tri nove hidroelektrane – HE Buk Bijela, HE Foča i HE Paunci, ukupne instalisane snage oko 212 MW, sa učešćem Srbije u ovom projektu 51%. Predviđena je i izgradnja hidroelektrana na Ibru (121 MW) i na Moravi (146 MW).

Reverzibilne hidroelektrane su vrlo bitna karika u korišćenju OIE za proizvodnju električne energije jer predstavljaju skladišta energije i imaju veliku ulogu u balansiranju elektroenergetskog sistema. Balansnu rezervu u našem EES-u obezbeđuju hidroelektrane, termoelektrane i reverzibilne hidroelektrane. EES baziran na OIE će imati sve veću potrebu za ovim rezervama, je su to nepredvidivi izvori, a sistemska inercija se smanjuje kao posledica priključenja OIE preko uređaja energetske elektronike.

Zato je u pripremi, u blizini postojeće HE Bistrica, projekat izgradnje RHE Bistrica (628 MW). Postoji i mogućnost izgradnje RHE Đerdap na Dunavu, procenjene instalisane snage 1.800 MW. Sa druge strane, procena je da ne postoji dovoljan potencijal za izgradnju novih malih hidroelektrana koji može imati značajniji uticaj na razvoj energetike Republike Srbije.

Sa druge strane, procena je da ne postoji dovoljan potencijal za izgradnju novih malih hidroelektrana koji može imati značajniji uticaj na razvoj energetike Republike Srbije.

Po pitanju potencijala energije vetra, minimalni tehnički raspoloživi potencijal za izgradnju vetroelektrana u Srbiji je oko 10,75 GW. Najveći potencijal energije vetra imaju lokacije u regionima Banata i Bačke, ali su značajni potencijali i u istočnom delu Srbije.

Tehnički potencijal fotonaponskih panela instalisanih na konstrukcijama na tlu u Republici Srbiji iznosi 8.750 MWp. Tehnički potencijal za izgradnju fotonaponskih elektrana na krovnim površinama iznosi oko 11.096 MWp. Najveći potencijal fotonaponskih elektrana je u regionu Beograda, a u ostalim regionima se kreće od 147 MWp u Topličkom okrugu do 970 MWp u Južnobačkom okrugu. Prirodni potencijal za izgradnju plutajućih solarnih elektrana na teritoriji Republike Srbije, koji uvažava samo površinu jezera i određena ograničenja, iznosi oko 4.249 MWp.

U periodu do 2030. godine, očekuje se ekspanzija izgradnje vetroelektrana i solarnih elektrana sa ukupnom instalisanom snagom vetroelektrana i solarnih elektrana od 3,5 GW, što predstavlja značajan porast učešća intermitentnih OIE u ukupnoj proizvodnji električne energije. Predviđena instalisana snaga u vetroelektranama iznosi 1,77 GW, dok je predviđena instalisana snaga u solarnim elektranama 1,73 GW.

U periodu posle 2030. godine, očekuje se dalji porast instalisanih kapaciteta vetroelektrana i solarnih elektrana. Do 2040. godine očekuje se da ukupni instalisani kapacitet izgrađenih vetroelektrana i solarnih elektrana bude 10,97 GW. Konkretno, predviđena instalisana snaga vetroelektrana iznosi 3,6 GW, dok je predviđena instalisana snaga solarnih elektrana 7,37 GW.

Da bi energetska tranzicija u elektroenergetskom sektoru bila moguća, potrebno je i da operatori prenosnog i distributivnog sistema prate sve očekivane promene u elektroenergetskom sektoru. Za pravilan rad i razvoj prenosnog i distributivnog

sistema u narednim godinama, operator prenosnog i operator distributivnog sistema će nastaviti realizaciju aktivnosti koje treba da omoguće povećanje pouzdanosti i sigurnosti napajanja kupaca električne energije. Najznačajniji projekti u prenosnom sistemu u narednom periodu su projekti izgradnje i rekonstrukcije interne 400, 220 i 110 kV mreže, čime će se ublažiti uticaj starenja postojeće infrastrukture, omogućiti priključenje novih elektrana i potrošača i povećati efikasnost upravljanja prenosnim sistemom. Pored toga veoma važni su i međunarodni projekti, koji obuhvataju povećanje kapaciteta prenosnih koridora koji imaju regionalni i panevropski značaj. Na distributivnom nivou najvažniji projekti su projekti izgradnje i rekonstrukcije elektroenergetskih objekata i projekti naprednog upravljanja distributivnom mrežom.

Što se tiče nuklearne energije, sa stanovišta osnovnih razvojnih ciljeva i prioriteta energetskog razvoja, nuklearna energetika bi mogla značajno da doprinese dekarbonizaciji i podizanju konkurentnosti energetskog sektora. Iz tog razloga u Strategiji razvoja energetike, postoji i jedan scenario razvoja koji uključuje učešće nuklearne energije u energetskom miksu Republike Srbije, sa konzervativnom prognozom puštanja u rad nuklearne elektrane 2045. godine. Na taj način je ostavljena mogućnost i ovoj vrsti energije, ukoliko u narednim godina Srbija opredeli za to. Ukoliko bi 2040. godine nuklearna elektrana snage 1.000 MW radila u punom kapacitetu, kako je predviđeno ovim scenarijem, na račun proizvodnje električne energije iz ovog postrojenja, došlo bi do smanjenja proizvodnja iz termoelektrana na lignit i prirodni gas.

Međutim, mora se imati i u vidu da postojeći zakonski i regulatorni okvir koji se odnosi na nuklearnu sigurnost i bezbednost je nedovoljan da bi omogućio izgradnju nuklearnih elektrana i sveobuhvatno regulisao sve faze životnog ciklusa nuklearne elektrane. Takođe, postojeći stručni i naučni kadar, iz oblasti nuklearnih nauka i sa njima povezanih naučnih i stručnih disciplina je relativno skroman u Republici Srbiji. Ukoliko bi se i izabrao ovakav scenario razvoja, potrebno je unaprediti visokoškolske studijske programe koji se direktno ili indirektno odnose na nuklearnu tehniku i tehnologiju, kako bi imali potreban kapacitet za razvoj i uspostavljanje nacionalne infrastrukture za potrebe korišćenja nuklearne energije.

Program za ostvarivanje Strategije razvoja energetike

Na osnovu Zakona o energetici, energetska politika Republike Srbije utvrđuje se Strategijom razvoja energetike i INEKP-om, a uslovi, način, dinamika i mere za ostvarivanje Strategije i INEKP-a, utvrđuju se Programom ostvarivanja Strategije razvoja energetike [25].

Pomenuti programski dokument izrađuje i predlaže Ministarstvo rudarstva i energetike, a usvaja ga Vlada Republike Srbije. Međutim, ovaj dokument još uvek nije zvanično usvojen.

IV ZAKLJUČAK

Kao odgovor na izazove klimatskih promena i globalnog zagrevanja u svetu, poslednjih decenija dešavaju se krupne promene u energetskom sektoru Republike Srbije, koje se najčešće opisuju kao energetska tranzicija. S obzirom da je

Republika Srbija prihvatila evropski put sa energetsom tranzicijom, ovaj stručni rad ima za cilj da se upozna šira javnost sa zakonskim i podzakonskim aktima koji regulišu razvoj energetskog sektora Republike Srbije u narednom periodu. U Republici Srbiji je 2024. godina označila ambiciozno otpočinjanje nove etape razvoja energetskog sektora usvajanjem dva nova strateška dokumenta, Integrisani nacionalni energetski i klimatski plan (INEKP) za period do 2030. godine, sa projekcijama do 2050. godine, kao i Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine. Važno je pomenuti i da su 2024. godine usvojene i izmene i dopune Zakona o energetici, sa ciljem ispunjenja obaveza iz Ugovora o osnivanju Energetske zajednice

Put energetske tranzicije nije nimalo lak i jednostavan. U energetsom sektoru nas čeka težak zadatak ka ostvarivanju svih propisanih i očekivanih ciljeva. Da bi se ciljevi ostvarili u Republici Srbiji, trenutno nam je svima najvažnije da se što pre donese Program ostvarivanja Strategije razvoja energetike, jer će u njemu biti definisani konkretni projekti pomoću kojih se postižu ciljevi definisani Strategijom i INEKP-om, kao i rokovi za završetak ovih projekata u Republici Srbiji. Na taj način će svi akteri u energetsom sektoru Republike Srbije (proizvođači, operatori prenosnog i distributivnog sistema, itd.) imati pred sobom konkretne zadatke za potrebe razvoja energetskog sektora, koje će morati da uvrste i u svoje zvanične planove poslovanja, razvoja i investicija.

LITERATURA

- [1] Đukić, P. Pravična tranzicija energetike Srbije - održivost reformi u uslovima nove globalne krize, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 3, pp. 53-62, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-3.53D>
- [2] Đukić, P., Đukanović, S. Konfuzija u energetske tranziciji - svet i Srbija danas, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 3, pp. 17-23, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE22-3.17D>
- [3] Batić, I., Ivančić, A. Analiza kapaciteta za izgradnju fotonaponskih sistema na krovovima stambenih zgrada u Srbiji, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 3, pp. 9-16, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-3.09B>
- [4] United Nations Climate Change, <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement> [pristupljeno 28.01.2025]
- [5] European Commission, https://www.mei.gov.rs/upload/documents/eu_dokumenta/2020/green_agen_da_for_the_western_balkans_en.pdf [pristupljeno 28.01.2025]
- [6] Babić, I., Petrović, M. Razvoj pravnog okvira za veće korišćenje obnovljivih izvora energije u Srbiji od 2013. do 2020. godine, *Klimatizacija, grejanje, hlađenje*, Vol. 42, No. 2, pp. 47-50, 2013.
- [7] European Commission, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en [pristupljeno 28.01.2025]
- [8] Kougias, I., Taylor, N., Kakoulaki, G., Jäger-Waldau, A. The role of photovoltaics for the European Green Deal and the recovery plan, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 144, 111017, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111017>
- [9] United Nations Climate Action, <https://www.un.org/en/climatechange/net-zero-coalition> [pristupljeno 28.01.2025]
- [10] He, Y., Li, Y., Li, X., Liu, Y., Wang, Y., Guo, H., Hou, J., Zhu, T., Liu, Y. Net-zero greenhouse gas emission from wastewater treatment: Mechanisms, opportunities and perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 184, 113547, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113547>
- [11] European Commission, https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal/fit-55-delivering-proposals_en [pristupljeno 28.01.2025]
- [12] Schlacke, S., Wentzien, H., Thierjung, E.-M., Köster, M. Implementing the EU Climate Law via the 'Fit for 55' package, *Oxford Open Energy*, Vol. 1, oiab002, 2022. <https://doi.org/10.1093/ooenergy/oiab002>
- [13] Batić, I., Đuričić, Ž., Babić, M. Tehno-ekonomska analiza proizvodnje vodnika iz biodizela i njegove upotrebe za proizvodnju električne energije u gorivnim ćelijama za pogon električnih vozila, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-6, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-1.01B>
- [14] Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data> [pristupljeno 28.01.2025]
- [15] The nature Coservancy, https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-directive_en [pristupljeno 28.01.2025]
- [16] Lehnert, W., Traum, Y. The 'new' Renewable Energy Directive (RED III): an overview, *European Energy and Climate Journal*, Vol.12, No. 2, pp. 40-47, 2024. <https://doi.org/10.4337/eej.2024.0001>
European Commission, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0221> [pristupljeno 28.01.2025]
- [17] European Commission, https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/eu-wind-energy_en [pristupljeno 28.01.2025]
- [18] Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2040. godine sa projekcijama do 2050. godine, http://www.parlament.gov.rs/upload/archive/files/lat/pdf/ostala_akta/14_saziv/RS52-24%20-%20Lat..pdf [pristupljeno 28.01.2025]
- [19] Magyar, Z. Projekat evropske platforme: direktiva o energetskim karakteristikama zgrada, in *Proc. Zbornik Međunarodnog kongresa i izložbe o KGH 37*, Beograd, pp. 55-63, 6-8. Decembar, 2006. <https://izdanja.smeits.rs/index.php/kgkh/article/view/5310> [pristupljeno 02.02.2025]
- [20] Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products, amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and repealing Directive 2009/125/EC (Text with EEA relevance), <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1781/oj/eng> [pristupljeno 02.02.2025]
- [21] Uredba (EU) 2018/1999 Evropskog parlamenta i Vijeća od 11. prosinca 2018. o upravljanju energetsom unijom i djelovanjem u području klime, izmjeni uredaba (EZ) br. 663/2009 i (EZ) br. 715/2009 Evropskog parlamenta i Vijeća, direktiva 94/22/EZ, 98/70/EZ, 2009/31/EZ, 2009/73/EZ, 2010/31/EU, 2012/27/EU i 2013/30/EU Evropskog parlamenta i Vijeća, direktiva Vijeća 2009/119/EZ i (EU) 2015/652 te stavljanju izvan snage Uredbe (EU) br. 525/2013 Evropskog parlamenta i Vijeća, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/HR/TXT/?uri=celex:32018R1999> [pristupljeno 02.02.2025]
- [22] National energy and climate plans (NECPs), https://ec.europa.eu/energy/topics/energy-strategy/national-energy-climate-plans_en [pristupljeno 02.02.2025]
- [23] Integrisani nacionalni energetski i klimatski plan Republike Srbije (INEKP), <https://www.mre.gov.rs/tekst/1115/-integrisani-nacionalni-energetski-i-klimatski-plan-republike-srbije-za-period-do-2030-sa-vizijom-do-2050-godine.php> [pristupljeno 02.02.2025]
- [24] Program za ostvarivanje Strategije razvoja energetike (POS), <https://biogas.org.rs/wp-content/uploads/2019/11/Uredba-o-utvr%C4%91ivanju-programa-ostvarivanja-Strategije-razvoja-energetike-za-period-od-2017-do-2023.pdf> [pristupljeno 02.02.2025]
- [25] Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2015. godine, http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/t2005_05/t05_0155.htm [pristupljeno 02.02.2025]

AUTORI

Biljana Trivić, viši stručni saradnik, Agencija za energetiku Republike Srbije (AERS), Beograd, Srbija, biljana.trivic@aers.rs
dr Iva Batić, naučni saradnik, Univerzitet u Beogradu – Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija, iva@etf.rs, ORCID [0000-0003-0150-3235](https://orcid.org/0000-0003-0150-3235)
dr Milan Petrović, generalni sekretar, Agencija za energetiku Republike Srbije (AERS), Beograd, Srbija, e-mail: milan.petrovic@aers.rs

New Regulation in the Field of Strategic Development of the Energy Sector in the Republic of Serbia

Abstract - In the Republic of Serbia, the year 2024 marked the ambitious beginning of a new phase in the development of the energy sector. At the end of July 2024, the Republic of Serbia adopted the Integrated National Energy and Climate Plan (INECP) for the period up to 2030, with projections until 2050. By adopting the INECP, Serbia obtained an important strategic document aligned with the European Union's vision for the decarbonization of the energy sector. This document represents Serbia's roadmap for energy transition and will contribute to the goal of integrating its electricity market with the EU's single market. In line with the requirements set out in the INECP, Serbia plans to make significant investments in renewable energy sources by 2030 -around 3.5 GW of new solar and wind power plants (to be connected to the electricity grid) - aimed at increasing supply security for consumers, boosting the share of clean energy sources, and enhancing environmental protection. Another important strategic document in the field of energy sector development is the Energy Development Strategy of the Republic of Serbia until 2040, with projections until 2050, which was adopted in November 2024. In addition, amendments and supplements to the Energy Law were adopted in December 2024, with the goal of fulfilling obligations under the Energy Community Treaty. In this paper, the authors will provide an overview of all the innovations introduced by the aforementioned strategic documents, as well as the implications of the amendments to the Energy Law.

Index terms - RES, Energy transition, Decarbonization, Regulation

Proračun godišnje potrošnje energije toplotne pumpe metodom temperaturnih segmenata

Branislav Petrović, Marija Vasilev, Miloš Banjac

Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Kraljice Marije 16, Beograd

Rezime - Toplotne pumpe su električni uređaji koji termičku energiju okoline prenose u grejani prostor. Zahvaljujući tome što, u poređenju sa elektrootpornim grejačima, mogu preneti tri do šest puta više termičke energije u grejani prostor, toplotne pumpe po efikasnosti predstavljaju neprikosnoveno rešenje u tehnici grejanja. U slučaju da je izvor termičke energije spoljašnji vazduh, slučaj tzv. toplotnih pumpi tipa vazduh-vazduh, njihova efikasnost direktno zavisi od temperature spoljašnjeg vazduha. Zbog toga se procena ukupne potrošnje energije toplotne pumpe mora zasnivati na metodologiji koja uzima u obzir promenu ove temperature. Za određivanje ukupne potrošnje energije toplotne pumpe Standard EN 15316 utvrđuje dve metode: metodu stepen-dana i metodu temperaturnih segmenata. U domaćoj praksi isključivo se koristi jednostavnija i manje precizna, metoda stepen-dana. Metoda temperaturnih segmenata, iako pouzdanija, verovatno zbog potrebe da se raspolaze časovnim podacima temperature spoljašnjeg vazduha, ostala je gotovo nepoznata. Kako bi se predstavila i približila inženjerskoj praksi, u radu su opisane teorijske osnove i prikazani osnovni koraci ove metode, a na studiji slučaja upravne zgrade EPS AD u Bajinoj Bašti prikazana njena primena. Grupisanjem stvarnih časovnih podataka o temperaturi spoljašnjeg vazduha u temperaturne segmente i njihovim povezivanjem sa radnim tačkama toplotne pumpe, uz obuhvatanje rada pomoćnih uređaja i rezervnih grejača, određena je ukupna godišnja potrošnja električne energije. Dobijena potrošnja od 56 150 kWh električne energije, pri čemu se 86% ostvaruje u zimskom, a 14 % u letnjem režimu rada, jasno pokazuje dominantan uticaj zimskih sati u ukupnoj potrošnji.

Ključne reči - metoda temperaturnih segmenata, metoda proračuna energetske analize, toplotna pumpa, godišnja potrošnja energije

I UVOD

Toplotne pumpe su trenutno najefikasnije tehničko rešenje kojim mogu da se zadovolje potrebe za grejanjem i hlađenjem. Njihova primena značajno smanjuje upotrebu fosilnih goriva, a time i emisiju gasova koji prouzrokuju efekat staklene bašte, budući da one preuzimajući termičku iz okoline omogućavaju da se tri do šest puta više toplote preda u grejani prostor, nego što se potroši električne energije [1]. Pored sektora zgradarstva, one se koriste i u industrijskim procesima, za potrebe sušenja, isparavanja, destilacije, ukuvavanja, proizvodnju pare ili istovremeno zagrevanje jednog i hlađenje drugog fluida [2]. Posebno je značajna i perspektivna njihova primena u

sistemima daljinskog grejanja, jer one koriste niskotemperaturne toplotne izvore i tzv. otpadnu toplotu. Brojne analize potvrđuju finansijsku isplativost koja se ostvaruje zamenom tradicionalnih sistema grejanja toplotnim pumpama [3-5]. Rad [6] pokazuje da zamena električnog kotla toplotnom pumpom vazduh-voda značajno smanjuje potrošnju električne energije za grejanje objekta, pri čemu se ostvaruje ušteda od približno 60 %. Dodatno, u istom radu navodi se da prelazak sa gasnog kotla na toplotnu pumpu doprinosi oko 40% manju potrošnju energije. S obzirom na značajne energetske i ekološke koristi u primeni toplotnih pumpi, precizna procena godišnje potrošnje energije za njihov pogon postala je važan deo tehničkih, ekonomskih i ekoloških analiza primene ovih sistema.

Iako postoji mnogo različitih metoda za proračun godišnje potrošnje energije za pogon toplotne pumpe, standard ISO EN 15316-4-2:2017/AC:2017 [7] utvrđuje samo dve i to tzv. metodu stepen dana i tzv. metodu temperaturnih segmenata (eng. bins). U domaćoj praksi isključivo se koristi jednostavnija i manje precizna metoda stepen-dana. Ova metoda koristi prosečne dnevne temperature spoljašnjeg vazduha, što je čini manje preciznom, pa čak i potpuno neadekvatnom kad se koristi za analizu tokom letnjeg perioda [8]. Metoda temperaturnih segmenata, iako spada u grupu kvazistacionarnih metoda, koristi časovne temperature spoljašnjeg vazduha, što obezbeđuje precizniju procenu potrošnje energije za sve vremenske intervale (godina, mesec, dan) tokom sezone grejanja i hlađenja, uz mogućnost obuhvatanja potrošnje energije za rad pomoćnih uređaja i rezervnih grejača [9]. Pri tome, za razliku od metode stepen dana, koja pri određivanju ukupno utrošene energije pretpostavlja da koeficijent grejanja COP i koeficijent hlađenja EER toplotne pumpe imaju stalne vrednosti, metoda temperaturnih segmenata uzima u obzir upravo promenljivost vrednosti ovih koeficijenata u zavisnosti o temperature spoljašnjeg vazduha. Zbog toga, da bi se ona primenila, potrebno je pored poznavanja srednjih časovnih vrednosti temperatura spoljašnjeg vazduha poznavati i kako se menjaju koeficijent grejanja COP, odnosno koeficijentom hlađenja EER toplotne pumpe u funkciji ovih temperatura. Ova zavisnost, u praksi se svodi na poznavanje ovih podataka u karakterističnim, tzv. radnim tačkama, za koju proizvođači toplotnih pumpi daju u svojim katalogima.

Kao što joj sam naziv glasi, metoda temperaturnih intervala zasniva se na prebrojavanju broja pojavljivanja i svrstavanju časovnih temperatura spoljašnjeg vazduha u određene temperaturne intervale. Ovi intervali, ograničeni gornjom θ_{lim} i donjom θ_{lim} graničnom temperaturom intervala, formiraju se

tako da svaki interval obuhvati tzv. radnu tačku, tj. temperaturu pri kojoj je za zimski režim poznat koeficijent grejanja COP , odnosno koeficijent hlađenja EER toplotne pumpe za letnji režim. Kako ova metoda predviđa da u formiranom intervalu temperatura toplotna pumpa uvek radi u tzv. radnoj tački, sa odgovarajućim koeficijentom grejanja COP , odnosno koeficijentom hlađenja EER , jasno je da se povećanjem broja temperaturnih intervala povećava kvalitet proračuna.

Metoda temperaturnih segmenata utvrđena standardom ISO EN 15316-4-2:2017/AC:2017 [7], daje mogućnost izbora dve podmetode: Metode A i Metode B. Izbor podmetode zavisi od vremenskog intervala za koji je potrebno da se odredi potrošnja energije. Metoda A omogućava proračune časovne i dnevne potrošnje energije, dok Metoda B omogućava dnevne, mesečne i godišnje proračune. Zbog namere da se odrede pre svega godišnja potrošnja energije, u ovom radu je predstavljen i za proračunu i analizu korišćena Metoda B.

Za potrebe izračunavanja prema Metodi B, uvodi se i pojam kumulativnog grejnog stepen sata ($DH_{H,j}$ [°Ch]). Ova veličina predstavlja broj sati u kojima se javlja temperatura spoljašnjeg vazduha u temperaturnom intervalu j (NB_{h_j} [h]) pomnožena sa razlikom između temperature vazduha u prostoriji (usvojena kao 20 °C) i temperature spoljašnjeg vazduha:

$$DH_{H,j} = NB_{h_j} \cdot (\vartheta_{gen,out} - \vartheta_{ext}) [°Ch] \quad (1)$$

Analogno jednačini (1), u režimu hlađenja koristi se kumulativni rashladni stepen sat ($DH_{C,j}$ [°Ch]) koji predstavlja broj sati u kojima se javlja temperatura spoljašnjeg vazduha u temperaturnom intervalu j (NB_{h_j}), pomnožena sa razlikom između temperature spoljašnjeg vazduha i temperature vazduha u prostoriji (usvojene kao 24 °C).

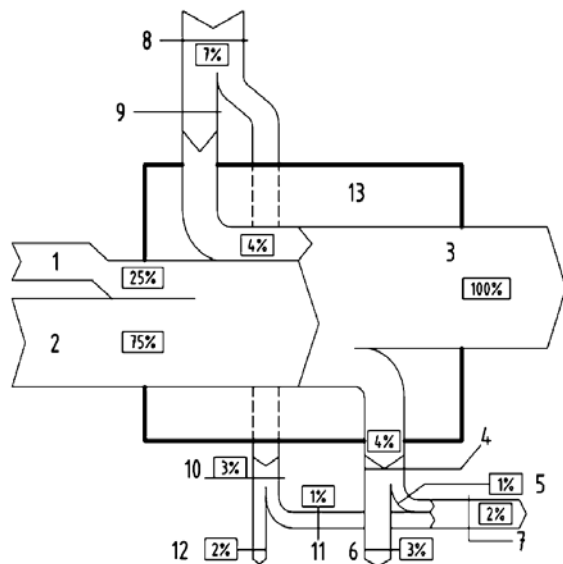
Proračun parametara toplotne pumpe zahteva detaljno poznavanje specifičnih potreba za grejanjem i pripremom sanitarne tople vode. Pored toga, na rezultate proračuna utiče broj i vrsta toplotnih izvora, tip toplotne pumpe i način njenog regulisanja (ON/OFF ili inverter).

Cilj proračuna je određivanje svih vrsta energije, sa posebnim akcentom na energiju potrebnu za pogon toplotne pumpe.

Kako bi se obezbedila tačnost proračuna, neophodno je precizno definisati energetske tokove koji se javljaju kako u zimskom, tako i u letnjem režimu rada podsistema toplotne pumpe, a to su (Slika 1):

- 1 - energija potrebna za pogon toplotne pumpe i pomoćnog grejača $E_{HW,gen,in}$,
- 2 - toplota preuzeta od toplotnog izvora $Q_{HW,gen,in}$,
- 3 - toplotna energija potrebna za grejanje prostora (grejni učinak) $Q_{HW,gen,out}$,
- 4 - ukupni toplotni gubici u podsistemu toplotne pumpe $Q_{HW,gen,ls,tot}$,
- 5 - iskoristivi toplotni gubitak vraćen u grejani prostor $Q_{HW,gen,ls,rbl}$,
- 6 - neiskoristivi toplotni gubitak $Q_{HW,gen,ls,nrbl}$,
- 7 - ukupni iskoristivi toplotni gubici (toplotni gubici podsistema toplotne pumpe i pomoćnih uređaja) $Q_{HW,gen,ls,rbl,tot}$,

- 8 - energija potrebna za pogon pomoćnih uređaja $W_{HW,gen,aux}$,
- 9 - vraćena pomoćna energija u podsistem toplotne pumpe (stvarno iskorišćena) $Q_{HW,gen,aux,ls,rvd}$,
- 10 - ukupni toplotni gubici pomoćnih uređaja $Q_{HW,gen,aux,ls}$,
- 11 - iskoristivi toplotni gubici pomoćnih uređaja $Q_{H,gen,aux,ls,rbl}$,
- 12 - neiskoristivi toplotni gubici pomoćnih uređaja $Q_{H,gen,aux,ls,nrbl}$,
- 13 - podsistem toplotne pumpe.



Slika 1. Energetski tokovi podsistema toplotne pumpe [1]

U letnjem režimu rada, energetski tokovi su isti izuzev ukupnih iskoristivih toplotnih gubitaka u podsistemu toplotne pumpe ($Q_{H,gen,ls,rbl}$).

Nezavisno od korišćene metode, potrošnja energije potrebne za pogon toplotne pumpe određuje se na osnovu izraza:

$$E_{HW,gen,in} \cdot COP_{HW,gen} = Q_{HW,gen,out} + Q_{HW,gen,ls,tot} - f_{gen,aux,ls,rvd} \cdot W_{HW,gen,aux} [kWh] \quad (2)$$

gde su:

$COP_{HW,gen}$ - srednja vrednost COP za grejanje i pripremu sanitarne tople vode,

$f_{gen,aux,ls,rvd}$ - udeo iskorišćene toplote od pomoćnih uređaja.

II ODREĐIVANJE ENERGETSKIH POTREBA ZA DEFINISANE TEMPERATURNE INTERVALE

Nakon određivanje temperaturnih intervala i kumulativnog broja grejnih stepen sati i kumulativnog broja rashladnih stepen sati, neophodno je odrediti i pojedine količine toplote potrebne koje toplotna pumpa u ovim temperaturnim intervalima treba da isporuči grejanom, odnosno hlađenom prostoru. Ove vrednosti se određuju preko težinskog faktora toplotne pumpe za režim grejanja $f_{H,j}$ [-] za temperaturni interval j , izražen preko kumulativnog grejnog stepen sata u okviru definisanog vremenskog intervala, kao:

$$f_{H,j} = \frac{Q_{H,gen,out,j}}{Q_{H,gen,out}} = \frac{DH_{H,0h,lim,j} - DH_{H,0l,lim,j}}{DH_{H,tot}} [-] \quad (3)$$

gde su:

$Q_{H,gen,out,j}$ [kWh] - količina toplote potrebna za nadoknadu gubitaka toplote u okviru temperaturnog intervala j ,

$Q_{H,gen,out}$ [kW] - ukupna količina toplote potrebna za nadoknadu gubitaka toplote,

$DH_{H,0h,lim,j}$ [°Ch] - kumulativni grejni stepen sat do gornje temperature temperaturnog intervala j ,

$DH_{H,0h,lim,j}$ [°Ch] - kumulativni grejni stepen sat do gornje temperature temperaturnog intervala j ,

$DH_{H,0l,lim,j}$ [°Ch] - kumulativni grejni stepen sat do donje temperature temperaturnog intervala j ,

$DH_{H,tot}$ [°Ch] - ukupni kumulativni grejni stepen sat do granice grejanja za zimski režim.

S obzirom da prikazana formula uzima u obzir jedino spoljašnju temperaturu vazduha, uvodi se faktor f_{ctrl} , koji uzima u obzir uslove u kojima je smanjena potreba za grejanjem/hlađenjem. Pored toga, prilikom određivanja energetske potreba za grejanjem, uzima se u obzir i iskorišćena toplota $Q_{H,rnd,j}$ koja ima različite vrednosti za svaki temperaturni interval.

Na osnovu dobijenog težinskog faktora dobija se potrebna količina toplote za nadoknadu gubitaka toplote za definisane temperaturne intervale:

$$Q_{H,gen,out,j} = f_{H,j} \cdot Q_{H,gen,out} \text{ [kWh]} \quad (4)$$

Energija potrebna za pogon toplotne pumpe u okviru definisanih temperaturnih intervala koja se, u opštem slučaju, koristi za grejanje prostorija, pripremu sanitarne tople vode i akumulaciju toplote, izračunava kao:

$$E_{H,gen,in,j}(\vartheta_{gen,in}, \vartheta_{gen,out}) = \frac{\Phi_{gen}(\vartheta_{gen,in}, \vartheta_{gen,out})}{COP_{gen}(\vartheta_{gen,in}, \vartheta_{gen,out})} \cdot t_{eff,j} \text{ [kWh]} \quad (5)$$

Koeficijent grejanja za zadate radne uslove toplotne pumpe u okviru temperaturnih intervala ($COP_{gen,k,l}$), izračunava se u skladu sa standardom SRPS EN 14511. Vrednost $COP_{gen,ref}$ -a, dobijena pri nominalnim uslovima rada od strane proizvođača množi se sa odgovarajućim težinskim faktorom $f_{COP,k,l}$ datim u Aneksu navedenog standarda, kako bi bila prilagođena specifičnim uslovima rada. Analogno određivanju $COP_{gen,k,l}$ -a, grejni učinak toplotne pumpe za zadate radne uslove $\Phi_{gen,k,l}$ takođe se izračunava u zavisnosti od temperatura toplotnog izvora i ponora, pri čemu se grejni učinak toplotne pumpe, dobijen pri nominalnim uslovima rada ($\Phi_{gen,Pn,ref}$), množi sa odgovarajućim korekcionim faktorom za grejni učinak $f_{gen,Pn,k,l}$.

S obzirom da u većini slučajeva toplotna pumpa ne radi kontinuirano tokom celog dana, uvodi se efektivno vreme rada toplotne pumpe koji predstavlja ukupno vreme rada toplotne pumpe za određeni temperaturni interval.

$$t_{eff,j} = t_j \cdot \frac{24 - t_{CO}}{24} \text{ [s]} \quad (6)$$

gde je:

t_{CO} [h/dan] - vreme prekida rada toplotne pumpe u toku 24 sata.

Vreme rada toplotne pumpe t_j za zadati temperaturni interval j , izračunava se na osnovu jednačine (7), pri čemu ukupno vreme rada za definisane temperaturne intervale daje dužinu trajanja grejne sezone.

$$t_j = N_{ho,0hlim,j} - N_{ho,0llim,j} \text{ [h]} \quad (7)$$

gde su:

$N_{ho,0hlim,j}$ [h] - kumulativni broj sati do gornje temperature za temperaturni interval j ,

$N_{ho,0llim,j}$ [h] - kumulativni broj sati do donje temperature za temperaturni interval j .

Na osnovu vrednosti za svaki temperaturni interval dobijaju se vrednosti potrošnje navedenih vidova energije za čitavu sezonu grejanja i hlađenja.

Određivanje energetske potreba za pripremu sanitarne tople vode određuje se analogno delu proračuna za grejanje preko težinskog faktora za pripremu sanitarne tople vode.

Energija potrebna za rad pomoćnih uređaja ($W_{H,gen,aux,j}$) čini udeo ukupne energije potrebne za pogon toplotne pumpe.

$$W_{H,gen,aux,j} = (f_{gen,aux} + f_{gen,Pn,aux,el}) \cdot E_{H,gen,in,j} + LR_{sto} \cdot P_{sto,aux} \cdot t_{eff,j} = E_{H,gen,in,j} \cdot f_{gen,Pn,aux,el} \text{ [kWh]} \quad (8)$$

Koeficijent $f_{gen,Pn,aux,el}$ se određuje na osnovu vrste pogonske energije toplotne pumpe (toplotnu pumpu pogoni električna energija $f_{gen,Pn,aux,el}=0$), dok se koeficijent $f_{gen,aux}$ određuje na osnovu lokacije, proizvođača i tipa toplotne pumpe.

Ukoliko se toplota ne skladišti unutar rezervoara za toplu/hladnu vodu, drugi sabirak u jednačini (8) se zanemaruje.

Ukupni gubici toplote u okolinu podsistema toplotne pumpe ($Q_{H,gen,ls,tot}$) sastoje se iz gubitaka toplote u okolinu komponente k podsistema ($Q_{H,gen,ls,k}$) i gubitaka svih pomoćnih uređaja u okolinu ($Q_{H,gen,aux,ls}$):

$$Q_{H,gen,ls,tot,j} = \sum_k Q_{H,gen,ls,k,j} + Q_{H,gen,aux,ls,j} \text{ [kWh]} \quad (9)$$

pri čemu se smatra da ukupni gubici toplote pumpe prema okolini iznose 1% u odnosu na grejni učinak toplotne pumpe tokom njenog vremena rada za dati temperaturni interval:

$$Q_{H,gen,ls,k} = 0,001 \cdot Q_{H,gen,in,j}(t) \quad (10)$$

Gubici svih pomoćnih uređaja ka okolini računaju se na osnovu energije potrebne za rad pomoćnih uređaja ($W_{H,gen,aux,j}$) pomnožene sa udelom električne energije odvedene u okolinu ($f_{gen,aux,ls,k}$):

$$Q_{H,gen,aux,ls,j} = \sum_k W_{H,gen,aux,k,j} \cdot f_{gen,aux,ls,k} \text{ [kWh]} \quad (11)$$

Ukupni iskoristivi toplotni gubici u podsistemu toplotne pumpe ($Q_{H,gen,ls,rbl,tot}$) za definisani temperaturni interval obuhvataju gubitke toplote koji se mogu iskoristiti kako od strane podsistema toplotne pumpe ($Q_{H,gen,ls,rbl}$), tako i od pomoćnih

uređaja ($Q_{H,gen,aux,ls,rbl}$). U odnosu na ukupne gubitke toplote u okolinu, iskoristivi toplotni gubici uzimaju u obzir faktor redukcije temperature ($b_{gen,k}$) i faktor redukcije temperature pomoćne komponente $b_{gen,aux,k}$, koji zavisi od položaja komponente k .

$$Q_{H,gen,ls,rbl,tot,j} = Q_{H,gen,ls,rbl,j} + Q_{H,gen,aux,ls,rbl,j} = \sum_k Q_{gen,ls,k,j} (1 - b_{gen,k}) + Q_{H,gen,aux,ls,j} (1 - b_{gen,aux,k}) \quad (12)$$

Količina toplote preuzeta od toplotnog izvora, odnosno obnovljiva energija (u ovom slučaju vazduh $Q_{H,gen,in,j} = Q_{H,gen,ren,in,j}$) koju koristi toplotna pumpa dobija se kao razlika količine toplote koja se isporučuje potrošačima i zbira električne energije potrebne za pogon toplotne pumpe i energije rezervnih grejača.

$$Q_{H,gen,ren,in,j} = Q_{H,gen,out,j} - (E_{H,gen,in,j} + E_{H,gen,bu,in,j}) \text{ [kWh]} \quad (13)$$

U slučaju kada toplotna pumpa nije u mogućnosti da nadoknadi celokupne gubitke toplote u objektu, izabrana toplotna pumpa mora biti opremljena dodatnim rezervnim električnim grejačem, čija se snaga računa prema sledećoj formuli:

$$Q_{gen,bu,out,j} = Q_{H,gen,out,j} + Q_{W,gen,out,j} - Q_{H,gen,in,j} - Q_{W,gen,in,j} + Q_{gen,ls,j} \text{ [kWh]} \quad (14)$$

gde su:

$Q_{gen,bu,out,j}$ [kWh] - količina toplote koju rezervni grejač treba da preda u temperaturnom intervalu j ,

$Q_{H,gen,out,j}$ [kWh] - količina toplote potrebna za grejanje objekta u temperaturnom intervalu j ,

$Q_{W,gen,out,j}$ [kWh] - količina toplote potrebna za pripremu sanitarne tople vode u temperaturnom intervalu j ,

$Q_{H,gen,in,j}$ [kWh] - količina toplote koja se preda za grejanje prostora za zadate radne uslove u temperaturnom intervalu j ,

$Q_{W,gen,in,j}$ [kWh] - količina toplote koja se preda za pripremu sanitarne tople vode za zadate radne uslove u temperaturnom intervalu j ,

$Q_{H,gen,ls,j}$ [kWh] - gubici toplote u okolinu podsistema toplotne pumpe u temperaturnom intervalu j .

III STUDIJA SLUČAJA

1 Ulazni podaci za proračun

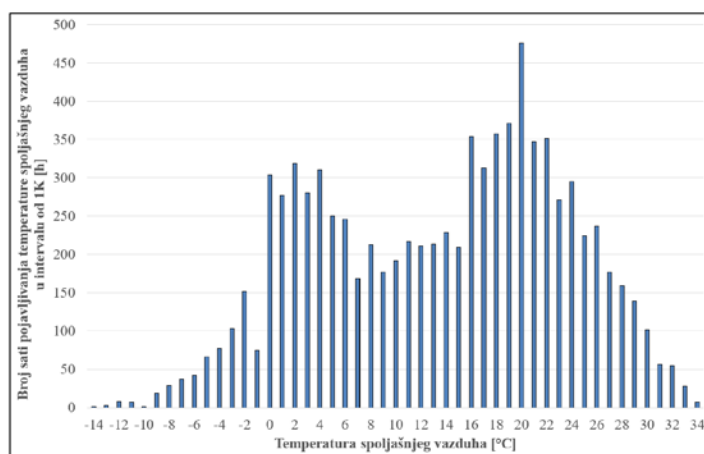
Proračun godišnje potrošnje električne energije za pogon toplotne pumpe prema metodi B predstavljen je na konkretnom primeru objekta Upravne zgrade EPS AD Ogranka „Drinsko-Limske“ HE u Bajinoj Bašti. Objekat se sastoji iz podruma i četiri sprata, pri čemu grejna površina objekta iznosi 2133,44 m². Trenutno snabdevanje energijom za grejanje izvodi se pomoću toplotne podstanice direktnog tipa, povezane na sistem daljinskog grejanja. Grejanje prostorija vrši se pomoću člankastih radijatora, dok se hlađenje u objektu ostvaruje pomoću monosplit sistema. U cilju unapređenja energetske efikasnosti i isplativosti tokom eksploatacije, umesto postojeće toplotne podstanice direktnog tipa predviđena je toplotna pumpa vazduh-voda.

Tabela 1. Prikaz meteoroloških podataka o časovnim temperaturama spoljašnjeg vazduha na osnovu tipične meteorološke godine za Bajinu Baštu

Bin 1K		NB_h _j	NB_h _k	DH _{H,j}	DH _{H,k}	DH _{C,j}	DH _{C,k}
-14	-13	1	1	33	33	0	0
-13	-12	3	4	96	129	0	0
-12	-11	8	12	248	377	0	0
-11	-10	7	19	210	587	0	0
-10	-9	1	20	29	616	0	0
-9	-8	19	39	532	1148	0	0
-8	-7	29	68	783	1931	0	0
-7	-6	37	105	962	2893	0	0
-6	-5	42	147	1050	3943	0	0
-5	-4	66	213	1584	5527	0	0
-4	-3	77	290	1771	7298	0	0
-3	-2	103	393	2266	9564	0	0
-2	-1	152	545	3192	12756	0	0
-1	0	75	620	1500	14256	0	0
0	1	304	924	5776	20032	0	0
1	2	277	1201	4986	25018	0	0
2	3	319	1520	5423	30441	0	0
3	4	280	1800	4480	34921	0	0
4	5	311	2111	4665	39586	0	0
5	6	250	2361	3500	43086	0	0
6	7	246	2607	3198	46284	0	0
7	8	168	2775	2016	48300	0	0
8	9	213	2988	2343	50643	0	0
9	10	177	3165	1770	52413	0	0
10	11	192	3357	1728	54141	0	0
11	12	217	3574	1736	55877	0	0
12	13	211	3785	1477	57354	0	0
13	14	214	3999	1284	58638	0	0
14	15	229	4228	1145	59783	0	0
15	16	209	4437	836	60619	0	0
16	17	354	4791	1062	61681	0	0
17	18	313	5104	626	62307	0	0
18	19	358	5462	358	62665	0	0
19	20	371	5833	0	62665	0	0
20	21	476	6309	0	62665	0	0
21	22	347	6656	0	62665	0	0
22	23	352	7008	0	62665	0	0
23	24	271	7279	0	62665	0	0
24	25	295	7574	0	62665	295	295
25	26	224	7798	0	62665	448	743
26	27	237	8035	0	62665	711	1454
27	28	177	8212	0	62665	708	2162
28	29	159	8371	0	62665	795	2957
29	30	139	8510	0	62665	834	3791
30	31	102	8612	0	62665	714	4505
31	32	56	8668	0	62665	448	4953
32	33	55	8723	0	62665	495	5448
33	34	28	8751	0	62665	280	5728
34	35	9	8760	0	62665	99	5827

U skladu sa projektnim uslovima, prema metodologiji iz standarda SRPS EN 12831 određena je potrebna grejna snaga grejnog sistema od 210 kW, odnosno za letnji period, rashladna snaga rashladnog sistema od 221,1 kW. Za definisanje

temperaturnih intervala potrebnih za proračun godišnje potrošnje električne energije za pogon toplotne pumpe bilo je neophodno izabrati odgovarajuću toplotnu pumpu. Za nadoknadu potreba za grejanjem i hlađenjem usvojene su dve redno povezane toplotne pumpe proizvođača Viessmann (tip: VITOCAL 200-A PRO AWO-AC 204.A128), koje rade u temperaturnom režimu 45/40 °C u sezoni grejanja i 7/12 °C u režimu hlađenja. Iako izabrane toplotne pumpe zadovoljavaju celokupne zahteve u režimu hlađenja, njihova snaga pri projektnoj spoljašnjoj temperaturi vazduha u zimskom periodu iznosi 164 kW. Kako bi se izbeglo predimenzionisanje sistema tokom režima hlađenja, a istovremeno osigurala odgovarajuća grejna snaga u periodu kada toplotni gubici premašuju grejnu snagu toplotnih pumpi, predviđeno je korišćenje električnih grejača ugrađenih u same toplotne pumpe, grejne snage od po 25 kW.



Slika 2. Godišnja učestalost pojavljivanja spoljašnje temperature vazduha za Bajinu Baštu tokom tipične meteorološke godine

Jedan od ulaznih podataka proračuna je učestalost pojave spoljašnje temperature vazduha sa korakom od 1 K [10]. Za određivanje kumulativnog grejnog stepen sata za pojedine temperaturne intervale analizirana je tipična meteorološka godina za Bajnu Baštu [11]. Grafički prikaz godišnje učestalosti pojavljivanja časovnih vrednosti temperatura spoljašnjeg vazduha dat je na Slici 2. Ukupan broj sati u kojima se određena temperatura spoljašnjeg vazduha javlja tokom tipične meteorološke godine, zajedno sa grejnim i rashladnim stepen satima za intervale od 1 K, kao i kumulativnim grejnim i rashladnim stepen satima, prikazani su u Tabeli 1.

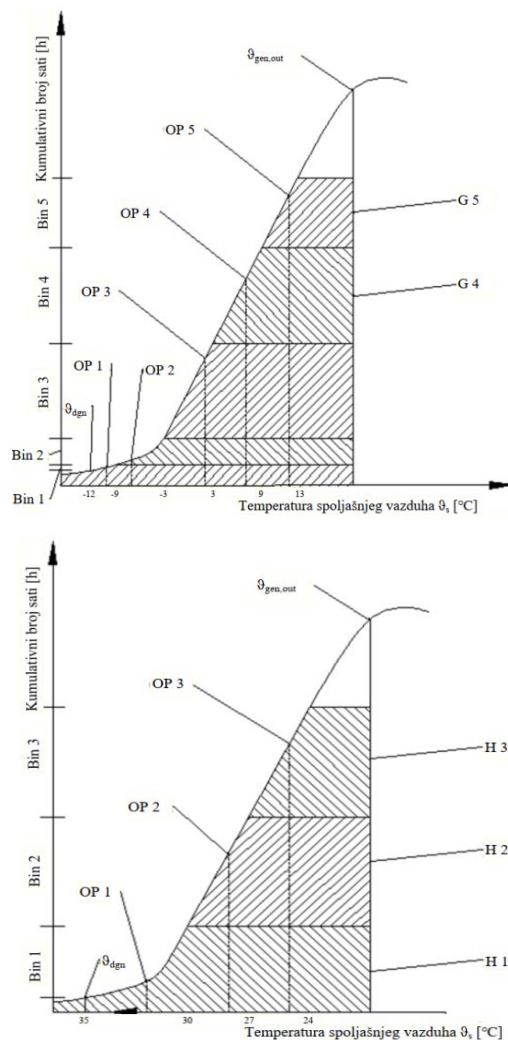
II Definisane temperaturnih segmenata

Radne tačke – temperature izvora toplote, odnosno ponora toplote za koje su poznate vrednosti koeficijenata grejanja (COP), koeficijenata hlađenja (EER), usvojene su na osnovu podataka navedenih u katalogu proizvođača toplotne pumpe. Prema navodima proizvođača, vrednosti ovih koeficijenata grejanja i koeficijenata hlađenja, određen je standardnim metodama.

Na osnovu tabele i dijagrama iz kataloga proizvođača toplotnih pumpi, usvojeno je pet temperaturnih intervala za grejnu sezonu i tri temperaturna intervala za sezonu hlađenja. Temperatura radne tačke svakog intervala postavljena je tako da odgovara vrednostima temperature spoljašnjeg vazduha koje je proizvođač

naveo prilikom određivanja koeficijenta grejanja i grejne snage date toplotne pumpe u režimu grejanja i koeficijenta hlađenja i rashladne snage u režimu hlađenja. U tabeli 2 prikazane su vrednosti grejne i rashladne snage za dve paralelno povezane toplotne pumpe. Gornja i donja granica svakog intervala odabrane su proizvoljno, uz uslov da temperatura radne tačke bude unutar tih granica. Sezona hlađenja definisana je za temperature spoljašnjeg vazduha u temperaturnom intervalu od 24 do 35 °C, dok je granica grejanja usvojena u temperaturnom intervalu od -12 do 12 °C.

Na osnovu temperaturnih intervala prikazanih u prethodnoj tabeli za režim grejanja i hlađenja, konstruisani su dijagrami (Slika 3) koji prikazuju zavisnost kumulativnog broja sati (u kojima toplotna pumpa radi unutar definisanog temperaturnog intervala za zadatu radnu tačku) u funkciji temperature spoljašnjeg vazduha. Uočava se da sa porastom spoljašnje temperature vazduha opada površina ispod krive na gornjem dijagramu, koja predstavlja količinu toplote potrebnu za grejanje objekta u zimskom režimu, dok površina ispod krive na donjem dijagramu, koja predstavlja količinu toplote potrebne za hlađenje objekta, raste (Slika 3).



