

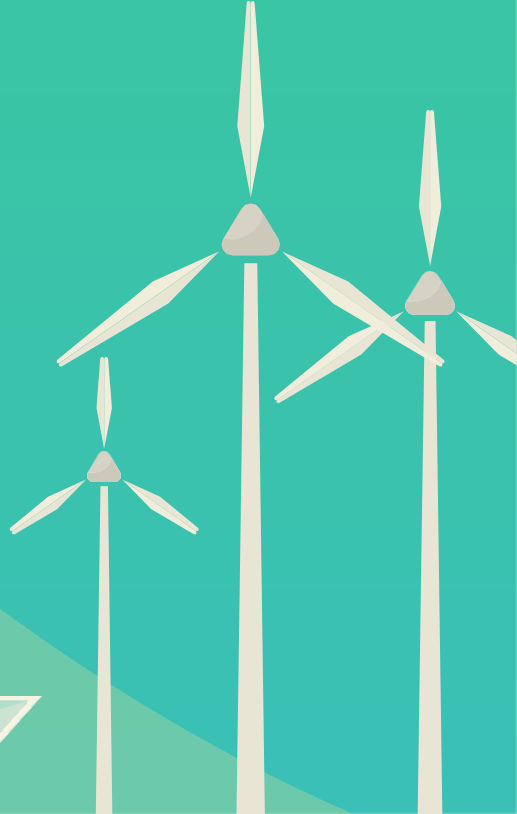
ISSN 0354-8651



List Saveza energetičara
Broj 1 / Godina XXVI / Mart 2024.

energija

| ekonomija | ekologija



e3e3e3

energija

| ekonomija | ekologija



Energija / Ekonomija / Ekologija

Broj 1, Mart 2024

Izdavač:

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

Suizdavači:

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

Predsednik Saveza energetičara:

prof. dr Nikola Rajaković

Predsednik Skupštine Saveza energetičara:

prof. dr Milun Babić

Glavni i odgovorni urednik:

prof. dr Dušan Gordić, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

Uređivački odbor i izdavački savet:

prof. dr Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet, Beograda
prof. dr Dejan Ivezić, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd
prof. dr Mirko 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 Vrtič, 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] Mia LEŠIĆ AGANOVIĆ, Mugdin AGIĆ, Majda TEŠANOVIĆ, Izudin KAPETANOVIĆ, Tatjana KONJIĆ
Analiza uticaja obnovljivih izvora energije na elektroenergetski sistem sjeveroistočne Bosne / Impact Analysis of Renewable Energy Sources on Power System of North-eastern Bosnia
- [11] Dunja GRUJIĆ, Miloš KUZMAN
Stambena zajednica u ulozi kupca-proizvođača / Residential Community in the Role of Prosumer
- [22] Sergey FOMINYKH, Dusan STANAR
Unravelling the Serbian Energy Transition Puzzle: Driving an Electric Vehicle Result in Higher CO₂ Emissions than Driving a Traditional Internal Combustion Engine Counterparty / Rešavanje zagonetke energetske tranzicije Srbije: Vožnja električnim vozilima dovodi do veće emisije CO₂ nego vožnja tradicionalnih vozila sa SUS motorom
- [28] Nikola STANKOVIĆ
Mokra polja kao potencijalno rešenje u procesu prečišćavanja otpadnih voda / Constructed Wetlands as a Potential Solution in the Wastewater Treatment Process
- [34] Sandra Lj. KOVAČEVIĆ, Miloš J. BANJAC
Postupak određivanja energetske karakteristike zgrade prema ISO 52016-1 / Determination of energy performance of building according to ISO 52016-1

- [42] Vladimir BEČEJAC, Miloš ĐORĐEVIĆ, Nemanja JELENIĆ, Mihajlo MARKOVIĆ, Miloš MOSUROVIĆ
Estimacija stanja u elektroenergetskom sistemu sa PMU uređajima i maliciozni napad injektiranjem loših merenja i njegova detekcija /
State Estimation in the Power System with Phasor Measurement Units and Malicious Attacks through Injection of Inaccurate Measurements and Its Detection

- [51] Boban PAVLOVIĆ, Aleksandar MADŽAREVIĆ, Dejan IVEZIĆ, Marija ŽIVKOVIĆ, Dušan MOJIĆ
Energetska tranzicija u domaćinstvima: analiza usaglašenosti Srbije sa paketom „Čista energija za sve Evropljane“ / Energy Transition in Households: Analysis of Serbia's Compliance with the "Clean Energy for All Europeans" Package

- [59] Marko ĐUROVIĆ, Arsenije ĆIRIĆ, Željko V. DESPOTOVIĆ
Projektovanje i realizacija fotonaponske elektrane izlazne snage 1500 kW na krovu fabrike „Flash“-Apatin / Design and Realization of a Photovoltaic Power Plant with an Output Power of 1500 kW on the Roof of the "Flash" - Apatin Factory

- [72] Dušan PRODANOVIĆ, Damjan IVETIĆ, Predrag VOJT, Milan ĆUŠIĆ
U susret revitalizaciji turbina HE Đerdap 2: Merenje rasporeda vektora brzina na ulazima turbina / Preparing for Revitalization of the Turbines of the Đerdap 2 HPP: Measurement of Velocity Distribution at Turbine Inlets

- [80] Siniša SPREMIĆ, Aleksandar ANTONIĆ
Uticaj solarnih panela i skladišta električne energije na gubitke u niskonaponskoj mreži / The Influence of Solar Panels and Electric Energy Storage on Losses in the Low-Voltage Network

Analiza uticaja obnovljivih izvora energije na elektroenergetski sistem sjeveroistočne Bosne

Mia Lešić Aganović*, Mugdin Agić*, Majda Tešanović**, Izudin Kapetanović**, Tatjana Konjić**

* Elektroprijenos – Elektroprenos BiH a.d. Banja Luka, Operativno područje Tuzla, Tuzla, BiH

** Univerzitet u Tuzli, Fakultet elektrotehnike, Tuzla, BiH

Rezime - Razmatrajući obaveze nametnute od strane Evropske zajednice, ali i klimatske promjene koje se više ne mogu zanemarivati, nužno je izvršiti pomak u paradigmi proizvodnje električne energije smanjenjem udjela konvencionalnih izvora energije, a povećanjem proizvodnje iz obnovljivih izvora. Elektroenergetski sistem Bosne i Hercegovine uglavnom se temelji na proizvodnji električne energije iz termo i hidroelektrana. U zadnjoj deceniji značajno je porastao interes za ulaganje u obnovljive izvore energije. Ovaj rad ima namjeru ukazati na ograničenja i potencijalne posljedice koje obnovljivi izvori energije mogu imati na elektroenergetski sistem, ali i predložiti rješenja efikasnije integracije obnovljivih izvora energije u elektroenergetski sistem koristeći model virtualnih elektrana simuliranjem različitih scenarija u prenosnoj mreži u sjeveroistočnom dijelu Bosne i Hercegovine korištenjem profesionalnog softvera.

Ključne reči – obnovljivi izvori energije, virtualne elektrane, energetska tranzicija, analiza opterećenja dalekovoda

I UVOD

Smanjenje proizvodnje električne energije iz konvencionalnih izvora poput fosilnih goriva nametnuto je kao prioritet, čime se mijenjaju osnovne karakteristike sistema gdje sistem evoluirá prema geografski razučenoj proizvodnji i sve većem porastu potrošnje [1]. Postavlja se pitanje da li postojeći elektroenergetski sistem ima sposobnost odgovoriti na sve predstojeće izazove, ispunjavanje svoje osnovne uloge i održavanje svoje stabilnosti; sigurno i efikasno snabdijevanje električnom energijom svih korisnika. Osnovni zadatak prenosne mreže, kao dijela elektroenergetskog sistema, je prenos električne energije iz proizvodnih jedinica smještenih na različitim lokacijama do distributivnog sistema, koji zatim opskrbljuje energijom krajnje korisnike. Glavna razlika između prenosne i distributivne mreže odražava se u tokovima energije. Povećana integracija distribuirane proizvodnje, poput obnovljivih izvora energije, mijenja smjer toka energije u distributivnoj mreži s jednosmjernog na dvosmjernan, što dodatno komplikuje paradigmu upravljanja sistemom [2]. Međutim, promjene u vezi s tokovima energije nisu jedini izazovi s kojima se elektroenergetski sistem suočava instaliranjem neupravljivih obnovljivih izvora energije. Kvalitet električne energije ima veliki značaj, a smanjenje kvaliteta energije u smislu onečišćenja mreže može uzrokovati smanjenje efikasnosti, povećanje zagrijavanja opreme i u konačnici uzrokovati kvarove opreme u sistemu [3]. Obnovljivi izvori čija tehnologija se temelji na

invertorima, poput vjetroelektrana, solarnih elektrana, sistema jednosmjerne struje i baterijskih sistema, uvode nekoliko različitih onečišćavača u sistem, poput harmoničnih komponenti ili varijacija napona. Obaveza praćenja kvaliteta električne energije u prenosnom sistemu pripada operatorima prenosnog sistema svake države, u skladu sa nacionalnim mrežnim kodeksima. U Bosni i Hercegovini je primjetan trend povećanja instalisane snage iz obnovljivih izvora energije na svim naponskim nivoima s jako velikim interesima za izgradnjom i instaliranjem još više proizvodnih jedinica, dominantno fotonaponskih elektrana. Uvažavajući prethodno navedeno, uz ranije pomenute prioritete, nameće se još jedan, očuvanje integriteta prenosne mreže njenim racionalnim korištenjem, kontinuiranim ulaganjem i analitičkim pristupom u obradi podataka koji dostavljaju investitori u pogledu instaliranja novih proizvodnih kapaciteta s ciljem osiguranja kontinuiranje, čiste i stabilne električne energije svim krajnjim korisnicima.

U ovom radu prikazani su rezultati simulacija različitih scenarija u realnoj prenosnoj mreži u sjeveroistočnoj Bosni, za slučajeve prihvatanja različitih količina proizvedene snage iz obnovljivih izvora energije. S obzirom na trenutno stanje opterećenja u sistemu, prikazane su moguće količine proizvedene električne energije iz obnovljivih izvora koje će sistem u budućnosti moći prihvatiti.

II ELEKTROENERGETSKI SISTEM SJEVEROISTOČNE BOSNE

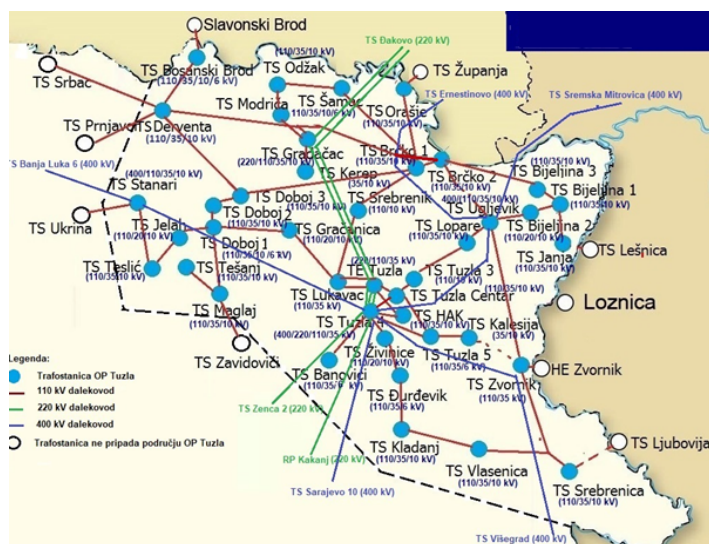
Prenos električne energije u Bosni i Hercegovini, kao posebna elektroprivredna djelatnost, oblikovan je pedesetih godina prošlog stoljeća. Posebna kompanija za prenos električne energije osnovana je 1953. godina sa sjedištem u Sarajevu i njena osnovna djelatnost bila je uz prenos električne energije i projektovanje, izgradnja, održavanje i razvoj prenosne mreže u Bosni i Hercegovini [4]. Elektroprenos-Elektroprijenos BiH se, teritorijalno i funkcionalno gledano, sastoji od četiri operativna područja: Banja Luka, Mostar, Sarajevo i Tuzla [5].

Elektroenergetski sistem sjeveroistočne Bosne sastoji se od proizvodnih jedinica, prenosne mreže 400/220/110 kV, distributivne mreže 35/10/0,4 kV i fabričke, željezničke i rudarske mreže nazivnog napona 6 kV. Proizvodne jedinice obuhvataju termoelektrane (TE), hidroelektrane (HE), termoelektanu na koksni gas (TEKG) i fotonaponske elektrane (FNE) povezane s distribucijskom mrežom, kako je prikazano na Slici 1. Termoelektrane u sjeveroistočnoj Bosni uključuju TE Tuzla s instaliranom snagom od 723 MW i godišnjom proizvodnjom od približno 3.100 GWh, TE Ugljevik s instaliranom snagom od 300 MW i godišnjom proizvodnjom od

približno 1.601 GWh, te TE Stanari s instaliranom snagom od 300 MW i godišnjom proizvodnjom od približno 1.601 GWh. TE Tuzla je puštena u rad 1963. godine, TE Ugljevik 1985. godine, a TE Stanari 2016. godine.

Jedina termoelektrana na koksni gas instalirana je u kompaniji za proizvodnju koksa u Lukavcu. Puštena je u rad 1951. godine s instaliranom snagom od 16 MW i projektovanom godišnjom proizvodnjom od 130,68 GWh.

Prva mini hidroelektrana u ovom području puštena je u rad 1998. godine na jezeru Modrac i ima instaliranu snagu od 257 do 1.998 kW, ovisno o dostupnom višku vode na brani. Kod Zvornika, Vlasenice i Teslića postoji nekoliko mini HE s instaliranom snagom od 10,35 MW [6].



Slika 1. Mapa elektroenergetskog sistema sjeveroistočne Bosne

III INTEGRACIJA OBNOVLJIVIH IZVORA ENERGIJE U PRENOSNU MREŽU

Obnovljivi izvori energije jedni su od ključnih komponenti održivog razvoja, te omogućavaju pozitivne ekonomske, ekološke i socijalne efekte. Obnovljivi izvori energije smanjuju negativne uticaje na životnu sredinu, kao i ovisnost o uvozu energije. Implementacija obnovljivih izvora energije ima niz pozitivnih uticaja, u ekonomskom, ekološkom i društvenom konceptu održivog razvoja. Zbog korištenja fosilnih goriva dolazi do globalnog zagrijavanja, te kako bi se eliminisali ovi negativni uticaji, posebice po životnu sredinu, kao imperativ se nameće korištenje obnovljivih izvora energije [7].

Integracijom neupravljivih obnovljivih izvora električne energije, poput vjetroelektrana i fotonaponskih elektrana, struktura elektroenergetskog sistema postaje još složenija s aspekta njegovog upravljanja i vođenja. Razlog tome su karakteristike ovih vrsta resursa, koje se razlikuju od konvencionalnih elektrana na sljedeće načine [8, 9, 10]:

- *intermitentnost proizvodnje* – neupravljivi obnovljivi izvori energije imaju proizvodnju koja varira s vremenom, ovisno o trenutačnoj snazi primarnih energetske izvora (brzina vjeta i insolacija), što se ne podudara s varijabilnošću potrošnje;

- *geografski položaj* – proizvodnja električne energije iz obnovljivih izvora uveliko ovisi o njihovom geografskom položaju;
- *prognoza proizvodnje* – prognoza proizvodnje jedan dan unaprijed nije dovoljno pouzdana, tako da obnovljivi izvori energije ne sudjeluju u ekonomskom dispečiranju kao konvencionalni izvori energije;
- *troškovi tehnologije* – niski marginalni troškovi tehnologija obnovljivih izvora daju prednost varijabilnim izvorima u usporedbi s konvencionalnima, što utiče na tržišnu cijenu električne energije, a koja ima nestabilan karakter zbog varijabilnosti proizvodnje iz obnovljivih izvora;
- *kvalitet električne energije* – oprema koja se temelji na invertorskim tehnologijama, poput vjetroelektrana i fotonaponskih sistema, može dovesti do problema u vezi s kvalitetom energije, ali ih se također može dizajnirati kako bi se smanjili ili ograničili ti učinci;
- *stabilnost sistema* – vrlo je važno održavati napon unutar dopuštenih granica. Naponi iznad dopuštenih granica nepovoljno utiču na karakteristike izolacije opreme, smanjuju vijek trajanja opreme, a uz dielektrička naprezanja i povećanje napona mogu uzrokovati dodatne gubitke.

U skladu s navedenim, iako se obnovljivi izvori energije smatraju čistom i zelenom energijom, takvi izvori mogu uzrokovati onečišćenje elektroenergetskog sistema. Zbog njihove intermitentnosti i varijabilnosti, mogu uticati na kvalitet energije prenosne mreže i smanjiti stabilnost sistema.

Prenosna mreža nema neograničene kapacitete za prihvatanje novih proizvodnih postrojenja. Ako se planira integracija većeg broja proizvodnih kapaciteta, bit će potrebna rekonstrukcija postojećih i izgradnja novih prenosnih kapaciteta. U skladu s Pravilnikom o priključku [11] i Mrežnim kodeksom [12], tokom postupka priključivanja na prenosnu mrežu provodi se i studija tehničkog rješenja priključka. Cilj studije je utvrditi tehnički izvediv način priključka s najmanjim troškovima priključka. Svaki potencijalni projekt za koji se podnese zahtjev za priključenje je specifičan. Na određenim lokacijama postojeći prenosni kapaciteti su popunjeni, pa tehnički izvediv način priključka može biti, primjerice, priključak izgradnjom dugih priključnih vodova ili priključak na višem naponu. Svaki pojedinačni zahtjev se obrađuje, a definiraju se i potrebni uslovi za priključak. Zbog problema u ispunjavanju uslova za priključak, troškovi investitora mogu značajno porasti.

Da bi omogućili prijem električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora, potrebno je povećati kapacitete pojedinačnih prenosnih vodova, povećavajući ukupni kapacitet prenosne mreže određenog područja, dijela elektroenergetskog sistema ili samog sistema. Moguće je povećati kapacitet prenosne mreže izgradnjom novih ili povećanjem kapaciteta postojećih prenosnih vodova.

IV PLANIRANI OBUHVAT OBNOVLJIVIH KAPACITETA U SJEVEROISTOČNOJ BOSNI

Ne postoji strateški dokument s jasno definiranim ciljevima za integraciju novih proizvodnih postrojenja u Bosni i Hercegovini

na osnovu kojeg bi se izradili detaljni planovi i odredile potrebne akcije za provedbu. Također, investicije koje treba izvršiti od strane operatora prenosne mreže trebale bi pratiti integraciju obnovljivih izvora, jer treba paziti da se izbjegne prekomjerno dimenzioniranje ili nedostatna izgradnja mreže kako bi se prilagodila novim proizvodnim postrojenjima. Trenutno, prenosna mreža u Bosni i Hercegovini je podopterećena, većina prenosnih vodova je opterećena ispod svoje prirodne snage, posebno na 220 i 400 kV naponskom nivou. Prirodna snaga dalekovoda je svojstvo dalekovoda na nivou koje se gubici u prenosnoj mreži mogu smatrati zanemarivima. Opterećenje dalekovoda ispod prirodne snage uzrokuje prenapone u sistemu zbog viška reaktivne energije, dok veća opterećenja uzrokuju pad napona, uzrokujući probleme u kvaliteti isporučene električne energije uz dodatni toplinski stres na vodičima. Realno je očekivati da će prihvatanje dodatno proizvedene električne energije dovesti do dodatnog toplinskog stresa na vodičima.

Postojeća prenosna mreža izgrađena je uzimajući u obzir postavljanje velikih proizvodnih jedinica u središtima prenosne mreže, koja su na vrlo visokom naponu i dobro povezana s ostatkom mreže. Ovaj koncept osiguravao je stalnu proizvodnju prema centrima potrošnje i dovoljne kapacitete za prenos električne energije. Otvaranje tržišta električne energije i prihvatanje obnovljivih izvora na prenosnoj mreži donijelo je značajne promjene u strukturi proizvodnje električne energije.

Zbog svoje prirodne lokacije, 60% površine Bosne i Hercegovine ima značajan solarni potencijal u rasponu od 1.200-1.400 kWh/kWp godišnje. Sjeveroistočna Bosna ima solarni potencijal u rasponu od 1200-1350 kWh/kWp [13]. Budući da Bosna i Hercegovina ima značajan potencijal za korištenje obnovljive energije, investitori iz cijele Bosne i Hercegovine žele iskoristiti priliku za ulaganje u izvore obnovljive energije. Potvrda toga je vidljiva iz Registra podnesenih zahtjeva za priključenje na prenosnu mrežu. U decembru 2023. godine podneseni su zahtjevi za priključenje 3.978 MW vjetroelektrana i 9.685 MW fotonaponskih elektrana [14].

U skladu s dijelom 4.1. Mrežnog kodeksa [12], bilansiranje novih proizvodnih jedinica vrši se na osnovu važećih uslova za priključenje na prenosnu mrežu i izjave korisnika o prihvaćanju tih uslova i potvrde entitetske institucije da je proizvodna jedinica unutar maksimalne moguće prihvatljive snage s obzirom na mogućnosti regulacije sistema. Do maja 2022. godine na snazi je bila Odluka o odobrenju maksimalne moguće snage prihvata iz neupravljivih obnovljivih izvora energije, s ograničenjima od 460 MW za vjetroelektrane i 400 MW za fotonaponske elektrane. Nakon ukidanja tih ograničenja, podneseno je stotine zahtjeva za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora.

Unatoč poništenju Odluke o odobrenju maksimalne moguće prihvatljive snage iz obnovljivih izvora energije, Državna regulatorna agencija za električnu energiju (DERK) zahtijevala je analitički pristup u obradi podataka koje investitori dostavljaju tokom pripreme Indikativnog plana razvoja proizvodnje od strane Operatora nezavisnog sistema (NOS), u pogledu određivanja realne dinamike izgradnje i puštanja u rad postrojenja, kao i razmatranja uvođenja dodatnih kriterija za balansiranje snage u skladu s Mrežnim kodom. Zbog ovog zahtjeva, u Indikativnom planu razvoja proizvodnje za razdoblje

od 2024. do 2033. godine tretirano je samo 769,4 MW vjetroenergije i 312,206 MW solarnih kapaciteta. Ovaj razvojni plan predviđa puštanje u rad Bloka 7 TE Tuzla, ali i nijednu vjetroelektranu ili fotonaponsku elektranu na području sjeveroistočne Bosne [6]. Većina planiranih fotonaponskih elektrana predviđena je za izgradnju u Hercegovini, zbog velikog solarnog potencijala. To je doprinijelo ostvarenju 80 priključaka na distributivnu mrežu i još 116 koji čekaju puštanje u rad. Pregledom Registra podnesenih zahtjeva za priključenje na prenosnu mrežu i podacima od elektroprivrednih društava i općina, primjećuje se da je za izgradnju planirano nekoliko fotonaponskih postrojenja u sjeveroistočnoj Bosni:

- Banovići: fotonaponska elektrana s instaliranom snagom od 8,8 MW i projektiranom godišnjom proizvodnjom od 12,5 GWh,
- Živinice: osam fotonaponskih elektrana s projektiranom godišnjom proizvodnjom od 60 MWh,
- Gračanica: projektni zadatak za fotonaponsku elektranu snage 2x25 MW dostavljen je korisniku,
- Deling 1: korisniku izdati uslovi za priključenje fotonaponske elektrane 2x29,75 MW,
- Jezero Modrac i Snježnica: planirana izgradnja plutajućih fotonaponskih elektrana od strane elektroprivredne kompanije.

Sa poništenjem Odluke o odobrenju maksimalne moguće prihvatljive snage iz neupravljivih obnovljivih izvora energije, više ne postoji ograničenja za priključenje novih neupravljivih obnovljivih izvora energije u smislu regulacije sistema. Međutim, postoje drugi problemi s kojima se sistem suočava, a koji trebaju biti dalje razmotreni.

V VIRTUALNE ELEKTRANE – MOGUĆE RJEŠENJE

Virtualna elektrana (eng. Virtual Power Plant, VPP) je mreža decentraliziranih, srednjih proizvodnih jedinica električne energije, kao i fleksibilnih potrošača električne energije i sistema za skladištenje. Ove izvore energije mogu činiti tri osnovne forme [15]:

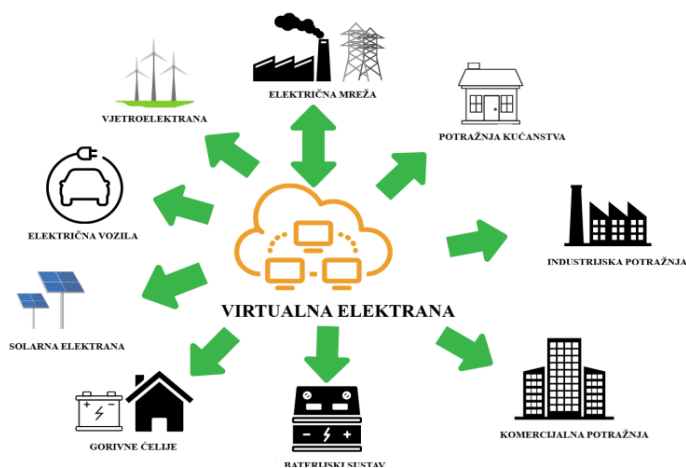
- male i srednje proizvodne jedinice električne energije, poput vjetroelektrana i solarnih parkova,
- fleksibilni potrošači električne energije su korisnici energije koji posjeduju energetske resurse s inherentnom fleksibilnošću koja se može koristiti kroz odgovor na potražnju,
- fleksibilni sistemi za skladištenje energije, poput baterijskih skladišta.

Virtualne elektrane predstavljaju sistem u kojem se neupravljiva distribuirana proizvodnja i fleksibilna potražnja mogu uspješno balansirati i optimizirati [16]. Virtualne elektrane ne moraju se sastojati od samo jednog određenog izvora energije, već mogu biti kombinacija sva tri, kako je prikazano na Slici 2:

- fotonaponski solarni sistemi,
- vjetroelektrane,
- hidroelektrane.

Osim navedenog, dijelovi virtualne elektrane mogu biti i elektrane na biogas i biomasu, te male elektrane s gasnim ili dizel turbinama. Cilj virtualne elektrane je povezati različite izvore

energije u jedinstvenu cjelinu. To može obuhvatiti sve, od solarnih i vjetroelektrana do energetske resursa i jedinica za skladištenje energije. Ova mreža distribuiranih energetske jedinica povezana je jednom centraliziranom platformom. Ta platforma se koristi za praćenje, koordinaciju i upravljanje energetske resursima virtualne elektrane u jednom centralnom upravljačkom sistemu. To osigurava da korisnici i potrošači električne energije mogu dobiti optimalnu energiju u bilo kojem trenutku kako bi obavljali niz operacija koristeći virtualnu elektranu. Jako važna komponenta virtualne elektrane su i komunikacijske tehnologije i infrastruktura koje služe u svrhu upravljanja energijom i potrošnjom.



Slika 2. Agregirane jedinice unutar virtualne elektrane [18]

U zavisnosti od toga koji su subjekti uključeni u planiranje i vođenje virtualnom elektranom, četiri osnovna cilja se mogu identificirati u radu virtualnih elektrana. Ekonomski, tehnički i ekološki su najvažniji aspekti rada ovakvog sistema, dok je četvrti kombinacija prethodno navedenih [17]. U ekonomskom smislu, funkcija cilja je minimiziranje ukupnih troškova uvažavajući i najmanji uticaj na mrežu i ovo je osobina koju koriste i vlasnici distribuirane proizvodnje i operateri. Ograničavajući faktor ovog cilja su fizičke osobine i ograničenja mreže. S tehničkog aspekta, poboljšavaju se performanse mreže. U ovom smislu, cilj je minimiziranje gubitaka i poboljšanje naponskih prilika u mreži bez razmatranja troškova resursa ili prihoda. Ovo je osobina kojom se uglavnom bave operateri distributivnog sistema. Ekološki cilj je važan bez obzira na ekonomsku, odnosno tehničku komponentu cilja, jer se bazira isključivo na potrebi za očuvanjem životne sredine i smanjenjem emisije stakleničkih plinova. Ovu osobinu u potpunosti podržavaju regulatori sistema.

Postoji veliki potencijal za proizvodnju energije putem virtualnih elektrana u sjeveroistočnoj Bosni i potrebna su brza rješenja nadležnih institucija na pravnim okvirima kako bi se mogli formirati pravni subjekti koji bi aktivirali virtualne elektrane i stvorile mrežu proizvođača (domaćinstava, kompanije itd.) na nivou distribucije. Na ovaj bi se način kapacitet proizvodnje u okviru konzuma trafostanice kompenzirao sa prenosnom mrežom na koju bi se mogle instalirati fotonaponske elektrane. Ovaj vid

proizvodnje električne energije mogao bi dostići najveću ekspanziju od svih proizvođača električne energije, prvenstveno zbog jednostavnosti i niskih cijena umrežavanja, te instalacije mini vjetroelektrana, mini hidroturbina i fotonaponskih panela, uključujući sisteme za skladištenje električne energije. Promjena paradigme elektroenergetskog sistema je nužna kako bi ga učinila održivim u novim radnim uslovima.

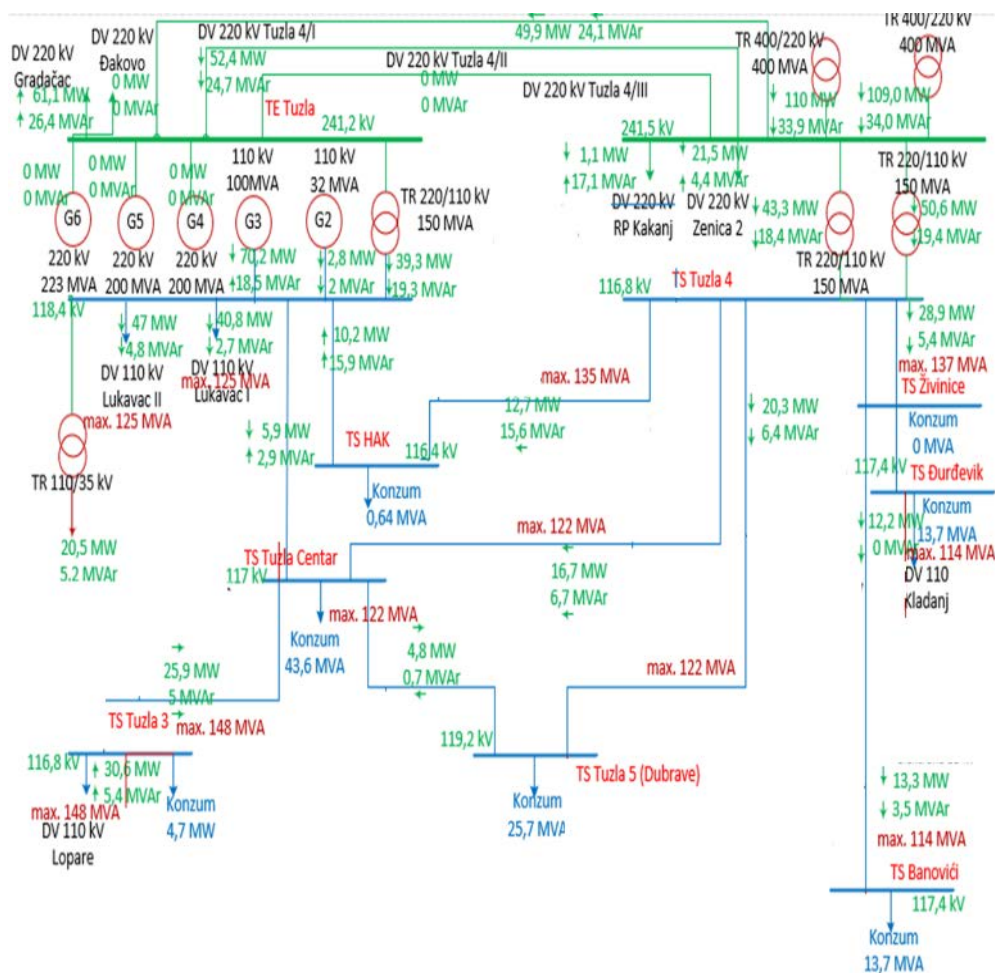
V MOGUĆNOSTI MODERNIZACIJE UNUTAR PROIZVODNIH CENTARA SJEVEROISTOČNE BOSNE

Zbog obaveza nametnutih od strane Evropske zajednice za napuštanje konvencionalnih izvora, elektrana poput termoelektrana, modelirani su i analizirani različiti scenariji za prenosnu mrežu sjeveroistočne Bosne. Analiziran je stvarni slučaj iz decembra 2023. godine, kada je bio u pogonu samo generator G3 u TE Tuzla. Generatori G4, G5 i G6 nisu bili u pogonu.

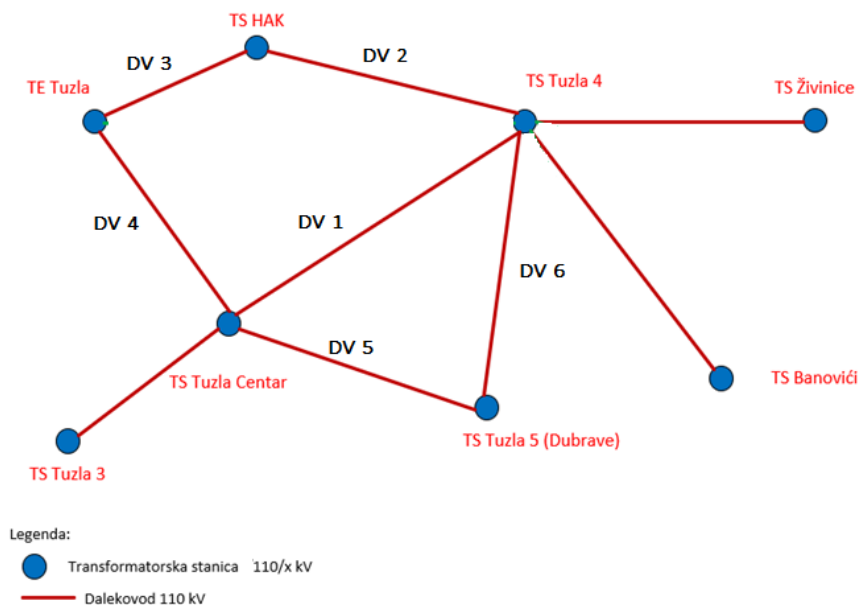
Budući da se vjetroelektrane i hidroelektrane ne planiraju instalirati u elektroenergetski sistem sjeveroistočne Bosne, analizirani prijedlog obrađuje fotonaponske elektrane, virtualne elektrane i jednu elektranu na koksni gas koja bi poboljšala energetske bilans analiziranog područja. Različiti scenariji analizirani su za energetske prstenove u prenosnoj mreži sjeveroistočne Bosne. Analiza je izvedena pri optimalnom opterećenju potrošača, u zimskom periodu 2023. godine, za dio 110 kV prenosne mreže.

Razmatrana su tri različita energetska prstena, te su za svaki 110 kV prsten analizirani različiti scenariji energetskog bilansa, kao što su slučajevi kada dođe do kvara na jednom od dalekovoda, što se manifestuje prekidom ili ispadom. Slika 3 prikazuje detaljan energetske bilans za dio elektroenergetske mreže sjeveroistočne Bosne koja se sastoji od objekata 400, 220 i 110 kV s naznačenim kapacitetima opterećenja dalekovoda, prema zaštitnim i kontrolnim uređajima. Simulacija je izvršena za 110 kV mrežu, na osnovu stvarnih napona u 110 kV mreži, koja je za ovaj dio mreže podopterećena i ima više vrijednosti napona koje su u ovom slučaju 125 kV u večernjim satima. U okviru 110 kV prstenova ova analiza razmatra proizvodne jedinice u distributivnoj mreži 35/10 kV i prenosnoj mreži 110 kV. Razmatrane proizvodne jedinice su fotonaponske i virtualne elektrane.

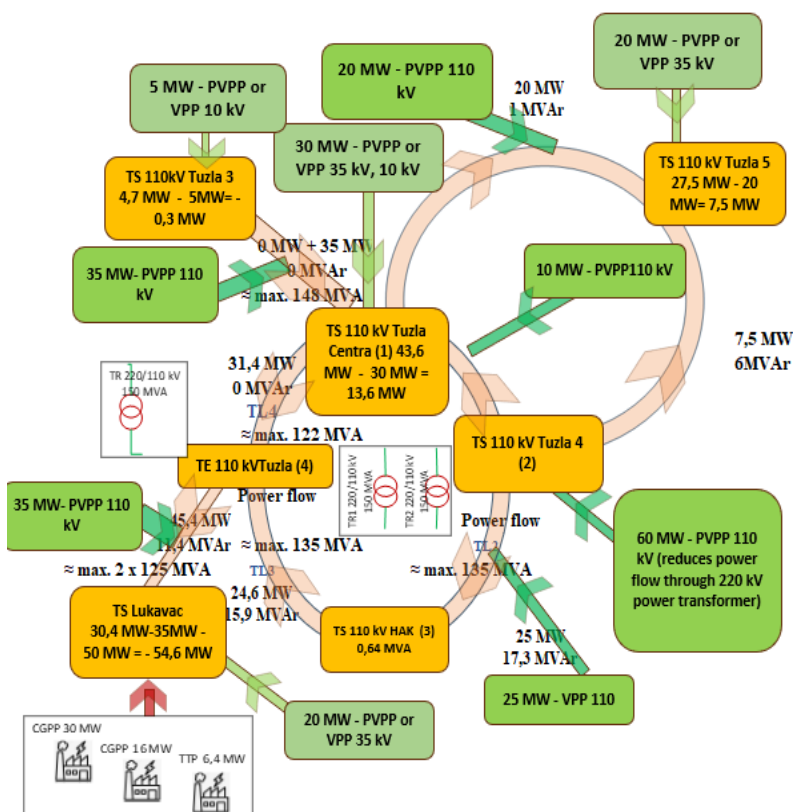
Na Slici 4 prikazan je prvi razmatrani energetske prsten (prsten 1) koji obuhvata transformatorske stanice (TS) TE Tuzla – Tuzla Centar – Tuzla 4 – Hak. Razmatrani su slučajevi nerazpoloživosti svakog pojedinačnog dalekovoda, te tokovi snaga u preostalim dijelovima mreže. Maksimalna opterećenja po dalekovodima iznose 122 MVA (za dalekovode 1, 4, 5 i 6), te 135 MVA (za dalekovode 2 i 3). Slika 5 daje grafički prikaz bilansa snage u prvom analiziranom prstenu sistema s priključenim virtualnim elektranama, fotonaponskim elektranama i jednim generatorom termoelektrane i elektrane na koksni gas. Termoelektrana i elektrane na koksni gas su neophodne kako bi se ostvarila kontinuirana opskrba energijom za predstavljeni dio sistema. Isti scenariji izvršeni su za sistem s priključenim novim proizvodnim jedinicama kao za stvarnu prenosnu mrežu.



Slika 3. Detaljan energetska bilans za analizirani dio 110 kV mreže



Slika 4. Energetski prsten 1



Slika 5. Bilans snage za energetski prsten 1 s priključenim VPP, FNE, TEKG i TE

Tabela 1 prikazuje kumulativne vrijednosti opterećenja za svaki dalekovod koji se razmatra za isključivanje za prsten 1 TE Tuzla – Tuzla Centar – Tuzla 4 – Hak (prsten 1, Slika 4) stvarne mreže bez priključenja obnovljivih izvora energije. Tabela 2 prikazuje kumulativne vrijednosti opterećenja za svaki dalekovod koji se razmatra za isključivanje za prsten prve podstanice (PS) TE Tuzla – Tuzla Centar – Tuzla 4 – Hak (prsten 1) s priključenim novim proizvodnim jedinicama. U odnosu na maksimalna opterećenja dalekovoda, za oba slučaja se može zaključiti da su dalekovodi podopterećeni.

Tabela 3 prikazuje procentualne vrijednosti opterećenja dalekovoda i može se zaključiti da su dalekovodi podopterećeni uz poštovanje stvarnih vrijednosti potrošnje. Dalekovod DV 4 je u analiziranom trenutku bio rasterećen, tok energije je bio preko DV 3, tako da su vrijednosti opterećenja DV 4 gotovo zanemarive. Slika 6 prikazuje vrijednosti opterećenja dalekovoda prema postavkama zaštitnih i kontrolnih uređaja za razmatrani prsten i izvršene modele za vrijednosti prikazane u Tabeli 3.