Slika 3: Prikaz zavisnosti kumulativnog stepena sata od temperature spoljnog vazduha za zimski režim (levo) i za letnji režim (desno)

Tabela 2: Prikaz izabranih temperaturnih segmenata za režim grejanja i režim hlađenja toplotne pumpe

Br. temperaturnog segmenta	Režim grejanja					Režim hlađenja		
	Temp. segment 1	Temp. segment 2	Temp. segment 3	Temp. segment 4	Temp. segment 5	Temp. segment 1	Temp. segment 2	Temp. segment 3
$\theta_{Hlim,j}$ [°C]	-12	-9	-3	3	9	24	27	30
$\theta_{Hlim,j}$ [°C]	-9	-3	3	9	13	27	30	35
Temperatura radne tačke [°C]	-10	-7	2	7	12	25	28	32
COP/EER [-]	2,60	2,75	3,33	3,71	4,20	6,25	5,85	5,31
$\Phi_{gen,j}(\vartheta_{gen,in}, \vartheta_{gen,out})$ [kW]	173,2	184,6	230	260	299	342,8	339,4	332,6

Tabela 3. Pregled ulaznih podataka za proračun parametara toplotne pumpe u režimu grejanja i režimu hlađenja za definisane temperaturne segmente

Br. temp. segment	Režim grejanja					Režim hlađenja		
	Temp. segment 1	Temp. segment 2	Temp. segment 3	Temp. segment 4	Temp. segment 5	Temp. segment 1	Temp. segment 2	Temp. segment 3
DH_j [°Ch]	239	6682	23143	20202	6711	1454	2337	2036
$DH_{tot,j}$ [°Ch]	56977	56977	56977	56977	56977	5827	5827	5827
f_j [-]	0,004	0,12	0,41	0,35	0,12	0,25	0,40	0,35
t_j [h]	16	270	1230	1468	797	756	475	250
$t_{eff,j}$ [h]	11	191	871	1040	565	347	218	115
$Q_{gen,out,j}$ [kWh]	9,7	4712,9	74436,2	77584,3	14001,7	19152,9	19339,9	8888,2

Tabela 4. Pregled izračunatih energija u režimu grejanja i režimu hlađenja toplotne pumpe za definisane temperaturne segmente

Br. temperaturnog segmenta	Režim grejanja					Režim hlađenja		
	Temp. segment 1	Temp. segment 2	Temp. segment 3	Temp. segment 4	Temp. segment 5	Temp. segment 1	Temp. segment 2	Temp. segment 3
COP/EER	2,6	2,75	3,33	3,71	4,2	6,25	5,85	5,31
$Q_{gen,out,j}(\vartheta_{gen,in}, \vartheta_{gen,out})$ [kWh]	9,7	4713	74436	77584	14001	19153	19340	8888
$E_{gen,in,j}(\vartheta_{gen,in}, \vartheta_{gen,out})$ [kWh]	3	1504	22353	20912	3334	3064	3306	1674
$W_{gen,aux,j}$ [kWh]	0,45	226	3353	3137	500	460	496	251
$Q_{gen,in,j} = Q_{gen,ren,in,j}$ [kWh]	3	2012	52083	56672	10668	16089	16034	7214
$Q_{gen,aux,ls,j}$ [kWh]	0,34	170	2515	2353	375	345	372	188
$Q_{gen,aux,ls,rb,j}$ [kWh]	0,10	51	754	706	113	104	112	56
$Q_{gen,ls,k,j}$ [kWh]	0,08	41	744	776	140	192	193	89
$Q_{H,gen,ls,rb,j}$ [kWh]	0,02	12	223	233	42	-	-	-
$Q_{gen,ls,tot,j}$ [kWh]	0,18	92	1499	1482	253	537	565	277
$Q_{H,gen,ls,rb,tot,j}$ [kWh]	0,13	63	978	939	155	-	-	-

III Prikaz proračunskih veličina po definisanim temperaturnim segmentima

U nastavku su, za prethodno definisane temperaturne segmente, prikazani ulazni i izvedeni proračunski parametri za režim grejanja i hlađenja toplotne pumpe. Za posmatrani objekat, u režimu grejanja, vreme prekida rada toplotne pumpe (t_{co}) tokom 24 sata iznosi 7 sati, dok u režimu hlađenja vreme prekida rada toplotne pumpe iznosi 13 sati. Vrednost koeficijenta $f_{gen,aux}$ za Bajinu Bašu i izabranu toplotnu pumpu iznosi 0,15 za sve temperaturne režime. U studiji slučaja ne razmatraju se priprema sanitarne tople vode niti akumulacija toplote u rezervoarima. Zbog ograničenja grejne snage, je neophodan za temperaturne

intervale 1 i 2. U tom slučaju, količina toplote koju rezervni grejač treba da preda u temperaturnim intervalima 1 i 2 iznosi $Q_{gen,bu,out}=621,07$ kWh.

IV REZULTATI

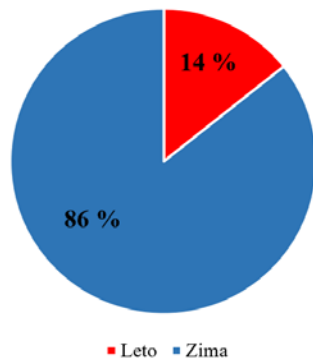
Određivanje ukupne potrošnje energije za rad toplotne pumpe za ukupni temperaturni interval, koji obuhvata energiju potrebnu za pogon toplotne pumpe ($E_{H,gen,in}$), energiju za pogon pomoćnih uređaja ($W_{H,gen,aux}$), energiju koju grejači predaju tokom njihovog rada ($E_{H,gen,bu,in}$), ukupne iskoristive toplote gubitke u podsistemu toplotne pumpe ($Q_{H,gen,ls,rb}$) i količinu toplote preuzetu od toplotnog izvora ($Q_{H,gen,ren,in}$) izračunava se

množenjem energije ili gubitaka za jedan sat sa brojem sati rada toplotne pumpe za definisani temperaturni interval. Sabiranjem vrednosti za svaki temperaturni interval dobijaju se vrednosti potrošnje navedenih vidova energije za čitavu sezonu grejanja i hlađenja.

Ukupne energetske potrebe toplotne pumpe za zimski i letnji režim prikazane su u Tabeli 5 i Tabeli 6.

Tabela 5. Ukupne energetske potrebe toplotne pumpe (zima)

Veličina	Oznaka	Potrošnja
Energija potrebna za pogon toplotne pumpe	$E_{H,gen,in}$	48106 kWh
Ukupni iskoristivi gubici toplote u podsistemu toplotne pumpe	$Q_{H,gen,ls,rbl,tot}$	2134 kWh
Ukupni gubici toplote ka okolini podsistema toplotne pumpe	$Q_{H,gen,ls,tot}$	3325 kWh
Količina toplote preuzeta od toplotnog izvora	$Q_{H,gen,ren,in}$	121438 kWh
Energija potrebna za rad pomoćnih uređaja	$W_{H,gen,aux}$	7216 kWh
Energija potrebna za rad rezervnih grejača	$Q_{gen,bu,out}$	621 kWh
Potrebna grejna snaga grejnog sistema	$Q_{H,gen,out}$	210,4 kW



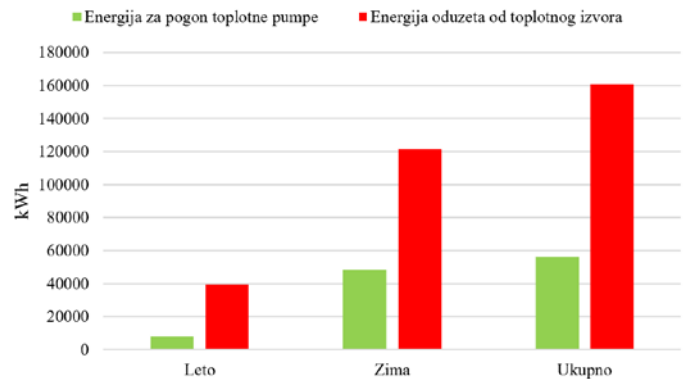
Slika 4. Udeo potrošnje energije za pogon toplotne pumpe tokom zimskog i letnjeg režima rada u ukupnoj energiji potrebnoj za pogon toplotne pumpe tokom cele godine

Tabela 6. Ukupne energetske potrebe toplotne pumpe (letno)

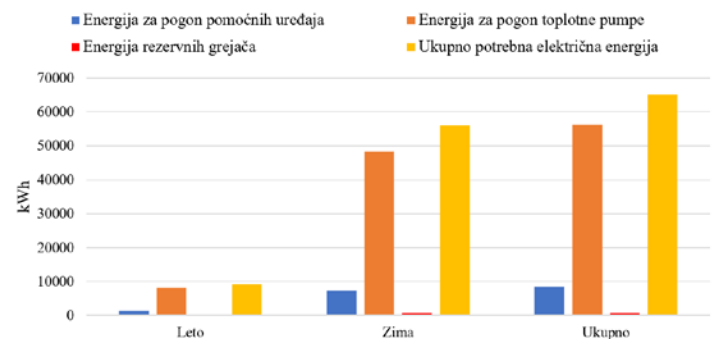
Veličina	Oznaka	Potrošnja
Energija potrebna za pogon toplotne pumpe	$E_{C,gen,in}$	8044 kWh
Ukupni dobici toplote podsistema toplotne pumpe od okoline	$Q_{C,gen,ls,tot}$	1379 kWh
Količina toplote preuzeta od toplotnog izvora	$Q_{C,gen,ren,in}$	39337 kWh
Energija potrebna za rad pomoćnih uređaja	$W_{C,gen,aux}$	1207 kWh
Potrebna rashladna snaga rashladnog sistema	$Q_{C,gen,out}$	221,2 kW

Na Slici 4 je prikazan udeo potrošnje energije za pogon toplotne pumpe tokom zimskog i letnjeg režima rada u ukupnoj energiji potrebnoj za pogon toplotne pumpe tokom cele godine, pri čemu se 86% ukupne energije potrebne za pogon toplotne pumpe odnosi na zimski, a 14% na letnji režim rada. Ovaj odnos je

posledica činjenice da je broj radnih sati toplotne pumpe veći u zimskom nego u letnjem režimu, kao i da je prekid rada objekta duži u letnjem nego u zimskom režimu rada.



Slika 5: Potrošnja energije za pogon i energija oduzeta od strane toplotnog izvora



Slika 6: Ukupno potrebna električna energija (za pogon toplotne pumpe, pomoćnih uređaja i rezervnog grejača)

Tabela 7. Ukupne godišnje energetske potrebe toplotne pumpe

Na Slici 5 i Slici 6 je vizuelno prikazan odnos potrošnje svih relevantnih vrsta energije u letnjem i zimskom režimu, a u Tabeli 7. ukupne godišnje energetske potrebe toplotne pumpe

Veličina	Oznaka	Potrošnja
Energija potrebna za pogon toplotne pumpe	$E_{gen,in}$	56150 kWh
Ukupni iskoristivi gubici toplote u podsistemu toplotne pumpe	$Q_{gen,ls,rbl,tot}$	2134 kWh
Ukupni gubici toplote podsistema toplotne pumpe	$Q_{gen,ls,tot}$	4704 kWh
Količina toplote preuzeta od toplotnog izvora	$Q_{gen,ren,in}$	160775 kWh
Energija potrebna za rad pomoćnih uređaja	$W_{gen,aux}$	8423 kWh
Energija potrebna za rad rezervnih grejača	$Q_{gen,bu,out}$	621 kWh
Proračunata količina toplote u jedinici vremena za nadoknadu gubitaka toplote objekta (toplotni gubici)	$Q_{H,gen,out}$	210,4 kW
Proračunata količina toplote u jedinici vremena, koju je tokom leta potrebno odvesti iz prostorije (toplotno opterećenje)	$Q_{C,gen,out}$	221,2 kW

VI ZAKLJUČAK

U radu su predstavljene teorijske osnove, koncept i metodologija proračuna godišnje potrošnje energije potrebne za pogon toplotne pumpe po tzv. metodi temperaturnih segmenata (eng. bins). Proračun je sproveden na konkretnom primeru objekta Upravne zgrade EPS AD Ogranka „Drinsko-Limske“ HE u Bajinoj Bašti, ali tako da su uzete u obzir samo potrebe grejanja i hlađenja ovog objekta, a ne i priprema sanitarne tople vode.

Kako ova metoda, za razliku od metode stepen dana, po segmentima temperatura uzima u obzir promene koeficijenta grejanja *COP*, odnosno koeficijenta hlađenja *EER*, u zavisnosti od temperature spoljašnjeg vazduha i tokom sezone grejanja i sezone hlađenja, jasno je da ona daje kvalitetnije i preciznije proračune potrošnje energije potrebne za pogon toplotne pumpe.

Pored toga, na osnovu rezultata datog proračuna može se primetiti da je potrebno značajno više električne energije za pogon toplotne pumpe u zimskom u odnosu na letnji režim iz razloga što potrošnja električne energije za pravilno dimenzionisanu toplotnu pumpu najviše zavisi od broja sati u toku sezone (grejanja ili hlađenja). Za ovaj konkretan slučaj potrošnja električne energije je skoro pet puta veća u zimskom režimu u odnosu na letnji režim, usled većeg broja sati rada toplotne pumpe u zimskom režimu, kao i dužeg prekida u radu objekta u zimskom u odnosu na letnji režim.

ZAHVALNICA

Ovde prikazani rezultati su rezultat istraživanja podrzanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS po Ugovoru 451-03-136/2025-03/ 200105 od 04.02.2025. god

LITERATURA

- [1] Ostrovski, N. Toplotne pumpe - mogućnosti i perspektive, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 11, No. 3-4, pp. 25-29, 2009.
- [2] Banjac, M., Kulić, F., Genić, S., Stamenić, M., Čantrak, Đ., Ilić, D., Janković, N., Miliwojević, A., Otović, M., Zlatanović, I., Gvozdenac Urošević, B., Urošević, D., Adžić, V., Josipović, S., Jošić, P., Galić, R., Vasilev, M., Petrović, B., Kovačević, S. *Priručnik za obuku energetskih savetnika*, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, Beograd, 2025.

- [3] Guo, J., Yan, D., Zhang, Q. Data-driven heat pump retrofit analysis in residential buildings, *Applied Energy*, Vol. 370, 123999, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123999>
- [4] Tang, Y., Li, J., Xu, X. Numerical study on carbon emissions and economics of a heat pump & thermal energy storage system, *Energy*, Vol. 302, 131862, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131862>
- [5] Zuberi, M.J.S., Hasanbeigi, A., Morrow, W. Techno-economic evaluation of industrial heat pump applications in US pulp and paper, textile, and automotive industries, *Energy Efficiency* Vol. 16, 19, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12053-023-10089-6>
- [6] Josijević, M., Gordić, D., Vukašinović, V., Nikolić, J., Živković, D. Tehno-ekonomska analiza zamene električnog kotla toplotnom pumpom vazduh-voda za zagrevanje stambenog prostora, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 4, pp. 42-47, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-4.42J>
- [7] SRPS EN 15316-4-2:2017, *Energetske performanse zgrada – Metoda za proračun zahteva energetskog sistema i efikasnosti sistema – Deo 4-2: Sistemi za proizvodnju toplotne za grejanje prostora, sistemi toplotnih pumpi, moduli M3-8-2, M8-8-2*, Institut za standardizaciju Srbije, 2017. https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:56969 [pristupljeno 26.02.2025]
- [8] Petrović, B., Gojak, M. Analytical Assessment of Cooling Degree-Days for Estimating Energy Consumption in Building Sector During Cooling Season in Belgrade, in *Proc. SimTerm 2024*, Niš, Serbia, pp. 188-196, 22-25 October, 2024. <https://doi.org/10.5937/SimTerm24188P>
- [9] Dović, D., Horvat, I., Rodić, A., Soldo, V., Švaić, S. *Algoritam za određivanje energijskih zahteva i učinkovitosti termotehničkih sustava u zgradama; Sustavi grijanja prostora i pripreme potrošne tople vode*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Sveučilište u Zagrebu, 2017.
- [10] Naldi, C., Dongellini, M., Morini, G.-L., Zanchini, E. Comparison between hourly simulation and bin-method for the seasonal performance evaluation of electric air-source heat pumps for heating, in *Proc. Proceedings of BSA 2015, the Second IBPSA-Italy conference on "Building Simulation Applications"*, Bolzano, pp. 252-262, 04-06 February, 2015. https://publications.ibpsa.org/proceedings/bsa/2015/papers/bsa2015_9788860460745_32.pdf [pristupljeno 28.02.2025]
- [11] Photovoltaic Geographical Information System, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html [pristupljeno 03.03.2025]

AUTORI

Branislav Petrović - istraživač pripravnik, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, bpetrovic@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-2429-0642](https://orcid.org/0000-0002-2429-0642)

Marija Vasilev - asistent, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mvasilev@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6156-2451](https://orcid.org/0000-0001-6156-2451)

Miloš Banjac - prof. dr, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mbanjac@mas.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-8659-8581](https://orcid.org/0000-0001-8659-8581)

Calculation of Annual Energy Consumption of a Heat Pump by the Bin-method

Abstract - Heat pumps are electrical devices that transfer thermal energy from the environment into a heated space. Thanks to their ability, compared to electric resistance heaters, to deliver three to six times more thermal energy to the conditioned space, heat pumps represent an unrivaled solution in heating technology in terms of efficiency. When the thermal energy source is outdoor air — as in the case of air-to-air heat pumps — their efficiency directly depends on the temperature of the outdoor air. Therefore, the assessment of the total energy consumption of a heat pump must be based on a methodology that takes into account the variation of this temperature. According to Standard EN 15316, two methods are defined for determining the total energy consumption of a heat pump: the degree-day method and the temperature-bin method. In domestic practice, only the simpler and less accurate degree-day method is used. The temperature-bin method, although more reliable, has remained almost unknown, probably due to the need for hourly outdoor air temperature data.

To present and bring this method closer to engineering practice, the paper describes the theoretical background and outlines the main steps of the method, while its application is demonstrated through a case study of the EPS AD office building in Bajina Bašta. By grouping actual hourly outdoor air temperature data into temperature bins and linking

them with the operating points of the heat pump, while including the operation of auxiliary equipment and backup heaters, the total annual electricity consumption was determined. The obtained consumption of 56,150 kWh of electricity — of which 86% occurs in the heating and 14% in the cooling mode — clearly indicates the dominant influence of winter hours on total energy use.

Index terms - Bin-method, Energy analysis calculation method, Heat pump, Annual energy consumption

Optimalna estimacija električnih parametara netransponovanih vodova korišćenjem sinhrofazorskih merenja

Miljana Todorović*, Zoran Stojanović**

* Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, PowerGrid Engineering d.o.o. Beograd, Srbija

** Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Srbija

Rezime - U radu je predstavljena metoda za estimaciju parametara netransponovanog dalekovoda, koji se može predstaviti zamenskom π -šemom, u realnom vremenu. Za estimaciju parametara je korišćena metoda minimuma ponderisanih kvadrata odstupanja (engl. Weighted Least Square, WLS) koja koristi tri seta sinhronizovanih fazorskih merenja napona i struja na oba kraja dalekovoda, od kojih minimalno jedno merenje sadrži dovoljno nulte komponente napona. Metoda je primenjiva u opštem slučaju - za transponovane i netransponovane dalekovode, simetrično ili nesimetrično opterećene. Primenom predstavljene metode moguće je proračunati vrednosti sopstvenih i međusobnih impedansi, kao i susceptansi. Prelaskom u sistem simetričnih komponenti, izračunavaju se impedanse i susceptanse direktnog, inverznog i nultog redosleda, kao i međusobne impedanse između direktnog, inverznog i nultog redosleda.

Parametri netransponovanog voda su određivani u dva različita slučaja. Merenja napona i struja na oba kraja dalekovoda su generisana u okviru MATLAB Simulink softvera gde su određeni odgovarajući fazori, koji su kasnije bili ulazni podaci za proračun. U prvom idealizovanom slučaju nije uvaženo prisustvo greške merenja, dok je u drugom slučaju modelovana greška merenja u ulaznim podacima. U oba slučaja su primenjene dve metode: prva, koja nepoznate parametre netransponovanog voda estimira na osnovu jednačina za netransponovani dalekovod, i druga, koja nepoznate parametre estimira na osnovu jednačina transponovanog voda.

KLjučne reči - Električni parametri netransponovanog dalekovoda, estimacija, sinhrofazorska merenja, WLS

I UVOD

Proračuni parametara dalekovoda su od velike važnosti za dobijanje preciznijih rezultata različitih programa za analizu elektroenergetskih sistema, ali i što preciznijih podešenja distantnih zaštita dalekovoda. Pre pojave sinhrofazorskih merenja, metode za određivanje parametara dalekovoda su se zasnivale na proračunima koji uvažavaju geometriju stuba, tip provodnika, estimaciju stvarne dužine provodnika i ugiba provodnika, otpornost tla, temperaturu i druge faktore, ili na primarnim merenjima dok je dalekovod van pogona. Sa pojavom metoda estimacije parametara vodova na osnovu sinhrofazorskih merenja na oba kraja dalekovoda u realnom vremenu, pored preciznijih estimacija koje imaju značaj u već navedenim primerima, otvara još niz mogućnosti, kao što su na primer proračun prosečne temperature voda i njegovog ugiba u realnom

vremenu, zatim mogućnost provere i ažuriranja centralne baze podataka o parametrima vodova koja bi pratila modifikacije na dalekovodima - povećanje dužine, zamenu provodnika, ugradnju rednih baterija kondenzatora na vodu i slično, [1], [2].

Iako se u literaturi najčešće spominju metode za određivanje parametara direktnog redosleda transponovanih vodova srednje dužine, svakako su prisutni i radovi koji obrađuju kompleksnije modele dalekovoda. Obrađene su teme estimacije parametara dugačkih dalekovoda, tj. dalekovoda modelovanih zamenskom šemom sa distribuiranim parametrima [3], kao i estimacije parametara netransponovanih vodova modelovanih šemom sa koncentrisanim parametrima [4], [5]. Greške merenja su modelovane ili u vidu Gausovog šuma (gde su kasnije primenjivanje metode minimizacije sume kvadrata odstupanja) ili uz prisustvo „outlier“-a (gde je potom primenjivan M-robustni algoritam).

S obzirom na veću kompleksnost modela za estimaciju parametara netransponovanih vodova u odnosu na modele za estimaciju transponovanih vodova, a i kako su u praksi najčešće potrebne estimacije samo impedansi i susceptansi direktnog, inverznog i nultog redosleda (ne i sve sopstvene i međusobne impedanse, odnosno susceptanse dalekovoda), u radu je izvršeno poređenje rezultata koji se dobijaju primenom oba algoritma u slučaju estimacije parametara netransponovanih vodova. Netransponovani dalekovod čiji se parametri određuju je modelovan pomoću zamenske šeme sa koncentrisanim parametrima. U ulaznim podacima programa, tj. merenim signalima napona i struja na oba kraja dalekovoda su modelovane greške u vidu Gausovog šuma, a primenjena metoda za estimaciju parametara je metoda minimuma sume ponderisanih kvadrata odstupanja.

II SINHROFAZORSKA TEHNOLOGIJA

Sinhrofazorska merenja su precizna, vremenski sinhronizovana merenja električnih veličina elektroenergetskog sistema, dostupna pomoću uređaja koji se nazivaju PMU uređaji (engl. *Phasor Measurement Unit*). PMU uređaj može da bude samostalan uređaj ili funkcija u okviru mikroprocesorskog zaštitnog uređaja. Veličine koje PMU uređaji mogu meriti su sinhronizovani fazori struje i napona, frekvencija i brzina promene frekvencije (engl. *ROCOF*). Fazni ugao sinhrofazorskih merenja je izražen u odnosu na referentni fazor koji je sinhronizovan prema UTC vremenu, čime je omogućeno da merenja sa različitih lokacija budu vremenski sinhronizovana. Za sinhronizaciju se koriste precizni časovnici tačnosti od ± 500 ns,

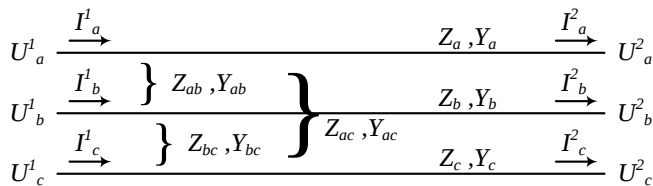
kompatibilni sa standardima koji uređuju oblast sinhronog merenja vremena.

U odnosu na široko primenjenu SCADA tehnologiju za nadzor, tehnologija sinhrofazorskih merenja ima niz prednosti. Prvo, SCADA analogna merenja su dostupna za efektivne vrednosti napona i struja, kao i za vrednosti aktivne i reaktivne snage, dok su sinhrofazorska merenja dostupna za fazore struje i napona, frekvenciju i brzinu promene frekvencije. Sinhrofazorska merenja su daleko veće rezolucije, tipično 10 do 60 snimaka u sekundi u poređenju sa jednim SCADA merenjem na tipično 2 do 4 sekunde. Dodatno, sinhrofazorska merenja imaju vremensku sinhronizaciju i preciznu vremensku referencu korišćenjem standardom definisanog vremena.

U poslednjih desetak godina, sinhrofazorska merenja su sve više u primeni kroz razne aplikacije, kao što su na primer upravljanje elektroenergetskim sistemom na širokom geografskom području (engl. *wide-area control*), validacija modela sistema, određivanje granica stabilnosti, određivanje maksimalnih dozvoljenih opterećenja u sistemu, detekcija ostrvskog rada, snimanje poremećaja u sistemu, u estimaciji stanja u EES-u, i brojne druge. Sinhrofazorska merenja se mogu primeniti i za rešavanje problema estimacije parametara dalekovoda u realnom vremenu, što će biti prikazano u radu.

III MATRICA IMPEDANSI DALEKOVODA

Model trofaznog dalekovoda sa označenim sopstvenim i međusobnim impedansama je prikazan na slici 1.



Slika 1. Model trofaznog dalekovoda

Električni parametri dalekovoda su definisani pomoću matrice rednih impedansi ($\underline{Z} = R + jX$) i matrice otočnih admitansi ($\underline{Y} = jB$):

$$\underline{Z} = \begin{bmatrix} Z_a & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_b & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_c \end{bmatrix}, \quad \underline{Y} = \begin{bmatrix} Y_a & Y_{ab} & Y_{ac} \\ Y_{ab} & Y_b & Y_{bc} \\ Y_{ac} & Y_{bc} & Y_c \end{bmatrix}$$

Za konverziju fazora napona i struja iz „abc“ sistema u sistem simetričnih komponenti, i obrnuto, koristi se Fortescue-ova matrica. Ako je kompleksni operator $\underline{a} = (-1/2 + j\sqrt{3}/2)$, Fortescue-ova matrica i njena inverzna su sledećeg oblika:

$$\underline{F} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \end{bmatrix}, \quad \underline{F}^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \underline{a} & \underline{a}^2 \\ 1 & \underline{a}^2 & \underline{a} \end{bmatrix}$$

Između faznih veličina u „abc“ sistemu i veličina u sistemu simetričnog redosleda, važi da je:

$$\underline{U}_{abc} = \underline{F} \cdot \underline{U}_{0di}, \quad \underline{I}_{abc} = \underline{F} \cdot \underline{I}_{0di}$$

Matrica impedansi u simetričnom sistemu izračunava iz

prethodno definisanih matrica, na sledeći način, [6].

$$\underline{Z}_{sym} = \underline{F}^{-1} \cdot \underline{Z} \cdot \underline{F} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_0 & \underline{Z}_{0d} & \underline{Z}_{0i} \\ \underline{Z}_{d0} & \underline{Z}_d & \underline{Z}_{di} \\ \underline{Z}_{i0} & \underline{Z}_{id} & \underline{Z}_i \end{bmatrix}$$

U opštem slučaju, postoji veza između komponenti direktnog, inverznog i nultog redosleda.

Ukoliko je vod transponovan, sve međusobne impedanse su jednake. Ako sopstvene i međusobne impedanse označimo sa $\underline{Z}_s = \underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$ i $\underline{Z}_m = \underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{ca}$, dobija se deкуплована matrica simetričnih komponenti transponovanog voda:

$$\underline{Z}_{sym} = \begin{bmatrix} \underline{Z}_s + 2\underline{Z}_m & 0 & 0 \\ 0 & \underline{Z}_s - \underline{Z}_m & 0 \\ 0 & 0 & \underline{Z}_s - \underline{Z}_m \end{bmatrix},$$

gde je $\underline{Z}_0 = \underline{Z}_s + 2\underline{Z}_m$, $\underline{Z}_d = \underline{Z}_s - \underline{Z}_m$ i $\underline{Z}_i = \underline{Z}_s - \underline{Z}_m$. U tom slučaju se impedanse nultog, direktnog i inverznog redosleda mogu određivati samo na osnovu napona i struja nultog, direktnog i inverznog redosleda, respektivno.

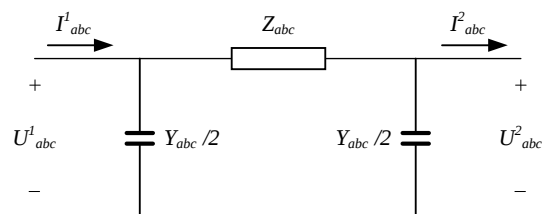
IV MODEL VODA

Nadzemni vodovi se mogu klasifikovati na osnovu dužine kao kratki vodovi, vodovi srednje dužine i dugački vodovi. Za kratke vodove otočne kapacitivnosti su zanemarljive i vodovi se mogu aproksimirati samo rednom impedansom. Vodove srednje dužine je moguće modelovati zamenskom π -šemom (model sa koncentrisanim parametrima), dok se za dugačke dalekovode primenjuju modeli sa raspodeljenim parametrima.

U radu su razvijena dva algoritma za proračun parametara dalekovoda, od kojih jedan koristi model netransponovanog voda, dok drugi koristi model transponovanog voda (kod koga su sistemi nultog, direktnog i inverznog redosleda deкупловани). Razvijeni algoritmi koriste π -šemu za modelovanje dalekovoda, te se stoga mogu primenjivati za slučaj kratkih i vodova srednje dužine. Zamenska π -šema voda se formira tako da redna grana predstavlja impedansu voda, dok se otočna grana, koja predstavlja admitansu voda, kao koncentrisani parametar u π -šemi voda deli na dve polovine, kao što je prikazano na slikama 2 i 3.

A Model netransponovanog voda

Zamenska šema netransponovanog voda srednje dužine je prikazana na slici 2.



Slika 2. Zamenska π -šema netransponovanog voda

Primenom Kirhofovih zakona, dolazi se do jednačina matrica impedansi i matrica admitansi voda na osnovu napona i struja na početku i kraju voda:

$$\underline{U}_{abc}^1 - \underline{U}_{abc}^2 = \underline{Z}_{abc} \cdot \left(\underline{I}_{abc}^1 - \frac{1}{2} \cdot \underline{Y}_{abc} \cdot \underline{U}_{abc}^1 \right)$$

$$\underline{I}_{abc}^1 - \underline{I}_{abc}^2 = \frac{1}{2} \cdot \underline{Y}_{abc} \cdot (\underline{U}_{abc}^1 + \underline{U}_{abc}^2)$$

Kako bi se problem rešavao primenom linearne metode optimizacije, prva jednačina se definiše u sledećem obliku:

$$\underline{y}_p \cdot (\underline{U}_{abc}^1 - \underline{U}_{abc}^2) = \underline{I}_{abc}^1 - \frac{1}{2} \cdot \underline{Y}_{abc} \cdot \underline{U}_{abc}^1,$$

$$\text{gde je } \underline{y}_p = \underline{Z}_{abc}^{-1} = \begin{bmatrix} \underline{y}_a & \underline{y}_{ab} & \underline{y}_{ac} \\ \underline{y}_{ab} & \underline{y}_b & \underline{y}_{bc} \\ \underline{y}_{ac} & \underline{y}_{bc} & \underline{y}_c \end{bmatrix}.$$

U matričnom formatu, jednačine su sledećeg oblika:

$$\begin{bmatrix} \underline{y}_a & \underline{y}_{ab} & \underline{y}_{ac} \\ \underline{y}_{ab} & \underline{y}_b & \underline{y}_{bc} \\ \underline{y}_{ac} & \underline{y}_{bc} & \underline{y}_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{U}_a^1 - \underline{U}_a^2 \\ \underline{U}_b^1 - \underline{U}_b^2 \\ \underline{U}_c^1 - \underline{U}_c^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{I}_a^1 \\ \underline{I}_b^1 \\ \underline{I}_c^1 \end{bmatrix} - j \frac{1}{2} \begin{bmatrix} B_a & B_{ab} & B_{ac} \\ B_{ab} & B_b & B_{bc} \\ B_{ac} & B_{bc} & B_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_a^1 \\ \underline{U}_b^1 \\ \underline{U}_c^1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{U}_a^1 - \underline{U}_a^2 \\ \underline{U}_b^1 - \underline{U}_b^2 \\ \underline{U}_c^1 - \underline{U}_c^2 \end{bmatrix} = -j \frac{1}{2} \begin{bmatrix} B_a & B_{ab} & B_{ac} \\ B_{ab} & B_b & B_{bc} \\ B_{ac} & B_{bc} & B_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{U}_a^1 \\ \underline{U}_b^1 \\ \underline{U}_c^1 \end{bmatrix}$$

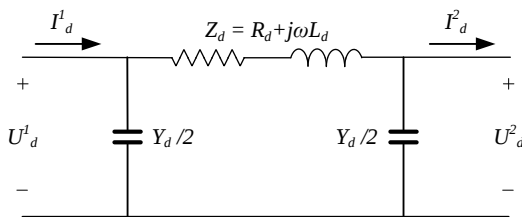
Daljim razvojem navedenih jednačina u matričnoj formi, izvodi se 6 jednačina u kompleksnom domenu, odnosno 12 jednačina nakon izdvajanja realnih i imaginarnih delova.

Nepoznate veličine su elementi matrice impedansi $\underline{Z}_{abc}$, kao i matrice susceptansi $\underline{B}_{abc}$. Kako su vandijagonalni elementi pomenutih matrica simetrični, broj nepoznatih veličina je 18.

B Model transponovanog voda

Osnovna razlika modelovanja transponovanog voda u odnosu na netransponovani, jeste mogućnost da se formiraju tri nezavisne zamenske šeme, za sisteme nultog, direktnog i inverznog redosleda.

Na slici 3 je data zamenska šema transponovanog voda za sistem direktnog redosleda.



Slika 3. Zamenska π -šema transponovanog voda za sistem direktnog redosleda

Primenom Kirhofovih zakona, dolazi se do jednačina za računanje impedanse i admitanse voda na osnovu napona i struja direktnog redosleda na početku i kraju voda:

$$\underline{U}_d^1 - \underline{U}_d^2 = \underline{Z}_d \cdot \left(\underline{I}_d^1 - \frac{1}{2} \cdot \underline{Y}_d \cdot \underline{U}_d^1 \right)$$

$$\underline{I}_d^1 - \underline{I}_d^2 = \frac{1}{2} \cdot \underline{Y}_d \cdot (\underline{U}_d^1 + \underline{U}_d^2)$$

Broj nepoznatih parametara u ovom slučaju je tri - $Re\{\underline{Z}_d\}$, $Im\{\underline{Z}_d\}$, $Im\{\underline{Y}_d\}$, dok se na osnovu prethodne dve jednačine u kompleksnom domenu izvode četiri jednačine izdvajanjem realnih i imaginarnih delova. Za određivanje parametara nultog redosleda, postupak je analogan prethodno definisanom.

V METODA MINIMUMA PONDERISANIH KVADRATA ODSTUPANJA ZA LINEARNI SLUČAJ

Za rešavanje sistema gde je broj jednačina veći od broja nepoznatih, koristi se neka od optimizacionih metoda. Generalno, definisani problem estimacije parametara voda se formuliše kao predefinisani sistem linearnih jednačina, [7]:

$$\underline{b} = \underline{H} \cdot \underline{x}$$

gde su:

$\underline{b}$ - poznati vektor, dimenzije $m \times 1$,

$\underline{H}$ - poznata matrica, dimenzije $m \times n$,

$\underline{x}$ - vektor nepoznatih, dimenzije $n \times 1$, $m > n$.

U opštem slučaju, predefinisani sistem jednačina nema rešenje, tj. ne postoji vektor $\underline{x}$ koji tačno ispunjava zadati sistem jednačina. Iz tog razloga se uvodi rezidualni vektor:

$$\underline{r} = \underline{H} \cdot \underline{x} - \underline{b}$$

i izračunava rešenje $\underline{x}$ koje na neki način minimizira vektor reziduala. Vektor reziduala predstavlja greške merenja uređaja za merenje.

Kako bi se rešio ovaj problem, u praksi se primenjuje više pristupa, a jedan od najzastupljenijih je metoda minimuma sume ponderisanih kvadrata odstupanja (engl. Weighted Least Square, WLS), koja će biti korišćena u radu. Rešenje datog predefinisanih sistema jednačina $\underline{x}$, metodom minimuma sume ponderisanih kvadrata odstupanja, minimizira sumu ponderisanih kvadrata komponenti rezidualnog vektora $\underline{r}$. Matematički, ovo se iskazuje pomoću sledeće jednačine:

$$\text{Minimize } \underline{J} = \sum_{i=1}^m w_i r_i^2 = \underline{r}^T \underline{W} \underline{r}$$

gde su:

w_i - težinski faktor reziduala r_i ,

$\underline{W}$ - dijagonalna matrica (elementi glavne dijagonale su w_i).

Težinski faktori reziduala se uvode kako bi se uvažile razlike između merenja sa većom i merenja sa manjom tačnošću. Težinski faktori se definišu kao recipročne vrednosti varijanse greške merenja.

Koristeći jednačine linearnog modela, problem estimacije stanja se definiše na sledeći način:

$$\text{Minimize } \underline{J} = [\underline{H} \cdot \underline{x} - \underline{b}]^T \underline{W} [\underline{H} \cdot \underline{x} - \underline{b}]$$

Vektor nepoznatih $\underline{x}$ se dobija na osnovu rešenja sledeće jednačine, $d \underline{J} / d \underline{x} = 0$:

$$\underline{x} = (\underline{H}^T \underline{W} \underline{H})^{-1} \underline{H}^T \underline{W} \underline{b}$$

VI PROGRAM ZA ESTIMACIJU PARAMETARA DALEKOVODA

Program za estimaciju parametara dalekovoda je razvijen u Matlab softverskom paketu, dok je za generisanje ulaznih podataka koji predstavljaju sinhrofazorska merenja napona i struja sa obe strane dalekovoda korišćen Matlab Simulink. Za model dalekovoda je iskorišćen blok trofaznog netransponovanog voda, parametara datih u Tabeli 1.

U okviru programa za estimaciju parametara dalekovoda su razvijene dve funkcije - jedna koja problem estimacije parametara vodova rešava na osnovu jednačina netransponovanog voda (Metoda 1), i druga koja problem estimacije parametara vodova rešava na osnovu jednačina transponovanog voda, tj. raspregnutih jednačina za sisteme nultog, direktnog i inverznog redosleda (Metoda 2). Rezultati koji se dobijaju na osnovu ove dve metode su upoređeni na primeru estimacije parametara netransponovanog voda.

A Program za estimaciju parametara netransponovanih vodova (Metoda 1)

Za izradu programa za estimaciju parametara netransponovanih vodova, korišćene su jednačine sistema modela sa slike 2, a koje se mogu napisati u sledećoj formi:

$$\begin{aligned} \underline{y}_a \cdot \Delta \underline{U}_a + \underline{y}_{ab} \cdot \Delta \underline{U}_b + \underline{y}_{ac} \cdot \Delta \underline{U}_c &= \underline{I}_a - j \frac{1}{2} \cdot (B_a \cdot \underline{U}_a^1 + B_{ab} \cdot \underline{U}_b^1 + B_{ac} \cdot \underline{U}_c^1) \\ \underline{y}_{ab} \cdot \Delta \underline{U}_a + \underline{y}_b \cdot \Delta \underline{U}_b + \underline{y}_{bc} \cdot \Delta \underline{U}_c &= \underline{I}_b - j \frac{1}{2} \cdot (B_{ab} \cdot \underline{U}_a^1 + B_b \cdot \underline{U}_b^1 + B_{bc} \cdot \underline{U}_c^1) \\ \underline{y}_{ac} \cdot \Delta \underline{U}_a + \underline{y}_{bc} \cdot \Delta \underline{U}_b + \underline{y}_c \cdot \Delta \underline{U}_c &= \underline{I}_c - j \frac{1}{2} \cdot (B_{ac} \cdot \underline{U}_a^1 + B_{bc} \cdot \underline{U}_b^1 + B_c \cdot \underline{U}_c^1) \\ \Delta \underline{I}_a &= -j \frac{1}{2} \cdot (B_a \cdot \underline{U}_a^1 + B_{ab} \cdot \underline{U}_b^1 + B_{ac} \cdot \underline{U}_c^1) \\ \Delta \underline{I}_b &= -j \frac{1}{2} \cdot (B_{ab} \cdot \underline{U}_a^1 + B_b \cdot \underline{U}_b^1 + B_{bc} \cdot \underline{U}_c^1) \\ \Delta \underline{I}_c &= -j \frac{1}{2} \cdot (B_{ac} \cdot \underline{U}_a^1 + B_{bc} \cdot \underline{U}_b^1 + B_c \cdot \underline{U}_c^1), \end{aligned}$$

gde su $\Delta \underline{U}_x = \underline{U}_x^1 - \underline{U}_x^2$, i $\Delta \underline{I}_x = \underline{I}_x^1 - \underline{I}_x^2$, $x = a, b, c$.

Fazori napona i struja su poznata merenja. Ako je N broj merenja, merenih veličina ima $24N$ (za svaki fazor se razdvajaju merenja amplitude i ugla).

Vektor nepoznatih X se definiše na sledeći način:

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad x_{18}]$$

gde su:

$$x_1, x_1, \dots, x_{12} - \text{elementi matrice } \underline{\mathbf{y}}_p = \underline{\mathbf{Z}}_{abc}^{-1} = \begin{bmatrix} \underline{y}_a & \underline{y}_{ab} & \underline{y}_{ac} \\ \underline{y}_{ab} & \underline{y}_b & \underline{y}_{bc} \\ \underline{y}_{ac} & \underline{y}_{bc} & \underline{y}_c \end{bmatrix},$$

$$\underline{\mathbf{y}}_p = \begin{bmatrix} x_1 + jx_2 & x_7 + jx_8 & x_{11} + jx_{12} \\ x_7 + jx_8 & x_3 + jx_4 & x_9 + jx_{10} \\ x_{11} + jx_{12} & x_9 + jx_{10} & x_5 + jx_6 \end{bmatrix},$$

$$x_{13}, x_{14}, \dots, x_{18} - \text{elementi matrice } \mathbf{B}_{abc} = \begin{bmatrix} x_{13} & x_{16} & x_{18} \\ x_{16} & x_{14} & x_{17} \\ x_{18} & x_{17} & x_{15} \end{bmatrix}.$$

Razdvajanjem članova u jednačini na realne i imaginarne delove, dobija se $12N$ jednačina sistema, prikazanih u Dodatku. Za rešavanje definisanog sistema $12N$ linearnih jednačina sa 18 nepoznatih je korišćena prethodno opisana metoda minimizacije sume ponderisanih kvadrata odstupanja.

B Program za estimaciju parametara transponovanih vodova (Metoda 2)

Za izradu programa za estimaciju parametara transponovanih vodova, korišćene su jednačine sistema modela sa slike 3, a koje se mogu napisati u kompleksnom domenu u sledećoj formi:

$$\begin{aligned} \underline{y}_d \cdot \Delta \underline{U}_d &= \underline{I}_d^1 - j \frac{1}{2} \cdot B_d \cdot \underline{U}_d^1 \\ \Delta \underline{I}_d &= -j \frac{1}{2} \cdot B_d \cdot \underline{U}_d^1 \end{aligned}$$

gde su $\Delta \underline{U}_d = \underline{U}_d^1 - \underline{U}_d^2$, i $\Delta \underline{I}_d = \underline{I}_d^1 - \underline{I}_d^2$, a $\underline{y}_d = \underline{Z}_d^{-1}$.

U sistemu nultog redosleda, jednačine se zadaju analogno, tj.:

$$\begin{aligned} \underline{y}_0 \cdot \Delta \underline{U}_0 &= \underline{I}_0^1 - j \frac{1}{2} \cdot B_0 \cdot \underline{U}_0^1 \\ \Delta \underline{I}_0 &= -j \frac{1}{2} \cdot B_0 \cdot \underline{U}_0^1 \end{aligned}$$

gde su $\Delta \underline{U}_0 = \underline{U}_0^1 - \underline{U}_0^2$, i $\Delta \underline{I}_0 = \underline{I}_0^1 - \underline{I}_0^2$, a $\underline{y}_0 = \underline{Z}_0^{-1}$.

Fazori napona i struja u „abc“ sistemu su poznata merenja, iz kojih se primenom Fortescue-ove transformacije izračunavaju naponi i struje direktnog, inverznog i nultog redosleda na oba kraja dalekovoda. Kako su sistemi nultog, direktnog i inverznog redosleda raspregnuti za slučaj transponovanog voda, to su program za proračun parametara nultog i program za proračun parametara direktnog redosleda dalekovoda nezavisni. Za svaki od programa, broj merenih veličina je $8N$ (za svaki fazor se razdvajaju merenja amplitude i ugla), ako je N broj merenja.

Vektor nepoznatih $\mathbf{x}$ u programu za proračun parametara dalekovoda direktnog redosleda se definiše na sledeći način:

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]$$

gde su:

$$\begin{aligned} x_1 + jx_2 &= \underline{y}_d = \underline{Z}_d^{-1} \\ x_3 &= B_d \end{aligned}$$

U slučaju proračuna parametara dalekovoda nultog redosleda, vektor nepoznatih $\mathbf{x}$ se definiše na sledeći način:

$$\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]$$

gde su:

$$\begin{aligned} x_1 + jx_2 &= \underline{y}_0 = \underline{Z}_0^{-1} \\ x_3 &= B_0 \end{aligned}$$

Razdvajanjem članova u gore navedenim jednačinama na realne i imaginarne delove, dobija se $4N$ jednačina sistema:

$$\begin{aligned} \text{Re}(\underline{I}_d^1) &= x_1 \cdot \text{Re}(\Delta \underline{U}_d) - x_2 \cdot \text{Im}(\Delta \underline{U}_d) - \frac{1}{2} \cdot x_3 \cdot \text{Im}(\underline{U}_d^1) \\ \text{Re}(\Delta \underline{I}_d) &= -\frac{1}{2} \cdot x_3 \cdot \text{Im}(\underline{U}_d^1 + \underline{U}_d^2) \\ \text{Im}(\underline{I}_d^1) &= x_1 \cdot \text{Im}(\Delta \underline{U}_d) + x_2 \cdot \text{Re}(\Delta \underline{U}_d) + \frac{1}{2} \cdot x_3 \cdot \text{Re}(\underline{U}_d^1) \\ \text{Im}(\Delta \underline{I}_d) &= \frac{1}{2} \cdot x_3 \cdot \text{Re}(\underline{U}_d^1 + \underline{U}_d^2) \end{aligned}$$

U ovom slučaju je metoda minimizacije sume ponderisanih kvadrata odstupanja korišćena za rešavanje definisanog sistema od $4N$ linearnih jednačina sa 3 nepoznata parametra.

Gore navedene formule se zadaju analogno i za sistem nultog redosleda.

VII REZULTATI

U radu su razmatrana dva slučaja estimacije parametara netransponovanog voda, gde u prvom slučaju (slučaj A) nije uvažena greška merenja fazora, za razliku od drugog slučaja (slučaj B) gde je modelovana i greška uređaja za merenje

sinhrofazora. Prvi slučaj je upotrebljen kako bi se verifikovao rad programa koji koristi jednačine za netransponovani dalekovod (Metoda 1), ali i odredile greške programa koji koristi jednačine za transponovani dalekovod (Metoda 2) u estimaciji parametara netransponovanog dalekovoda. Na ovaj način se mogu izdvojiti greške u estimaciji primenom druge metode koje su dominantno posledica primene uprošćenog modela.

U drugom slučaju je modelovana i greška uređaja za sinhrofazorska merenja, a potom su takođe upoređeni rezultati estimacije koji se dobijaju primenom Metode 1 i Metode 2. Urađen je veći broj simulacija, kako bi se dobili okviri u kojima se nalaze estimirane vrednosti parametara, a postupak je ponovljen za različite dužine dalekovoda.

A Slučaj A - nije uvažena greška merenja

Kao što je navedeno, u prvom slučaju nije razmatrano prisustvo greške merenja, a primer je poslužio da bi se uporedile greške estimacije parametara pomoću dve prethodno opisane metode. Estimacije su urađene na osnovu tri seta merenja, pri čemu je u

svakom setu merenja bilo prisutno nesimetrično opterećenje po fazama. Dodatno, u jednom merenju je simuliran zemljospoj u mreži što za posledicu ima prisustvo nultog napona u jednom od merenja. Kvar nije simuliran na dalekovodu, jer se, generalno u praksi, mogu iskoristiti i merenja koja odgovaraju trenutku kada se npr. na nekom od susednih dalekovoda desio kvar.

Rezultati estimacije parametara netransponovanog dalekovoda primenom prve i druge metode, dati su u Tabeli 1. Kako se model za transponovani vod bazira na pretpostavci simetričnog modela sistema, koji omogućava raspredanje jednačina direktnog, inverznog i nultog sistema, očekivano se beleže greške u estimaciji impedanse i susceptanse kako direktnog tako i nultog redosleda. Apsolutne greške estimacije parametara direktnog i nultog redosleda netransponovanog dalekovoda prvom metodom su ispod 1%, dok se u slučaju primene druge metode beleže značajnije greške, i preko 10%. S obzirom da je zanemarena greška merenja, ova odstupanja u estimaciji parametara prilikom primene Metode 2 su dominantno posledica primene modela koji zanemaruje činjenicu da je vod netransponovan.