Tabela 1. Kumulativna opterećenja dalekovoda – prsten 1

Scenarij	DV 1 (MVA)	DV 2 (MVA)	DV 3 (MVA)	DV 4 (MVA)	DV 5 (MVA)	DV 6 (MVA)
1. Bilans snage	17,99	20,12	19,98	6,57	4,85	21,57
2. Prekid voda 1	0,00	34,63	31,23	13,37	4,85	31,00
3. Prekid voda 2	28,30	0,00	0,64	13,94	4,85	21,57
4. Prekid voda 3	28,30	0,64	0,00	13,93	4,85	21,57
5. Prekid voda 4	23,57	21,96	13,93	0,25	4,85	21,57

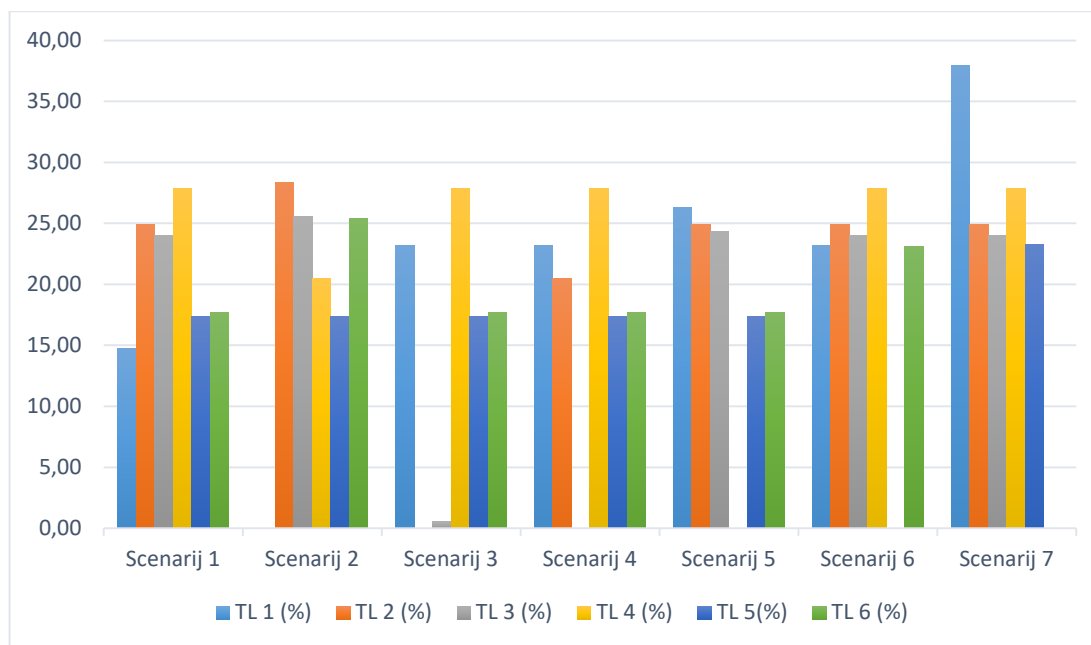
6.	Prekid voda 5	28,30	0,64	0,00	13,93	0,00	28,23
7.	Prekid voda 6	46,27	21,96	13,93	0,3	28,38	0,00

Tabela 2. Kumulativna opterećenja dalekovoda s priključenim VPP, FNE, TEKG i TE – prsten 1

Scenarij	DV 1 (MVA)	DV 2 (MVA)	DV 3 (MVA)	DV 4 (MVA)	DV 5 (MVA)	DV 6 (MVA)
1. Bilans snage	12,04	30,04	29,29	33,98	21,19	9,60
2. Prekid voda 1	0,00	30,04	29,29	25,04	21,19	9,60
3. Prekid voda 2	12,04	0,00	0,64	33,98	21,19	9,60
4. Prekid voda 3	12,04	25,00	0,00	33,98	21,19	9,60
5. Prekid voda 4	32,11	30,40	29,74	0,00	21,19	9,60
6. Prekid voda 5	12,04	30,40	29,29	33,98	0,00	28,23
7. Prekid voda 6	21,80	30,40	29,29	33,98	28,38	0,00

Tabela 3. Procentualna opterećenja dalekovoda s priključenim VPP, FNE, TEKG i TE – prsten 1

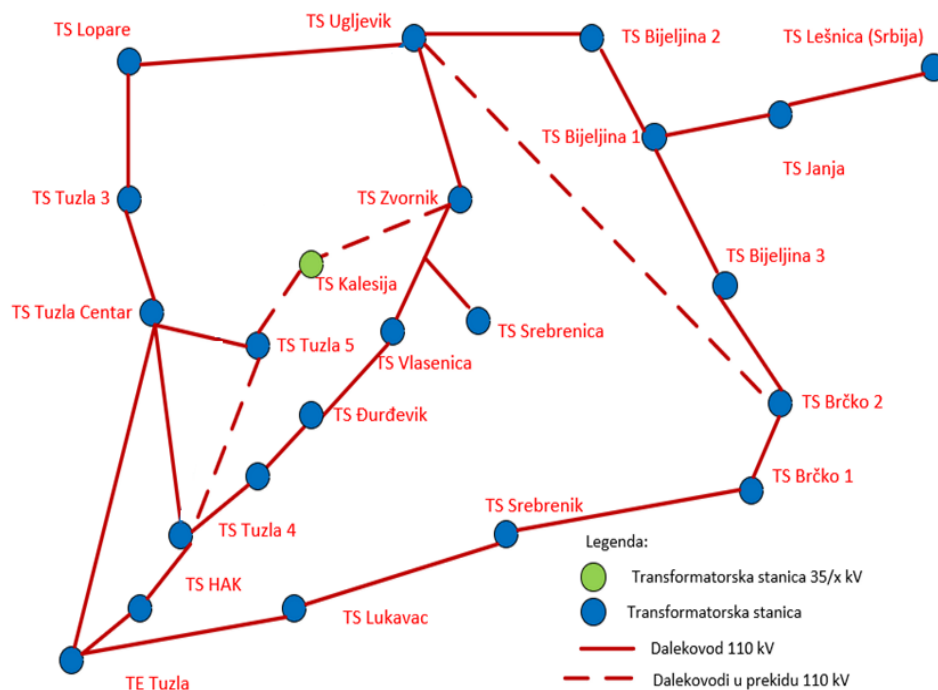
Scenarij	DV 1 (%)	DV 2 (%)	DV 3 (%)	DV 4 (%)	DV 5 (%)	DV 6 (%)
1. Bilans snage	14,75	24,92	24,01	27,86	17,37	17,68
2. Prekid voda 1	0,00	28,39	25,60	20,52	17,37	25,41
3. Prekid voda 2	23,20	0,00	0,52	27,86	17,37	17,68
4. Prekid voda 3	23,20	20,49	0,00	27,86	17,37	17,68
5. Prekid voda 4	26,32	24,92	24,38	0,00	17,37	17,68
6. Prekid voda 5	23,20	24,92	24,01	27,86	0,00	23,14
7. Prekid voda 6	37,93	24,92	24,01	27,86	23,26	0,00



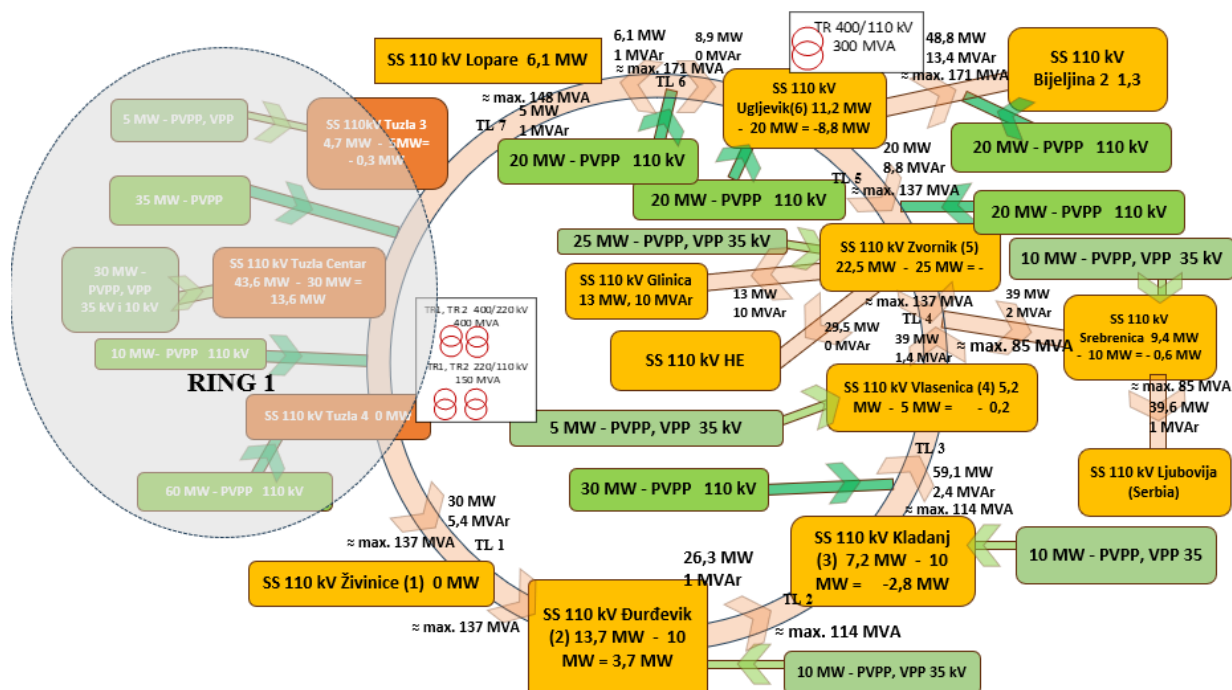
Slika 6. Procentualna opterećenja dalekovoda s priključenim VPP, FNE, TEK i TE – prsten 1

Različiti scenariji koji uključuju ispad dalekovoda izvedeni su za druge prstene u analiziranoj prenosnoj mreži sjeveroistočne Bosne. Na Slici 7, prikazan je energetska prsten 2 kojeg sačinjavaju sljedeće transformatorske stanice Ugljevik – Zvornik – Vlasenica – Kladanj – Đurđevik – Živinice – Tuzla Centar –

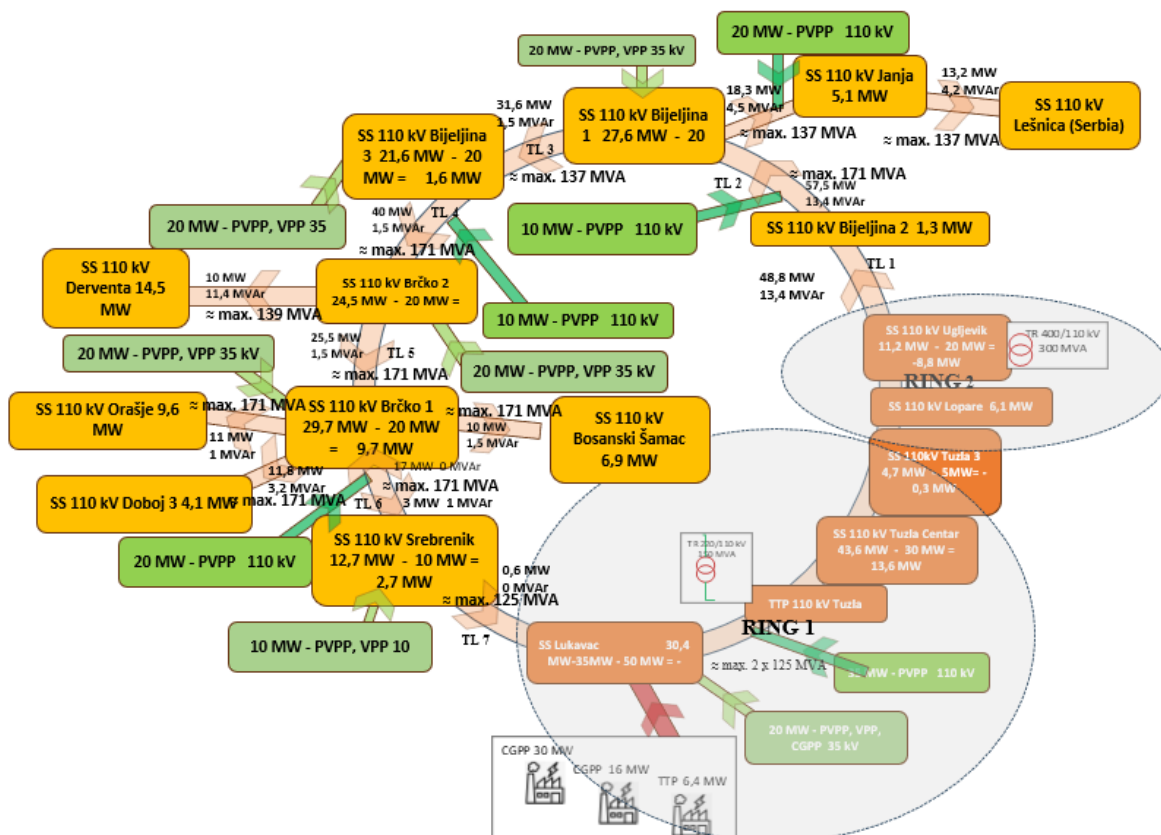
Tuzla 3 – Tuzla 4 – Lopare i energetska prsten 3 koji podrazumijeva transformatorske stanice Bijeljina 1 – Bijeljina 2 – Ugljevik – Lopare – Tuzla 3 – Tuzla Centar – Tuzla 4 – Lukavac – Srebrenik – Brčko 1 – Brčko 2 – Bijeljina 3. Sva tri razmatrana energetska prstena su međusobno povezana.



Slika 7. Energetska prsten 2 i 3



Slika 8. Bilans snage za energetski prsten 2 s priključenim VPP, FNE, TEKG i TE



Slika 9. Bilans snage za energetski prsten 3 s priključenim VPP, FNE, TEKG i TE

Rezultati analize daju iste zaključke kao u prikazanom slučaju za prsten 1. Bilans snaga za energetski prsten 2 i 3, kada su svi dalekovodi u pogonu, prikazani su na Slikama 8 i 9. Razmatrani

su slučajevi sa priključenim obnovljivim izvorima energije tipa fotonaponskih i virtualnih elektrana. Prilikom isključivanja svakog pojedinačnog dalekovoda i za ova dva energetska prstena

dobijaju se rezultati analogni prvom slučaju. Dalekovodi ostaju opterećeni ispod maksimalne snage.

Prema rezultatima izvedenih simulacija, raspoloživost prenosne mreže za nove proizvodne kapacitete, u slučaju ograničene proizvodnje iz TE Tuzla, iznosi 725 MW za regiju sjeveroistočne Bosne. S rastom potražnje za potrošnjom u budućnosti, pojavit će se proizvodni kapaciteti s ciljem proizvodnje dovoljne energije za krajnje korisnike. Tabela 4 prikazuje ukupne kapacitete proizvodnje energije za svaki analizirani energetska prsten i na naponskim nivoima prenosne mreže, kao i distributivne mreže u sjeveroistočnoj Bosni. Na osnovu prikazanih podataka, ova regija ima veliki potencijal za korištenje obnovljivih izvora energije za proizvodnju električne energije i grijanja. Svaki scenarij razmatra upravljivu konvencionalnu proizvodnu jedinicu za kontinuiranu proizvodnju električne energije. Rekonstrukcija i nadogradnja prenosne mreže mogla bi povećati dostupne kapacitete za proizvodnju električne energije iz fotonaponskih i virtualnih elektrana, uz smanjenje proizvodnje iz termoelektrane i rast potražnje. Da bi se to osiguralo, potrebno je da institucije što prije usvoje strategije za razvoj i instalaciju fotonaponskih i virtualnih elektrana, mini i srednjih vjetroelektrana i hidroelektrana te skladišnih sistema kako bi se osigurala sigurna, stabilna i kontinuirana opskrba svim krajnjim korisnicima. Sjeveroistočna Bosna ima sve potrebne resurse za samoodrživost.

Tabela 4. Mogućnosti prihvata proizvodnje električne energije iz FNE i VPP u Sjeveroistočnoj Bosni

Energetski prsten	Proizvodne jedinice u mreži 35/10/0,4 kV	Proizvodne jedinice u mreži 110 kV (MW)	Ukupno (MW)
1	80 MW	225 MW	305 MW
2	150 MW	90 MW	240 MW
3	100 MW	80 MW	180 MW
Ukupno moguća prihvatljiva proizvodnja (MW)			725

VII ZAKLJUČAK

Elektroenergetski sistem Bosne i Hercegovine uglavnom se oslanja na proizvodnju električne energije iz hidroelektrana i termoelektrana, izgrađen tokom druge polovice prošlog vijeka. Integracija obnovljivih izvora energije je nužna, ali nije jednostavan proces. Može se smatrati da, iako je u pitanju čista energija, takvi izvori energije uvode određeno onečišćenje u sistem, posebno u prijenosnu mrežu, u pogledu uslova napona, opterećenja vodova i stabilnosti sistema. Integracija obnovljivih izvora energije zahtijeva značajno uključivanje svih sudionika u procesu u smislu donošenja odgovarajućih planova i pravnih akata, odabira optimalnih rješenja, sve s ciljem sigurne i stabilne opskrbe električnom energijom krajnjih korisnika.

Analizirani model sistema ukazuje na značajnu mogućnost integracije obnovljivih izvora u sjeveroistočnoj Bosni poput fotonaponskih i virtualnih elektrana, uz određena ograničenja. Veća integracija obnovljivih izvora implicirala bi povećanje potrošnje u trenutačno podopterećenoj mreži, ali i zadržavanje određenog nivoa konvencionalnih proizvodnih jedinica ili skladišnih sistema koji bi osigurali stalnu dostavu električne

energije svim korisnicima. Nprekidna ulaganja u razvoj prijenosne mreže su nužna kako bi se tranzicija prema obnovljivim izvorima provela bez posljedica po stabilnost i sigurnost sistema.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Nielsen, S., Ostergaard, P.A., Sperling, K. Renewable energy transition, transmission system impacts and regional development: a mismatch between national planning and local development, Energy, Bol. 278, patr A, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127925>
- [2] Willis, L. Introduction to transmission and distribution networks: T&D infrastructure, reliability and engineering, regulation and planning, Woodhead Publishing Series in Energy, pp. 3-38, 2013. <https://doi.org/10.1533/9780857097378.1.3>
- [3] Farhoodnea, M., Mohamed, A., Shareef, H., Zayandehroodi, H. Power Quality Impact on Renewable Energy based Generators and Electric Vehicles on Distribution System, Procedia Technology, Vol. 11, pp. 11-17, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.156>
- [4] Elektroprijenos-Elektroprenos BiH a.d. Banja Luka. Istorija. <https://www.elprenos.ba/BS/IstorijaBS.aspx> [pistupljeno 21.12.2023]
- [5] Dugoročni plan razvoja prenosne mreže za period 2021-2030, Elektroprenos-Elektroprijenos BiH a.d. Banja Luka, 2021. <https://www.nosbih.ba/files/2021/03/20210311-lat-Dugorocni-plan-razvoja-prenosne-mreze-2021-2030-Knjiga-1.pdf> [pistupljeno 21.12.2023]
- [6] NOSBIH 2023. Indikativni plan razvoja proizvodnje za period 2024-2033. <https://www.nosbih.ba/files/2023/09/20230914-lat-Indikativni-plan-razvoja-proizvodnje-2024-2033.pdf> [pistupljeno 21.12.2023]
- [7] Žikić, S., Paunković, Dž., Jovanović, V., Stevanović, M. Obnovljivi izvori energije: ekonomski, ekološki i društveni doprinosi konceptu održivog razvoja, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 19, No. 3-4, pp. 225-231, 2017.
- [8] Albadi, M. Solar PV power intermitting and it's impacts on power system: an overview, The Journal of Engineering Research [TJER], Vol. 16, No. 2, pp. 142-150, 2019. <https://doi.org/10.24200/tjer.vol16iss2pp142-150>
- [9] Liang, X., Chai, H., Ravishankar, J. Analytical methods of voltage stability in renewable dominated power systems: a review, Electricity, Vol. 3, No. 1, pp 75-107, 2022. <https://doi.org/10.3390/electricity3010006>
- [10] Simović, V., Žerajić, M. Procena uticaja integracije solarnih elektrana na niskom i srednjem naponu na smanjenje vrednosti gubitaka aktivne snage u prenosnom sistemu, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 1, pp. 81-83, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.81S>
- [11] Pravilnik o priključku, Službeni glasnik BiH broj 95/08, 79/10, 60/12 i 83/17. https://www.elprenos.ba/Prikljucak/Pravilnik_o_prikljucku_23_10_2008_fi_nal_b.pdf [pistupljeno 28.12. 2023]
- [12] Mrežni kodeks, Službeni glasnik BiH broj 78/21. <http://sluzbenilist.ba/page/akt/wQj8ohz4nh78h77RUQpgo> [pistupljeno 28.12.2023]
- [13] Đuliman, A., Aganović, S., Kušljugić, M., Miljević, D. Integracija distribuiranih energetskih resursa, RESET, 2022. https://reset.ba/wp-content/uploads/2022/07/Integracija-distribuiranih-energetskih-resursa_II-1.pdf [pistupljeno 8.01.2023]
- [14] Registar podnijetih zahtjeva korisnika za priključak na prenosnu mrežu naponskog nivoa 110 kV, 220 kV i 400 kV, Elektroprenos-Elektroprijenos BiH a.d. Banja Luka, 2023. <https://www.elprenos.ba/Prikljucak/Registar%20pdnijetih%20zahtjeva%20a%20prikljucak%2022.12.15.pdf> [prisupljeno 28.12.2023]
- [15] Liu, J., Hu, H., Yu, S.S., Trinh, H. Virtual power plant with renewable energy sources and energy storage systems for sustainable power grid formation, control techniques and demand response, Energies, Vol. 16, No. 9, pp. 3705, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16093705>
- [16] Kehinde, K., Maryam, R.S., Faisa, O.H. Virtual power plant (VPP), concept and components to promote power system decentralisation, Global Scientific Journals, Vol. 9, No. 12, pp. 157-164, 2021. https://www.globalscientificjournal.com/researchpaper/VIRTUAL_POWER_PLANT_VPP_CONCEPT_AND_COMPONENTS_TO_PROMOTE_POWER_SYSTEM_DECENTRALISATION.pdf [prisupljeno 28.12.2023]
- [17] Roozbehani, M.M., Heydarian-Forushani, E., Hasanzadeh, S., Ben Elghali, S. Virtual Power Plant Operational Strategies: Model, Markets,

Optimization, Challenges and Opportunities, Sustainability, Vol. 14, No. 19, pp. 12486, 2022. <https://doi.org/10.3390/su141912486>

- [18] Nikonowicz, L., Milewski, J. Virtual Power Plants-general review: structure, application and optimization, Journal of Power Technologies, Vol. 92, No. 3, pp. 135-149, 2012.
https://www.researchgate.net/publication/255989307_Virtual_Power_Plants-general_review_structure_application_and_optimization [prisupljeno 28.12.2023]

AUTORI/AUTHORS

Mia Lešić Aganović - MA elektrotehnike, Elektroprijenos - Elektroprenos BiH a.d. Banja Luka, mia.lesic@elprenos.ba, ORCID

[0000-0002-2627-542X](https://orcid.org/0000-0002-2627-542X)

Mr. Sc. Mugdin Agić - dipl. ing. el., Elektroprijenos - Elektroprenos BiH a.d. Banja Luka, mugdin.agic@elprenos.ba, ORCID [0009-0009-4421-9067](https://orcid.org/0009-0009-4421-9067)

Dr. Sc. Majda Tešanović - vanr. prof., Univerzitet u Tuzli, Fakultet elektrotehnike, majda.tesanovic@untz.ba, ORCID [0000-0003-1510-8615](https://orcid.org/0000-0003-1510-8615)

Dr. Sc. Izudin Kapetanović - emeritus, Univerzitet u Tuzli, Fakultet elektrotehnike, izudin.kapetanovic@untz.ba

Dr. Sc. Tatjana Konjić - red. prof. Univerzitet u Tuzli, Fakultet elektrotehnike, tatjana.konjic@untz.ba, ORCID [0000-0002-6229-4548](https://orcid.org/0000-0002-6229-4548)

Impact Analysis of Renewable Energy Sources on Power System of North-eastern Bosnia

Abstract – Considering obligations imposed by the European Community, especially in terms of climate change, it is necessary to make a shift in the electricity production paradigm by reducing the share of conventional energy sources and increasing production from renewable sources. The electricity system of Bosnia and Herzegovina is mainly based on the production of electricity from thermal and hydro power plants. In the last decade, interest in investing in renewable energy sources has grown significantly. Aim of this paper is to point out the limitations and potential consequences that renewable energy sources can have on the power system, but also to propose solutions for more efficient integration of renewable energy sources into the power system using the model of virtual power plants by simulating different scenarios in the transmission network in the north-eastern part of Bosnia and Herzegovina using professional software.

Index Terms – Renewable energy resources, Virtual power plant, Energy transition, Transmission line load analysis

Stambena zajednica u ulozi kupca-proizvođača

Dunja Grujić*, Miloš Kuzman**

* Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, Bulevar umetnosti 12, Novi Beograd

** Udruženje za pravo energetike Srbije, Pjarona De Mondezira 30, Beograd

Rezime - Kupci-proizvođači su regulativom Republike Srbije prepoznati kao korisnici elektroenergetskog sistema i učesnici na tržištu električne energije od 2021. godine. Između ostalih, i domaćinstvima, kako u individualnim tako i u objektima kolektivnog stanovanja, data je mogućnost sticanja statusa kupca-proizvođača čime mogu ostvariti uštede u mesečnim troškovima za električnu energiju i doprineti smanjenju zagađenja životne sredine i usporavanju globalnog zagrevanja. U okviru ovog rada analizirane su stambene zajednice kao kupci-proizvođači. Opisan je način sticanja statusa kupca-proizvođača za stambene zajednice i to od ideje, preko regulisanja međusobnih odnosa članova stambene zajednice i zaključenja ugovora o snabdevanju do izgradnje i priključenja proizvodnog objekta na elektroenergetski sistem. Takođe, prikazan je i način obračuna električne energije za kupca-proizvođača koji je stambena zajednica. Na kraju rada dati su predlozi za dodatne uštede kupaca-proizvođača koji su stambene zajednice, kao i modeli za unapređenje njihovog statusa.

Gljučne reči - kupac-proizvođač, obnovljivi izvori energije, tržište električne energije, stambena zajednica

I UVOD

Poslednjih godina smo svedoci posledica globalnog zagrevanja i zagađenja životne sredine. To se naročito može osetiti tokom zimskog perioda, koji je iz godine u godinu sve topliji, uz prateće zagađenje vazduha. Kako bi se bar delom ublažile posledice dosadašnjeg zagađenja i delimično sprečilo buduće, zemlje Evrope i sveta ubrzano sprovode programe energetske tranzicije sa tradicionalnih fosilnih goriva na obnovljive izvore energije.

U Republici Srbiji oko 70% ukupne električne energije na godišnjem nivou proizvede se iz fosilnih izvora [1]. Kako bi se pomenuti procenat smanjio, odnosno povećao procenat proizvedene električne energije iz obnovljivih izvora energije, Republika Srbija je poslednjih godina izmenama i dopunama propisa dala brojne pogodnosti za priključenje proizvođača koji proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora energije i definisala nov model korišćenja obnovljivih izvora energije kroz institut kupca-proizvođača. Kupac-proizvođač u Republici Srbiji prepoznat je u izmenama i dopunama Zakona o energetici [2], Zakonu o korišćenju obnovljivih izvora energije [3], Zakonu o energetske efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije [4], Uredbi o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupca – proizvođača i snabdevača [5], Uredbi o uslovima isporuke i snabdevanja električnom energijom [6] i Pravilniku 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 [7]. Od uvođenja instituta kupca-proizvođača do kraja 2023. godine na elektroenergetski sistem priključeno je 2.611 kupaca-proizvođača, ukupne instalirane snage proizvodnih objekata 41.501 kW, od čega su samo dva kupca-proizvođača stambene zajednice snage 20 kW – dakle manje od 0,1% kupaca-proizvođača predstavljaju stambene zajednice [8].

U Republici Srbiji ukupan broj registrovanih stambenih zajednica je 54.270 [9]. Može se zaključiti da stambene zgrade, koje su pretežno koncentrisane u gradskim naseljima, u kojima je inače vazduh uglavnom zagađen, predstavljaju veliki, za sada neiskorišćen, potencijal za izgradnju proizvodnih objekata iz obnovljivih izvora energije (pre svega solarnih elektrana na krovovima). Samim tim stambene zgrade mogu postati sredstvo za povećanje udela obnovljivih izvora energije u energetske miks Republike Srbije i smanjenje zagađenja životne sredine.

S obzirom na navedeno u okviru ovog rada biće analiziran trenutni model priključenja i obračuna električne energije za kupce-proizvođače koji su stambene zajednice. Takođe, biće dat model za unapređenje njihovog položaja, kako bi se procenat stambenih zajednica koje su stekle status kupca-proizvođača, tj. izgradile zajednički proizvodni objekat iz obnovljivih izvora energije, značajno povećao.

II STAMBENE ZAJEDNICE

Zakonom o stanovanju i održavanju zgrada [10] stambena zgrada je definisana kao zgrada namenjena za stanovanje i koristi se za tu namenu, a sastoji se od najmanje tri stana. Stambene zgrade se sastoje od posebnih i zajedničkih delova. Posebni deo zgrade jeste posebna funkcionalna celina u zgradi koja može da predstavlja stan, poslovni prostor, garažu, garažno mesto ili garažni boks. Zajednički delovi zgrade su delovi zgrade koji služe za zajedničko korišćenje posebnih delova zgrade, kao što su: zajednički prostori (npr. stepenište, hodnik, tavanski prostor, podrum, zajednička terasa), zajednički građevinski elementi (npr. temelji, noseći zidovi i stubovi, fasade, krov, dimnjaci, svetlarnici), kao i zajedničke instalacije, oprema i uređaji (npr. unutrašnje električne instalacije, lift, gromobrani, svi komunalni priključci koji su namenjeni zajedničkom korišćenju).

Sticanjem prava svojine na posebnom delu zgrade stiče se i pravo svojine nad zajedničkim delovima zgrade, pravo učešća u upravljanju stambenom zajednicom i pravo susvojine na zemljištu na kome je zgrada izgrađena, odnosno zemljištu koje služi za redovnu upotrebu zgrade. Nad zajedničkim delovima vlasnici posebnih delova zgrade imaju pravo zajedničke nedeljive svojine.

Stambenu zajednicu čine svi vlasnici posebnih delova stambene, odnosno stambeno-poslovne zgrade. Stambena zajednica ima status pravnog lica, koji stiče trenutkom kada najmanje dva lica postanu vlasnici dva posebna dela. Da bi jedna stambena zajednica započela postupak sticanja statusa kupca-proizvođača neophodna je odluka skupštine stambene zajednice, odnosno saglasnost vlasnika posebnih delova stambene zgrade da se zajednički delovi stambene zgrade iskoriste za izgradnju zajedničkog proizvodnog objekta iz obnovljivih izvora energije. Za očekivati je da će za ove potrebe biti korišćeni krovovi kao najoptimalniji zajednički delovi za izgradnju solarne elektrane. Stoga je prethodno celishodno predstaviti osnovne zakonske odredbe koje se odnose na stambenu zajednicu. Stambena zajednica se upisuje u registar stambenih zajednica [9] i ima svoj matični broj, PIB i tekući račun. Njeni obavezni organi su skupština i upravnik. Članovi skupštine stambene zajednice koja bira i razrešava upravnika su svi vlasnici posebnih delova. Ova skupština, između ostalog, donosi program održavanja zajedničkih delova zgrade, donosi odluke o preduzimanju radova na zajedničkim delovima zgrade, raspolaganju zajedničkim delovima zgrade, unapređenju zajedničkih delova zgrade, kao i postavljanju, odnosno ugradnji stvari na zajedničkim delovima zgrade i zemljištu koje služi za redovnu upotrebu zgrade i visini naknade koju plaćaju vlasnici tih stvari. O raspolaganju zajedničkim delovima zgrade skupština stambene zajednice odlučuje na sednici skupštine većinom koju čine 2/3 ukupnog broja glasova. Kvorum za održavanje i rad sednice skupštine po pravilu čini obična većina od ukupnog broja glasova članova koji imaju pravo glasa po određenom pitanju. Kvorum za održavanje i rad ponovljene sednice po pravilu čini 1/3 ukupnog broja glasova članova.

Pored prednosti izgradnje solarnih elektrana na stambenim zgradama u smislu smanjenja zagađenja životne sredine i uštede u troškovima za električnu energiju za vlasnike posebnih delova koji učestvuju u izgradnji zajedničke solarne elektrane, treba imati u vidu da održivi razvoj stanovanja predstavlja javni interes. Održivi razvoj, između ostalog, podrazumeva i unapređenje energetske efikasnosti, smanjenje negativnih uticaja na životnu sredinu i racionalno korišćenje resursa, odnosno usklađivanje ekonomskog i socijalnog razvoja i zaštite životne sredine prilikom razvoja stambenog sektora, čemu izgradnja zajedničke solarne elektrane i sticanje statusa kupac-proizvođač može značajno doprineti.

III STATUS KUPAC-PROIZVOĐAČ

Kupac-proizvođač definisan je kao krajnji kupac koji je na unutrašnje instalacije priključio sopstveni objekat za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije, pri čemu se proizvedena električna energija koristi za snabdevanje sopstvene potrošnje, a višak proizvedene električne energije predaje u prenosni, distributivni, odnosno zatvoreni distributivni sistem. Kupac-proizvođač ima pravo da samostalno ili posredstvom agregatora proizvodi električnu energiju za sopstvenu potrošnju, skladišti električnu energiju za sopstvene potrebe, da višak proizvedene električne energije isporuči u prenosni, distributivni, odnosno zatvoreni distributivni sistem i druga prava i obaveze krajnjeg kupca [2, 3, 5].

Po pitanju priključenja, prava i obaveza kupci-proizvođači se dele na domaćinstva, stambene zajednice i ostale [3, 5]. Kupac-

proizvođač je korisnik sistema i učesnik na tržištu te ima obavezu uređenja pristupa sistemu i balansne odgovornosti [2]. Svi kupci-proizvođači sa izabranim snabdevačem zaključuju ugovore o potpunom snabdevanju. Kupci-proizvođači koji su domaćinstva ili stambene zajednice zaključuju ugovore o potpunom snabdevanju sa neto merenjem, a ostali ugovore o potpunom snabdevanju sa neto obračunom [3, 5]. Dakle, obavezu uređenja pristupa sistemu i balansne odgovornosti za mesta primopredaje električne energije kupca-proizvođača preuzima snabdevač koji ga snabdeva [2]. Kupac-proizvođač nema pravo da koristi podsticajne mere u vidu tržišne premije i *fid-in* tarife, niti može imati pravo na garancije porekla [3].

U okviru ovog rada biće analizirani samo kupci-proizvođači koji su stambene zajednice.

3.1 Merno mesto kupca-proizvođača

Mesto razgraničenja odgovornosti za isporučenu električnu energiju između operatora sistema i korisnika sistema je mesto na kome se graniče instalacije objekta korisnika sistema i operatora sistema, a ujedno je to i tačka na kojoj se nalazi mesto primopredaje električne energije [6]. Svaki krajnji kupac za svoju instalaciju ima zasebno merenje preuzete električne energije iz prenosnog, distributivnog, odnosno zatvorenog distributivnog sistema. Za objekat koji u svom sastavu ima stanove ili poslovne prostore, koji se priključuje na distributivni sistem, isporučena električna energija se meri jednim posebnim mernim uređajem za svaki stan ili poslovni prostor, osim u slučaju kada se za određene uređaje u stanu ili poslovnom prostoru izvodi posebna instalacija preko koje operator distributivnog sistema može da upravlja potrošnjom, pa se isporučena električna energija u tom slučaju meri preko posebnog mernog uređaja [6]. Dakle, u okviru stambene zajednice tipično postoji merno mesto zajedničke potrošnje (npr. za lift i osvetljenje), pri čemu svaka stambena jedinica ima svoje zasebno merno mesto.

Krajnji kupci koji nisu stambene zajednice u postupku sticanja statusa kupca-proizvođača grade sopstveni proizvodni objekat iz obnovljivih izvora energije i priključuju ga na svoje unutrašnje instalacije pri čemu se postojeće merno mesto adaptira tako što se, između ostalog, merni uređaj koji meri samo preuzimanje iz prenosnog, distributivnog, odnosno zatvorenog distributivnog sistema menja dvosmernim mernim uređajem [5, 11] koji meri i preuzimanje i isporuku električne energije. Sa druge strane, u postupku sticanja statusa kupca-proizvođača stambena zajednica na zajedničkim delovima stambene zgrade gradi proizvodni objekat iz obnovljivih izvora energije koji je u vlasništvu stambene zajednice i koji se priključuje, preko novog ili posebnog mernog mesta u sastavu postojećeg priključka, opremljenog dvosmernim mernim uređajem [11], direktno na distributivni elektroenergetski sistem [3, 5].

3.2 Proizvodni objekat kupca-proizvođača

Proizvodni objekat kupca-proizvođača može biti bilo koji objekat za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora energije. Očekivano je da se kupci-proizvođači opredeljuju za solarnu elektranu kao proizvodni objekat zbog relativno niske vrednosti investicije, jednostavne tehnologije i minimalnih potreba za održavanjem. U prilog tome govori i činjenica da su se upravo za solarnu elektranu opredelili svi kupci-proizvođači priključeni na

distributivni sistem do kraja 2023. godine, uključujući i stambene zajednice [8]. S obzirom na prethodno navedeno u okviru ovog rada analiziran je kupac-proizvođač čiji je proizvodni objekat solarna elektrana.

Prema važećoj regulativi instalisana snaga solarne elektrane kupca-proizvođača jednaka je instalisanoj snazi invertora, u kW, pri $\cos \varphi = 1$, kada je nazivna snaga invertora manja ili jednaka zbiru instalisanih snaga fotonaponskih panela ili zbir instalisanih snaga fotonaponskih panela, kada je nazivna snaga invertora, veća od zbira instalisanih snaga fotonaponskih panela. Instalirana snaga ostalih tipova proizvodnih objekata iz obnovljivih izvora energije jednaka je nominalnoj snazi instaliranih generatora [5]. Instalirana snaga proizvodnog objekta iz obnovljivih izvora energije kupca-proizvođača koji nije stambena zajednica ne može biti veća od odobrene snage priključka krajnjeg kupca [3, 5]. Takođe, ne može biti veća od ekvivalentne snage koja odgovara struji od 10A, ako priključak na sistem nije trofazni, 10,8 kW ako je kupac - proizvođač domaćinstvo, odnosno 150 kW ako kupac - proizvođač nije domaćinstvo [3].

Maksimalna vrednost instalirane snage proizvodnog objekta iz obnovljivih izvora energije stambene zajednice se određuje kao jednovremena snaga mernih mesta za zajedničku potrošnju električne energije i pojedinačnih članova koji grade zajednički proizvodni objekat iz obnovljivih izvora energije u okviru stambene zajednice [3, 5]. Dve ili više stambenih zajednica ne mogu koristiti isti proizvodni objekat, niti merno mesto može biti uključeno u dve ili više stambenih zajednica [5].

3.3 Ugovor o snabdevanju članova stambene zajednice u postupku sticanja statusa kupca-proizvođača

Pojedinačni članovi stambene zajednice koji učestvuju u izgradnji zajedničkog proizvodnog objekta iz obnovljivih izvora međusobne odnose uređuju ugovorom koji naročito sadrži plan raspodele proizvedene električne energije između članova i podatke upravnika, odnosno profesionalnog upravnika stambene zajednice. Ugovorom se definiše koji deo proizvodnje zajedničkog proizvodnog objekta pripada zajedničkoj potrošnji (nije obavezno ali može doneti značajne uštede svim članovima stambene zajednice), a koji sopstvenoj potrošnji pojedinačnih članova stambene zajednice koji su učestvovali u izgradnji zajedničkog proizvodnog objekta iz obnovljivih izvora. Ugovor se dostavlja snabdevaču prilikom zaključenja ugovora o potpunom snabdevanju u cilju definisanja načina obračuna. Nema zakonskog ograničenja u pogledu izmena ugovora između članova stambene zajednice, a upravnik, odnosno profesionalni upravnik, o svakoj promeni ugovora blagovremeno obaveštava snabdevača koji je dužan da izmeni način obračuna pojedinačnim članovima stambene zajednice [5].

U postupku sticanja statusa kupca-proizvođača članovi iste stambene zajednice koji grade zajednički proizvodni objekat iz obnovljivih izvora energije zaključuju, sa istim snabdevačem, ugovor o potpunom snabdevanju sa neto merenjem, i to pojedinačno za svakog člana stambene zajednice koji gradi zajednički proizvodni objekat. Dakle, pre sticanja statusa kupca-proizvođača i pre početka snabdevanja snabdevač je u obavezi da uredi pristup sistemu i balansnu odgovornost za merno mesto svakog člana stambene zajednice koji gradi zajednički proizvodni

objekat, za merno mesto zajedničke potrošnje (ukoliko učestvuje u raspodeli proizvedene električne energije), kao i za merno mesto preko kog je priključen proizvodni objekat [5].

Ugovor o pristupu distributivnom sistemu snabdevač zaključuje sa operatorom distributivnog sistema, jer se stambene zgrade zbog svoje snage ne priključuju na prenosni sistem, a takođe ni u okviru zatvorenog distributivnog sistema po pravilu ne postoje domaćinstva. Balansnu odgovornost snabdevač reguliše ugovorom sa operatorom prenosnog sistema kao balansno odgovorna strana ili prenosom balansne odgovornosti na drugu balansno odgovornu stranu [2,12]. Krajnji kupci koji nisu učestvovali u izgradnji zajedničkog proizvodnog objekta iz obnovljivih izvora mogu proizvoljno birati snabdevača za sopstvenu potrošnju električne energije [2].

IV PRIKLJUČENJE PROIZVODNOG OBJEKTA KUPCA-PROIZVOĐAČA KOJI JE STAMBENA ZAJEDNICA

Priključenje proizvodnog objekta kupca-proizvođača koji je stambena zajednica vrši se u skladu sa važećom regulativom [2, 3, 4, 5, 13, 14]. Stambena zajednica operatoru distributivnog sistema podnosi zahtev za izdavanje odobrenja za priključenje proizvodnog objekta. Nakon dobijanja odobrenja za priključenje stambena zajednica sa operatorom distributivnog sistema zaključuje ugovor o pružanju usluge za priključenje i gradi proizvodni objekat u skladu sa odobrenjem za priključenje. Pored navedenog, stambena zajednica je dužna da ispuni obaveze iz ugovora o pružanju usluge za priključenje i da zaključi ugovor o potpunom snabdevanju električnom energijom sa neto merenjem kako je opisano u poglavlju 3.3 ovog rada. Po ispunjenju svih uslova operator distributivnog sistema izvršiće priključenje proizvodnog objekta na distributivni elektroenergetski sistem i stambena zajednica može steći status kupca-proizvođača [14].

V OBRAČUN ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA KUPCA-PROIZVOĐAČA KOJI JE STAMBENA ZAJEDNICA

Obračun električne energije za kupca-proizvođača koji je stambena zajednica vrši se putem neto merenja [3, 5].

Neto električna energija predstavlja razliku ukupne preuzete i ukupne isporučene električne energije kupca-proizvođača u prenosni, distributivni, odnosno zatvoreni distributivni sistem u toku jednog meseca, utvrđene u kWh na osnovu očitavanja brojala električne energije koja ispunjavaju propisane metrološke zahteve. Neto merenje je način obračuna neto električne energije, pri kome se viškom isporučene električne energije, u toku jednog meseca, umanjuje neto količina električne energije u toku narednog meseca u toku perioda za poravnanje potraživanja između kupca-proizvođača i snabdevača koji je jedna godina i završava se 1. aprila. Kupac-proizvođač nema pravo na potraživanja za količinu isporučene električne energije koja je veća od količine preuzete električne energije u periodu za poravnanje potraživanja [3, 5]. Dakle, ukoliko nakon 01. aprila ostane višak električne energije koji bi se preneo u naredni mesec, kupac-proizvođač ga predaje snabdevaču bez naknade tj. višak se poništava, a računanje neto električne energije i viška kreće ispočetka. Višak, kao i neto električna energija, se obračunavaju po vremenima trajanja tarifa tj. odvojeno za višu i nižu tarifu u slučaju dvotarifnog obračuna [3, 5, 15].

S obzirom na to da su članovi stambene zajednice koji zaključuju ugovore o snabdevanju većinski domaćinstva, a merno mesto zajedničke potrošnje koje je u vlasništvu stambene zajednice gotovo sigurno ispunjava uslove za sticanje statusa malog kupca¹ pretpostavka je da će većini stambenih zajednica snabdevač biti garantovani snabdevač [2]. Pravo na garantovano snabdevanje, po regulisanim cenama koje su značajno niže od tržišnih, imaju domaćinstva i mali kupci [2, 15, 16, 17].

5.1 Obračun električne energije za kupce-proizvođače koji su stambene zajednice

Kako je ranije navedeno sva domaćinstva koja zajednički grade solarnu elektranu, kao i zajednička potrošnja, zadržavaju posebne postojeće merne uređaje, a solarna elektrana se priključuje direktno na distributivni sistem. Fizički se u okviru stambene zajednice električna energija za potrošnju preuzima iz distributivnog sistema, a ukupna proizvedena električna energija isporučuje u distributivni sistem. Dakle, za svako pojedinačno merno mesto za svaki obračunski period, proračun neto električne energije, viška i električne energije za obračun se vrši samo računski.

S obzirom na to da stambene zajednice sa snabdevačem zaključuju ugovore o potpunom snabdevanju sa neto merenjem, snabdevač uređuje pristup sistemu za mesta primopredaje stambene zajednice koja je kupac-proizvođač. Obračun naknade za pristup distributivnom sistemu operator distributivnog sistema obračunava snabdevaču pojedinačno za svako merno mesto domaćinstava koja su učestvovala u izgradnji zajedničkog proizvodnog objekta, kao i za merno mesto zajedničke potrošnje [2, 3, 5]. S obzirom na to da i domaćinstva i zajednička potrošnja pripadaju kategoriji korisnika sistema "široka potrošnja" operator distributivnog sistema snabdevaču za kupca-proizvođača koji je stambena zajednica za pojedinačna merna mesta obračunava pristup distributivnom sistemu samo za ukupnu aktivnu električnu energiju preuzetu iz distributivnog sistema i odobrenu snagu [2, 15, 18].

Za zajedničku potrošnju stambene zajednice i domaćinstva koja učestvuju u izgradnji zajedničkog proizvodnog objekta, od strane snabdevača obračunava se neto električna energija, pristup distributivnom sistemu za celokupnu preuzetu električnu energiju i odobrenu snagu (operator distributivnog sistema snabdevaču obračuna naknadu, a potom taj trošak snabdevač obračuna kupcu-proizvođaču), naknada za unapređenje energetske efikasnosti, naknada za podsticaj povlašćenih proizvođača, akciza za ukupnu utrošenu električnu energiju (ukupnu električnu energiju preuzetu iz distributivnog sistema), PDV na celokupan iznos računa [2, 5, 6, 15, 16, 17, 18, 19, 20].

5.2 Optimalna instalisana snaga zajedničke solarne elektrane kupca-proizvođača koji je stambena zajednica

S obzirom na prethodno navedeno, optimalna instalisana snaga proizvodnog objekta kupca-proizvođača koji je stambena

zajednica je ona kojom se može na godišnjem nivou proizvesti onoliko električne energije kolika je potrošnja svih članova stambene zajednice koji učestvuju u izgradnji zajedničkog proizvodnog objekta i zajedničke potrošnje u višoj tarifi. U tom slučaju stambena zajednica neće predavati snabdevaču električnu energiju bez naknade nakon isteka godišnjeg perioda za poravnanje potraživanja. Ukoliko se izgradi proizvodni objekat veće instalisane snage investicija će biti veća od potrebne i električna energija će se isporučivati snabdevaču bez naknade, što značajno može produžiti period povrata investicije.

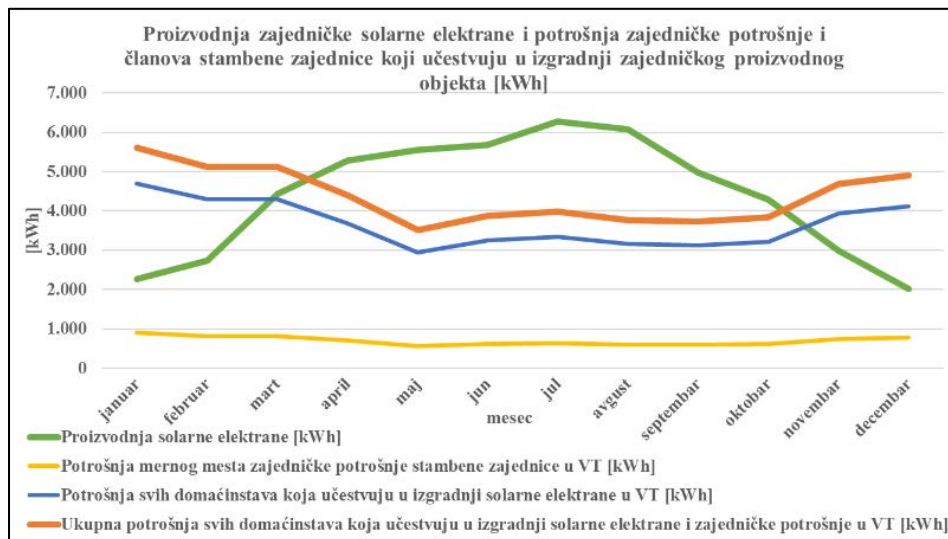
VI PRIMER OBRAČUNA ELEKTRIČNE ENERGIJE ZA KUPCA-PROIZVOĐAČA KOJI JE STAMBENA ZAJEDNICA

U okviru ovog rada analiziran je način obračuna električne energije za kupca-proizvođača koji je stambena zajednica u okviru koje više članova zajednice grade zajedničku solarnu elektranu. Kako bi se prikazao način određivanja optimalne snage solarne elektrane i uštede koje članovima stambene zajednice donosi izgradnja solarne elektrane, analizirana je stambena zajednica koja u svom sastavu ima 20 posebnih stambenih jedinica i zajedničku potrošnju. Pretpostavljeno je da u okviru stambene zajednice 15 stanova učestvuje u izgradnji zajedničke solarne elektrane, a 5 ne. Takođe, raspodela proizvedene električne energije se vrši i na zajedničku potrošnju. Usvojeno je da svaki od stanova troši prosečno 350 kWh na mesečnom nivou (4.200 kWh godišnje), a zajednička potrošnja 1.000 kWh (12.000 kWh godišnje), pri čemu se 70% električne energije potroši u višoj tarifi, 30% u nižoj. Dakle, zajednička potrošnja i članovi stambene zajednice koji učestvuju u izgradnji proizvodnog objekta u višoj tarifi potroše na godišnjem nivou $(15 \cdot 350 + 1.000) \cdot 12 \cdot 0,7$ tj. 52.500 kWh.

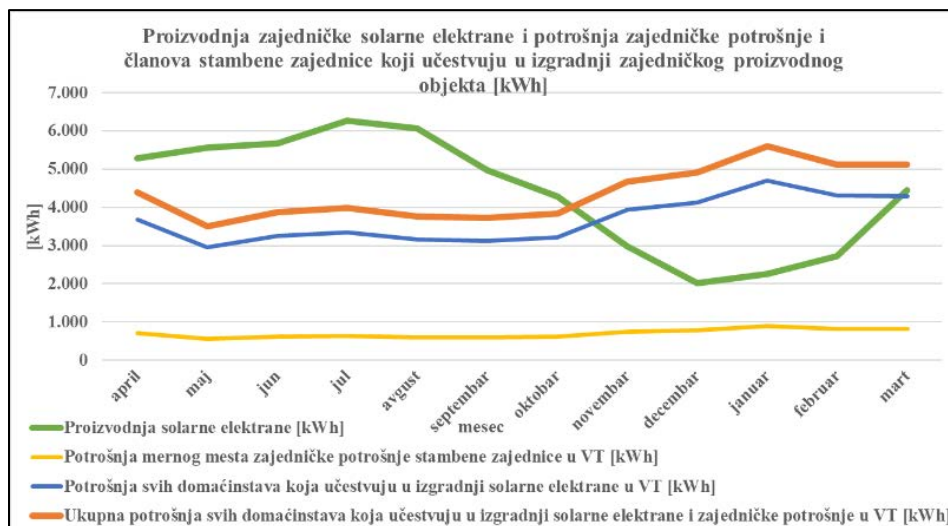
Navedenu količinu električne energije proizvede solarna elektrana snage 44 kW što je i optimalna snaga za posmatranu stambenu zajednicu kako je ranije objašnjeno u poglavlju 5.2. Optimalna snaga solarne elektrane, kao i njena satna proizvodnja na godišnjem nivou, određena je korišćenjem online baze podataka softverskog paketa PVGIS [21]. Na osnovu preuzetih podataka proizvodnja predmetne elektrane je 52.543 kWh na godišnjem nivou većinski u vreme trajanja više tarife. Za potrebe ovog rada usvojeno je da je celokupna proizvodnja u višoj tarifi. Pretpostavljeno je da je raspodela ukupne godišnje potrošnje električne energije po mesecima i za domaćinstva i za zajedničku potrošnju odgovara opterećenju distributivnog sistema [22].

Sa slike 1 može se uočiti da ukupna potrošnja domaćinstava koja učestvuju u izgradnji solarne elektrane i zajedničke potrošnje stambene zajednice u višoj tarifi nije usaglašena sa proizvodnjom solarne elektrane. Opisano je očekivano s obzirom na to da je potrošnja prosečnih domaćinstava u letnjim periodima kada solarna elektrana više proizvodi manja i obrnuto. Upravo zbog toga je određen period poravnanja od 01. aprila do 31. marta naredne godine, jer je april prvi mesec u godini u kom je proizvodnja solarne elektrane optimalne snage veća od potrošnje tako da višak počinje da se akumulira. Istovetna situacija je tipična za mesece sve do oktobra u kom potrošnja postaje veća od proizvodnje i višak počinje da se troši. Opisano je prikazano na slici 2. U posmatranom slučaju višak koji se predaje snabdevaču bez naknade je svega 43 kWh.

¹ Mali kupci električne energije su krajnji kupci (pravna lica i preduzetnici) koji imaju manje od 50 zaposlenih, ukupan godišnji prihod u iznosu do 10 miliona € u dinarskoj protivvrednosti, čiji su svi objekti priključeni na distributivni sistem električne energije napona nižeg od 1 kV i čija je potrošnja električne energije u prethodnoj kalendarskoj godini do 30.000 kWh [2].



Slika 1. Proizvodnja zajedničke solarne elektrane i potrošnja zajedničke potrošnje i članova stambene zajednice koji učestvuju u izgradnji zajedničkog proizvodnog objekta [kWh]



Slika 2. Proizvodnja zajedničke solarne elektrane i potrošnja zajedničke potrošnje i članova stambene zajednice koji učestvuju u izgradnji zajedničkog proizvodnog objekta u periodu poravnanja potraživanja [kWh]

Ukoliko se pretpostavi da je svih 15 domaćinstava investiralo isto u izgradnju solarne elektrane opravdano je pretpostaviti da je ugovorom između članova stambene zajednice ugovoreno da se proizvedena električna energija deli srazmerno potrošnji električne energije i broju članova koji grade zajedničku solaru elektranu. S obzirom na pretpostavljenu godišnju potrošnju zajedničke potrošnje u višoj tarifi od $1.000 \cdot 12 \cdot 0,7$, što je 8.400 kWh, i domaćinstava koja grade zajednički proizvodni objekat $15 \cdot 350 \cdot 12 \cdot 0,7$, odnosno 44.100 kWh pretpostavka da je ugovorom definisano da 16% ukupne proizvodnje elektrane bude opredeljeno za zajedničku potrošnju, a 84% za domaćinstva, odnosno 5,6% po domaćinstvu.

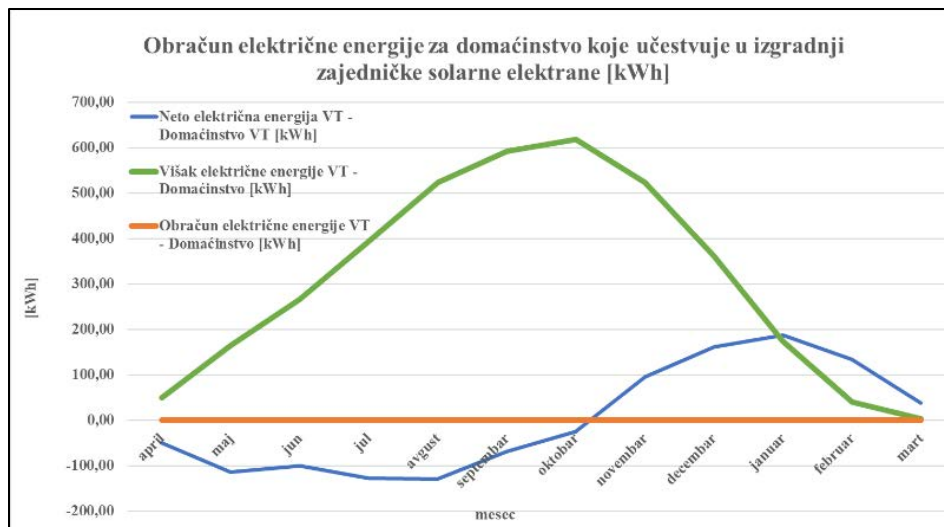
Imajući u vidu prethodno navedeno urađen je obračun neto električne energije, viška i obračunate električne energije po principu neto merenja za jedno domaćinstvo koje učestvuje u izgradnji solarne elektrane, kao i za zajedničku potrošnju. Rezultati su prikazani na slikama 3 i 4. Detaljan opis obračuna putem neto

merenja za pojedinačna domaćinstva može se pronaći u [23].

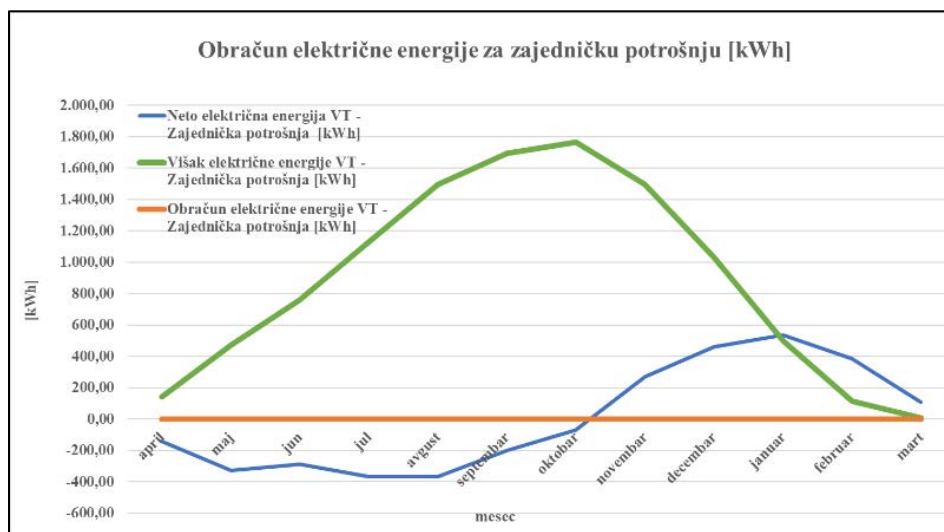
Može se primetiti da će, uz ranije usvojene pretpostavke, obračun električne energije u toku cele godine u višoj tarifi za zajedničku potrošnju i domaćinstva koja učestvuju u izgradnji zajedničke solarne elektrane biti 0 kWh. Već u aprilu, u prvom mesecu perioda za poravnanje potraživanja, neto električna energija je negativna, odnosno kupac-proizvođač počinje da akumulira višak električne energije pri čemu mu se obračunava 0 kWh. Ista situacija je sve do oktobra, kada neto električna energija postaje pozitivna. I dalje mu se obračunava 0 kWh, ali se višak smanjuje, jer potrošnju u zimskim mesecima kompenzuje viškom koji je akumuliran tokom letnjih meseci. Prethodno izneto se odnosi samo na troškove električne energije preuzete od snabdevača. U nastavku će detaljno biti prikazan trenutni način kompletnog obračuna električne energije za kupce-proizvođače koji su stambene zajednice opisan u poglavlju V kao i uštede kupaca-proizvođača u odnosu na krajnje kupce. Treba imati u vidu da u

nižoj tarifi ni domaćinstva ni zajednička potrošnja ne mogu imati nikakve uštede jer je usvojena pretpostavka (na osnovu realnih parametara proizvodnje solarne elektrane) da solarna elektrana

proizvodi električnu energiju isključivo u višoj tarifi, tj. u toku dana. Upravo navedeno je uzrok načina određivanja optimalne instalisane snage solarne elektrane opisanog u poglavlju 5.2.



Slika 3. Neto električna energija, višak i obračun električne energije za jedno domaćinstvo koje učestvuje u izgradnji zajedničke solarne elektrane stambene zajednice [kWh]



Slika 4. Neto električna energija, višak i obračun električne energije za zajedničku potrošnju stambene zajednice [kWh]

VII UŠTEDE ČLANOVA STAMBENE ZAJEDNICE NAKON STICANJA STATUSA KUPCA-PROIZVOĐAČA

Kako bi se analizirale uštede članova stambene zajednice nakon sticanja statusa kupac-proizvođač prvo će biti prikazan proračun troškova članova stambene zajednice kao krajnjih kupaca. U posmatranom primeru članovi su 20 stanova i jedno merno mesto zajedničke potrošnje. Pretpostavljeno je da se troškovi zajedničke potrošnje dele na 20 jednakih delova (isti deo svaki stan). Usvojeno je da je snabdevač stambene zajednice garantovani snabdevač. Svi troškovi izračunati su po važećim cenama pristupa distributivnom sistemu [18] i garantovanog snabdevanja [16].

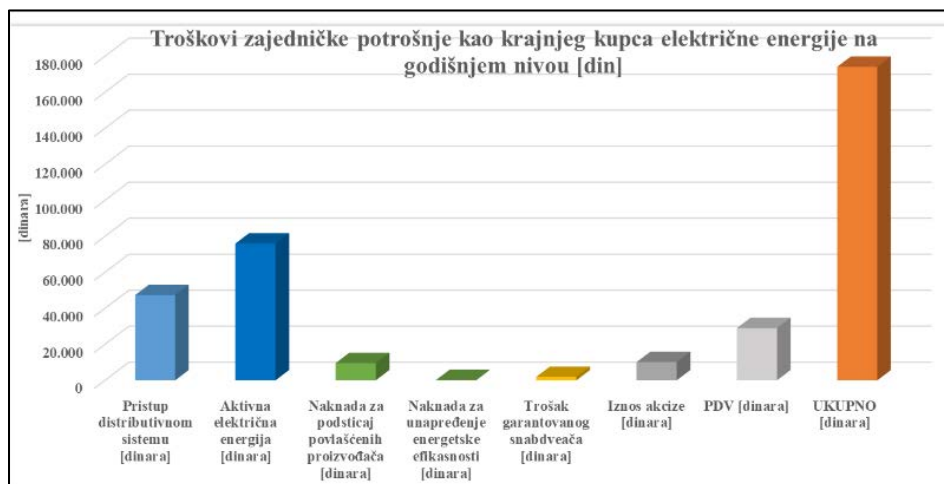
Iako su u ceni garantovanog snabdevanja već uračunati troškovi pristupa distributivnom sistemu [16, 17] za analize u okviru ovog

poglavlja od troškova garantovanog snabdevanja oduzeti su troškovi pristupa distributivnom sistemu i prikazani zasebno. Na opisan način jasnije se vidi koliki su troškovi svake pojedinačne stavke i kolike su uštede nakon sticanja statusa kupac-proizvođač.

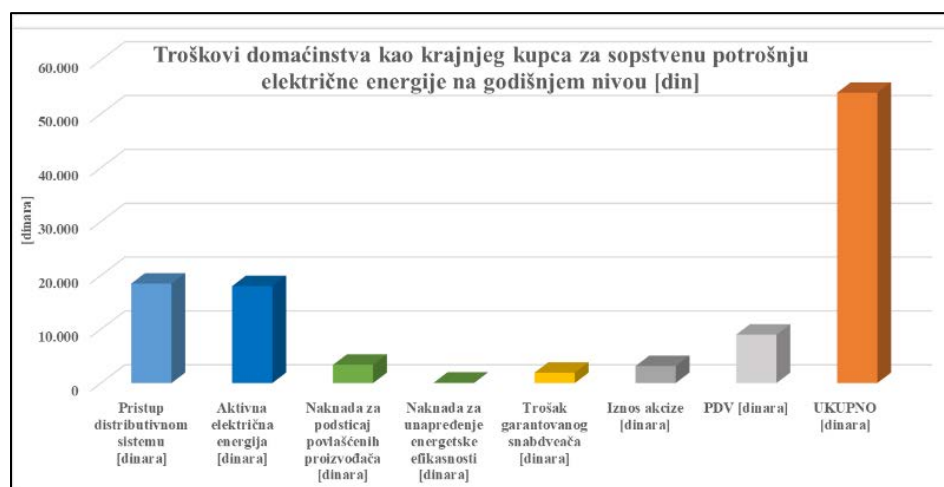
7.1 Troškovi članova stambene zajednice kao krajnjih kupaca

Zajednička potrošnja pripada kategoriji korisnika sistema „široka potrošnja“, grupa po nameni „javna i zajednička potrošnja“ [15]. Pretpostavljeno je da je snaga zajedničke potrošnje, kao i svakog pojedinačnog stana, 17,25 kW. Ukupni troškovi za električnu energiju po stavkama za zajedničku potrošnju stambene zajednice na godišnjem nivou prikazani su na slici 5. Oni ukupno iznose 174.142 RSD, odnosno približno 8.700 RSD po stanu. Stanovi pripadaju kategoriji korisnika sistema „široka potrošnja“, grupa po nameni „domaćinstvo“ [15]. Ukupni troškovi za

električnu energiju po stavkama za jedan stan na godišnjem nivou prikazani su na slici 6. Oni iznose 53.937 RSD po stanu.



Slika 5. Troškovi zajedničke potrošnje kao krajnjeg kupca za električnu energiju po stavkama na godišnjem nivou [din]



Slika 6. Troškovi za električnu energiju za jedno domaćinstvo po stavkama na godišnjem nivou [din]

7.2 Troškovi zajedničke potrošnje nakon sticanja statusa kupac-proizvođač

Nakon sticanja statusa kupac-proizvođač troškovi pristupa sistemu ostaju nepromenjeni kao i naknade za unapređenje energetske efikasnosti i naknade za podsticaj povlašćenih proizvođača jer se i dalje sva električna energija potrebna za potrošnju zajedničke potrošnje i domaćinstava preuzima iz distributivnog sistema. Međutim, značajno je smanjenje troškova na aktivnoj električnoj energiji, a posledično i na PDV upravo zbog modela neto merenja koje je trenutno na snazi u Republici Srbiji [2, 3, 5, 23]. Na slikama 7 i 8 prikazan je odnos troškova po stavkama na godišnjem nivou za zajedničku potrošnju i domaćinstvo koje je učestvovalo u izgradnji zajedničkog proizvodnog objekta, respektivno, pre i nakon sticanja statusa kupca-proizvođača koji je stambena zajednica.

Ukupni troškovi na godišnjem nivou za zajedničku potrošnju nakon sticanja statusa kupac-proizvođač su 88.694 RSD, odnosno 4.435 RSD po stanu, što je za 49% manje u odnosu na troškove za zajedničku potrošnju pre sticanja statusa. Dakle, svih

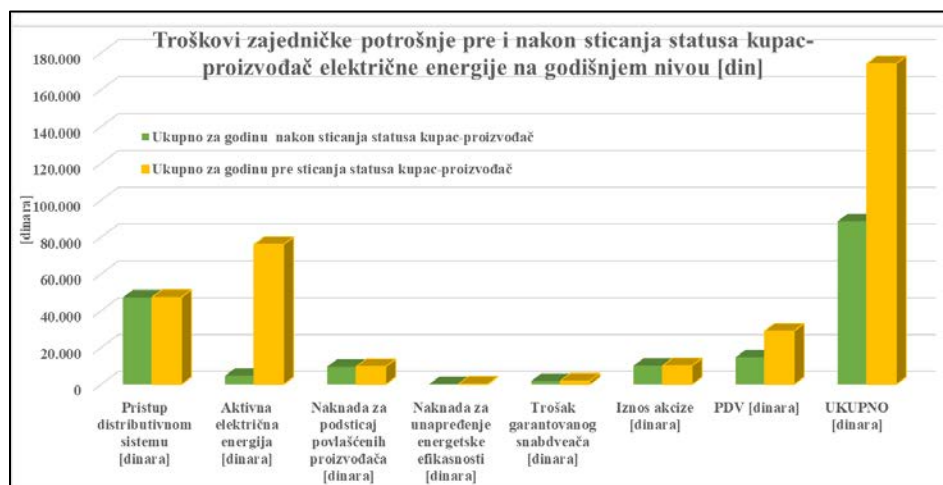
20 stanova, bez obzira da li su učestvovali u izgradnji solarne elektrane ili ne imaće umanjeње troškova za 4.272 RSD na godišnjem nivou za troškove zajedničke potrošnje. Ovo se može smatrati malom nadoknadom vlasnicima posebnih delova koji nisu želeli da učestvuju u izgradnji zajedničke solarne elektrane ali su dali saglasnost da se za izgradnju solarne elektrane koristi zajednički krov. Troškovi na godišnjem nivou za sopstvenu potrošnju električne energije domaćinstava koja su učestvovala u izgradnji zajedničke solarne elektrane nakon sticanja statusa kupca-proizvođača su 34.326 RSD, što je ušteda od 19.611 RSD na godišnjem nivou, odnosno troškovi su za 36% manji nego pre sticanja statusa. Pomenute uštede nemaju domaćinstva koja nisu učestvovala u izgradnji solarne elektrane.

7.3 Period povrata investicije za solarnu elektranu

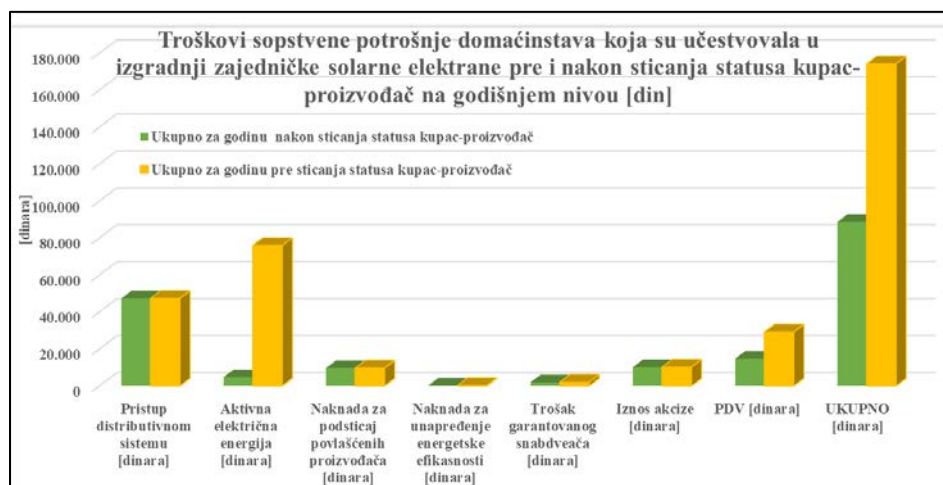
Imajući u vidu da su uštede sa trenutnim cenama električne energije na godišnjem nivou 19.611 RSD po domaćinstvu i 4.272 RSD po domaćinstvu na godišnjem nivou za zajedničku potrošnju, može se zaključiti da su ukupne uštede jednake $4.272 \cdot 15 + 19.611 \cdot 15$, odnosno 358.245 RSD godišnje. Ukoliko

pretpostavimo da je visina investicije okvirno 44.000 € tj. 5.170.000 RSD (pri kursu od 117,5 RSD/€) može se zaključiti da je period otplate oko 14,5 godina što je značajno dug period. Ukoliko bi se posmatralo samo jedno domaćinstvo period otplate bi bio identičan jer su domaćinstva srazmerno investiciji (polazna pretpostavka je da je svako domaćinstvo identično investiralo) ugovorom odredila raspodelu proizvedene električne energije.

Nakon perioda povrata investicije, a do isteka životnog veka solarne elektrane (očekivani životni vek solarne elektrane je oko 25 godina) sve uštede predstavljaju dobit za domaćinstva koja su investirala u zajedničku solarnu elektranu. U posmatranom konkretnom slučaju to je period od 10,5 godina, pri čemu je iznos ušteda u tom periodu oko 3,8 miliona RSD, odnosno oko 250 hiljada RSD po domaćinstvu.



Slika 7. Troškovi za električnu energiju za zajedničku potrošnju po stavkama na godišnjem nivou pre i nakon sticanja statusa kupac-proizvođač [din]



Slika 8. Troškovi za električnu energiju za sopstvenu potrošnju domaćinstava koja su učestvovala u izgradnji zajedničke solarne elektrane po stavkama na godišnjem nivou pre i nakon sticanja statusa kupac-proizvođač [din]

Sve prethodno prikazano izračunato je na osnovu trenutno važećih cena električne energije. S obzirom na to da cene imaju tendenciju rasta očekivano je da uštede budu značajno veće. Trebalo bi imati u vidu i da solarni paneli vremenom degradiraju što doprinosi blagom smanjenju ušteda. Pet članova stambene zajednice koji nisu učestvovali u izgradnji elektrane i njihove uštede na troškovima sopstvene potrošnje nisu uzeti u obzir prilikom proračuna, jer nisu imali investicioni trošak, te njihove uštede ne doprinose povratu investicije članovima stambene zajednice koji su investirali u zajedničku solarnu elektranu.

7.4 Mogućnosti za dodatne uštede domaćinstava koja su investirala u zajedničku solarnu elektranu

Kako bi investicija bila svrsishodna neophodno je izgraditi solarnu elektranu odgovarajuće, optimalne snage. Važno je napomenuti da je potrebno razmišljati o budućoj potrošnji električne energije kako se ne bi investiralo u solarnu elektranu veće snage od potrebne, jer će se, kako je ranije napomenuto, u tom slučaju određena količina električne energije isporučivati u distributivni sistem snabdevaču bez naknade. Dobar primer je unapređenje energetske efikasnosti zgrade (npr. postavljanje izolacije) nakon izgradnje solarne elektrane što će značajno smanjiti potrošnju električne energije ukoliko se npr. zgrada greje na električnu energiju. Ukoliko se ovo buduće smanjenje potrošnje ne uzme u obzir prilikom određivanja optimalne snage solarne elektrane gotovo sigurno će ona biti veća od optimalne, a samim tim i uštede manje, odnosno period povrata

investicije duži.

U okviru ovog rada analizirana je jedna idealna situacija u kojoj sva domaćinstva koja grade zajednički proizvodni objekat troše istu količinu električne energije i investirala su podjednako u zajednički proizvodni objekat. U realnim slučajevima obično će neko domaćinstvo investirati više, neko manje te će tako različito raspodeljivati i proizvedenu električnu energiju – po pravilu ko je investirao više, više će mu proizvedene električne energije pripadati. Međutim, ukoliko bi se pomenuto pravilo primenilo u slučaju domaćinstva sa malom potrošnjom električne energije koje je značajno doprinelo investiciji u zajedničku solarnu elektranu optimalne snage tada bi to domaćinstvo značajnu količinu električne energije predavalo snabdevaču bez naknade čime bi produžavalo period povrata investicije i sebi ali i svim ostalim članovima stambene zajednice koji su investirali u zajednički proizvodni objekat. S obzirom na to, u cilju bržeg povrata investicije, često ovo pravilo ne dovodi do najvećih ušteda već je neophodno raspodelu proizvedene električne energije optimizovati tako da se trošak za električnu energiju smanji najviše moguće a međusobni odnosi članova stambene zajednice se mogu definisati na druge načine. [24]

Takođe, potrebno je objasniti situaciju u kojoj u toku više obračunskih perioda nema potrošnje u jednom od stanova kom pripada određeni procenat ukupne proizvodnje zajedničkog proizvodnog objekta. U tom slučaju to domaćinstvo će imati troškove pristupa distributivnom sistemu za odobrenu snagu, akcize i PDV a proizvedena električna energija koja pripada tom stanu biće višak za taj stan. Ukoliko do kraja perioda za poravnanje potraživanja u posmatranom stanu nema potrošnje električne energije, sva proizvedena električna energija koja pripada tom stanu biće predata snabdevaču bez naknade. Kako bi se ovakve situacije sprečile, a solarna elektrana brže otplatila, neophodno je da upravnici zgrada sa domaćinstvima koja su izgradila zajednički proizvodni objekat blagovremeno, na opštu korist, izmene ugovor kojim raspodeljuju proizvedenu električnu energiju. Svakako, u domaćinstvu kod koga nema potrošnje u dužem vremenskom periodu ne može imati nikakve uštede od proizvedene električne energije, već će se samo produžavati period povrata investicije.

S obzirom na to da solarne elektrane električnu energiju proizvode gotovo isključivo u višoj tarifi, a da model neto merenja funkcioniše tako što se višak električne energije prenosi zasebno u višoj tarifi zasebno u nižoj tarifi (kako je već navedeno očekivano je da višak u nižoj tarifi bude minimalan, odnosno praktično 0 kWh) potrebno je tako i organizovati potrošnju električne energije u domaćinstvima koja su investirala u solarnu elektranu. Sva potrošnja koja se može obaviti u višoj tarifi trebalo bi da se obavlja u višoj tarifi kako bi uštede bile maksimalne. Naravno, postoji mogućnost ugradnje skladišta električne energije [2, 3, 5], koje bi deo električne energije proizvedene u toku više tarife skladištilo i isporučivalo u distributivni sistem u toku niže tarife. Na taj način optimalna snaga solarne elektrane bi se računala kao snaga elektrane koja proizvodi onoliko električne energije koliko potroše domaćinstva koja učestvuju u izgradnji zajedničkog proizvodnog objekta i zajednička potrošnja u višoj tarifi i delu niže tarife koje može da uskladišti skladište ugrađeno uz solarnu elektranu.

Takođe, kupci-proizvođači se mogu udruživati putem agregatora [2, 25], oformiti zajednice obnovljivih izvora energije [3, 26] i drugo i tako doprineti dodatnim uštedama.

Naravno, sve navedeno može imati negativan uticaj na operatora distributivnog sistema u smislu promene tokova snaga, otežanog upravljanja distributivnim sistemom, isporuke električne energije u distributivni sistem kada je inače ima previše (npr. u tački gde inače ima manje potreba za električnom energijom) ili preuzimanje električne energije u zimskim periodima u višoj tarifi kada je inače velika potražnja za električnom energijom i kada je sistem značajno opterećen. Kako bi se sve navedeno umanjilo, a kako bi kupci-proizvođači koji su stambene zajednice imali najveće uštede i kraći period povrata investicije u nastavku rada biće izloženi neki od predloga za unapređenje trenutno važećeg modela kupca-proizvođača koji je stambena zajednica u Republici Srbiji.

VIII PREDLOZI ZA UNAPREĐENJE MODELA KUPCA-PROIZVOĐAČA KOJI JE STAMBENA ZAJEDNICA

S obzirom na veliki potencijal krovova stambenih zgrada za izgradnju solarnih elektrana i neophodnosti promene energetske miksa Republike Srbije potrebno je podsticati stambene zajednice da grade solarne elektrane. Pre svega se to može uraditi kroz različite subvencije (subvencionisati deo sredstava za izgradnju zajedničkih elektrana, ponuditi odloženo plaćanje za opremu za izgradnju solarne elektrane ili na drugi način).

Takođe, neophodno je promovisati i obučavati upravnike stambenih zgrada, kao i građanstvo, o značaju visoke energetske efikasnosti, obnovljivih izvora energije, njihovom uticaju na životnu sredinu, kao i o uštedama koje bi imali u budućnosti u slučaju izgradnje zajedničke solarne elektrane i unapređenja energetske efikasnosti zgrade.

Pored navedenog, potrebno je razmišljati i o modelima za unapređenje obračuna električne energije za stambene zajednice koje su kupci-proizvođači sa zajedničkim proizvodnim objektima. Pre svega, predlaže se propisivanje odredbe da višak električne energije nakon perioda poravnanja potraživanja između kupca-proizvođača i snabdevača, ukoliko postoji, bude plaćen kupcu-proizvođaču po npr. 70% tržišne cene. Snabdevač svakako preuzima proizvedenu električnu energiju i prodaje je drugim krajnjim kupcima koje snabdeva po 100% tržišne cene, što je za snabdevača čist prihod jer nema troškove nabavke električne energije koja je bila višak kupca-proizvođača nakon perioda za poravnanje potraživanja. Upravo zbog toga predloženo je da, kako kupci-proizvođači ne bi investirali u prevelike solarne elektrane koje mogu nepovoljno uticati na distributivni sistem, snabdevač plaća kupcu-proizvođaču višak električne energije po ceni od 70% tržišne. Dakle, optimalno je da kupac-proizvođač nema viška električne energije nakon perioda za poravnanje potraživanja, ali ukoliko se ipak pojavi neophodno je da bude primereno plaćen.

Predlaže se i omogućavanje raspodele proizvedene električne energije između susednih zgrada ukoliko se odluče za izgradnju zajedničkog proizvodnog objekta. Ovo je naročito važno u slučajevima gde na nekoj od stambenih zgrada fizički ne postoji mogućnost za izgradnju proizvodnog objekta.

U okviru stambenih zgrada predlaže se odobravanje priključenja

proizvodnog objekta na unutrašnju instalaciju:

- zajedničke potrošnje stambene zajednice koja se napaja preko jednog mernog mesta pri čemu će svi članovi stambene zajednice imati uštede za troškove zajedničke potrošnje, ali ne i za troškove sopstvene potrošnje električne energije. Ovakav model može biti koristan, ukoliko npr. članovi stambene zajednice žele da investiraju u proizvodni objekat iz obnovljivih izvora ali imaju ograničena sredstva. Maksimalna snaga proizvodnog objekta u tom slučaju bi bila jednaka odobrenoj snazi priključka predmetnog mernog mesta zajedničke potrošnje [3,5];
- jednog od članova stambene zajednice, pri čemu ostali članovi neće imati uštede ni na sopstvenoj, ali ni na zajedničkoj potrošnji. Ovakav model može biti koristan ukoliko samo jedan član stambene zajednice želi da investira u proizvodni objekat, ili ostali članovi stambene zajednice ne dozvoljavaju upotrebu zajedničkog prostora u svrhu izgradnje proizvodnog objekta. U ovom slučaju proizvodni objekat bi morao biti postavljen na posebnom delu zgrade (npr. na ličnoj terasi) i maksimalna snaga proizvodnog objekta bi bila jednaka odobrenoj snazi priključka domaćinstva i ne veća od 6,9 kW [3, 5].

Ukoliko je proizvodni objekat kupca-proizvođača koji je stambena zajednica priključen na unutrašnju instalaciju zajedničke potrošnje ili samo jednog člana stambene zajednice obračun bi se vršio na isti način kao za jedno individualno domaćinstvo. Način neto merenja za individualna domaćinstva detaljno je opisan u [5, 23].

Kako bi se podstakla izgradnja elektrana na stambenim zgradama potrebno je razmišljati o dodatnim pogodnostima – npr. oslobađanja od PDV [20] i akcize [19], kao i promene alokacije maksimalno odobrenog prihoda [15] za operatora distributivnog sistema u smislu da kupci-proizvođači imaju posebnu tarifu za pristup sistemu koja je značajno niža od tarife za ostale krajnje kupce.

Od velikog značaja za operatora distributivnog sistema, kupce-proizvođače, ali i energetske miks bilo bi i uvođenje generalno pojma viška električne energije koji neće biti vezan za tarifu. Po trenutnom modelu, kupci-proizvođači uglavnom višak imaju u višoj tarifi i zbog toga zimi dominantno koriste električnu energiju u višoj tarifi. Model viška bi mogao biti uređen na taj način da se ukupan višak prenosi iz meseca u mesec u toku perioda poravnanja potraživanja tako što se dve trećine viška prenose kao višak u nižoj tarifi, a jedna trećina u višoj tarifi. Na ovaj način kupci-proizvođači bi imali višak koji mogu koristiti u višoj tarifi, ali bi bili stimulisani da više električne energije koriste u nižoj tarifi kada je distributivni sistem rasterećeniji, što je naročito važno u toku zimskih meseci. Takođe, ovo je odlična mera i za same kupce-proizvođače jer će na ovaj način moći da koriste proizvodnju solarne elektrane i u nižoj tarifi, kada ona fizički ne proizvodi električnu energiju. Pored navedenog, pozitivna strana ove mere je i to što će optimalna snaga solarne elektrane uz ovakvu meru biti veća nego po trenutno važećem modelu jer će optimalna snaga biti ona koja može da proizvede onoliko električne energije kolika je potrošnja u višoj i nižoj tarifi, a ne samo u višoj. Ovo bi moglo biti izuzetno značajno za povećanje udela obnovljivih izvora energije u energetsom

miksu Republike Srbije.