Tabela 1. Estimacija parametara netransponovanog voda metodom 1 i metodom 2 za vod dužine 100 km bez uvažene greške merenja

Veličina	Zadati parametar	Metoda 1		Metoda 2	
		Estimirani parametar	Relativna greška [%]	Estimirani parametar	Relativna greška [%]
$R_0 (\Omega)$	23,0724	22,8891	0,79	26,0533	12,92
$R_1 (\Omega)$	6,0959	6,0884	0,12	5,9107	3,04
$X_0 (\Omega)$	131,0672	130,6972	0,28	128,8177	1,72
$X_1 (\Omega)$	39,7632	39,6899	0,18	39,5448	0,55
$B_0 (\mu S)$	158,7931	159,0001	0,13	158,5785	0,14
$B_1 (\mu S)$	288,4368	288,7246	0,10	296,6907	2,86
$R_a (\Omega)$	11,8283	11,8140	0,12	/	/
$R_b (\Omega)$	11,6821	11,2670	3,55	/	/
$R_c (\Omega)$	11,7538	11,9849	1,97	/	/
$R_{ab} (\Omega)$	5,6584	5,3408	5,61	/	/
$R_{ac} (\Omega)$	5,6954	5,6929	0,04	/	/
$R_{bc} (\Omega)$	5,6228	5,7671	2,57	/	/
$L_a (mH)$	223,2297	222,7835	0,20	/	/
$L_b (mH)$	223,6642	223,2638	0,18	/	/
$L_c (mH)$	223,4466	222,6485	0,36	/	/
$L_{ab} (mH)$	87,6457	87,3879	0,29	/	/
$L_{ac} (mH)$	101,3835	100,8962	0,48	/	/
$L_{bc} (mH)$	101,6006	101,4011	0,20	/	/
$C_a (\mu F)$	0,7985	0,7987	0,02	/	/
$C_b (\mu F)$	0,7716	0,7726	0,13	/	/
$C_c (\mu F)$	0,7716	0,7729	0,17	/	/
$C_{ab} (\mu F)$	-0,1176	-0,1174	0,18	/	/
$C_{ac} (\mu F)$	-0,1176	-0,1174	0,21	/	/
$C_{bc} (\mu F)$	-0,1774	-0,1781	0,40	/	/

* $Z_1 = Z_2$, $B_1 = B_2$

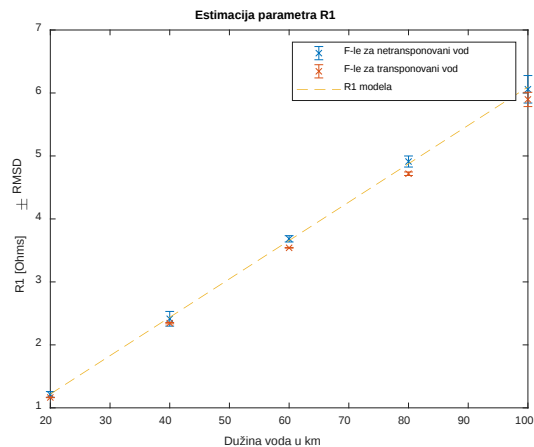
A Slučaj B - modelovana greška merenja

U drugom slučaju su vrednosti fazora napona i struja dobijene iz simulacija normalizovane, a potom su na vrednosti ovih fazora dodavane greške u vidu Gausovog belog šuma, srednje vrednosti 0 i varijanse $(0,001)^2$. Ovako formirana merenja su korišćena kao ulazni podaci u programe za estimaciju parametara dalekovoda. Svaki set estimacije parametara je dobijen na osnovu merenja iz tri različita radna režima, koja su definisana različitim zadatim profilima aktivne i reaktivne

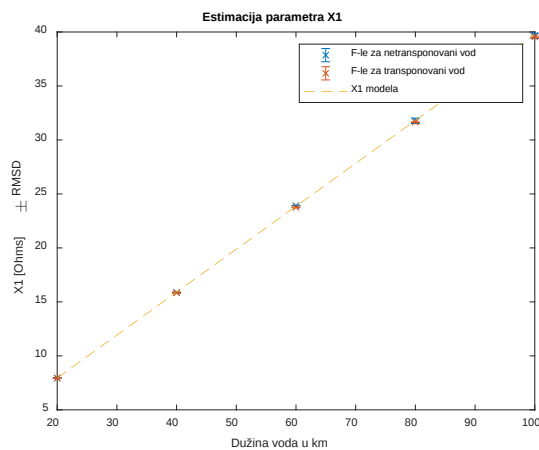
potrošnje. Opterećenja su zadata nesimetrično po fazama, a u makar jednom merenju je prisutna i nulta komponenta napona.

Dodatno, analizirana je estimacija parametara dalekovoda različitih dužina, i to dužina od 20, 40, 60, 80 i 100 km. Za svaku zadatu dužinu dalekovoda, urađeno je 20 puta po 3 simulacije različitih pogonskih uslova, kako bi se dobilo 20 različitih estimacija za svaki nepoznati parametar primenom Metode 1 i primenom Metode 2. Zatim je određena srednja vrednost estimacije parametara, kao i koren srednje vrednosti

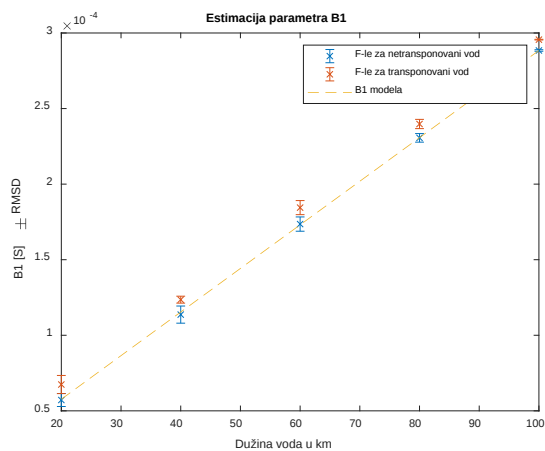
kvadrata odstupanja za svaki od parametara (engl. *Root Mean Square Error Deviation, RMSD*), a rezultati dobijeni na taj način su prikazani na slikama 4 do 9. Uz rezultate programa za estimaciju, na slikama je isprekidanom linijom prikazana i zadata vrednost parametara u modelu.



Slika 4. Estimacija otpornosti dalekovoda direktnog redosleda

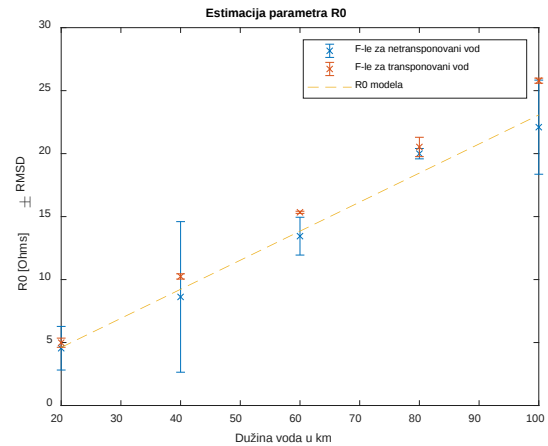


Slika 5. Estimacija reaktanse dalekovoda direktnog redosleda

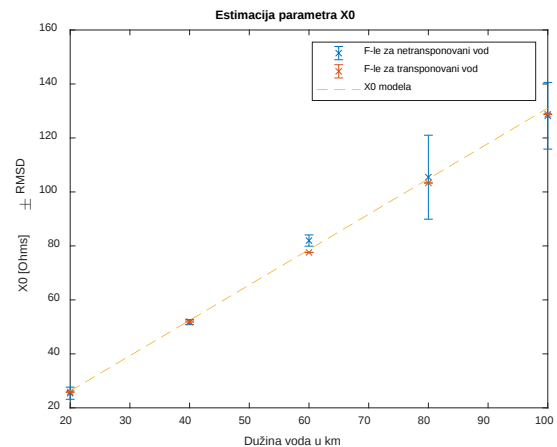


Slika 6. Estimacija susceptanse dalekovoda direktnog redosleda

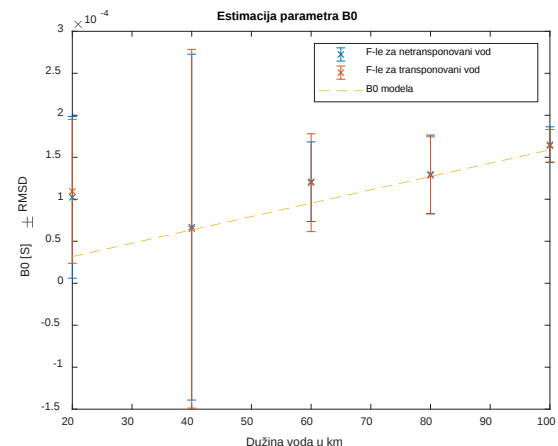
Na slikama od 4 do 6 su prikazane estimacije parametara direktnog redosleda, i to redom otpornosti, reaktanse i susceptanse dalekovoda. Na osnovu prikazanih rezultata, može se uočiti prednost primene algoritma koji uvažava nesimetričnost vodova, jer su estimacije tačnije, a i varijacije u estimacijama slične ili manje.



Slika 7. Estimacija otpornosti dalekovoda nultog redosleda



Slika 8. Estimacija reaktanse dalekovoda nultog redosleda



Slika 9. Estimacija susceptanse dalekovoda direktnog redosleda

Na slikama od 7 do 9 su prikazane estimacije otpornosti, reaktanse i susceptanse dalekovoda nultog redosleda. Sa slike 9 se može videti da oba algoritma daju nepouzdanu estimaciju susceptanse nultog redosleda. Prilikom određivanja otpornosti i reaktanse nultog redosleda, uočava se da je algoritam koji koristi jednačine za netransponovani vod mnogo osetljiviji na prisustvo greški u ulaznim podacima, tj. mnogo je veći opseg u kome se može naći estimirana vrednost. Osetljivost je izraženija kod estimacije otpornosti nultog redosleda, jer je otpornost gotovo za red veličine manja od induktivnosti.

Dakle, na osnovu urađenih simulacija, pokazalo se da se primenom Metode 1 dobijaju tačniji rezultati u slučaju procene parametara direktnog redosleda dalekovoda, dok se primenom Metode 2 dobijaju pouzdanije estimacije u proceni parametara nultog redosleda. To dalje dovodi do zaključka da je za estimaciju parametara netransponovanog dalekovoda najbolje koristiti kombinaciju ove dve metode, na način da se za estimaciju parametara dalekovoda direktnog redosleda koristi metoda koja uvažava nesimetričnost vodova, a da se za estimaciju parametara dalekovoda nultog redosleda koristi metoda koja ne uvažava nesimetričnost vodova jer se pokazalo da je robusnija na prisustvo greški u merenjima.

VIII ZAKLJUČAK

U radu su predstavljena dva algoritma za proračun parametara dalekovoda, od kojih je jedan zasnovan na jednačinama

netransponovanog dalekovoda (Metoda 1), dok je drugi zasnovan na jednačinama transponovanog dalekovoda (Metoda 2). Oba algoritma su primenjena na primeru estimacije parametara netransponovanog voda, a rezultati su pokazali da se primenom Metode 1 dobijaju tačnije estimacije parametara dalekovoda direktnog redosleda, dok se primenom Metode 2 dobijaju stabilnije estimacije (sa manje varijacija) prilikom estimacija parametara nultog redosleda. Stoga je predlog da se za estimaciju parametara netransponovanog dalekovoda koristi kombinacija oba algoritma, i to prvog (koji uvažava nesimetriju dalekovoda) za estimaciju parametara direktnog redosleda, a drugog (robusnijeg, koji ne uvažava nesimetriju dalekovoda) za estimaciju parametara dalekovoda nultog redosleda.

S obzirom na uočenu osetljivost algoritama (posebno kompleksnijeg algoritma koji koristi jednačine netransponovanih vodova) na prisustvo greški u merenjima, bilo bi od velikog značaja testirati algoritam i sa realnim merenjima, gde bi se pored stvarnih, a ne modelovanih greški uređaja za sinhrofazorska merenja, dodatno uvažile i greške strujnih i naponskih zaštitnih mernih transformatora.

IX ZAHVALNICA

Ovaj rad je finansijski podržalo Ministarstvo za nauku, tehnološki razvoj i inovacije Republike Srbije po ugovoru broj: 451-03-137/2025-03/200103.

X DODATAK

Formule netransponovanog dalekovoda u kompleksnom domenu se nakon izdvajanja realnog i imaginarnog dela, zapisuju na sledeći način:

$$Re(\underline{U}_a^1) = x_1 \cdot Re(\Delta \underline{U}_a) - x_2 \cdot Im(\Delta \underline{U}_a) + x_7 \cdot Re(\Delta \underline{U}_b) - x_8 \cdot Im(\Delta \underline{U}_b) + x_{11} \cdot Re(\Delta \underline{U}_c) - x_{12} \cdot Im(\Delta \underline{U}_c) - \frac{1}{2} \cdot x_{13} \cdot Im(\underline{U}_a^1) - \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Im(\underline{U}_b^1) - \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Im(\underline{U}_c^1)$$

$$Re(\underline{U}_b^1) = x_7 \cdot Re(\Delta \underline{U}_a) - x_8 \cdot Im(\Delta \underline{U}_a) + x_3 \cdot Re(\Delta \underline{U}_b) - x_4 \cdot Im(\Delta \underline{U}_b) + x_9 \cdot Re(\Delta \underline{U}_c) - x_{10} \cdot Im(\Delta \underline{U}_c) - \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Im(\underline{U}_a^1) - \frac{1}{2} \cdot x_{14} \cdot Im(\underline{U}_b^1) - \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Im(\underline{U}_c^1)$$

$$Re(\underline{U}_c^1) = x_{11} \cdot Re(\Delta \underline{U}_a) - x_{12} \cdot Im(\Delta \underline{U}_a) + x_9 \cdot Re(\Delta \underline{U}_b) - x_{10} \cdot Im(\Delta \underline{U}_b) + x_5 \cdot Re(\Delta \underline{U}_c) - x_6 \cdot Im(\Delta \underline{U}_c) - \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Im(\underline{U}_a^1) - \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Im(\underline{U}_b^1) - \frac{1}{2} \cdot x_{15} \cdot Im(\underline{U}_c^1)$$

$$Re(\Delta \underline{U}_a) = -\frac{1}{2} \cdot x_{13} \cdot Im(\underline{U}_a^1 + \underline{U}_a^2) - \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Im(\underline{U}_b^1 + \underline{U}_b^2) - \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Im(\underline{U}_c^1 + \underline{U}_c^2)$$

$$Re(\Delta \underline{U}_b) = -\frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Im(\underline{U}_a^1 + \underline{U}_a^2) - \frac{1}{2} \cdot x_{14} \cdot Im(\underline{U}_b^1 + \underline{U}_b^2) - \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Im(\underline{U}_c^1 + \underline{U}_c^2)$$

$$Re(\Delta \underline{U}_c) = -\frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Im(\underline{U}_a^1 + \underline{U}_a^2) - \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Im(\underline{U}_b^1 + \underline{U}_b^2) - \frac{1}{2} \cdot x_{15} \cdot Im(\underline{U}_c^1 + \underline{U}_c^2)$$

$$Im(\underline{U}_a^1) = x_1 \cdot Im(\Delta \underline{U}_a) + x_2 \cdot Re(\Delta \underline{U}_a) + x_7 \cdot Im(\Delta \underline{U}_b) + x_8 \cdot Re(\Delta \underline{U}_b) + x_{11} \cdot Im(\Delta \underline{U}_c) + x_{12} \cdot Re(\Delta \underline{U}_c) + \frac{1}{2} \cdot x_{13} \cdot Re(\underline{U}_a^1) + \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Re(\underline{U}_b^1) + \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Re(\underline{U}_c^1)$$

$$Im(\underline{U}_b^1) = x_7 \cdot Im(\Delta \underline{U}_a) + x_8 \cdot Re(\Delta \underline{U}_a) + x_3 \cdot Im(\Delta \underline{U}_b) + x_4 \cdot Re(\Delta \underline{U}_b) + x_9 \cdot Im(\Delta \underline{U}_c) + x_{10} \cdot Re(\Delta \underline{U}_c) + \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Re(\underline{U}_a^1) + \frac{1}{2} \cdot x_{14} \cdot Re(\underline{U}_b^1) + \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Re(\underline{U}_c^1)$$

$$Im(\underline{U}_c^1) = x_{11} \cdot Im(\Delta \underline{U}_a) + x_{12} \cdot Re(\Delta \underline{U}_a) + x_9 \cdot Im(\Delta \underline{U}_b) + x_{10} \cdot Re(\Delta \underline{U}_b) + x_5 \cdot Im(\Delta \underline{U}_c) + x_6 \cdot Re(\Delta \underline{U}_c) + \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Re(\underline{U}_a^1) + \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Re(\underline{U}_b^1) + \frac{1}{2} \cdot x_{15} \cdot Re(\underline{U}_c^1)$$

$$Im(\Delta \underline{U}_a) = \frac{1}{2} \cdot x_{13} \cdot Re(\underline{U}_a^1 + \underline{U}_a^2) + \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Re(\underline{U}_b^1 + \underline{U}_b^2) + \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Re(\underline{U}_c^1 + \underline{U}_c^2)$$

$$Im(\Delta \underline{U}_b) = \frac{1}{2} \cdot x_{16} \cdot Re(\underline{U}_a^1 + \underline{U}_a^2) + \frac{1}{2} \cdot x_{14} \cdot Re(\underline{U}_b^1 + \underline{U}_b^2) + \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Re(\underline{U}_c^1 + \underline{U}_c^2)$$

$$Im(\Delta \underline{U}_c) = \frac{1}{2} \cdot x_{18} \cdot Re(\underline{U}_a^1 + \underline{U}_a^2) + \frac{1}{2} \cdot x_{17} \cdot Re(\underline{U}_b^1 + \underline{U}_b^2) + \frac{1}{2} \cdot x_{15} \cdot Re(\underline{U}_c^1 + \underline{U}_c^2)$$

LITERATURA

- [1] Johnson, B.K., Wong, C., Jadid, S. Validation of Transmission Line Relay Parameters Using Synchrophasors, in Proc. *41st Annual Western Protective Relay Conference*, Spokane, Washington, October 14-16, 2014. <https://selinc.com/api/download/104514?id=104514> [pristupljeno 16.01.2025]
- [2] Du, Y., Liao, Y. Online estimation of power transmission line parameters, temperature and sag, in Proc. *2011 North American Power Symposium*, Boston, MA, pp. 1-6, 4-6 August, 2011. <https://doi.org/10.1109/NAPS.2011.6024854>
- [3] Liao, Y., Kezunovic, M. Online Optimal Transmission Line Parameter Estimation for Relaying Applications, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 24, No. 1, pp. 96-102, 2009. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.2002875>
- [4] Milojević, V., Čalija, S., Rietveld, G., Ačanski, M.V., Colangelo, D. Utilization of PMU Measurements for Three-Phase Line Parameter Estimation in Power Systems, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 67, No. 10, pp. 2453-2462, 2018. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2843098>
- [5] Shi, D., Tylavsky, D.J., Koellner, K.M., Logic, N., Wheeler, D.E. Transmission line parameter identification using PMU measurements, European Transactions on Electrical Power. <https://doi.org/10.1002/etep.522>
- [6] Schweitzer, E.O., Zocholl, S.E. Introduction to symmetrical components, in Proc. *58th Annual Georgia Tech Protecting Relaying Conference*, Atlanta, GA, 2004. <https://selinc.com/api/download/2470> [pristupljeno 16.01.2025]
- [7] Kezunovic, M., Meliopoulos, S., Venkatasubramanian, S., Vittal, V. *Application of Time-Synchronized Measurements in Power System Transmission Networks*, Springer Cham, 2014. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06218-1>

AUTORI

Miljana Todorović - master inženjer elektrotehnike i računarstva, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, PowerGrid Engineering d.o.o. Beograd, miljana.todorovic@powergrid-e.com, ORCID [0000-0002-8821-4227](https://orcid.org/0000-0002-8821-4227)
dr Zoran Stojanović - redovni profesor Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu, stojanovic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-2432-394X](https://orcid.org/0000-0003-2432-394X)

Optimal Untransposed Transmission Line Parameter Estimation Using Synchrophasors

Abstract - The paper presents a method for estimating the parameters of an untransposed transmission line, which can be represented by an equivalent π -model, in real-time. The estimation of parameters is performed using the Weighted Least Squares (WLS) method, which utilizes three sets of synchronized phasor measurements of voltages and currents at both ends of the transmission line, with at least one measurement containing a sufficient zero-sequence voltage component. This method could be used in general case - for both transposed and untransposed lines, that have balanced or unbalanced load. By applying this method, it is possible to calculate the values of self-impedances and mutual impedances, as well as the values for susceptances. By transforming these values into the system of symmetrical components, the impedances and susceptances of positive, negative, and zero sequences, as well as mutual impedances between the positive, negative, and zero sequences, are also determined.

The parameters of the untransposed line were determined in two different cases. Voltage and current measurements at both end of the transmission line were generated using MATLAB Simulink software, where phasors were determined and later used as data input for the calculations. In the first idealized case, measurement errors were not considered, while in the second case, measurement error was modelled in the input data. In both cases, two methods were applied: the first one which estimates the unknown parameters of the untransposed line using equations for an untransposed transmission line, and the second one which estimates the unknown parameters based on equations for a transposed line.

Index terms - Untransposed transmission line parameter, Estimation theory, Synchrophasor, Measurements, WLS

Izazovi energetske tranzicije u distributivnom sistemu: kritička analiza i predlozi za njihovo rešavanje

Dunja Grujić*, Jelisaveta Krstivojević**, Jelena Stojković Terzić**

* Flaner d.o.o., ** Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Rezime - Neophodnost energetske tranzicije je očigledna u uslovima značajnog zagađenja životne sredine i globalnog zagrevanja, kojima svedočimo. U okviru ovog rada biće analizirani izazovi za sprovođenje energetske tranzicije u Republici Srbiji, koji su povezani sa distributivnim elektroenergetskim sistemom, pri čemu će biti dati i predlozi za njihovo prevazilaženje. Za energetske tranzicije, između ostalog, neophodan je stabilan distributivni elektroenergetski sistem i pouzdan operator distributivnog sistema. S obzirom na to, pre svega biće dat pregled trenutnog stanja operatora distributivnog sistema kao i samog distributivnog elektroenergetskog sistema kroz osvrt na tehničko stanje, regulativu, finansije, planove poslovanja i kapacitete za priključenje proizvodnih objekata iz obnovljivih izvora energije. Uvidom u trenutno stanje operatora i sistema biće utvrđeni izazovi i barijere za sprovođenje energetske tranzicije. Takođe, biće dati i predlozi za prevazilaženje uočenih izazova i barijera. U radu će posebno biti analizirane mogućnosti integracije proizvodnih objekata iz obnovljivih izvora energije u distributivni sistem. Različiti koncepti korišćenja obnovljivih izvora energije biće predstavljeni, kao i trenutni stepen njihove integracije u distributivni sistem. Identifikovaće se izazovi za povećanje kapaciteta proizvodnih objekata iz obnovljivih izvora energije priključenih na distributivni sistem i biće dati predlozi za njihovo prevazilaženje kroz predloge za unapređenje regulative, tehničkih rešenja priključenja na sistem, načina obračuna električne energije i dodatnih mogućnosti među kojima su agregacija, pomoćne usluge, redispečing i skladištenje električne energije.

Ključne reči - energetska tranzicija, distributivni sistem, obnovljivi izvori energije, fleksibilnost

I UVOD

Operator distributivnog sistema električne energije (ODS) je odgovoran za siguran, pouzdan i bezbedan rad distributivnog sistema, kao i za kvalitet isporuke električne energije. Njegova nadležnost obuhvata upravljanje distributivnim sistemom srednjeg i niskog napona na način koji osigurava sigurnost snabdevanja, transparentan i nediskriminatoran pristup sistemu, kao i njegov dalji razvoj kako bi se dugoročno obezbedila sposobnost mreže da odgovori na racionalne zahteve za distribuciju električne energije. ODS je takođe zadužen za izgradnju priključaka korisnika distributivnog sistema, utvrđivanje tehničko-tehnoloških uslova za priključenje na mrežu, kao i za obezbeđivanje relevantnih informacija energetskim subjektima i korisnicima distributivnog sistema, u skladu s principima transparentnosti i nediskriminacije. Pored toga, odgovoran je za

ispravnost i pouzdanost merenja električne energije [1].

S obzirom na prethodno navedeno može se zaključiti da je upravo ODS jedan od ključnih faktora u sprovođenju energetske tranzicije. U okviru ovog rada biće analizirano trenutno stanje ODS, barijere za energetske tranzicije koje nastaju kao posledica delovanja ODS, kao i predlozi za njihovo prevazilaženje.

II STANJE DISTRIBUTIVNOG SISTEMA - TEHNIČKI POKAZATELJI

Elementi elektroenergetskog sistema

Jedna od ključnih prepreka energetske tranzicije je zastarelost elemenata distributivnog sistema, posebno velikih transformatora, od kojih su mnogi u upotrebi duže od 30 godina [2], uz često neadekvatno održavanje. Kako bi se obezbedila stabilnost i pouzdanost elektroenergetskog sistema, neophodno je redovno i pravovremeno održavanje njegove infrastrukture. Pored toga, ulaganja u modernizaciju sistema su ključna za omogućavanje priključenja novih korisnika koji doprinose energetske tranziciji, kao i za povećanje sigurnosti snabdevanja.

Ojačavanje mreže treba da se dešava paralelno sa razvojem proizvodnih kapaciteta iz obnovljivih izvora energije (OIE) i generalno procesom energetske tranzicije, a ne da mu prethodi. Takođe, važno je da regulatorna agencija prepozna ova ulaganja kao opravdana i omogući ODS dovoljno finansijskih sredstava za unapređenje elektroenergetske mreže.

Gubici električne energije

Poslednjih godina uočen je trend pada gubitaka u distributivnom sistemu, od 14,36% u 2014. godini do 10,85% u 2023. godini, ali su oni i dalje na visokom nivou i iznad evropskog proseka [3]. Usled novih korisnika sistema koji učestvuju u energetske tranziciji potencijalno u lokalizovanim tačkama može doći i do povećanja gubitaka.

Kako bi se pomenuto sprečilo neophodno je prilikom određivanja tačke priključenja i načina rada korisnika sistema, striktno voditi računa o gubicima energije. Takođe, ključno je koristiti energetske efikasne elemente sistema sa minimalnim gubicima, optimizovati upravljanje sistemom u cilju smanjenja gubitaka i sprovesti kontrole mernih mesta korisnika sistema radi sprečavanja neovlašćene potrošnje električne energije.

Tehnički kvalitet isporuke električne energije

Tehnički kvalitet podrazumeva neprekidnost isporuke električne energije uz održavanje nazivnog napona i frekvencije na mestima primopredaje [1,4]. Međutim, usled starosti i stanja elemenata

sistema, dolazi do odstupanja od ovih standarda.

Kako bi se obezbedio stabilan i pouzdan elektroenergetski sistem, neophodno je kontinuirano unapređivati tehnički kvalitet kroz redovno održavanje, ulaganja u infrastrukturu i optimizaciju procedura upravljanja i održavanja sistema.

Merenje električne energije

Merenje električne energije kod proizvođača je u velikoj meri digitalizovano, s obzirom na to da je 98% njih opremljeno naprednim mernim sistemima, što predstavlja izuzetno visok nivo pokrivenosti. Nasuprot tome, situacija kod krajnjih kupaca je znatno lošija, jer je svega 5,25% njihovih mernih mesta opremljeno naprednim mernim uređajima. Nasuprot tome, svi kupci na prenosnom sistemu već imaju napredne merne sisteme [3].

Tokom 2024. godine ODS je sprovodio intenzivnu zamenu klasičnih mernih uređaja naprednim i planirano je da se taj proces nastavi i u budućnosti. Međutim, dodatni izazov predstavlja i veliki broj mernih uređaja kojima je istekao rok overe, što može negativno uticati na tačnost merenja.

Zbog svega navedenog, neophodno je ubrzati implementaciju naprednih mernih sistema, jer su oni ključni za učešće u energetske zajednicama, agregaciji, proizvodnji električne energije i upravljanju potrošnjom. Kako su ovi koncepti od suštinskog značaja za energetske tranziciju, jasno je da je instalacija naprednih mernih uređaja neophodna za sve korisnike elektroenergetskog sistema, a posebno za one koji aktivno učestvuju u pomenutim procesima.

Kapaciteti za priključenje

Trenutno ne postoji mapa koja prikazuje dostupne kapacitete za priključenje na elektroenergetski sistem. Kako bi se to omogućilo, potrebno je obezbediti precizan model elektroenergetске mreže. Ovakva mapa bila bi od ključne važnosti za investitore u proizvodne objekte iz OIE, jer bi im omogućila da planiraju lokaciju svojih postrojenja i procene mogućnosti za priključenje.

Bez takve mape, investitori koji kupuju zemljište za izgradnju elektrana ne mogu sa sigurnošću znati da li postoji raspoloživ kapacitet za priključenje, što često dovodi do usporavanja ili čak potpune obustave realizacije ovih projekata.

Fleksibilnost sistema

Za energetske tranzicije ključno je precizno odrediti fleksibilnost elektroenergetskog sistema i kontinuirano raditi na njenom unapređenju kako bi se omogućilo priključenje što većeg broja proizvodnih objekata iz OIE. To podrazumeva, između ostalog, podsticanje razvoja skladišta energije, unapređenje modela upravljanja potrošnjom, podršku agregatorima, uspostavljanje efikasnog tržišta pomoćnih usluga i optimizaciju redišpećinga.

Koncepti implicitnog (cenovnim impulsima) i eksplicitnog (ugovorom) upravljanja potrošnjom i proizvodnjom, pomoćne usluge i redišpećing posebno su značajni za rešavanje lokalnih problema u mreži, naročito u udaljenim područjima. Njihovom primenom povećava se kapacitet i fleksibilnost mreže, olakšava upravljanje sistemom, omogućava preciznije praćenje tokova snaga, smanjuju se gubici i oslobađaju dodatni kapaciteti za priključenje novih proizvodnih objekata.

III STANJE DISTRIBUTIVNOG SISTEMA - EKONOMSKI POKAZATELJI

Kako bi ODS mogao da ispuni svoje obaveze, neophodno je da posluje stabilno i da ima adekvatne prihode. To je ključno za obezbeđivanje sigurnosti snabdevanja, pouzdanosti elektroenergetskog sistema i efikasnu podršku energetske tranzicije, umesto da predstavlja faktor koji je usporava.

Cena pristupa distributivnom sistemu

Prihod od naknade za pristup sistemu predstavlja glavni izvor prihoda za ODS [1,5]. U Republici Srbiji, cene pristupa prenosnom i distributivnom sistemu poslednji put su promenjene u oktobru 2021. godine [6], i one su veoma niske, što čini da prihodi ODS-a nisu dovoljni za pokrivanje osnovnih troškova i investicija u sistem koje su neophodne za sprovođenje energetske tranzicije. Dok su cene drugih usluga, poput gubitaka, goriva, materijala i usluga trećih lica, znatno porasle, cene pristupa nisu se promenile.

U 2023. godini, cena pristupa prenosnom sistemu bila je među najnižim u Evropi, niža je samo u Slovačkoj i Severnoj Makedoniji, dok je cena pristupa distributivnom sistemu niža samo u Turskoj i Grčkoj. Takođe, prosečna cena pristupa od 2014. do 2023. godine za prenosni sistem porasla je za 44%, a za distributivni sistem svega 16%. Ova činjenica ukazuje na lošiji položaj ODS u prethodnom periodu u odnosu na operatora prenosnog sistema i ukazuje na to da su neophodne velike investicije u distributivni sistem kako bi mogao da podrži energetske tranzicije bez ugrožavanja sigurnosti snabdevanja [3]. Pored toga, ukupan ostvareni rezultat ODS-a je neto gubitak u 2023. godini u iznosu od 1,053 milijardi dinara, što je lošiji rezultat od ostvarenog ukupnog neto finansijskog rezultata u 2022. godini [7], što samo po sebi govori o uslovima pod kojima posluje ODS.

Kako bi se negativni efekti prethodno navedenog umanjili, neophodno je, pre svega, razmotriti opravdanost troškova ODS - neopravdane troškove smanjiti ili ih potpuno sprečiti, a opravdane troškove i maksimalno odobreni prihod ODS realno proceniti [5]. Takođe, potrebno je proceniti realna sredstva kojima ODS mora raspolagati kako bi bio u mogućnosti da omogućiti tranziciju i nesmetan rad sistema.

Takođe, neophodno je analizirati trenutne cene pristupa distributivnom sistemu i povećati ih što pre kako ODS ne bi poslova u minusu i kako bi imao dovoljno sredstava za svoj redovan rad, za ispunjavanje svoje osnovne delatnosti na korist korisnika sistema, kao i da sprovede sve zadatke koje energetska tranzicija pred njega postavlja. Sem toga, radi lakšeg upravljanja sistemom i mogućnosti da se više novih korisnika sistema priključi bez značajnih ulaganja u elektroenergetski sistem, neophodno je razmatrati i dinamičke tarife za pristup koje će odražavati opterećenje u sistemu, pri čemu će cene biti više u periodima većeg opterećenja sistema i obrnuto. Za početak mogu se uvesti umesto postojeće dve (dnevna i noćna tarifa), četiri tarife, a nakon toga postepeno razvijati tarife koje će biti znatno češće promenljive [8-10].

Prema trenutno važećoj Metodologiji za određivanje pristupa sistemu, 32% maksimalno odobrenog prihoda se nadoknađuje iz tarifnog elementa „odobrena snaga“, 66% iz tarifnog elementa „aktivna energija“, i 2% iz tarifnog elementa „reaktivna energija“ [5]. Usled delovanja novih korisnika sistema, koji sami proizvode deo električne energije koju potroše, isporuka električne energije

korisnicima sistema od strane ODS se smanjuje, te će i prihod ODS, ukoliko se koncept obezbeđivanja prihoda ne promeni, biti sve manji, dok će troškovi i potrebe za investicijama biti sve veći.

Pored navedenog, potrebno je preispitati i trenutni način određivanja cena pristupa i prilagoditi ga uslovima energetske tranzicije. S obzirom na trendove energetske tranzicije, uz sve nove korisnike sistema koji samostalno obezbeđuju deo energije za sebe, koncept obezbeđivanja prihoda dominantno iz aktivne energije bilo bi opravdano zameniti konceptom dominantnog obezbeđivanja prihoda iz kapaciteta priključka na sistem. Pri tom, tarifni element „odobrena snaga“, tj. kapacitet priključka, trebalo bi da bude dominantan izvor prihoda (70% ili više), a ostatak da se rasporedi na aktivnu i reaktivnu energiju.

Neophodno je i razmotriti i uvođenje G komponente pri čemu bi se pristup sistemu obračunavao korisnicima i za električnu energiju koju isporuče u sistem. Pored toga što bi se krajnjim kupcima smanjila cena pristupa sistemu, ODS bi imao naknadu za injektiranje električne energije u prenosni sistem u trenucima kada je proizvodnja u nekoj tački veća od potreba za električnom energijom. Količine ove energije su višestruko povećane u prethodnih nekoliko godina od kada je počelo priključivanje većeg kapaciteta elektrana koje proizvode električnu energiju iz OIE [3].

Troškovi očitavanja mernih uređaja

ODS je obavezan da do dvanaestog dana svakog meseca prikupi podatke sa mernih uređaja za prethodni mesec, obradi ih i u naredna tri dana učini dostupnim korisnicima sistema sa kojima je zaključio ugovor o pristupu sistemu [1]. Na distributivnom sistemu, međutim, na kraju 2023. godine samo 5% mernih uređaja bilo je opremljeno za daljinsko očitavanje [3], dok je ostatak uređaja zahtevao fizičko očitavanje svakog meseca. Očitavanje svih 3,8 miliona mernih mesta svakog meseca nosi značajne troškove za ODS, kako ljudske tako i finansijske. Na primer, troškovi očitavanja mernih uređaja u 2022. godini iznosili su 1,6 milijardi dinara [7], a treba uzeti u obzir i dodatne troškove poput razvoja softverskih rešenja za očitavanje i nabavku opreme kao što su mobilni telefoni.

Ako bi se očitavanje mernih mesta za domaćinstva koja ne učestvuju u upravljanju potrošnjom, nisu kupci-proizvođači niti članovi energetske zajednice ili agregacije, sprovodilo jednom svakih tri, šest meseci ili čak godinu dana:

- troškovi ODS bi se smanjili, a resursi bi bili oslobođeni za druge aktivnosti (kao što su kontrole i zamene mernih uređaja) [1,8,9],
- cena pristupa sistemu, nakon planiranog povećanja, bila bi niža, jer bi troškovi za očitavanje bili manji, a to bi omogućilo građanima više sredstava u budžetu za ulaganja u sopstvene OIE elektrane, energetske efikasnost, nabavku pametnih uređaja i slične aktivnosti koje doprinose energetske tranziciji,
- procena potrošnje bi se bazirala na istorijskim podacima, što bi krajnjim kupcima omogućilo lakše planiranje kućnog budžeta, a balansno odgovornim stranama lakše planiranje svojih aktivnosti.

Troškovi ODS za nabavku električne energije za nadoknadu gubitaka u distributivnom sistemu

ODS je dužan da nabavi električnu energiju kako bi nadoknadio gubitke u sistemu. Iako je primetan trend smanjenja gubitaka u prethodnim godinama [3], porast cena električne energije, uz činjenicu da cena pristupa sistemu nije menjana od 2021. godine, čini gubitke ozbiljnim finansijskim opterećenjem za ODS. Takođe, važno je da regulatorna agencija precizno utvrdi opravdane troškove za nabavku električne energije potrebne za nadoknadu gubitaka, uzimajući u obzir aktuelne cene energije i stanje samog sistema.

IV STANJE DISTRIBUTIVNOG SISTEMA - DRUŠTVENI POKAZATELJI

Komercijalni kvalitet isporuke električne energije

ODS ima obavezu da obezbedi komercijalni kvalitet usluga korisnicima sistema, što podrazumeva pravovremeno pružanje usluga u skladu sa važećom regulativom, uključujući rešavanje zahteva za priključenje i prigovora korisnika sistema [1,4]. Iako ODS snosi odgovornost za priključenje, često se uočava da to ne čini u predviđenim rokovima, a takođe ni na prigovore korisnika ne reaguje u propisanim vremenskim okvirima. Zakon predviđa kazne za ODS u slučaju nepridržavanja rokova, ali se ove kazne retko primenjuju [1].

Korisnici najčešće podnose svoje zahteve u pisanoj formi, a trenutno nije razvijena digitalna platforma koja bi omogućila jednostavno podnošenje i praćenje statusa tih zahteva. Transparentnost u ovom procesu je niska, pa korisnici moraju često dolaziti u ODS kako bi rešavali svoje obaveze. Generalno, odnosi između ODS i korisnika sistema nisu uvek zadovoljavajući, jer informacije nisu lako dostupne, procedure su složene, duge i nedovoljno transparentne.

Potrebno je unaprediti komercijalni kvalitet ODS kroz ubrzanu i efikasnu reakciju na zahteve korisnika, pojednostavljenje radnih procedura, kao i kroz uvođenje specijalizovanih službi za rešavanje tih pitanja. Predložene izmene regulative, koje predviđaju uvođenje kazni za ODS u slučaju neispunjavanja zahteva za kvalitet, mogle bi značajno poboljšati ovu situaciju, pa je važno što pre implementirati te izmene.

Građanima i privredi mora biti omogućeno maksimalno pojednostavljenje svih procesa kako bi se odlučili na važna, ali ponekad izazovna ulaganja u energetske tranziciju. Da bi se to postiglo, trebalo bi uvesti sledeće mere:

- uspostaviti „jednu tačku“ za sve korisnike sistema, gde bi mogli da podnesu zahteve i završe čitav proces, od početka do kraja, bez potrebe za višestrukim kontaktiranjem različitih instanci,
- razviti online platformu na kojoj bi korisnici mogli da postavljaju pitanja, dostavljaju potrebnu dokumentaciju i prate status svog zahteva, čime bi se povećala transparentnost i ubrzao postupak,
- striktno poštovati definisane rokove za realizaciju zahteva korisnika, što bi omogućilo smanjenje administrativnih opterećenja i ubrzalo celokupni proces koji trenutno može biti iscrpljujući sa više koraka i dugim čekanjem.

Ove mere će olakšati građanima i privredi da se uključe u tranziciju i da daju svoj doprinos, čime će se stvoriti temelji za efikasan i pravičan proces energetske transformacije.

Pored toga, potrebno je ozbiljno raditi na poboljšanju dostupnosti

generalnih informacija o mogućnostima za učešće u energetske tranziciji. Takođe, važno je da lokalne samouprave, javna preduzeća i sve državne institucije prepoznaju potrebu da se usmere ka građanima i privredi i postanu pravi servis za njih. Ovaj pristup je ključan za uspešno sprovođenje energetske tranzicije. Za ostvarenje toga, zaposleni u institucijama treba da budu ljubazni, da pružaju tačne i blagovremene informacije, da budu dostupni, da redovno rade i da osiguraju transparentnost u svim procesima. Potrebno je ponovo izgraditi poverenje u javna preduzeća i državne institucije, jer bez toga napredak u energetske tranziciji neće biti moguć.

Zaposleni ODS

Na kraju 2023. godine, ODS je imao 8.626 zaposlenih [3], pri čemu je prosečna starost zaposlenih bila oko 50 godina. Ovaj podatak ukazuje na relativno stariji kolektiv koji se nije obrazovao prema potrebama energetske tranzicije, digitalizacije, dekarbonizacije i decentralizacije [3,7].

Za 2024. godinu, planirana sredstva za obuke i školovanje kadrova ODS bila su 23,37 miliona dinara, ali su rebalansom smanjena na 11 miliona dinara [2], što predstavlja drastičan pad. Ova suma iznosi svega 1.275 dinara po zaposlenom godišnje, što ukazuje na nedovoljna ulaganja u obrazovanje i usavršavanje kadrova.

S obzirom na to, sredstva za edukaciju moraju se povećati i usmeriti ka specifičnom obrazovanju zaposlenih. Potrebno je organizovati obuke kako za rad sa savremenom elektroenergetskom opremom, tako i za korišćenje softverskih alata i njihovih mogućnosti. Takođe, edukacija o energetske tranziciji i mehanizmima njenog sprovođenja mora biti prioritet. Javni sektor često pokazuje otpor prema novim pristupima u potrošnji i proizvodnji električne energije, kao i u upravljanju sistemom, zbog čega je od suštinske važnosti ulagati u edukaciju postojećih kadrova, ali i zapošljavanje novih stručnjaka. Javne institucije treba da vode tranziciju i podstiču svakog pojedinca da doprinese, jer bez toga energetska tranzicija neće biti moguća.

Takođe, treba uzeti u obzir činjenicu da je gotovo 1.000 zaposlenih starijih od 60 godina, koji će u narednim godinama otići u penziju [7]. Stoga je važno promovisati ODS kao atraktivnog poslodavca za mlade obrazovane ljude. Jedan od ključnih faktora za privlačenje tih kadrova je plata. Troškovi zarada zaposlenih u 2023. godini iznosili su 17,3 milijarde dinara, što znači da je prosečna plata bila 167 hiljada bruto, odnosno oko 100 hiljada neto [2]. Ovaj iznos spada u donji opseg plata za inženjere u Republici Srbiji, zbog čega ODS nije atraktivan poslodavac za mlade stručnjake. Ova situacija zahteva hitnu reakciju kako bi ODS bio spreman za izazove koji ga očekuju u svetlu energetske tranzicije.

V MODELI KORIŠĆENJA OIE U REPUBLICI SRBIJI

U Republici Srbiji postoje različiti modeli korišćenja OIE koji su regulisani važećom regulativom. Među njima su: proizvođač [1,4,11], kupac-proizvođač [1,4,11,12], aktivni kupac [1], zajednica OIE [1,11,13] i energetska zajednica građana [1].

Regulativa jasno definiše prava i obaveze proizvođača, kupaca-proizvođača i aktivnih kupaca, dok članovi zajednica OIE i energetskih zajednica građana zadržavaju svoja prava i obaveze u skladu sa važećim propisima.

Proizvođači električne energije

Snaga elektrana i raspoloživi kapaciteti za priključenje

Zakonom o korišćenju OIE [11] utvrđeno je da maksimalna snaga proizvođača koji se mogu priključiti na distributivni sistem iznosi 10 MW. Takođe, ODS je obavezan da ograniči priključenje elektrana koje koriste varijabilne OIE, tako da ukupna instalisana snaga elektrana na delu distributivnog sistema povezanog sa prenosnim sistemom ne prelazi 80% instalisane snage transformatorske stanice na mestu predaje između distributivnog i prenosnog sistema. Ovaj uslov važi pod pretpostavkom da ukupna aktivna snaga koja se predaje iz distributivnog u prenosni sistem na jednoj transformatorskoj stanici ne prelazi 16 MW. Međutim, ODS ne primenjuje ograničenje na kupce-proizvođače, već samo na elektrane.

Ova ograničenja stvaraju značajnu neizvesnost za investitore, jer ne postoje javno dostupni podaci o kapacitetima koji su dostupni za priključenje na pojedinačne trafostanice, niti postoje javno dostupne mape raspoloživih kapaciteta.

Zbog toga je potrebno precizno odrediti kapacitete za priključenje, objaviti mapu raspoloživih kapaciteta, kao i preispitati kriterijume za ograničenje snage elektrana. To podrazumeva razmatranje mogućnosti da se ograničenje od 80% i limit od 16 MW za injektiranje energije prošire pod određenim uslovima, kao i procenu tehničke izvodljivosti priključenja elektrana sa snagom većom od 10 MW na distributivni sistem.

Postupak priključenja na distributivni sistem

Proces priključenja na sistem je složen i obuhvata veliki broj koraka, od kojih mnogi donose dodatne troškove i često su dugotrajni. Na primer, izrada studije priključenja za prenosni sistem može koštati najmanje 50.000 evra, dok za distributivni sistem trošak može biti do 5.000 evra, u zavisnosti od snage elektrane, uz obaveznu bankarsku garanciju za ozbiljnost projekta [1,4]. Pored toga, postupak je često netransparentan, što može obeshrabriti investitore za ulaganje u proizvodnju električne energije.

Potrebno je preispitati opravdanost trenutnih procedura za priključenje, kao i trajanje i uslove koji se postavljaju, uključujući i troškove koji se zahtevaju od proizvođača. Na primer, cilj uvođenja inicijalnih troškova za izradu studije i bankarske garancije bio je da se odstrane nesigurni investitori, ali ovakvi uslovi otežavaju poslovanje i onima koji su sigurni u svoje projekte. Stoga bi trebalo razmotriti nove pristupe koji bi smanjili opterećenje za investitore.

Takođe, važno je da svi uslovi i troškovi za priključenje budu jasni i transparentni. Takođe, postoji potreba za unapređenjem, ubrzanjem i digitalizovanjem svih faza procesa priključenja, od izdavanja licenci i dozvola, preko priključenja na sistem, pa sve do uređivanja pristupa sistemu i balansne odgovornosti.

Odlaganje postupka priključenja

Prema Zakonu o korišćenju OIE [11], ako analiza adekvatnosti, kao deo plana razvoja prenosnog sistema, pokaže da postoji rizik po stabilnost elektroenergetskog sistema zbog nedostatka rezerve za balansiranje, ODS je dužan da odloži postupak priključenja za elektrane koje koriste varijabilne OIE.

Međutim, odlaganje priključenja na distributivni sistem ne odnosi se na elektrane koje ispunjavaju sledeće uslove:

- instalisana snaga manja od 400 kW,
- obezbeđen je novi kapacitet za pomoćnu uslugu sekundarne rezerve (iz postojećih kapaciteta sopstvenih ili drugih učesnika na tržištu) koji će biti ponuđen operatoru prenosnog sistema za sekundarnu regulaciju frekvencije i razmene snage,
- obezbeđeno je skladište električne energije čiji kapacitet iznosi najmanje 20% instalisane snage elektrane koja koristi varijabilne OIE, uz minimalni kapacitet skladišta od 0,4 MWh/MW instalisane snage.

S obzirom na to da postavljeni uslovi za odlaganje priključenja mogu značajno poskupeti investiciju, potrebno je revidirati njihovu opravdanost u kontekstu energetske tranzicije. U najmanju ruku, svaki slučaj treba razmatrati pojedinačno. Na primer, za elektranu koja se gradi u blizini potrošnje, uslovi za odlaganje nisu nužni, dok bi za elektranu koja je udaljena od potrošnje i negativno utiče na sistem, kao što je izazivanje zagušenja ili otežano balansiranje, bilo potrebno da ispuni određene uslove, ali ne bi trebalo zahtevati iste uslove za sve elektrane kao da su sve u najnepovoljnijem mogućem scenariju za sistem.