Takođe, predlaže se i definisanje obaveznih uslova za izgradnju novih stambenih zgrada, tako da pored toga što moraju biti visoko energetske efikasne moraju imati i sopstvenu proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora električne energije od npr. najmanje 20% ukupne planirane godišnje potrošnje električne energije u toj stambenoj zgradi.

IX ZAKLJUČAK

Imajući u vidu činjenicu da status kupca-proizvođača mogu steći određeni korisnici elektroenergetskog sistema koji proizvode električnu energiju iz obnovljivih izvora, nesporan je doprinos ovog instituta u sprovođenju energetske tranzicije. Kako je stambenim zajednicama data mogućnost da steknu status kupca-proizvođača, može se zaključiti da stambene zajednice koje steknu status kupca-proizvođača predstavljaju aktivne učesnike u bržem dostizanju energetske tranzicije i samim tim borbi protiv posledica klimatskih promena.

S obzirom na velik broj stambenih zajednica u Republici Srbiji i činjenicu da su do kraja 2023. godine samo dve stekle status kupca-proizvođača neophodno je intenzivno se baviti unapređenjem statusa stambenih zajednica koje žele da izgrade solarnu elektranu npr. kroz modele iznete u okviru ovog rada. Interes za pomoć stambenim zajednicama za sticanje ovog statusa imaju, kako Republika Srbija koja u svojim ciljevima ima sprovođenje energetske tranzicije i povećanje procenta obnovljivih izvora energije u energetsom miksu Republike Srbije, tako i same stambene zajednice koje, imajući u vidu analize iznete u ovom radu, imaju ekonomski interes za sticanje navedenog statusa.

Takođe, neophodno je generalno više se baviti promovisanjem samih koncepata korišćenja obnovljivih izvora energije, mogućnosti za investiranje u ovoj oblasti, kao i edukacijom u oblasti potencijalnih energetske i finansijske uštede. Naročito je važno potencirati značaj korišćenja obnovljivih izvora energije u svetlu smanjenja zagađenja životne sredine. Stoga je i cilj ovog rada da doprinese široj stručnoj i naučnoj javnosti u razumevanju koncepta stambenih zajednica kao kupca-proizvođača, kako bi se ubrzala njegova vidljivost i omogućila njegova značajnija primena.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] AD EMS. Godišnji izveštaj o nacionalnom rezidualnom miksu za Srbiju za 2022. godinu. <https://ems.rs/wp-content/uploads/2023/06/Godisnji-izvestaj-o-nacionalnom-rezidualnom-miksu-2022.pdf> [pristupljeno 20.02.2024]
- [2] Zakon o energetici ("Sl. glasnik RS", br. 145/2014, 95/2018 - dr. zakon i 40/2021). https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_energetici.html [pristupljeno 20.02.2024]
- [3] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije ("Službeni glasnik RS", br. 40/21 i 35/2023). <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-koriscenju-obnovljivih-izvora-energije.html> [pristupljeno 20.02.2024]
- [4] Zakon o energetske efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije ("Službeni glasnik RS", br. 40/21). <https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgrs/skupstina/zakon/2021/40/4/reg> [pristupljeno 20.02.2024]
- [5] Uredba o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupca – proizvođača i snabdevača ("Službeni glasnik RS", br. 83/2021 od 27.8.2021. godine). <https://www.paragraf.rs/dnevne-vesti/080922/080922-vest5.html> [pristupljeno 20.02.2024]
- [6] 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_elektricnom_energijom.html [pristupljeno 20.02.2024]
- [7] Pravilnik o načinu vođenja Registra kupaca – proizvođača priključenih na prenosni, distributivni, odnosno zatvoreni distributivni sistem i metodologiji za procenu proizvedene električne energije u proizvodnom objektu kupca – proizvođača („Službeni glasnik RS“, broj 33 od 11. marta 2022. godine). <https://www.paragraf.rs/dnevne-vesti/290422/290422-vest11.html> [pristupljeno 20.02.2024]
- [8] Elektrodistribucija Srbije Beograd. Registar kupaca-proizvođača. http://edbnabavke.edb.rs/registar_kupaca/STAMBENA_ZAJEDNICA/STAMBENA_ZAJEDNICA.pdf [pristupljeno 20.02.2024]
- [9] Centralni registar stambenih zajednica u Republici Srbiji. <https://katastar.rgz.gov.rs/StambeneZajednice/?&LanguageID=1> [pristupljeno 20.02.2024]
- [10] Zakon o stanovanju i održavanju zgrada ("Sl. glasnik RS", br. 104/2016 i 9/2020 - dr. zakon). https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_stanovanju_i_odrzavanju_zgrada.html [pristupljeno 20.02.2024]
- [11] Funkcionalni zahtevi i tehničke specifikacije AMI/MDM sistema, sveska 1, Tehničke specifikacije brojila električne energije i komunikacionih uređaja, verzija 4.0, Usvajeno na Stručnom savetu EPS Distribucije, Beograd, 07.02.2019. https://elektrodistribucija.rs/interni_standardi/pravila/Functional_requirements_AMI_MDM_system_version_3.0_sr_F1.pdf [pristupljeno 20.02.2024]
- [12] Pravila o radu tržišta električne energije, 2022. <https://ems.rs/wp-content/uploads/2022/12/Pravila-o-rad-trizista-elektrcn-1.pdf>, [pristupljeno 20.02.2024]
- [13] Pravila o radu distributivnog sistema, jul 2017. http://aers.rs/FILES/AktiAERS/AERSDajeSaglasnost/2017-07-19_Pravila%20o%20radu%20ED-ODS%20EPS%20distr.pdf [pristupljeno 20.02.2024]
- [14] Procedure za priključenje kupaca-proizvođača koji su domaćinstva i stambene zajednice. https://elektrodistribucija.rs/usluge/postupak-prikljucenja-na-dsee/postupak-sticanja-statusa-kupca-proizvodjaca/stambene_zajednice [pristupljeno 20.02.2024]
- [15] Metodologija za određivanje cena pristupa sistemu za distribuciju električne energije („Službeni glasnik RS“, broj 105/12). <http://aers.rs/FILES/Metodologije/2012-10-31%20Metodologija%20distribucija%20EE%20SG%20105-12.pdf> [pristupljeno 20.02.2024]
- [16] Cena električne energije za garantovano snabdevanje. https://www.aers.rs/FILES/Odluke/OCenama/20230926_Odluka%20o%20regulisanju%20ceni.pdf, [pristupljeno 20.02.2024]
- [17] Savet Agencije za energetiku Republike Srbije. Metodologija za određivanje cene električne energije za javno snabdevanje. http://aers.rs/FILES/Metodologije/2014-08-08_Metodologija%20javno%20snabdevanje%20EE%20SG%2084-14.pdf [pristupljeno 20.02.2024]
- [18] Cena pristupa sistemu za distribuciju električne energije. https://www.aers.rs/FILES/Odluke/OCenama/2021-10-01_ED%20Cenovnik%20-%20distribucija.pdf [pristupljeno 20.02.2024]
- [19] Zakon o akcizama ("Sl. glasnik RS", br. 22/2001, 73/2001, 80/2002, 43/2003, 72/2003, 43/2004, 55/2004, 135/2004, 46/2005, 101/2005 - dr. zakon, 61/2007, 5/2009, 31/2009, 101/2010, 43/2011, 101/2011, 6/2012 - usklađeni din. izn., 43/2012 - odluka, 76/2012 - odluka, 93/2012, 119/2012, 8/2013 - usklađeni din. izn., 47/2013, 4/2014 - usklađeni din. izn., 68/2014 - dr. zakon, 142/2014, 4/2015 - usklađeni din. izn., 5/2015 - usklađeni din. izn., 55/2015, 103/2015, 5/2016 - usklađeni din. izn., 108/2016, 7/2017 - usklađeni din. izn., 18/2018 - usklađeni din. izn., 30/2018, 4/2019 - usklađeni din. izn., 5/2020 - usklađeni din. izn., 7/2020 - izm. usklađenih din. izn., 78/2020 - izm. usklađenih din. izn., 153/2020, 11/2021 - usklađeni din. izn., 32/2022 - odluka, 46/2022 - odluka, 50/2022 - odluka, 62/2022 - odluka, 73/2022 - odluka, 84/2022 - odluka, 89/2022 - odluka, 97/2022 - odluka, 110/2022 - odluka, 121/2022 - odluka, 130/2022 - odluka, 144/2022 - odluka, 6/2023 - odluka, 15/2023 - odluka, 25/2023 - odluka i 75/2023). <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-akcizama.html> [pristupljeno 21.02.2024]
- [20] Zakon o porezu na dodatu vrednost ("Sl. glasnik RS", br. 84/2004, 86/2004 - ispr., 61/2005, 61/2007, 93/2012, 108/2013, 6/2014 - usklađeni din. izn., 68/2014 - dr. zakon, 142/2014, 5/2015 - usklađeni din. izn., 83/2015, 5/2016 - usklađeni din. izn., 108/2016, 7/2017 - usklađeni din. izn., 113/2017, 13/2018 - usklađeni din. izn., 30/2018, 4/2019 - usklađeni din. izn., 72/2019, 8/2020 - usklađeni din. izn., 153/2020 i 138/2022). <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-porezu-na-dodatu-vrednost.html> [pristupljeno 21.02.2024]
- [21] Climate online baze podataka. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ [pristupljeno 21.02.2024]
- [22] Godišnji izveštaj Elektrodistribucije Srbije za 2022. godinu. https://elektrodistribucija.rs/o-nama/informacije/dokumenta/GI_2022.pdf [pristupljeno 21.02.2024]
- [23] Grujić, D., Kuzman, M. Modeli korišćenja električne energije kupaca-proizvođača, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 1, pp. 8-16, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.08G>
- [24] Zakon o opštem upravnom postupku ("Sl. glasnik RS", br. 18/2016, 95/2018 - autentično tumačenje i 2/2023 - odluka US) <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-opstem-upravnom-postupku.html> [pristupljeno 21.02.2024]
- [25] Grujić, D., Kuzman, M. Uloga agregatora u razvoju tržišta električne energije, Electric Power Industry Journal, Vol. 1, No. 1, Article 2, pp. 15-29, 2023. <https://doi.org/10.18485/epij.2023.1.1.2>
- [26] 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>

AUTORI/AUTHORS

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

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

Residential Community in the Role of Prosumer

Abstract - Prosumers have been recognized as the electricity system users and the electricity market participants since 2021 by the regulations of the Republic of Serbia. Among others, households, both in individual and collective housing facilities, are given the opportunity to acquire prosumer status, which enables them to achieve savings in monthly electricity costs and contribute to reducing environmental pollution and slowing down global warming. In this paper, residential communities were analysed as prosumers. The method of acquiring prosumer status for residential communities is described, starting from the basic idea, through the regulation of mutual relations between the members of the residential community and the conclusion of the supply contract to the construction and connection of the production facility to the power system. In addition, the method of electricity billing for the prosumer that is a residential community is shown in the paper. As a conclusion, proposals for additional savings for prosumers who are residential communities were given, as well as the models for improving their status.

Index Terms - Prosumer, Renewable energy sources, Electricity market, Residential community

Unravelling the Serbian Energy Transition Puzzle: Driving an Electric Vehicle Result in Higher CO₂ Emissions than Driving a Traditional Internal Combustion Engine Counterparty

Sergey Fominykh, Dusan Stanar

Naftna industrija Srbije – NIS a.d. Novi Sad

Abstract – This article delves into the intriguing paradox emerging in Serbia's transportation landscape, where electric vehicles (EVs) are projected to generate more carbon dioxide (CO₂) emissions than internal combustion engine (ICE) until 2030. Driving an EV within Serbia over the upcoming five years is estimated to contribute to roughly 25% more CO₂ emissions compared to ICE vehicles. The study unveils the underlying factors behind this paradox, including Serbia's energy mix dominated by lignite. By contrasting this with the European Union's cleaner energy sources, the article underscores the delayed CO₂ emissions reduction from EVs in Serbia. Furthermore, it explores the carbon footprint associated with EV production and highlights the challenges posed by the country's energy infrastructure and vehicle fleet. The article concludes with insights into potential solutions, emphasizing the need for Serbia to accelerate its transition to renewables, aiming to align with 2030 targets, while parity with EU emissions levels is projected by 2040.

Index Terms – Energy, Sustainability, Carbon emissions, Electric vehicles

I INTRODUCTION

Electric vehicles are often seen as a promising solution to achieve sustainability and energy transition across industries, which have sparked many discussions regarding their efficiency in terms of decarbonisation, cost to produce and drive, and widespread use. Due to Serbia's unfavourable energy composition heavily reliant on lignite, driving electric vehicles over the next six years is estimated to contribute to CO₂ emissions approximately 25% more than driving internal combustion engine vehicles, necessitating the energy transition based on the accelerated shift towards renewable energy sources. Compared to the European Union residents and businesses usually experiencing reduced CO₂ emissions from driving electric vehicles after the second year of their use, Serbia's energy system is yet to attain parity with EU and achieve its emissions levels.

Therefore, the purpose of this article is to provide comprehensive insights into demystifying the Serbian energy transition puzzle rooted in the projection that electric vehicles (EVs) will produce higher carbon dioxide (CO₂) emissions than internal combustion engine (ICE) vehicles until 2030. This paper presents a synthesis of the most recent research on EVs, investigates energy production in Serbia, and reveals the potential for optimizing the

utilization of EVs both domestically and globally. Further, the paper lays out proposed solutions for the energy transition and aims to integrate EVs seamlessly into Serbia's energy landscape.

II LITERATURE REVIEW

The comparison of CO₂ emissions from EVs and ICE vehicles, particularly in the context of proper energy mix and sustainable transportation, has garnered a lot of attention from researchers and experts worldwide. Numerous studies have addressed the complex interplay between vehicle technology, energy sources, and emissions reduction, shedding light on the factors influencing the Serbian energy transition puzzle and wider deployment of EVs [1].

The latest research provides a framework to assess EV emissions throughout their life cycle, considering energy sources and manufacturing procedures, and emphasizing the critical role of the energy mix in determining the overall environmental impact of EVs [2, 3]. The CO₂ emissions resulting from the production and operation of EVs are inextricably linked to the dynamic nature of energy transitions and the optimized energy mix [4, 5], particularly when considering factors such as spare parts production, energy generation, waste from roads, and others [5, 6]. Thus, promoting EVs as a sustainable transportation solution, without considering the total CO₂ emissions dispersed across different lifecycle phases, could obscure our vision, and potentially lead to misunderstandings regarding the importance of the energy mix [7]. Nevertheless, recent research on replacing ICE vehicles with EVs in the United States, Poland, and Brazil, has highlighted the promising future of EVs in terms of emission reduction [6, 8, 9], especially when reinforced by an energy transition and a shift towards renewable energy sources. Additionally, the benefits of energy transition have also been pointed out in the special reports published by the International Renewable Energy Agency and the Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC.

Concerning the specific instance of Serbia, recent studies have examined the CO₂ emissions consequences associated with adopting EVs in relation to the country's energy mix [10,11]. These studies underscore the requirement for a shift to more environmentally friendly energy sources to realize the emissions reduction potential of EVs in Serbia, even providing a timeline for when EVs could turn environmentally advantageous in the country. However, the necessity of transitioning from ICE vehicles to EVs has not been sufficiently acknowledged in Serbian legislation, a critical aspect for EVs to become a key

player in the nation's energy and transportation sectors [12]. Consequently, both the energy transition and the deployment of EVs are gaining traction, as confirmed by official data from UNDP Serbia advocating the need for reducing CO₂ emissions. Several other authors, in addition to UNDP Serbia, have published research and case studies highlighting the urgency of long-term planning for carbon emissions reductions, which further underscores the pressing need for energy transition [14-16].

III THE STRUCTURE OF ENERGY PRODUCTION IN SERBIA

According to the official data, Serbia's energy system is characterized by a mix of various energy sources, with a notable presence of coal and lignite in the electricity generation [17, 18]. Key components of Serbia's energy system include [17]:

- Coal,

- Natural gas,
- Hydroelectric energy,
- Renewable energy and biofuels.

Historically, coal has been the primary energy source in Serbia, forming the bedrock of electricity and heat energy production. Notably, lignite, a type of brown coal, is abundant in the country and contributes significantly to power production [18]. Consequently, Serbia generates roughly 65-70% of its electricity primarily from low-calorific-value lignite in aged plants with suboptimal efficiency. This scenario results in considerably higher CO₂ emissions per MWh in Serbia than in most European countries [19, 20], as depicted in Figure 1. In addition, natural gas, which is mainly utilized for heating and industrial processes, also contributes to electricity generation, albeit to a lesser degree than coal and lignite, currently accounting to approximately 3-5% of Serbia's electricity production [18, 19].



Figure 1. Emissions of tons of CO₂ per 1 MWh of electricity produced in 2019 [20]

Altogether, Serbia produces 0.9 tCO₂/MWh [20], but this figure could potentially be even higher. A study conducted by the International Renewable Energy Agency estimates emissions of approximately 1.1 tCO₂/MWh for electricity and heat production (see Figure 2) [21], necessitating new strategies for assembling the energy puzzle, predominantly based on renewable energy.

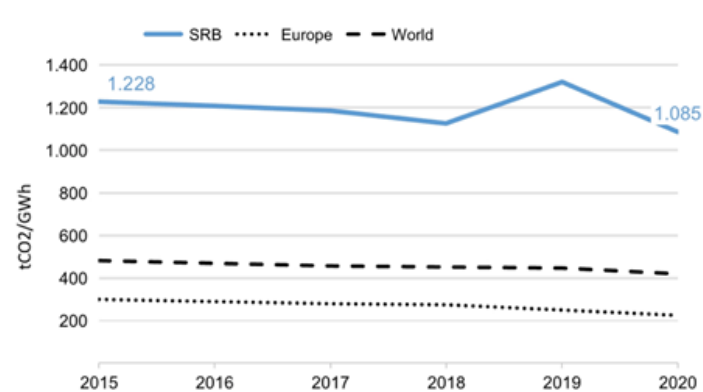


Figure 2. CO₂ emission factor for electricity and heat generation [21]

Serbia has been progressively increasing its utilization of renewable energy sources, including hydropower, wind power, and solar power [17-19]. Hydropower, being one of the oldest and most established renewable energy sources in the country, accounts for a significant portion of electricity production,

contributing 25-30% to overall electricity generation. The combined contribution of wind and solar power to total electricity generation remains below 1% and can only exceed this benchmark when combined with biogas production [17,18]. Serbia has also demonstrated interest in nuclear energy and has contemplated the construction of nuclear power plants as a low-carbon energy source. To date, however, the country does not have operational nuclear power plants.

It's noteworthy that Serbia also imports a portion of its electricity from neighbouring countries to satisfy its energy needs and exports the surplus electricity generated, thereby maintaining the sustainability of the Serbian energy sector.

IV CO₂ EMISSIONS OF ELECTRIC VEHICLES VS. FOSSIL FUEL VEHICLES

For several decades, ICE vehicles have formed the foundation of global transportation, substantially contributing to the convenience and mobility of contemporary societies. However, the rise of ICE vehicles has sparked significant environmental concerns, particularly pertaining to their CO₂ emissions and the subsequent impact on climate change. Contemporary trends lean towards replacing ICE vehicles with EVs, but since the production and operation of both EVs and ICE vehicles result in CO₂ emissions, there's a genuine need to evaluate these in the context of sustainability and overall lifecycle emissions reduction.

Early research conducted by the Argonne National Laboratory in Chicago, renowned for its pioneering models in this area and affiliated with the US Department of Energy, reveals that manufacturing an average EV results in roughly 8.1 metric tons of CO₂ emissions, whereas the production of ICE vehicles entails emitting around 5.5 metric tons of CO₂, ICE vehicle production entails approximately 5.5 metric tons of CO₂ emissions, underscoring the difference in emissions associated with distinct vehicle propulsion technologies [11, 22]. Thus, the production of an average EV generates around 2.6t CO₂ emissions more than production of an average ICE vehicle. This discrepancy primarily stems from the heightened emissions necessitated by the mining and processing of lithium and other ores crucial for producing electric vehicle batteries, along with the battery size and technology used in manufacturing. Additionally, while conventional ICE vehicle production has been in existence for an extended period, EVs production represents somewhat novel and promising technology set to revolutionize not only transportation but also society in general. Numerous authors recommend greater investment in EV technology and its key components, particularly batteries, and suggest that under certain conditions, EVs are substantially more efficient and counteract carbon emission more than ICE vehicles [23].

Concerning the driving phase of EVs or ICE vehicles, differing perspectives exist favouring one or the other in terms of CO₂ emissions and overall efficiency. The CO₂ emissions related to ICE vehicles stem from the combustion of fossil fuels, namely gasoline and diesel. Despite improvements in engine efficiency and emission control technologies, ICE vehicles continue to be a significant source of human-induced CO₂ emissions, thereby adding to global greenhouse gases (GHGs) accumulation. These emissions are influenced by various factors, such as engine design, vehicle weight, driving patterns, and fuel quality. While modern ICE vehicles are equipped with emissions control systems to mitigate pollutant releases, these measures often fall short in substantially reducing CO₂ output. Furthermore, the efficiency gains attained by the automotive industry in recent years have been partially nullified by the growing demand for larger, more powerful vehicles, underlining the intricate interaction between technology advancements, consumer preferences, and environmental objectives.

On the other hand, EVs are revolutionizing the industry and shifting the focus to sustainability ingrained in every facet of transportation paradigms [24]. The prevailing belief is that EVs emit no greenhouse gases, which is typically underscored as their primary advantage in reducing CO₂ emissions and positively affecting climate change. Consequently, EVs are viewed as the future of transportation and a cornerstone of the green transition. However, the flip side presents the challenge of electricity production necessary to charge EVs, which is not always environmentally friendly, posing a hurdle that many countries, including Serbia, find hard to overcome. Charging EVs typically involves multiple processes such as mining, ore processing, electricity generation, storage, and transmission, all of which result in sizeable GHG emissions [24]. Therefore, the total emissions derived from driving EVs are more complex to understand than initially perceived, and the reduction of CO₂ emissions from EVs hinges on the electricity generation mix,

which differs across countries [7, 24]. According to recent studies, Serbia is among European nations with the highest proportion of fossil fuels in electricity generation, making the dream of transport electrification less feasible without a proper energy transition [24]. If we look at the average emissions data, prevalent ICE vehicles in Serbia, such as Volkswagen Golf, Skoda Fabia, and Skoda Octavia, produce between 110 to 134 gCO₂/km and, given the country's average consumption rate of ~0.17 kWh per 1 km drive and 0.9t/MWh CO₂ emissions, driving EVs in Serbia generates in average of ~150 gCO₂ / km [25]. This factor implies that using EVs causes around 20 gCO₂/km more emissions than using prevalent ICE vehicles in Serbia. As such, the unique Serbian energy puzzle impacts the EV driving landscape, differentiating the country from EU nations where EVs, due to lower carbon intensity of their energy mix, have lower CO₂ emissions after just the second year of usage [2,7,24].

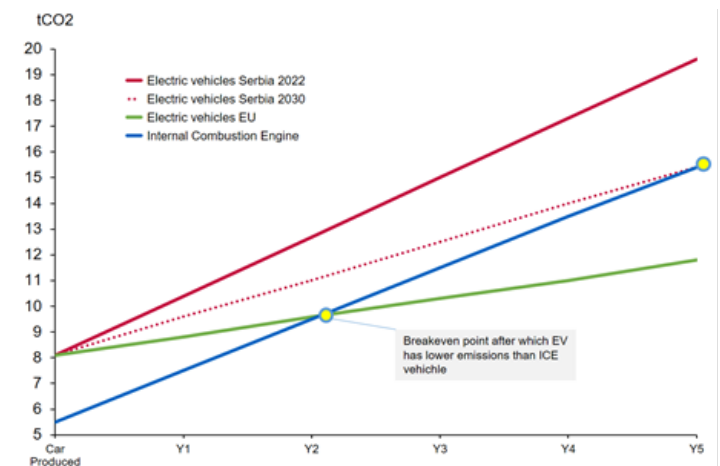


Figure 3. CO₂ emissions vs. Years of Driving

Despite the relatively low CO₂ emissions from the ICE vehicles predominantly used in Serbia, a pressing need exists for sustainable transportation solutions and an urgent transition towards low-carbon alternatives such as EVs, plug-in hybrids, hydrogen-powered vehicles, etc.

V EV CHARGING INFRASTRUCTURE AND THE VEHICLE LANDSCAPE IN SERBIA

Long journeys with EVs pose a challenge in Serbia, necessitating careful planning for the expansion of EV charging networks across the country. The current paucity and occasional unreliability of EV charging stations intensifies the dilemma for wider EV deployment and consumer interest, leaving drivers uncertain about whether to switch to EVs and act responsibly or stick with ICE vehicles for convenience. Consider this scenario: with only 20% battery charge remaining, a stop for charging on the highway is necessary. However, one may encounter a situation where one charging station is out of order, and another is occupied by an EV, resulting in an unexpected wait time of at least 30 minutes. A more dire situation arises when a non-operational charger disrupts the plan, leaving the EV stranded far from the nearest working station. As such, the density and reliability of charging infrastructure, which are presently inadequate, need to be addressed through legislative measures and practical initiatives to bolster the EV landscape in Serbia.

A noteworthy effort to address this challenge is Serbia's adoption of the Law on Energy of the Republic of Serbia, which establishes rules for charging infrastructure and providers [12]. This is in alignment with the European Union's plans to install EV chargers every 60km on all Class I roads (highways) before 2026, setting an encouraging timeline for substantial charging infrastructure expansion and the achievement of agreed upon sustainable development goals [12,26]. Serbia aspires to set up charging facilities not only at gas stations but also at nearly 20 highway rest areas and toll booths, positioning the country on par with the European Union and the United States in similar pursuits. Additionally, private energy companies, led by Naftna Industrija Srbije a.d. Novi Sad, play a significant role in expanding charging infrastructure as addressed in their sustainable development strategies [26-28]. It is also worth noting that besides Naftna Industrija Srbije a.d. Novi Sad, several other petroleum giants, along with private investors and entrepreneurs, are entering the EV charging arena [26].

Nevertheless, prevalent challenges with charging infrastructure persist. While recent legal provisions in Serbia are commendable, additional regulatory strides are essential to facilitate the economical charging of EVs. The existing legislation lacks the necessary framework for electric energy transactions pertaining to EV charging. This development is not only favorable for enhancing EV adoption but is also critical for maintaining revenue from tolls for foreign vehicles traversing Serbia. In contrast to the scarcity of EVs in Serbia's vehicular landscape, Western Europe's more prominent EV penetration and cleaner energy mix have prompted a substantial proportion of new vehicle registrations - 13.9% in 2023, with EVs commanding a 14.6% market share [29]. Meanwhile, EVs account for less than 1% of the total vehicles registered in Serbia [30].

As of February 2024, Serbia's total EV population is approximately 2,700 vehicles, with an annual growth of almost 60%, and it also hosts 18,000 hybrid vehicles, with an annual growth rate of nearly 30% [30]. Notably, the number of EVs and hybrid vehicles is on the rise, influenced to some degree by the state granting owners similar incentives to purchase EVs or plug-in hybrid vehicles, including purchase incentives and reduced registration costs. However, there is currently just one EV charging station per 100,000 citizens, calling for immediate action to meet previously set goals regarding charging infrastructure accessibility [30]. Another distinct challenge arises from Serbia's purchasing power landscape. According to the Strategy on Traffic Safety of the Republic of Serbia, the average vehicle age fluctuates between 15 and 17 years each year, and import practices predominantly rely on sourcing used vehicles from EU countries [17, 31]. Thus, expecting the inevitable increase of EVs, the primary charging context should lean towards residential and commercial properties, mirroring trends in Europe and the United States, which could also be influenced by consumers' purchasing power and the lack of an initial investment to install a home charger. These findings underscore the pivotal role of state regulations in determining infrastructure priorities.

Furthermore, the inevitable degradation of older EV batteries, which results in reduced range throughout the battery lifetime,

poses a dilemma concerning proper disposal, not only in Serbia but globally. The current state of battery recycling technology only exacerbates this issue, highlighting the importance of holistic solutions in correlation with the expansion of the EV market.

VI TRANSITIONING ENERGY PRODUCTION

The transition towards sustainable energy production is a complex and challenging endeavour, characterized by neither low cost nor swift implementation, neither low cost nor rapid implementation, much like other aspects of the energy transition. A crucial first step involves curbing the carbon dioxide (CO₂) emissions from Serbia's energy system. Given the constraints of resource availability, particularly the prevalence of domestically sourced lignite, and probable limitations in improving thermal capacity efficiency, a practical solution involves phasing out or reducing dependence on existing thermal facilities. The subsequent priority is the establishment of new power capacities derived from renewable sources such as wind, solar, and hydroelectric power. Clearly, Serbia is actively steering its energy trajectory towards these objectives and is striving to transform its energy system to generate cleaner energy and support a sustainable future for all. Thus, the Electric Power Industry of Serbia (EPS) has unveiled an ambitious roadmap through the "Go Green Road" initiative, strengthened by its partial integration into the official documentation of the Ministry of Energy. Government-led market premium allocations have resulted in the division of quotas, with 400MW allocated for wind energy and 12MW for solar energy.

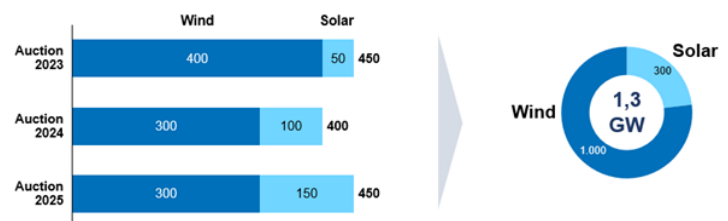


Figure 4. Quotas for RES auctions, MW

Additionally, the Serbian government's recent call for tender submissions for the construction of 1GW solar capacity, including 200MW battery storage, underscores the country's momentum. Notably, private businesses are also converging on solar and wind projects, highlighting the transition from aspirations to concrete projects. This shift towards sustainable energy isn't just strategic but is supported by detailed project designs. Projections indicate the overall expense of this transition, estimated at approximately €11 billion based on internal calculations, additionally factoring in construction costs and reinforcement of the transmission network. The ensuing challenge lies in synchronizing the energy system amidst increasing supply from wind and solar sources, necessitating system balance and enhanced transmission capabilities. The culmination of this renewable energy integration is expected to occur around 2030, with the addition of an extra 3GW of renewable capacity to Serbia's energy mix. This point is predicted to create a scenario where EVs become a prudent choice, gradually compensating for the CO₂ emissions difference

vis-à-vis internal combustion engine vehicles.

Another aspect of the sustainable energy discourse is the technology of carbon capture, utilization, and storage (CCUS). By capturing CO₂ emissions from the chimneys of thermal power plants and storing them in geologically suitable reservoirs, the CO₂ emissions from electricity generation can be mitigated. Notably, CCUS technology is approaching feasibility in Europe, as evidenced by its near-profitability, driven by a carbon tax exceeding €90 per metric ton of CO₂. If Serbia were to implement a similar carbon tax regimen, dependent on the introduction of the Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) and the Clean Development Mechanism (CDM), CCUS technology's prospects within the country appear promising [32].

Individuals possessing residential solar panels and a compatible energy storage system represent an ideal group to adopt EVs, offering the privilege of lower emissions even within the initial kilometres of travel, and a notably reduced cost for charging their EV. Similarly, businesses advocating for environmentally conscious practices can also capitalize on this synergy between renewable energy and EVs. Enhancing this trajectory involves improving the energy utilization efficiency of EV batteries, currently estimated at around 0.17 kWh per kilometre. Nevertheless, it is crucial to acknowledge that advancements in the efficiency of internal combustion engines can also significantly reduce exhaust emissions, as demonstrated historically. In conclusion, the shift towards cleaner energy production remains a complex yet essential endeavour for Serbia, reliant on a symbiotic relationship between the deployment of renewable energy, emission mitigation, and sustainable transportation paradigms.

VII CONCLUSION

This study illuminates the intricate relationship between electric vehicles (EVs), carbon dioxide (CO₂) emissions, and Serbia's distinct energy landscape. At the intersection of these three elements, the "Serbian energy transition puzzle" emerges and poses a challenge necessary to surmount in the coming years - despite all green initiatives, EVs are projected to emit more CO₂ than ICE vehicles until 2030. This paradox, anchored in the country's unfavourable energy mix, emphasizes the crucial role of altering energy sources to attain environmental benefits and facilitate transportation electrification.

The importance of recognizing the transitional nature of adopting and driving EVs in Serbia, which could serve as a harbinger of more sustainable transportation and society in general. While the current energy mix impedes immediate emissions reductions, it also offers a key opportunity for learning from global best practices. Therefore, Serbia's delay in transitioning to EVs allows the country to bypass the challenges encountered by early adopters, enabling a smoother integration of cleaner technologies. A promising opportunity also lies in expanding the EV charging infrastructure and supporting the installation of EV chargers and the placement of solar panels at individual homes, thus creating a landscape that encourages EV use and facilitates the integration of EVs into everyday activities. Lastly, emerging technologies such as CCUS, hydrogen-powered vehicles, synthetic and biofuels, among others, also present potential

solutions to mitigate emissions from both the energy and transportation sectors.

As Serbia aligns its trajectory towards sustainable transportation and renewable energy sources, governmental interventions, and further infrastructure development play key roles. Therefore, to harness the full potential of EVs, it is essential to introduce policies and practices that respect emerging energy and transportation needs, streamline the energy mix, and increase the availability of resources required to purchase, charge, and drive EVs. In conclusion, the future of EVs in Serbia is promising and will become more apparent as the benefits of the energy transition permeate into transportation, facilitating the use of EVs.

REFERENCES

- [1] Tan, K.M., Yong, J.Y., Ramachandramurthy, V.K., Mansor, M., Teh, J., Guerrero, J.M. Factors influencing global transportation electrification: Comparative analysis of electric and internal combustion engine vehicles, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 184, 113582, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113582>
- [2] Koroma, M.S., Costa, D., Philippot, M., Cardellini, G., Hosen, M.S., Coosemans, T., Messagie, M. Life cycle assessment of battery electric vehicles: Implications of future electricity mix and different battery end-of-life management, *Science of the Total Environment*, Vol. 831, 154859, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154859>
- [3] Sinha, P., Paul, C., Deb, S., Sachan, S. Comprehensive Review Based on the Impact of Integrating Electric Vehicle and Renewable Energy Sources to the Grid, *Energies*, Vol. 16, No. 6, pp. 2924, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16062924>
- [4] Strielkowski, W., Civin, L., Tarkhanova, E., Tvaronavičienė, M., Petrenko, Y. Renewable Energy in the Sustainable Development of Electrical Power Sector: A Review, *Energies*, Vol. 14, No. 24, pp. 8240, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14248240>
- [5] Woo, S.H., Jang, H., Lee, S.B., Lee, S. Comparison of total PM emissions emitted from electric and internal combustion engine vehicles: An experimental analysis, *Science of The Total Environment*, Vol. 842, 156961, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156961>
- [6] Jing, R., Yuan, C., Rezaei, H., Qian, J., Zhang, Z. Assessments on energy and greenhouse gas emissions of internal combustion engine automobiles and electric automobiles in the USA, *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 90, pp. 297-309, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2019.11.017>
- [7] Athanasopoulou, L., Bikas, H., Stavropoulos, P. Comparative Well-to-Wheel Emissions Assessment of Internal Combustion Engine and Battery Electric Vehicles, *Procedia CIRP*, Vol. 78, pp. 25-30, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.169>
- [8] Zimakowska-Laskowska, M., Laskowski, P. Emission from Internal Combustion Engines and Battery Electric Vehicles: Case Study for Poland, *Atmosphere*, Vol. 14, No. 4, pp. 401-, 2022. <https://doi.org/10.3390/atmos13030401>
- [9] Del Pero, F., Delogu, M., Pierini, M. Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car, *Procedia Structural Integrity*, Vol. 12, pp. 521-537, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.066>
- [10] Mijailović, R.M., Pesic, D., Vlajic, J.V. Evaluation Of Scenarios For Improving Energy Efficiency And Reducing Exhaust Emissions Of A Passenger Car Fleet: A Methodology, *Transportation research Part D: Transport and Environment*, Vol. 73, pp. 352-366, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.07.005>
- [11] Petrovic, D.T., Pesic, D.R., Petrovic, M.M., Mijailovic, R.M. Electric cars: Are they solution to reduce CO₂ emission?, *Thermal Science*, Vol. 224, No. 5A, pp. 2879-2889, 2020. <https://doi.org/10.2298/TSCI191218103P>
- [12] Kuzman, M. Electric Vehicles in Serbia: Instrument for the Energy Transition?, *Pravni zapisi*, Vol. 14, No. 2, pp. 476-494, 2023. <https://www.doi.org/10.5937/pravzap0-45999>
- [13] United Nations Development Programme in Serbia [UNDP Serbia]. Serbia and Climate Change, UNDP Serbia, 2022.

- <https://www.klimatskepromene.rs/obaveze-prema-un/kjoto-protokol/cmd-projekti/> [pristupljeno 07.02.2024]
- [14] Nesić, S., Mitrović, V., Filipović, M. Serbia evaluates its CO₂ storage potential, *Oil and Gas Journal*, 2017. <https://www.ogj.com/exploration-development/article/17229021/serbia-evaluates-its-co2-storage-potential> [pristupljeno 28.02.2024]
- [15] Karas, D., Nesić, S. CO₂ sources, transportation, and storage possibilities in Serbian oil and gas fields, in *Proc. 10th Trondheim Conference on CO₂ Capture, Transport and Storage*, Trondheim, Norway, June 17-19, 2019. <https://www.sintef.no/globalassets/project/tccs-10/dokumenter/c4/tccs-10-nis-presentation-app.pptx.pdf> [pristupljeno 28.02.2024]
- [16] Tomic, L., Karović-Marčić, V., Danilović, D. The preliminary selection of oil reservoir in Serbia for carbon dioxide injection and storage by a multicriteria decision-making approach: a case study, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 2021. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1936303>
- [17] Statistical Office of the Republic of Serbia. Statistical calendar of the Republic of Serbia, Belgrade, 2023. <https://www.stat.gov.rs/sr-latn/publikacije/publication/?p=15133> [pristupljeno 28.02.2024]
- [18] Statistical Office of the Republic of Serbia. Energy Balances, 2022, Belgrade, 2024. <https://www.stat.gov.rs/sr-latn/publikacije/publication/?p=15618> [pristupljeno 28.02.2024]
- [19] The World Bank. CO₂ emissions (metric tons per capita). <https://data.worldbank.org/indicator/EN.ATM.CO2E.PC?locations=RS&view=map> [pristupljeno 28.02.2024]
- [20] Scarlat, N., Prussi, M., Padella, M. Quantification of the carbon intensity of electricity produced and used in Europe, *Applied Energy*, Vol. 305, 117901, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117901>
- [21] International Renewable Energy Agency. Renewable Energy Prospects for the European Union, Author, Abu Dhabi, 2018. <https://www.irena.org/Publications/2018/Feb/Renewable-energy-prospects-for-the-EU> [pristupljeno 28.02.2024]
- [22] Sullivan, J., Burnham, A., Wangal, M. *Energy-Consumption and Carbon-Emission Analysis of Vehicle and Component Manufacturing*, Argonne National Laboratory, Argonne, Ill., USA, 2010. <https://publications.anl.gov/anlpubs/2010/10/68288.pdf> [pristupljeno 27.02.2024]
- [23] Weldon, P., Morrissey, P., O'Mahony, M. Long-term cost of ownership comparative analysis between electric vehicles and internal combustion engine vehicles, *Sustainable Cities and Society*, Vol. 39, pp. 578-591, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.02.024>
- [24] Doucette, R.T., McCulloch, M.D. Modeling the prospects of plug-in hybrid electric vehicles to reduce CO₂ emissions, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 7, pp. 2315-2323, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.045>
- [25] The Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure (WLTP), 2021. <https://www.vehicle-certification-agency.gov.uk/fuel-consumption-co2/the-worldwide-harmonised-light-vehicle-test-procedure> [pristupljeno 28.02.2024]
- [26] Peljto, S. U Srbiji ima 1.700 električnih vozila i nedovoljno punjača. *Bloomberg Adria*, 2023. <https://rs.bloombergadria.com/ostalo/opste/27038/u-srbiji-1700-elektricnih-vozila-i-nedovoljno-punjaca/news/> [pristupljeno 01.03.2024]
- [27] Fominykh, S. Strategy Assignment: A Case Study of Oil and Gas Company (Part I), *Journal of Mechatronics, Automation and Identification Technology*, Vol. 6, No. 1, pp. 14-20, 2021. <http://jmail.org/jmail-vol-6-no-1-pp-14-20-2021/> [pristupljeno 27.02.2024]
- [28] Naftna industrija Srbije. NIS Sustainable development report, 2021. <https://www.nis.rs/wp-content/uploads/2022/04/odrzivi-low.pdf> [pristupljeno 28.02.2024]
- [29] New car registrations: +13.9% in 2023; battery electric 14.6% market share. *AREA*, 2024. <https://www.acea.auto/pc-registrations/new-car-registrations-13-9-in-2023-battery-electric-14-6-market-share/> [pristupljeno 28.02.2024]
- [30] Lazarević, J. U Srbiji 2.699 električnih vozila i jedan punjač na 100.000 stanovnika. *Bloomberg Adria*, 2024. <https://rs.bloombergadria.com/bloomberg-adria-tv/bloomberg-adria-tv/53400/u-srbiji-2699-elektricnih-vozila-i-jedan-punjac-na-100000-stanovnika/news/> [pristupljeno 01.03.2024]
- [31] Strategija bezbednosti saobraćaja Republike Srbije za period od 2023. do 2030. godine sa Akcionim planom za period od 2023. do 2025. godine, Službeni glasnik RS", broj 84 od 5. oktobra 2023. <https://www.pravno-informacioni-sistem.rs/SlGlasnikPortal/eli/rep/sgrs/vlada/strategija/2023/84/1/reg> [pristupljeno 01.03.2024]
- [32] Fominykh, S. The Serbian Climate Change Act: The Perspective of Implementation of Carbon Capture And Storage Projects in Oil And Gas Industry, in *Proc. 49th International Symposium on Operational Research Sym-Op-Is 2022*, Vrnjačka Banja, Srbija, pp. 549-554, 19-22 September 2022.

AUTORI/AUTHORS

Sergey Fominykh - Mr, Director of the Energy Block, Naftna industrija Srbije – NIS a.d. Novi Sad, fominykh.sa@nis.rs, ORCID [0009-0005-2276-3572](https://orcid.org/0009-0005-2276-3572)

Dusan Stanar - Mr, Strategy manager, Naftna industrija Srbije – NIS a.d. Novi Sad, dusan.stanar@nis.rs

Rešavanje zagonetke energetske tranzicije Srbije: Vožnja električnim vozilima dovodi do veće emisije CO₂ nego vožnja tradicionalnih vozila sa SUS motorom

Rezime - Ovaj se članak bavi veoma zanimljivim paradoksom koji se pojavljuje u sferi saobraćajnog prevoza u Srbiji, koji predviđa da će električna vozila proizvoditi više emisije ugljen-dioksida (CO₂) nego motor sa unutrašnjim sagorevanjem (SUS) do 2030. Procenjuje se da će vožnja električnim vozilima u Srbiji tokom predstojećih pet godina za približno 25% povećati emisiju CO₂ u poređenju sa vozilima pogonjenim SUS motorima. Ovo istraživanje otkriva osnovne faktore koji stoje iza ovog paradoksa, uključujući energetske mikse Srbije kojim dominira lignit. Upoređujući ovo sa čistijim izvorima energije Evropske unije, članak naglašava odloženo smanjenje emisije CO₂ iz električnih vozila u Srbiji. Štaviše, istražuje karbonski otisak povezan sa proizvodnjom električnih vozila i naglašava izazove koje predstavljaju energetska infrastruktura i vozni park u zemlji. Članak se završava uvidom u potencijalna rešenja, naglašavajući potrebu da Srbija ubrza svoj prelazak na obnovljive izvore energije, sa ciljem da se uskladi sa ciljevima do 2030. godine, dok se paritet sa nivoima emisija u EU predviđa do 2040. godine.

Ključne reči - energija, održivost, emisije SO₂, električna vozila

Mokra polja kao potencijalno rešenje u procesu prečišćavanja otpadnih voda

Nikola Stanković

Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“, Balkanska 13, 11 000 Beograd

Rezime - Mokra polja su inženjerski sistemi koji si koriste u procesu prečišćavanja otpadnih voda i unapređenju kvaliteta vode. Mokra polja su projektovani sistemi koji su izgrađeni da iskoriste prednosti procesa koji se dešavaju u prirodnim močvarama, uključujući vegetaciju, zemljište i prateću mikrobnu aktivnost za prečišćavanje otpadnih voda. Ovi sistemi se mogu koristiti kao deo decentralizovanih sistema za tretman otpadnih voda i mogu se koristiti za prečišćavanje različitih vrsta otpadnih voda. U radu su prikazani različiti tipovi mokrih polja, njihova primena, kriterijumu za dizajn i načini prečišćavanja otpadne vode. Ovi sistemi se koriste kao sekundarni proces tretmana što znači da se otpadna voda prečišćava u primarnom koraku prečišćavanja pre ulaska u filter mokrih polja. Postoje različite vrste mokrih polja, kao što su mokra polja sa površinskim kretanjem otpadne vode, mokra polja sa podzemnim kretanjem otpadne vode, gde voda može horizontalno i vertikalno da se kreće, kao i hibridni sistem koji je kombinacija prethodno dva navedena sistema. Korišćenje mokrih polja za prečišćavanje otpadnih voda postaje sve popularniji sistem u različitim delovima sveta, kao u razvijenim zemljama tako i u zemljama u razvoju.

Ključne reči - prečišćavanje otpadnih voda, tipovi mokrih polja, dizajn mokrih polja, procesi prečišćavanja otpadne vode

I UVOD

Voda je jedna od najvažnijih dobara ekosistema [1]. Pristup vodi je osnovno ljudsko pravo [2] i vitalni element za ostvarivanje drugih ljudskih prava. Danas postoji ogromna i neodrživa upotreba vode koja rezultira njenim prekomernim korišćenjem i visokim nivoom zagađenja. Zagađenje se javlja jer otpadne vode mogu sadržati mnoge vrste patogenih mikroorganizama, suspendovane čestice, organske i neorganske supstance koje mogu imati veliki uticaj na ljudsko zdravlje. Glavni uticaj na ljudsko zdravlje određen je prisustvom patogena koji uključuju bakterije, viruse, protozoe i parazitske crve (helminthe) koji mogu izazvati različite bolesti [3]. Mineralno zagađenje uključuje pesak, glinu, rastvorene mineralne soli, kiseline, baze itd. Organsko zagađenje može biti biljnog, ljudskog ili životinjskog porekla. Zagađenje u otpadnim vodama može se javiti u obliku rastvora, koloida i suspenzija. Stoga, hemijski i bakteriološki sastav otpadnih voda mora se kontrolisati i pratiti kako bi se obezbedilo javno zdravlje [4].

II TEHNOLOGIJE ZA PRERADU OTPADNE VODE

Konvencionalna obrada otpadnih voda uključuje fizičke, hemijske i biološke procese i operacije. Sastoje se od primarne,

sekundarne i tercijarne faze različitih stepena obrade otpadnih voda čija je funkcija uklanjanje čvrstih materija, organske materije i hranljivih materija iz otpadnih voda [5]. Ove tehnologije troše mnogo energije za svoj rad [1]. Nadalje, jedan od najvažnijih aspekata za poboljšanje kvaliteta vode je uklanjanje hranljivih materija što zahteva naprednu i skupu tehnologiju [6]. Tipična stopa uklanjanja za konvencionalne sisteme zagađivača je 80-90% za biohemijsku potrošnju kiseonika (BPK), 70-80% za suspendovane čestice, 20-30% za ukupni azot (TN) i manje od 20% za ukupni fosfor (TP) [7]. Ipak, čak i sa visoko efikasnim sistemom obrade, postoji gubitak od 20% azota, 5% fosfora i 90% kalijuma [8].

U slučaju alternativnih tehnologija, ističe se jedan od trenutnih predloga, a to je obrada otpadnih voda korišćenjem akvatičnih biljaka u posebno konstruisanim močvarama ili mokrim poljima. Ovo je biološka metoda obrade otpadnih voda koja se zasniva na složenom skupu sledećih elemenata: vode, supstrata, otpada, mikroorganizama i biljaka [9]. Sistem imitira prirodni proces prečišćavanja otpadnih voda koji postoji u prirodnim močvarama. To znači da su to konstruisane ekosistemske usluge koje su slične prirodnim ekosistemskim uslugama. Stoga, mokra polja predstavljaju sistem koji ima određene ekološke i ekonomske vrednosti. Ove vrednosti mogu biti izražene u obliku direktnih ili indirektnih vrednosti koje su konačno važne za ljudsko blagostanje. Nadalje, mokra polja pružaju vitalne dobra i usluge poput regulacije gasova, punjenja podzemnih voda, izlazne vode, one su stanište za raznolike vrste i imaju naučne i obrazovne vrednosti [10].

Dodatno, kao moguće rešenje za male i srednje zajednice, Vodič Evropske komisije (2001): "Procesi za obradu otpadnih voda prilagođeni malim i srednjim zajednicama (od 500 do 5000 ekvivalenata populacije)" predlaže sledeće tehnike za obradu otpadnih voda: Biološki filteri; Rotirajući biološki kontaktni sistemi (Biodiskovi); Aktivni mulj - Proširena aeracija; Infiltracija - perkolacija kroz pesak; Vertikalni filteri sa trskom; Horizontalni filteri sa trskom; Prirodne lagune (stabilizacioni bazeni); Lagune sa makrofitima; i Aerotankovi.

III MOKRA POLJA

Sistemi mokrih polja su dizajnirani da poboljšaju kvalitet vode. Prvobitno su razvijene kako bi se iskoristila i unapredila biodegradacijska sposobnost biljaka [11]. To su inženjerski sistemi koji su izgrađeni da iskoriste procese koji se odvijaju u prirodnim močvarama uključivanjem vegetacije, zemljišta i prateće mikrobiološke aktivnosti radi tretmana otpadnih voda [12]. Prvi eksperiment o mogućnosti korišćenja biljaka za

pročišćavanje vode u Evropi izveden je od strane Max-Planck Instituta 1950-ih godina pod vođstvom dr. Käthe Seidel [13]. U ovom radu opažena je obična rogozina (*Schoenoplectus lacustris*) i prepoznato je da ova vrsta može ukloniti organske i neorganske supstance iz zagađene vode [14].

Koncept metode korena razvijen je u Nemačkoj i bio je pionirski u sistemu prečišćavanja mokrih polja, proširio se po celoj Evropi tokom 1980-ih i 1990-ih [15]. Metoda korena sadrži ležište zasaden rogozinom (*Phragmites australis*) u laganoj glini ili teškom gornjem sloju zemljišta koji može sadržavati dodatke kalcijuma, gvožđa ili aluminijuma radi poboljšanja strukture zemljišta i sposobnosti uklanjanja fosfata [14].

Danas, metode mokrih polja široko su korišćene u Evropi, pretežno u Nemačkoj, Švedskoj, Danskoj, Italiji, Holandiji, Češkoj, Francuskoj, Sloveniji, Mađarskoj i drugim zemljama. U svakoj od ovih zemalja, Danskoj, Nemačkoj i Ujedinjenom Kraljevstvu, prisutno je oko 200 sistema mokrih polja sa podzemnim tokom, a broj ove tehnologije raste i širi se veoma brzo [14]. Kao biljka koristi se obična trska (*Phragmites australis*), ali se mogu naći i druge vrste močvarnog bilja [14]. Rad na mokrim poljima u Evropi uticao je na razvoj i pojavu ove tehnologije i u Sjedinjenim Američkim Državama. U Sjedinjenim Američkim Državama, uspostavljen je hibridni sistem za prečišćavanje otpadnih voda koristeći anaerobne mikroorganizme i trsku (*Phragmites communis*) [16]. Mokra polja sa slobodnim površinskim tokom razvijene su u nekim evropskim zemljama poput Švedske, Francuske i Mađarske. Dobar primer gde su močvare ponovo obnovljene radi poboljšanja kvaliteta vode može se naći u Mađarskoj [17]. Na drugom delu sveta, dve trećine ukupnog broja mokrih polja u Severnoj Americi su sistemi sa slobodnim površinskim tokom [18].

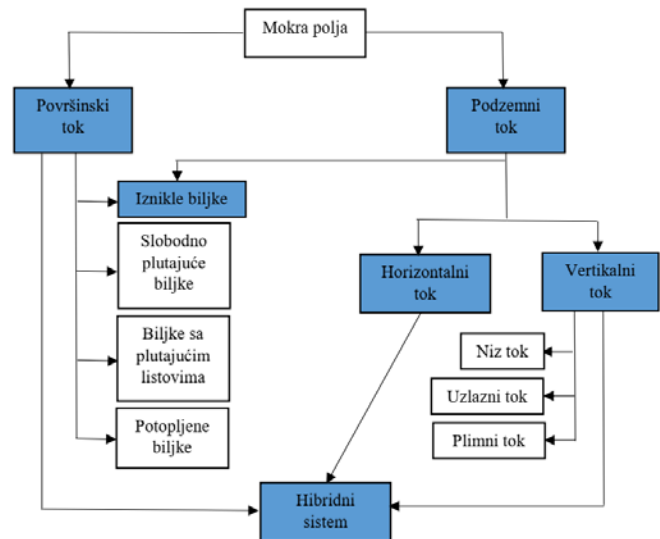
Mnoga mokra polja koriste se za prečišćavanje otpadnih voda domaćinstava gde biohemijska i hemijska potrošnja kiseonika predstavljaju indikatore za organsku materiju. Nadalje, ovaj sistem može se koristiti za uklanjanje specifičnih organskih jedinjenja, azota, fosfora, za smanjenje koncentracije teških metala, organskih hemikalija i patogenih [19]. Dakle, primenljivost mokrih polja je široka, a jedino pitanje koje je važno je njihova efikasnost u prečišćavanju otpadnih voda. Takođe, danas postoje različite vrste mokrih polja, a njihova primena može biti upitna u smislu toga koja vrsta mokrih polja je najprikladnija za određene otpadne vode.

Trenutno postoje nekoliko vrsta konstruisanih močvara koje se koriste za obradu otpadnih voda (Slika 1). Mokra polja mogu se klasifikovati prema obliku života dominantne makrofite [20]:

- makrofite slobodno plutajuće,
- potopljene makrofite,
- korenovane emergentne makrofite.

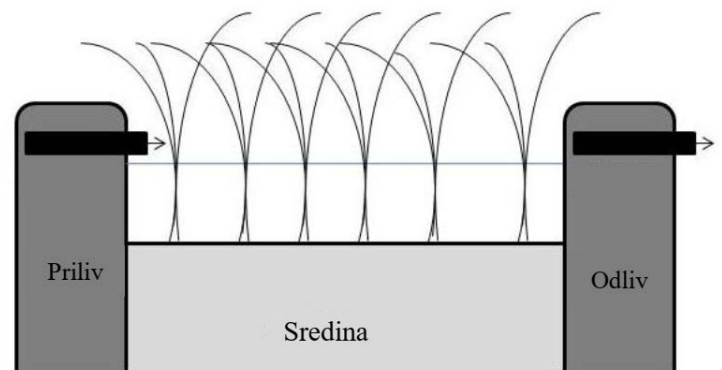
Unutar sistema sa slobodno plutajućim makrofitima prepoznate su dve pristupne strategije kao što su sistemi na temelju vodenih hijacinta i lemeša [21]. Biljke vodenih hijacinta poznate su po visokoj produktivnosti i stoga se koriste za tretman otpadnih voda. Druga klasifikacija konstruisanih močvara vrši se na osnovu hidrologije močvara [22]. Stoga razlikuju se mokra polja sa slobodnim površinskim tokom i sistemi sa podzemnim tokom.

U sistemu sa podzemnim tokom postoje horizontalni tokovi, a zbog značajne potrebe za uklanjanjem amonijaka započeo je razvoj i upotreba vertikalnih mokrih polja [23]. Postoje i hibridna mokra polja koje su obično kombinacija horizontalnog i vertikalnog toka. Ovi sistemi se koriste kako bi se postigao bolji efekat tretmana.



Slika 1. Klasifikacija mokrih polja (izmenjena prema [24]).

I pored predrasuda o mokrim poljima sa slobodnim površinskim tokom da imaju lošu efikasnost tokom hladnih perioda, mnoge su izgrađene širom sveta (Slika 2). Prvo mokro polje sa slobodnim površinskim tokom izgrađeno je u Holandiji 1967. godine [23]. Ovaj sistem se koristi u Mađarskoj za tretman otpadnih voda [25]. Ovaj sistem se takođe često koristi u Severnoj Americi [26]. Obično mokra polja sa slobodnim površinskim tokom i emergentnim makrofitima sastoje se od plitkog zatvorenog bazena ili skupa bazena koji sadrže 20-30 cm korenskog zemljišta, sa dubinom vode od 20-40 cm i guste izdignute vegetacije koja pokriva više od 50% površine [23].



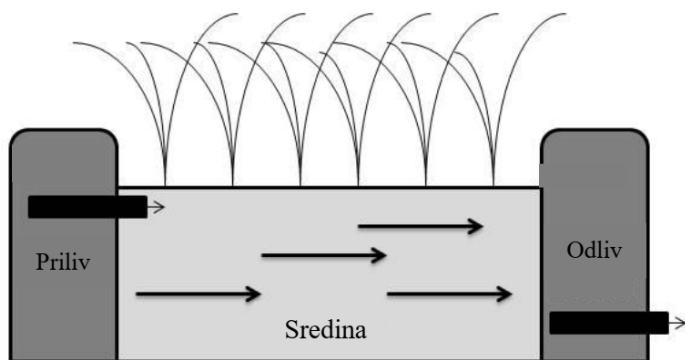
Slika 2. Šematski prikaz emergentnog sistema tretmana zasnovanog na makrofitima: sistem sa površinskim tokom

U Evropi se generalno koriste vrste za mokra polja sa slobodnim površinskim tokom kao što su: *Phragmites australis* (obična trska), *Scirpus lacustris*; u Severnoj Americi: *Typha spp.* (trska), *Scirpus spp.*, *Sagittaria latifolia*; Novi Zeland i Australija:

Phragmites australis, *Typha* spp., *Bolboschoenus* (*Scirpus*) *fluvialis*, *Eleocharis sphacelata*, *Scirpus tubernaemontani* (*Scirpus validus*, mekostabljika) [23]. Mokra polja sa slobodnim površinskim tokom imaju dobru efikasnost uklanjanja nekih zagađivača. Organske materije uklanjaju se putem mikrobiološke aktivnosti, a ovaj proces određen je ravnotežom između snabdevanja kiseonikom i opterećenjem ugljenikom [27]. Azot se uklanja procesima nitrifikacije i denitrifikacije [23]. Postoje aerobne zone unutar mokrih polja sa slobodnim površinskim tokom koje su blizu površine zbog atmosferske difuzije i anoksične ili anaerobne zone blizu sedimenta. U aerobnim zonama amonijak se oksidiše nitrifikacionim bakterijama, dok se u anoksičnim zonama nitrat pretvara u slobodni azot ili azotni oksid denitrifikacionim bakterijama. Uklanjanje fosfora u mokrim poljima sa površinskim tokom vrši se procesima adsorpcije, apsorpcije i precipitacije [23]. Ipak, uklanjanje fosfora obično je nisko zbog ograničenog kontakta između otpadnih voda i čestica zemljišta koje apsorbuju ili precipitiraju fosfor [22]. Osim toga, precipitacija sa Al, Ca i Fe jonima je ograničena zbog manjeg kontakta između vodenog stuba i zemljišta [26].

Mokra polja sa podzemnim tokom dizajnirane su da omoguće otpadnim vodama da teku ispod površine kroz supstrat. Supstrat kroz koje otpadne vode prolaze obično je napravljeno od šljunka ili zemlje [14]. Dubina supstrata obično je između 0,6 i 1,0 m, a dno supstrata je nagnuto kako bi se izbeglo preliivanje vodene struje [19]. Postoje dva osnovna tipa mokrih polja sa podzemnim tokom: horizontalna i vertikalna mokra polja [9]. Otpadne vode gravitaciono teku, horizontalno ili vertikalno, kroz supstrat koja sadrži i omogućava kontakt sa mikroorganizmima koji žive u vezi sa podlogom i korenjem biljaka [19].

U horizontalnim mokrim poljima sa podzemnim tokom, otpadne vode imaju više ili manje horizontalnu putanju i kreću se od ulaznog dela kroz porozni medijum ili filtracionu podlogu ispod površine do izlaznog dela gde se sakupljaju pre izlaska iz bazena (Slika 3). Tokom ovog procesa, otpadne vode su izložene mreži aerobnih, anaerobnih i anoksičnih zona gde se odvijaju glavni mehanizmi uklanjanja zagađivača i gde se zagađenje uklanja putem mikrobiološke degradacije i drugih hemijskih i fizičkih procesa [28]. Očekuje se visok efekat tretmana otpadne vode za ove sisteme ako je površina trske 3-5 m² ekvivalenta populacije [15].

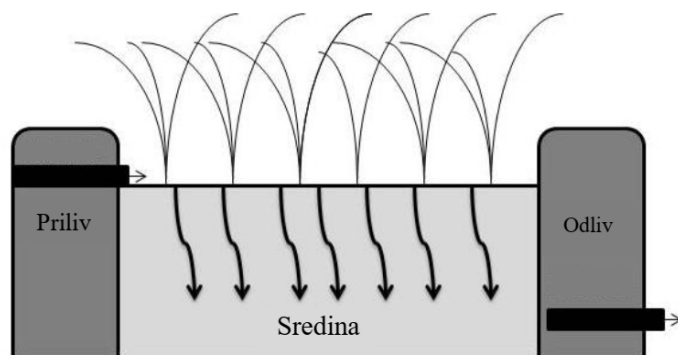


Slika 3. Šematski prikaz emergentnog sistema tretmana zasnovanog na makrofitima: sistem sa horizontalnim podzemnim tokom

Horizontalna mokra polja sa podzemnim tokom uglavnom su korišćeni za tretman komunalnih ili gradskih otpadnih voda, ali je njihova upotreba proširena na tretman poljoprivrednih, industrijskih otpadnih voda, ili otpadnih voda sa deponija [23]. U horizontalnim mokrim poljima često se koristi obična trska (*Phragmites australis*) kao biljka, ali se koriste i druge biljke kao što su *Phragmites arundinacea*, *Glyceria maxima* i *Typha* spp. [27]. Iako su neki eksperimentalni radovi pokazali da ovaj sistem ima određena ograničenja, oni predstavljaju najčešće korišćeni sistem za tretman otpadnih voda širom sveta [24].

Mokra polja sa podzemnim vertikalnim tokom zahtevaju manje prostora i imaju veću efikasnost u tretmanu otpadnih voda u poređenju sa horizontalnim tokom [29]. Ovaj sistem obično se primenjuje kao biološka faza (sekundarni tretman), a njegova efikasnost zavisi od faze prethodnog tretmana [21]. Ipak, postoje primeri gde se ovaj sistem koristi za tercijarni tretman, i efikasnost uklanjanja amonijaka bila je između 40-90% [30].

Mokra polja sa podzemnim vertikalnim tokom predstavljaju ravnu površinu poslaganog šljunka i peska koji je zasađen makrofitima (Slika 4). Obično je veličina šljunka veća u donjem sloju (30-60 mm) i manja u gornjem sloju (6 mm) [24]. Da bi se izbeglo zapušavanje sistema, veoma je važno pravilno odabrati materijal za filtraciju, hidrauličku opterećenost i ravnomerno raspodeliti otpadnu vodu po površini sistema [31].

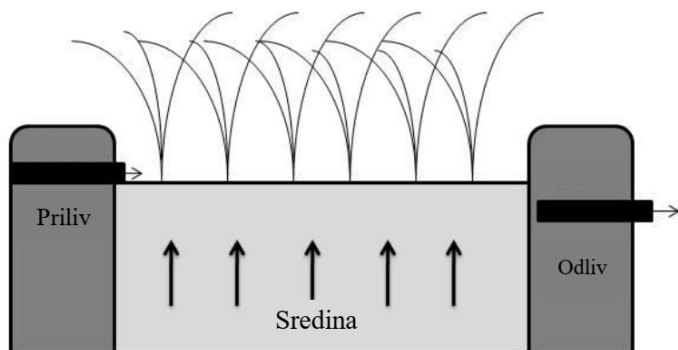


Slika 4. Šematski prikaz emergentnog sistema sa vertikalnim podzemnim tokom vode

U ovom sistemu, otpadne vode periodično se pumpaju na površinu, a zatim prolaze naniže kroz sloj filtera ka odvodnom delu [23]. Najvažniji faktori koji se moraju uzeti u obzir pri dizajniranju ovog sistema odnose se na filter sistem koji mora biti napravljen na način da omogući prodiranje otpadne vode kroz medijum pre dolaska naredne doze, a istovremeno mora zadržati dovoljno otpadne vode kako bi obezbedio kontakt sa rastućim bakterijama radi postizanja potrebnog tretmana [32]. Dakle, otpadne vode se intermitentno dovode u serijama, i tek nakon što sva voda prođe kroz krevet, nova serija može biti napunjena vodom. Ovo omogućava difuziju kiseonika u aerobnijim uslovima i kao rezultat bolji proces nitrifikacije [22]. Još jedan faktor koji se mora uzeti u obzir kako bi se postigle efikasne performanse i dobar dizajn je dovoljna površina koja mora omogućiti transfer kiseonika i adekvatan rast bakterija [32]. U poređenju sa horizontalnim sistemima, ovaj sistem zahteva manje zemljišta, obično 1-3 m² ekvivalenta populacije [22]. Pokazano je da vertikalni sistemi, u skladu sa zakonodavstvom u

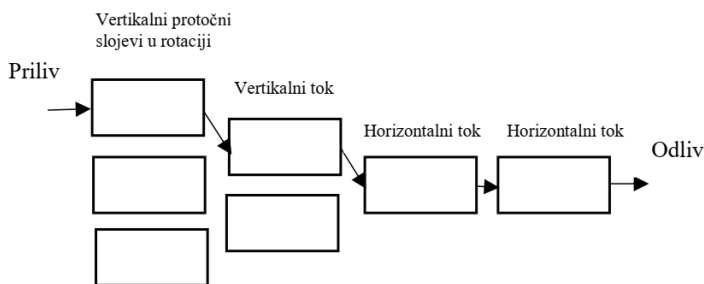
različitim zemljama, mogu zadovoljiti stroge zahteve za izlazne vode [21]. Ipak, neka iskustva pokazuju da njihova efikasnost zavisi od procesa prethodnog tretmana kao što su taložni rezervoar ili septička jama [21].

U Brazilu su korišćene mokra polja sa vertikalnim tokom usmerenim naviše za tretman komunalnih i industrijskih otpadnih voda (Slika 5). Ovaj sistem u Brazilu naziva se "filtrirajuće zemljište" i proučavan je u Švedskoj, Australiji i Novom Zelandu [24]. Hidraulika vertikalnog toka naviše može se kombinovati sa sistemom perkolacije naniže sa ciljem recikliranja hranljivih materija za poljoprivrednu upotrebu ili ishranu životinja [33].



Slika 5. Šematski prikaz mokrih polja sa vertikalnim uzlaznim tokom

Kako bi se poboljšale performanse mokrih polja, dizajniran je hibridni sistem. Različiti tipovi mokrih polja mogu se kombinovati kako bi se poboljšala efikasnost prečišćavanja otpadnih voda u slučaju uklanjanja azota ili fosfora. Međutim, najčešće, hibridni sistem se sastoji od sistema horizontalnog i vertikalnog toka. U ovom hibridnom sistemu, nekoliko mokrih polja sa podzemnim horizontalnim i vertikalnim tokom radi u seriji, što poboljšava procese prečišćavanja otpadne vode [22]. Vertikalne faze toka obično su zasađene *Phragmites australis*, dok horizontalne faze toka sadrže druge vrste emergentnih makrofitnih biljaka kao što su *Iris*, *Schoenoplectus*, *Sparganium*, *Carex*, *Typha* i *Acorus* [21].



Slika 6. Hibridni sistem sa vertikalnim tokom praćen horizontalnim tokom, zasnovan na konceptima Seidela

Prvi hibridni sistem sastojao se od nekoliko mokrih polja postavljenih paralelno ili u kaskade vertikalnih faza toka, koje su sledile dve ili tri horizontalne faze toka u seriji. Nazvan je Seidel sistem (Slika 6) [21]. U ovom sistemu su iskorišćene prednosti horizontalnih i vertikalnih sistema toka kako bi se obezbedila

efektivna izlazna voda sa niskim biodegradabilnim zahtevom za kiseonikom i konačno sa niskim sadržajem azota [15].

Zbog toga postoji sve veći interes za korišćenje i testiranje ovakvog sistema za tretman otpadnih voda. Ovaj sistem je implementiran u Italiji, Sloveniji, Francuskoj, Nemačkoj, Austriji, Norveškoj, Danskoj, Poljskoj i Irskoj. Osim komunalnih otpadnih voda, ovaj sistem se koristi za tretman raznovrsnih otpadnih voda sa deponija, klanica, uzgoja škampa i ribe i vinarija [22]. U Danskoj je izgrađena dvostepena sistem koji je imao mehanički pretretman, horizontalni podzemni tok za denitrifikaciju, biološko uklanjanje kiseonika i suspendovanih čestica i vertikalni tok za nitrifikaciju. Ovaj sistem takođe primenjuje recikliranje nitrifikovane izlazne vode iz vertikalnog toka na krajnji deo horizontalnog sistema gde denitrifikacija može da se odvija u manje aerobnim uslovima kako bi se uklonio azot (Slika 7) [34].



Slika 7. Hibridni sistem zasnovan na konceptu Briksa i Johansena

IV PRIMENA MOKRIH POLJA

Pretežno, mokra polja se koriste za tretman komunalnih i industrijskih otpadnih voda. Nedavno je njihova upotreba proširena na prečišćavanje poljoprivrednih, industrijskih otpadnih voda, gradskih atmosferskih voda, različitih otpadnih voda sa deponija [26]. Takođe, vrste otpadnih voda koje se mogu tretirati u mokrim poljima variraju od sirove do sekundarne otpadne vode [35]. Mokra polja koja se koriste za tretman svih ovih otpadnih voda i drugih izvora zagađene vode pokazuju veliko obećanje zbog velike mogućnosti kontrole procesa i manje šanse za izazivanje nepovoljnih ekoloških efekata [35]. U slučaju tretmana komunalnih otpadnih voda, mokra polja se koriste kao glavna ili treća faza [36]. Za tercijarni tretman mogu se koristiti i površinski i podzemni sistemi mokrih polja.

Mokra polja sa slobodnim površinskim tokom sa emergentnom vegetacijom, osim za tretman komunalnih otpadnih voda, imaju primenu i za druge otpadne vode poput stajnjaka, oticaja sa pašnjaka, poljoprivredne drenaže, atmosferskih oticaja, otpadnih voda iz rudnika, rafinerija, fabrika papira i celuloze, uzgoja škampa, deponija, fabrika šećera, otpadnih voda drvne i metalurške industrije [22].

Oba tipa podzemnih mokrih polja, horizontalni i vertikalni, imaju primenu u tretmanu komunalnih i industrijskih otpadnih voda, ali se njihova upotreba proširila i na druge vrste otpadnih voda poput industrijskih, poljoprivrednih, deponijskih, otpadnih voda

rafinerija, različitih oticaja, otpadnih voda iz proizvodnje mleka i sira [22]. Kao glavna faza tretmana, podzemna mokra polja sa horizontalnim ili vertikalnim tokom primenjuju se u zavisnosti od željenog kvaliteta izlazne ili prečišćene vode [36]. Ako je potrebna niska koncentracija amonijaka u izlaznoj vodi, tada vertikalna mokra polja sa dovoljnim snabdevanjem kiseonikom i periodičnim punjenjem mogu obezbediti dobru nitrifikaciju i dobre performanse prečišćavanja [36]. Vertikalna mokra polja obično se koriste za tretman otpadnih voda gde su postavljeni limiti za azot [22].

U slučaju hibridnih mokrih polja, različiti tipovi mokrih polja mogu se koristiti kako bi se poboljšale karakteristike prečišćavanja otpadne vode. Ipak, ova kombinacija se obično vrši kako bi se poboljšalo uklanjanje azota. Za različite vrste otpadnih voda primenjene su različite kombinacije mokrih polja. Primeri su vertikalni (VF) i horizontalni tok (HF) koji se koriste za tretman komunalnih otpadnih voda u kombinaciji VF-HF ili HF-VF. Osim toga, ove kombinacije (VF-HF/HF-VF) mogu se koristiti za tretman otpadnih voda kao što su procedne otpadne vode sa deponija, otpadne vode iz bolnica, otpadne vode mlekara i farmi svinja [23]. Takođe, prijavljene su i druge kombinacije mokrih polja sa slobodnim površinskim tokom vode i horizontalnog toka, kao i vertikalni tok u kombinaciji sa horizontalnim i slobodnim površinskim tokom vode.

Dodatno, industrijske otpadne vode poput rudarskih i metalurgijskih otpadnih voda, otpadne vode od naftne industrije, otpadnih voda od obrade metala, specifičnih organskih jedinjenja proizvedenih od strane vojske kao što su hlorisani ugljovodonici, aromatična organska jedinjenja, cijanidi, surfaktanti, rastvarači, antifrizi, pesticidi, trihloretilen mogu se ukloniti ili prečistiti sistemom mokrih polja [36].

V ŽIVOTNI VEK MOKRIH POLJA I ZAKLJUČAK

Imajući u vidu da su mokra polja kompleksni sistemi koji obuhvataju biološke, hemijske i hidrološke procese, to dovodi do pretpostavke da održivost ovih sistema ili dugoročna efikasnost može biti upitna. Životni vek mokrih polja može biti važan prilikom upoređivanja ovih sistema sa konkurentnim ili sličnim tehnologijama. Efikasnost mokrih polja zavisi od različitih faktora. Ti faktori takođe utiču na životni vek mokrih polja. Dizajn i konstrukcija mokrih polja su jedan od ključnih faktora koji utiču na buduće upravljanje i održavanje sistema. Stoga, funkcionalna očekivana starost treba da bude uključena u parametre dizajna. U nekim tipovima mokrih polja mogu se desiti procesi poput zapušnja ili nagomilavanja čvrstih materija i nagomilavanja mrtvog biljnog materijala, što može smanjiti kapacitet mokrih polja. Dugovečnost mokrih polja zavisi od različitih faktora kao što su hidrauličko opterećenje, vreme zadržavanja otpadne vode, rast biofilma, opterećenja i koncentracija različitih загаđivača poput fosfora [37]. Kao rezultat, efikasnost uklanjanja različitih загаđivača može opasti, što na kraju dovodi do loših performansi. U tom smislu je neophodno ponovo izgraditi sistem ili promeniti neke ključne komponente mokrih polja. Podmlađivanje mokrih polja može se postići čišćenjem filtera od mulja, blata i ponovnom vegetacijom [38]. U slučaju tretmana otpadne vode opterećena organskim загаđenjem, životni vek mokrih polja pokazan je otprilike 20

godina [11]. Dugovečnost mokrih polja može se odrediti kapacitetom uklanjanja medija ili materijala koji se koriste. U slučaju uklanjanja nutrijenata, potencijal zasićenja mokrih polja može uticati na njihov životni vek. Proces uklanjanja fosfora je ograničen filtera medija i stoga je potrebno zameniti ili oprati supstrat [39]. Stoga se supstrat može odabrati prema njihovom kapacitetu zadržavanja fosfora i time uticati na dugovečnost mokrih polja. Zavisno od dizajna i tipa otpadne vode koja se tretira, dugovečnost supstrata može se predvideti između 7-20 godina [39]. Ipak, postoje različiti materijali koji se mogu koristiti za uklanjanje fosfora i to može na kraju uticati na životni vek mokrih polja.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Ahmed, M. T. Life Cycle Analysis in Wastewater: A Sustainability Perspective, in: Barcelo, D., Petrovic, M. (Eds.), *Waste Water Treatment and reuse in the Mediterranean Region. The Handbook of Environmental Chemistry*, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 125-154. 2011. <https://doi.org/10.1007/978-2010-75>
- [2] Scanlon, J., Cassar, A., Nemes, N. Water as a human right? IUCN Environmental policy and law paper, No. 51, 2008. <https://doi.org/10.2305/IUCN.CH.2005.EPLP.51.en>
- [3] Drinan, J.E. *Water and wastewater treatment – a guide for the nonengineering professional*, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida. 2001.
- [4] Ellis, T.G. Chemistry of wastewater, in: *Environmental and ecological chemistry*, Vol. 2, pp. 327-350, (EOLSS) Publications, 2004.
- [5] Pescod, M.B. *Wastewater treatment and use in agriculture-FAO irrigation and drainage, paper 47*, Food and agriculture organization of the United Nations, Rome. 1992. <https://www.fao.org/4/T0551E/t0551e00.htm> [pristupljeno 28.01.2024]
- [6] Carey, R.O., Migliaccio, K.W. Contribution of wastewater treatment plant effluents to nutrient dynamics in aquatic systems: a review, *Environmental Management*, Vol. 44, pp. 205-217, 2009. <https://doi.org/10.1007/s00267-009-9309-5>
- [7] Lee, C., Fletcher, T.D., Sun, G. Nitrogen removal in constructed wetland systems, *Engineering in Life Sciences*, Vol. 9, No. 1, pp. 11-22, 2009. <https://doi.org/10.1002/elsc.200800049>
- [8] Gajurel, D.R., Li, Z., Oterpohl, R. Investigation of the effectiveness of source control sanitation concepts including pre-treatment with Rottebehalter, *Water Science and Technology*, Vol. 48, No. 1, pp. 111-118, 2003. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12926627/> [pristupljeno 02.02.2024]
- [9] Davis, L. *Handbook of constructed wetlands - a guide to creating wetlands for: agricultural waste water, domestic waste water, coal mine drainage, storm water in the Mid-Atlantic region*, Vol. 2, Natural Resources Conservation Service and the US Environmental Protection Agency, 1995.
- [10] Yang, W., Chang, J., Xu, B., Peng, C., Ge, Y. Ecosystem service value assessment for constructed wetlands: a case study in Hangzhou, China, *Ecological Economics*, Vol. 68, No. 1-2, pp. 116-125, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2008.02.008>
- [11] Shutes, R.B.E. Artificial wetlands and water quality improvement, *Environment International*, Vol. 26, No. 5-6, pp. 441-447, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(01\)00025-3](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(01)00025-3)
- [12] Vymazal, J. Removal of nutrients of various types of constructed wetlands, *Science of the Total Environment*, Vol. 380, No. 1-3, pp. 48-65, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- [13] Vymazal, J. Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience, *Environmental Science and Technology*, Vol. 45, No. 1, pp. 61-69, 2011. <https://doi.org/10.1021/es101403q>
- [14] Brix, H. Use of constructed wetlands in water pollution control: historical development, present status, and future perspectives, *Water Science and Technology*, Vol. 30, No. 8, pp. 209-223, 1994. <https://doi.org/10.2166/wst.1994.0413>
- [15] Wolverton, B.C. Hybrid wastewater treatment system using anaerobic microorganism and reed (*Phragmites communis*), *Economic Botany*, Vol. 36, No. 4, pp. 373-380. 1982. <https://doi.org/10.1007/BF02862693>
- [16] Brix, H., Schierup, H.H. The use of aquatic macrophytes in water-pollution control, *Ambio*, Vol. 18, No.2, pp. 100-107, 1989.