Operativna ograničenja

Operator prenosnog sistema može, za elektrane priključene na prenosni sistem, kao i za deo distributivnog sistema kojim upravlja operator prenosnog sistema, uvesti operativna ograničenja u isporuci proizvedene električne energije [4]. Ova ograničenja služe kao zaštita sistema, pomažu u sprečavanju zagušenja i oslobađanju kapaciteta za priključenje novih korisnika sistema koji doprinose energetskej tranziciji. Međutim, da bi bila efikasna, ograničenja moraju biti jasno definisana i unapred ugovorena sa proizvođačem, kako bi on mogao da planira rad svog proizvodnog objekta, uzimajući u obzir potencijalna ograničenja u određenim delovima godine.

Prilikom određivanja tehničkih uslova za priključenje svakog proizvodnog objekta iz OIE, potrebno je uzeti u obzir čitav elektroenergetski sistem, kao i specifične uslove na mikrolokaciji objekta, kako bi se obezbedili optimalni tehnički i finansijski uslovi za priključenje. Takođe, meru operativnih ograničenja trebalo bi primeniti i na distributivni sistem, kako za elektrane, tako i za kupce-proizvođače i aktivne kupce.

Jedan od mogućih pravaca za rešavanje ovog problema bio bi razvoj "uslovnog priključenja na sistem". To bi značilo da bi se proizvodni objekti iz OIE priključili uz određeno ograničenje, gde ne bi mogli da plasiraju punu snagu tokom cele godine, već bi bila ograničena u skladu sa uslovima sistema. Ako ovakvo rešenje ne bude razvijeno, veliki broj proizvodnih objekata iz OIE neće moći da se priključi, jer trenutni uslov za priključenje uključuje mogućnost punog plasmana snage tokom cele godine.

Pristup sistemu i balansna odgovornost

Proizvođači električne energije zaključuju ugovor sa ODS kako bi obezbedili pristup sistemu, ali nemaju troškove pristupa, jer nije propisano obračunavanje troškova za energiju koju proizvođači isporučuju u sistem [5,14].

Pored toga, proizvođači moraju postati balansno odgovorne strane, što znači da su obavezni da zaključe ugovor sa operatorom prenosnog sistema. Takođe, moraju položiti sredstva obezbeđenja u iznosu od milion evra ili preneti balansnu odgovornost na drugu balansno odgovornu stranu [1, 15].

Dodatne mogućnosti za unapređenje poslovanja proizvođača električne energije

Potrebno je razviti model koji bi omogućio većem broju proizvođača iz OIE da se priključe na elektroenergetski sistem, pri čemu bi trebalo obezbediti predvidljivost perioda otplate i prihoda tokom životnog veka, u skladu sa tržišnim uslovima i mogućnostima za proizvodnju. Ovaj model treba da bude održiv, u smislu stabilnosti snabdevanja i pouzdanosti sistema.

Takođe, važno je razviti održiv model primene i popularizovati PPA ugovore, jer oni mogu obezbediti bankabilnost projekata i time olakšati finansiranje, kao i predvidljivost troškova i prihoda na duži vremenski period, kako za proizvođače, tako i za snabdevače i privredu u celini. Pored toga, potrebno je detaljno razraditi model direktnog voda, koji će omogućiti jasno definisanje ko može da ga koristi, uslove za njegovu izgradnju, način proizvodnje i isporuke električne energije, kao i snabdevanje kupaca povezanih na ovaj sistem.

Kupci-proizvođači

Kupci-proizvođači su korisnici elektroenergetskog sistema i učesnici na tržištu električne energije [1]. Mogu se podeliti u tri kategorije: domaćinstva, stambene zajednice i ostale [11,12,16].

Način rada kupaca-proizvođača

Pošto kupci-proizvođači priključuju svoje proizvodne objekte na unutrašnje instalacije, deo proizvedene električne energije se koristi unutar samog objekta. U situacijama kada proizvodnja objekta nije dovoljna da zadovolji potrebe kupaca-proizvođača, on ima pravo da povuče električnu energiju iz elektroenergetskog sistema. Takođe, ukoliko proizvodni objekat generiše više električne energije nego što je potrebno kupcu-proizvođaču, on može višak energije isporučiti u elektroenergetski sistem.

Snaga proizvodnog objekta kupaca-proizvođača

Kupci-proizvođači instaliraju proizvodne objekte koji generišu električnu energiju iz OIE. Do sada su se najviše odlučivali za solarne elektrane [16], ali moguće je koristiti i druge izvore, kao što su vetroelektrane, hidroelektrane ili elektrane na biogas. Maksimalna snaga proizvodnog objekta ne može premašiti odobrenu snagu priključka, koja je limitirana na 10,8 kW za domaćinstva i 150 kW za ostale kupce-proizvođače [11].

Aktivni kupac, kako je definisano Zakonom o energetici [1], može instalirati elektranu sa većom snagom od 150 kW, ali mora ispuniti brojne obaveze, što može obeshrabriti potencijalne investitore.

Trenutni maksimalni limiti snage za proizvodne objekte kupaca-proizvođača izazivaju dva problema:

- kupci-proizvođači sa manjim proizvodnim objektima suočavaju se sa prestrogim uslovima za priključenje.
- zbog nedostatka informacija, neki kupci-proizvođači prave veće elektrane nego što im je potrebno, što može dovesti do zagušenja u sistemu i potrebe za velikim

ulaganjima u infrastrukturu kako bi se omogućio priključak novih kapaciteta iz OIE.

Kako bi se rešili ovi problemi, potrebno je povećati maksimalnu snagu proizvodnog objekta za kupce-proizvođače, čime bi im se omogućilo da efikasnije pokriju deo svoje potrošnje i smanje pritisak na sistem. Time bi se postiglo smanjenje gubitaka jer bi energija bila proizvedena na mestu potrošnje, a kupci-proizvođači bi imali i finansijske koristi.

Takođe, granica između kupaca-proizvođača i aktivnog kupca trebala bi se pomeriti prema snazi za koju nije potrebna baterija, u skladu sa Zakonom o korišćenju OIE (400 kW) [11], a još bolje bi bilo pomeriti granicu između proizvodnih modula tipa A i B [17].

Kao dodatak, trebalo bi razviti online alat koji će kupcima-proizvođačima omogućiti jednostavno i brzo određivanje optimalne snage proizvodnog objekta. Ovaj alat bi moglo razviti neko nezavisno telo (Ministarstvo, Agencija, Fakultet ili drugo) pri čemu bi služio kao validan i koristan resurs za sve zainteresovane.

Priključenje na sistem

Pitanje sticanja statusa kupaca-proizvođača zavisi od vrste kupaca-proizvođača i vrsta priključenja koja im je dozvoljena. Stambene zajednice svoje proizvodne objekte priključuju direktno na elektroenergetski sistem i celokupnu energiju isporučuju u sistem, dok individualna domaćinstva i ostali kupci-proizvođači priključuju svoje proizvodne objekte na unutrašnje instalacije [11,12,18].

Za sve kupce-proizvođače, organ nadležan za izdavanje građevinske dozvole izdaje rešenje o odobrenju za izvođenje radova za elektrane snage do 50 kW i za postrojenja snage preko 50 kW koja proizvode energiju iz OIE za potrebe krajnjeg kupca [18]. Za ove projekte nije potrebna građevinska dozvola, niti licenca za proizvodnju električne energije, što olakšava proceduru.

Kupci-proizvođači sa proizvodnim objektima manjim od 10,8 kW imaju pojednostavljene uslove za priključenje, dok ostali imaju složenije uslove [19-22]. Takođe, krajnji kupac ima pravo da ovlasti treće lice (npr. izvođača radova) da u njegovo ime završi ceo administrativni postupak, što može biti korisno za ubrzanje procesa.

Za efikasno sprovođenje celokupnog procesa, neophodno je da ODS bude ažuran, savestan i organizovan kako bi zahtevi za priključenje kupaca-proizvođača bili sprovedeni u razumnom roku. Takođe, izvođači moraju biti odgovorni i ažurni prilikom izvođenja radova. Krajnji kupac mora biti u potpunosti upoznat sa svim procedurama i koordinirati sve potrebne korake.

Za kupce-proizvođače sa proizvodnim objektima male instalisane snage (manje od 10,8 kW), trebalo bi unapred definisati sve uslove, spisak opreme koja se može koristiti i omogućiti im da postupak obave bez administrativnih prepreka. Nakon toga, ODS bi samo trebalo da proveri da li je sve urađeno u skladu sa uputstvima. Ovo bi znatno rasteretilo administraciju i ubrzalo postupak za kupce-proizvođače.

Snabdevanje kupaca-proizvođača i obračun električne energije

Kupci-proizvođači imaju obavezu zaključenja ugovora o potpunom snabdevanju sa izabranim snabdevačem. Domaćinstva i stambene zajednice koriste neto merenje, dok ostali kupci-proizvođači koriste neto obračun [11,12]. Na osnovu ovog

ugovora, snabdevač je odgovoran za isporuku i preuzimanje električne energije, kao i za balansnu odgovornost [1]. Kupci-proizvođači nemaju obavezu prema snabdevaču zbog odstupanja od plana rada, a snabdevač svaki mesec obračunava neto energiju kao razliku između preuzete i isporučene energije. Višak energije koji kupac-proizvođač isporuči u sistem može se preneti u naredni mesec, a višak na kraju perioda za poravnanje potraživanja koji traje od 1. aprila do 31. marta naredne godine predaje se snabdevaču bez naknade [11,12].

Električna energija, naknade i porezi se kupcu-proizvođaču obračunavaju na neto električnu energiju, dok se pristup sistemu obračunava na celokupnu električnu energiju preuzetu iz sistema.

Za optimizaciju perioda povrata investicije i prihoda tokom životnog veka proizvodnje elektrane, potrebno je analizirati trenutni model obračuna putem neto merenja i neto obračuna. Takođe, treba omogućiti da višak energije nakon perioda poravnanja bude plaćen kupcu-proizvođaču i da se pristup sistemu obračunava na neto električnu energiju, što bi stimulisalo veće ulaganje u OIE projekte.

Edukacija kupaca-proizvođača je ključna za njihovu finansijsku isplativost. Korišćenje sopstvene proizvodnje energije u periodima kada je najviše generišu omogućava uštede i smanjuje potrebu za kupovinom energije od snabdevača. Time ne samo da povećavaju svoje finansijske uštede, već i doprinose smanjenju opterećenja elektroenergetskog sistema i skraćuju period otplate investicije.

Merenje električne energije

Trenutni sistem merenja za kupce-proizvođače se fokusira samo na razmenu električne energije između kupaca-proizvođača i elektroenergetskog sistema (preuzimanje i isporuka), a ne na ukupnu proizvodnju energije koju kupac-proizvođač generiše [11,12,23]. Iako postoje algoritmi za procenu ukupne proizvedene energije [24], oni nisu potpuno precizni i ne daju realnu sliku o ukupnoj proizvodnji sa proizvodnih objekata.

Da bi se postigla tačnost u merenju i obezbedila precizna analiza energetske miksa Republike Srbije, neophodno je unaprediti sistem merenja. To bi se postiglo uvođenjem dodatnog mernog uređaja koji bi precizno merio ukupnu proizvodnju energije kupaca-proizvođača, a ne samo razmenu sa sistemom. Ovaj uređaj treba da omogući praćenje svih relevantnih podataka, kao što su proizvedena energija, preuzeta energija i isporučena energija, sa 15-minutnim intervalom očitavanja podataka.

Ova unapređenja omogućila bi bolje praćenje potrošnje i proizvodnje kupaca-proizvođača, što bi doprinelo preciznijem izveštavanju o energetske potrošnji i proizvodnji na nacionalnom nivou, kao i boljoj optimizaciji rada elektroenergetskog sistema.

Stambene zajednice kao kupci-proizvođači

Kako bi se iskoristio veliki potencijal stambenih zajednica u Republici Srbiji, neophodno je olakšati uslove za priključenje na elektroenergetski sistem i pojednostaviti administrativne procedure. S obzirom na to da postoji više od 5.000 stambenih zajednica [25], a samo četiri od njih funkcionišu kao kupci-proizvođači [16], važno je omogućiti članovima stambenih zajednica da na svojim posebnim delovima objekta izgrade proizvodne sisteme iz OIE i priključe ih na interne instalacije. Ovim korakom bi stambene zajednice postale samostalni kupci-proizvođači, čime bi se povećala njihova

energetska efikasnost i doprinos energetske tranziciji [26].

Takođe, potrebno je omogućiti zakup zajedničkih delova stambenih zgrada za izgradnju elektrana iz OIE, što bi značajno doprinelo ubrzanju energetske tranzicije. Ovaj pristup omogućio bi korišćenje neiskorišćenih krovova i drugih zajedničkih prostora za instalaciju proizvodnih objekata iz OIE, što bi povećalo energetske autonomiju i smanjilo zavisnost od centralizovanog snabdevanja.

Uz ove mere, bilo bi korisno regulativom definisati obavezne standarde za nove građevinske projekte, kako bi se olakšala kasnija instalacija solarnih sistema. Na primer, trebalo bi osigurati da sve nove zgrade budu „solar ready“, što bi omogućilo bržu i jednostavniju ugradnju solarnih panela. Dodatno, mogla bi se uvesti obavezna ili stimulativna politika za instalaciju solarnih sistema u određenim vrstama objekata, sa jasno definisanim rokovima i kriterijumima za sve:

- nove javne i poslovne objekte čija korisna površina prelazi propisanu granicu, počev od određene godine,
- postojeće javne i poslovne objekte čija korisna površina prelazi određenu vrednost, počev od određene godine,
- nove stambene objekte, počev od određene godine.

Ove mere ne samo da bi podstakle širu upotrebu OIE, već bi osigurale da energetska tranzicija bude sistemski integrisana u urbanističke i građevinske planove, čime bi se postigao održiviji i energetski efikasniji razvoj.

Aktivni kupci

Da bi se stvorio povoljan okvir za razvoj aktivnih kupaca i omogućila im se veća autonomnost, potrebno je rešiti nekoliko ključnih barijera:

- potrebno je precizno definisati status i obaveze aktivnih kupaca kroz propise, kako bi se eliminisale nejasnoće i omogućilo jednostavno prepoznavanje i implementacija ovog statusa. Jasna pravila pomoći će krajnjim kupcima da lakše postanu aktivni kupci,
- aktivni kupci trenutno imaju iste procedure za priključenje kao proizvođači, što može biti administrativni izazov. Potrebno je razmotriti olakšanje tih procedura i smanjenje obaveza, naročito za industrijske kupce koji žele postati delimično autonomni,
- granica snage između kupaca-proizvođača i aktivnog kupca trenutno je 150 kW, što je premala vrednost kako je opisano u prethodnom poglavlju,
- aktivni kupci mogu pružati pomoćne usluge, kao što su redišpećing ili upravljanje potrošnjom što im može doneti značajne uštede i prihode, čime bi se podstakao njihov razvoj. Potrebno je omogućiti im olakšice za učešće u ovim mehanizmima,
- potrebno je pojednostaviti administrativne procedure za aktivne kupce.

Kroz ove korake bi se omogućilo većem broju krajnjih kupaca da postanu aktivni, smanjujući zavisnost od sistema i čineći elektroenergetski sistem efikasnijim i stabilnijim.

Zajednice OIE i energetske zajednice građana

Zajednice imaju ključna prava i obaveze koja omogućavaju njihov doprinos energetske tranziciji, a to uključuje:

- pravo na proizvodnju, potrošnju, skladištenje i prodaju električne energije,
- pravo na pristup svim tržištima energije, bilo direktno ili preko agregatora, na nediskriminatoran način,
- druga prava i obaveze koja se odnose na povlašćenog proizvođača [1,11].

Razlika između zajednica OIE i energetske zajednice građana leži u tome što zajednice OIE moraju izgraditi proizvodni objekat iz OIE, dok u energetskim zajednicama građana nije obavezno da se proizvodi energija iz OIE.

Zajednice OIE su propisima definisane pre više od dve godine, ali do sada nijedna nije formirana. Stoga je važno promovisati ove zajednice kako bi se što više lokalnih samouprava uključilo, kao i širi broj fizičkih i pravnih lica. Smatra se da će ovaj model prvo biti primenjen u lokalnim samoupravama, a zatim se proširiti među fizičkim i pravnim licima. Putem zajednica OIE, moguće je povećati udeo OIE u energetskom miksu na održiv način, jer će se proizvodni objekti graditi u blizini mesta potrošnje, što je ključno za smanjenje negativnih efekata na elektroenergetski sistem [13].

Takođe, važno je razmisliti o proširenju i omogućiti da stanovnici drugih lokalnih samouprava mogu učestvovati u zajednicama, u skladu sa Direktivama EU.

Promocija energetske zajednice građana je takođe ključna, jer one omogućavaju postizanje ciljeva zaštite životne sredine, smanjenja zagađenja i unapređenja energetske efikasnosti kroz korišćenje OIE. Članovi ovih zajednica ostvaruju uštede, što ih dodatno motiviše da investiraju. Oni koji su skeptični mogu početi sa minimalnim investicijama u OIE, a kako se uveravaju u koristi, mogu povećati svoj ulog. Ovo je odličan način za širenje svesti o energetske tranziciji i njenim prednostima.

VI ALTERNATIVE ZA FLEKSIBILNOST

Kako se broj novih korisnika elektroenergetskog sistema povećava, uključujući proizvođače električne energije iz OIE, kupce-proizvođače, skladišta energije, punionice električnih vozila i druge, suočavamo se sa značajnim izazovima u planiranju i upravljanju elektroenergetskim sistemom. Promene u strukturi potrošnje i proizvodnje električne energije, koje su rezultat energetske tranzicije, stvaraju dodatne poteškoće u balansiraju sistema, povećavajući gubitke i otežavaju efikasno upravljanje. Osim toga, zbog varijabilnosti izvora energije, kao što su solarne i vetroelektrane, postaje teže precizno predvideti količine energije koje će biti proizvedene u određenim vremenskim intervalima.

Ovi izazovi donose neophodnost ulaganja u modernizaciju infrastrukture, kao i u razvoj novih mehanizama i tehnologija koji će omogućiti stabilno i sigurno funkcionisanje sistema. Povećani operativni troškovi i potrebne investicije u kapacitete dovode do smanjenja raspoloživih slobodnih kapaciteta za priključenje novih korisnika. U tom kontekstu, ključno je raditi na povećanju fleksibilnosti sistema kako bi se uspešno odgovorilo na ove nove izazove. U tom svetlu domaćim propisima definisani su različiti tržišni mehanizmi koji doprinose fleksibilnosti sistema a koji će biti opisani u produžetku.

Agregatori

Krajnji kupci, kupci-proizvođači, proizvođači, skladišta energije i

drugi učesnici na tržištu mogu se objediniti u agregatorske grupe putem agregatora, što omogućava lakši plasman električne energije na tržištu (ukrupnjavanje ponude), pružanje pomoćnih usluga operatoru sistema, kao što su redispečing, ili postupanje po nalogu agregatora u cilju smanjenja troškova debalansa. Članovi agregatorske grupe primaju naloge od agregatora kada je potrebno povećati ili smanjiti njihovo preuzimanje ili isporuku električne energije u elektroenergetski sistem, za šta ostvaruju finansijske nadoknade, popuste na električnu energiju i slične benefite [1, 27].

Agregatorske grupe mogu imati ključnu ulogu u optimizaciji upravljanja sistemom, naročito u smanjenju zagušenja u sistemu i smanjenju troškova debalansa za balansno odgovorne strane. Stoga je važno sprovesti edukaciju kako među građanima, tako i među privrednicima, o važnosti agregatora i podsticati razvoj agregatorskog poslovanja u Republici Srbiji.

Skladištari

Skladišta energije [1] igraju ključnu ulogu u energetske tranziciji, posebno u sistemima sa velikim udelom proizvodnje iz OIE. Pored finansijskih interesa vlasnika skladišta, snabdevača i balansno odgovornih strana, skladišta imaju značajnu ulogu u balansiranju elektroenergetskog sistema, kao i u pružanju usluga redispečinga i pomoćnih usluga, koje omogućavaju efikasno upravljanje potrošnjom i proizvodnjom.

U tom kontekstu, od suštinskog je značaja sprovesti edukaciju među građanima i privrednicima o značaju skladištenja energije i njegovim prednostima, kako bi se podstakla ulaganja u ovu tehnologiju. Takođe, potrebno je motivisati skladištare da započnu poslovanje u Republici Srbiji, jer njihovo učešće može značajno doprineti energetske tranziciji, olakšavajući upravljanje sistemom i rad balansno odgovornih strana.

Tržište pomoćnih usluga i redispečing

Redispečing i pomoćne usluge [1] predstavljaju ključne mehanizme u upravljanju elektroenergetskim sistemom sa značajnim udelom distribuirane proizvodnje iz varijabilnih izvora energije. Ovi alati omogućavaju efikasno upravljanje sistemom kroz optimizaciju postojećih resursa - proizvodnih objekata, potrošnje i skladišta, čime se doprinosi stabilnosti sistema i integraciji novih kapaciteta iz OIE uz minimalna ulaganja u infrastrukturu.

Kako bi se omogućila efikasna implementacija ovih mehanizama, neophodno je razviti tržište pomoćnih usluga i redispečinga, kao i uspostaviti sistem koji bi omogućio procenu potrebe za ovim uslugama, izdavanje naloga za redispečing i praćenje njihove realizacije. Pored toga, edukacija učesnika na tržištu koji mogu pružati ove usluge je od ključnog značaja, kao i podsticanje njihovog aktivnog angažovanja. Takođe, potrebno je razviti isplativ model koji će motivisati tržišne učesnike da pruže ove usluge operatoru sistema, čime bi se olakšalo upravljanje elektroenergetskim sistemom i podržao proces energetske tranzicije.

Upravljanje potrošnjom

Tradicionalni pristup upravljanju elektroenergetskim sistemom podrazumevao je da se proizvodnja energije prilagođava potrošnji, što je bilo omogućeno dominacijom fosilnih goriva u proizvodnji i relativnom predvidljivosti potrošnje. Ovaj sistem je omogućavao efikasno upravljanje bez većih poremećaja. Međutim, energetska tranzicija, koja uključuje integraciju

distribuiranih izvora energije i promene u obrascima potrošnje, donosi nove izazove. Promene u potrošnji, kao što su unapređenje energetske efikasnosti, uvođenje novih uređaja i tehnologija, kao i razvoj sistema za skladištenje energije, izazivaju promene u tokovima snage unutar distributivnog sistema, što otežava njegovo upravljanje. Zagušenja i povećani gubici postaju česti problemi, čime je postalo neophodno prilagoditi potrošnju proizvodnji.

Efikasno upravljanje opterećenjem sistema postaje ključno kako bi se rasteretile ili dodatno opteretile određene tačke u sistemu, naročito u oblastima gde se javljaju zagušenja. Ovakvo upravljanje omogućava oslobađanje kapaciteta za priključenje novih korisnika uz minimalna ulaganja u infrastrukturu i smanjenje gubitaka. U tom smislu, razvijanje šema upravljanja potrošnjom, kako sa regulatorne tako i sa tehničke strane, postaje prioritet.

Svi korisnici sistema koji žele da doprinesu energetske tranziciji, dok istovremeno maksimiziraju svoje uštede, moraju pratiti različite signale tržišta. Na primer, industrijski objekti treba da upravljaju mašinama, dok domaćinstva treba da prilagode rad sistema za grejanje i hlađenje prema signalima, a ne prema trenutnim željama korisnika. Ovaj aspekt energetske tranzicije često predstavlja prepreku, jer korisnici često nisu spremni da se odreknu svog komfora u cilju ubrzanja energetske tranzicije i postizanja ušteda. Zbog toga je nužno sprovesti edukacije koje će korisnicima omogućiti bolje razumevanje njihovog doprinosa društvu, kroz smanjenje uticaja na životnu sredinu i ostvarivanje sopstvenih ušteda.

Mogućnosti udruživanja i prodaje električne energije za napajanje susednih objekata

Regulativa prepoznaje energetske zajednice građana i zajednice OIE kao oblik udruživanja, međutim, neophodno je dalje razvijati koncepte koji omogućavaju efikasnije upravljanje energijom, kao što su koncepti peer-to-peer [28] snabdevanja i iznajmljivanja krovova. Peer-to-peer snabdevanje omogućava direktnu razmenu električne energije između korisnika u susednim objektima, čime se smanjuje potreba za korišćenjem centralizovanih mreža i doprinosi većoj autonomnosti korisnika. S druge strane, iznajmljivanje krovova omogućava trećim stranama, koje žele da investiraju u OIE, ali nemaju prostor za instalaciju opreme, da iskoriste krovove drugih objekata za postavljanje svojih sistema, poput solarnih panela.

Ovaj model može značajno olakšati upravljanje elektroenergetskim sistemom, smanjujući uticaj varijabilnih izvora energije na naponske prilike i smanjujući gubitke u sistemu. Dodatno, omogućava bolju raspodelu energije, jer se proizvodnja može odvijati u neposrednoj blizini potrošnje.

Kako bi ovi koncepti mogli postati efektivni, neophodno je da se u Republici Srbiji, kako na regulatornom, tako i na praktičnom nivou, razvijaju i implementiraju okviri koji omogućavaju ovakve oblike udruživanja i poslovanja.

Dinamičke tarife

U cilju ubrzanja energetske tranzicije, sve više se razmatra primena koncepta dinamičkih tarifa [1,10] za pristup elektroenergetskom sistemu i prodaju električne energije. Dinamičke tarife imaju za cilj da odražavaju realnu situaciju na

tržištu i u elektroenergetskom sistemu, pri čemu bi cene bile niže kada je ponuda energije veća, a više kada je potražnja ili opterećenje sistema veće. Ovaj pristup omogućava veću fleksibilnost sistema i efikasnije upravljanje njegovim radom, čime se doprinosi stabilnosti i optimizaciji.

Početna primena dinamičkih tarifa može se očekivati u industriji, budući da je u privredi lakše upravljati procesima koji su povezani sa potrošnjom električne energije. Takođe, industrijski subjekti suočavaju se sa višim cenama energije u poređenju sa domaćinstvima, što čini primenu dinamičkih tarifa ekonomičnijom za ovaj sektor.

Kako bi se uspešno implementirao ovaj koncept, potrebno je intenzivirati rad na razvoju dinamičkih tarifa i obezbediti odgovarajuće preduslove za njihovu primenu. Osim toga, važan je i proces edukacije koji bi uključivao kako domaćinstva, tako i privredu, snabdevače, agregatore, ODS, balansno odgovorne strane i druge učesnike. Dinamičke cene mogu značajno doprineti ubrzanju energetske tranzicije kroz rasterećenje sistema, lakše upravljanje, sprečavanje zagušenja u mreži i oslobađanje kapaciteta za priključenje novih korisnika sistema, čime se omogućava efikasnije korišćenje postojećih resursa i doprinos održivosti energetskog sistema.

VII ZAKLJUČAK

Neophodnost energetske tranzicije je neupitna i predstavlja ključni korak ka održivom razvoju. Da bi se uspešno sproveda, potrebno je preduzeti sveobuhvatan pristup koji uključuje kadrovska, tehnička i finansijska poboljšanja u oblasti ODS i samog distributivnog sistema. To podrazumeva ulaganja u infrastrukturu, proizvodne objekte za proizvodnju električne energije iz OIE, kao i u tržišne mehanizme koji omogućavaju i podržavaju ovu tranziciju.

Osim toga, neophodno je temeljno preispitati postojeću regulativu koja se odnosi na proizvodne objekte iz OIE, kao i na tržište električne energije, kako bi se stvorili povoljniji uslovi za priključenje novih objekata na elektroenergetski sistem. S obzirom na rastuću potrebu za smanjenjem administrativnih barijera, važno je pojednostaviti procedure za priključenje i redovan rad tih objekata. Time bi se omogućilo korisnicima sistema, koji žele da učestvuju u energetske tranziciji, da to učine na jednostavan i ekonomski isplativ način, bez potrebe za neosnovano visokim investicijama i operativnim troškovima. Takođe, cena električne energije treba da odražava stvarne troškove i podstakne građane na aktivnije učešće u energetske tranziciji, kako kroz direktne uštede, tako i kroz dodatne prihode od tržišnih mehanizama. Ove promene će doprineti bržem razvoju energetske tranzicije i efikasnijem korišćenju OIE.

ZAHVALNICA

Autorke izražavaju zahvalnost Evropskoj fondaciji za klimu (*European Climate Foundation*) na podršci u realizaciji ove studije i naučnog rada. Takođe, druga i treća autorka izražavaju zahvalnost Ministarstvu nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije za njihovu finansijsku podršku.

LITERATURA

- [1] Zakon o energetici, ("Sl. glasnik RS", br. 145/2014, 95/2018 - dr. zakon, 40/2021, 35/2023 - dr. Zakon, 62/2023 i 94/2024),

- https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_energetici.html [pristupljeno 05.12.2024]
- [2] Izmene i dopune trogodišnjeg programa poslovanja Elektro distribucije Srbije za period 2024-2026, https://elektrodistribucija.rs/o-nama/informacije/informacije_o_poslovanju/dokumenta/Izmene_3PP_2024-2026.pdf [05.12.2024]
- [3] Izveštaj o radu Agencije za energetiku Republike Srbije za 2023. godinu, <https://www.aers.rs/Files/Izvestaji/Godisnji/Izvestaj%20Agencije%202023.pdf> [pristupljeno 05.12.2024]
- [4] Uredba o uslovima isporuke i snabdevanja električnom energijom, ("Sl. glasnik RS", br. 84/2023), https://www.paragraf.rs/propisi/uredba_o_uslovima_iskoruke_i_snabdevanja_a_elektricnom_energijom.html [pristupljeno 05.12.2024]
- [5] Metodologija za određivanje cene pristupa sistemu za distribuciju električne energije, <https://www.aers.rs/metodologije-za-odre%C4%91ivanje-cena-1> [05.12.2024]
- [6] Cena pristupa sistemu za distribuciju električne energije, <https://elektrodistribucija.rs/usluge/dokumenta/2025-10-01%20Cenovnik%20EDS.pdf> [pristupljeno 05.12.2024]
- [7] Godišnji izveštaj o poslovanju Elektro distribucije Srbije za 2023. godinu, https://elektrodistribucija.rs/o-nama/informacije/informacije_o_poslovanju/dokumenta/Final%20Godi%C5%A1niji%20Izve%C5%A1taj%20o%20poslovanju%20za%202023%20godinu%20sa%20Odlukom-potpisan.pdf [pristupljeno 05.12.2024]
- [8] Direktiva EU 944, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/944/oj> [pristupljeno 05.12.2024]
- [9] Grujić, D., Kuzman, M., Đurišić, Ž. Unapređivanje načina obračuna pristupa distributivnom sistemu električne energije, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 4, pp. 28-37, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-4.28G>
- [10] Grujić, D., Kuzman, M., Đurišić, Ž. Upotreba cenovnih signala u cilju ubrzanja energetske tranzicije, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 4, pp. 11-18, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE24-4.11G>
- [11] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije ("Sl. glasnik RS", br. 40/2021 i 35/2023), <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-korisccenju-obnovljivih-izvora-energije.html> [pristupljeno 05.12.2024]
- [12] Uredba o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupca – proizvođača i snabdevača, "Službeni glasnik RS", br. 83 od 27. avgusta 2021, 74 od 1. jula 2022, <https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgrs/vlada/uredba/2021/83/1/reg> [pristupljeno 05.12.2024]
- [13] Kuzman, M., Grujić, D. Uloga zajednica obnovljivih izvora energije u energetske tranziciji, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 1, pp. 40-50, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-1.40K>
- [14] Metodologija za određivanje cene pristupa sistemu za prenos električne energije, <https://www.aers.rs/metodologije-za-odre%C4%91ivanje-cena-1> [pristupljeno 05.12.2024]
- [15] Pravila o radu tržišta električne energije, <https://ems.rs/wp-content/uploads/2022/12/Pravila-o-rad-trzista-elektrcn-1.pdf> [pristupljeno 05.12.2024]
- [16] Registar kupaca-proizvođača, Elektro distribucija Srbije d.o.o. Beograd, <https://elektrodistribucija.rs/pdf/DOMACINSTVA.pdf> [pristupljeno 05.12.2024]
- [17] Uredba o mrežnim pravilima koja se odnose na priključenje na mrežu proizvodnih jedinica ("Sl. glasnik RS", br. 95/2022), http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/2022_08/SG_095_2022_002.htm [pristupljeno 05.12.2024]
- [18] Pravilnik o posebnoj vrsti objekata i posebnoj vrsti radova za koje nije potrebno pribavljati akt nadležnog organa, kao i vrsti objekata koji se grade, odnosno vrsti radova koji se izvode, na osnovu rešenja o odobrenju za izvođenje radova, kao i obimu, sadržaju i kontroli tehničke dokumentacije koja se prilaže uz zahtev i postupku koji nadležni organ sprovodi ("Sl. glasnik RS", br. 87/2023 i 16/2024), <https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik-posebne-vrste-objekata-radova-za-koje-nije-potrebno-pribavljati-akt.html> [pristupljeno 05.12.2024]
- [19] Uputstvo za priključenje kupaca-proizvođača koji su domaćinstva, <https://energetskiportal.rs/uputstvo-za-individualna-domacinstva-o-nacinu-sticanja-statusa-kupac-proizvodjac/> [pristupljeno 05.12.2024]
- [20] Uputstvo za priključenje kupaca-proizvođača koji su stambene zajednice, <https://elektrodistribucija.rs/usluge/postupak-prikljucenja-na-dsee/postupak->

- [sticanja-statusa-kupca-proizvodjaca/stambene_zajednice](#) [pristupljeno 05.12.2024]
- [21] Uputstvo za priključenje kupaca-proizvođača sa proizvodnim objektom od 10,8 do 50 kW, https://elektrodistribucija.rs/usluge/postupak-prikljucenja-na-dsee/postupak-sticanja-statusa-kupca-proizvodjaca/objekti_koji_nisu_domacinstva [pristupljeno 05.12.2024]
- [22] Opšti tehnički uslovi za priključenje proizvodnih objekata kupaca-proizvođača, <https://elektrodistribucija.rs/pdf/Opsti%20uslovi.pdf> [pristupljeno 05.12.2024]
- [23] Funkcionalni zahtevi i tehničke specifikacije AMI/MDM sistema, sveska 1, Tehničke specifikacije brojala električne energije i komunikacionih uređaja, https://elektrodistribucija.rs/interni_standardi/pravila/Functional_requirements_AMI_MDM_system_version_3.0_sr_F1.pdf [pristupljeno 05.12.2024]
- [24] 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 ("Sl. glasnik RS", br. 33/2022), <https://www.paragraf.rs/dnevne-vesti/290422/290422-vest11.html> [pristupljeno 05.12.2024]
- [25] Jedinstvena evidencija stambenih zajednica u Republici Srbiji, <https://katastar.rgz.gov.rs/stambenezajednice/> [pristupljeno 05.12.2024]
- [26] Grujić, D., Kuzman, M. Stambena zajednica u ulozi kupca-proizvođača, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 26, No. 1, pp. 11-21, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE24-1.11G>
- [27] Grujić, D., Kuzman, M. Uloga agregatora u razvoju tržišta električne energije, *Elektroprivreda*, Vol. 1, No. 1, pp. 15-29, 2023. <https://doi.org/10.18485/epij.2023.1.1.2>
- [28] DIRECTIVE (EU) 2018/2001, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018L2001> [pristupljeno 05.12.2024]

AUTORI

Dunja Grujić - Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, dunja.grujic@flaner.rs, ORCID [0000-0001-9298-6249](https://orcid.org/0000-0001-9298-6249)

Jelisaveta Krstivojević - Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, j.krstivojevic@etf.rs, ORCID [0000-0003-4906-6433](https://orcid.org/0000-0003-4906-6433)

Jelena Stojković Terzić - Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, jstojkovic@etf.rs, ORCID [0000-0002-6948-3755](https://orcid.org/0000-0002-6948-3755)

Energy Transition Challenges in the Distribution System: Critical Analysis and Proposals for Addressing Them

Abstract - The necessity of the energy transition is obvious in the conditions of significant environmental pollution and global warming, which we are witnessing. This paper will analyse the challenges for the implementation of the energy transition related to the distribution power system and provide suggestions for overcoming them. For the energy transition, among other things, a stable distribution power system and a reliable distribution system operator are necessary. In this regard, an overview of the current state of the distribution system operator as well as the distribution power system itself will be given through a review of the technical condition, regulations, finances, business plans and capacities for connecting production facilities from renewable energy sources. By reviewing the current state of operators and systems, challenges and barriers to the implementation of the energy transition will be identified. Also, suggestions will be given for overcoming the perceived challenges and barriers. The paper will specifically analyse the possibilities of integrating production facilities from renewable energy sources into the distribution system. Different concepts of using renewable energy sources will be presented, as well as the current level of their integration into the distribution system. Challenges for increasing the capacity of production facilities from renewable energy sources connected to the distribution system will be identified and suggestions will be made for overcoming them through proposals for improving regulations, technical solutions for connecting to the system, methods of electricity billing and additional possibilities, including aggregation, auxiliary services, redispatching and storage of electricity.

Index terms - Energy transition, Distribution system, Renewable energy sources, Flexibility

Metodologija proračuna ugljeničnog otiska proizvoda na primeru mlekare

Mladen Josijević, Dušan Gordić, Vanja Šušteršič, Vladimir Vukašinović, Dubravka Živković, Jelena Nikolić

Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Rezime - U radu je predložena metodologija za proračun emisija CO₂ po proizvodu. Razvijena metodologija se bazira na detaljnom energetskom pregledu postrojenja radi utvrđivanja tokova energije i sirovina i primeni GHG protokola za proračun ugljeničnog otiska. Emisioni koeficijenti su usvojeni pregledom literature i relevantnih baza podataka. Metodologija je testirana na studiji slučaja, preduzeću iz sektora mleka i mlečnih proizvoda.

Ključne reči - Ugljenični otisak proizvoda, mlekara, CO₂ emisije

1 UVOD

Da bi se globalno zagrevanje ograničilo na znatno ispod 2 °C, kako je dogovoreno Pariskim sporazumom, neophodna su brza i u većini slučajeva trenutna smanjena emisija gasova sa efektom staklene bašte (GHG) u svim sektorima [1]. Apsolutno smanjenje emisija postaje prioritet, posebno u smislu postizanja nulte emisije GHG gasova do 2050. godine [2], s obzirom na ciljeve postavljene Evropskim zelenim dogovorom [3] kao i paketom Fit for 55 [4].

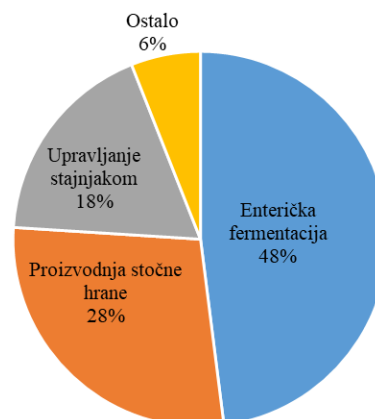
Stoga se korporativna klimatska akcija sve više smatra važnom u pokretanju tranzicije ka ekonomiji sa niskim sadržajem ugljen-dioksida [5]. Od 2025. godine stupila je na snagu Direktiva o izveštavanju o korporativnoj održivosti (eng. *Corporate Sustainability Directive* (CSRD)) [6] kojom se od preduzeća traži da izveštavaju o nefinansijskim informacijama uključujući ESG (eng. *European sustainability reporting*) [7] izveštavanje, uzimajući u obzir ugljenični otisak preduzeća.

U prelaznom periodu, od usvajanja direktive, kompanije su se fokusirale na izveštavanje o emisijama koje su pod njihovom direktnom vlasničkom i/ili operativnom kontrolom (emisije u okviru opsega 1 (eng. *Scope 1*) kao i emisije od kupljene energije (Scope 2), dok je izveštavanje o emisijama u okviru Scope 3 najčešće izuzeto. Nasuprot, u većini industrijskih grana, a posebno u sektoru prerade hrane ove emisije su dominantne pa je iz tog razloga neophodno izveštavanje i o ovim emisijama [8]. Na primer, u sektoru prerade mleka, emisije iz opsega 3 (Scope 3) čine oko 70-80% svih emisija [9].

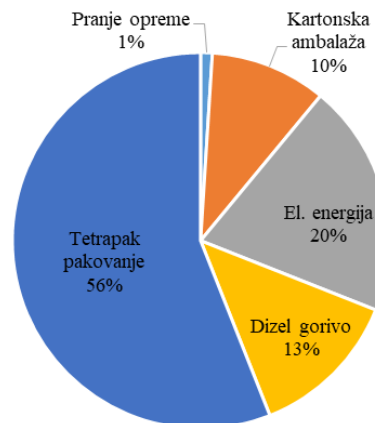
Emisije gasova sa efektom staklene bašte poreklom iz sektora prerade mleka se iz godine u godinu povećavaju zbog kontinualnog porasta konzumiranja mleka i mlečnih proizvoda i porasta populacije [10]. Očekivani porast proizvodnje mleka na globalnom nivou je za oko 1,4% godišnje [11]. Učešće ovog sektora u ukupnim emisijama u zemljama EU je oko 5% [12].

Stoga, smanjenje intenziteta emisija GHG u ovom sektoru predstavlja ključni izazov postizanja održivosti.

Proračun ugljeničnog otiska farmi kao dominantnih izvora emisija kada su u pitanju mleko i mlečni proizvodi je predmet analize u mnogim naučnoistraživačkim radovima [11, 13-16]. Prema [11] na farmama u Mongoliji se emituje od 1,6 kgCO_{2e} do 3,4 kgCO_{2e} po litri sirovog mleka. Varijacije u emisijama su posledica načina čuvanja, načina ishrane i upravljanja stajnjakom. Najveći udeo u emisijama (često preko 50% [15,16]) čine emisije metana (CH₄), kao posledica enteričke fermentacije pri procesu varenja goveda, ali i emisije iz stajnjaka. Na slici 1 prikazani su udeli pojedinačnih emisija u ukupnim emisijama na farmama u Kanadi.



Slika 1. Emisije CO_{2e} na farmama u Kanadi [15]

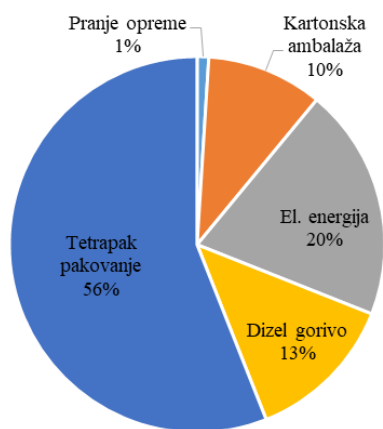


Slika 2. Pojedinačne emisije CO_{2e} pri procesu proizvodnje mlečnih proizvoda [16]

U Španiji su izračunate emisije poreklom sa farmi, koje se kreću u granicama od 1,23 kgCO₂/kg do 1,31 kgCO₂/kg [14], dok su prosečne vrednosti emisija u Italiji oko 1,26 kgCO_{2e}/kg, Austriji 1,1 kgCO_{2e}/kg, i Irskoj 1,26 kgCO₂/kg. U zemljama zapadne Evrope emisije sa farmi su u granicama od 1,1 do 1,52 kgCO_{2e}/kg sirovog mleka.

Emisije ekvivalentnog ugljen-dioksida koje nastaju u toku procesa proizvodnje mlečnih proizvoda čine obično oko 15% u ukupnim emisijama CO_{2e} [16]. Na slici 2., prikazani su izvori emisija koje nastaju u procesu proizvodnje mlečnih proizvoda.

Sa slike se može zaključiti da su dominantne emisije one koje nastaju pri procesu proizvodnje ambalaže za mlečne proizvode koje čine čak 56% (96 gCO_{2e}/kg). Ukupna potrošnja energije je odgovorna za 33% emisija koje nastaju pri procesu obrade mleka, a u ukupnim emisijama čini udeo od oko 5%.



Slika 2. Pojedinačne emisije CO_{2e} pri procesu proizvodnje mlečnih proizvoda [16]

Kada je u pitanju proračun ugljeničnog otiska proizvoda, uglavnom su u radovima predložene metodologije koje su vrlo kompleksne, zahtevaju relativno veliki broj ulaznih parametara koji često nisu raspoloživi i ne uzimaju u obzir emisije iz opsega 3, koje su ujedno dominantne.

Zbog svega prethodno navedenog u ovom radu biće prikazana relativno jednostavna metodologija za utvrđivanje ugljeničnog otiska proizvoda, koja se bazira na sprovođenju energetskeg pregleda radi utvrđivanja tokova energije i primeni metodologije predložene GHG protokolom. Metodologija obuhvata i emisije iz opsega 3. Predložena metodologija se uz adekvatne modifikacije može primeniti na više grana prehrambene industrije.

II METODOLOGIJA PRORAČUNA UGLJENIČNOG OTISKA PROIZVODA

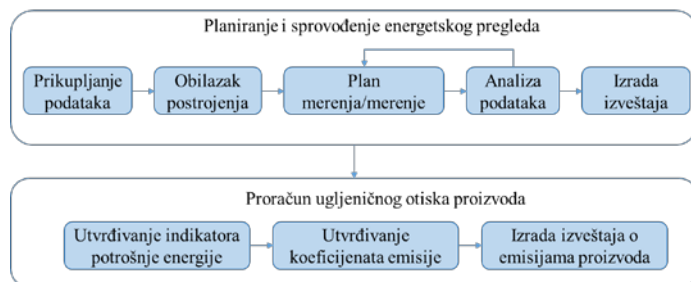
Metodologija proračuna emisija CO₂ po proizvodu prikazana je na slici 3. Predložena metodologija se sastoji iz dva osnovna koraka, a to su:

- planiranje i sprovođenje energetskeg pregleda i
- proračun ugljeničnog otiska proizvoda.

II-1 Planiranje i sprovođenje energetskeg pregleda

Kako bi se utvrdili procentualni udeli potrošnje različitih oblika energije i energenata po proizvodu neophodno je izvršiti detaljan energetski pregled preduzeća koji se zasniva na standardu ISO

50002:2014. Prema standardu, energetski pregled se sastoji od sledećih faza (slika 3) [17]: prikupljanje podataka, obilazak lokacije postrojenja, sprovođenje plana merenja i obavljanje merenja, analiza podataka i izrada izveštaja [18].



Slika 3. Blok šema predložene metodologije

Prikupljanje podataka

Prvi korak pri izradi energetske revizije je prikupljanje detaljnih podataka o postojanju koje je predmet energetske analize. Kako bi se lakše prikupili, a u narednoj fazi i analizirali prikupljeni podaci, neophodna je saradnja rukovodstva preduzeća (odgovornih lica) i upoznavanje energetskeg savetnika sa procesima i tokovima energije unutar pojedinačnih procesa i postrojenja kao celine. Nakon prve posete preduzeću i intervju sa rukovodiocima, pristupa se izradi plana sprovođenja energetskeg pregleda. Na kraju ove faze energetskeg pregleda, energetski savetnik donosi odluku o dodatnim aktivnostima (merenjima) koje je neophodno izvršiti kako bi se dobila šira slika o tokovima energije unutar proizvodnog preduzeća.

Obilazak postrojenja

Obilazak postrojenja predstavlja važan korak u sprovođenju energetskeg pregleda postrojenja. Cilj obilaska je upoznavanje sa proizvodnim procesima, utvrđivanje tokova sirovine i energije i prikupljanje informacija neophodnih za naredne korake u sprovođenju energetskeg pregleda.

Plan merenja i merenje

Potrošnja energije svakog pojedinačnog procesnog aparata ili mašine se često značajno razlikuje od projektovane ili od one koju propisuje proizvođač. S tim u vezi, merenje predstavlja neizbežnu fazu pri izradi svakog energetskeg pregleda. Merenjem potrošnje energije svakog pojedinačnog uređaja u proizvodnoj liniji povećava se baza podataka, koja u narednoj fazi izrade energetskeg pregleda omogućava lakše razumevanje energetskeg tokova i proračun specifičnih indikatora (pokazatelja) potrošnje energije.

Analiza stanja i predlog mera

U ovoj fazi izrade energetskeg pregleda preduzeća na osnovu prikupljenih podataka i izmerenih vrednosti potrošnje energije pristupa se utvrđivanju specifičnih indikatora potrošnje (kWh/toni prerađenog mleka, kWh/toni gotovog proizvoda i dr.). Proračunava se udeo potrošnje pojedinih uređaja u ukupnoj potrošnji energije i mapiraju se lokacije (kritične tačke) sa mogućnošću smanjenja potrošnje energije implemtacijom mera energetskeg efikasnosti.

Obzirom na to da se u mlekarima najčešće proizvode više

različitih proizvoda, neophodno je za svaki od njih, odrediti potrošnju energije za svaku tehničku operaciju koja se sprovodi u procesu proizvodnje. Najčešće procesne operacije koje troše električnu energiju u mlekarnama su: procesno hlađenje i hlađenje proizvoda, homogenizacija, separacija, mešanje, transport materijala (pumpa) [19]. Procesne operacije koje zahtevaju toplotnu energiju su pasterezacija i kuvanje.

Potrošnju električne energije svakog pojedinačnog uređaja, zbog promenljivog opterećenja, najbolje je izmeriti u realnim eksploatacijskim uslovima korišćenjem adekvatne merne opreme (trofazni analizator snage, merna klešta...) ili proceniti na osnovu nominalne snage i godišnjeg časovnog angažovanja [20]:

$$E = P \cdot T \text{ [kWh/y]} \quad (1)$$

gde su:

E [kWh/y] - potrošnja električne energije na godišnjem nivou,

P [kW] - nominalna snaga,

T [h/y] - procenjeno godišnje časovno angažovanje

Za električne uređaje kod kojih potrošnja energije zavisi od više faktora (npr. kod rashladnih sistema, od količine i temperature sirovine koja se podvrgava hlađenju, spoljne temperature i dr.) vrši se merenje potrošnje u dužem vremenskom intervalu (najmanje mesec dana) ili izračunavanje potrošnje na osnovu količine energije potrebne za hlađenje proizvoda i vrednosti koeficijenta performansi rashladnog uređaja:

$$E = M \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot COP^{-1} \quad (2)$$

gde su:

M [kg] - masa proizvoda koji se hladi,

c_p [kWh/kgK] - specifična toplota,

ΔT [K] - razlika između početne i krajnje (željene) temperature proizvoda,

COP [-] - koeficijent performansi rashladnog uređaja.