- [17] Knight, R.L., Ruble, R.W., Kadlec, R.H., Reed, S. Wetlands for wastewater treatment: Performance database, in: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed wetlands for water quality improvement*. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp: 35-58. 1993. <http://dx.doi.org/10.1201/9781003069997-5>
- [18] Haberl, R., Grego, S., Langergraber, G., Kadlec, R.H., Cicalini, A.R., Dias, S.M., Novais J.M., Aubert, J., Gerth, A., Hartmut, T., Hebner, A. Constructed Wetlands for the Treatment of Organic Pollutants, *Journal Solis and Sediments*, Vol. 3, No. 2, pp. 109-124, 2003. <https://doi.org/10.1007/BF02991077>
- [19] Brix, H. Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes, and treatment performance, in: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed Wetland for Water Quality Improvement*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp. 9-22. 1993. <http://dx.doi.org/10.1201/9781003069997-3>
- [20] Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Haberl, R., Perfler R., Laber J. Removal mechanisms and types of constructed wetlands, in: Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P.F., Green, M.B., Haberl, R., *Constructed wetlands for wastewater treatment in Europe*. Backhuys Publishers, Leiden, pp. 17-66, 1998.
- [21] Vymazal, J. Constructed wetlands for wastewater treatment, *Water Open Access*, Vol. 2, No. 3, pp. 530-549, 2010. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- [22] Vymazal, J. Constructed wetlands for wastewater treatment: a review, in *Proc. 12th World Lake Conference (Taal 2007)*, Jaipur, Rajasthan, India, pp. 965-980, 28 October - 2 November, 2007.
- [23] Vymazal, J., Kröpfelova, L. *Wastewater treatment in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow*, Springer Science & Business Media, 2008.
- [24] Lakatos, G., Kiss, M. K., Kiss, M., Juhász, P. Application of constructed wetlands for wastewater treatment in Hungary, *Water Science and Technology*, Vol. 35, No. 5, pp. 331-336, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00087-5](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00087-5)
- [25] Kadlec, R.H., Knight, R.I. *Treatment wetlands*, CRC Press, Lewis Publishers. Boca Raton, Florida, 1996.
- [26] Kadlec, R.H., Knight, R. H., Vymazal, J., Brix, H., Cooper, P., Haberl R. *Constructed wetlands for pollution control: processes, performance, design and operation, Scientific and technical Report No. 8*, IWA Publishing, London, 2000. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/30978> [pristupljeno 10.02.2024]
- [27] Vymazal, J. The use constructed wetlands with horizontal sub-surface flow for various types of waste water, *Ecological Engineering*, Vol. 35, No. 1, pp. 1-17, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.08.016>
- [28] Vymazal, J. Horizontal sub-surface flow and hybrid constructed wetlands systems for wastewater treatment, *Ecological engineering*, Vol. 25, pp. 478-490, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.010>
- [29] Hoffmann, H., Platzer, C., Winker, M., Muench von, E. *Technology review of constructed wetlands: Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment*, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit GmbH (GTZ), Eschborn, 2011. <https://www.susana.org/resources/documents/default/2-930-giz2011-en-technology-review-constructed-wetlands.pdf> [pristupljeno 11.02.2024]
- [30] Schönerklee, M., Koch, F., Perfler, R., Laber, J. Tertiary treatment in a vertical flow reed bed system: a full scale pilot plant for 200-600 p.e., *Water Science and Technology*, Vol. 35, No. 5, pp. 223-230, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00072-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00072-3)
- [31] Lianfang, Z., Wei, Z., Wei, T. Clogging processes caused by biofilm growth and organic particle accumulation in lab-scale vertical flow constructed wetlands, *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 21, No. 6, pp. 750-757, 2009. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62336-0](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62336-0)
- [32] Cooper, P. The performance of vertical flow constructed wetland systems with special reference to significance of oxygen transfer and hydraulic loading rates, *Water science and Technology*, Vol. 51, No. 9, pp. 81-90, 2005. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0293>
- [33] Farahbakhshazad, N., Morrison, G.M., Filho, E.S. Nutrient removal in a vertical upflow wetland in Piracicaba, Brazil, *A Journal of the Human Environment*, Vol. 29, No. 2, pp. 74-77, 2000. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-29.2.74>
- [34] Brix, H., Johansen, N-H. Treatment of domestic sewage in a two-stage constructed wetland - design principles, in: Vymazal, J. (Ed.), *Nutrient cycling and retention in natural and constructed wetlands*, Backhuys Publishers, Leiden, Netherlands, pp. 155-163, 1999.
- [35] Bastian, R. K., Shanaghan, P. E., Thompson, B. P. Use of wetlands for municipal wastewater treatment and disposal- regulatory issues and EPA policies, in: Moshiri, G.A. (Ed.), *Constructed wetlands for water quality improvement*, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp. 265-278, 1989. <http://dx.doi.org/10.1201/9781003069850-26>
- [36] Haberl, R., Grego, S., Langergraber, G., Kadlec, R.H., Cicalini, A-R., Dias, S. M., Novais J. M., Aubert, J., Gerth, A., Hartmut, T., Hebner, A. Constructed Wetlands for the Treatment of Organic Pollutants, *Journal Solis and Sediments*, Vol. 3, No. 2, pp. 109-124, 2003. <https://doi.org/10.1007/BF02991077>
- [37] Arias, C.A., Brix, H. Phosphorus removal in constructed wetlands: can suitable alternative media be identified?, *Water Science and Technology*, Vol. 51, No. 9, pp. 267-273, 2005. <https://doi.org/10.2166/wst.2005.0335>
- [38] Miller, B.K., MacGowan, B.J., Reaves, R.P. Are constructed wetlands a viable option for your waste management system? *Historical Documents of the Purdue Cooperative Extension*, Paper 1044, Purdue University, USA, 2015. <https://docs.lib.purdue.edu/agext/1044> [pristupljeno 13.02.2024]
- [39] Drizo, A., Comeau, Y., Forget, C., Chapuis, R.P. Phosphorus saturation potential: a parameter for estimating the longevity of constructed wetland systems, *Environmental Science and Technology*, Vol. 36, No. 21, pp. 4642-4648, 2002. <https://doi.org/10.1021/es011502v>

AUTORI/AUTHORS

msr Nikola Stanković – vodeći inženjer za zaštitu životne sredine za TE i TE-TO, Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“, stankovic.nikola@eps.rs, ORCID [0000-0002-8053-4488](https://orcid.org/0000-0002-8053-4488)

Constructed Wetlands as a Potential Solution in the Wastewater Treatment Process

Abstract – Constructed wetlands are engineering systems that are used in the process of purifying waste water and improving water quality. Wetlands are engineered systems that are built to take advantage of the processes that occur in natural wetlands, including vegetation, soil, and associated microbial activity to treat wastewater. These systems can be used as part of decentralized wastewater treatment systems and can be used to treat different types of wastewater. The paper presents different types of wet fields, their application, design criteria and methods of wastewater treatment. These systems are used as a secondary treatment process meaning that the wastewater is treated in a primary treatment step before entering the wet field filter. There are different types of wet fields, such as wet fields with surface movement of wastewater, wet fields with underground movement of wastewater, where water can move horizontally and vertically, as well as a hybrid system that is a combination of the previously mentioned two systems. The use of wet fields for wastewater treatment is becoming an increasingly popular system in various parts of the world, both in developed and developing countries.

Index Terms – Wastewater treatment, Types of wetlands, Design of wetlands, Wastewater treatment processes

Postupak određivanja energetske karakteristike zgrade prema ISO 52016-1

Sandra Lj. Kovačević, Miloš J. Banjac

* Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

Rezime - Sa idejom usklađivanja sa aktuelnom EU regulativom u vezi metodologije koja se koristi za energetske sertifikacije zgrada, a u cilju ostvarenja uštede energije u sektoru zgradarstva, predstavljena i analizirana je metodologija dinamičkog časovnog proračuna za određivanje energetskih potreba zgrade za grejanjem i hlađenjem. Predstavljena metoda zasnovana je na novom, trenutno važećem standardu SRPS EN ISO 52016-1. Za razliku od prethodne časovne tzv. metode tri čvora, utvrđene sad već povučenim standardom SRPS EN ISO 13790, ova metoda ne grupiše slojeve građevinskog omotača, već svaki sloj svakog elemenata građevinskog omotača tretira odvojeno. U skladu sa tim, nova metoda proračuna zasniva se na formiranju jednačina energetskih bilansa ne samo za unutrašnju i spoljašnju graničnu površinu, već i za svaki sloj građevinskog elementa, i njihovim spregnutim rešavanjem za granične uslove koji se menjaju na časovnom nivou.

Zbog kompleksnosti ove metodologije, koja pored časovnih temperatura spoljašnjeg vazduha, časovnih vrednosti dozračenog Sunčevog zračenja, zračenja neba, ali i sopstvenog zračenja svih čvrstih površina, u obzir uzima i dinamičko ponašanje svih elemenata termičkog omotača zgrade (otpor provođenju toplote i akumulaciju toplote svakog sloja omotača), razvijen je poseban softver, čija je provera, kao i provera metodologije izvršena na primeru određivanja energetskih potreba model objekta za grejanjem i hlađenjem.

Ključne reči - metodologija časovnog proračuna; potreba zgrade za grejanjem i hlađenjem; SRPS EN ISO 52016-1

I UVOD

Cilj Evropske unije (EU) već više od trideset godina je smanjenje potrošnje energije, zbog čega posebnu pažnju posvećuje sektoru zgradarstva, budući da se u tom sektoru troši oko 40% ukupne energije proizvedene u Evropi. EU je uspostavila zakonodavni okvir, koji uključuje niz direktiva, kao što su Direktiva o energetskim performansama zgrada 2002/91/EC, koja je izmenjena 2010/31/EU i Direktiva o energetskoj efikasnosti 2012/27/EU. Glavni cilj je poboljšanje energetskih svojstava zgrada, uzimajući u obzir spoljašnje klimatske i lokalne uslove, kao i unutrašnje klimatske zahteve, koji definišu uslove komfora i ekonomičnosti. Nakon toga, EU izdaje Direktivu o izmenama i dopunama Direktive o energetskim performansama zgrada (2018/844/EU), koja je uvela nove elemente i poslala snažan politički signal o posvećenosti EU da modernizuje sektor zgradarstva u svetlu tehnoloških poboljšanja i da poveća obim renoviranja zgrada. U decembru 2021. godine, Evropska komisija predložila je reviziju direktive

(COM (2021) 802 final). Ovim izmenama dalje se nadograđuje postojeći regulatorni okvir, kako bi se održale veće ambicije i hitnije potrebe u klimatskim i društvenim akcijama.

Srbija kao potpisnica Ugovora o osnivanju Energetske zajednice, dužna je da u skladu sa odgovarajućom odlukom Ministarskog saveta Energetske zajednice usklađuje svoje nacionalno zakonodavstvo sa EU. Vlada RS usvojila je nekoliko pravilnika iz ove oblasti, među kojima je i Pravilnik o energetskoj efikasnosti zgrada ("Sl. glasnik RS", br. 61/2011). Prema ovom pravilniku, propisano je da se proračun potreba zgrade za energijom sprovodi u skladu sa metodologijom propisanom u Standardu SRPS EN ISO 13790:2010 i to najjednostavnijom od tri predviđene metode – potpuno definisanom kvazi-stacionarnom mesečnom metodom proračuna (posebna opcija je sezonski metod). Nažalost, pravilnikom je predviđeno da se energetska sertifikacija zgrade sprovodi samo prema potrebama zgrade za energijom za grejanje, a izostavljene su i zanemarene potrebe zgrade za energijom za hlađenje, obuhvatanje uticaja vrste i efikasnosti termo-tehničkih sistema koji obezbeđuju ove potrebe, kao i korišćenje obnovljivih izvora energije. Najveći nedostatak ove, trenutno važeće regulative, je što je Standard SRPS EN ISO 13790:2010 povučen iz upotrebe još 2017. godine, a njega su zamenili SRPS EN ISO 52016-1 i SRPS EN ISO 52016-2.

Zbog toga, a sa idejom usklađivanja sa aktuelnom EU regulativom, u ovom radu je predstavljena i analizirana metodologija dinamičkog časovnog proračuna za određivanje energetskih potreba zgrade za grejanjem i hlađenjem, zasnovana na novom, trenutno važećem standardu SRPS EN ISO 52016-1.

II POSTUPCI ČASOVNOG PRORAČUNA PREMA ISO 52016-1

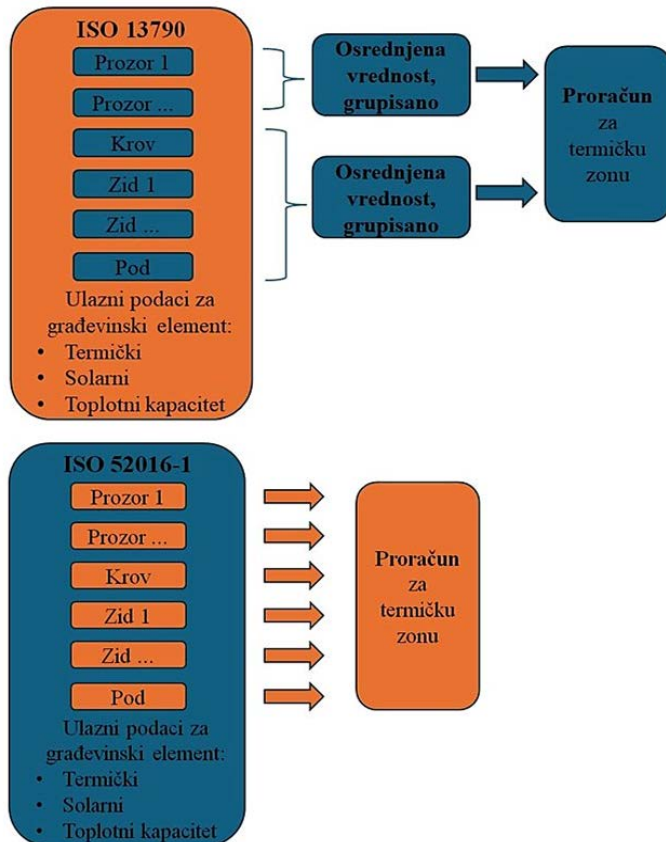
Časovna metoda u ISO 52016-1 je izmenjena, naprednija u poređenju sa pojednostavljenom metodom sa tri čvora, propisanom u ISO 13790. Glavna razlika je u tome što građevinski elementi nisu grupisani na osnovu nekoliko parametara, već su odvojeni u modelu. ISO 52016-1 koristi termički model (pojednostavljen) za svaki element zgrade posebno, kao što je prikazano na slici 1 [1,2].

Na osnovu razlike, da svojstva svakog građevinskog elementa ostaju pojedinačno poznata, umesto da se grupišu na samo dva toplotna otpora, prevaziđeni su problemi prethodne metode, tj.:

- više ne postoji dilema o tome kako kombinovati npr. prolaženje toplote kroz krov i kroz prizemlje, sa veoma različitim uslovima okoline (temperatura tla i inercija tla, Sunčevo zračenje na krovu);
- toplotni kapacitet zgrade ili zone zgrade može biti

specifičan za svaki građevinski element zgrade i nema potrebe za grupisanjem u jedan ukupni toplotni kapacitet za zgradu ili zonu;

- srednja temperatura unutrašnje površine (srednja temperatura zračenja) može se jasno identifikovati i razlikovati od unutrašnje temperature vazduha;
- u isto vreme, ulazni podaci koje treba da obezbedi korisnik su isti kao i za mesečnu metodu [1].



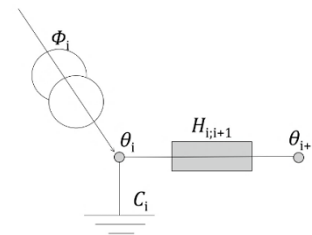
Slika 1. Poređenje časovne metode u ISO 13790 i ISO 52016-1

Časovna metoda proračuna se može primeniti za stambene i nestambene zgrade, ili za njihove delove, koji su u fazi projektovanja, na nove zgrade nakon izgradnje i na postojeće zgrade u fazi korišćenja. Časovna metoda pokriva tri oblasti primene [1]:

- proračun energetske potrebe,
- proračun unutrašnje temperature i
- proračun projektnih opterećenja za grejanje i hlađenje.

II.1 Osnovni principi metodologije

Časovni metod ISO 52016-1 podrazumeva formiranje sistema jednačina za svaki sat, koje energetski opisuju prenos toplote između spoljašnje i unutrašnje sredine kroz netransparentne i transparentne elemente, koji čine omotač zone. On koristi tzv. RC-model (slika 2), koji svaki sloj građevinskog elementa zamenjuje čvorovima, koji imaju sposobnost da pružaju otpor provođenju toplote (R -resistance), kao i sposobnost akumulacije toplote (C -capacity) [1,3].

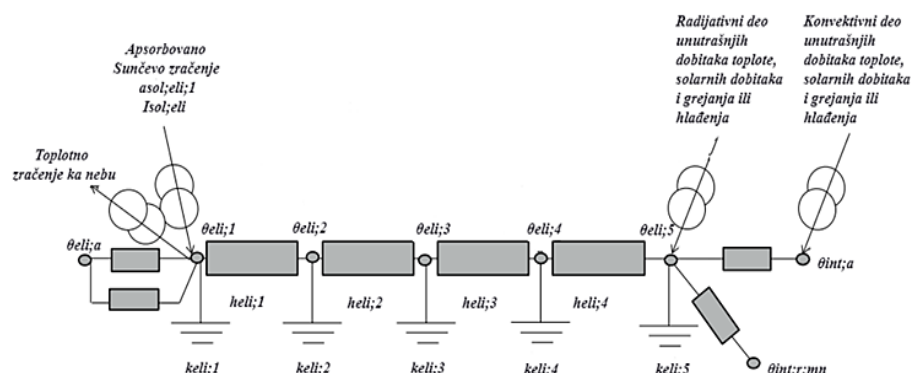


Slika 2. RC-model

Na slici 3 predstavljena je ilustracija RC-modela po elementu zgrade. Specifične adaptacije predstavljenog modela, vrše se za unutrašnje pregrade i elemente koji su u kontaktu sa tlom. Termička masa se može zanemariti kod transparentnih građevinskih elementa, u tom slučaju postoje dva čvora (unutrašnji i spoljašnji površinski čvor). Tačnije, bilo koje Sunčevo zračenje apsorbirano na spoljnoj površini ili unutar transparentnog elementa (sekundarno dobijanje Sunčeve toplote) se aproksimira kao da se direktno prenosi u unutrašnju sredinu, odnosno termičku zonu [1,3].

Dobijeni sistem jednačina rešava se matričnom metodom i kao rezultat dobija se vrednost temperature vazduha unutar zone, kao i temperatura svakog čvora. Svaki element konstrukcije (npr. pod, prozor, zid) je modelovan kao niz od nekoliko čvorova [1]:

- netransparentni elementi podeljeni su na 4 sloja sa 5 čvorova,
- prozori i vrata sastoje se od 2 čvora i nisu podeljeni na posebne slojeve.



Slika 3. RC-model građevinskog elementa

II.2 Energetski bilansi

Energetski bilans se postavlja za svaki čvor (*pli*) - *pli* = 1, 2, ..., *pln*, građevinskog elementa *eli*. U skladu sa međunarodnom konvencijom, numerisanje čvorova elemenata konstrukcije vrši se od spolja (broj čvora *pli* = 1), ka unutra (broj čvora *pli* = *pln*). Formula bilansa za svaki element prikazana je po jedinici površine (m²). U zavisnosti od vrste elementa i položaja samog sloja, toplotni protok koji se dovodi u čvor može biti, [1,3]:

- apsorbovano Sunčevo zračenje;
- emitovano dugotalasno zračenje prema nebu;
- radijativni deo unutrašnjih toplotnih dobitaka; i
- opterećenje grejanje ili hlađenja.

Energetski bilans po elementu zgrade i toplotni bilans u zoni, mogu biti manje prepoznatljivi, jer su formule preuređene tako da su svi pojmovi sa nepoznatim temperaturama (svih čvorova i unutrašnjeg vazduha) premešteni na levu stranu i svi termini nezavisni od nepoznatih temperatura na desnu stranu. Broj formula jednak je broju građevinskih elemenata u termičkoj zoni, pomnožen sa brojem čvorova, odnosno temperatura, po elementu zgrade.

II.2.1 Energetski bilans na nivou zone

Energetski bilans za termički klimatizovanu zonu (*ztc* – *thermally conditioned zone*), obuhvata akumulaciju toplote u zoni (*ztc*), konvekciju između unutrašnjih površina građevinskih elemenata i vazduha unutar zone, ventilaciju, uticaj toplotnih mostova, konvektivni deo unutrašnjih i solarnih dobitka toplote, kao i toplotnih opterećenja grejanja/hlađenja [1,3]:

$$\frac{C_{int,ztc}}{\Delta t} \cdot (\theta_{int,a,ztc,t} - \theta_{int,a,ztc,t-1}) + \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci,eli}) \cdot (\theta_{int,a,ztc,t} - \theta_{pln,eli,t}) + \sum_{vei=1}^{ven} H_{ve,vei,t} \cdot (\theta_{int,a,ztc,t} - \theta_{sup,vei,t}) + H_{tr,tb,ztc} \cdot (\theta_{int,a,ztc,t} - \theta_{e,a,t}) = f_{int,c} \cdot \Phi_{int,ztc,t} + f_{sol,c} \cdot \Phi_{sol,ztc,t} + f_{H/C,c} \cdot \Phi_{H/C,ztc,t} \quad [W] \quad (1)$$

Prethodni izraz se za potrebe formiranja matrice transformiše u oblik:

$$\left[\frac{C_{int,ztc}}{\Delta t} + \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci,eli}) + \sum_{vei=1}^{ven} H_{ve,vei,t} + H_{tr,tb,ztc} \right] \cdot \theta_{int,a,ztc,t} - \sum_{eli=1}^{eln} (A_{eli} \cdot h_{ci,eli} \cdot \theta_{pln,eli,t}) = \frac{C_{int,ztc}}{\Delta t} \cdot \theta_{int,a,ztc,t-1} + \sum_{vei=1}^{ven} (H_{ve,vei,t} \cdot \theta_{sup,vei,t}) + H_{tr,tb,ztc} \cdot \theta_{e,a,t} + f_{int,c} \cdot \Phi_{int,ztc,t} + f_{sol,c} \cdot \Phi_{sol,ztc,t} + f_{H/C,c} \cdot \Phi_{H/C,ztc,t} \quad [W] \quad (2)$$

II.2.2 Energetski bilans na nivou elementa zgrade

Energetski bilans za spoljašnji površinski čvor, koji je okrenut prema „spoljnoj“ strani, *pli* = 1, obuhvata akumulaciju toplote čvora (*pli*), konvekciju i radijaciju između spoljašnje površine građevinskog elementa (*eli*) i spoljnog vazduha, provođenje toplote između čvorova (*pli* i *pli+1*), apsorpciju difuznog i direktnog Sunčevog zračenja, kao i toplotno zračenje prema nebu [1,3]:

$$\frac{k_{pli,eli}}{\Delta t} \cdot (\theta_{pli,eli,t} - \theta_{pli,eli,t-1}) + h_{ce,eli} \cdot (\theta_{pli,eli,t} - \theta_{e,t}) +$$

$$+ h_{re,eli} \cdot (\theta_{pli,eli,t} - \theta_{e,t}) + h_{pli,eli} \cdot (\theta_{pli,eli,t} - \theta_{pli+1,eli,t}) = a_{sol,pli,eli} \cdot (I_{sol,dif,eli,t} + I_{sol,dir,eli,t} \cdot F_{sh,obst,eli,t}) - \Phi_{sky,eli,t} \quad [W/m^2] \quad (3)$$

Prethodni izraz se za potrebe formiranja matrice transformiše u oblik:

$$\left(\frac{k_{pli,eli}}{\Delta t} + h_{ce,eli} + h_{re,eli} + h_{pli,eli} \right) \cdot \theta_{pli,eli,t} - h_{pli,eli} \cdot \theta_{pli+1,eli,t} = \frac{k_{pli,eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli,eli,t-1} + (h_{ce,eli} + h_{re,eli}) \cdot \theta_{e,t} + a_{sol,pli,eli} \cdot (I_{sol,dif,eli,t} + I_{sol,dir,eli,t} \cdot F_{sh,obst,eli,t}) - \Phi_{sky,eli,t} \quad [W/m^2] \quad (4)$$

Energetski bilans za unutrašnje čvorove, *pli* = 2,..., *pln-1*, obuhvata provođenje toplote između čvorova (*pli* i *pli-1*, *pli* i *pli+1*), kao i akumulaciju toplote čvora (*pli*) [1,3]:

$$h_{pli-1,eli} \cdot (\theta_{pli,eli,t} - \theta_{pli-1,eli,t}) + \frac{k_{pli,eli}}{\Delta t} \cdot (\theta_{pli,eli,t} - \theta_{pli,eli,t-1}) + h_{pli,eli} \cdot (\theta_{pli,eli,t} - \theta_{pli+1,eli,t}) = 0 \quad [W/m^2] \quad (5)$$

Prethodni izraz se za potrebe formiranja matrice transformiše u oblik:

$$-(h_{pli-1,eli} \cdot \theta_{pli-1,eli,t}) + \left[\frac{k_{pli,eli}}{\Delta t} + h_{pli,eli} + h_{pli-1,eli} \right] \cdot \theta_{pli,eli,t} - h_{pli,eli} \cdot \theta_{pli+1,eli,t} = \frac{k_{pli,eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli,eli,t-1} \quad [W/m^2] \quad (6)$$

Energetski bilans za unutrašnji površinski čvor, koji je okrenut prema termičkoj zoni (*ztc*), *pli* = *pln*, obuhvata provođenje toplote između čvorova (*pln* i *pln-1*), akumulaciju toplote čvora *pln*, konvekciju između unutrašnje površine građevinskog elementa (*eli*) i vazduha unutar zone, zračenje unutrašnjeg površinskog čvora (*pln*), radijativni deo unutrašnjih i solarnih dobitka toplote, kao i toplotnih opterećenja grejanja/hlađenja [1,3]:

$$h_{pli-1,eli} \cdot (\theta_{pli,eli,t} - \theta_{pli-1,eli,t}) + \frac{k_{pli,eli}}{\Delta t} \cdot (\theta_{pli,eli,t} - \theta_{pli,eli,t-1}) + h_{ci,eli} \cdot (\theta_{pli,eli,t} - \theta_{int,a,ztc,t}) + \sum_{elk=1}^{eln} \frac{A_{elk}}{A_{tot}} \cdot h_{ri,eli} \cdot (\theta_{pli,eli,t} - \theta_{pli,elk,t}) = \frac{1}{A_{tot}} \cdot \left[(1 - f_{int,c}) \cdot \Phi_{int,ztc,t} + (1 - f_{sol,c}) \cdot \Phi_{sol,ztc,t} + (1 - f_{H/C,c}) \cdot \Phi_{H/C,ztc,t} \right] \quad [W/m^2] \quad (7)$$

Prethodni izraz se za potrebe formiranja matrice transformiše u oblik:

$$-(h_{pli-1,eli} \cdot \theta_{pli-1,eli,t}) + \left[\frac{k_{pli,eli}}{\Delta t} + h_{ci,eli} + h_{ri,eli} \cdot \sum_{elk=1}^{eln} \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \right) + h_{pli-1,eli} \right] \cdot \theta_{pli,eli,t} - h_{ci,eli} \cdot \theta_{int,a,ztc,t} - \sum_{elk=1}^{eln} \left(\frac{A_{elk}}{A_{tot}} \right) \cdot h_{ri,eli} \cdot \theta_{pli,elk,t} = \frac{k_{pli,eli}}{\Delta t} \cdot \theta_{pli,eli,t-1} + \frac{1}{A_{tot}} \cdot \left[(1 - f_{int,c}) \cdot \Phi_{int,ztc,t} + (1 - f_{sol,c}) \cdot \Phi_{sol,ztc,t} + (1 - f_{H/C,c}) \cdot \Phi_{H/C,ztc,t} \right] \quad [W/m^2] \quad (8)$$

II.3 Postupak određivanja temperatura čvorova građevinskih elemenata i vazduha u termičkoj zoni

Od izraza energetskih bilansa za svaki element zgrade i toplotnog bilansa za termički klimatizovanu zonu (ztc), u vremenskom intervalu t , formira se kvadratna matrica [1]:

$$[\text{Matrica A}] \times [\text{Vektor temperature čvora X}] = [\text{Vektor B}] \quad (9)$$

gde su:

[Matrica A] - (poznati) koeficijenti na levoj strani formula;

[Vektor B] - (poznati) članovi na desnoj strani formula;

[Vektor temperature čvora X] - (nepoznate) temperature koje je potrebno izračunati ($pli=1..pln$, $eli=1..eln$): $(\theta_{1,1,ztc;t}, \theta_{1,eli,ztc;t}, \dots, \theta_{pli,1,ztc;t}, \dots, \theta_{pli,eli,ztc;t}, \dots, \theta_{pln,eli,ztc;t}, \dots, \theta_{pli,eln,ztc;t}, \dots, \theta_{pln,eln,ztc;t}, \theta_{int,a,ztc;t})$;

gde su:

$\theta_{pli,eli,ztc;t}$ temperatura u čvoru pli građevinskog elementa eli , [°C];

$\theta_{int,a,ztc;t}$ temperatura vazduha unutar zone, [°C].

Rešavanjem matrica za svaki sat, kao rezultat dobijaju se vrednosti nepoznatih temperatura, koje su neophodne kako bi se odredile vrednosti časovnih toplotnih opterećenja grejanja i hlađenja.

II.4 Postupak određivanja potrebne energije za grejanje i hlađenje

Postupak određivanja potrebne energije za grejanje i hlađenje sprovodi se za svaki sat, u opštem slučaju u 5 koraka. U prvom koraku proračun unutrašnje radne temperature, $\theta_{int,op,ztc;t}$, za svaku zonu sprovodi se pod pretpostavkom da se zona dodatno ne greje, odnosno dodatno ne hladi, tj. za tzv. slobodne uslove ($\Phi_{HC,ld,ztc;t} = 0$ W). Unutrašnja radna temperatura $\theta_{int,op,ztc;t}$, za termički klimatizovanu zonu (ztc) određuje se kao srednja vrednost temperature vazduha unutar zone i srednje temperature zračenja svih površina koje obuhvataju zonu:

$$\theta_{int,op,ztc;t} = \frac{\theta_{int,a,ztc;t} + \theta_{int,r,mn,ztc;t}}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (10)$$

Ukoliko je vrednost dobijene radne temperature vazduha za slobodne uslove između propisanih vrednosti unutrašnje radne temperature vazduha za slučaj grejanja, odnosno slučaj hlađenja zone, $\theta_{int,set,H,ztc;t} \leq \theta_{int,op,0,ztc;t} \leq \theta_{int,set,C,ztc;t}$, preskaču se svi naredni koraci osim petog, u kom se proglašava da u satu u zoni za koji je izvršen proračun, zonu nije potrebno niti grejati, niti hladiti: $\Phi_{HC,ld,ztc;t} = 0$ [W], a za stvarnu temperaturu vazduha unutar zone usvaja se vrednost prethodno određene radne temperature za slobodne uslove: $\theta_{int,op,ac,ztc;t} = \theta_{int,op,0,ztc;t}$ [°C].

Ukoliko nije ispunjen prethodni uslov, prelazi se na drugi korak. Pod uslovom da je izračunata radna temperatura vazduha za slobodne uslove viša od propisane vrednosti unutrašnje radne temperature vazduha, $\theta_{int,op,0,ztc;t} > \theta_{int,set,C,ztc;t}$, usvaja se da je vrednost temperature vazduha unutar zone jednaka vrednosti propisane temperature vazduha za slučaj hlađenja zone $\theta_{int,op,set,ztc;t} = \theta_{int,set,C,ztc;t}$ [°C], a da je zonu potrebno hladiti. Ukoliko je izračunata radna temperatura vazduha za slobodne uslove niža od propisane vrednosti unutrašnje radne temperature vazduha, $\theta_{int,op,0,ztc;t} < \theta_{int,set,H,ztc;t}$, usvaja se da je vrednost

temperature vazduha unutar zone jednaka vrednosti propisane temperature vazduha za slučaj grejanja zone $\theta_{int,op,set,ztc;t} = \theta_{int,set,H,ztc;t}$ [°C], a da je zonu potrebno grejati.

Za toplotnu snagu, kojom je potrebno hladiti, odnosno grejati zonu, kako bi se dostigla usvojena temperatura vazduha unutar zone, tj. za tzv. toplotno opterećenje, najpre se usvaja maksimalna dostupna snaga grejanja, odnosno hlađenja: $\Phi_{HC,upper,ztc;t} = \Phi_{HC,avail,ztc;t}$ [W]. Ukoliko njena vrednost nije poznata, usvaja se da ona iznosi:

$$\Phi_{HC,upper,ztc;t} = 10 \times A_{use,ztc} \quad [W] \quad (11)$$

gde je $A_{use,ztc}$ [m²], korisna površina zone.

Pod ovim uslovima, ponovo se određuje unutrašnja radna temperatura vazduha u zoni, $\theta_{int,op,ztc;t} = \theta_{int,op,upper,ztc;t}$ [°C], kao i donja vrednost toplotne snage za grejanje, odnosno hlađenje, $\Phi_{HC,ld,un,ztc;t}$, prema izrazu:

$$\Phi_{HC,ld,un,ztc;t} = \Phi_{HC,upper,ztc;t} \cdot \frac{(\theta_{int,op,set,ztc;t} - \theta_{int,op,0,ztc;t})}{(\theta_{int,op,upper,ztc;t} - \theta_{int,op,0,ztc;t})} \quad [W] \quad (12)$$

U narednom, trećem koraku, proverava se da li je raspoloživa toplotna snaga grejanja, odnosno hlađenja, dovoljna kako bi se zadovoljili uslovi komfora. Ukoliko je prethodno dobijena donja vrednost toplotne snage, $\Phi_{HC,ld,un,ztc;t}$, između vrednosti maksimalne raspoložive snage grejanja, $\Phi_{H,avail,ztc;t}$, i maksimalne raspoložive snage hlađenja, $\Phi_{C,avail,ztc;t}$, preskače se četvrti korak, i prelazi se na poslednji, peti korak, u kome se proglašava da je u satu u zoni za koji je izvršen proračun, toplotna snaga jednaka vrednosti donje toplotne snage: $\Phi_{HC,ld,ztc;t} = \Phi_{HC,ld,un,ztc;t}$ [W], a stvarna temperatura vazduha unutar zone jednaka je vrednosti propisane temperature vazduha: $\theta_{int,op,ac,ztc;t} = \theta_{int,op,set,ztc;t}$ [°C].

Ukoliko nije ispunjen prethodni uslov, primenjuje se četvrti korak, u kom se konstatuje da raspoloživa snaga grejanja ili hlađenja nije dovoljna, tačnije propisana vrednost temperature vazduha unutar zone u datom satu neće biti dostignuta. Pod uslovom da je vrednost toplotne snage pozitivna, $\Phi_{HC,ld,un,ztc;t}$, proglašava se da je toplotna snaga za grejanje zone u datom satu jednaka maksimalno dostupnoj snazi grejanja, $\Phi_{H,ld,ztc;t} = \Phi_{H,avail,ztc;t}$ [W]. Ukoliko je vrednost toplotne snage negativna, $\Phi_{HC,ld,un,ztc;t}$, proglašava se da je toplotna snaga za grejanje zone u datom satu jednaka maksimalno dostupnoj snazi hlađenja, $\Phi_{C,ld,ztc;t} = \Phi_{C,avail,ztc;t}$ [W]. Usvaja se da je vrednost stvarne temperature vazduha unutar zone jednaka unutrašnjoj radnoj temperaturi vazduha u zoni za maksimalnu snagu grejanja ili hlađenja, izračunate u drugom koraku: $\theta_{int,op,ac,ztc;t} = \theta_{int,op,upper,ztc;t}$ [°C].

Poslednji, peti korak služi da se prikaže rezultat proračuna, ukoliko je dobijena pozitivna vrednost toplotne snage, usvaja se:

$$\begin{aligned} \Phi_{H,ld,ztc;t} &= \Phi_{HC,ld,ztc;t} \\ \Phi_{C,ld,ztc;t} &= 0 \end{aligned} \quad [W] \quad (13)$$

Ukoliko je negativna vrednost toplotne snage, usvaja se [1]:

$$\begin{aligned} \Phi_{C,ld,ztc;t} &= -\Phi_{HC,ld,ztc;t} \\ \Phi_{H,ld,ztc;t} &= 0 \end{aligned} \quad [W] \quad (14)$$

II.5 Energetska potreba za (suvo) grejanje i hlađenje

Mesečne energetske potrebe za grejanjem/hlađenjem, $Q_{H/C;nd;ztc;m}$, u termički klimatizovanoj zoni, ztc, računaju se kao zbir časovnih opterećenja grejanja/hlađenja:

$$Q_{H/C;nd;ztc;m} = 0.001 \times \sum_t (\Phi_{H/C;ld;ztc;t} \cdot \Delta t_h) \text{ [kWh]} \quad (15)$$

gde su:

$Q_{H/C;nd;ztc;m}$ - energetske potrebe za grejanjem/hlađenjem u zoni ztc, u mesecu m, [kWh];

$\Phi_{H/C;ld;ztc;t}$ - toplotno opterećenje grejanja/hlađenja u zoni ztc, u vremenskom intervalu t, [W];

Δt_h - dužina vremenskog intervala t, $\Delta t_h = 1$ h za vremenski interval po satu.

Godišnje energetske potrebe za grejanjem/hlađenjem, u termički klimatizovanoj zoni, ztc, računaju se kao zbir mesečnih energetskih potreba:

$$Q_{H/C;nd;ztc;an} = \sum_m Q_{H/C;nd;ztc;m} \text{ [kWh]} \quad (16)$$

gde je:

$Q_{H/C;nd;ztc;an}$ - godišnja potreba za grejanjem/hlađenjem u zoni ztc, [kWh].

Za proračun specifičnih energetskih potreba sistema za grejanje i hlađenje, mogu se primeniti ograničenja na dužinu grejne ili rashladne sezone [1].

II.6 Projektno opterećenje za grejanje i hlađenje

Proračun (godišnjeg) projektnog opterećenja za grejanje/hlađenje termičke zone sprovodi se kao i proračun za energetske potrebe, uz klimatske i operativne uslove koji su dati u ISO 52016-1.

Vrednost projektnog godišnjeg suvog opterećenja za grejanje termičke zone, $\Phi_{H;ld;des;ztc;an}$, određuje se kao maksimalna vrednost suvog opterećenja u zoni ztc, u vremenskom intervalu t:

$$\Phi_{H;ld;des;ztc;an} = \max_t (\Phi_{H;ld;ztc;t}) \text{ [W]} \quad (17)$$

Vrednost projektnog godišnjeg suvog opterećenja za hlađenje termičke zone, $\Phi_{C;ld;des;ztc;an}$, određuje se kao maksimalna vrednost suvog opterećenja u zoni ztc, u vremenskom intervalu t [1]:

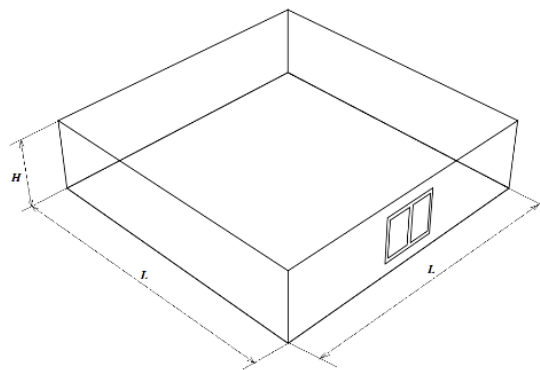
$$\Phi_{C;ld;des;ztc;an} = \max_t (\Phi_{C;ld;ztc;t}) \text{ [W]} \quad (18)$$

III PRIMENA ČASOVNOG PRORAČUNA NA KONKRETNOM PRIMERU

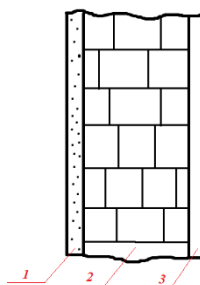
Časovni proračun iz ISO 52016-1, primenjen je na model objektu sa slike 4, koji ujedno predstavlja termičku zonu. Termički omotač čine četiri spoljna zida (slika 5 i tabela 1) dimenzija $L \times L \times H = 10 \times 10 \times 2,6$ m i spoljni prozor (slika 6) dimenzija građevinskog otvora $a \times b = 1,7 \times 2$ m i dimenzija stakla $a_1 \times b_1 = 1,4 \times 0,85$ m.

Radi pojednostavljenja proračuna, zanemaruje se pod i tavanica objekta. Takođe, smatra se da su temperature unutrašnjih površina zidova jednake u svim tačkama.

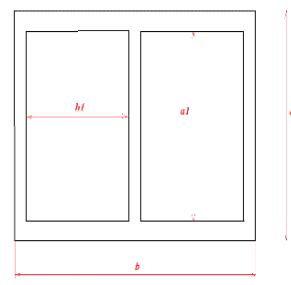
Određivanje potrebne energije za grejanje i hlađenje zone model objekta sa slike 4 izvršeno je za period od godinu dana, tačnije 8760 h. Za polazni sat proračuna uzet je 17.09.2018. u 20h. Tog dana je prosečna dnevna temperatura spoljnog vazduha u Beogradu bila 20,1 °C. Na ovaj način, obezbeđeno je da se ceo sistem u polaznom trenutku nalazi u temperaturskoj ravnoteži.



Slika 4. Ilustracija objekta



Slika 5. Struktura spoljnog zida



Slika 6. Spoljni prozor

Tabela 1. Svojstva slojeva spoljnog zida

Vrsta materijala	Debljina δ [m]	Gustina ρ [kg/m ³]	Specifična toplota c [J/kgK]	Toplotna provodljivost λ [W/mK]
1. krečni malter	0,02	1600	1050	0,81
2. puna opeka	0,2	1200	920	0,47
3. cementni malter	0,025	2100	1050	1,4

Vrednosti propisanih radnih temperatura unutrašnjeg vazduha iznose:

- za grejanje, $\theta_{int;set;H;ztc;t} = 20$ °C, vrednost usvojena iz tabele 1 dokumenta [7], za 2. kategoriju komfora;
- za hlađenje, $\theta_{int;set;C;ztc;t} = 26$ °C, vrednost usvojena iz tabele 1 dokumenta [7], za 2. kategoriju komfora.

Korišćenjem programskog jezika Python, za svaki sat termičke zone, prolazi se kroz pet prethodno opisanih koraka proračuna. Rezultati se za svaki korak (sat) skladište u Excel datoteku, kako bi se lakše predstavljali i obrađivali.

Godišnja energetska potreba za grejanjem termičke zone, tj. objekta sa slike 4, računa se kao zbir mesečnih potreba i iznosi:

$$Q_{H;nd;ztc;an} = \sum_m Q_{H;nd;ztc;m} = 7912,34 \text{ kWh} \quad (17)$$

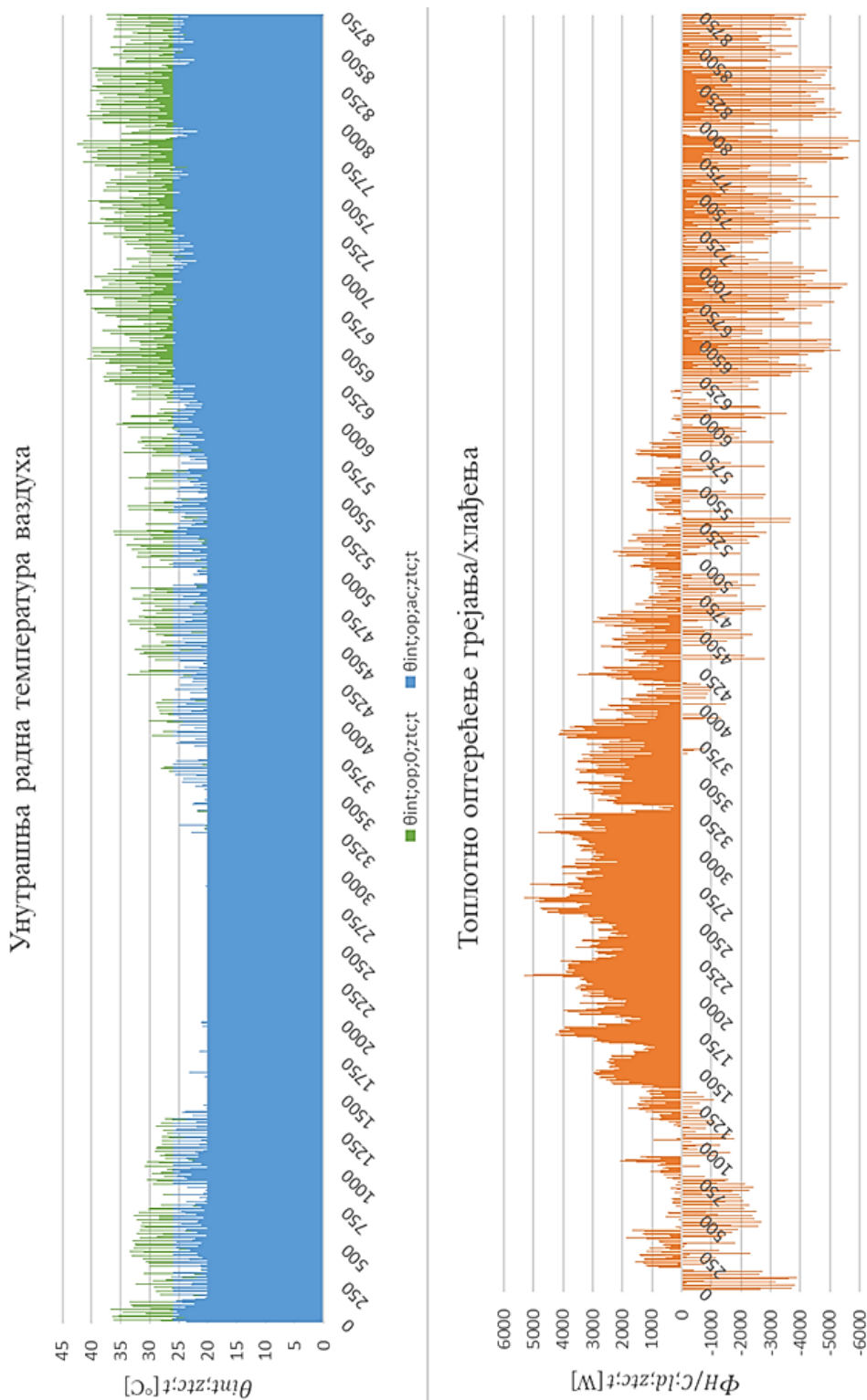
Godišnja energetska potreba za hlađenjem termičke zone, tj. objekta sa slike 4, računa se kao zbir mesečnih potreba i iznosi:

$$Q_{C;nd;ztc;an} = \sum_m Q_{C;nd;ztc;m} = 3402,36 \text{ kWh} \quad (18)$$

Na slici 7 prikazani su dijagrami sa radnom temperaturom

unutrašnjeg vazduha u slobodnim uslovima za svaki sat (zeleno boja), $\theta_{\text{int;op;0;zt};t}$, stvarnom radnom temperaturom unutrašnjeg

vazduha (plava boja), $\theta_{\text{int;op;ac;zt};t}$, kao i časovnim toplotnim opterećenjem grejanja i hlađenja (narandžasta boja), $\Phi_{\text{H/C;ld;zt};t}$.



Slika 7. Rezultat godišnjeg proračuna

Sa dijagrama se može jasno videti da u zimskom periodu, kada je pik sezone, maksimalno potrebno opterećenje grejanja iznosi 5300 W, kako bi stvarna temperatura vazduha u prostoriji bila

jednaka zadatoj temperaturi za grejanje. U letnjem periodu, kada je temperatura u slobodnim uslovima jednaka 42 °C, potrebno je odvesti 6000 W, kako bi stvarna temperatura vazduha bila

jednaka zadatoj temperaturi za hlađenje.

V ZAKLJUČAK

Osnovna kvalitativna prednost časovne metode u poređenju sa mesečnom jeste da obuhvata uticaj časovnih i dnevnih varijacija spoljnih klimatskih uticaja. Zatim, načina korišćenja termotehničkih sistema, kao npr. položaja roletni, termostata, namene prostorije, akumulacije toplote, itd. Takođe, ova časovna metoda ima kompaktniji i pouzdaniji postupak dinamičkih interakcija u odnosu na mesečni metod. Tačnost metode, odnosno, u kojoj meri rezultati proračuna odgovaraju stvarnoj potrošnji energije zgrade, zavisi od kvaliteta ulaznih podataka.

U slučaju proračuna energetske karakteristika starih postojećih zgrada, za slučaj da bi prikupljanje svih potrebnih tzv. ulaznih podataka bilo previše zahtevno, ISO 52016-1 predviđa korišćenje podataka na nacionalnom ili regionalnom nivou. Drugim rečima, ISO 52016-1 pruža mogućnost za postizanje visoko ponovljivog rezultata, dozvoljavajući da se na nekoliko nivoa može odlučiti, npr. da se na nacionalnom nivou propišu posebne opcije, granični uslovi i/ili unos podataka.

Konačno, rezultat proračuna po metodologiji časovne metode, propisane standardom ISO 52016-1, na model objektu prikazanom na slici 4, je očekivan, s obzirom da se radi o prostoriji sa spoljnim zidovima bez izolacije, kao i spoljnim prozorom.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGMENT

Ovde prikazani rezultati su rezultat istraživanja podržanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS po Ugovoru o finansiranju naučnoistraživačkog rada zaposlenih u nastavi na akreditovanim visokoškolskim ustanovama u 2024. godini br. 451-03-65/2024-03/200105 od 5.2.2024. godine.

OZNAKE

A_{eli}	površina građevinskog elementa <i>eli</i> [m ²]
A_{elk}	površina građevinskog elementa <i>elk</i> [m ²]
$A_{use; ztc}$	korisna površina zone [m ²]
A_{tot}	zbir površina A_{elk} svih građevinskih elemenata <i>elk</i> = 1, ..., <i>eln</i> [m ²]
$\alpha_{sol; pli; eli}$	koeficijent solarne apsorpcije na spoljnoj površini [-]
$\mathcal{C}_{int; ztc}$	unutrašnji toplotni kapacitet zone [J/K]
$\mathcal{C}_i$	toplotni kapacitet čvora <i>i</i> [J/kgK]
$F_{sh, obst; eli; t}$	faktor zasenčenja za spoljne prepreke građevinskog elementa <i>eli</i> [-]
$f_{int; c; ztc}$	konvektivni udeo unutrašnjih dobitaka [-]
$f_{sol; c; ztc}$	konvektivni udeo Sunčevog zračenja [-]
$f_{H/C; c; ztc}$	konvektivni udeo sistema grejanja/hlađenja [-]
$h_{ce; eli}$	koeficijent prelaza toplote spoljašnje konvektivne površine građevinskog elementa <i>eli</i> [W/m ² K]
$h_{ci; eli}$	koeficijent prelaza toplote unutrašnje konvektivne površine građevinskog elementa <i>eli</i> [W/m ² K]

$h_{pli; eli}$	provodljivost između čvora <i>pli</i> + 1 i čvora <i>pli</i> [W/m ² K]
$h_{pli-1; eli}$	provodljivost između čvora <i>pli</i> i čvora <i>pli</i> -1 [W/m ² K]
$h_{re; eli}$	koeficijent prelaza toplote spoljašnje radijantne površine građevinskog elementa <i>eli</i> [W/m ² K]
$h_{ri; eli}$	koeficijent prelaza toplote unutrašnje radijantne površine građevinskog elementa <i>eli</i> [W/m ² K]
$H_{i; i}$	provodljivost između čvora <i>i</i> i čvora <i>i</i> +1 [W/K]
$H_{tr; tb; ztc}$	ukupan koeficijent razmene toplote za toplotne mostove [W/K]
$H_{ve; vei; t}$	ukupan koeficijent razmene toplote ventilacijom za element <i>vei</i> [W/K]
$I_{sol; dif; eli; t}$	difuzni deo Sunčevog zračenja na elementu <i>eli</i> [W/m ²]
$I_{sol; dir; eli; t}$	direktni deo Sunčevog zračenja na elementu <i>eli</i> [W/m ²]
$k_{pli; eli}$	površinski toplotni kapacitet čvora <i>pli</i> [J/m ² K]
$Q_{H/C; nd; ztc; m}$	Potrebe za grejanjem/hlađenjem u zoni <i>ztc</i> , u mesecu <i>m</i> [kWh]
$Q_{H/C; nd; ztc; g}$	godišnje potrebe za grejanjem/hlađenjem u zoni <i>ztc</i> [kWh]

GRČKI SIMBOLI

Δt	dužina vremenskog intervala <i>t</i> [s]
$\vartheta_{i, t}$	temperatura čvora <i>i</i> u datom vremenskom intervalu <i>t</i> [°C]
$\vartheta_{i+1, t}$	temperatura čvora <i>i</i> +1 u datom vremenskom intervalu <i>t</i> [°C]
$\vartheta_{i, t-1}$	temperatura čvora <i>i</i> u prethodnom vremenskom intervalu <i>t</i> - Δt [°C]
$\vartheta_{int; set; H; ztc; t}$	propisana vrednost unutrašnje temperature za grejanje [°C]
$\vartheta_{int; set; C; ztc; t}$	propisana vrednost unutrašnje temperature za hlađenje [°C]
$\vartheta_{int; op; ztc; t}$	unutrašnja radna temperatura [°C]
$\vartheta_{int; op; 0; ztc; t}$	radna temperatura u slobodnim uslovima [°C]
$\vartheta_{int; ac; op; zt; t}$	stvarna unutrašnja radna temperatura [°C]
$\vartheta_{int; op; upper; ztc; t}$	unutrašnja radna temperatura, dobijena za gornju vrednost opterećenja [°C]
$\vartheta_{int; a; ztc; t}$	unutrašnja temperatura vazduha [°C]
$\vartheta_{int; a; ztc; t-1}$	unutrašnja temperatura vazduha u zoni <i>ztc</i> u prethodnom vremenskom intervalu (<i>t</i> - Δt) [°C]
$\vartheta_{int; r; mn; ztc; t}$	srednja temperatura zračenja [°C]
$\vartheta_{pli; eli; t}$	temperatura u čvoru <i>pli</i> građevinskog elementa <i>eli</i> [°C]
$\vartheta_{pli-1; eli; t}$	temperatura u čvoru <i>pli</i> -1 građevinskog elementa <i>eli</i> [°C]
$\vartheta_{pli+1; eli; t}$	temperatura u čvoru <i>pli</i> +1 građevinskog elementa <i>eli</i> [°C]
$\vartheta_{pli; eli; t-1}$	temperatura u čvoru <i>pli</i> u prethodnom vremenskom intervalu (<i>t</i> - Δt) [°C]
$\vartheta_{pli=pln; eli; t}$	temperatura u čvoru <i>pli</i> = <i>pln</i> građevinskog elementa <i>eli</i> [°C]
$\vartheta_{sup; vei; t}$	temperatura dovodnog vazduha, koji ulazi u zonu <i>ztc</i> [°C]

$\vartheta_{e,a;t}$	temperatura spoljašnjeg vazduha [$^{\circ}\text{C}$]
$\phi_{C;ld;des;zt;c;an}$	(godišnje) projektno suvo opterećenje hlađenja u termičkoj zoni ztc [W]
$\phi_{H;ld;des;zt;c;an}$	(godišnje) projektno suvo opterećenje grejanja u termičkoj zoni ztc [W]
$\phi_{H/C;ld;zt;t}$	opterećenje grejanja/hlađenja u zoni ztc , u vremenskom intervalu t [W]
$\phi_{H/C;upper;zt;t}$	gornja vrednost opterećenja grejanja/hlađenja [W]
$\phi_{H/C;ld;un;zt;t}$	neograničeno opterećenje grejanja/hlađenja, kako bi se dostigla propisana vrednost temperature [W]
$\phi_{C;avail;zt;t}$	maksimalna raspoloživa snaga hlađenja u vremenskom intervalu t [W]
$\phi_{H;avail;zt;t}$	maksimalna raspoloživa snaga grejanja u vremenskom intervalu t [W]
$\phi_i;t$	dovedena toplota čvoru i u vremenskom intervalu t [W]
$\phi_{int;zt;t}$	ukupni unutrašnji toplotni dobitak u proračunskoj zoni ztc , u vremenskom intervalu t [W]
$\phi_{H/C;zt;t}$	opterećenje grejanja/hlađenja u proračunskoj zoni ztc , u vremenskom intervalu t [W]
$\phi_{sol;zt;t}$	ukupni solarni dobici toplote u proračunskoj zoni ztc , u vremenskom intervalu t [W]
$\phi_{sky;zt;t}$	(dodatno) toplotno zračenje prema nebu [W/m^2]

LITERATURA/REFERENCES

- [1] SRPS EN ISO 52016-1:2017 – Energetske performanse zgrada – Energija potrebna za grejanje i hlađenje, unutrašnje temperature i osetna i latentna toplotna opterećenja - Deo 1: Postupci proračuna, Institut za standardizaciju

Srbije (ISS), Beograd, 2017.

- https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:53649 [pristupljeno 28.08 2023]
- [2] ISO/FDIS 13790:2007 – Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling. https://www.sysecol2.ethz.ch/OptiControl/LiteratureOC/ISO_07_FDIS_13790_ApprovalDraft.pdf [pristupljeno 28.08 2023]
- [3] SRPS CEN ISO/TR 52016-2:2017 – Energetske performanse zgrada – Energija potrebna za grejanje i hlađenje, unutrašnje temperature i osetna i latentna toplotna opterećenja - Deo 2: Objašnjenje i obrazloženje za ISO 52016-1 i ISO 52017-1, Institut za standardizaciju Srbije (ISS), Beograd, 2017. https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:53660 [pristupljeno 28.08 2023]
- [4] Ministarstvo životne sredine, rudarstva i prostornog planiranja. Pravilnik o energetske efikasnosti zgrada. https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_energetskoj_efikasnosti_zgrada.html [pristupljeno 28.08 2023]
- [5] Photovoltaic geographical information system, typical meteorological year. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#TMY [pristupljeno 28.08 2023]
- [6] Hogeling J. Report on Case Study to EN 16798-1 - Conditions of use - Final report, EPB Center, Rotterdam, Netherlands, 2021. https://epb.center/media/documents/EPB-Center-Case_Study_EN_16798-1_Condit_use_Report_2021-10-31.pdf [pristupljeno 14.02.2024]
- [7] Shinoda, J., Kazanci, O., Tanabe, S., Olesen, B. A review of the surface heat transfer coefficients of radiant heating and cooling systems, Building and Environment, Vol. 159, 106156, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.05.034>

AUTORI/AUTHORS

msr Sandra Kovačević - master inženjer mašinstva, Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, sandrakovacevic912@gmail.com, ORCID [0009-0007-2567-6735](https://orcid.org/0009-0007-2567-6735)

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

Determination of energy performance of building according to ISO 52016-1

Abstract – With the idea of harmonizing with current EU regulation regarding methodology used for energy certification of buildings, and with aim of achieving energy savings in the building sector, the dynamic hourly calculation methodology for determining energy needs of the building for heating and cooling was presented and analyzed. The presented method is based on the new, currently valid standard SRPS EN ISO 52016-1. Unlike the previous so-called three-node method, determined by the now extracted standard SRPS EN ISO 13790, this method does not group layers of the construction envelope, but treats separately each layer of each element of the construction envelope. Accordingly, the new calculation method is based on forming energy balance equations not only for the internal and external boundary surface, but also for each layer of the building element, and their coupled solution for boundary conditions that change on an hourly basis.

Due to complexity of this methodology, which in addition to the hourly temperatures of the external air, hourly values of solar irradiance, radiation to the sky, but also the own radiation of all solid surfaces, also takes into account dynamic behavior of all elements of the building's thermal envelope (resistance to heat conduction and heat accumulation of each layer of the envelope), a special software was developed, verification of which, as well as verification of methodology, was performed on the example of determining energy needs of a model object for heating and cooling.

Index Terms – Hourly calculation methodology, Building's heating and cooling needs, SRPS EN ISO 52016-1

Estimacija stanja u elektroenergetskom sistemu sa PMU uređajima i maliciozni napad injektiranjem loših merenja i njegova detekcija

Vladimir Bećejac*, Miloš Đorđević*, Nemanja Jelenić*, Mihajlo Marković*, Miloš Mosurović**

* AD Elektromreža Srbije

** Srpska berza električne energije Seepex

Rezime - Ovaj rad istražuje značaj primene metode estimacije stanja u elektroenergetskim sistemima, posebno fokusirajući se na ulogu PMU (Phasor Measurement Unit) uređaja. Prikazane su osnovni principi i prednosti estimatora stanja u odsustvu PMU merenja, a zatim se analizira kako PMU merenja značajno unapređuju preciznost estimacije stanja. Kroz detaljan pregled, istaknute su ključne karakteristike PMU uređaja i kako njihovi sinhronizovani podaci doprinose boljem kvalitetu estimacije stanja. U radu se istražuju bezbednosni aspekti estimacije stanja, posebno se fokusirajući na maliciozni napad injektiranjem lažnih merenja (FDIA). Kroz konkretan primer, demonstrirano je kako FDIA napad može značajno uticati na tačnost estimacija stanja, uvodeći netačne podatke u sistem. Razmatrana je i strategija detekcije ovakvih napada pomoću analize reziduala.

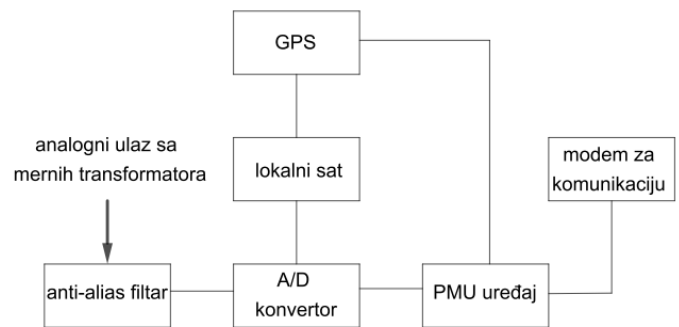
Ključne reči - estimacija stanja, PMU, FDIA

I UVOD

Estimator stanja (ES) funkcioniše tako što određuje stanje elektroenergetskog sistema (EES) na temelju njegovog matematičkog modela i dostupnih merenja. U skladu sa mrežnim modelom, ES pronalazi rešenje koje je što moguće bliže stvarnim merenjima. Ova aplikacija je od vitalnog značaja u operativnim centrima. Međutim, ES koji se oslanja isključivo na PMU merenja nije praktičan zbog visokih troškova implementacije i dugoročnih ulaganja u SCADA/EMS sistem koji je dugo vremena bio ključan za estimaciju stanja [1]. Realniji pristup je iskoristiti postojeća SCADA/EMS i PMU merenja kako bi se poboljšao kvalitet estimacije stanja. Radovi na ovu temu često koriste tehnike podržane teorijom i simulacijama. Međutim, postoje izazovi u odabiru relevantnih podataka iz obimne količine pristiglih informacija, kao i problemi s konvergencijom tradicionalnog elektroenergetskog sistema koji se oslanja na PMU podatke. Često se u estimaciji stanja koristi Njutn-Rapsonov metod, ali ovaj pristup ignorisanja članova većeg od drugog stepena u Tejlorovom razvoju ima smisla samo uz dobro odabran početni trenutak [2]. S obzirom na različitu učestalost PMU i SCADA merenja u ES-u, izbor početnog trenutka i konvergencija postaju problematični. Ignorisanje članova većeg od drugog stepena u Tejlorovom razvoju nije dovoljno za adekvatnu polinomnu aproksimaciju tokova snaga. Neki drugi algoritmi, poput Gaus-Zajdelovog, mogli bi biti neprihvatljivi za velike sisteme zbog brzine konvergencije. Radi prevazilaženja problema integracije PMU i SCADA merenja, sprovedeno je mnogo istraživanja [3,4,5,6,7].

II SINHROFAZORSKA TEHNOLOGIJA

Govoriti o PMU tehnologiji i procesima u današnjem vremenu je izazovno s obzirom na raznolikost pristupa svakog proizvođača koji želi da istakne svoje konkurentske prednosti na tržištu. Ipak, u osnovi, svi PMU uređaji dele određene karakteristike koje će biti istaknute u ovom pregledu. Ti uređaji se sastoje od nekoliko ključnih modula: računarskog, za prikupljanje podataka i za sinhronizaciju. Svaki PMU uređaj obuhvata analogne ulaze, sposobnost filtriranja, digitalizacije, sinhronizacije, digitalnu obradu i komunikacijske mogućnosti.



Slika 1. Blok šema PMU uređaja

Na slici 1 je prikazana struktura tipičnog PMU uređaja [8]. Analogne ulaze koristimo kako bismo prikupili trofazni signal sa sekundarnih naponskih i strujnih mernih transformatora za dalju analizu. Iako je suštinski PMU uređaj mikroprocesorska zaštita, on se razlikuje od klasičnih zaštita po tome što može prikupljati signale struje i napona sa različitih izvora u trafostanici. Da bi se ovi signali dalje obradili, neophodno je da prođu kroz analogno-digitalnu konverziju (A/D). U tu svrhu, početni signali se često redukuju korišćenjem oslabljivača ili instrumentalnih transformatora (obično na naponske nivoe od ± 10 V i strujne nivoe od nekoliko ampera, u zavisnosti od specifikacija proizvođača). Kako bi se izbegli alijas efekti, period odabiranja mora zadovoljiti Nikvistov kriterijum, što podrazumeva korišćenje anti-alijas filtera. Moderni PMU uređaji često koriste višestruko uzorkovanje (tzv. *oversampling*) sa visokim stopama odsecanja (*cut-off frequency*) unutar analognih anti-alijas filtera kako bi se postigla veća fleksibilnost i efikasnost. Digitalni decimacioni filteri se koriste za uzorkovanje signala sa manjom frekvencijom, čime se postiže integrisani digitalni anti-alijas

filter [8] zajedno sa analognim anti-alijas filtrom. Ovakva struktura omogućava stabilniji rad PMU uređaja u različitim uslovima temperature i sporiji proces starenja, uz poboljšani kvalitet signala. Svi odbirci koji se dobijaju u opisanom procesu imaju vremenske značke (*time tag*). Sat koji vrši njihovo dodeljivanje je baždaren prema GPS vremenu koje se dobija od strane GPS satelita raspoređenih u šest orbitalnih ravni.

Na kraju procesa, iz PMU uređaja izlazi vremenski sinhronizovani signal koji se telekomunikacionim putevima dovodi do sledećeg uređaja u hijerarhiji - PDC uređaja (*Phasor Data Concentrator*) koji ima ulogu da prikuplja, vrši obradu i odbacuje loše podatke primljene sa svih primljenih signala iz PMU uređaja. Za velike sisteme kada jedan PDC uređaj nije dovoljan, postavlja se više njih, a onda se signali iz PDC-ova dovode na super PDC uređaj. Za bilo kakav vid analize se pristupa PDC ili super PDC uređaju preko neke od razvijenih aplikacija npr. WAMS, o kojoj će biti reči u odeljku o primeni sinhrofazorske tehnologije. Treba napomenuti da je komunikacija na nivou PMU - PDC dvosmerna. Sa PDC uređaja se na PMU uređaj mogu poslati konfiguracione poruke, najčešće vezane za striming proces. Komunikacija se odvija preko fiberoptičkih kablova koji imaju ogroman kapacitet za prenos podataka.

III WLS ESTIMACIJA STANJA

Statička procena stanja se može opisati kao proces pronalaženja vrednosti promenljivih stanja koje minimizuju kvadratnu sumu razlika između izmerenih i stvarnih vrednosti veličina, gde su te vrednosti funkcija vektora promenljivih stanja [9,10,11]. Pri tom, svakoj razlici, koja se naziva rezidual merenja, mora se pridružiti odgovarajuća težina. Inicijalna jednačina za WLS algoritam je data sa:

$$\mathbf{z} = \mathbf{h}(\mathbf{x}) + \mathbf{e}$$

gde je $\mathbf{z}$ m – dimenzioni vektor merenja, vektor $\mathbf{h}$ ima m nelinearnih funkcija i vektor stanja, $\mathbf{x}$, koji se sastoji od n promenljivih. Vektor $\mathbf{e}$ predstavlja vektor grešaka merenja. Kriterijumska funkcija koja se posmatra je oblika

$$J(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m \frac{(z_i - h_i(\mathbf{x}))^2}{R_{ii}} = [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]^T \mathbf{R}^{-1} [\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x})]. \quad (1)$$

Cilj WLS algoritma je minimizacija prethodno postavljene kriterijumske funkcije (1). Sa $\mathbf{R}$ je označena matrica kovarijansi merenja preko relacije $\mathbf{R} = \text{cov}\{\mathbf{e}\} = \text{diag}\{\sigma_m^2\}$. Estimacija vektora promenljivih stanja se iterativno dobija rešavanjem sistema jednačina:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}(\mathbf{x}^{(k)}) \Delta \mathbf{x}^{(k)} &= \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(k)})) \\ &= \mathbf{H}^T(\mathbf{x}^{(k)}) \mathbf{R}^{-1} \Delta \mathbf{z}^{(k)}, \quad k = 0, 1, 2, \dots \\ \Delta \mathbf{x}^{(k)} &= \mathbf{x}^{(k+1)} - \mathbf{x}^{(k)} \end{aligned}$$

gde je sa $\mathbf{G}$ označena matrica pojačanja u k -toj iteraciji, $\mathbf{H}$ je Jakobijeva matrica u k -toj iteraciji, dok je priraštaj vektora merenja u k – toj iteraciji dat sa $\Delta \mathbf{z} = \mathbf{z} - \mathbf{h}(\mathbf{x}^{(k)})$.

IV NAPADI NA ELEKTROENERGETSKI SISTEM

Elektroenergetski sistem je ključni infrastrukturni resurs koji, poput mnogih drugih, može biti meta različitih vrsta hakerskih napada. Evo nekoliko potencijalnih hakerskih napada na elektroenergetski sistem, zajedno sa osnovnim objašnjenjem o svakom:

- *Denial-of-Service* (DoS) napadi: Ovi napadi ciljaju da onesposobe elektroenergetski sistem preplavljujući ga sa velikim brojem zahteva, čime se sprečava normalno funkcionisanje. To može dovesti do prekida u isporuci električne energije.
- Napadi na SCADA sistem: SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) sistemi se koriste za nadzor i upravljanje elektroenergetskim sistemom. Napadi na ove sisteme mogu omogućiti napadačima pristup kontrolama sistema, što može dovesti do neovlašćenog manipulisanja i oštećenja opreme ili prekida u snabdevanju energijom.
- Napadi na mrežnu infrastrukturu: Napadi na mrežnu infrastrukturu elektroenergetskog sistema mogu ciljati rutere, prekidače i druge mrežne komponente kako bi se poremetio komunikacioni protokol sistema. To može ometati komunikaciju između različitih delova sistema, što može dovesti do problema u upravljanju i isporuci električne energije.
- Fizički napadi: Ovi napadi uključuju fizičko oštećenje infrastrukture elektroenergetskog sistema, poput sabotaze transformatora, prekidača ili drugih ključnih komponenti. Takvi napadi mogu prouzrokovati ozbiljne prekinde u snabdevanju električnom energijom i zahtevni su za oporavak.
- Fišing i društveni inženjering: Napadači mogu pokušati da dobiju pristup osetljivim informacijama ili sistemima elektroenergetskog sistema putem fišinga (*phishing*), slanjem lažnih e-mailova ili druge manipulativne komunikacije. Ovo može dovesti do neovlašćenog pristupa sistemima ili krađe korisničkih podataka.
- Malware napadi: *Malware* (zlonamerni softver) može biti korišćen za infekciju računara ili drugih uređaja unutar elektroenergetskog sistema. Ovi napadi mogu omogućiti napadačima pristup osetljivim informacijama ili čak daljinsku kontrolu nad sistemima.
- Napadi na IoT uređaje: Sa sve većim brojem pametnih uređaja povezanih u elektroenergetski sistem (npr. pametni brojlara), napadači mogu ciljati ove uređaje radi poremećaja sistema ili krađe podataka.

U ovom radu će se razraditi napad na SCADA sistem. Ovi sistemi igraju ključnu ulogu u nadzoru, upravljanju i automatizaciji različitih procesa unutar elektroenergetskog sistema, uključujući distribuciju, prenos i generaciju električne energije. Evo nekoliko načina na koje napadi na SCADA sisteme mogu biti izvedeni i potencijalne posledice:

- Neovlašćeni pristup: Napadači mogu pokušati da dobiju neovlašćen pristup SCADA sistemima putem raznih tehnika, uključujući iskorišćavanje ranjivosti u softveru, upotrebu ukradenih korisničkih podataka ili korišćenje naprednih tehnika kao što su napadi *brute force*. Kada dobiju pristup, napadači mogu imati mogućnost da manipulišu postavkama sistema, izvrše komande ili promene parametre koji kontrolišu elektroenergetski sistem.
- Manipulacija podacima: Napadači mogu promeniti ili uništiti podatke koji se prikupljaju i obrađuju u SCADA sistemima. Ovo može rezultirati pogrešnim očitavanjima, netačnim procenama i odlukama zasnovanim na nepouzdanim informacijama. Na primer, napad na SCADA sistem koji kontroliše distribuciju električne energije može rezultirati pogrešnim upravljanjem opterećenjem mreže ili nepotrebnim isključenjem snabdevanja.
- Otkazivanje rada sistema: Napadači mogu izazvati otkazivanje rada SCADA sistema ili sprečiti normalno funkcionisanje putem različitih tehnika, kao što su distribuirani DoS napadi ili napadi na ranjivosti sistema. Ovo može uzrokovati ozbiljne prekidne u snabdevanju električnom energijom, naročito ako se ne može brzo intervenisati i oporaviti.
- Lažne komande i kontrole: Napadači mogu emitovati lažne komande ili manipulirati kontrolama SCADA sistema kako bi izazvali neželjene efekte ili čak štetu na opremi. Na primer, mogućnost da se lažno otvore ili zatvore prekidači u elektroenergetskom sistemu može dovesti do prekida u snabdevanju energijom ili oštećenja opreme.
- Krađa podataka: Napadači mogu ciljati SCADA sisteme radi krađe osetljivih podataka, kao što su informacije o infrastrukturi, operativnim procedurama ili korisničkim podacima. Ove informacije mogu se koristiti za dalje napade ili za stvaranje drugih bezbednosnih rizika.

Napadi na SCADA sisteme mogu imati ozbiljne posledice po funkcionalnost, sigurnost i pouzdanost elektroenergetskog sistema. Stoga je ključno da se preduzmu odgovarajuće mere zaštite, uključujući stalno praćenje sistema, primenu sigurnosnih zakrpa, obuku osoblja i implementaciju sigurnosnih protokola kako bi se smanjila ranjivost na ove vrste napada.

V ESTIMACIJA STANJA SA PMU MERENJIMA

PMU merenja se koriste za prikupljanje fazorskih podataka o stanju elektroenergetskog sistema (EES) u realnom vremenu. Ova merenja se šalju do koncentratore fazorskih podataka putem specijalnog protokola kako bi se vremenski sinhronizovala i dalje distribuirala do kontrolnog centra. Međutim, jedan od izazova koji se javlja je skladištenje velike količine informacija koje se generišu u kratkom vremenskom periodu, što predstavlja zahtev za naprednim SCADA/EMS sistemima.

Najčešći način korišćenja PMU merenja je upoređivanje fazorskih uglova napona između različitih čvorova u mreži sa prethodno definisanim vrednostima. Ako su razlike između ovih uglova veće od predefinisanih granica, generiše se alarm koji

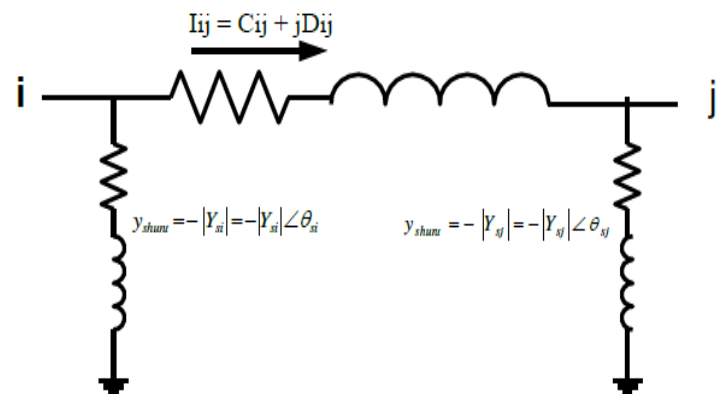
obaveštava dispečera o mogućim problemima u stabilnosti EES-a.

Pored upotrebe u estimaciji stanja radi poboljšanja robustnosti, observabilnosti i tačnosti mreže, PMU merenja takođe imaju značajnu ulogu u analizi tranzijentnih pojava koje su omogućene visokom frekvencijom merenja. Iako bi idealno bilo da postoji PMU merenje u svakom čvoru EES-a, zbog visokih troškova ova merenja se postavljaju samo na pažljivo odabrane lokacije, koristeći napredne algoritme za optimizaciju postavljanja [14].

Iako PMU merenja pružaju detaljne informacije o stanju sistema, klasična SCADA merenja i dalje imaju važnu ulogu, posebno za praćenje promena koje se ne dešavaju tako često. Stoga, integracija visokofrekventnih PMU merenja sa klasičnim SCADA merenjima zahteva napredne tehnike za estimaciju stanja koje mogu efikasno upravljati ovim različitim tipovima podataka.

U statičkoj estimaciji stanja, koristi se princip baferovanja PMU merenja kako bi se uvažila njihova tačnost i pouzdanost. Ovaj princip podrazumeva čekanje između dva uzastopna izvršavanja WLS estimacije stanja kako bi se formirala srednja vrednost i varijansa PMU fazorskih merenja. Ovo omogućava da se bolje iskoristi informacija dobijena iz PMU merenja i da se smanji uticaj mogućih privremenih fluktuacija u merenjima.

PMU uređaj ima sposobnost da meri fazor napona u čvoru u koji je instaliran i sve fazore struja koje iz tog čvora izlaze. Ako definišemo y_{shunt} kao otopnu admitansu, a y rednu admitansu, fazor struje može biti predstavljen u pravougaonom obliku, kao što je prikazano na slici 2. Veličine C_{ij} i D_{ij} su definisane sa:



slika 2. Pi zamenska šema

$$C_{ij} = |V_i Y_{si}| \cos(\delta_i + \theta_{si}) + |V_j Y_{ij}| \cos(\delta_j + \theta_{ij}) - |V_i Y_{ij}| \cos(\delta_i + \theta_{ij})$$

$$D_{ij} = |V_i Y_{si}| \sin(\delta_i + \theta_{si}) + |V_j Y_{ij}| \sin(\delta_j + \theta_{ij}) - |V_i Y_{ij}| \sin(\delta_i + \theta_{ij})$$

gde je vektor stanja dat sa

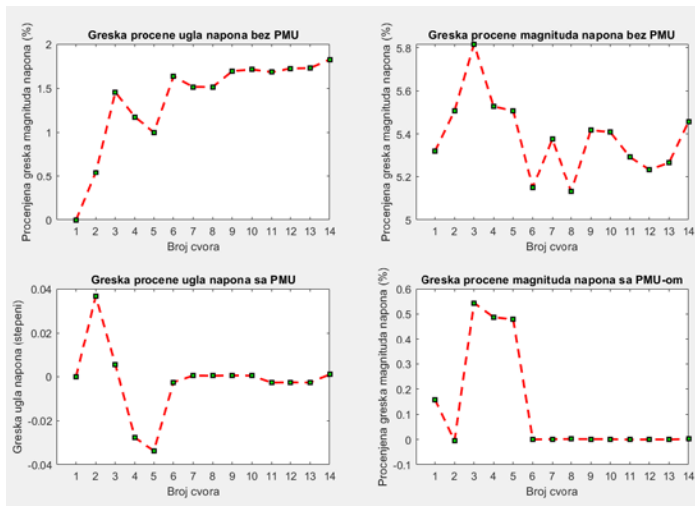
$x = [V_1, V_2, \dots, V_N]^T$. Jakobijan matrice merenja H koje odgovara aktivnom i reaktivnom delu struje je:

$$\frac{\partial C_{ij}}{\partial V_j} = |Y_{si}| \cos(\delta_i + \theta_{si}) - |Y_{ij}| \cos(\delta_i + \theta_{ij})$$

uređajima značajno popravlja.

Tabela 2. Fazori napona u čvorovima sa PMU

Broj čvora	Napon (r,j,)	Ugao (stepeni)
1	1,0584	0
2	1,0451	-5,0258
3	1,0046	-12,7546
4	1,0083	-10,2142
5	1,0118	-8,7264
6	1,0700	-14,4443
7	1,0457	-13,2372
8	1,0800	-13,2371
9	1,0305	-14,8206
10	1,0299	-15,0364
11	1,0461	-14,8553
12	1,0533	-15,2946
13	1,0466	-15,3285
14	1,0193	-16,0727



Slika 4. Greške procene ugla napona sa i bez PMU uređaja

VI UNSCENTED KALMAN FILTER

Uobičajeni Kalman filter može naići na poteškoće u obradi izrazito nelinearnih funkcija koje opisuju odnos između merenja i stanja sistema, kao što je slučaj u proceni stanja elektroenergetskih sistema. Linearizacija ovih funkcija korišćenjem proširenog Kalman filtera često može dovesti do nepreciznih rezultata ili čak do divergencije algoritma. Iterativna primena proširenog Kalman filtera može rešiti ove probleme, ali uz dodatno vreme izvršenja algoritma. Oba pristupa takođe mogu imati problema sa stvaranjem matrica Jakobijana, što dodatno komplikuje proces [13].

Unscented Kalman filter (UKF) pristupa rešavanju problema nelinearnosti na drugačiji način. Umesto linearizacije funkcija, ovaj filter koristi selektovane uzorke tačaka koji tačno reflektuju pretpostavljenu raspodelu stanja sistema. Ovi uzorci se direktno propagiraju kroz originalne nelinearne funkcije, a zatim se koriste za dobijanje srednje vrednosti i kovarijanse stanja sistema. Ideja je da je lakše aproksimirati Gauss-ovu raspodelu

nego proizvoljnu nelinearnu funkciju, što omogućava tačnije procene stanja sistema. Ovaj pristup ne zahteva formiranje matrica Jakobijana i Hesijana, što dodatno pojednostavljuje algoritam.

Unscented Kalman filter funkcioniše na sličan način kao prošireni Kalman filter (EKF) u smislu osnovnih koraka. Oba algoritma se sastoje od dva glavna koraka:

- **Predikcija:** U ovom koraku, trenutno stanje sistema se predviđa na osnovu tranzicione funkcije (koja opisuje kako se sistem razvija tokom vremena) i prethodnog stanja sistema. Ovaj korak generiše procenu stanja sistema u sledećem vremenskom koraku.
- **Korekcija/Ažuriranje:** Nakon što su dostupna merenja za trenutni vremenski korak, sistem vrši korekciju ili ažuriranje procene stanja koristeći ova merenja. Ovaj korak koristi informacije o merenjima kako bi se poboljšala procena stanja sistema.

Ovi koraci se iterativno ponavljaju kako bi se sistem dinamički pratio kroz vreme, uzimajući u obzir kako tranzicione funkcije, tako i informacije dobijene iz merenja. Oba filtra, kako EKF tako i UKF, su osmišljena kako bi rešio problem estimacije stanja u nelinearnim sistemima, ali se razlikuju u načinu linearizacije i propagacije informacija o stanju sistema. Estimirani vektor promenljivih stanja u trenutku t_{n-1} ($\hat{x}(t_{n-1})$) njemu odgovarajuća matrica kovarijansi $R_{\hat{x}}(t_{n-1})$ se proširuje srednjom vrednošću $E\{v(t_n)\} = 0$ i matricom kovarijansi greške tranzicionog perioda:

$$\begin{aligned} \tilde{x}(t_{n-1}) &= [\hat{x}^T(t_{n-1}) \quad \mathbf{0}]^T \\ \tilde{R}_{\tilde{x}}(t_{n-1}) &= \begin{bmatrix} R_{\hat{x}}(t_{n-1}) & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & R_v(t_n) \end{bmatrix} \\ \tilde{n} &= 2n \end{aligned}$$

gde $\tilde{n}$ predstavlja broj elemenata proširenog vektora promenljivih stanja, $R_{\hat{x}}(t_{n-1})$ a predstavlja proširenu matricu kovarijansi. Sigma tačke, kojih ima $\tilde{n}+1$ i njihovi težinski faktori se određuju kao:

$$\begin{aligned} \chi^i(t_{n-1}) &= \begin{cases} \tilde{x}(t_{n-1}) + B_i, & i = 0, \\ \tilde{x}(t_{n-1}) + B_i, & i = 1, \dots, \tilde{n} \\ \tilde{x}(t_{n-1}) - B_{i-\tilde{n}}, & i = \tilde{n} + 1, \dots, 2\tilde{n}. \end{cases} \\ W_i^s &= \begin{cases} k/(\tilde{n} + k), & i = 0, \\ 1/[2(\tilde{n} + k)], & i = 1, \dots, 2\tilde{n}. \end{cases} \\ W_i^c &= \begin{cases} k/(\tilde{n} + k) + (1 - \alpha^2 + \beta), & i = 0, \\ 1/[2(\tilde{n} + k)], & i = 1, \dots, 2\tilde{n}. \end{cases} \end{aligned}$$

gde je B_i i -ta kolona matrice $B = \sqrt{\begin{bmatrix} \tilde{n} + \kappa \\ n + \kappa \end{bmatrix} R_{\tilde{x}}(t_{n-1})}$, zatim

α - koeficijent koji uključuje prethodno znanje o distribuciji vektora promenljivih stana, k - parametar skaliranja, W_i^s je težinski faktor koji se odnosi i -tu sigma tačku i koristi za proračun prediktovanog vektora promenljivih stana i matrice kovarijansi. Prediktovane sigma tačke se dobijaju propagacijom prethodno odabranih sigma tačaka kroz tranzicionu funkciju $f(x(t_{n-1}))$ koja opisuje kako se sistem razvija tokom vremena. Ove sigma tačke se koriste za

procenu predikcije vektora promenljivih stanja u trenutku t_n . Nakon propagacije, dobija se prediktovanu srednju vrednost i kovarijansu:

$$\begin{aligned}\bar{\mathbf{x}}^i(t_n) &= \mathbf{f}(\mathbf{x}^i(t_{n-1})) \\ \bar{\mathbf{x}}(t_n) &= \sum_{i=0}^{2\tilde{n}} W_i^s \bar{\mathbf{x}}^i(t_n) \\ \mathbf{R}_x(t_n) &= \sum_{i=0}^{2\tilde{n}} W_i^c (\bar{\mathbf{x}}^i(t_n) - \bar{\mathbf{x}}(t_n)) (\bar{\mathbf{x}}^i(t_n) - \bar{\mathbf{x}}(t_n))^T\end{aligned}$$

Unscented Kalman Filter u estimaciji stanja u energetske sistemima se sastoji iz nekoliko koraka:

- Inicijalizacija: Proces počinje inicijalizacijom početnog stanja sistema. Ovo može uključivati postavljanje inicijalnih vrednosti promenljivih stanja, kao i inicijalizaciju kovarijacione matrice koja opisuje nesigurnost u početnom stanju.
- Predikcija: Prvi korak u svakoj iteraciji je predikcija sledećeg stanja sistema. To se postiže propagacijom trenutnog stanja sistema kroz tranzicionu funkciju $f(x)$, koja opisuje evoluciju sistema tokom vremena. Koristi se i kovarijaciona matrica šuma procesa kako bi se uzela u obzir nesigurnost u predikciji.
- Generisanje sigma tačaka: Zatim se generišu sigma tačke, koje su odabrane tačke u prostoru stanja koje odražavaju statističku raspodelu stanja sistema. Ove tačke se biraju tako da što bolje opisuju raspodelu stanja i njegovu nesigurnost.
- Predikcija sigma tačaka: Svaka od sigma tačaka se zatim propagira kroz tranzicionu funkciju kako bi se dobile predikcije stanja u sledećem vremenskom koraku.
- Procena predikcije stanja: Nakon propagacije, procenjuje se srednja vrednost i kovarijansa predikcije stanja. Ovo se radi na osnovu prediktovanih sigma tačaka.
- Ažuriranje: Kada stignu novi mereni podaci, ažurira se procena stanja sistema. To se postiže kroz dva koraka:
- Generisanje sigma tačaka merenja: Koristeći procenju srednju vrednost i kovarijansu stanja, generišu se sigma tačke merenja kroz funkciju merenja, koja opisuje kako stanje sistema utiče na merene veličine.
- Ažuriranje stanja: Mereni podaci se zatim koriste za ažuriranje procene stanja sistema. Ovo se postiže proračunom težinskih faktora za svaku sigma tačku, koji se zatim koriste za procenu novog stanja sistema.
- Ponavljanje iteracija: Ovi koraci se ponavljaju za svaki novi vremenski korak, pri čemu se procena stanja sistema kontinuirano ažurira na osnovu novih merenja i predikcija.