Na isti način, potrošnja toplotne energije jednaka je količini energije potrebnoj da se proizvod koji se tretira zagreje sa početne na neku krajnju procesom zahtevanu temperaturu:

$$Q = M \cdot c_p \cdot \Delta T \cdot \eta^{-1} \quad (3)$$

gde je η [-] efikasnost sistema grejanja.

Pri proračunu količine rashladne i toplotne energije za potrebe procesa, neophodno je precizno usvojiti vrednosti specifičnih toplota. One se bitno razlikuju od faze do faze proizvodnje na istoj proizvodnoj liniji, jer se menjaju temperatura i svojstva materije. Vrednosti specifičnih toplota za karakteristične proizvode od mleka prikazane su u tabeli 1.

Tabela 1. Srednje specifične toplote za različite proizvode od mleka [21, 22]

	Specifična toplota [kJ/kgK]
Punomasno mleko	3,914
Obrano mleko	3,97
Jogurt	3,5
Sir	3,27
Pavlaka	3,51-3,56
Kiselo mleko	3,5
Drobljeni sir	3,5

Nakon utvrđivanja potrošnje električne i toplotne energije za svaki od pojedinačnih potrošača, pristupa se utvrđivanju indikatora specifične potrošnje energije (kWh/toni prerađenog mleka, kWh/toni gotovog proizvoda i dr.) [23, 24]). Takođe, proračunavaju se udeli pojedinih komponenata koje figurišu u sastavu proizvoda (voda, so, aditivi, palmino ulje i dr.), ali i transportni troškovi, ambalaža i dr. Nakon ove vaze, sledi proračun ugljeničnog otiska proizvoda baziran na GHG protokolu.

II-2 Proračun ugljeničnog otiska proizvoda

Proračun ugljeničnog otiska proizvoda zahteva sveobuhvatnu procenu emisija gasova sa efektom staklene bašte u svim fazama proizvodnog lanca, od ulaza sirovine i ambalaže do kraja životnog veka proizvoda uključujući pritom direktne i indirektne emisije.

Predložena metodologija za izračunavanje ugljeničnog otiska proizvoda je u skladu sa smernicama navedenim u međunarodno priznatim standardima, uključujući Izveštaj o klimatskim promenama iz 2023. godine (eng. 2023 IPCC Report on Climate Change [25]), protokol o gasovima sa efektom staklene bašte (eng. GHG Protocol [26]) i standarde ISO 14040 i ISO 14044. Uticaji svih gasova sa efektom staklene bašte izraženi su preko ekvivalentnog CO_{2e} što je definisano jednačinom 4 [27].

$$CO_{2e} = GHG \cdot GWP_{GHG} \quad (4)$$

gde su:

CO_{2e} [kgCO_{2e}] - ekvivalentne emisije ugljendioksida,

GHG [kg] - emisije datog gasa,

GWP_{GHG} [kgCO_{2e}/kgGHG] - potencijal globalnog zagrevanja (eng. global warming potential) datog GHG gasa.

Ugljenični otisak proizvoda jednak je zbiru ekvivalentnih emisija svih komponenata/sirovina koji ulaze u sastav tog proizvoda i emisija koje nastaju kao posledica potrošnje energenata za proces dobijanja gotovog proizvoda, tj. kao zbir svih direktnih i indirektnih emisija [27]. Ako se pretpostavi da proizvod sadrži n komponenata/sirovina, onda se može pisati:

$$CF = \sum_{i=1}^n (CO_{2ed})_i + \sum_{i=1}^n (CO_{2ei})_i \quad (5)$$

gde su:

CF [kgCO_{2e}/kg proizvoda] - ugljenični otisak proizvoda,

$(CO_{2ed})_i$ [kgCO_{2e}/kg pr.] - direktne emisije i -te komponente/sirovine,

$(CO_{2ei})_i$ [kgCO_{2e}/kg pr.] - indirektne emisije i -te komponente/sirovine.

Kada su u pitanju emisije u okviru opsega 1 (Scope 1), one obuhvataju sve direktne emisije koje nastaju kao posledica sagorevanja fosilnih goriva na lokaciji, procesne emisije, emisije usled curenja rashladnih sredstava i drugih gasova sa efektom staklene bašte i emisije usled sagorevanja goriva sa potrebe transporta vozila u vlasništvu kompanije. Utvrđivanjem potrošnje energenata i usvajanjem koeficijenata emisije za energente iz relevantnih baza podataka ili korišćenjem podatka o emisijama dobijenim direktno od dobavljača energenta, računaju se emisije u okviru Scope 1:

$$CO_{2e} = QE \cdot CE \quad (6)$$

gde su:

QE [kWh] - količina potrošenog energenta/energije

CE [kgCO_{2e}/kWh] - koeficijent emisije.

U tabeli 2 dati su koeficijenti emisije koji mogu biti korišćeni za proračun ugljeničnog otiska proizvoda za energente kupljene u Srbiji.

Tabela 2. Koeficijenti emisije za energente u Srbiji [28]

Energent	Koeficijent emisije	
	[kgCO _{2e} /jed.]	[kgCO _{2e} /kWh]
Lignit za industrijsku svrhu [t]	1.037,52	0,36
Lignit kostolac [t]	759,2	0,4
Lignit kolubara [t]	967,2	0,4
Benzin (motorni benzin) [l]	2,21	0,25
Biodizel [l]	2.264	0,25
Dizel gorivo - gasno ulje [l]	2,75	0,27
Ulje za loženje srednje S - Ulje za loženje srednje (mazut) [t]	0,28	3.174
Prirodni gas [m ³]	1,85	0,18
Komprimovani prirodni gas - CNG - metan [l]	1,85	0,18

Scope 2 obuhvata sve emisije nastale kao posledica potrošnje kupljene energije (električna energija, para, toplotna ili rashladna energija). Korišćenjem jednačine 6, računaju se sve emisije u okviru ovog opsega emisija. Treba naglasiti da je kod proračuna emisija u okviru Scope 2 neophodno uzeti u obzir i emisije koje nastaju kao posledica eksploatacije, transporta i distribucije energenata (*eng. upstream emission*) koje se obračunavaju u okviru Scope 3.3

U tabeli 3 dati su koeficijenti emisije koji mogu biti korišćeni za proračun u okviru Scope 2 i koji važe sa Srbiju.

Tabela 3. Koeficijenti emisije za kupljenu energiju [28]

Energent	Koeficijent emisije	
	[kgCO _{2e} /kWh]	
Para [kWh]	0,287	
Topla voda [kWh]	0,287	
Električna energija [kWh]	1,099	

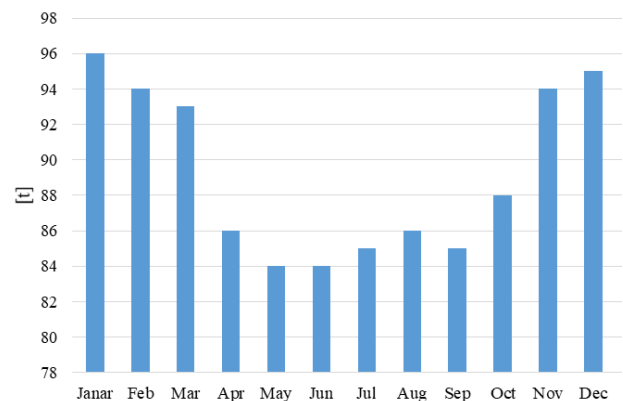
Kao što je već bilo reči, emisije u okviru Scope 3 često čine i najveći procenat emisija. U ovaj opseg spadaju sve emisije nastale kao posledica kupljenih dobara, usluga i kapitalnih investicija. Takođe sve emisije nastale kao posledica sagorevanja goriva za transport materijala i sirovina do lokacije, ali i od lokacije do veleprodaja, magacina, maloprodajnih objekata i sl. i emisije usled putovanja zaposlenih (na posao i službena putovanja), iznajmljena imovina, tretman otpada i dr. Koeficijenti emisije za proračun u okviru opsega 3 često nisu dostupni ili nisu primenljivi za konkretan slučaj, pa je neophodno usvojiti koeficijente koji po više parametara odgovaraju za primenu u analiziranom slučaju.

U nastavku će predložena metodologija biti testirana na studiji slučaja, mlekari iz centralne Srbije.

Predložena metodologija je testirana na studiji slučaja, mlekari iz centralne Srbije koja po klasifikaciji spada u grupu srednjih preduzeća. Proizvodni kapaciteti analizirane mlekare su oko 100 tona sirovog mleka dnevno. U analiziranoj mlekari sirovo mleko se podvrgava energetske veoma zahtevnim procesima poput: pasterizacije, kuvanja, hlađenja separacije, ultrafiltracije, homogenizacije i dr., a kao rezultat se dobijaju različiti mlečni proizvodi (sirevi, pavlaka, jogurt, kiselo mleko i pasterizovano mleko).

Celokupna količina mleka sa prijema pre lagerovanja podvrgava procesu hlađenja na temperaturu od 4-8 °C. Zatim se u zavisnosti od plana proizvodnje, celokupna količina mleka pasterizuje i standardizuje na željeni procenat masnoće. Zbog raznolikosti tehnologija proizvodnje, svaki od proizvoda se proizvodi u različitoj proizvodnoj liniji. Na kraju proizvodnog procesa svi gotovi proizvodi se odlažu u hladnjaču gde se hlade na temperaturu od 4 °C. Proces proizvodnje mlečnih proizvoda podrazumeva niz operacija među kojima dominiraju procesno zagrevanje i hlađenje. Pored toga značajan deo energije troši se za procese homogenizacije, separacije, pakovanja i za pogon pumpi i kompresora.

U analiziranoj mlekari, od energenata se koriste drveni briketi, električna energija i voda. Sagorevanjem briketa u dva kotla, nominalnih snaga od po 500 kW, podmiruju se gotovo sve potrebe za toplotnom energijom za proizvodni proces i za zagrevanje zgrade u zimskom periodu. Godišnja potrošnja briketa prikazana je na slici 4.



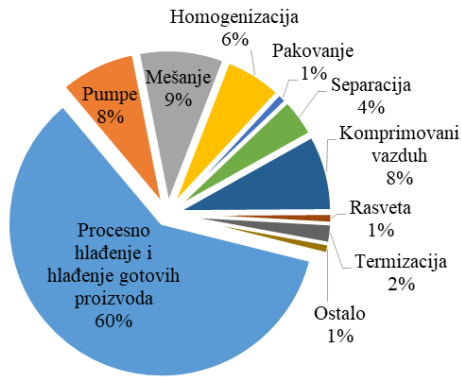
Slika 4. Potrošnja briketa analizirane mlekare

Prosečna dnevna potrošnja briketa je oko 3 t. Obzirom na to da je obim proizvodnje konstantan tokom cele godine, povećanje potrošnje briketa u zimskim mesecima je zbog zagrevanja objekata. Utvrđeno je da se za potrebe grejanja objekta godišnje potroši 38 t briketa, što je uzimajući u obzir usvojenu efikasnost kotla od 75% i donju toplotnu moć korišćenog briketa od 18 MJ/kg koje deklarišu proizvođači, oko 140 MWh toplotne energije godišnje ili 3% od ukupne potrošnje. Ostalih 97% se koristi za potrebe procesnog zagrevanja.

Za analiziranu mlekaru, za svaki od procesa koji zahtevaju toplotnu energiju izračunata je vrednost potrebne količine toplote korišćenjem jednačine 3. Vrednosti usvojenih specifičnih toplota prikazane su u tabeli 1. Merenjem temperatura i protoka, utvrđene su količine energije koje se rekuperacijom na pasterima vraćaju u proces i koje u proseku iznose 80%. Toplotna energija

potrebna za termizaciju, obezbeđuje se električnim konvektivnim grejalicama, a količina energije koja se troši za obavljanje ovog procesa je procenjena na osnovu nominalne snage grejača i dnevnog časovnog angažovanja (jednačina (1)).

Potrošnja električne energije u analiziranom preduzeću je u proseku oko 200.000 kWh mesečno. Od toga, najveći deo se troši na procesno hlađenje i hlađenje gotovih proizvoda. Kako bi se utvrdili udeli pojedinih potrošača u ukupnoj potrošnji električne energije bilo je neophodno izvršiti niz merenja. Za sve proizvodne linije i procesne aparate koji su potrošnjači el. energije trofaznim analizatorom snage (Extech 382091) u realnim eksploatacionim uslovima izmerene su vrednosti potrošnje električne energije. Raspodela potrošnje električne energije prikazana je na slici 5. Pored toga, za svaki od proizvoda izračunata je vrednost specifične potrošnje energije po jediničnoj meri gotovog proizvoda. Potrošnja električne energije za hlađenje izračunata je na osnovu dobijene potrebne rashladne energije (Tabela 4) i usvojene vrednosti koeficijenta hlađenja EER=2,5. Dobijeni rezultati prikazani su u tabeli 4.



Slika 5. Raspodela potrošnje električne energije [29]

Tabela 4. Dnevna potrošnja energije u kWh različitih proizvoda

	Pumpe	Mešanje	Separacija	Homogenizacija	Pakovanje	Procesno hlađenje	Procesno zagrevanje	Specifična potrošnja [kWh/kg proizv.]
Paster mleko	15	18	20	-	4,5	288	324	0,087
Jogurt	34	90	26,7	140	10,5	1391	1404	0,189
Pavlaka 40-45% mm	2,8	6,8	26,7	-	5,4	35	24,3	0,081
Pavlaka 12-30% mm	4	26	26,7	30	8	128	83	0,097
Drobljeni sir	38	35	81	-	11	340	1927	0,612
Feta sir	167	109	26,7	75	17,6	545	988	0,688
Biljni sir	183	142	26,7	72	19,8	731	1016	0,376
Kiselo mleko	9	34	26,7	56	4,2	297	265	0,119

U analiziranoj mlekari, potrošnja finalne energije po jedinici

mase obrađenog mleka prosečno iznosi 0,12 kWh/kg, dok se po toni dobijenog proizvoda u proseku potroši oko 0,3 kWh/t. U tabeli 5, prikazane su dnevne količine proizvoda i potrebna količina sirovog mleka za pripremu proizvoda.

Tabela 5. Dnevna količina proizvedenih proizvoda

Proizvod	Masa proizvoda [kg/dnevno]	Potrebna količina sirovog mleka [kg]
Paster mleko	20.000	20.000
Jogurt	20.000	20.000
Pavlaka 40-45% mm	1.500	1.500
Pavlaka 12-30% mm	3.800	3.800
Drobljeni sir	4.700	18.000
Feta sir	3.200	20.000
Biljni sir	6.800	20.000
Kiselo mleko	7.000	7.000

Mleko se nakon procesa separacije sa ciljem izdvajanja mlečnih masti za potrebe dobijanja pavlake koristi na drugim linijama (sir sa biljnim mastima, jogurt, paster mleko i dr.) za dobijanje gotovih proizvoda.

III 2 Proračun ugljeničnog otiska proizvoda

Scope 1

Obzirom na to da se kao primarni energent za potrebe generisanja procesne toplote i toplote neophodne za zagrevanja objekata koristi biomasa, koja se smatra CO₂ neutralnim gorivom emisije koje nastaju kao posledica sagorevanja na lokaciji će biti zanemarene.

Tabela 6. Proračun emisija poreklom iz dizel goriva

Proizvod	Potrošnja dizel goriva [l]	Emisioni faktor (Direktne) [kgCO ₂ e/l]	Emisioni faktor (Indirektne) [kgCO ₂ e/l]	Emisije [kgCO ₂ e/kg proizvoda]	
				Direktne	Indirektne
Paster mleko	120.071	2,75	0,62	0.0452	0.0102
Jogurt	120.071			0.0452	0.0102
Pavlaka 40-45% mm	13.341			0.067	0.0151
Pavlaka 12-30% mm	26.682			0.0529	0.0119
Drobljeni sir	106.730			0.1711	0.0386
Feta sir	120.071			0.2827	0.0637
Biljni sir	120.071			0.1330	0.0300
Kiselo mleko	40.024			0.0431	0.0097

Kada su u pitanju fugitivne emisije u analiziranom periodu od godinu dana ukupno je potrošeno 15 kg freona R410A. Ukupne izračunate emisije na nivou kompanije su 28,9 tCO_{2e}.

Scope (3.3) Dizel	Scope (3.3) El. energija	Scope (3.5) PVC otpad	Scope (3.5) Papirni otpad	Scope (3.5) Organski otpad	Σ
0,0102	0,007	0,0095	0,0011	0,0066	3,25
0,0102	0,026	0,0095	0,0011	0,0066	3,36
0,0151	0,042	0,0095	0,0011	0,0066	3,45
0,0119	0,027	0,0095	0,0011	0,0066	3,36
0,0386	0,039	0,0364	0,0041	0,254	12,37
0,0637	0,096	0,0595	0,0066	0,0415	20,38
0,03	0,055	0,0282	0,0031	0,0195	10,25
0,023	0,023	0,0095	0,0011	0,0066	3,33

VIII ZAKLJUČAK

U radu je prikazana metodologija za proračun ugljeničnog otiska proizvoda koja je testirana na primeru mlekare. Na osnovu dobijenih rezultat može se zaključiti da je u zavisnosti od vrste proizvoda udeo emisija koje se računaju u okviru opsega 3 najveći i da se kreće u granicama 93-98%. Za najveći deo emisija u okviru opsega 3 odgovorna je ulazna sirovina (mleko), sa udelom od preko 95%, pa se shodno tome ugljenični otisak proizvoda u zavisnosti od količine mleka koje se koristi za pripremu proizvoda značajno razlikuje. Npr. ukupne izračunate emisije pasterizovanog mleka su 3,25 kgCO_{2e}/kg jer je za dobijanje gotovog proizvoda neophodno samo termički obraditi sirovo mleko (zagreјati do 92 °C i ohladiti na 5°C - proces pasterizacije). Nasuprot, izračunate emisije za feta sir su više od 6 puta veće (20,38 kgCO_{2e}/kg) jer je za pripremu 1 kg feta sira neophodno oko 6,25 litara mleka.

Prilikom proračuna ugljeničnog otiska proizvoda posebnu pažnju treba obratiti na izbor adekvatnih koeficijenata emisija. U ovom radu, koeficijent emisije za sirovo mleko je usvojen iz baze podataka *Climatiq* [31] kao prosečna vrednost nekoliko zemalja u okruženju.

Obzirom na to da je za najveći procenat emisija odgovorna ulazna sirovina tj. sirovo mleko, gajenje goveda (ishrana i upravljanje stajnjakom) na način kojim se u nižoj meri utiče na životnu sredinu predstavlja jednu od prioritarnih mera za redukciju ugljeničnog otiska mlečnih proizvoda. Takođe, implementacija mera energetske efikasnosti, kako na farmama tako i u postrojenjima za preradu mleka i proizvodnju mlečnih

proizvoda je od ključnog značaja. Pravac daljih istraživanja trebalo bi da bude usmeren ka utvrđivanju koeficijenta emisije za sirovo mleko poreklom sa farmi u Srbiji.

ZAHVALNICA

Rad je nastao u toku istraživanja finansiranog od strane ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija br. 451-03-137/2025-03/200107 od 04.02.2025. godine.

LITERATURA

- [1] Siegl, S., Hagenbucher, S., Niggli, U., Riedel, J., Addressing dairy industry's scope 3 greenhouse gas emissions by efficiently managing farm carbon footprints, *Environmental Challenges*, Vol. 11, pp. 100719, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100719>
- [2] Globalna alijansa za budućnost hrane, 2023, <https://futureoffood.org/insights/power-shift-why-we-need-to-wean-industrial-food-systems-off-fossil-fuels> [pristupljeno 12.01.2025]
- [3] Evropski zeleni dogovor (eng. The European Green Deal). Brussels, 2020, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0021&from> [pristupljeno 17.01.2025]
- [4] Uredba (EU) 2021/1119 Evropskog parlamenta i Save1.500ta od 30. juna 2021. godine o uspostavljanju okvira za postizanje klimatske 3.800 neutralnosti i izmenama i dopunama Uredbi (EC) br. 401/2009 i (EU)2.500 2018/1999. *Uredba - 2021/1119 - EN - EUR-Lex* [pristupljeno 12.01.2025]
- [5] Krabbe, O., i drugi., Aligning corporate greenhouse-gas emissions targets with climate goals, *Nature climate change*, Vol. 5, pp. 1057-1060, 2015. <https://doi.org/10.1038/nclimate2770>
- [6] Direktiva Evropskog Parlamenta i Saveta od 14. decembra 2022. o izmenama i dopunama Uredbe (EU) br. 537/2014, Direktive 2004/109/EC, Direktiva 2006/43/EC i Direktiva 2013/34/EU u pogledu korporativnog izveštavanja. *OJL* 2022, 322, 15-80.
- [7] Wróbel-Jędrzejewska, M., Przybysz, L., Włodarczyk, E., Carbon footprint analysis of sugar production in Poland, *Food and Bioproducts Processing*, Vol. 148, pp. 88-94, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2024.08.014>
- [8] Science Based Targets, Value Change in the Value Chain: Best Practices in Scope 3 Greenhouse Gas Management, (2018). <https://sn.rs/a1015> [pristupljeno 17.01.2025]
- [9] Siegl, S., Hagenbucher, S., Niggli, U., Riedel, J., Addressing dairy industry's scope 3 greenhouse gas emissions by efficiently managing farm carbon footprints, *Environmental Challenges*, Vol. 11, pp. 100719, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2023.100719>
- [10] Baek, C. Y., Lee, K. M., Park, K. H., Quantification and control of the greenhouse gas emissions from a dairy cow system, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 70, pp. 50-60, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.010>
- [11] Wei, S., Ledgard, S., Fan, J., i ostali. Carbon footprints, mitigation effects and economic performance of dairy farm systems in Inner Mongolia, *Agricultural Systems*, Vol. 214, pp. 103835, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103835>
- [12] Adler, A. A., Doole, G. J., Romera, A. J., Beukes, P. C., Managing greenhouse gas emissions in two major dairy regions of New Zealand: a system-level evaluation, *Agricultural Systems*, Vol. 135, pp. 1-9, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.11.007>
- [13] Globalni standard za karbonski otisak iz sektora mleka (eng. International Dairy Federation (Ed.), The IDF global Carbon Footprint standard for the dairy sector. Bulletin of the IDF No. 520/2022), 2022 <https://sn.rs/jkvq0> [pristupljeno 11.02.2025]
- [14] Diaz, G. S., Pereda, P. M., Salcedo-Rodriguez, D., Assessing the carbon footprint in dairy cattle farms in the northern temperate region of Spain, *Farming System*, Vol. 2, pp. 100058, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.farsys.2023.100058>
- [15] Lactanet, Canadian network for dairy excellence, <https://lactanet.ca/en/environmental-footprint-dairy-industry/> [pristupljeno 11.02.2025]
- [16] Herrero, M., Henderson, B., Havlik, P., i ostali, Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector, *Nature climate change*, Vol. 6, pp. 452-461, 2016. <https://doi.org/10.1038/nclimate2925>

- [17] SRPS ISO 50002:2017, Energetski pregledi – Zahtevi sa uputstvom za korišćenje, https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:66069 [pristupljeno 11.02.2025]
- [18] Josijević, M., Šušteršič, V., Gordić, D., i ostali, Pregled mera energetske efikasnosti i sprovođenje energetskog pregleda u prehrambenoj industriji, in: *Zbornik radova XXXV Međunarodnog savetovanja ENERGETIKA 2020*, pp. 203-208, 24-27. Oktobar 2020.
- [19] De Lima, L. P., De Deus Ribeiro, G.B., Perez, R., The energy mix and energy efficiency analysis for Brazilian dairy industry, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 181, pp. 209-216, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.221>
- [20] Josijević, M., Šušteršič, V., Gordić, D., Ranking energy performance opportunities obtained with energy audit in dairies, *Thermal Science*, Vol. 24, pp. 2865-2878, 2020. <https://doi.org/10.2298/TSCI191125100J>
- [21] Hammer B. W., Johnson A. R., The specific heat of milk and milk derivatives, *Agricultural experiment station Iowa State College of Agriculture and the Mechanic Arts*, 1913. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=uiug.30112019567905&seq=7> [pristupljeno 15.02.2025]
- [22] "Online" softver za kalkulaciju specifične toplote za pojedine sirovine koje se koriste u prehrambenoj industriji, <http://www.sponline.swep.net/home.html#> [pristupljeno 10.02.2025]
- [23] Ramirez, C.A., Patel, M., Blok, K. From fluid milk to milk powder: Energy use and energy efficiency in the European dairy industry, *Energy*, Vol. 31, No. 12, pp. 1984-2004, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.10.014>
- [24] Kallaa, A.M., Devaraju R. Energy efficient and cost saving practices in dairy industries: a review, *International Journal of Applied Engineering, Research and Development (IJAERD)*, Vol. 7, No. 3, pp. 1-10, 2017.
- [25] IPCC. Report on Climate Change 2023: The Physical Science Basis, <https://sn.rs/nqm9z> [pristupljeno 17.01.2025]
- [26] Green House Gas Protocol. 2022, <https://ghgprotocol.org/guidance-0> [pristupljeno 13.02.2025]
- [27] Wróbel-Jedrzejska, M., Klepacka, A., Włodarczyk, E., Przybysz, L. Carbon Footprint of Milk Processing - Case Study of Polish Dairy, *Agriculture*, Vol. 15, No. 1, pp. 62, 2025. <https://doi.org/10.3390/agriculture15010062>
- [28] Pravilnik o faktorima konverzije finalne energije u primarnu i faktorima emisije ugljen dioksida ("Sl. Glasnik RS", br. 111/2021 i 6/2023), http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/2023_01/SG_006_2023_015.htm [pristupljeno 05.02.2025]
- [29] Josijević, M., Šušteršič, V., Vukašinović, V., Gordić, D., Živković, D., Nikolić, J. Korišćenje otpadne toplote u prehrambenoj industriji primenom toplotne pumpe, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 26, No. 4, pp. 19-24, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE24-4.19J>
- [30] Greenhouse gas reporting: conversion factors 2023, [Greenhouse gas reporting: conversion factors 2023 - GOV.UK](https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2023) [pristupljeno 05.02.2025]
- [31] "Online" baza podataka sa faktorima konverzije, <https://www.climatiq.io/data> [pristupljeno 05.02.2025]

AUTORI

Mladen Josijević - docent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, mladenjosijevic@gmail.com, ORCID [0000-0001-9619-0897](https://orcid.org/0000-0001-9619-0897)

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

Vanja Šušteršič - redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, vanjas@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-7773-4991](https://orcid.org/0000-0001-7773-4991)

Vladimir Vukašinović - vanredni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, vladimir.vukasinovic@kg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6489-2632](https://orcid.org/0000-0001-6489-2632)

Dubravka Živković - docent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, dubravka@uni.kg.ac.rs, ORCID [0000-0002-0266-456X](https://orcid.org/0000-0002-0266-456X)

Jelena Nikolić - istraživač saradnik, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, jelena.nikolic@fink.rs, ORCID [0000-0001-6781-8059](https://orcid.org/0000-0001-6781-8059)

A Methodology for Calculating Product Carbon Footprint in the Case of a Dairy

Abstract - This paper proposes a methodology for calculating CO₂ emissions per product. The methodology developed here is based on a detailed energy review of a dairy plant to determine energy raw material flows and apply a GHG protocol for calculating carbon footprint. The emission coefficients are adopted from the current literature and the relevant databases. The methodology was tested on a case study: a dairy plant.

Index terms - Product carbon footprint, Dairy, CO₂ emissions

Primena baterijskih sistema kod solarnih elektrana

Miodrag Vuković*, Željko V. Despotović**

* CONSEKO d.o.o, Beograd

** Institut „Mihajlo Pupin“, Univerzitet u Beogradu

Rezime - Kada energija iz solarne elektrane ne može da se utroši u momentu proizvodnje, onda je kao jedno od mogućih rešenja skladištenje viška električne energije u baterije. U radu se opisuje koncept rada solarnog sistema sa skladištem energije i faktori koji utiču da ovaj koncept bude ekonomski dugoročno isplativ za primenu u industrijskim i trgovinskim kompanijama. U radu se prikazuje primer baterijskog sistema sa skladištem energije realizovan sa inverterima evropskih proizvođača, sa kojima su autori uspešno realizovali nekoliko baterijskih sistema sa solarnim elektranama za proizvodnju električne energije za sopstvene potrebe.

Ključne reči - skladištenje električne energije, baterijski sistemi za skladištenje energije, solarne elektrane, period isplativosti

I UVOD

Sistemi za skladištenje energije (SSE) efikasno doprinose pouzdanosti i dostupnosti napajanja električnom energijom, poboljšavajući integraciju obnovljivih izvora u energetske sisteme [1]. Centralni problem zbog koga se danas uočava snažna potreba za baterijskim sistemima jeste neravnomernost raspodele potrošnje i proizvodnje električne energije tokom dana.

Rezultati prethodnih studija pokazuju da baterijska skladišta pokazuju prednost u postizanju veće neto sadašnje vrednosti ulaganja (eng. *net present value* - NPV) i indeksa samodovoljnosti energije (eng. *self sufficiency index* - SSI), u odnosu na trenutna rešenja sistema za skladištenje vodonika [2].

Poslednjih godina na evropskom tržištu električne energije cene električne energije variraju tokom dana, tako što se na primer, cena električne energije na berzi, odnosno tzv. spot tržištu menja po časovima tokom dana. Ova cena je najniža, a veoma često i negativna upravo sredinom dana, u periodu od 12h do 15h, a najviša je u periodu od 18h do 21h. Takođe, proizvedeni kWh u jutarnjim satima imaju višestruko veću vrednost u odnosu na cenu sredinom dana. Koliko je problem viškova električne energije na mreži velik u određenim periodima dana, jesu primeri negativnih cena na tržišta koje se tada javljaju. Za tu svrhu u zemljama poput Češke, pojavljuju se mašine koje služe za uništavanje viškova energije sa priključenim velikim ventilatorima, koji zapravo troše viškove električne energije. Ipak, baterijska skladišta električne energije za "peglanje" dnevnih neravnomernosti potrošnje i proizvodnje električne energije, jesu jedno od rešenja ovog problema.

Prethodna istraživanja upućuju na način rešavanja problema sa viškovima proizvodnje električne energije za sopstvene potrebe, kroz [3]:

- pretvaranje viškova u toplotnu energiju (na primer za

zagrevanje vode),

- uključivanje dodatnih potrošača (npr. ventilatora, klima uređaja i sl.),
- skladištenje viškova energije u baterije.

Alternativni načini da se postigne bolji balans između potrošnje i proizvodnje električne energije kod privrednih subjekata i domaćinstava koji električnu energiju proizvode za sopstvene potrebe su:

- ograničavanje proizvodnje za sopstvene potrebe, sa pametnim meračem (smart metrom) koji se postavlja iza obračunskog mernog mesta i koji služi da se pomoću njega upravlja proizvodnjom energije iz solarne elektrane na osnovu sopstvene potrošnje,
- skladištenje električne energije u baterijske sisteme, kada je proizvodnja električne energije u višku, da bi se ta energija koristila kasnije, kada je veća potrošnja,
- upravljanje potrošnjom, isključivanjem nekritičnih potrošača, u momentima kada je potrošnja velika,
- skladištenje viškova električne energije u termalna skladišta (rezervoare sa vodom, ili drugim materijalima, koji apsorbuju viškove energije).

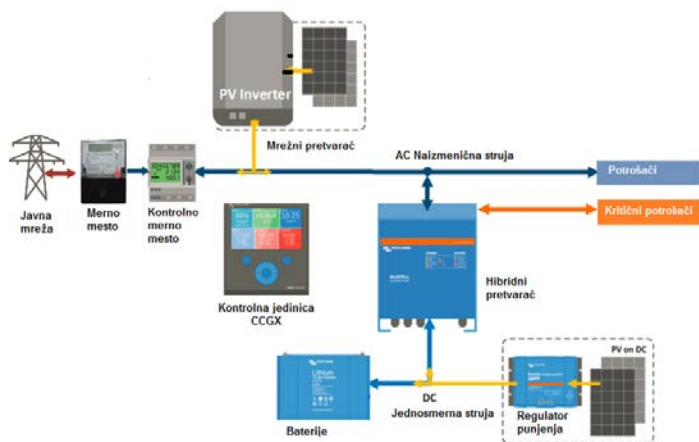
Skladište energije ima zadatak između ostalog da doprinese da se u većoj meri zadovolje dnevne neravnomernosti potrošnje i proizvodnje električne energije. Pored osnovne funkcije da se energija iz baterija koristi kada proizvodnja iz sopstvenih obnovljivih izvora nije dovoljna, baterije imaju i funkciju tzv. „bekap sistema“, a to znači obezbeđenja kontinuiteta rada potrošača u slučaju nestanka električne energije. Za ovakve situacije uvek postoji određena rezerva energije koja se mora sačuvati u baterijama.

Baterijski sistemi za skladištenje električne energije koriste se dakle u različitim situacijama, radi:

- iskorišćenja viška "zelene" električne energije - skladištenja viška nakon proizvodnje radi kasnijeg korišćenja u povoljnim momentima,
- smanjenja vršnih opterećenja - ravnjanja krive trošenja energije iz mreže i ublažavanja pikova opterećenja,
- besprekdnog napajanja, u slučaju prekida napajanja iz distributivne mreže,
- povećanja mogućeg udela obnovljive energije, proizvedene za sopstvene potrebe,
- ekonomičnosti - obnovljiva energija skladištena u baterijama jeftinija je od električne energije iz mreže,
- povećanja snage priključka: u slučaju nedostajuće snage postojećeg priključka, može se povećati snaga na mestu priključka, bez uvećanja snage kod elektrodistribucije (ED).

Dodatne koristi koje ostvaruju komercijalni i industrijski sistemi za skladištenje energije su stabilizacija elektro distributivne mreže pružanjem pomoćnih usluga, usluga za balansiranje mreže, regulaciju frekvencije i napona, na čemu se može ostvariti dodatna zarada kod aktivnih kupaca na tržištu električne energije.

Međutim, velike baterijske instalacije suočavaju se sa rizicima kao što su kvarovi sistema koji mogu dovesti do oštećenja baterija i pitanja kontrole zaštite životne sredine. Sprovođenje sistema kontrole zaštite životne sredine sa odgovarajućim senzorima i sistemom za monitoring i upravljanje baterijom (tzv. *monitoring battery management system* - MBMS) mogu pomoći u ublažavanju ovih rizika održavanjem optimalnih radnih uslova i sprečavanje potencijalnih katastrofa [4].



Slika 1. Prikaz komponenti baterijskog sistema sa solarnom elektranom

II KOMPONENTE BSSE

U ovom poglavlju prikazane su osnovne komponente solarne elektrane sa baterijskim sistemom, za korišćenje na industrijskim i komercijalnim objektima. Baterijski sistem sa skladištenjem energije (BSSE) zajedno sa fotonaponskim sistemom (Slika 1) čine:

- fotonaponski solarni paneli
- invertori fotonaponskog sistema
- sistem pretvaranja energije (eng. *power conversion system* - PCS)
- akumulatorske elektrolitske baterije,
- sistem za upravljanje baterijama (eng. *battery management system* - BMS)
- smart metar,
- upravljački sistem skladišta (eng. *battery control unit* - BCU),
- dodatni sistemi zaštite.

Fotonaponski paneli pretvaraju sunčevu svetlost u električnu energiju koristeći fotonaponski efekat, koja se javlja u obliku jednosmerne struje na redno povezanim nizovima solarnog panela. Invertori fotonaponskog sistema pretvaraju jednosmerne struje (DC) koju proizvode fotonaponski paneli u naizmjeničnu struju (AC), koja se koristi u domaćinstvima, industrijskim objektima ili na električnoj mreži. Sistem pretvaranja energije obuhvata bidirekzione invertore baterijskog sistema koji omogućavaju dvosmerno pretvaranje energije, zajedno sa

upravljanjem energijom između baterija i potrošača (ili električne mreže). Akumulatorske elektrolitske baterije su vrsta punjivih baterija (akumulatora) koje koriste tečni elektrolit za omogućavanje protoka jona između elektroda tokom procesa punjenja i pražnjenja. "Mozak" baterijskog sistema je sistem za upravljanje baterijama koji upravlja i nadgleda rad punjivih baterija (akumulatora), kako bi se obezbedila njihova bezbednost, pouzdanost i dug životni vek. Upravljački sistem skladišta je sofisticirana platforma koja upravlja, kontroliše i optimizuje rad sistema za skladištenje energije, koji integriše različite komponente, uključujući baterije, invertore, sistem za upravljanje baterijama i druge uređaje, kako bi obezbedilo efikasno i bezbedno skladištenje, pražnjenje i korišćenje energije. Smart metar zajedno sa strujnim mernim transformatorima je neophodan uređaj u baterijskim sistemima za sopstvene potrebe. On služi za merenje tokova energije na glavnom napojnomvodu u postojećem objektu. Informacija sa digitalnog smart metra prenosi se do kontrolnog uređaja upravljačkog sistema, koji na osnovu informacije o tokovima i potrošnji energije iz mreže odlučuje da li baterije treba da se dopunjuju ili prazne i da li elektrana treba da radi punim kapacitetom ili treba da se ograniči ukupna snaga kojom ovakav sistem raspolaže. Dodatni sistemi zaštite obuhvata uređaje za zaštitu instalacija od kratkog spoja, zaštitu od preopterećenja kablova, sistemsku zaštitu od ostrvskog rada i drugi zaštitni uređaji. Isti uređaji se već primenjuju na elektranama na mreži (takozvanim "on-grid" sistemima).

Izazove kao što su starenje baterija, uticaj na životnu sredinu i njihovu pouzdanost potrebno je rešiti kako bi se u potpunosti ostvarile prednosti BSSE sistema [5].

III DIMENZIONISANJE SISTEMA

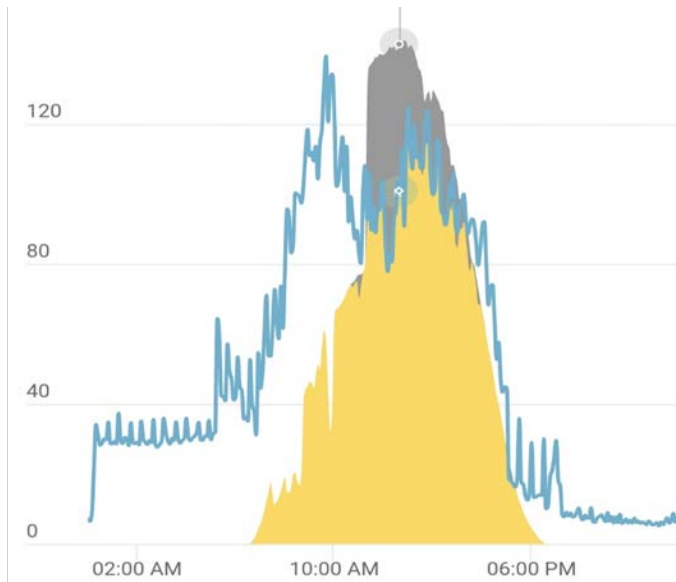
Dimenzionisanje baterijskog sistema koji se koristi u kombinaciji sa solarnom elektranom, ključni je aspekt za uspešnost projekta ESS, obzirom da će rezultat konfiguracije i dimenzionisanja sistema uticati na: (1) mogućnost da komponente sistema zajedno rade u jednom mikro energetsom sistemu, (2) bezbednost funkcionisanja sistema u različitim režimima opterećenja, (3) period povratka investicije. Sa stanovišta ekonomičnosti ukupnog sistema, dimenzionisanje značajno utiče na period povraćaja ulaganja investicije.

Prilikom dimenzionisanja baterijskog sistema potrebno je da se odredi:

- kapacitet skladišta, odnosno koliko je skladište energije potrebno u baterijama (izraženo u kWh), sračunato na osnovu dnevne potrošnje energije, profila potrošnje, viškova energije kao i zahteva za rezervno (bekap) napajanje,
- snaga baterijskih invertora - jedan ili više hibridnih (baterijskih) invertora mora da podrži ukupnu izlaznu snagu postojećeg sistema, prema snazi potrošača i zahtevima za punjenje/pražnjenje baterija,
- uslovi u kojima će se obezbediti da sistem radi (klimatizovan prostor ili drugi prostor pod kontrolisanim temperaturnim uslovima i drugim uslovima bezbednog rada).

Poseban aspekt dimenzionisanja baterijskog sistema su komponente i kapaciteti BSSE u odnosu na postojeću solarnu

elektranu. Kada se analizira proizvodnja solarne elektrane za sopstvene potrebe i upoređi sa potrošnjom objekta, dolazi se do sagledavanja viškova energije koji se javljaju u toku dana, a koji se mogu akumulirati u baterije. Primer je prikazan na Slici 2, gde su sivom oblašću označeni viškovi električne energije koji se mogu skladištiti u baterije, žuta oblast predstavlja proizvodnja električne energije za sopstvene potrebe, a plavom linijom je označena potrošnja energije. Nadogradnja sistema sa baterijama na postojeću solarnu elektranu zahteva pažljivo projektovanje i izvođenje, kako bi se osigurala kompatibilnost, bezbednost, kao i usklađenost sa nacionalnim standardima i propisima. Ako se želi da se zadrži postojeći mrežni inverter, mora se dodati kompatibilan baterijski inverter, ili DC-sistem za skladištenje. Baterije koje se odaberu moraju takođe biti kompatibilne sa postojećim invertorom, ali i dodatnim baterijskim invertorom koji se instalira.



Slika 2. Potrošnja energije objekta i proizvodnja iz solarne elektrane sa viškom, tokom sunčanog dana

Dodavanje baterijskog sistema na postojeću solarnu elektranu ima dve opcije:

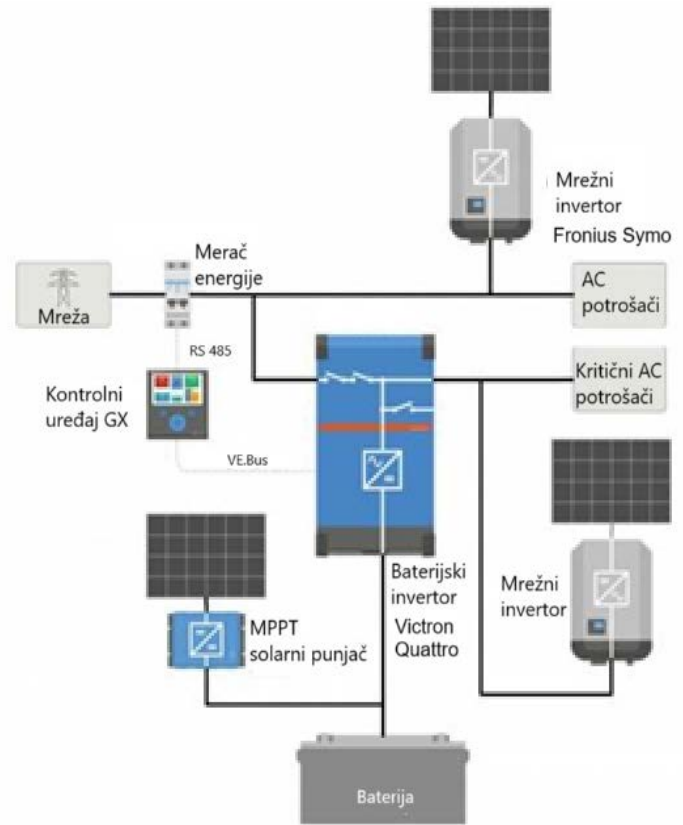
- zamena postojećeg invertora hibridnim invertorom sa baterijama (odnosi se na jedan inverter u sistemu),
- dodavanje uparenog AC sistema (eng. *AC coupled system*); dodaju se baterijski invertori koji mogu da komuniciraju sa postojećim on-grid (fotonaponskim invertorom) i smart metrom; dodaju se baterije na novi baterijski inverter.

Krovni PV sistemi na komercijalnim i industrijskim objektima dostižu snagu do 150 kW, a maksimalno 1 MW. Na veoma velikim krovovima mogu se postaviti industrijski fotonaponski sistemi u rasponu od (0.5÷3) MW [6].

Sa druge strane, trenutno važeća regulativa za solarne elektrane za sopstvenu potrošnju u Srbiji propisuje da se mogu graditi elektrane snage do 150 kW [7], a preko te snage elektrane se moraju registrovati kao aktivni kupci, koje bi eventualne viškove proizvodnje energije, zajedno sa skladištem energije ponudile na slobodnom tržištu električne energije.

IV PRIMER REALIZOVANOG BATERIJSKOG SKLADIŠTA SA PV ELEKTRANOM

Na obrađenom primeru projekta solarne elektrane na garaži Obilićev Venac u Beogradu (Slika 3) biće istaknuta uloga baterijskog skladišta. Reč je o sistemu za skladištenje energije Victron ESS koji je realizovan tokom 2017. godine od strane domaće firme Conseko d.o.o iz Beograda [8].



Slika 3. Principijska šema Victron BSSE na solarnoj elektrani 50kW na garaži Obilićev Venac u Beogradu

Opremu solarne elektrane sa baterijskim skladištem energije činili su:

- solarni fotonaponski paneli Luxor Solar 280W, količine 180 komada, ukupne snage 50,4kWp,
- mrežni invertori Fronius Symo 15.0-3M, izlazne snage 15kW, koji energiju na ulazu direktno pretvaraju električnu energiju naizmenične struje na trofaznom sistemu 400V,
- olovne gel baterije nemačkog proizvođača Hoppecke, kapaciteta 1100Ah, 2V, ukupno 24 baterije sa vekom od 2.500 ciklusa punjenja,
- solarni regulator punjenja baterija Victron MPPT 150/70, maksimalne struje punjenja baterija 70A, na naponu 48V
- baterijski pretvarač napona Victron Quattro, 48/8000, 6 jedinica, sa izlaznim monofaznim naponom 230V, 50Hz,
- kontrolno merno mesto, za bilans proizvodnje i potrošnje energije,
- kontrolna jedinica koja upravlja celim sistemom, Victron Color Control GX, sa softverom za ESS.

U okviru pomenutog objekta, nalaze se sledeći dominantni potrošači električne energije: (1) LED rasveta po spratovima garaže i na fasadi, (2) kancelarija se klima uređajima i računarima (3) blagajna.

Paralelna topologija mreže sa PV invertorom podrazumeva da će samo određeni kritični potrošači ostati zaštićeni od nestanka struje. MultiGrid će koristiti podatke sa merača snage da optimizuje sopstvenu potrošnju i, ako je potrebno, da spreči povraćaj viška solarne energije u elektroenergetsku mrežu [9].

V OPIS RADA SOLARNE PV ELEKTRANE

Realizovan je paralelan rad solarne elektrane sa DSEE bez predaje viškova električne energije u DSEE, gde se proizvedena električna energija koristi za napajanje sopstvene potrošnje. Fotonaponska elektrana je povezana sa baterijskim sistemom preko Victron sistema za upravljanje radom elektrane. Projekat je realizovan 2017. godine, nekoliko godina uoči donošenja Zakona o obnovljivim izvorima energije u Republici Srbiji.

Realizovana solarna elektrana proizvodi električnu energiju za sopstvene potrebe, odnosno proizvedena električna energija se koristi za potrošače u okviru objekta.

Victron upravljački sistem je koncipiran na sledeći način:

- sistem funkcioniše paralelno sa električnom mrežom,
- proizvedena električna energija koristi se za sopstvenu potrošnju energije na potrošačima u okviru objekta garaže, pri čemu je za tu količinu proizvedene energije manje energije koja se preuzima iz distributivne mreže,
- u momentima kada elektrana proizvodi manje energije od potrošnje električne energije, nedostajuća električna energija se preuzima iz distributivne mreže,
- kada je proizvodnja električne energije iz solarnih panela veća od potrošnje energije, viškom energije se dopunjuju baterije,
- u slučaju nestanka električne energije iz mreže solarna elektrana se automatski isključuje i prelazi na ostrvski režim napajanja, do ponovne raspoloživosti napona na napojnomvodu,
- predviđeni prioritetni potrošači koji bi dobijali energiju iz solarne centrale, čak i u momentima prekida napajanja električne energije iz mreže su potrošači povezani na sistem neprekidnog napajanja iz baterija.

Karakteristika rada Victron hibridnih baterijskih invertora raspoređenih pojedinačno po fazama sistema, jeste da mogu da snabdevaju potrošače sa nebalansiranom potrošnjom po fazama, što je bitno za rad baterijskih sistema kada nema vraćanja električne energije u mrežu.

VI OPIS IZVEDENOG SISTEMA

Nizovi solarnih panela (popularno nazvani „stringovi“) su paralelno povezani u DC razvodne kutije pre invertora u kojima su smeštene zaštitne komponente (zaštitni topivi gPV osigurači na vodovima, odvodnici prenapona i DC rastavljač). Solarni paneli su zaštićeni od moguće pojave inverzne struje, preopterećenja i kratkih spojeva sa gPV osiguračima.

Na svaki od invertora Fronius Symo 15.0.3-M (ukupno 2 invertora) sa implementiranim algoritmom praćenja tačke maksimalne snage (MPPT), su vezana tri paralelna stringa. U okviru svakog stringa je vezano 20 solarnih panela na red. U tački maksimalne snage napon na jednom solarnom panelu je 31.86V. Na ovaj način se dobija da je maksimalni napon stringa od 637.2V pri maksimalnoj struji jednog stringa od 8.80A (na 25°C). Ukupna ulazna struja svakog od invertora je jednaka zbirnoj struji stringova, odnosno $3 \times 8.80A = 26.4A$. Polaganje kablova na DC strani je ostvareno na nosačima kablova montiranim ispod mehaničke konstrukcije solarnih panela. Od svakog stringa ka invertorima su ugrađeni kablovi preseka 6 mm², pri čemu je projektom dobijen maksimalni gubitak od 2% u kablovima kod prenosa energije od solarnih panela do ulaza invertora [9].

Principiska blok šema realizovane solarne elektrane je data na Slici 4.

Invertorski sistem

Mrežni (‘‘on-grid‘‘) invertori proizvode trofaznu naizmeničnu struju napona 400V, učestanosti 50Hz i na razvodnom ormanu solarne elektrane povezani su preko NN sabirnica sa baterijskim invertorima, kao što je prikazano na slici 4.

Hibridni, odnosno baterijski invertori Victron Quattro 8000/48, povezani su po 2 komada na svakoj fazi pojedinačno, čime je dobijen trofazni sistem ukupne snage 16kVA po fazi, odnosno 48kVA, na sve tri faze. U trofaznom sistemu Victron obezbeđena je automatska međusobna sinhronizacija baterijskih invertora, kao i sinhronizacija sa mrežom u vremenskom intervalu od minimalno 20s, uz maksimalnu dopuštene tolerancije: (1) razlika napona manja od $\pm 10\%$ nazivnog napona, (2) razlika frekvencije manja od $\pm 0.5\text{Hz}$ i (3) razlika faznog ugla manja od ± 10 stepeni.

AC razvod

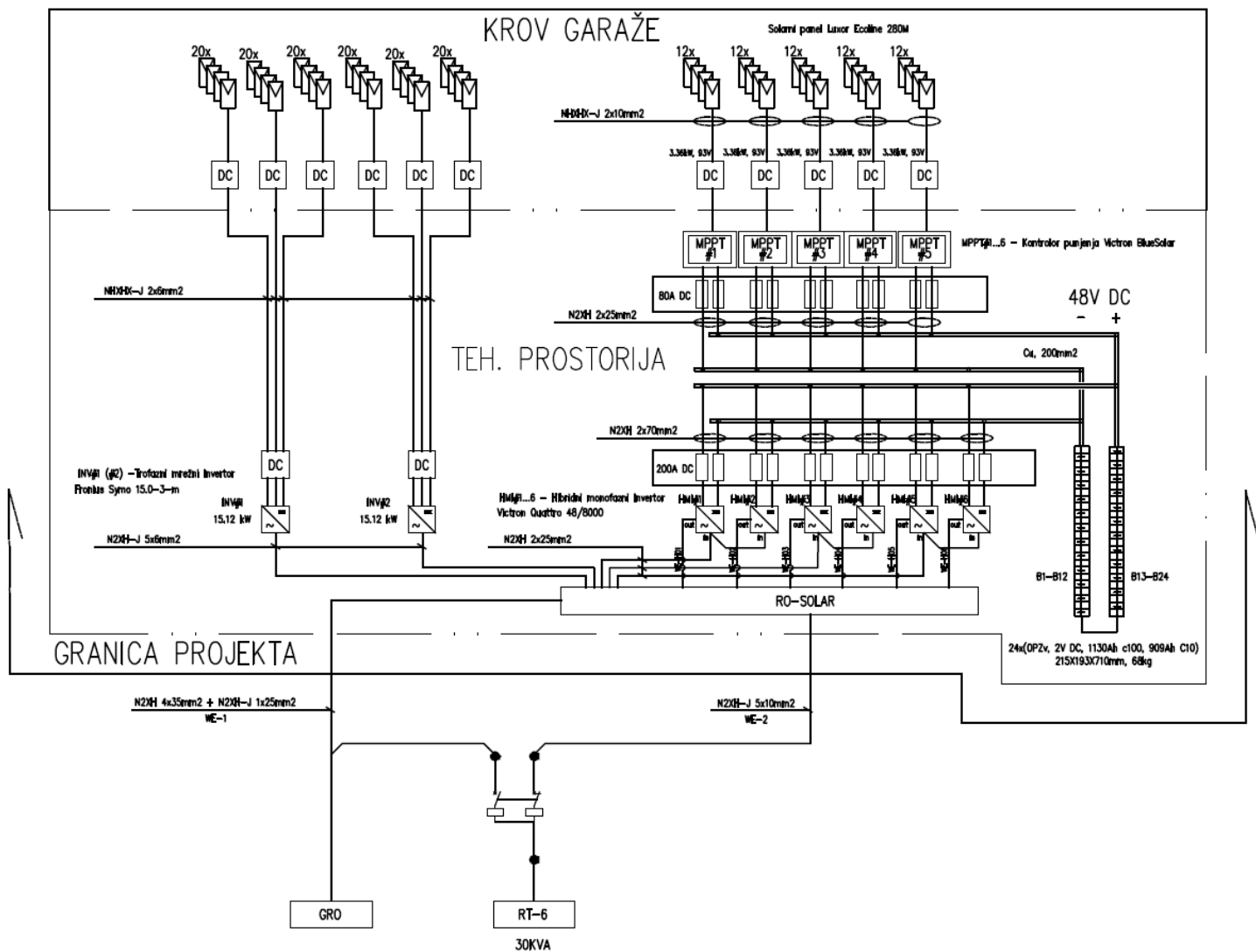
U RO solarne elektrane, postavljeni su automatski osigurači, za svaki dolazni kabl sa pojedinačnih invertora. Zajedno sa osiguračima, na red su postavljeni uređaji zaštite od diferencijalne struje. Spojni prekidač solarne elektrane sa baterijskim sistemom je trolpolni (3P) kompakt prekidač, za nominalnu struju od 150A, sa termičkom strujnom zaštitom opsega $(0.8 \div 1) \times I_n$ i prekostrujnom zaštitom.

Spojni prekidač zajedno sa trolpolnim kontaktorom povezanim na red sa njim, su smešteni u odvodno polje RO solarne elektrane.

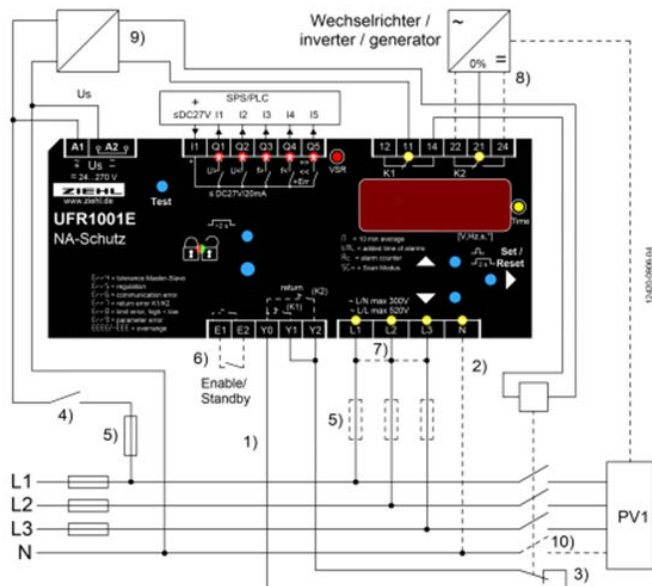
Pored ovog prekidača u spojnopolju dva uređaja merenje faznih i međufaznih napona, linijskih struja, aktivne i reaktivne snage. Jedan uređaj je mrežni analizator, dok je drugi uređaj u stvari rele systemske zaštite.

Rele systemske zaštite Ziehl UFR 1001E [10] u spojnopolju RO obuhvata frekventnu i naponsku zaštitu, koje obezbeđuje kontroler koji je prikazan na Slici 5. Pri ovome se obezbeđuje rad elektrane u definisanim granicama napona i frekvencije. Kao što pokazuje Slika 5, komande iz kontrolera su povezane sa glavnim kontaktorom nominalne struje 115A.

Na Slici 6 je dat prikaz tehničke sobe u kojoj je smešten sistem sa baterijama, invertorima i AC razvodom.



Slika 4. Principska blok šema solarne fotonaponske elektrane sa baterijama



Slika 5. Povezivanje kontrolnog modula UFR1001E i sistemskih zaštita solarne elektrane [10]



Slika 6. Tehnička soba u kojoj je smešten sistem sa baterijama, invertorima i AC razvodom

U Tabeli 1 su dati osnovni podaci o projektovanoj solarnoj elektrani sa baterijskim skladištem električne energije, na osnovu odabrane snage invertora i broja fotonaponskih panela.

Tabela 1. Osnovni podaci o ESS sistemu za proizvodnju električne energije sa baterijama (solarna fotonaponska elektrana „Garaža Obilićev Venac“)

Maksimalna izlazna snaga elektrane	50 kW
Izlazni napon iz elektrane	0,4 kV
Snaga baterijskih invertora	48 kVA
Način rada	Paralelni rad za sopstvene potrebe (Zero feed-in)
Maksimalna snaga solarnih panela	50,4 kWp
Kapacitet baterija	50 kWh
Napon baterijskog sistema	48 V
Ukupna snaga mrežnih invertora	30 kW
Maksimalna struja DC punjača baterija	420 A (na 48 V)
Maksimalna snaga kojom se električna energija predaje u DSEE	0 kW
Očekivana godišnja proizvodnja elektrane	56 300 kWh
Napon na mestu priključenja na DSEE	0,4 kV

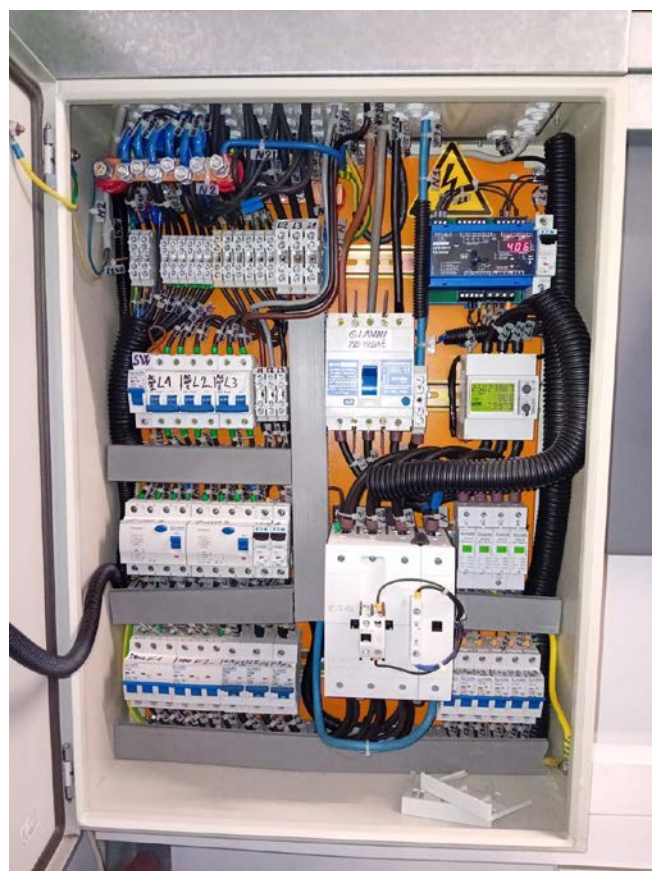
Pozicija (1) (Slika 6) predstavlja digitalni ulaz u kontroler na priključcima Y0-Y1 na koji se dovodi signal sa pomoćnog kontakta (3) glavnog kontaktora (10). Na ovom ulazu kontroler dobija informacije o statusu glavnog kontaktora na AC razvodu solarne elektrane. Kontrolni namotaj (špulna) kontaktora je dat na poziciji (2) i on je kontrolisan digitalnim izlazom kontrolera (relejnim izlazom) K1, čime su implementirani sistemi zaštita (podnaponske $U<$, prenaponske $U>$, podfrekventne $f<$, nadfrekventne $f>$ i prekostrujne, odnosno zaštite od preopterećenja $I >>$).

Od razvodnog ormana solarne elektrane, kablom N2XH 4 x35mm² + N2XH-J 1x25mm², ostvarena je veza između RO solarne elektrane (sa hibridnim invertorm) i razvodnog postrojenja u GRO objekta. Zaštita voda elektrane ostvaruje se prekostrujnom zaštitom sa osiguračima od 100A, postavljenim u GRO objekta.

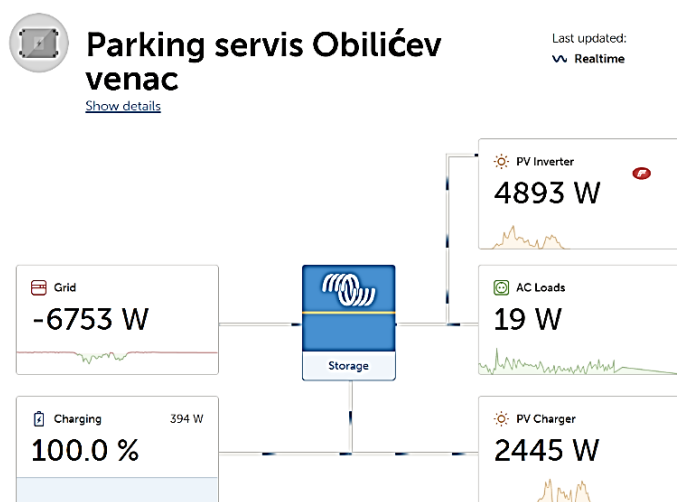
Proizvedena energija se predaje preko napojnog kabla koji je izveden prema elektrani iz GRO, kao i putem kabla koji sprovodi energiju ka prioritetnim potrošačima povezanim na RT-6 (slika 4). Sistem poseduje merač energije (mrežni analizator, odnosno smart metar), koji se postavlja iza mernog mesta na glavni vod napajanja objekta, čime se stalno prati tok energije i omogućuje da elektrana radi kao sistem koji proizvodi energiju za sopstvene potrebe (eng. “self-consumption”), kao što je prikazano na Slici 6. Merač energije omogućuje kontrolu nad predajom električne energije ka mreži i ujedno meri potrošnje električne energije na napojnom vodu. Na ovaj način je omogućen ne samo pravilan rad sistema prema elektrodistributivnoj mreži, nego i upravljanje radom baterija. Ovaj uređaj obezbeđuje pametni energetske menadžment koji se tiče snaga (aktivne, reaktivne, prividne),

faktora snage i energetske potrošnje objekta).

Svi potrošači povezani na GRO tokom rada solarne elektrane dobijaju električnu energiju najpre sa elektrane, a u slučaju nedostatka, energija za potrošnju se nadoknađuje iz baterija i elektroenergetske mreže.



Slika 7. Razvodni orman solarne elektrane



Slika 8. Bilans tokova energije prikazan na VRM portalu

Pre priključenja sistema na energetske mreže obezbeđena je sinhronizacija izlaznih faza svih invertora sa fazama mreže. Nakon sinhronizacije, elektrana se priključuje i predaje energiju

potrošačima. Ukoliko dođe do nestanka mrežnog napona (napona na priključnom kablu ka solarnoj elektrani), sistemska zaštita solarne elektrane preko kontaktora odvaja mrežu i baterijski sistem zajedno sa potrošačima ostaje u ostrvskom radu. Na Slici 7 je dat izgled unutrašnjosti GRO solarne elektrane sa glavnim prekidačem 150A, mrežnim analizatorom i relejem sistemske zaštite Ziehl UFR1001E.

Na Slici 8 je dat prikaz bilansa tokova energije u sistemu na VRM portalu, a na Slici 9 je dat prikaz dispozicije solarnih panela na krovu garaže.



Slika 9. Dispozicija solarnih panela na krovu garaže

III PRAĆENJE RADA SOLARNE ELEKTRANE I BSSE

Sistem nadzora solarne elektrane je projektovan da u realnom vremenu dostavlja informacije o trenutnoj proizvodnji električne energije i stanju baterija, sa alarmima u slučaju nepravilnog rada. Sistem takođe omogućuje mesečno i godišnje praćenje proizvedene električne energije. Victron VRM portal omogućuje korisniku da putem WEB sajta i aplikacija za Android i Apple mobilne telefone proverava status rada elektrane i količinu proizvodnje električne energije.

Za praćenje rada i komunikaciju putem interneta i pristup portalu predviđena je veza sa izlazom na internet preko zaštićene veze. Prikaz praćenja trenutnih parametara rada sistema sa potrošnjom energije, povlačenjem električne energije iz mreže, proizvodnjom energije iz solarne elektrane i statusom napunjenosti baterija je prikazan na Slici 8. Podaci su očitani sa Victron VRM portala.

V ZAKLJUČAK

U radu su predstavljene prednosti baterijskih sistema za skladištenje električne energije sa detaljima izvođenja krovne solarne fotonaponske elektrane maksimalne snage 50 kW, sa baterijskim sistemom ukupne akumulacije energije 50 kWh, koji se koristi za proizvodnju električne energije za potrebe sopstvene potrošnje garaže Obilićev Venac u Beogradu, bez predaje viškova električne energije u mrežu.

U ovom smislu realizovanim projektom je dat izvestan doprinos promociji obnovljivih izvora energije i korišćenju zelene i čiste energije, kao i svojevrsan doprinos u sveukupnoj dekarbonizaciji na teritoriji Republike Srbije. Dalja domaća istraživanja u ovoj oblasti mogu dati doprinos dodatnom povećanju udela obnovljive energije kod industrijskih i komercijalnih objekata, kao i stabilnijem i ekonomičnijem poslovanju domaćih privrednih subjekata.

Napredak u arhitekturi baterijskih sistema, kao što je integracija bidirekcionih topologija energetskih pretvarača i upravljačkih algoritama strujne i naponske kontrole, mogu poboljšati fleksibilnost i pouzdanost baterijskih sistema. Buduće inovacije u ovoj oblasti presudno će uticati na produženje veka baterija, smanjenju negativnih uticaja na životnu sredinu i unapređivanje ukupnih performansi BSEE u komercijalnim i industrijskim primenama.

LITERATURA

- [1] Mohamad, F., Teh, J., Lai, C.M., Chen, L.R. Development of Energy Storage Systems for Power Network Reliability: A Review, *Energies*, Vol. 11, No. 9, pp. 2278, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11092278>
- [2] Zhang, Y., Campana, P.E., Lundblad, A., Yan, J. Comparative study of hydrogen storage and battery storage in grid connected photovoltaic system: Storage sizing and rule-based operation, *Applied Energy*, Vol. 201, pp. 397-411, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.123>
- [3] Vuković, M., Supić, L. Realization of project of grid tied self-consumption PV system, in *Proc. 4th International Symposium on Environment-Friendly Energies and Applications - EFEA*, Belgrade, 14-16 September, 2016. <https://doi.org/10.1109/EFEA.2016.7748822>
- [4] Yang, C.S., Tsai, H.S., Lee, S.H. An Environment Control Management System for Container-Type Energy Storage System, in *Proc. IEEE 6th International Conference on Knowledge Innovation and Invention (ICKII)*, Sapporo, Japan, 11-13 August, 2023. <https://doi.org/10.1109/ICKII58656.2023.10332581>
- [5] Rosa, E.F., da Silveira Brito, E.M., Pereira, H., Pulsed-Current Operation of Smart Batteries Through Warm Redundancy, in *Proc. IEEE 8th Southern Power Electronics Conference (SPEC)*, Florianopolis, Brazil, 26-29 November, 2023. <https://doi.org/10.1109/SPEC56436.2023.10407654>
- [6] Vuković, M., Despotović, V.Ž., Simonović, B. Iskustva u izvođenju i eksploataciji fotonaponske elektrane instalisane snage 500 kW u fabrici „Gruner“ d.o.o-Vlasotince, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 4, pp. 57-67, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-4.57V>
- [7] Grujić, D., Vučić, D., Kuzman, M. Upporedna analiza i mogućnosti unapređenja položaja kupaca-proizvođača u Crnoj Gori i Republici Srbiji, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 26, No. 3, pp. 63-69, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE24-3.63G>
- [8] Baterijski sistemi: Pametni sistemi skladištenja za dom i industriju <https://www.conseko.rs/skladištenje-energije-baterijski-sistemi-za-stabilno-napajanje> [pristupljeno 16.12.2024]
- [9] Self-consumption & energy storage system examples & product, https://www.victronenergy.it/upload/documents/Brochure_Self-Consumption-&Energy-Storage_EN-2025.pdf [pristupljeno 16.12.2024]
- [10] Operating Manual for controller ZiehlUFR1001E, https://www.ziehl.com/media/aa/19/b7/1722922641/UFR1001E_OM_ZIEHL_L_2024-08-01_EN.pdf [pristupljeno 16.12.2024]

AUTORI

dr Miodrag Vuković, CONSEKO d.o.o., Beograd, m.vukovic@conseko.rs, ORCID [0000-0003-0158-192X](https://orcid.org/0000-0003-0158-192X)
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)

Implementing Battery Systems in Photovoltaic Power Plants

Abstract - When the energy from the solar power plant cannot be used at the time of production, one of the possible solutions is the storage of excess electricity in batteries. The paper describes the operation concept of the solar system + energy storage and the factors that influence this concept to be economically profitable in the long term for application to industrial and commercial companies. The paper shows an example of a system with battery energy storage implemented with inverters from European manufacturers, with which the authors successfully implemented several battery systems with solar power plants for the production of electricity for self-consumption.

Index terms - Energy storage, Battery energy storage, Solar power plants, Payback period

Energija iz otpada: pravni aspekt proizvodnje vodonika iz komunalnog otpada u Evropskoj uniji

Bojana Petrović Raičević*

* NIS a.d. Novi Sad, Narodnog fronta 12, Novi Sad

Rezime - Upotreba vodonika kao goriva predstavlja jedan od nosećih stubova energetske tranzicije Evropske unije, čiji je cilj dekarbonizacija i postizanje klimatske neutralnosti do 2050. godine. Proizvodnja vodonika iz komunalnog otpada ima perspektivu da doprinese kako stepenu iskorišćenja otpada, što će značajno uticati na smanjenje deponijskog odlaganja, tako i dekarbonizaciji određenih privrednih sektora koje je teško elektrifikovati poput hemijske ili čelične industrije. Međutim, kako bi ovaj proces bio kompatibilan sa ciljevima postavljenim u Evropskom zelenom dogovoru, kao i u Evropskom zakonu o klimi i drugim strateškim dokumentima, neophodno je ispuniti specifične uslove koje se odnose kako na karakteristike i vrstu samog otpada kao sirovine, tako i na metode njegove obrade. Cilj rada je analiza evropskog pravnog okvira za proizvodnju vodonika iz komunalnog otpada sa fokusom na usklađivanje sa principima cirkularne ekonomije i održivog upravljanja otpadom. Prvi deo ovog rada fokusiran je na analizu načela hijerarhije upravljanja otpadom u kontekstu proizvodnje vodonika sa posebnim naglaskom na ograničenja i mogućnosti korišćenja komunalnog otpada kao resursa. Naglašava se prednost prevencije, ponovne upotrebe i reciklaže komunalnog otpada, dok je energetska iskorišćenje moguće jedino za nerekiclabilne frakcije komunalnog otpada. Budući da evropska regulativa nema precizno utvrđene zakonske definicije vodonika pod tim nazivom, već koristi različite termine u zavisnosti od njegovog porekla i načina proizvodnje, drugi deo rada posvećen je analizi terminologije i klasifikacije vrsta vodonika koji mogu biti proizvedeni iz komunalnog otpada, kao i njihove uloge u energetskej tranziciji. U tom smislu posebna pažnja se pridaje Evropskoj direktivi o obnovljivoj energiji (RED III) kojom se reguliše vodonik dobijen iz organske frakcije komunalnog otpada, čime se svrstava u kategoriju obnovljivih goriva. Takođe, razmatra se i Direktiva o zajedničkim pravilima za unutrašnje tržište gasa iz obnovljivih izvora energije, prirodnog gasa i vodonika koja reguliše niskougljenični vodonik u koji spada vodonik dobijen iz fosilne frakcije nerekiclabilnog komunalnog otpada.

Ključne reči - vodonik, komunalni otpad, cirkularna ekonomija, dekarbonizacija

I UVOD

Klimatske promene i iscrpljivanje resursa sa kojima se svet sve intenzivnije susreće postavili su pred Evropsku uniju zadatak redefinisavanja energetskeg sektora u pravcu njegove dekarbonizacije. Prvi i krovni dokument Evropske Unije koji

dekarbonizaciju postavlja kao strateški cilj je Evropski zeleni dogovor kojim je predviđeno dostizanje klimatske neutralnosti do 2050. godine [1]. Navedeni cilj dodatno je učvršćen usvajanjem Evropskog zakona o klimi, koji je pravno obavezujućim okvirom osigurao njegovu primenu i postavio temelje za sprovođenje politika usmerenih ka dekarbonizaciji [2].

Kako navodi prof. Rajaković, vizija dekarbonizovanog energetskeg sistema podrazumeva otklon od prethodne paradigme u konvencionalnoj energetici prema energetici bez fosilnih goriva i čini suštinu energetske tranzicije [3]. Ovaj proces neraskidivo je povezan sa konceptom cirkularne ekonomije, koji teži maksimizaciji iskorišćenja resursa i minimizaciji kako generisanja, tako i odlaganja otpada. Važeći Akcioni plan za cirkularnu ekonomiju (CEAP) iz 2020. godine predstavlja ključni strateški dokument Evropske unije kojim se definišu mere za prelazak na održiviji ekonomski model privrede i to kroz smanjenje otpada, povećanje reciklaže i generalno efikasnije korišćenje resursa [4]. U tom kontekstu proizvodnja energije iz otpada zauzima specifično mesto kao deo strategije za energetska iskorišćenje onih frakcija otpada koji ne mogu biti reciklirani, što daje pozitivan efekat na smanjenje deponovanja. Shodno navedenom, proizilazi zaključak da energetska iskorišćenje otpada predstavlja operaciju komplementarnu recikliranju koja obezbeđuje dodatno izvlačenje benefita iz otpada kao resura i smanjenje deponovanja. Navedeno potvrđuje i Evropska komisija ističući da proizvodnja energije iz otpada može maksimizovati doprinos cirkularne ekonomije dekarbonizaciji isključivo uz poštovanje hijerarhije otpada, tj. ukoliko proizvodnja energije iz otpada ne remeti sprovođenje viših nivoa u hijerarhiji poput prevencije i reciklaže [5]. Uprkos činjenici da su u pitanju operacije koje se međusobno dopunjuju, istraživanja Evropskog univerziteta u Madridu ukazuju na izraženu preferenciju evropskih država ka reciklaži u odnosu na energetska iskorišćenje otpada koja je zastupljenija u državama sa višim BDP-om poput Austrije, Švedske, Danske i Finske [6].

Koncept „iz otpada u energiju“ (*engl. „waste-to-energy, dalje: WtE“*) uklapa se u širi okvir energetske tranzicije Evropske unije budući da omogućava istovremeno smanjenje emisijonog opterećenja životne sredine, te time doprinosi dekarbonizaciji. Označava operaciju ponovnog iskorišćenja otpada u energetske svrhe i odnosi se na proces generisanja energije u obliku električne energije i/ili toplote iz primarnog tretmana otpada, ili proces transformacije otpada u gorivo, kao što su metan, metanol, etanol ili sintetička goriva [5]. U svom obraćanju Evropskom parlamentu, Savetu, Evropskom Komitetu za ekonomska i socijalna pitanja i Komitetu regiona 2017. godine sa

ciljem daljeg pojašnjavanja uloge i povezanosti koncepta WtE sa principima cirkularne ekonomije, Evropska komisija je ukazala na širinu samog koncepta pretvaranja otpada u energiju navodeći da navedeni pojam obuhvata različite procese tretmana otpada koji generišu energiju (npr. u obliku električne energije ili toplote ili goriva dobijenog iz otpada), od kojih svaki ima različite uticaje na životnu sredinu i potencijal cirkularne ekonomije [5]. Shodno tome može se zaključiti da pojam WtE predstavlja generički pojam za različite procese proizvodnje energije iz otpada pod čijim se okriljem nalazi i pojam, tj. koncept proizvodnje vodonika iz otpada (*engl. „Waste-to-Hydrogen“, dalje: WtH2*).

Vodonik je nosač energije koji, iako predstavlja namjmanji molekul na svetu, igra veliku ulogu u energetskej tranziciji Evropske Unije. Obnovljivi vodonik može pomoći u dekarbonizaciji veoma važnih ekonomskih sektora u kojima je smanjenje emisija sa efektom staklene bašte veliki izazov poput čelične i hemijske industrije i industrije proizvodnje cementa [1,7]. Ističu se sledeće njegove uloge:

- zamena vodonika proizvedenog od fosilnih goriva u hemijskoj industriji;
- zamena koksnog uglja u proizvodnji gvožđa i čelika u cilju smanjenja emisija koje dolaze iz velikih peći;
- gorivo za teška vozila (vodonične gorive čelije) i avijaciju i brodarstvo (e-goriva);
- industrijsko i stambeno grejanje;
- proizvodnja električne energije [7].

Iako je na osnovu analize ključnih strateških dokumenata Evropske unije jasno vidljivo da Evropska unija aktivno promoviše vodonik, a posebno obnovljivi vodonik, kao instrument energetske tranzicije i dekarbonizacije, njegov pravni okvir ostaje fragmentiran i nedovoljno definisan. Regulativa koja se odnosi na vodonik rasuta je kroz više direktiva i uredbi, pri čemu ne postoji jedinstvena terminološka i pravna usklađenost. U zakonodavstvu se koriste različiti pojmovi, poput „niskougljenični vodonik“, „niskougljenični gas“, „niskougljenična goriva“, „goriva iz biomase“, „biogas“, „napredna biogoriva“, „reciklirana ugljenična goriva“, „obnovljiva goriva nebiološkog porekla“, pri čemu njihove definicije i međusobni odnosi nisu u potpunosti jasni.

Cilj ovog rada jeste analiza pravnog okvira koji uređuje proizvodnju vodonika iz komunalnog otpada s obzirom na to da komunalni otpad predstavlja važan resurs, ali i značajan izazov za države članice, uzimajući u obzir da je u Evropskoj uniji u toku 2023. godine proizvedeno 511 kg otpada po glavi stanovnika [8]. U pisanju ovog rada korišćene su sledeće metode: analitička metoda, komparativna metoda, deskriptivna metoda, kao i jezičko i sistemsko tumačenje.

II HIJERARHIJA UPRAVLJANJA OTPADOM – PREDUSLOV ZA ENERGETSKO ISKORIŠĆENJE OTPADA

Tvorac koncepta hijerarhije upravljanja otpadom kao jednog od krucijalnih elemenata za prelazak na cirkularnu ekonomiju bio je holandski političar Ad Lansik, koji je ovu svoju ideju pod nazivom „Lansikova lestvica“ (*engl. „Lansik Ladder“*) prvi put predstavio u parlamentu Holandije još 1979. godine [9].

Hijerarhija upravljanja otpadom predstavlja sistematsko rangiranje operacija upravljanja otpadom prema njihovom ukupnom uticaju na životu sredinu, pri čemu se prioritet daje onim opcijama kojima se umanjuju negativne posledice po životnu sredinu sa jedne strane, i pospešuje efikasno korišćenje resursa sa druge strane. U evropsku regulativu uvedena je Direktivom o otpadu iz 2008. godine, i kao takva ostala je nepromenjena i u članu 4 danas važeće Okvirne direktive o otpadu iz 2018. godine [10] i prikazana je na slici 1.



Slika 1. Hijerarhija upravljanja otpadom prema evropskoj legislativi

Važno je reći da je Okvirna direktiva o otpadu iz 2018. godine uvođenjem tačke 3 u članu 4 uvela i obaveze država članica da uvedu ekonomske instrumente i druge mere kojima će se podsticati implementacija hijerarhije otpada kao što su:

- naknade i ograničenja za odlaganje i spaljivanje otpada kako bi deponovanje, tj. odlaganje bilo najmanje poželjna opcija;
- uvođenje šema kojima se omogućava naplata otpada po stvarno generisanoj količini;
- uvođenje depozitnog sistema, naročito za otpad od plastike;
- podrška istraživanju i implementaciji najboljih dostupnih tehnologija;
- postepeno ukidanje subvencija koje nisu u skladu sa hijerarhijom otpada;
- uvođenje koncepta proširene odgovornosti proizvođača otpada.

Takođe, navedena direktiva je u tački 2b člana 3 uvela definiciju komunalnog otpada pod kojim se podrazumeva:

- mešani otpad i odvojeno sakupljeni otpad iz domaćinstava, uključujući papir i karton, staklo, metale, plastiku, biootpad, drvo, tekstil, ambalažu, otpadnu električnu i elektronsku opremu, otpadne baterije i akumulatore i kabasti otpad, uključujući duške i nameštaj;
- mešoviti otpad i odvojeno sakupljeni otpad iz drugih izvora, kada je takav otpad po prirodi i sastavu sličan otpadu iz domaćinstava.

Iako je jedan od ciljeva Okvirne direktive o otpadu bio usklađivanje i prilagođavanje pojmova, definicija „komunalnog

otpada“ je kritikovana kao nedovoljno precizna i podložna različitim tumačenjima [11].

Takođe, i definicije elemenata iz hijerarhije otpada poput reciklaže i ostalih operacija ponovnog iskorišćenja mogu biti predmet različitih interpretacija. Shodno tačkama 15 i 17 člana 3 Okvirne direktive o otpadu oba gorenavedena pojma potpadaju pod generički termin „operacije ponovnog iskorišćenja“ (*engl. „recovery“*) pod kojim se podrazumeva svaka operacija koja kao glavni rezultata daje otpad koji služi korisnoj svrsi zamenom drugih materijala koji bi inače bili korišćeni za ispunjavanje određene funkcije, ili otpad koji se priprema da ispuni tu funkciju, u postrojenju ili u široj privredi. Aneks II Okvirne direktive o otpadu daje neiscrpnu listu operacija ponovnog iskorišćenja među kojima se nalaze kako reciklaža, tako i ostale operacije poput ponovnog iskorišćenja otpada.

Tačka 17 član 3 Okvirne direktive o otpadu pod pojmom „reciklaža“ obuhvata svaku operaciju ponovnog iskorišćenja kojom se otpad prerađuje u proizvod, materijale ili supstance bez obzira da li se koriste za prvobitnu ili drugu namenu, uključujući ponovnu proizvodnju organskih materijala, osim ponovnog iskorišćenja u energetske svrhe i ponovne prerade u materijale koji su namenjeni za korišćenje kao gorivo ili za prekrivanje deponija. Kako razjašnjava Evropska komisija, suština reciklaže je da se otpadni materijal obrađuje kako bi se promenila njegova fizičko-hemijska svojstva, omogućavajući mu da se ponovo koristi za istu ili drugu primenu, te uključuje svaki fizički, hemijski ili biološki tretman otpada koji kao rezultat daje materijal koji se ne smatra otpadom [12].

Ostale operacije ponovnog iskorišćenja nalaze se na četvrtom mestu u hijerarhiji otpada, predstavljajući operacije koje su na nižoj ekološkoj lestvici kako od prevencije, tako i od pripreme za ponovnu upotrebu, i od reciklaže. Njihov pojam nije eksplicitno definisan Okvirnom direktivom o otpadu, već se na osnovu jezičkog i sistemskog tumačenja nameće zaključak da tu spadaju sve one operacije koje se ne mogu klasifikovati kao operacije pripreme za ponovnu upotrebu ili kao reciklaža. Sama činjenica da Aneks II Okvirne direktive o otpadu navodi samo primere različitih aktivnosti koje se ubrajaju u pojam „ostale operacije ponovnog iskorišćenja otpada“ otvara prostor za tumačenje. Budući da je i termin „odlaganje“ negativno definisan, tj. čine ga one operacije koje se ne mogu klasifikovati pod pojmom „ponovno iskorišćenje otpada“, čija lista nije konačna, vrlo često dolazi do preklapanja ova dva pojma [11]. O tome svedoči i slučaj *Abfall Service AG (ASA) v Bundesminister für Umwelt, Jugend und Familie* Suda pravde Evropske unije [13]. U navedenom slučaju austrijska kompanija Abfall Service obavestila je austrijsko Ministarstvo za životnu sredinu, kao nadležni organ u državi članici iz koje je otpad nastao, o svojoj nameri da otpremi 7 000 tona opasnog otpada u Nemačku. Prema obaveštenju, otpad je bio šljaka i pepeo koji je nastao kao neželjeni proizvod u radu spalionica otpada i pretvoren je u „specifičan proizvod“ u fabrici za tretman otpada u Beču. Otpad je trebalo da se deponuje u bivši rudnik soli u Nemačku, kako bi se obezbedilo zaptivanje rudnika. Međutim, austrijsko Ministarstvo za životnu sredinu nije odobrilo isporuku budući da, prema njihovom tumačenju, navedena aktivnost predstavlja operaciju odlaganja. Iako se Evropski sud pravde u konkretnom

slučaju nije izjasnio po pitanju da li navedena operacija predstavlja odlaganje ili ponovno iskorišćenje otpada, doneo je nekoliko važnih smernica za dalje tumačenje. Naime, sud je utvrdio da je cilj aneksa Direktive da se navedu najčešće operacije odlaganja i ponovnog iskorišćenja, a ne da se da precizna i iscrpna lista svih operacija odlaganja i ponovnog iskorišćenja obuhvaćenih direktivom. Prema mišljenju Suda, iz direktive proizilazi da je suštinska karakteristika operacije ponovnog iskorišćenja otpad koji služi korisnoj svrsi u zameni drugih materijala koji bi se morali koristiti u tu svrhu, čime se čuvaju prirodni resursi.

Proizvodnja vodonika iz komunalnog otpada predstavlja energetsko iskorišćenje otpada i kao takva potpada pod pojam „ostale operacije ponovnog iskorišćenja otpada“ i to pod šifrom R1- korišćenje u svojstvu goriva ili kao drugo sredstvo za proizvodnju energije Aneksa II Okvirne direktive o otpadu. Tu se ubrajaju i operacije spaljivanja komunalnog otpada koje imaju za cilj proizvodnju energije, ali samo ukoliko ispunjavaju stroge kriterijume energetske efikasnosti čije je objašnjenje dato u Evropskom vodiču za korišćenje formule energetske efikasnosti R1 za postrojenja za spaljivanje namenjena preradi komunalnog čvrstog otpada u skladu sa Okvirnom direktivom o otpadu 2008/98/EC [14]. Ukoliko ovi kriterijumi nisu zadovoljeni, ovakva aktivnost u skladu sa Aneksom I Okvirne direktive o otpadu predstavlja operaciju odlaganja otpada.

Shodno navedenom, Okvirna direktiva o otpadu eksplicitno prepoznaje komplementarnost između operacija reciklaže i energetskog iskorišćenja otpada, budući da dozvoljava da se energetska valorizacija otpada, pod uslovom da doprinosi ostvarivanju ciljeva održivog upravljanja otpadom i energetske efikasnosti, smatra operacijom ponovnog iskorišćenja otpada. Važnost poštovanja hijerarhije otpada prilikom proizvodnje energije istaknuta je i u tački 3 člana 3 Direktive o obnovljivim izvorima energije (*dalje: RED III Direktiva*) u kojoj se zahteva da se energija iz biomase proizvodi na način kojim se smanjuje negativan uticaj na biodiverzitet, životnu sredinu i klimu sa jedne strane, i poštuje kaskadni princip upotrebe biomase olicen u hijerarhiji upravljanja otpadom, sa druge strane [15].

Međutim, pojedine organizacije poput Bellona fondacije¹ ili Zero Waste Europe² protivnici su koncepta WtE ističući da takav pristup može ugroziti ostvarivanje ciljeva reciklaže budući da podstiče termičku obradu otpada i smanjuje dostupne količine materijala za reciklažne tokove, što nije u skladu sa principima cirkularne ekonomije [16, 17].

Autor ovog rada mišljenja je da reciklaža i energetsko iskorišćenje otpada nisu pravno niti funkcionalno suprotstavljene kategorije, već predstavljaju komplementarne pristupe usmerene ka smanjenju količine otpada koji se odlaže na deponije i ka maksimizaciji iskorišćenja materijalnih i energetskih resursa sadržanih u otpadu.

¹Fondacija za zaštitu životne sredine Bellona je međunarodna neprofitna organizacija sa sedištem u Norveškoj - <https://bellona.org/>

²Zero Waste Europe je evropska mreža zajednica, lokalnih lidera, stručnjaka i agenata sa sedištem u Briselu čiji je rad fokusiran na efikasnijem korišćenju resursa i eliminaciji otpada u društvu - <https://zerowasteurope.eu/about/team/#staff>

Sa pravnog stanovišta, reciklaža se uvek mora razmatrati kao primarni metod obrade otpada, u skladu sa hijerarhijom upravljanja otpadom. Međutim, u situacijama kada reciklaža nije tehnički, ekonomski ili ekološki izvodljiva, pravni okvir Evropske unije omogućava primenu postupaka energetske iskorišćenja kao legitimog i poželjnog rešenja. U tom kontekstu, proizvodnja vodonika iz nerekiclabilnog dela komunalnog otpada putem termičkih i termohemijskih postupaka predstavlja pravno prihvatljivu praksu pod uslovom da se postupci obrade otpada sprovode u skladu sa principima zaštite životne sredine i cirkularne ekonomije.

Povećanje stope reciklaže, kako je predviđeno Okvirnom direktivom o otpadu ni na koji način nije u suprotnosti sa pravno priznatim značajem energetske valorizacije otpada³. Naprotiv, cilj zakonodavca nije isključivanje energetske iskorišćenja, već njegovo pravilno pozicioniranje unutar hijerarhije otpada, pri čemu reciklaža ostaje prioritet kada god je tehnički i ekonomski izvodljiva. Pored toga, tačka 2 člana 4 pomenute direktive omogućava odstupanja od hijerarhije otpada kada je to opravdano boljim ekološkim ishodima, čime se otvara prostor za integraciju reciklaže i energetske valorizacije kao međusobno dopunjujućih strategija. U tom kontekstu, proizvodnja vodonika iz nerekiclabilnog otpada može biti deo zakonitog i održivog sistema upravljanja otpadom, pod uslovom da doprinosi ciljevima zaštite životne sredine i energetske efikasnosti koje propisuje pravni okvir Evropske unije.

III KLASIFIKACIJA VODONIKA DOBIJENOG IZ KOMUNALNOG OTPADA

Vodonična strategija Evropske unije usvojena 2020. godine pruža strateški i regulatorni okvir koji podstiče razvoj i integraciju obnovljivog i niskougljeničnog vodonika u energetske sistem Evropske unije [18]. Navedena strategija prvenstveno se fokusira na promociju obnovljivog vodonika koji dobija poseban značaj usvajanjem plana REPower 2022. godine koji ima za cilj brzo smanjenje zavisnosti Evropske unije od ruskih fosilnih goriva, te predviđa da proizvodnja obnovljivog vodonika u Evropskoj uniji dosegne 10 miliona tona do 2030. godine [19]. Međutim, uvažavajući trenutne tehnološke i ekonomske izazove u obezbeđivanju dovoljne količine obnovljivog vodonika, Evropska unija kratkoročno i srednjeročno priznaje i ulogu niskougljeničnog vodonika kao prelaznog rešenja, tj. tranzicionog goriva.

Za implementaciju strategije predviđeno je 20 ključnih aktivnosti od kojih šesta aktivnost predstavlja uvođenje sveobuhvatne terminologije i kriterijuma širom Evrope za sertifikaciju obnovljivog vodonika i vodonika sa niskim sadržajem ugljenika. Sama strategija pruža određene definicije, te tako pod vodonikom sa niskim sadržajem ugljenika podrazumeva vodonik na bazi fosilnih goriva sa tehnologijom hvatanja ugljenika i vodonik na bazi električne energije, sa značajno smanjenim emisijama gasova staklene bašte tokom celog životnog ciklusa u poređenju sa postojećom proizvodnjom vodonika. Vodonik na

bazi fosilnih goriva odnosi se na vodonik proizveden kroz različite procese koristeći fosilna goriva kao sirovinu, uglavnom reformisanjem prirodnog gasa ili gasifikacijom uglja, a vodonik na bazi fosilnih goriva sa tehnologijom hvatanja ugljenika je poddeo vodonika na bazi fosilnih goriva, u segmentu gde se hvataju gasovi staklene bašte koji se emituju kao deo procesa proizvodnje vodonika [20]. Vodonik na bazi električne energije odnosi se na vodonik koji se proizvodi elektrolizom vode (u elektrolizeru koji se napaja električnom energijom), bez obzira na izvor električne energije [20].

Iako je Vodonična strategija Evropske unije definisala određene pojmove i kategorizacije, oni nisu u potpunosti transponovani niti usklađeni sa važećim direktivama i regulativama Evropske unije. Posledično, dolazi do značajnog raskoraka u definicijama i pravnoj regulativi, jer se vodonik uređuje kroz više različitih direktiva koje ne pružaju jedinstven pravni okvir. Ovaj problem je posebno izražen u kontekstu vodonika proizvedenog iz komunalnog otpada, budući da se komunalni otpad sastoji iz dve frakcije: fosilne i organske frakcije. Nedostatak jasne pravne distinkcije između ovih frakcija dodatno komplikuje regulisanje statusa i klasifikacije vodonika dobijenog iz takvog izvora, što može uticati na njegovu upotrebu i tržišni tretman unutar Evropske unije.

Za vodonik iz fosilne frakcije komunalnog otpada vezuje se pojam „vodonik sa niskim sadržajem ugljenika“ (*engl. „low-carbon hydrogen“*) koji je regulisan Direktivom o zajedničkim pravilima za unutrašnje tržište gasa iz obnovljivih izvora energije, prirodnog gasa i vodonika, ali i pojam „reciklirana ugljenična goriva“ (*engl. „recycled carbon fuels“*) koji je uređen RED III Direktivom.

Vodonik dobijen iz organske frakcije komunalnog otpada nije eksplicitno regulisan, već može biti klasifikovan kao biogas, gorivo iz biomase ili napredno biogorivo (*engl. „advanced biofuels“*).

Veoma je važno istaći da je proizvodnja vodonika kako iz fosilne, tako iz organske frakcije, moguća jedino ukoliko je u pitanju nerekiclabilna materija, čime se ostvaruje koherentnost sa hijerarhijom upravljanja otpadom i daje se prioritet reciklaži kao operaciji višeg stepena u navedenoj hijerarhiji.

III-1 Vodonik dobijen iz fosilne frakcije komunalnog otpada

Vodonik dobijen iz fosilne frakcije komunalnog otpada regulisan je Direktivom o zajedničkim pravilima za unutrašnje tržište gasa iz obnovljivih izvora energije, prirodnog gasa i vodonika, koja je deo Paketa Evropske unije za dekarbonizaciju vodonika i gasa, usvojenog u maju 2024. godine. Navedena direktiva vodonik sa niskim sadržajem ugljenika definiše kao vodonik čiji je energetske sadržaj dobijen iz neobnovljivih izvora energije i koji zadovoljava prag smanjenja emisije gasova staklene bašte od 70% u poređenju sa komparatorom fosilnih goriva za obnovljiva goriva nebiološkog porekla utvrđenim metodologijom za procenu uštede emisija gasova staklene bašte iz obnovljivih goriva nebiološkog porekla i goriva od recikliranog ugljenika. Vodonik sa niskim sadržajem ugljenika shodno tački 12 člana 2 Direktive o zajedničkim pravilima za unutrašnje tržište gasa iz obnovljivih izvora energije, prirodnog gasa i vodonika potpada i pod pojam

³U skladu sa članom 11. Okvirne directive o otpadu, države članice imaju obavezu da do 2030. godine recikliraju najmanje 60% komunalnog otpada, a do 2035. godine najmanje 65% komunalnog otpada.

„gas sa niskim sadržajem ugljenika“ (*eng. „low-carbon“ gas*) za koji takođe važi prag od 70% smanjenja efekta staklene bašte u odnosu na komparator fosilnih goriva koji iznosi 94 gCO₂eq/MJ⁴. Pored toga, na osnovu tačke 13 navedenog člana, vodonik sa niskim sadržajem ugljenika zajedno sa recikliranim ugljeničnim gorivima i sintetičkim i tečnim gorivima dobijenim iz vodonika sa niskim sadržajem ugljenika spadaju u goriva sa niskim sadržajem ugljenika (*engl. „low carbon fuels“*) za koja se takođe traži već opisan prag smanjenja gasova sa efektom staklene bašte.

Na osnovu svega navedenog može se reći da pojmovi „gas sa niskim sadržajem ugljenika“, „goriva sa niskim sadržajem ugljenika“ i „vodonik sa niskim sadržajem ugljenika“ dele zajedničku definiciju zasnovanu na zahtevu da se postigne smanjenje emisije GHG od najmanje 70 % u poređenju sa komparatorom fosilnih goriva definisanim u RED III Direktivi.

Prilikom analize navedene definicije neophodno je uzeti u obzir i Taksonomiju Evropske unije koja za održivi vodonik propisuje uštedu emisija sa efektom staklene bašte u odnosu na komparator fosilnih goriva od 94 gCO₂e/MJ od 73,4%, što rezultira emisijama gasova staklene bašte tokom životnog ciklusa manjim od 3 tCO₂e/tH₂ [21].

Neujednačenost definicija pojmova „niskougljenični vodonik“ u Direktivi o zajedničkim pravilima za unutrašnje tržište gasa iz obnovljivih izvora energije, prirodnog gasa i vodonika, Vodoničnoj strategiji Evropske unije i Taksonomiji Evropske stvara pravnu nesigurnost i potencijalno ugrožava privredne subjekte, investitore i mehanizme održivog finansiranja. Budući da Taksonomija Evropske unije propisuje strože zahteve za održivo finansiranje, može doći do situacije u kojoj određeni oblici niskougljeničnog vodonika ispunjavaju uslove jedne regulative, ali ne i druge. Pored toga, navedene definicije Ovakva neujednačenost definicija može proizvesti pravnu diskriminaciju među investitorima, jer subjekti koji ulažu u proizvodnju niskougljeničnog vodonika mogu biti isključeni iz održivog finansiranja ukoliko njihov proces ne ispunjava kriterijume iz Taksonomije. Time se direktno narušava pravna sigurnost tržišnih aktera i dovodi u pitanje ostvarenje ciljeva Evropske unije u pogledu energetske tranzicije i dekarbonizacije industrije.

Sama metodologija za izračunavanje uštede emisija gasova staklene bašte, konkretno kako postići prag smanjenja od 70 %, nije navedena u zakonskim predlozima, već se tački 5 člana 9 Direktive o zajedničkim pravilima za unutrašnje tržište gasa iz obnovljivih izvora energije, prirodnog gasa i vodonika daje Evropskoj komisiji rok od 12 meseci nakon stupanja na snagu Paketa za dekarbonizaciju vodonika i gasa, da donese delegirani akt kojim se u potpunosti navode detalji⁵. Trenutno je u toku

⁴ U skladu sa Delegiranim aktom Evropske komisije uspostavljanje minimalnog praga za uštede emisija gasova staklene bašte iz recikliranih ugljeničnih goriva i preciziranjem metodologije za procenu uštede emisija gasova staklene bašte iz obnovljivih tečnih i gasovitih transportnih goriva nebiološkog porekla i iz recikliranih ugljeničnih goriva.

⁵ Dok propise Evropske unije regularno zajednički usvajaju glavni zakonodavci (Evropski parlament i Evropski savet), delegirane uredbe usvaja Evropska komisija, ako su joj dva glavna zakonodavca u zakonodavnom aktu dala mandat za to [21].

dijalog sa zainteresovanim stranama o sadržaju navedenog akta [22]. Predmetna metodologija treba da:

- obuhvata emisije gasova staklene bašte tokom životnog ciklusa;
- razmatra indirektne emisije koje nastaju usled preusmeravanja rigidnih inputa;
- bude u skladu sa metodologijom za procenu uštede emisija sa efektom staklene bašte za obnovljiva goriva nebiološkog porekla i reciklirana ugljenična goriva uključujući tretman emisija usled curenja vodonika; i
- uzme u obzir uzvodne emisije metana i stvarne stope hvatanja ugljenika [23].

Kako propisuje preambula Direktive o zajedničkim pravilima za unutrašnje tržište gasa iz obnovljivih izvora energije, prirodnog gasa i vodonika proces sertifikacije ove vrste vodonika blizak je pristupu navedenom u RED III Direktivi, te se shodno istoj od ekonomskih operatera u državama članicama traži dokaz o ispunjenosti praga uštede emisija kao i sprovođenje nezavisne revizije.

Još jedan pojam pod koji može potpadati vodonik dobijen iz fosilne frakcije komunalnog otpada je „reciklirana ugljenična goriva“ (*engl. „recycled carbon fuels“*) regulisan RED III Direktivom [24, 25]. Reciklirana ugljenična goriva definisana su tačkom 5 član 2 RED III Direktive kao tečna i gasovita goriva koja se proizvode:

- iz tokova tečnog ili čvrstog otpada neobnovljivog porekla koji nisu pogodni za operaciju materijalnog ponovnog iskorišćenja (*engl. „material recovery“*) shodno članu 4 Okvirne direktive o otpadu;
- ili iz tokova otpadnog gasa i izduvnog gasa neobnovljivog porekla koji nastaju kao neizbežna i nenamerna industrijska posledica proizvodnih procesa.

Na osnovu navedene definicije, može se izvesti zaključak da vodonik dobijen iz fosilne frakcije komunalnog otpada pod određenim uslovima može predstavljati i reciklirano ugljenično gorivo. Prvi uslov je da je ispoštovano načelo hijerarhije upravljanja otpadom, te da takav otpad više nije pogodan za ponovnu upotrebu ili reciklažu. Drugi uslov je dat u članu 29a RED III Direktive i zahteva zadovoljavanje praga smanjenja emisije gasova staklene bašte od 70% u poređenju sa komparatorom fosilnih goriva za obnovljiva goriva nebiološkog porekla koji iznosi 94g CO₂ek/MJ. Metodologija i detaljna pravila o načinu obračunavanja navedenih emisija i njihovih ušteda predstavljena su u Delegiranom aktu Evropske komisije uspostavljanje minimalnog praga za uštede emisija gasova staklene bašte iz recikliranih ugljeničnih goriva i preciziranjem metodologije za procenu uštede emisija gasova staklene bašte iz obnovljivih tečnih i gasovitih transportnih goriva nebiološkog porekla i iz recikliranih ugljeničnih goriva.

Na osnovu člana 25 RED III Direktive reciklirana ugljenična goriva uzimaju se u obzir prilikom računanja doprinosa obnovljive energije u finalnoj potrošnji energije u transportnom sektoru, u skladu sa ciljem od najmanje 29% do 2030. godine. Njihova mogućnost uključivanja u ostvarivanje ciljeva obnovljive energije zasnovana je na činjenici da potiču iz otpada fosilnog porekla, ali doprinose smanjenju emisija gasova sa

efektom staklene bašte u poređenju sa konvencionalnim fosilnim gorivima.

Nasuprot tome, vodonik sa niskim sadržajem ugljenika, koji se takođe može proizvoditi iz fosilnih izvora uz primenu tehnologija za smanjenje emisija, ne može se računati u ispunjavanje ciljeva obnovljive energije prema RED III Direktivi. Ovakav regulatorni pristup stvara očiglednu neujednačenost, budući da se oba tipa goriva dobijaju iz fosilnih frakcija, ali im se dodeljuju različiti pravni statusi i mogućnosti integracije u energetske strategije Evropske unije. Uzimajući u obzir da se priznaje doprinos recikliranih ugljeničnih goriva u dostizanju ciljeva obnovljive energije, dok niskougljenični vodonik nije obuhvaćen istim mehanizmima podrške, postavlja se pitanje koji su pravni i ekonomski razlozi za primenu različitih pravila na goriva sličnog porekla i funkcije.

Neujednačena regulativa dovodi do pravne nesigurnosti i može stvoriti nejednake tržišne uslove, obeshrabriti ulaganja u određene vrste tehnologija i otežati dugoročnu implementaciju održivih energetskih politika u Evropskoj uniji. Pravnoj nesigurnosti doprinosi i razdvajanje regulative za reciklirana ugljenična goriva i vodonika sa niskim sadržajem ugljenika u dva različita pravna akta. Reciklirana ugljenična goriva regulisana su u okviru RED III Direktive, iako nisu obnovljiva goriva, dok je niskougljenični vodonik isključen iz ove direktive i obuhvaćen Direktivom o zajedničkim pravilima za unutrašnje tržište gasa iz obnovljivih izvora energije, prirodnog gasa i vodonika, uz obrazloženje u tački 14 preambule da nije obnovljiv i da RED III Direktiva nije namenjena regulisanju goriva koja nisu u potpunosti obnovljiva. Otvara se pitanje da li je takav regulatorni pristup opravdan s obzirom na to da su oba tipa goriva poreklom iz fosilnih frakcija, ali imaju različit tretman u zakonodavnom okviru.

Čini se bi regulatorna konsolidacija bila bolje rešenje. Jedna mogućnost jeste uključivanje niskougljeničnog vodonika u RED III Direktivu, s obzirom na njegovu ulogu tranzicionog goriva u prelasku na potpuno obnovljive izvore energije. Ovim bi se omogućila veća pravna predvidivost i ujednačenost tretmana različitih vrsta goriva sa smanjenim emisijama. S druge strane, moguće rešenje može biti donošenje posebnog akta koji bi obuhvatio sva goriva sa smanjenim emisijama, uključujući kako reciklirana ugljenična goriva, tako i niskougljenični vodonik, čime bi se izbegle nedoslednosti između različitih pravnih instrumenata. Konačno, može se razmotriti i opcija ujedinjavanja celokupne regulative o vodoniku u jedan akt, koji bi obuhvatio i obnovljivi, i niskougljenični vodonik, i reciklirana ugljenična goriva i ostala goriva sa smanjenim emisijama čime bi se osigurala pravna koherentnost i jasno definisali kriterijumi za njegovu proizvodnju i upotrebu u okviru politike Evropske unije. Ovakav pristup bi mogao doprineti pravnoj sigurnosti investitora i omogućiti jasniji pravni okvir za razvoj tržišta vodonika u Evropskoj uniji.

III-2 Vodonik dobijen iz organske frakcije komunalnog otpada

Čvrsti, gasoviti i tečni resursi biomase zajedno u 2023. godini činili su polovinu ukupne potrošnje obnovljive energije u Evropskoj uniji što svedoči o važnosti biomase kao resursa obnovljive energije u Evropskoj uniji [26].

Na osnovu tačke 24 člana 2 RED III Direktive organska frakcija komunalnog otpada potpada pod definiciju biomase budući da predstavlja komunalni otpad biološkog porekla. Navedeni član uvodi generički pojam „goriva iz biomase“ (*engl. „biomass fuels“*) koji definiše kao gasovita i čvrsta goriva proizvedena iz biomase. Navedeni termin dalje obuhvata i termin „biogas“ (*enlg. „biogas“*), tj. gasovita goriva proizvedena iz biomase, a pored njega važno je spomenuti u termin „biogoriva“ (*engl. „biofuels“*), tečna goriva proizvedena iz biomase. Saglasno tački 1 predmetnog člana, svi navedeni pojmovi predstavljaju obnovljive izvore energije. Nameće se zaključak da je vodonik koji je proizveden iz organske frakcije komunalnog otpada obnovljivo gorivo, što potvrđuje i definicija obnovljivog vodonika data u Vodoničnoj strategiji Evropske unije [27]. Data strategija pod obnovljivim vodonikom podrazumeva i vodonik koji se proizvodi reformisanjem biogasa (umesto prirodnog gasa) ili biohemijskom konverzijom biomase.

Međutim, pravna definicija obnovljivog vodonika kao takvog u zakonodavstvu Evropske unije ne postoji, već se ovaj termin pojavljuje isključivo u Vodoničnoj strategiji EU, gde se koristi u širem političkom kontekstu energetske tranzicije i dekarbonizacije. RED III Direktiva koja predstavlja najvažniji akt Evropske unije kojim se uspostavlja pravni okvir za proizvodnju i korišćenje obnovljivih izvora energije, ne poznaje pojam obnovljivog vodonika. Umesto toga navedena direktiva definiše pojam „obnovljiva goriva nebiološkog porekla“ (*engl. „renewable fuels of non-biological origin“*, dalje: RFNBO), koji obuhvataju isključivo goriva dobijena iz vode putem elektrolize uz korišćenje obnovljive električne energije ili iz drugih nebioloških izvora, pri čemu je biomasa kao sirovina za njihovu proizvodnju isključena. To znači da vodonik koji se proizvodi iz biomase, iako potencijalno obnovljiv, ne može biti klasifikovan kao RFNBO prema RED III Direktivi, čime se još jednom stvara pravna neujednačenost u regulisanju različitih vrsta vodonika u okviru zakonodavstva EU.

S druge strane, Direktiva o zajedničkim pravilima za unutrašnje tržište gasa iz obnovljivih izvora energije, prirodnog gasa i vodonika u tački 13 preambule eksplicitno prepoznaje vodonik proizveden korišćenjem biomase kao deo postojećeg regulatornog okvira za biogas. Ovakav pravni pristup može dovesti do pravne nesigurnosti u pogledu statusa i podsticaja za proizvodnju vodonika iz biomase, budući da se njegovo regulisanje preklapa sa različitim pravnim režimima, pri čemu RED III Direktiva ne prepoznaje takav vodonik u okviru RFNBO kategorije, dok mu Direktiva o gasu i vodoniku daje određeni pravni legitimitet kroz povezivanje sa biogasom.

Dodatno, postoje i tumačenja prema kojima, zavisnosti od korišćene sirovine, vodonik proizveden iz biorazgradivog otpada može se klasifikovati kao napredno biogorivo (*engl. „advanced biofuels“*) [27]. RED III Direktiva navedeni pojam definiše u tački 34 člana 2 kao biogoriva koja su proizvedena od sirovina navedenih u delu A Aneksa IX među kojima se nalazi frakcija biomase u komunalnom otpadu osim one koja je uključena u ciljeve reciklaže u skladu sa Okvirnom direktivom o otpadu.

Na osnovu analize celokupne RED III Direktive može se zaključiti da su za RFNBO i biogas, tj. biogoriva postavljeni različiti ciljevi u domenu njihovog učešća u udelima energetske

potrošnje. Naime za RFNBO propisan je obavezni cilj od najmanje 2,6% ukupne energetske potrošnje u transportnom sektoru do 2030. godine, dok se njihova uloga u drugim sektorima ne reguliše eksplicitnim kvotama već zavisi od nacionalnih politika država članica. S druge strane, biogas i biogoriva imaju širu primenu i doprinose ostvarenju različitih ciljeva: u transportu čine deo ukupnog obaveznog cilja od najmanje 29% obnovljive energije do 2030. godine, u sektoru grejanja i hlađenja države članice moraju godišnje povećavati udeo obnovljivih izvora za najmanje 1,1%, dok u elektroenergetskom sektoru biogas i goriva iz biomase podleže posebnim kriterijumima održivosti i efikasnosti konverzije.

Iako obnovljiv vodonik može istovremeno pripadati i RFNBO kategoriji ali i biogasu, odnosno biti tretiran kao biogorivo, RED III Direktiva ga ne prepoznaje kao jedinstvenu kategoriju, te ne daje jasan pravni okvir koji bi omogućio njegovo ravnopravno uključivanje u ispunjenje ciljeva za obnovljive izvore energije. Ovakva pravna fragmentacija dovodi do neujednačenog tretmana vodonika, jer se RFNBO vodonik može eksplicitno računati za ispunjenje ciljeva u transportu, dok vodonik iz biogasa podleže drugačijim pravilima, što može ograničiti njegovu tržišnu vrednost i primenu.

Još jednom se nameće pitanje o potrebi usklađivanja različitih pojmova i definicija radi obezbeđivanja pravne sigurnosti i jednoobraznog tretmana svih oblika obnovljivog vodonika. Trenutni regulatorni okvir može uticati na investicione odluke i konkurentnost različitih tehnologija u okviru vodonične ekonomije Evropske unije. Na važnost zasebnog regulisanja vodonika proizvedenog iz biomase sugerise i Hydrogen Europe, evropsko udruženje koje okuplja kompanije, mala i srednja preduzeća, nacionalne asocijacije i nevladine organizacije koji se bave razvojem vodonične industrije u Evropskoj uniji [28].

Preciznija regulacija uz razjašnjenje pojmova „vodonik sa niskim sadržajem ugljenika“, „reciklirana ugljenična goriva“, „obnovljivi vodonik“, „biogas“, „goriva iz biomase“ i „napredna biogoriva“, kao i njihove međusobne korelacije neophodan je uslov za dalje razvijanje tehnologija i tržišta vodonika koji može doprineti dekarbonizaciji. Budući da se trenutno realizuju brojni projekti proizvodnje vodonika iz komunalnog otpada poput FUREC projekta (proizvodnja vodonika od otpada iz domaćinstva u Limburgu, Holandija) ili Plagazi projekat (proizvodnja vodonika iz različitih vrsta otpada uključujući i komunalni otpad u Nemačkoj i Švedskoj), njihova uspešnost i dalja primena dostignuća zahteva brzu reakciju evropskog zakonodavca i blagovremene amandmane postojećih direktiva [29,30].

IV ZAKLJUČAK

Korišćenjem otpada kao sirovine za dobijanje vodonika, smanjuje se oslanjanje na fosilna goriva i omogućava se efikasnije korišćenje resursa, što doprinosi postizanju ciljeva dekarbonizacije. Međutim, kako bi vodonik proizveden iz otpada zaista bio u skladu sa cirkularnom ekonomijom, neophodno je da se pri procesu njegove proizvodnje poštuje hijerarhija upravljanja otpadom, čime se obezbeđuje da energetska iskorisćenje otpada dolazi tek nakon što su iscrpljene mogućnosti njegove ponovne upotrebe i reciklaže.

Iako se elementi hijerarhije upravljanja definišu kroz princip otvorene liste, što omogućava određeni stepen fleksibilnosti, takav pristup može dovesti do različitih tumačenja i pravne nesigurnosti. U tom smislu, preciznije definisanje ključnih pojmova i jasnije određivanje kriterijuma za nerekiclabilnu frakciju komunalnog otpada moglo bi doprineti pravnoj sigurnosti i podsticanju ulaganja u tehnologije proizvodnje vodonika iz otpada. Kada se hijerarhija otpada adekvatno primeni, reciklaža i energetska iskorisćenje otpada postaju komplementarne metode upravljanja otpadom koje doprinose smanjenju količine otpada koja završava na deponijama.

Sa aspekta strateških dokumenata Evropske unije, prioritet se daje obnovljivom vodoniku, dok se vodonik sa niskim sadržajem ugljenika prepoznaje kao tranziciono gorivo u procesu prelaska ka potpunoj dekarbonizaciji. U tom kontekstu, vodonik dobijen iz komunalnog otpada može igrati značajnu ulogu, ali je neophodno preciznije usklađivanje pravnog okvira kako bi se omogućila njegova šira primena i uključivanje u ciljeve obnovljive energije.

Proizvodnja vodonika iz komunalnog otpada dodatno komplikuje pravni okvir zbog njegove dvojne prirode, koja proizlazi iz sastava otpada. Vodonik dobijen iz fosilne frakcije komunalnog otpada svrstava se u kategorije „vodonika sa niskim sadržajem ugljenika“ i „recikliranih ugljeničnih goriva“, dok se vodonik iz organske frakcije otpada reguliše kroz pojmove „biogas“, „goriva iz biomase“ ili „napredna biogoriva“. Ovakva fragmentacija rezultira pravnom nesigurnošću i otežava njegovu integraciju u evropski energetska sistem. Poseban problem predstavlja nepostojanje jasne definicije obnovljivog vodonika, što stvara regulatorne nejasnoće i otežava investicije u ovu oblast. Preciznije definisanje svih navedenih kategorija i njihovih međusobnih odnosa neophodno je kako bi se obezbedila pravna sigurnost za privredne subjekte koji ulažu u proizvodnju i upotrebu vodonika iz otpada.

Dodatno, evropska legislativa ne prepoznaje vodonik dobijen iz organske frakcije komunalnog otpada kao poseban oblik obnovljivog vodonika, već ga isključivo tretira kroz regulative koje se odnose na biogas. To znači da za njega ne postoje posebna pravila, što ga dovodi u nepovoljan položaj u odnosu na druge oblike obnovljivog vodonika, poput onog dobijenog elektrolizom uz korišćenje obnovljive električne energije (RFNBOs). Ovakav regulatorni propust može ograničiti razvoj tehnologija za konverziju otpada u vodonik i umanjiti njegovu ulogu u dekarbonizaciji.

Konačno, analiza važećih pravnih akata pokazuje da su ključni pojmovi u vezi sa vodonikom raspršeni kroz različite direktive, te je u cilju uspostavljanja pravne sigurnosti, neophodno razmotriti donošenje jedinstvenog zakonodavnog okvira koji bi obuhvatio sve oblike vodonika. Na taj način bi se omogućilo jasno razgraničenje kategorija vodonika, uspostavila pravna predvidljivost i podstakle investicije u njegovu proizvodnju kao ključnog elementa energetske tranzicije u Evropskoj uniji jer regulatorni okvir, energetska politika i zakon određuju tempo primene obnovljive energije, što pokreće tranziciju kako na regionalnom tako i na nacionalnom nivou [31].

LITERATURA

- [1] The European Green Deal, The European Green Deal, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640> [pristupljeno 21.01.2025]
- [2] European Climate Law, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32021R1119> [pristupljeno 21.01.2025]
- [3] Rajaković, N. Da li je pravo vreme za izgradnju velike solarne elektrane u Srbiji?, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No. 2, pp. 1-10, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-2.01R>
- [4] A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN> [pristupljeno 23.01.2025]
- [5] The role of waste-to-energy in the circular economy <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52017DC0034> [pristupljeno 23.01.2025]
- [6] Pilar Lopez-Portillo, M., Martínez-Jimenez, G., Ropero-Moriones, E. Concepcion Saavedra-Serrano M, Waste treatments in the European Union: A comparative analysis across its member states, *Heliyon*, Vol. 7, No 12, e08645, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08645>
- [7] Dulian, M., Erbach, G., Chahri, S. Renewable and low-carbon hydrogen. State of play and outlook, European Parliamentary Research Service, 2025, [https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2025\)7_67227](https://www.europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2025)7_67227) [pristupljeno 06.02.2025]
- [8] Municipal waste statistics, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics [pristupljeno 06.02.2025]
- [9] Original Waste Hierarchy of Ad Lansink, <https://www.recycling.com/downloads/waste-hierarchy-lansinks-ladder/> [pristupljeno 06.02.2025]
- [10] Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02008L0098-20081212> [pristupljeno 08.02.2025]
- [11] Stankevicius, A., Novikovas, A., Bakaveckas, A., Petryshyn, O. EU waste regulation in the context of the circular economy: peculiarities of interaction, *Entrepreneurship and Sustainability Issues*, Entrepreneurship and Sustainability Center, Vol. 8, No. 2, pp. 533- 545, 2020. [https://doi.org/10.9770/jesi.2020.8.2\(32\)](https://doi.org/10.9770/jesi.2020.8.2(32))
- [12] European Commission Guidance on the interpretation of key provisions of Directive 2008/98/EC on waste, https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/framework/guidance_doc.pdf [pristupljeno 09.02.2025]
- [13] Judgment of the Court of Justice in Case C-6/00. Abfall Service AG (ASA) v Bundesminister für Umwelt, Jugend und Familie, <https://curia.europa.eu/en/actu/communiqués/cp02/aff/cp0219en.htm> [pristupljeno 09.02.2025]
- [14] European Commission, Guidelines on the interpretation of the R1 energy efficiency formula for incineration facilities dedicated to the processing of municipal solid waste according to Annex II of the Directive 2008/98/EC on waste, <https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/framework/guidance.pdf> [pristupljeno 10.02.2025]
- [15] Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj/eng> [pristupljeno 10.02.2025]
- [16] Bellona, Rethink Plastic, Zero Waste Europe, Policy Brief: Recycled Carbon Fuels in the Renewable Energy Directive, <https://bellona.org/publication/policy-brief-recycled-carbon-fuels-in-the-renewable-energy-directive> [pristupljeno 12.02.2025]
- [17] Zero Waste Europe, The EU is clear: Waste-To-Energy incineration has no place in the sustainability agenda, <https://zerowasteurope.eu/2021/05/wte-incineration-no-place-sustainability-agenda/> [pristupljeno 12.02.2025]
- [18] A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-07/hydrogen_strategy_0.pdf [pristupljeno 13.02.2025]
- [19] REPowerEU Plan, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0230> [pristupljeno 13.02.2025]
- [20] Bruch, N., Knodt, M. Low carbon hydrogen in the European Union: A coherent regulatory framework, https://ariadneprojekt.de/media/2024/06/Ariadne-Analysis_EUFrameworkHydrogen_June2024.pdf [pristupljeno 13.02.2025]
- [21] Commission launches consultation on draft methodology for low- carbon hydrogen, https://energy.ec.europa.eu/news/commission-launches-consultation-draft-methodology-low-carbon-hydrogen-2024-09-27_en [pristupljeno 15.02.2025]
- [22] Talus, K., Pinto, J., Gallegos, F. Realism at the end of the rainbow? An argument towards diversifying hydrogen in EU regulation, *The Journal of World Energy Law & Business*, Vol. 17, No. 4, pp. 217-233, 2024. <https://doi.org/10.1093/jwelb/jwae007>
- [23] Frequently Asked Questions on EU Requirements on Renewable Hydrogen and its Derivates, PtX Hub, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, 2023, https://ptx-hub.org/wp-content/uploads/2023/10/International-PtX-Hub_202310_FAQ-EU-requirements-for-renewable-hydrogen-and-its-derivatives.pdf [pristupljeno 15.02.2025]
- [24] Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652, <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj/eng> [pristupljeno 17.02.2025]
- [25] Muron M, Pawelec G, Fraile D, Clean Hydrogen Production Pathways, Hydrogen Europe Secretariat, https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2024/06/2024_H2E_CleanH2ProductionPathwaysReport.pdf [pristupljeno 17.02.2025]
- [26] Share of energy consumption from renewable sources in Europe, <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/indicators/share-of-energy-consumption-from> [pristupljeno 17.02.2025]
- [27] Donnarumma, A. Regulatory framework in hydrogen production and the opportunities for application to a Mobility case study, https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/196676/3/Regulatory_framework_in_hydrogen_production_and_the_opportunities_for_application_to_a_Mobility_case_study_Alessandro_Donnarumma.pdf [pristupljeno 17.02.2025]
- [28] Open letter on biomass-derived H2, Hydrogen Europe, <https://hydrogeneurope.eu/open-letter-on-biomass-derived-h2/#> [pristupljeno 18.02.2025]
- [29] FUREC Producing hydrogen from household waste, <https://www.rwe.com/en/research-and-development/hydrogen-projects/furec/> [pristupljeno 19.02.2025]
- [30] Plagazi technology, <https://www.plagazi.com/technology> [pristupljeno 19.02.2025]
- [31] Aleksić, V., Bataš Bjelić, I., Da li nam treba više ambicije za tranziciju na obnovljive izvore u Srbiji? Temelji upravljanja i planiranja energije, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 23, No.3, pp. 1-9, 2021. <https://doi.org/10.46793/EEE21-3.01A>

AUTORI/AUTHORS

Bojana Petrović Raičević – NIS a.d. Novi Sad, petr.bojana@gmail.com, ORCID [0009-0006-3002-518X](https://orcid.org/0009-0006-3002-518X)

Energy from Waste: Legal Aspects of Hydrogen Production from Municipal Waste in the European Union

Abstract - The use of hydrogen as an energy carrier is one of the pillars of the European Union's energy transition, which aims to decarbonize and achieve climate neutrality by 2050. The production of hydrogen from municipal waste has the potential to contribute both to the level of waste utilization, which will significantly enhance the reduction of landfilling, and to the decarbonization of certain economic sectors that are difficult to electrify, such as the chemical or steel industries. However, in order for this process to be compatible with the objectives set in the European Green Deal, as well as in the European Climate Law and other strategic documents, it is necessary to meet specific conditions relating to both the characteristics and type of waste itself as a feedstock, and to its processing methods. The aim of the paper is to analyse the European legal framework for hydrogen production from municipal waste with a focus on harmonization with the principles of the circular economy and sustainable waste management. The first part of this paper focuses on the analysis of the principles of the waste management hierarchy in the context of hydrogen production with a special emphasis on the limitations and possibilities of using municipal waste as a feedstock. The advantage of prevention, reuse and recycling of municipal waste is emphasized, while energy recovery is possible only for non-recyclable fractions of municipal waste. Since European regulations do not have a precisely established legal definition of hydrogen under that name, but instead use different terms depending on its origin and production method, the second part of the paper is dedicated to the analysis of the terminology and classification of types of hydrogen that can be produced from municipal waste, as well as their roles in the energy transition. In this regard, special attention is paid to the European Renewable Energy Directive (RED III), which regulates hydrogen produced from the organic fraction of municipal waste, thus classifying it as a renewable fuel. Also under consideration is the Directive on common rules for the internal markets in renewable and natural gases and in hydrogen, which regulates low-carbon hydrogen, which includes hydrogen produced from the fossil fraction of non-recyclable municipal waste.

Index terms - Hydrogen, Municipal waste, Circular economy, Decarbonization

Eksploataciona ispitivanja brzih punjačkih stanica za E-automobile snaga 120 kW i 240 kW

Milan Đerić*, Željko V. Despotović**, Miloš Kostić*, Uroš Ilić**

*Charge & GO, Beograd

**Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, Beograd

Rezime - U radu su predstavljena eksploataciona ispitivanja i testovi koji su sprovedeni na brzim punjačkim stanicama za električne automobile. Ispitivanja su rađena na punjačkim stanicama izlaznih DC snaga od 120 kW i 240 kW. Ulazni napon testiranih punjačkih stanica je 3x400 V, 50 Hz, a izlazni jednosmerni napon 400 V. Merene veličine od interesa su bile ulazni mrežni napon i ulazna mrežna struja, izlazni jednosmerni napon i izlazna jednosmerna struja, stanje napunjenosti baterijske banke na električnom vozilu (SOC%), kao i ulazna i izlazna aktivna snaga. U radu su prikazani ključni eksperimentalni rezultati dobijeni tokom ispitivanja i izvršeno je snimanje krive stepena iskorišćenja brzih punjačkih stanica u zavisnosti od izlazne snage pri različitim režimima rada.

Ključne reči - Električna vozila, električne baterije, brze punjačke stanice, energetski pretvarači, AC snaga, DC snaga

I UVOD

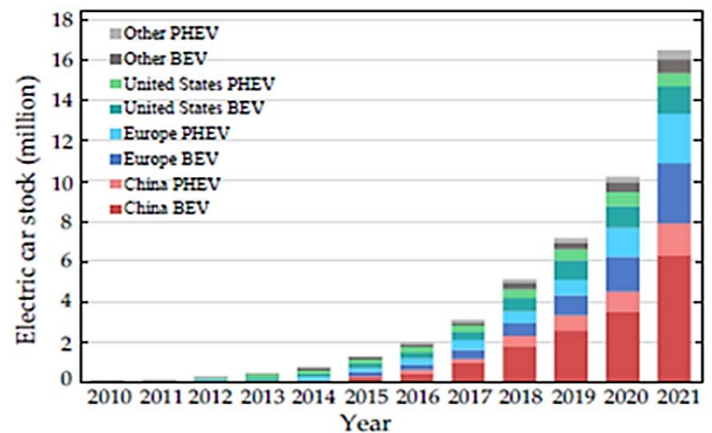
Pоследnjih godina svest ljudi o očuvanju resursa i zaštiti životne sredine postepeno raste. Električna vozila (EV) sve više postaju bitan pravac razvoja automobilske industrije zbog niske emisije zagađenja i niskih troškova upotrebe, a takođe, podstiču razvoj drugih sektora u svom industrijskom lancu [1-2]. U poređenju sa tradicionalnim vozilima na gorivo, EV imaju tri veoma bitne prednosti: (1) dvosmerni tok energije i mogućnost rekuperacije, (2) tehnologija elektronskih komponenti i modula energetske elektronike na kojima su EV zasnovana je postala već standardna i na visokom nivou pouzdanosti, (3) emisije ugljen-dioksida su niske [1],[3].

U tom kontekstu, vlade i automobilske kompanije postepeno usmeravaju svoj fokus istraživanja na razvoj EV. Kao rezultat toga, godišnja prodaja EV je brzo porasla. U 2021. godini globalna prodaja EV dostigla je 6.6 miliona jedinica, što je duplo više nego 2020. godine. U 2012. godini širom sveta prodato je samo 120000 EV, dok je u 2021. godini taj broj dostizan na nedeljnom nivou [1],[4-5].

Na Slici 1 je prikazan globalni broj EV u periodu od 2010. do 2021. godine. U 2021. godini ukupni broj EV na globalnom nivou premašio je 16.5 miliona, što je tri puta više u odnosu na 2018. Predviđa se da će do 2030. godine globalna EV flota premašiti 150 miliona vozila [5].

Industrijalizacija EV je složen sistemski projekat, a infrastruktura za punjenje baterijskih banki u sklopu EV je jedan od najvažnijih segmenata. Sistem punjenja baterijskih banki EV a predstavlja

ključni deo infrastrukture za punjenje i služi za obnavljanje energije potrebne za rad EV, uz to što je i važan podržavajući sistem za rad EV [6]. Sistemi punjenja moraju biti kompatibilni sa baterijskim sistemima EV i dele se na sisteme sporog i brzog punjenja, u zavisnosti od njihove snage. Kako svet sve više prelazi na obnovljive izvore energije, potražnja za električnim vozilima je porasla. Kao odgovor na to, jača potreba za infrastrukturu koja podržava ovaj porast i ona postaje ključna. Jedna od najvažnijih komponenti te infrastrukture su stanice za punjenje električnih vozila.



Slika 1. Globalni porast broja električnih vozila na svetskom nivou u periodu od 2010. do 2021. godine [5]

U Evropi se očekuje da će broj električnih vozila na putevima porasti na 44 miliona do 2030. godine, što stvara hitnu potrebu za izgradnjom većeg broja punjačkih stanica i adekvatne elektroenergetske strukture.

Kako trend elektrifikacije i dekarbonizacije dobija na zamahu širom sveta, potražnja za električnim vozilima raste sa predviđenom godišnjom stopom rasta (CAGR) od 10%. Sve vodeće ekonomske zemlje nude različite podsticaje i subvencije u različitim oblicima kako bi ubrzale prelazak sa motora sa unutrašnjim sagorevanjem (ICE) na električna vozila. Takođe evropski program "Fit for 55", zakonski obavezuje smanjenje emisije CO₂ u EU za najmanje 55% do 2030. godine.

Međunarodna agencija za energiju (IEA - *International Energy Agency*), uzimajući u obzir vladine politike usmerene na ubrzanje ove tranzicije, očekuje se da će do kraja 2025. godine na putevima biti skoro 50 miliona električnih vozila[4-5].

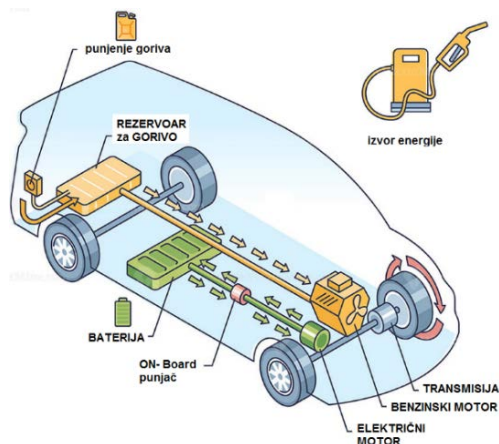
Treba ipak napomenuti da predviđeni prodor električnih vozila u transportni sektor, koji je prepoznat kao ključ za smanjenje emisije gasova sa efektom staklene, ozbiljno pretili da usled zahteva za punjenjem baterijske banke EV, doveli do značajnog povećanja opterećenja elektroenergetskog sistema, odnosno da rezultuje narušavanjem propisanog nivoa kvaliteta napajanja električnom energijom, sigurnosti i pouzdanosti elektroenergetskog sistema. Sa tog aspekta, razvoj strategije pametnog punjenja predstavlja jedan od najvažnijih koraka koji omogućava prodor ovih vozila u životnu svakodnevicu uz što manje troškove, kako za sistem, tako i za njegove korisnike.

U ovom radu su predstavljena eksploataciona ispitivanja i testovi koji su sprovedeni na brzim punjačkim stanicama proizvodnje KOSTAD UNITY za električne automobile. Ispitivanja su rađena na punjačkim stanicama izlaznih DC snaga od 120 kW i 240 kW. Ulazni napon testiranih punjačkih stanica je 3x400 V, 50 Hz, a izlazni jednosmerni napon $U_{dc}=400$ V. Eksploatacioni testovi su bili bazirani na merenju električnih veličina od interesa: ulazni mrežni napon i ulazna mrežna struja, izlazni jednosmerni napon i izlazna jednosmerna struja, stanje napunjenosti baterijske banke na električnom vozilu (SOC%), kao i ulazna i izlazna aktivna snaga. Motivacija za ovim aktivnostima je bila dobijanje eksperimentalnih rezultata (osciloskopskih snimaka) i snimanje krive stepena iskorišćenja brzih punjačkih stanica u zavisnosti od izlazne DC snage, pri različitim režimima rada.

II OSNOVNI TIPOVI E-AUTOMOBILA I PUNJAČA

Elektromobili (E-automobili ili električna vozila) su vozila koja pogonsku snagu u potpunosti ili delimično dobijaju posredstvom električnog motora. Mogu se razlikovati četiri osnovna tipa E-automobila:

- hibridno električno vozilo (eng. *Hybrid Electric Vehicle* - HEV),
- plug-in hibridno električno vozilo (eng. *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* - PHEV),
- čisto električno vozilo, bazirano na baterijskoj banci (eng. *Battery Electric Vehicle* - BEV)
- vozilo bazirano na gorivim ćelijama (eng. *Fuel Cell Vehicle* - FCV).

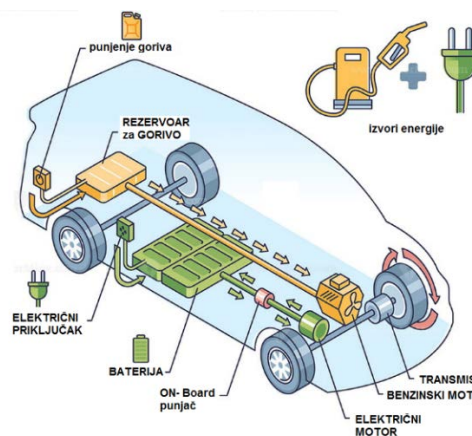


Slika 2. Dispozicija hibridnog električnog vozila (HEV) [7]

Uprošćena dispozicija jednog HEV-a je prikazana na Slici 2.

HEV poseduju konvencionalni motor sa unutrašnjim sagorevanjem, odgovarajuću transmisiju i električni motor. Električni motor služi za postizanje bolje ekonomičnosti potrošnje goriva. Procesom regenerativnog kočenja kinetička energija vozila pretvara se u električnu energiju, koja se preko "On-board" punjača skladišti u baterijama. HEV vozila usled bolje ukupne efikasnosti ispuštaju manje CO₂ gasova od konvencionalnih automobila, ali i dalje se kao primarni izvor energije koriste naftni derivati. Ova vozila nemaju mogućnost punjenja baterije električnom energijom iz elektroenergetске mreže.

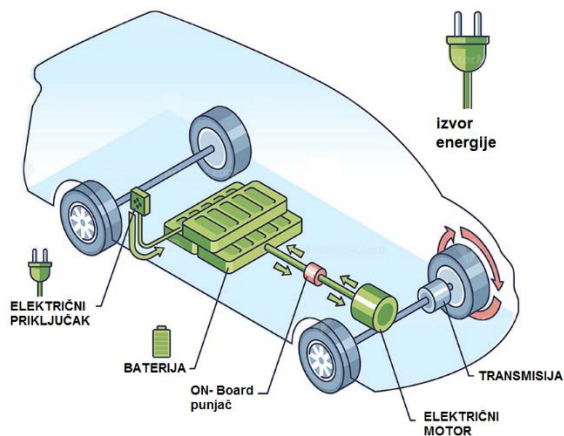
Da bi se postiglo značajnije smanjenje emisija CO₂ gasova, neophodno je koristiti električnu energiju kao primarni izvor energije za pogon vozila. Stoga se dodavanjem električnog priključka HEV-u, u stvari dobijaju PHEV, čime se omogućava da se dopunjavanje baterije električnom energijom vrši iz elektroenergetске mreže. Osnovna dispozicija PHEV-a je data na Slici 3.



Slika 3. Plug-in hibridno električno vozilo (PHEV) [7]

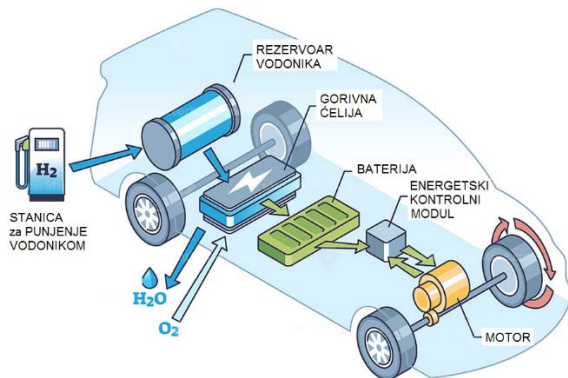
Osnovni cilj razvoja ovih vozila je da se postigne autonomija električnog pogona u toku prvih (40÷60) km, što je u proseku udaljenost ispod koje većina vozača putuje na dnevnoj osnovi. Potrebno je istaći da se domet prema evropskom sertifikacionom telu *New European Driving Cycle* (NEDC) meri sa isključenim svim pomoćnim sistemima (klima uređaj, svetla, ventilacija i sl.) jer isti utiču na smanjenje dometa E-automobila. Uzimajući u obzir pretpostavku da se baterije PHEV vozila dopunjavaju na dnevnoj osnovi isto znači da će PHEV vozila za pogon u proseku mnogo više koristiti električnu energiju nego fosilna goriva. Za duža putovanja, u slučaju nedostatka dovoljnog kapaciteta baterije, PHEV vozila koriste benzinski motor sa rezervoarom za gorivo čiji je kapacitet približno jednak kapacitetu rezervoara kod konvencionalnih vozila.

Konfiguracije BEV-a imaju samo električni motor i svu energiju dobijaju iz baterijske banke (litijum jonska baterija-Li Ion) visokih performansi, koja se dopunjava iz elektroenergetске mreže. Osnovna dispozicija jednog BEV-a je data na Slici 4. U ovom tipu vozila je primenjen isključivo elektromotorni pogon (asinhroni ili sinhroni električni motor sa pripadajućim energetskim pretvaračem - inverterom). Ovaj čisto električni pogonski sistem za primenu na veće udaljenosti zahteva i baterije većeg kapaciteta.



Slika 4. Dispozicija baterijskog električnog vozila (BEV) [7]

Vozilo sa gorivim ćelijama tzv. *Fuel Cell Vehicle* (FCV) ili električno vozilo sa gorivnim ćelijama tzv. *Fuel Cell Electric Vehicle* (FCEV) je električno vozilo koje koristi gorivu ćeliju, ponekad u kombinaciji sa malom baterijom ili super kondenzatorom, za napajanje svog ugrađenog elektromotora. Dispozicija FCV-a je data na Slici 5. Gorivne ćelije u vozilima proizvode električnu energiju uglavnom koristeći kiseonik iz vazduha i komprimovani vodonik. Proizvedena električna energija se koristi za punjenje baterijske banke na vozilu. Posredstvom energetskog kontrolnog modula sa dvosmernim tokom snage se vrši sprezanje pogonskog motora i baterijske banke. I u ovom slučaju je moguća rekuperacija energije. Vozila sa gorivim ćelijama su takođe klasifikovana kao vozila sa nultom emisijom štetnih gasova.

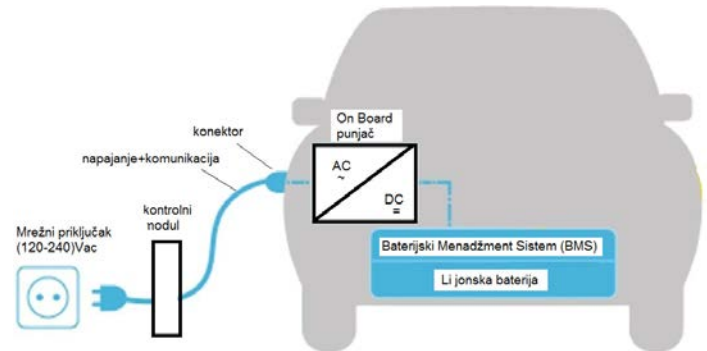


Slika 5. Vozilo bazirano na gorivim ćelijama (FCV) [7]

U poređenju sa vozilima sa unutrašnjim sagorevanjem, vozila na vodonik centralizuju zagađivače na mestu proizvodnje vodonika, gde se vodonik obično dobija iz prirodnog gasa. Transport i skladištenje vodonika takođe može stvoriti zagađivače. Gorivne ćelije su koriste u različitim vrstama vozila, uključujući viljuškare, posebno u unutrašnjim aplikacijama gde su njihove čiste emisije važne za kvalitet vazduha, takođe postoje primene i u svemirskim aplikacijama. Gorivne ćelije se razvijaju i testiraju u kamionima, autobusima, čamcima, brodovima, motociklima i biciklima, i sličnim vojnim vozilima.

U ovom radu je razmatranje i istraživanje fokusirano na koncepciju sa Slike 4, odnosno na isključivo baterijski napajana električna vozila (BEV). Dva su osnovna tipa punjenja, odnosno punjača baterijske banke korišćenih na ovim na ovim vozilima: (1) naizmenični ili AC punjači i jednosmerni ili DC punjači.

Punjenje naizmeničnom strujom se odnosi na punjenje pomoću električne energije dostupne iz elektroenergetske mreže. Ova vrsta punjenja zahteva ugrađeni punjač na električnom vozilu, tzv. "On-Board Charger" (OBC), koji je ustvari AC/DC energetski pretvarač sa kontrolisanim DC izlazom, odnosno izlaznom strujom, koja je potrebna za punjenje baterijske banke. Principski prikaz AC punjačkog sistema EV je dat na Slici 6.



Slika 6. AC punjački sistem na EV

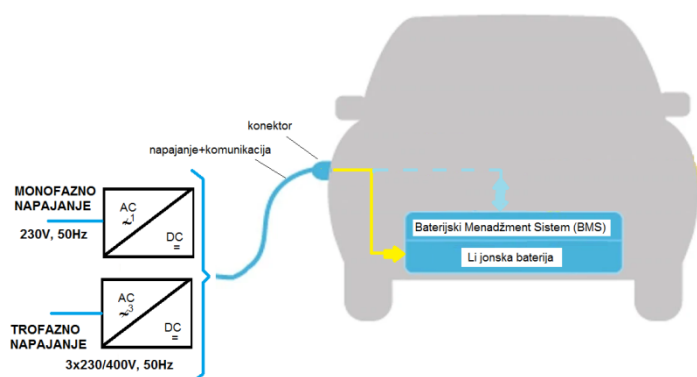
Što se tiče AC punjača električnih vozila, razlikujemo dva tipa AC punjača. AC punjač nivoa 1 i AC punjač nivoa 2.

AC punjač nivoa 1, je najjednostavniji osnovni punjač koji na svom ulazu iz mreže dobija napon ($120\div 240$) V_{ac} i zatim napaja električno vozilo preko kabla za punjenje. Ulazna struja ovog punjača je opsega ($13\div 16$) A. Ovo je najsporiji tip punjača, ali je i najprenosiviji i može se priključiti skoro svuda. Većina modela je izlazne snage opsega ($1\div 2$) kW. Približno vreme punjenja kod ovih punjača je >20 časova.

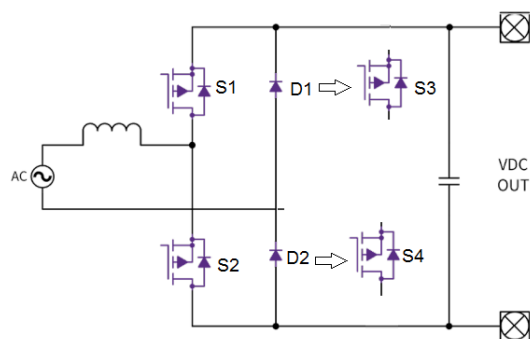
AC punjač nivoa 2 takođe koristi dostupno mrežno napajanje ($120\div 240$) V_{ac}, ali je za razliku od prethodnog tipa AC punjača, znatno veće struje ($32\div 40$) A. Ovi punjači su izlazne snage opsega ($11\div 22$) kW. Približno vreme punjenja baterije kod ovih sistema je oko ($5\div 6$) h.

Da bi se smanjilo vreme punjenja za EV, jedini način je korišćenje DC punjenja. DC punjači isporučuju struju direktno na bateriju u EV, praktično mimo ugrađenog punjača u EV. DC punjači nivoa-3 se često nazivaju DC brzi punjači tzv. "DC Fast Charger" (DCFC) ili super punjači. Nivoi snage za ovaj tip se kreću od 50 kW do 500 kW. Ovi punjači su napravljeni od više modularni napajanja od po 20, 30, 50 ili 60 kW, koje se mogu integrisati i koristiti za postizanje željenog ukupnog nivoa izlazne snage. U zavisnosti od kapaciteta, ovi brzi punjači mogu da napune tipičnu EV litijum jonsku bateriju za manje od 30 min.

Na Slici 7 je dat prikaz DC super-brzog punjačkog sistema, sa monofaznim ili trofaznim mrežnim ulazom. Na Slici 8 su dati tipovi punjačkih konektora u skladu sa prethodno navedenom podelom punjača.

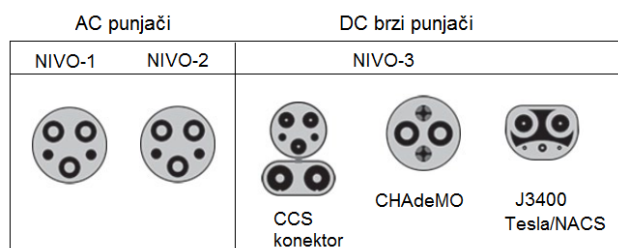


Slika 7. DC punački sistem EV a monofaznim i trofaznim ulazom



Slika 8. PFC "tothem pole" topologija DC punjača

SAE J1772 je industrijski standard za AC nivoe 1 i 2 punjača. CHAdeMO je jedan od prvih konektora predstavljenih na globalnom tržištu. Razvijen je u saradnji pet japanskih proizvođača automobila i implementiran je da bude industrijski standard. Ovo je najistaknutiji konektor u Japanu za upotrebu sa električnim vozilima koje proizvode japanski proizvođači automobila. Podržava samo DC punjenje i za EV je potreban dodatni kabl J1772 da bi se postigli nivoi punjenja 1 ili 2 [8].



Slika 8. Tipovi punjačkih konekcija

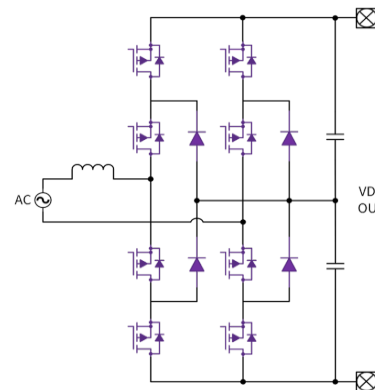
CCS tip se koristi za kombinovani sistem punjenja, koji je takođe predstavljen otprilike u isto vreme kada i CHAdeMO. Najveća prednost CCS-a je u tome što omogućava AC ili DC punjenje na istom priključku. Postao je omiljeni konektor među evropskim i američkim proizvođačima automobila. J3400 - Tesla® / NACS konektor je ekskluzivno dimenzionisan za Tesla EV i njegovu mrežu za punjenje. Mreža Tesla super-punjača je rapidno porasla od svog uvođenja. Sa Tesla automobilima i ojačanom prodajnom mrežom postaju sve popularniji u Severnoj Americi. Kompanija je odlučila da otvori mrežu za punjenje za električna vozila koja

nisu Tesla sredinom 2023. Najveći američki i evropski proizvođači automobila najavili su partnerstvo sa Teslom kako bi iskoristili mrežu punjača zajedno sa novim velikim električnim vozilima koja nisu opremljena prema dizajnu Tesla konektora [8].

III OSNOVNE TOPOLOGIJE DC PUNJAČA

Za AC/DC konverziju u ovim punjačkim sistemima se mogu koristiti jednofazne i trofazne topologije. Jednofazne topologije su najčešće primenjene za rezidencijalne stanice za punjenje ili kada su nivoi snage manji od 6 kW, dok su trofazne topologije pogodnije za punjenja veće snage (>11 kW).

PFC topologija "tothem pole" (Slika 9) je ustvari standardni monofazni PFC podizač napona, gde jedna polovina mosta sadrži dva aktivna prekidača, obično za ove aplikacije MOSFET ili IGBT prekidači od silicijum karbida (SiC) (S1 i S2), a druga polovina mosta sadrži dve diode (D1 i D2).



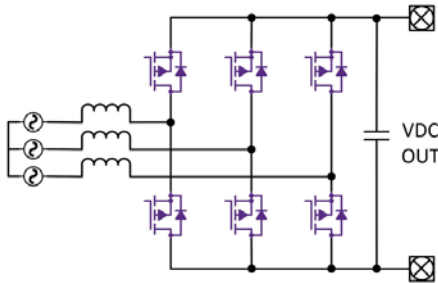
Slika 9. NPC PFC topologija DC punjača [8]

Glavna prednost ove topologije je u tome što obezbeđuje bolju efikasnost u poređenju sa konvencionalnim PFC podizačem. Ako se umesto dioda koriste S3 i S4 prekidači, ova topologija može da obezbedi dvosmerni tok energije, što može biti interesantno za DC punjačke aplikacije. Gubici inverznog oporavka u SiC prekidačima ograničavaju rad ove topologije u diskontinualnom režimu tzv. *Discontinuous Conduction Mode* (DCM). Sa ultra niskim povraćenim naelektrisanjem Q_{rr} tokom inverznog oporavka ova prekidačka topologija omogućava i rad u kontinualnom režimu, tzv. *Continuious Conduction Mode* (CCM).

U monofaznim aplikacijama je postala interesantna topologija energetskog pretvarača sa tri nivoa i fiksiranom neutralnom tačkom koja obezbeđuje korekciju faktora snage (PFC), tzv. "neutral point clamped" (NPC) PFC. Primena NPC obezbeđuje da se mogu birati prekidači u svakoj vertikali sa nižim probojnim naponom, a takođe i sa manjim dozvoljenim porastom napona "dv/dt". Prekidači sa nižim naponom su jeftiniji, te se njihovim izborom smanjuje cena modula, a manji "dv/dt" obezbeđuje manja EMI zračenja, čime se smanjuje veličina potrebnih ulaznih filtera. Ovom topologijom je moguće postići dvosmernost toka energije, veću gustinu snage (pa i energije) i bolju efikasnost. Glavni nedostatak ove topologije je taj što zahteva veći broj prekidačkih komponenti i što se na taj način povećava složenost kontrolnog kola sistema.

Ako postoje zahtevi za brže punjenje i većom gustinom snage, nameće se korišćenje trofaznih topologija. U zavisnosti od zahteva krajnjeg dizajna, trofazne konfiguracije se mogu podeliti u dva dela: (1) topologije na dva nivoa i (2) topologije sa više nivoa, tzv. “*multilevel*”, pri čemu svaka pruža svoje jedinstvene prednosti.

Na Slici 10 je prikazana mrežna PFC topologija sa dva nivoa. Za izlazni napon 800 Vdc napon međukola, svaka vertikalna sadrži SiC prekidačke elemente probojnog napona 1200 V. Za energetske modul snage 22 kW tipične vrednosti napona su 400 V za ulazni mrežni napon, učestanosti 50 Hz i jednosmerni napon DC međukola 800 Vdc.

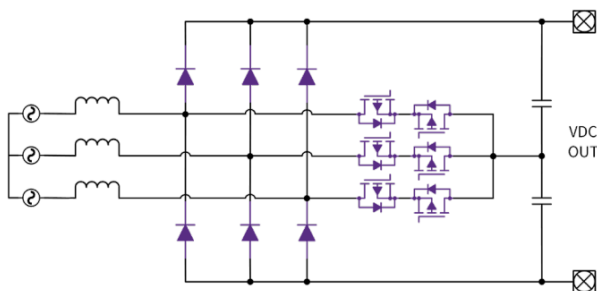


Slika 10. Mrežna PFC topologija DC punjača

Glavna prednost ove topologije je što je jednostavna za implementaciju i da ima pojednostavljenu šemu upravljanja. Uz prisustvo aktivnih prekidača za svaku vertikalnu mostu, ovaj tip energetskog pretvarača može da obezbedi dvosmerni protok energije. Budući da se u ovom slučaju radi o topologiji sa dva nivoa, glavni njen nedostatak je taj što zahteva velike ulazne filtere da bi se redukovala EMI na prihvatljive nivoe u poređenju sa topologijama sa više nivoa.

Za konverziju velike snage, posebno sa EV punjačem sa tri nivoa, *Vienna* ispravljač je najčešća topologija koja se koristi u trofaznoj izvedbi konverzije na tri nivoa, kao što prikazuje Slika 11. Glavna prednost ove topologije je inherentna trostepena konverzija koja proizvodi nizak stres na prekidačima čime se povećava njegova sposobnost da radi u CCM režimu.

Postoje različite verzije topologije *Vienna* ispravljača, pri čemu je T-tip najčešći (Slika 12). Topologija na Slici 11 koristi kombinaciju šest 1200 V SiC Šotki dioda i šest aktivnih MOSFET prekidača od 650 V. Tipična snaga jednog energetskog modula za ovu topologiju je 25 kW.

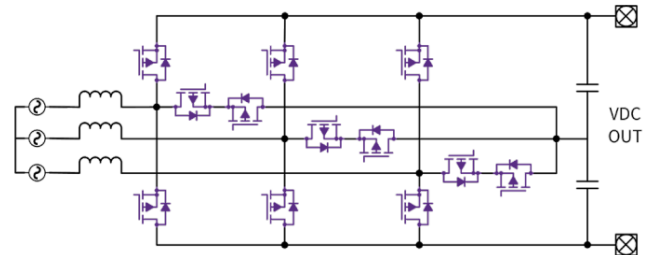


Slika 11. *Vienna* ispravljačka topologija DC punjača [8]

Pošto su svi aktivni prekidači “*fiksirani*” neutralnom tačkom (NPC), aktivni prekidači trpe samo polovinu napona

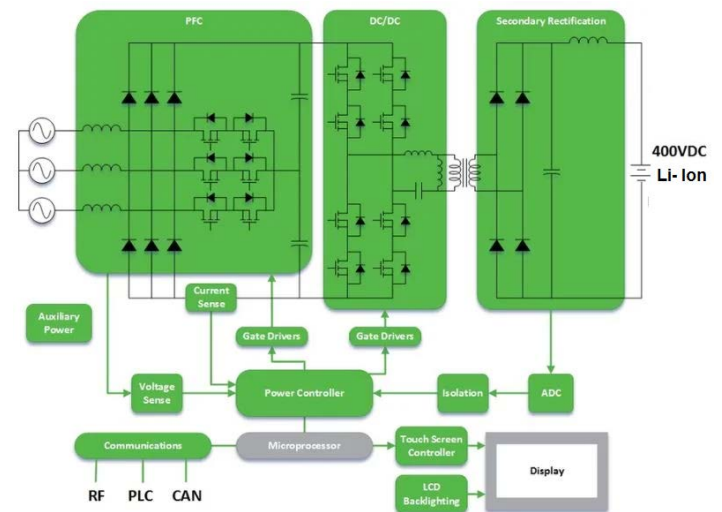
karakterističnog za standardne 1200 V aplikacije. Glavni nedostatak ove topologije je što može da obezbedi samo protok snage u jednom smeru.

Ukoliko se Šotki diode zamene sa MOSFET prekidačima dobijamo tzv. T-topologiji *Vienna* ispravljača, koja je prikazana na Slici 12. Ova topologija obezbeđuje dvosmerni tok snage. Srednji prekidači su u NPC, što dovodi do smanjenja naponskog stresa na njima.



Slika 12. *Vienna* ispravljačka T- topologija DC punjača[8].

Na Slici 13 je predstavljena topologija testiranih DC punjačkih stanica koja u sebi kombinuje *Vienna PFC* ispravljač i NPC mosnu topologiju sa galvanskom izolacijom DC baterijske strane.



Slika 13. Topologija testirane DC brze punjačke stanice

IV SPECIFIKACIJE TESTIRANIH PUNJAČA I E-VOZILA

U sklopu ovog istraživanja je izvršeno testiranje punjačkih stanica proizvodnje KOSTAD UNITY 120, izlazne DC snage 120 kW i KOSTAD UNITY 240, izlazne DC snage 240 kW[9-10]. Testovi su sprovedeni za razne režime punjenja na vozilu *Hyundai Kona Electric* iz 2021. Stoga će u nastavku biti date neke osnovne tehničke karakteristike baterije na pomenutom električnom vozilu, kao i karakteristike punjačkih stanica.

Hyundai Kona Electric ima aerodinamično oblikovanu karoseriju sa zatvorenom prednjom maskom i modernizovanim LED svetlima. Unutrašnjost je prostrana i sadrži visokokvalitetne materijale sa naprednim multimedijalnim sistemom. Snaga pogonskog elektromotora je 150 kW (204KS), obrtni moment

395 Nm, ubrzanje (0÷100) km/h, odnosno za vreme 7.9s se postiže maksimalna brzina od 167 km/h.

Baterija na ovom vozilu je polimerna Litijum-jonska energetskog kapaciteta 64 kWh. Nominalni jednosmerni napon baterije je 400 V_{dc}. Domet vozila sa ovom baterijom je prema standardu tzv. "Worldwide Harmonized Light-Duty Vehicles Test Procedure" (WLTP), maksimalno 484 km, dok je potrošnja približno 14,7 kWh/100 km. Priključak na vozilu za punjenje je CCS Combo 2. Za navedenu bateriju je se primenjuju brzo i sporije (tzv. "kućno") punjenje. Za brzo punjenje DC punjač snage daje 100 kW (od 10% do 80% za oko 47 min), 50 kW (od 10% do 80% za oko 64 min), dok se za kućno punjenje primenjuje AC punjač snage od 10.5kW (6 h i 50 min za punjenje od 10% do 100%) i AC punjač snage 7.2 kW (9 h i 15 min za punjenje do 100%).



Slika 14. Izgled (zadnji i prednji deo razvodnog ormara) punjačke stanice KOSTAD UNITY 120, izlazne snage 120 kW

Na Slici 14 je dat izgled punjačke stanice KOSTAD UNITY 120. KOSTAD UNITY 120 je stanica za brzo punjenje električnih

vozila sa maksimalnom izlaznom snagom od 120 kW (6 paralelno povezanih jediničnih modula snage 20 kW i svaki jednosmernog izlaznog napona 400 V_{dc}). KOSTAD UNITY 240 je stanica za brzo punjenje električnih vozila sa maksimalnom izlaznom snagom od 240 kW (12 paralelno povezanih jediničnih modula snage 20 kW i jednosmernog napona 400 V_{dc}).

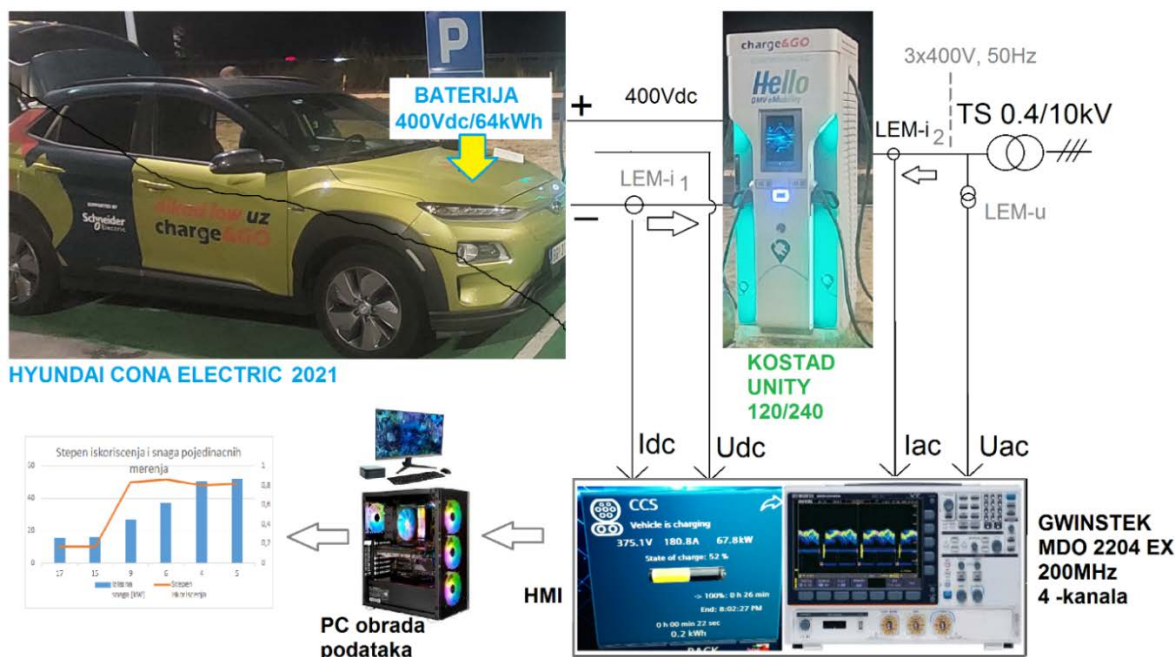
Oba pomenuta tipa punjačkih stanica su opremljena sa dva CCS2 priključka, omogućavajući istovremeno punjenje dva vozila, svako sa po 60 kW. U slučaju paralelnog punjenja, integrisani sistem za upravljanje opterećenjem osigurava ravnomernu raspodelu dostupne snage. Pored CCS2 priključaka, stanica podržava i CHAdeMO (DC) i Type2 (AC) standarde punjenja, pružajući dodatne opcije za različite tipove vozila.

Obe stanice se mogu koristiti i kao AC punjači za EV. Maksimalna AC izlazna snaga stanice KOSTAD UNITY 120 je 22 kW, dok je maksimalna AC izlazna snaga stanice KOSTAD UNITY 240, 44 kW. Stanice imaju mogućnost komunikacije putem OCPP 1.6 JSON protokola, sa mogućnošću nadogradnje na OCPP 2.0, omogućavajući efikasno upravljanje i nadzor putem Web baziranih sistema.

Pomenute KOSTAD stanice su optimizovane za javne i polujavne prostore, poput autoputeva, parkirališta, trgovinskih centara i depoa za autobuse i komercijalna vozila i sličnim objektima.

V EKSPERIMENTALNI REZULTATI

U ovom poglavlju su prikazani eksperimentalni rezultati dobijeni nakon eksploatacionih ispitivanja i testiranja brzih punjačkih stanica koje su bazirane na jedinicama KOSTAD UNITY 120/240, a koje je ugradila firma Charge & GO iz Beograda. Na Slici 15 je dat funkcionalni prikaz test okruženja u sklopu kojeg su ispitivani režimi punjenja na električnom vozilu *Hyundai Cona Electric*. Testirani su vi režimi punjenja na polimernoj Li-jonskoj bateriji nominalnog napona 400 V_{dc} i kapaciteta 64kWh.



Slika 15. Eksperimentalni setap za testiranje brze DC punjačke stanice KOSTAD UNIT 120/240-investitor firma Charge & GO

Osciloskopski su merene sledeće električne veličine od interesa: napon punjenja U_{dc} , struja punjenja I_{dc} , ulazni mrežni napon U_{ac} i ulazna mrežna struja I_{ac} . Preko HMI interfejsa na prednjoj strani KOSTAD jedinica su očitavane izmerene vrednosti stepena napunjenosti baterije SOC% i energija baterije u kWh. Prilikom testiranja je korišćena sledeća merna oprema:

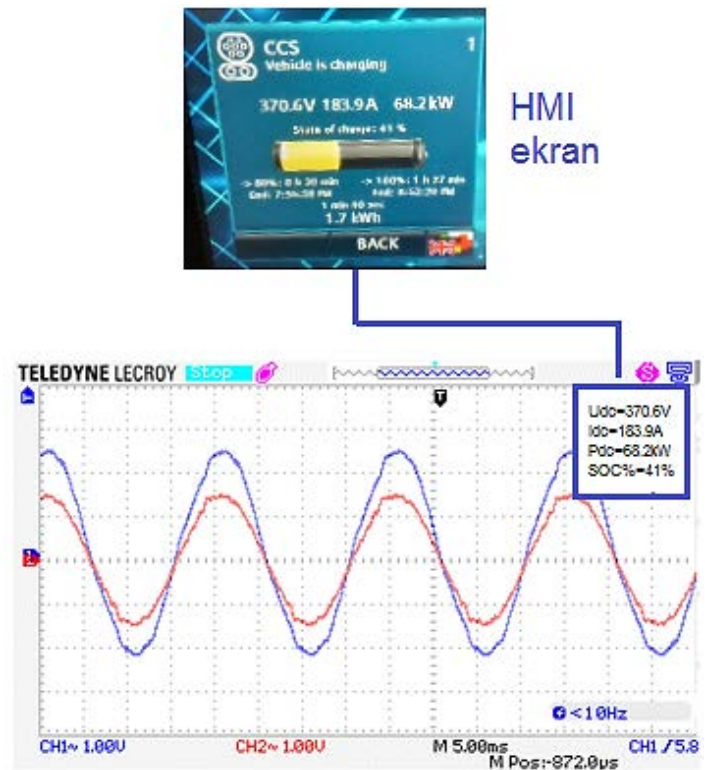
- digitalni 4-kanalni osciloskop GW INSTEK MDO2204EX, 200 MHz, 1 Gs/s i 2-kanalni osciloskop WAVE ACE 1000 TELEDYNE LeCROY, 60 MHz, 1 Gs/s,
- merenje napona U_{dc} je obavljeno visokonaponskom sondom (razdelnikom) za maksimalni napon 10kV, prenosnog odnosa 1:100, za direktno povezivanje na osciloskop preko BNC konektora,
- merenje struja I_{dc} i I_{ac} je obavljeno AC/DC strujnim sondama baziranim na Hall efektu, CC650 HANTEK, propusnog opsega 50 MHz, za maksimalnu struju 650A, mernih osetljivosti 1 mV/A i 1 mV/0,1A,
- merenje napona U_{ac} je vršeno naponskim LEM modulom LV100 VSP558 baziranog na Hall efektu, prenosnog odnosa 1000/1000, primarne struje 25 mA.

Na Slikama 17-19 su prikazani eksperimentalni rezultati dobijeni testiranjem punjačke jedinice KOSTAD UNITY 120. U ovim testovima su mereni mrežna struja i mrežni napon za tri karakteristične vrednosti stanja napunjenosti baterije 40 %, 80 % i 95 %. Napon i struja baterije (U_{dc} i I_{dc}) su očitavani sa HMI na prednjoj strani razvodnog ormara jedinice KOSTAD 120.

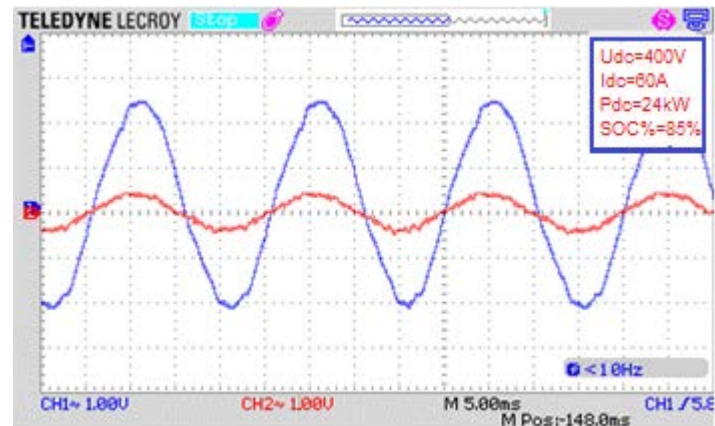
Na Slici 17 su prikazani snimljeni talasni oblici mrežnog faznog napona i mrežne fazne struje pri naponu baterije $U_{dc}=370,6$ Vdc, pri struji punjenja $I_{dc}=183,9$ A i pri stanju napunjenosti baterije SOC%=41%. Ove vrednosti su očitane na HMI ekranu na prednjoj strani razvodnog ormara punjačke jedinice KOSTAD UNITY 120. Kao što se sa prikazanih snimaka može videti mrežna struja i mrežni napon su u fazi (kolo za PFC ovo obezbeđuje). Izmerena maksimalna vrednost mrežnog napona je $U_{ac(max)}=312$ V, dok je izmerena maksimalna vrednost mrežne struje $I_{ac(max)}=150$ A. Ovim vrednostima odgovaraju efektivne vrednosti, $U_{ac}=312$ V/1,41=221,30 V i $I_{ac}=150$ A/1,41=106,38 A. Obzirom da je faktor snage veoma blizak jedan i ako zanemarimo harmonijska izobličenja ulazne struje i ulaznog napona, možemo zaključiti da je ulazna aktivna snaga koju punjačka jedinica uzima iz mreže po jednoj fazi jednaka $P_{ac1} \approx 221,3$ V · 106,38 A = 23,54 kW. Ukupna aktivna snaga koja se uzima iz mreže je $P_{ac} \approx 70,5$ kW. Izlazna snaga se dobija na osnovu izmerenih DC vrednosti napona i struje u režimu stanja napunjenosti baterije SOC%=41%, $U_{dc}=370,6$ V i $I_{dc}=183,9$ A, odnosno $P_{dc}=U_{dc} \cdot I_{dc}=370,6$ V · 183,9 A = 68,15 kW. Na osnovu prethodnih merenja se može dobiti stepen iskorišćenja za režim kada je stepen napunjenosti baterije SOC%=41%, odnosno $\eta=P_{dc}/P_{ac}=68,15$ kW/70,5 kW=0,966=96,6%.

Gubici u energetske modulima (ulazni AC PFC modul +izlazni DC ispravljač) u okviru KOSTAD 120 jedinice su $P_{\gamma} \approx 2,35$ kW. Ovaj deo značajnije utiče na grejanje punjačke jedinice, ali je sistemom ventilatora za hlađenje na osnovnim jedinicama snage 20 kW adekvatno rešeno odvođenje toplote sa poluprovodničkih modula, tako da u toku rada nisu detektovana niti primećena

pregrevanja energetske modula.



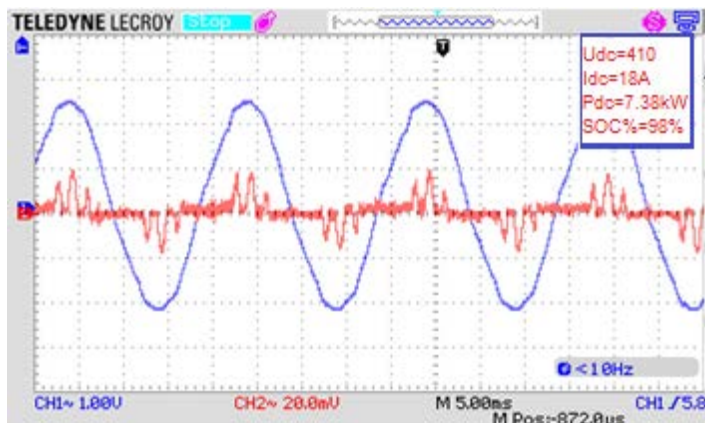
Slika 17. Talasni oblici pri stanju napunjenosti baterije 40%
CH1- napon mreže $U_{ac}=130$ V/div,
CH2 - struja mreže $I_{ac}=100$ A/div



Slika 18. Talasni oblici pri stanju napunjenosti baterije 80%
CH1- napon mreže $U_{ac}=130$ V/div,
CH2 - struja mreže $I_{ac}=100$ A/div

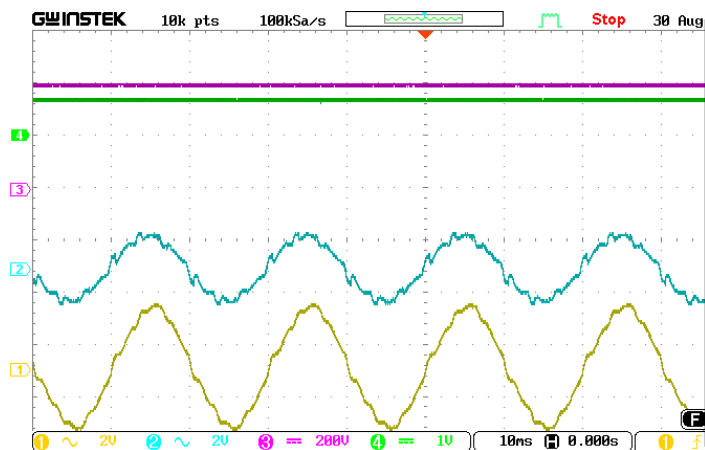
Na Slici 18 su prikazani eksperimentalni rezultati u režimu kada je stepen napunjenosti baterije iznosio 85%. U ovom režimu su izmerene maksimalna vrednost mrežnog napona $U_{ac(max)}=312$ V, dok je izmerena maksimalna vrednost struje $I_{ac(max)}=50$ A. Ovim izmerenim maksimalnim vrednostima odgovaraju efektivne vrednosti, $U_{ac}=312$ V/1,41=221,3 V i $I_{ac}=50$ A/1,41=35,4 A. Ukupna aktivna snaga koja se uzima iz mreže je jednaka $P_{ac}=\sum P_{ac1}=3 \cdot 221,3$ V · 35,4 A ≈ 23,5 kW. Na HMI modulu su

očitanu $U_{dc}=400$ V i $I_{dc}=60$ A. Stoga je stepen iskorišćenja u ovom slučaju $\eta=P_{dc}/P_{ac}=24$ kW/28,25 kW $\approx$ 85%. U slučaju manjih struja opterećenja stepen iskorišćenja opada. Gubici usled vođenja pri malim opterećenjima opadaju, ali u ovom slučaju su dominantni prekidački gubici koji sporije opadaju sa opterećenjem i stoga uslovljavaju niži stepen iskorišćenja.



Slika 19. Talasni oblici pri stanju napunjenosti baterije 98%
CH1- napon mreže $U_{ac}=120$ V/div,
CH2 - struja mreže $I_{ac} = 20$ A/div

Na Slici 19 je prikazan režim kada je baterija napunjena na SOC%=98%. Izmerene vrednosti na DC strani su $U_{dc}=410$ V i $I_{dc}=18$ A, što daje veoma nisku izlaznu snagu u ovom režimu, odnosno $P_{dc}\approx 7,38$ kW. Što se tiče ulazne struje i napona, konstatovano je značajnije izobličenje ulazne struje. Razlog za ovu pojavu je taj, što je ulazni PFC ispravljač u ovom režimu punjenja ušao u diskontinualni režim rada (DCM), odnosno struja je prekidna u pojedinim intervalima, kao što se vidi sa osciloskopskog snimka na Slici 19.



Slika 20. Talasni oblici pri stanju napunjenosti baterije 71%
CH1- napon mreže $U_{ac}=300$ V/div,
CH2 - struja mreže $I_{ac}=200$ A/div,
CH3 - napon baterije $U_{dc}=200$ V/div,
CH4 - struja punjenja baterije $I_{dc}=200$ A/div

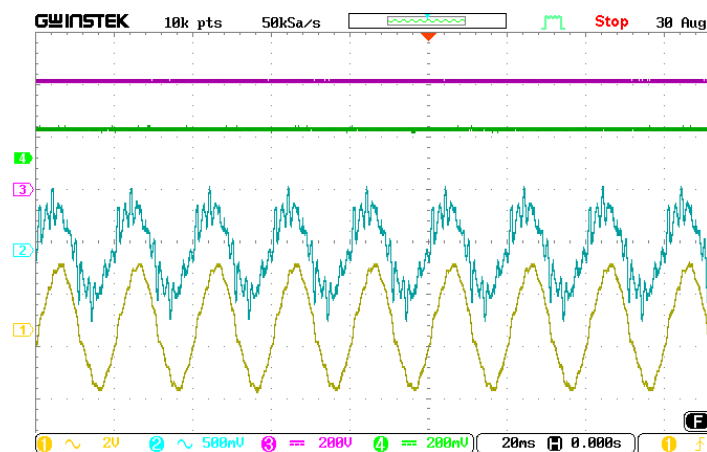
U ovom režimu su izmerene vrednosti na mrežnoj AC strani, $U_{ac}=230$ V, $I_{ac}=15$ A i $P_{ac}=3,3,45$ kW=10,35 kW i određen je

stepen korisnosti $\eta=P_{dc}/P_{ac}=7.38$ kW/ 10.35 kW $\approx$ 71%. U ovom režimu je bio najniži stepen iskorišćenja. Režim nije trajan i nakon relativno kratkog vremena, tipično (5÷10) min, dok traje impulsno punjenje sa relativno malom strujom punjenja (tzv. “trickle charge”) punjačka jedinica se isključuje obzirom da je u tom slučaju SOC%=100%, odnosno baterija na električnom vozilu je napunjena.

Na Slikama 20-24 su prikazani eksperimentalni rezultati dobijeni prilikom testiranja druge punjačke jedinice veće izlazne snage (240 kW) KOSTAD UNITY 240. Rezultati su prikazani prilikom dopune baterije na vozilu sa (SOC%)₁=71% do stanja napunjenosti (SOC%)₂=96%.

Sa osciloskopskog snimka koji je prikazan na Slici 20 su očitane vrednosti napona i struje na DC strani $U_{dc}=395$ V i $I_{dc}=147,8$ A. Maksimalna vrednost mrežne struje je iznosila $I_{ac(max)}=128$ A, a maksimalna vrednost faznog napona mreže $U_{ac(max)}=324$ V. Pri ovim uslovima, izmerene su izlazna snaga $P_{dc}=58,3$ kW i ulazna snaga $P_{ac}=62,70$ kW, pa je stepen korisnosti oko 93%.

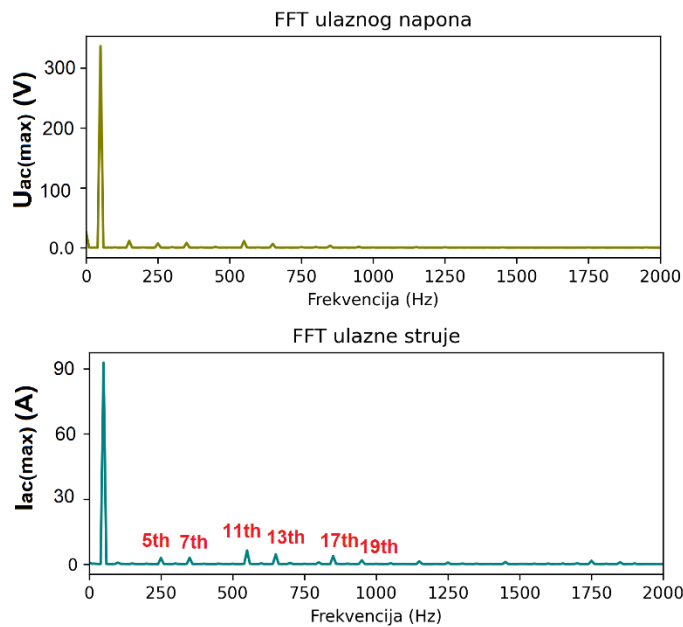
Na Slici 21 su takođe predstavljeni talasni oblici prethodno navedenih veličina U_{dc} , I_{dc} , U_{ac} i I_{ac} ali u režimu kada je baterija bila napunjena na 96% od svog nominalnog energetskeg kapaciteta od 64 kWh (pri deklarisanom naponu od 400 V je kapacitet baterije $C_b=64$ kWh/400 V=160 Ah). Pri naponu $U_{dc}=410,2$ V i kapacitetu baterije $C_b=0,96\cdot 160$ Ah $\approx$ 153 Ah, ukupna energija uskladištena u bateriji je $W_b=153$ Ah $\cdot$ 410,5 V $\approx$ 62.8kWh. Slično kao i u prethodnom slučaju su dobijene vrednosti snaga $P_{dc}=14,7$ kW i $P_{ac}=19,5$ kW, te je na osnovu ovih vrednosti određen stepen iskorišćenja, koji je u tom slučaju iznosio oko 70%



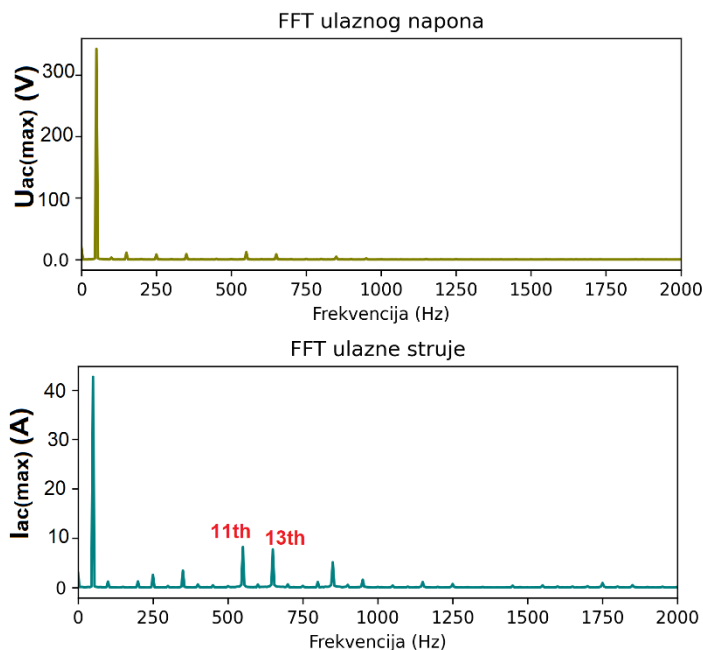
Slika 21. Talasni oblici pri stanju napunjenosti baterije 96%
CH1- napon mreže $U_{ac}=300$ V/div,
CH2 - struja mreže $I_{ac}=40$ A/div,
CH3 - napon baterije $U_{dc}=200$ V/div,
CH4 - struja punjenja baterije $I_{dc}=40$ A/div

Na Slici 22 su dati frekventni spektri ulaznog mrežnog napona i ulazne mrežne struje u stanju napunjenosti baterije SOC%=71%. Sa spektara prikazanih na Slici 22 se uočava da je prisustvo viših harmonika napon zanemarljivo i da dominira osnovni harmonik 50 Hz, dok je u ulaznoj struji uočeno prisustvo viših harmonika reda 5,7,11,13,17 i 15. Pri ovome treba napomenuti da su od prikazanih viših harmonika dominantni 11- ti i 13-ti (učestanosti

su 550 Hz i 650 Hz, respektivno). Amplituda 11-tog harmonika je oko 7 A, dok je amplituda 13-tog harmonika oko 4 A. Stoga je, pri 50 Hz, njihov procentualni udeo u odnosu na maksimalnu struju 7,8 % u prvom slučaju i oko 4,3% u drugom slučaju.



Slika 22. Spektri ulaznog mrežnog napona i mrežne struje u režimu stanja napunjenosti SOC%=71%



Slika 23. Spektri ulaznog mrežnog napona i mrežne struje u režimu stanja napunjenosti SOC%=96%

Na Slici 23 su dati spektri ulaznog mrežnog napona i ulazne mrežne struje u stanju napunjenosti baterije SOC%=96% (skoro u potpunosti napunjena baterija na električnom vozilu.). Uočava se da je prisustvo viših harmonika napona zanemarljivo i da dominira osnovni harmonik 50 Hz, dok je u ulaznoj struji uočeno prisustvo viših harmonika višeg reda 5, 7, 11, 13, 17 i 19. Pri

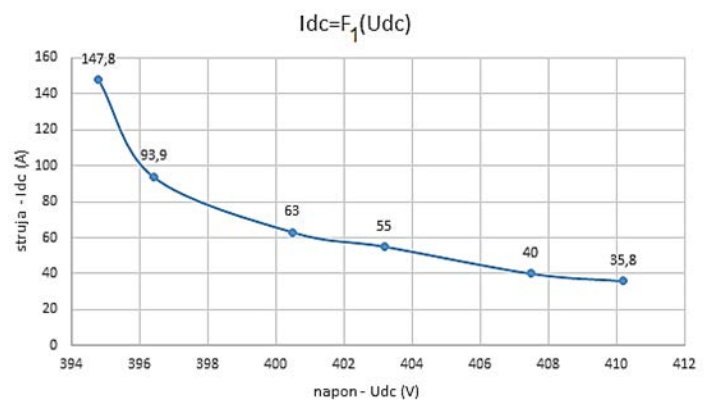
ovome treba napomenuti da su od prikazanih viših harmonika dominantni 11-ti i 13-ti. Amplituda 11-tog harmonika je oko 10A, dok je amplituda 13-tog harmonika oko 8 A. Stoga je pri 50 Hz njihov procentualni udeo u odnosu na maksimalnu struju 25% u prvom slučaju i oko 19% u drugom slučaju.

U nastavku su dati rezultati merenja i karakterizacije bitnih karakteristika punjačke stanice (Tabela 1).

Tabela 1. Tabelarni prikaz merenih veličina od interesa tokom testiranja (od stanja napunjenosti baterije 71% do 96%).

I_{dc} (A)	U_{dc} (V)	P_{dc} (kW)	SOC (%)	U_{ac} (V)	I_{ac} (A)	P_{ac} (kW)	η (%)
147,8	394,8	58,3	71	229,6	91,00	62,70	0,93
93,9	396,4	37,2	77	226,5	59,40	40,34	0,92
63	400,5	25,3	85	225,0	42,40	28,49	0,88
55	403,2	22,18	88	226,0	39,90	27,05	0,85
40	407,5	16,30	94	224,0	32,00	21,50	0,76
35,8	410,2	14,7	96	225,0	28,37	19,41	0,70

Na Slici 24 je prikazana funkcionalna zavisnost F1 struja punjenja baterije I_{dc} od njenog napona U_{dc} . Uočava se da je na početku punjenja baterije pri $(SOC\%)_1=71\%$, $I_{dc1}=147,8$ A, pri naponu $U_{dc1}=394,8$ V, a da je na kraju punjenja pri $SOC\%_2=96\%$ $I_{dc2}=35,8$ A, pri naponu baterije od $U_{dc}=410,2$ V.

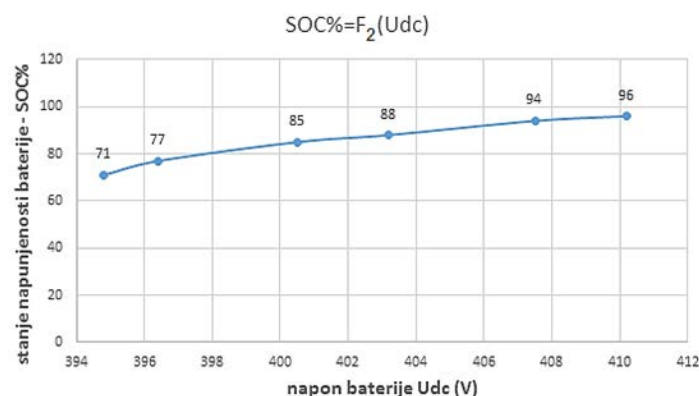


Slika 24. Zavisnost struje punjenja baterije I_{dc} električnog vozila od napona baterije U_{dc} za SOC% u opsegu (71%-96%)

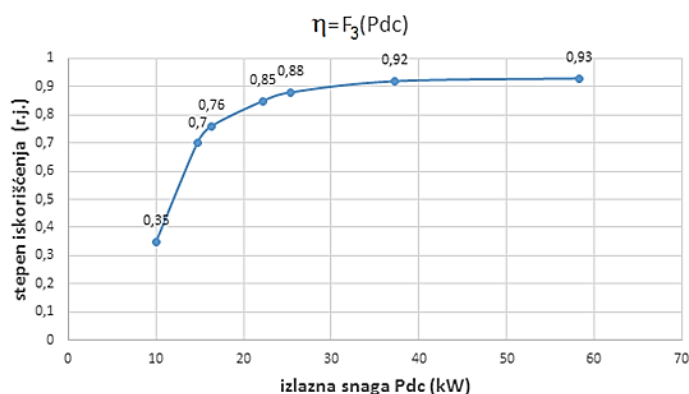
Na Slici 25 je prikazana funkcionalna zavisnost F2 stanja napunjenosti baterije SOC% od napona U_{dc} . Ova karakteristika je približno linearna u opsegu punjenja od SOC% 71%-96%.

Na Slici 26 je prikazana funkcionalna zavisnost F3 stepena iskorišćenja η (izraženog u r.j.) baterijskog punjača u zavisnosti od izlazne snage punjenja P_{dc} . Maksimalna vrednost stepena iskorišćenja je za režim punjenja SOC%=71% i ona je iznosila 93% pri izlaznoj snazi od $P_{dc}=58,3$ kW i pri ulaznoj snazi $P_{ac}=62,7$ kW. U ovom režimu su gubici iznosili $P_{\gamma}\approx 4,4$ kW. Prema deklaraciji proizvođača maksimalni stepen iskorišćenja ispitivanih punjačkih stanica je 96%, ali pri punoj snazi od 240 kW za punjačku jedinicu KOSTAD UNITY 240. Rezultat za stepen iskorišćenja od 93% koji je dobijen pri izlaznoj snazi koja je približno 1/4 od maksimalne snage (oko 60 kW) za ovu

napojnu jedinicu je u potpunosti zadovoljavajući.



Slika 25. Zavisnost stanja napunjenosti baterije SOC% od napona baterije U_{dc} za SOC% u opsegu (71%-96%)



Slika 26. Zavisnost stepena iskorišćenja od izlazne snage P_{dc} punjača na električnom vozilu; SOC% u opsegu (71%-96%)

VI ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazana eksperimentalna verifikacija i testiranje dva tipa napojnih jedinica KOSTAD UNITY 120 izlazne snage 120 kW i KOSTAD UNITY 240 izlazne snage 240 kW na baterijskoj banci E-vozila *Hyundai Cona Electric*, proizvodnje 2021. Nominalni kapacitet baterije na ovom vozilu je 160Ah pri naponu 400 Vdc. Sva testiranja i ispitivanja su sprovedena na punjačkim stanicama koje je isporučila i ugradila firma Charge & GO, koja jed između ostalog generalni zastupnik i distributer austrijske firme KOSTAD renomiranog proizvođača punjačkih stanica. U okviru eksploatacionih testova su osciloskopsku snimljene sve relevantne veličine od interesa i određen je stepen iskorišćenja ovih punjačkih jedinica za različite režime izlaznih snaga punjenja i stepena napunjenosti baterije na E-vozilu. Takođe su u sklopu ovog istraživanja su snimljeni FFT metodom spektri ulaznog mrežnog napona i mrežne struje i procenjen je uticaj punjačke stanice na napojnu mrežu.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao kao deo tekućih istraživanja studenta Milana Đerića u okviru master završnog rada iz predmeta Projektovanje

elektroenergetskih pretvarača (PEEP), pod mentorstvom prof. Željka Despotovića, na Akademiji tehničko-umetničkih strukovnih studija (ATUS) - Odsek Visoka škola elektrotehnike i računarstva iz Beograda.

Publikovanje i objava ovog rada su najvećim delom finansirani od strane firme Charge & GO iz Beograda, koja je bila nosilac posla prilikom implementacije testiranih punjačkih stanica za potrebe korisnika TC "Big Fashion", ulica Višnjička 84, Karaburma, Beograd i benzinske pumpe OMV, ulica Novi Novosadski put bb., Zemun.

Jednim delom finansiranje ovog istraživanja je takođe bilo podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, za period 2024.-2025. (Ugovor pod evidencionim brojem 51-03-136/2025-03/200034).

LITERATURA

- [1] Yu, D.M., Yang, C., Jiang, L.R., Li, T.Y., Yan, G.G., Gao, F.K., Liu, H.N. Review on Safety Protection of Electric Vehicle Charging, Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, Vol. 42, No.6, pp. 2145-2164, 2022. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.210274>
- [2] Zhou, K., Wu, Y., Wu, X., Sun, Y., Teng, D., Liu, Y. Research and Development Review of Power Converter Topologies and Control Technology for Electric Vehicle Fast-Charging Systems, Electronics, Vo. 12, No. 7, pp.1581-, 2023. <https://doi.org/10.3390/electronics12071581>
- [3] Dixon, J., Keith, Bell, K. Electric vehicles, Battery capacity, charger Power, access to charging and the impacts on distribution networks, eTransportation, Vol. 4, 100059, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.etrans.2020.100059>
- [4] Global EV Outlook 2022, <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2022> [pristupljeno 10.01.2025]
- [5] Global Electric Car Stock, 2010-2021, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-electric-car-stock-2010-2021> [pristupljeno 10.01.2025]
- [6] Tong, M.H., Cheng, M., Xu, Z.H., Wen, H.H., Hua, W., Zhu, X.Y. Key issues and solutions of integrated on-board chargers for electric vehicles, Transactions of China Electrotechnical Society, Vol. 36, No. 24, pp. 5125-5142, 2021. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.201154>
- [7] EV and HEV Fundamentals, Academy.gannet solutions <https://academy.gannetsolutions.com/product/ev-and-hev-fundamentals/> [pristupljeno 10.01.2025]
- [8] Aulakh, A. PRD-08367 REV 1.0, EV Charging Power Topologies Design Guidebook, Wolfsped, 2024, https://assets.wolfsped.com/uploads/2024/01/Wolfsped_PRD-08367_EV_Charging_Power_Topologies_Design_Guidebook_Application_Note.pdf [pristupljeno 10.01.2025]
- [9] Technical DataSheet, UNITY120, 2020, https://www.greenetik.eu/images/Kostad/Unity120_DE_EN_FR_RU_AR_Datasheet.pdf [pristupljeno 10.01.2025]
- [10] Elektro punjači, KOSTAD Unity 240, 2023, <https://elektropunjac.com/product/kostad-unity-240/> [pristupljeno 10.01.2025]

AUTORI/AUTHORS

Milan Đerić - dipl. inž. strukovnih studija, Charge & GO, Beograd, milan.djeric@chargego.rs, ORCID [0009-0008-1192-5419](https://orcid.org/0009-0008-1192-5419)

Željko V. Despotović - prof. dr, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710)

Miloš Kostić - dipl. inž., direktor firme Charge & GO, Beograd, milos.kostic@chargego.rs

Uroš Ilić - master inž., Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, uros.ilic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-3955-8995](https://orcid.org/0000-0003-3955-8995)

Exploitation Tests of Fast Charging 120 kW and 240 kW Power Stations for E-cars

Abstract - The paper presents exploitation testing that were carried out at fast charging stations for electric cars. Tests were performed at charging stations with output DC powers of 120 kW and 240 kW. The input voltage of the tested charging stations is 3x400 V, 50 Hz, and the output DC voltage is 400 V. The measured quantities of interest were input grid voltage and input grid current, output DC voltage and output DC current, state of charge (SOC%), of the electric vehicle battery bank as well as input and output active power. The paper presents the key experimental results obtained during the test and it is recorded the efficiency curve of fast charging stations depending on the output power in different operating modes.

Index terms - E-cars, Electrical battery, Fast charging station, Power converters, AC power, DC power

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