Ovaj proces omogućava estimaciju stanja sistema u realnom vremenu, uzimajući u obzir kako merene podatke tako i nesigurnost u modelu sistema i merenjima.

VII MALICIOZNI NAPADI NA ESTIMATOR

Pretpostavlja se da postoji m broj mernih uređaja koji pružaju m merenja $z_1, \dots, z_m$ i da postoji n promenljivih stanja $x_1, \dots, x_n$. Odnos između ovih m merenja i n promenljivih stanja može se karakterisati matricom $m \times n$ koju će se označiti sa H . Uopšteno, matrica H elektroenergetskog sistema određuje se topologijom i

impedansama vodova sistema. Takođe pretpostavlja se da napadač može imati pristup matrici H ciljanog elektroenergetskog sistema i može ubacivati maliciozna merenja u kompromitovane mere kako bi narušio proces procene stanja.

Razmatraju se dva moguća cilja napada: nasumične napade ubacivanja lažnih podataka, u kojima napadač ima za cilj da pronađe bilo koji vektor napada koji može rezultirati pogrešnom procenom promenljivih stanja, i ciljane napade ubacivanja lažnih podataka, u kojima napadač teži pronalaženju vektora napada koji može ubaciti specifičnu grešku u određene promenljive stanja. Iako potonji napadi mogu potencijalno prouzrokovati više štete sistemu, prvi su lakši za izvršenje

Pored osnovnog opisa napada ubacivanja lažnih podataka, koriste se i sledeća dva verovatna scenarija napada kako bi olakšali diskusiju o tome kako napadač može konstruisati vektore napada kako bi zaobišao trenutne pristupe za detekciju loših merenja. Međutim, napadi ubacivanja lažnih podataka nisu ograničeni na ove scenarije napada.

Scenario I – Ograničen pristup mernim uređajima. Napadaču je dozvoljen pristup samo određenim mernim uređajima zbog različitih fizičkih zaštita mernih uređaja. Na primer, merni uređaji locirani u podstanicama sa fizičkom kontrolom perimetra mogu biti znatno teže dostupni u poređenju sa onima koji se nalaze u zaključanoj kutiji izvan zgrade.

Scenario II – Ograničeni resursi za kompromitovanje mernih uređaja. Napadaču su ograničeni resursi potrebni za kompromitovanje mernih uređaja. Na primer, napadač ima resurse da kompromituje samo do k mernih uređaja (od svih mernih uređaja). Zbog ograničenih resursa, napadač može takođe želeći da minimizira broj mernih uređaja koji će biti kompromitovani.

Analiza Scenarija I

U ovom scenariju, napadač ima ograničen pristup samo određenim mernim uređajima zbog različitih nivoa fizičke zaštite tih uređaja. Ova ograničenja znače da napadač može manipulirati samo merenjima na uređajima do kojih može fizički pristupiti ili na koje ima digitalni pristup. To bi mogli biti merni uređaji koji su manje zaštićeni ili se nalaze na periferiji mreže, umesto onih koji se nalaze unutar dobro čuvanih podstanica.

Selekcija ciljanih uređaja: Napadač prvo identifikuje uređaje do kojih može pristupiti. Ovo zahteva prethodno poznavanje mreže i njenih bezbednosnih mehanizama.

Analiza matrice H : Napadač analizira matricu H koja karakteriše odnos između mernih uređaja i promenljivih stanja sistema. Ovo zahteva poznavanje ili procenu topologije mreže i impedansi vodova.

Konstrukcija vektora napada: Na osnovu dostupnih informacija o matrici H , napadač konstruiše vektor napada koji je dizajniran da, kada se primeni na kompromitovane uređaje, izazove željenu pogrešnu procenu stanja u sistemu. Ovaj proces uključuje selekciju odgovarajućih vrednosti za manipulaciju merenja na dostupnim uređajima kako bi se izazvala specifična greška u procenjenim promenljivama stanja bez otkrivanja.

Implementacija napada: Napadač zatim implementira napad ubacivanjem konstruisanog vektora napada u merni sistem,

izmenom merenja na ciljanim uređajima.

Otkrivanje i odbrana: Iako ovaj pristup omogućava napadaču da izvede FDIA (*False Data Injection Attack*), postoji rizik od otkrivanja ukoliko sistem za detekciju loših merenja identifikuje anomalije u izmenjenim podacima.

Potreba za detaljnim znanjem: Uspešna implementacija napada zahteva detaljno znanje o mreži, uključujući topologiju i parametre sistema, što može da bude izazovno za napadača da obezbedi bez unutrašnjeg izvora ili naprednih tehnika izviđanja.

Scenario I pokazuje da čak i sa ograničenim pristupom, napadači mogu efikasno izvesti FDIA ako pažljivo odaberu ciljane merne uređaje i precizno konstruišu vektor napada. Međutim, uspeh ovakvog napada zavisi od sposobnosti napadača da se neopaženo infiltrira i manipuliše mernim sistemom, kao i od njihove sposobnosti da precizno procene ili pristupe ključnim informacijama o mreži.

Analiza Scenarija II

Ovaj scenario pretpostavlja situaciju u kojoj napadač mora efikasno upotrebiti svoje ograničene resurse da maksimizira uticaj napada na sistem.

Napadač mora pažljivo odabrati koje merne uređaje će kompromitovati kako bi maksimizovao efekat napada. S obzirom na ograničeni broj uređaja koje može efektivno kompromitovati, napadač treba da odredi koja merenja imaju najveći uticaj na procenu stanja sistema. To zahteva razumevanje veza između mernih uređaja i ključnih promenljivih stanja na koje napadač želi da utiče.

Nakon odabira ciljanih mernih uređaja, napadač konstruiše vektor napada koristeći dostupne informacije o konfiguraciji sistema i matrici H. Ovo uključuje proračunavanje promena koje treba napraviti na izabranim merenjima kako bi se izazvala željena greška u procenama stanja sistema. Efektivnost ovog

koraka zavisi od sposobnosti napadača da pristupi tačnim i detaljnim informacijama o sistemu.

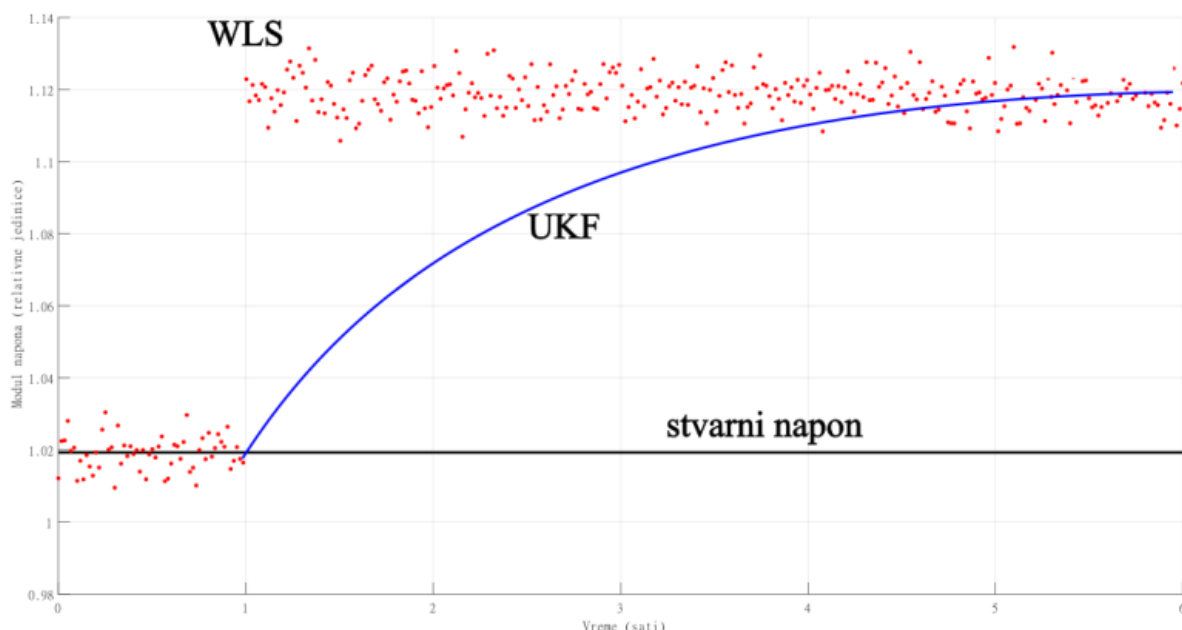
Za razliku od Scenarija I, gde je fokus na fizičkim ili digitalnim ograničenjima pristupa mernim uređajima, Scenarij II istražuje kako napadač može optimizovati upotrebu ograničenih resursa. Napadač mora balansirati između broja mernih uređaja koje želi da kompromituje i potrebe da ostane ispod radara detekcijskih sistema. Ovo često zahteva sofisticirane strategije i duboko poznavanje sistema da bi se identifikovali "slabi" merni uređaji čija kompromitacija može proizvesti disproporcionalno veliki uticaj na procenu stanja.

VIII PRIMER NAPADA

Pretpostavlja se da napadač ima neograničeno znanje o svim neophodnim parametrima sistema i da ima neograničene resurse. Napadač želi da injektiranjem loših merenja promeni napon u čvoru br. 5 za 1 relativnu jedinicu. Pretpostavimo da napad počinje u prvom satu. Ukoliko bi se za detekciju koristila samo statička WLS estimacija stanja, ona ne prati dinamiku sistema tj. ne zavisi od rezultata iz prošlosti. Kako napadač ima neograničeno znanje i resurse, on može odabrati takav vektor napada koje bi prošao kroz Hi-kvadrat test za identifikaciju loših merenja, kao i test na maksimalni normalizovani rezidual merenja. Međutim, ukoliko se koristi i dinamička estimacija stanja i to UKF algoritam, maliciozni napad neće biti preslikan odmah na napon u čvoru, već će se ka vrednosti koju napadač želi kretati postepeno.

U ovom primeru je zato iskorišćen vektor reziduala promenljivih stanja i to dobijenih od statičke WLS i dinamičke UKF estimacije:

$$\text{Res} = \tilde{x}_{\text{WLS}}(t_n) - \tilde{x}_{\text{UKF}}(t_n).$$



Slika 5. Prikaz rezultata simulacije

Normalizovani vektori reziduala promenljivih stanja se dobija deljenjem apsolutne vrednosti vektora reziduala promenljivih stanja sa kvadratnim korenom vrednosti dijagonalnih članova matrice kovarijansi promenljivih stanja iz UKF algoritma:

$$\text{Res}_{\text{nor}} = \frac{|\text{Res}(t_n)|}{\sqrt{R_x(t_n)}}.$$

Sada se detekcija malicioznih napada vrši isto kao i detekcija loših merenja: poređenjem maksimalnih normalizovanih reziduala. Postavlja se pitanje praga kada je maliciozni napad detektovan. Obično je to od 30 do 40 r.j. Na slici 5 su prikazani grafici stvarnog napona u čvoru br. 5. Može se primetiti da WLS estimacija do prvog sata prilično dobro prati stvarnu vrednost napona, a UKF se skoro poklapa sa stvarnom vrednosti napona. U prvom satu se događa maliciozni napad i kako WLS estimacija ne zavisi od prošlosti, ona odmah uzima novu vrednost, dok se UKF estimacija postepeno približava i uzima vrednost koju napadač želi tek nakon 4 sata. Primenom normalizovanog vektora reziduala promenljivih stanja se dobija da je u prvom satu on jednak 404, što je značajno iznad 30 do 40 r.j. i možemo reći da je napad detektovan.

IX ZAKLJUČAK

Uvođenje Phasor Measurement Units (PMU) uređaja unelo je revolucionarne promene u način na koji se vrši estimacija stanja u elektroenergetskim sistemima, donoseći značajna poboljšanja u preciznosti, brzini i pouzdanosti detekcije i identifikacije stanja mreže. PMU uređaji, merni instrumenti nove generacije, omogućavaju merenje električnih veličina u mreži, kao što su naponi i struje, sa visokom tačnošću i u realnom vremenu, pružajući time detaljan uvid u trenutno stanje mreže. Ključna poboljšanja kvaliteta estimacije stanja zahvaljujući PMU uređajima su povećana preciznost, a zahvaljujući visokoj tačnosti merenja faza i amplituda koje PMU uređaji pružaju, moguće je postići znatno precizniju estimaciju stanja elektroenergetske mreže. Ovo doprinosi boljem razumevanju dinamike sistema i poboljšava pouzdanost operativnih odluka. Takođe, PMU uređaji omogućavaju skoro trenutno praćenje promena u mreži zahvaljujući sposobnosti merenja u realnom vremenu. Ova karakteristika je ključna za brzo reagovanje na iznenadne poremećaje u mreži, omogućavajući efikasnu stabilizaciju sistema. Integracijom podataka sa PMU uređaja, sistemi za estimaciju stanja mogu efikasnije identifikovati i isključiti loša merenja, smanjujući uticaj grešaka i povećavajući pouzdanost procena stanja. PMU podaci, zbog svoje visoke tačnosti i kratkih vremenskih intervala merenja, pružaju dodatni sloj zaštite protiv napada na sisteme za estimaciju stanja, uključujući napade ubacivanjem lažnih podataka (FDIA). Upotrebom PMU podataka, sistem može brže i efikasnije detektovati anomalije koje mogu ukazivati na prisustvo malicioznih aktivnosti. PMU uređaji su posebno korisni u dinamičkim estimatorima stanja, kao što je UKF, omogućavajući detaljniju analizu promenljivosti i dinamike mreže. Ovo je posebno važno u kontekstu sve većeg učešća obnovljivih izvora energije i povećane potrebe za upravljanjem varijabilnosti i nepredvidivosti u mreži.

Istraživanje u fokusu pokazuje da postojeće metode za detekciju i

identifikaciju loših merenja u elektroenergetskim sistemima nisu dovoljno otporne na sofisticirane oblike malicioznih napada, kao što su napadi ubacivanja lažnih podataka (FDIA). Ključni problem leži u tome što se tradicionalne tehnike oslanjaju na analizu reziduala merenja, što napadačima omogućava da manipulišu sistemom tako da indukuju greške u procenjene vrednosti ciljanih promenljivih stanja, a da pritom ostanu neotkriveni. Napadači mogu da iskoriste poznavanje Jakobijeve matrice sistema za precizno usmeravanje svojih napada, simultano menjajući vrednosti određenih skupova merenja. Ovo čini promene nedetektovanim za tradicionalne metode detekcije. Ovi napadi predstavljaju realnu pretnju sa potencijalno ozbiljnim posledicama, s obzirom na sve učestalije hakerske napade na infrastrukturu energetskih sistema. Zbog toga je u radu predstavljena nova tehnika koja kombinuje statičku i dinamičku estimaciju stanja, koristeći nelinearni dinamički estimator stanja zasnovan na Unscented Kalman Filter (UKF) algoritmu. UKF je izabran zbog svoje sposobnosti da se efikasno nosi sa izrazito nelinearnim sistemima. Predložena metoda koristi kratkoročnu prognozu potrošnje i proizvodnje energije za konstrukciju tranzicione matrice, što omogućava preciznije predviđanje promenljivih stanja i smanjuje grešku tranzicionog procesa. Za detekciju FDIA koristi se nova metrika zasnovana na poređenju normalizovanih reziduala promenljivih stanja iz statičke i dinamičke estimacije stanja sa unapred definisanim pragom. Ovaj pristup omogućava detekciju napada čak i kada su promene indukovane napadom minimalne i nalaze se unutar uobičajenih grešaka estimatora stanja. Ovaj inovativni algoritam detekcije testiran je na test mrežama i pokazao se efikasnim u detektovanju FDIA, potvrđujući neophodnu osetljivost na različite intenzitete napada. Predstavljena metoda ne samo da unapređuje sigurnost i pouzdanost estimacije stanja u elektroenergetskim sistemima već i naglašava važnost kontinuiranog razvoja i prilagođavanja bezbednosnih mehanizama za zaštitu kritične infrastrukture od malicioznih napada.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Gomez-Exposito, A., Abur, A., Rousseaux, P., de la Villa Jaen, A., Gomez-Quiles, C. On the use of PMUs in power system state estimation, in Proc. *Proceedings of the 17th Power Systems Computation Conference (PSCC) 2011*, Stockholm, 22-26 August 2011. https://www.academia.edu/72290650/On_the_use_of_PMUs_in_power_system_state_estimation?auto=download [pristupljeno 04.02.2024]
- [2] Oh, H. Situational Awareness with PMUs and SCADA, 2017. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.00795>
- [3] Overbye, T., Sauer, P., DeMarco, C., Lesieutre, B., Venkatasubramanian, M. Using PMU data to increase situational awareness: Final Project Report, Power System Engineering Research Center (PSERC) Publication 10-16, 2010. https://pserc.wisc.edu/wp-content/uploads/sites/755/2018/08/S-36_Final-Report_Sept-2010.pdf [pristupljeno 04.02.2024]
- [4] Giri, J., Parashar, M., Trehern, J., Madani, V. The situation room: Control center analytics for enhanced situational awareness, *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 10, No. 5, pp. 24-39, 2012. <https://doi.org/10.1109/MPE.2012.2205316>
- [5] Korres, G.N., Manousakis, N.M. State estimation and bad data processing for systems including PMU and SCADA measurements, *Electric Power Systems Research*, Vol. 81, No. 7, pp. 1514-1524, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2011.03.013>
- [6] Das, K., Hazra, J., Seetharam, D. P., Reddi, R. K., Sinha, A. K. Real-time hybrid state estimation incorporating SCADA and PMU measurements, in Proc. *3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe)*, Berlin, Germany, pp. 1-8, 14-17 October 2012. <https://doi.org/10.1109/ISGTEurope.2012.6465749>

- [7] Avila-Rosales, R., Rice, M. J., Giri, J., Beard, L., Galvan, F. Recent experience with a hybrid SCADA/PMU on-line state estimator, in Proc. 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Calgary, Canada, pp.1-8, 26-30 July 2009. <https://doi.org/10.1109/PES.2009.5275954>
- [8] Phadke, A.G., Thorp, J.S. *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*, Springer 2008.
- [9] Abur, A., Exposito, A. *Power System State Estimation: Theory and Implementation*, New York: Marcel Dekker, 2004
- [10] Schweppe, F. C., Wildes, J. Power System Static-State Estimation, Part I: Exact Model, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 89, pp. 120-125, 1970. <https://doi.org/10.1109/TPAS.1970.292678>
- [11] Mijušković, N., Vlasisavljević, D. *Statička Estimacija Stanja Elektroenergetskog Sistema - Pregled Metoda*, Beograd: EPS, 1996.
- [12] Liu, Y., Ning, P., Reiter, M.K. False Data Injection Attacks Against State Estimation in Electric Power Grids, ACM Transactions on Information and System Security, Vol. 14, No. 1, pp. 1-33, 2011. <https://doi.org/10.1145/1952982.1952995>
- [13] Živković, N. *Detekcija malicioznih napada na elektroenergetski sistem korišćenjem sinergije statičkog i dinamičkog estimatora stanja*, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2019.
- [14] Kumar, J., Rai J.N., Vipin vp., Aurora. B.B., Singh C.K. Improvement in power system state estimation by use of phasor measurement unit, International journal of engineering research and technology (IJERT), Vol.1, No. 8, pp. 1-6, 2012. <https://www.ijert.org/research/improvement-in-power-system-state-estimation-by-use-of-phasor-measurement-unit-IJERTV1IS8201.pdf> [pristupljeno 08.02.2024]

AUTORI/AUTHORS

dr Vladimir Bećejac - PhD elektrotehnike i računarstva, EMS AD, vladimir.becejac@ems.rs, ORCID [0000-0002-2679-9354](https://orcid.org/0000-0002-2679-9354)

Miloš Đorđević - MS inženjer elektrotehnike i računarstva, EMS AD, milos.djordjevic@ems.rs, ORCID [0009-0001-6118-5104](https://orcid.org/0009-0001-6118-5104)

Nemanja Jelenić - diplomirani inženjer elektrotehnike i računarstva, EMS AD, nemanja.jelenic@ems.rs, ORCID [0009-0004-1878-7726](https://orcid.org/0009-0004-1878-7726)

Mihajlo Marković - diplomirani inženjer elektrotehnike i računarstva, EMS AD, mihajlo.markovic@ems.rs, ORCID [0009-0002-9604-5432](https://orcid.org/0009-0002-9604-5432)

Miloš Mosurović - MS inženjer elektrotehnike i računarstva, SEEPEX, milos.mosurovic@seepep-spot.rs, ORCID [0009-0005-3237-9734](https://orcid.org/0009-0005-3237-9734)

State Estimation in the Power System with Phasor Measurement Units and Malicious Attacks through Injection of Inaccurate Measurements and Its Detection

Abstract - This manuscript explores the significance of state estimation methods in electric power systems, with a particular focus on the role of Phasor Measurement Units. In the manuscript is presented the basic principles and advantages of state estimators in the absence of PMU measurements, followed by an analysis of how PMU measurements significantly enhance the accuracy of state estimations. Through a detailed review, we highlight the key characteristics of PMUs and how their synchronized data contributes to improved state estimation quality. The paper investigates the security aspects of state estimation, specifically focusing on malicious attacks through the injection of false measurements (FDIA). Using a concrete example, it is demonstrated how an FDIA attack can significantly impact the accuracy of state estimations by introducing inaccurate data into the system. The manuscript also considers a strategy for detecting such attacks through residual analysis.

Index Terms - State estimation, Phasor Measurement Unit (PMU), False Data Injection Attack (FDIA)

Energetska tranzicija u domaćinstvima: analiza usaglašenosti Srbije sa paketom „Čista energija za sve Evropljane“

Boban Pavlović*, Aleksandar Madžarević*, Dejan Ivezić*, Marija Živković*, Dušan Mojić**

* Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet, Đušina 7, 11120 Beograd, Srbija

** Univerzitet u Beogradu - Filozofski fakultet, Čika Ljubina 18-20, 11000 Beograd, Srbija

Rezime - Zahvaljujući svojoj složenosti i heterogenosti, sektor domaćinstva predstavlja neizostavnu tačku u politikama energetske tranzicije. U Evropskoj uniji, potrošnja energije u domaćinstvima čini oko 26% finalne potrošnje energije, dok u Srbiji ovaj sektor ima najveći udeo u finalnoj potrošnji, što čini oko trećinu finalne potrošnje. Primenom mera energetske efikasnosti moguće je ostvariti značajne energetske uštede, što zajedno sa smanjenjem i supstitucijom upotrebe fosilnih goriva vodi manjem doprinosu klimatskim promenama i značajnom smanjenju zagađenja vazduha. Paket zakonskih mera „Čista energija za sve Evropljane“ je sveobuhvatan skup zakona koji definišu evropsku klimatsku i energetske politiku nakon 2020. godine. Ovaj paket obuhvata i povezuje niz tema koje se tiču i sektora domaćinstva. Kroz ovaj paket se od država članica zahteva da postave visoke ciljeve u pogledu energetske efikasnosti i dekarbonizacije u gradnji i revitalizaciji stambenih objekata i istovremeno se zahteva sprovođenje mera koje se tiču domaćinstava pogođenih energetskim siromaštvom. Direktiva o energetskim performansama zgrada, Direktiva o energetskoj efikasnosti, Direktiva o obnovljivim izvorima energije, Uredba o upravljanju energetskom unijom i delovanju u oblasti klime i Uredba o uspostavljanju okvira za postizanje klimatske neutralnosti pokrivaju glavna pitanja vezana za energetske politiku tranzicije u domaćinstvima u Evropskoj uniji. Srbija se, kao članica Energetske zajednice i kandidat za članstvo u Evropskoj uniji, obavezala da će uskladiti svoju politiku i zakonodavstvo u energetici, prihvatiti tehničku pomoć i podršku u sprovođenju reformi kako bi prilagodila nacionalni energetske sistem evropskim standardima. Cilj ovog rada jeste prikaz regulatornog i strateškog okvira „Čista energija za sve Evropljane“ u delu koji se odnosi na sektor domaćinstva i analiza njegove transpozicije u ključne zakonske odredbe Republike Srbije koje se bave ovom tematikom.

Ključne reči - energetska tranzicija, Paket čiste energije, regulatorni okvir, energetska politika, domaćinstva, Srbija

I UVOD

Evropska unija (EU) je međunarodna organizacija koja predstavlja politički i ekonomski savez sa izuzetno ambicioznim ciljevima u sprovođenju energetske tranzicije [1]. U sklopu nove strategije razvoja EU, tzv. „Evropskog zelenog dogovora“, najavljeno je da će do 2030. godine biti uloženi 1 trilion evra (€) u politiku klimatske neutralnosti i smanjenje

emisije gasova staklene bašte za 55% do 2030. godine u odnosu na 1990. godinu [2]. Fokus Evropskog zelenog dogovora je očuvanje životne sredine i suzbijanje klimatskih promena, uz istovremeno razvijanje ekonomije EU [3]. Novi element zakonodavnog okvira EU, poznat i kao paket „Čista energija za sve Evropljane“, razvijen je kroz sistem direktiva i uredbi koji će pomoći u dekarbonizaciji energetskog sistema EU u skladu sa ciljevima Evropskog zelenog dogovora [4]. Ovaj paket nadograđuje sve prethodne inicijative, te ima za cilj dekarbonizaciju, promovisanje integracije obnovljive energije (OIE), poboljšanje energetske efikasnosti i kreiranje povezanijeg i konkurentnijeg evropskog energetskog tržišta. Paket uključuje mere koje se odnose na OIE, energetske efikasnosti, dizajn tržišta električne energije, upravljanje „energetskom unijom“ itd.

Pored svoje složenosti koja predstavlja izazov kod dugoročnog planiranja energetske tranzicije [5], sektor domaćinstva je posebno izazovan i zbog činjenice da ovaj sektor, u poređenju sa drugima, pruža mogućnosti za značajno unapređenje energetske efikasnosti i ostvarivanje energetske uštede [6]. Prosečan Evropljanin provodi 90% vremena u zatvorenom prostoru, samim tim dobrim delom troši energiju za zadovoljenje potreba u stambenom i radnom prostoru. Dve trećine (65%) zgrada u Evropi izgrađene su pre 1980. godine. U skladu sa ciljevima Evropskog zelenog dogovora, oko 97% zgrada EU mora biti renovirano kako bi se postigao cilj dekarbonizacije do 2050. godine, ali samo oko 1% se obnovi svake godine [7].

U ukupnoj finalnoj potrošnji energije u članicama EU, sektor domaćinstva zauzima nešto više od jedne četvrtine (oko 26% udela), a najveći deo potrošene energije odlazi na grejanje stambenog prostora [8]. Prirodni gas igra najveću ulogu u zagrevanju zgrada, čineći oko 42% energije koja se koristi za grejanje prostora u stambenom sektoru. Nafta je drugo najvažnije fosilno gorivo za grejanje, sa udelom od 14 %, dok ugalj čini oko 3%. Stoga, smanjenje potrošnje energije i korišćenje energije iz OIE u sektoru zgrada predstavljaju važne mere potrebne za smanjenje emisija gasova staklene bašte i energetskog siromaštva u Uniji i uopšte za ostvarenje Evropskog zelenog dogovora.

Do sada je u domaćoj stručnoj i naučnoj literaturi bilo malo napora da se identifikuju aspekti politike i prateće zakonske regulative EU koji imaju uticaja na energetske tranzicije u sektoru domaćinstva u Srbiji, kao državi kandidatu za članstvo u EU. Glavni motiv ovog rada jeste bolje razumevanje strateškog i regulatornog konteksta u okviru koga se sprovodi aktuelna energetska tranzicija u sektoru domaćinstva. Da bi se preciznije

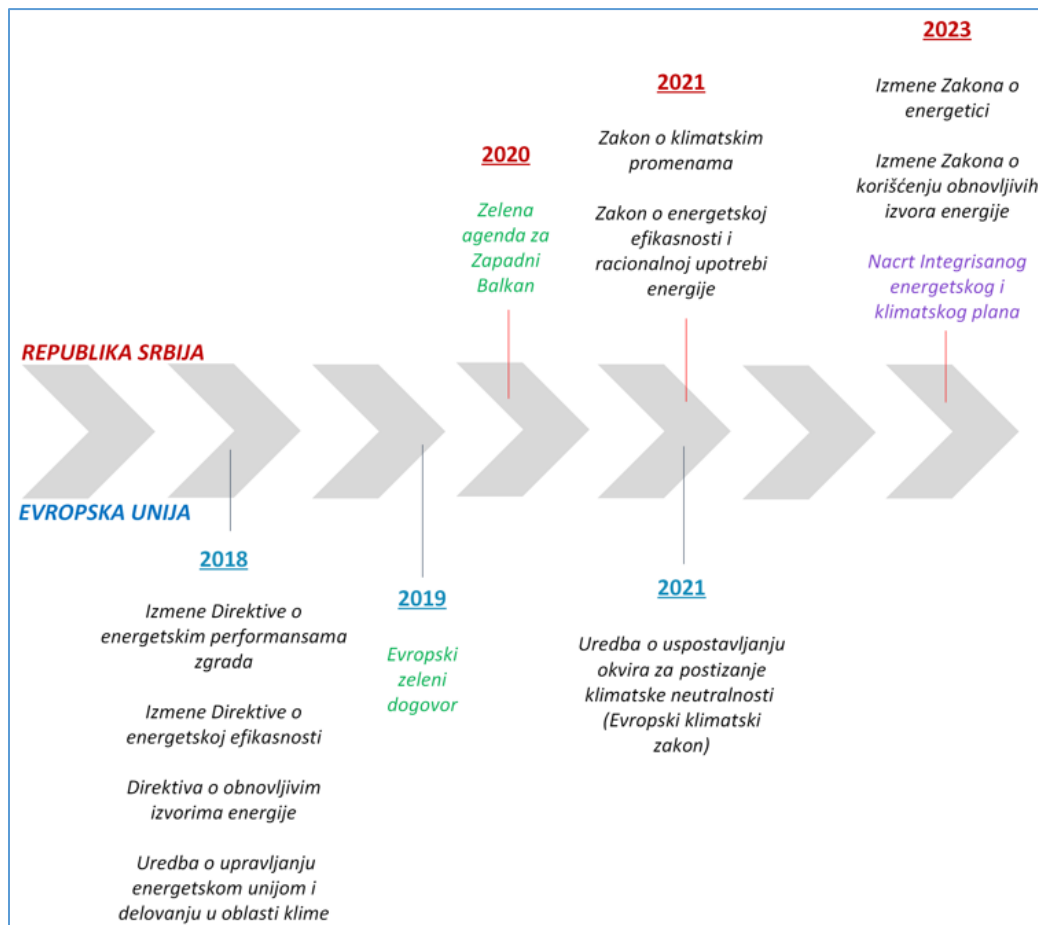
procenile direktne posledice politike na konkretan energetska sektor, identifikacija konkretnih ciljeva predstavlja prvi korak u definisanju održivih dugoročnih i kratkoročnih planova, kao i konkretnih instrumenata za njihovo ostvarenje.

Glavni cilj ovog rada je razumevanje strateškog i regulatornog konteksta koji oblikuje trenutnu energetska politiku, u svrhu bolje procene njegovih direktnih posledica na specifični sektor energetike. U radu je izvršena analiza energetske politike EU i proizašlog zakonodavnog okvira „Čista energija za sve Evropljane“ s ciljem identifikacije aspekata koji se odnose na sektor domaćinstava. Takođe je (na nivou Srbije) izvršena identifikacija aktuelnih ciljeva energetske politike u sektoru

domaćinstava kroz prepoznavanje ključnih zakonskih odredbi koje se bave ovom tematikom. Na osnovu analize trenutnog regulatornog okvira politike energetske tranzicije u sektoru domaćinstava, dat je uporedni prikaz politike EU i Srbije.

II ANALITIČKI OKVIR

Energetska (i klimatska) politika i zakonodavstvo EU međusobno su povezane komponente unutar okvira koji reguliše energetska tranziciju EU [4]. Iako imaju različitu prirodu i formu, tesno su povezani, jer zajedno uređuju način ostvarivanja određenih ciljeva u vezi sa transformacijom proizvodnje, distribucije i potrošnje energije do 2050. godine.



Slika 1. Analitički okvir

Energetska politika definiše dugoročne vizije, ciljeve i strategije za održivi razvoj energetike. Ona postavlja pravni i strateški okvir za energetska sektore, definiše opšti pravac i prioritete, poput prelaska na OIE, poboljšanja energetska efikasnosti, osiguranja energetska bezbednosti i drugo. Zakonodavstvo, sa druge strane, predstavlja propisi, i obavezujući standardi (uvršteni u sekundarne propise) razvijeni za sprovođenje energetska politike koji utvrđuju pravila i zahteve neophodne za praktičnu primenu politika. Praktično gledano, zakonodavstvo prevodi ciljeve politike u sprovodljiva pravila [9]. U EU, sekundarno zakonodavstvo: uredbe, direktive, odluke, preporuke i mišljenja su pravni instrumenti koji uređuju pravni okvir svim članicama EU. Uredba je obavezan propis EU koji se primenjuje

direktno i jednako u svim članicama bez potrebe za prenošenje u nacionalno zakonodavstvo država članica radi implementacije. Direktive nemaju neposredno dejstvo u nacionalnim pravnim sistemima članica. Umesto toga, zahtevaju prenošenje u nacionalno zakonodavstvo svake države članice [10].

S obzirom da je predmet analize u ovom radu evropski paket nazivom „Čista energija za sve Evropljane“ u EU i odgovarajući politički i zakonodavni okvir u Srbiji, akcenat u radu je na analizi krovnihi dokumenata (uredbi i direktiva u EU i domaćih zakona u Srbiji) i to prema relevantnosti tema koje su obrađene u dokumentima sa aspekta tranzicije u sektoru domaćinstva i unapređenja energetska efikasnosti stambenog fonda (Slika 1).

III EVROPSKA UNIJA

A Direktiva o energetske performansi zgrada

Direktiva o energetske efikasnosti zgrada (engl. *Energy Performance of Buildings Directive* - EPBD) predstavlja glavnu smernicu evropskog zakonodavstva za energetske tranzicije u sektoru građevinarstva. Poslednje izmene ove direktive su izvršene 2018. godine [11] u pravcu potpune dekarbonizacije evropskog fonda zgrada, samim tim i stambenih objekata, do 2050. godine, sa povećanim naglaskom na renoviranje i modernizaciju u gradnji. Prema EPBD, sve države članice EU-a moraju uspostaviti dugoročnu strategiju renoviranja (engl. *Long term renovation strategy* - LTRS) kako bi podržale renoviranje svog nacionalnog fonda zgrada u visoko energetske efikasne i dekarbonizovan fond zgrada do 2050. godine. Ova strategija treba da predstavlja deo integrisanog nacionalnog energetske i klimatskog plana (INEKP) države članice.

Kao značajan instrument sa aspekta smanjenja potrošnje energije, EPBD propisuje upotrebu sertifikata (energetskih pasoša) o energetske svojstvima zgrada (engl. *Energy performance certificate* EPC) kao zvaničnog uverenja o energetske efikasnosti zgrada. Energetski pasoši pružaju standardizovan i transparentan način za procenu i upoređivanje energetske efikasnosti različitih zgrada. Oni moraju da uključe energetske efikasnost zgrade i referentne vrednosti poput minimalnih zahteva za energetske efikasnost kako bi vlasnicima ili zakupcima zgrade ili stana omogućili upoređivanje i procenu energetske efikasnosti. Takođe, oni mogu sadržati informacije o tome kako poboljšati performanse zgrade, kao i dodatne informacije poput godišnje potrošnje energije i procenat energije iz obnovljivih izvora u ukupnoj potrošnji energije zgrade.

Kada su u pitanju energetske razredi, države članice moraju osigurati da svi objekti zadovolje minimalne standarde energetske efikasnosti, počevši od najslabije ocenjenih objekata. Konkretno, države članice moraju osigurati da stambeni objekti i stambene jedinice dostignu najkasnije 2030. godine barem energetske razred E, a 2033. godine barem energetske razred D, prema nacionalnoj klasifikaciji. Sem toga, do 2050. godine svaka država članica treba da uspostavi nacionalni plan renoviranja zgrada kako bi obezbedila renoviranje nacionalnog fonda stambenih i nestambenih zgrada, kako javnih tako i privatnih, u „visoko energetske efikasne i dekarbonizovan“ fond zgrada.

Zbog težnje za smanjenjem zavisnosti od fosilnih goriva u zgradama, EPBD propisuje da bi sve nove zgrade trebalo da budu konstruisane na način koji će omogućiti jednostavnu instalaciju solarnih panela, odnosno dizajnirane tako da optimizuju potencijal za iskorišćenje solarnih panela na osnovu solarnog zračenja na lokaciji.

B Direktiva o energetske efikasnosti

Evropa je pitanje energetske efikasnosti uvela u javnu politiku još tokom naftne krize sedamdesetih godina. Poboljšanje energetske efikasnosti zgrada bilo je sredstvo za zaštitu sigurnosti snabdevanja energijom. Od tada su razvijene različite politike o energetske efikasnosti za različite energetske sektore i različite grane ekonomije. U poslednjih nekoliko godina energetska efikasnost dodatno dobija na značaju kako bi se

postigao cilj Pariskog sporazuma o ograničavanju globalnog zagrevanja na 1,5 °C [12].

Direktiva o energetske efikasnosti (EED) [13] postavlja sveobuhvatan pravni okvir i cilj za politiku energetske efikasnosti u EU. Stupila je na snagu 2012. godine i tada je propisivala meru za postizanje cilja energetske efikasnosti od 20% do 2020. godine. Njena revizija iz 2018. postavlja cilj energetske efikasnosti od 32,5% do 2030. godine. Ovako ambiciozno postavljen cilj direktno utiče na strožije mere koje države članice moraju da usvoje kako bi smanjile potrošnju energije u sektoru zgrada. Da bi se cilj postigao, države članice moraju da daju svoj nacionalni doprinos energetske efikasnosti (tj. njihov udeo u EU cilju) i da to predstave Evropskoj komisiji u okviru svojih Nacionalnih energetskih i klimatskih planova. Pri uspostavljanju svojih doprinosa, države članice mogu usmeriti nacionalne akcije na sektore sa najvećim potencijalom za uštedu energije, uključujući tu i sektor zgrada i stambeni fond.

Izmenjeni EED takođe zahteva od država članica da sprovede mere koje se odnose na ranjiva domaćinstva, uključujući ona pogođena energetske siromaštvom. Neefikasne zgrade često su povezane sa energetske siromaštvom i socijalnim problemima. Ranjiva domaćinstva su posebno izložena rastućim cenama energije jer troše veći deo svojih budžeta na energetske proizvode. Glavna pretpostavka od koje se polazi jeste da se, dajući prioritet renoviranju u tim domaćinstvima, obezbeđuje smanjenje računa za potrošnju energije, što na kraju utiče na poboljšanje životnih uslova građana EU.

EED uvodi i daljinsko očitavanje troškova grejanja kao novi standard za nove zgrade. Od 2027. godine, to će važiti za sve postojeće uređaje. Do tada, svi merači moraju biti zamenjeni ili prilagođeni. Prilikom prenošenja pravila o merenju i fakturisanju, države članice mogu uzeti u obzir nacionalne okolnosti, poput klimatskih uslova, zakupnine i vlasništva nad imovinom i dr.

C Direktiva o obnovljivim izvorima energije (OIE)

Promovisanje i veća upotreba OIE jedan je od ciljeva energetske politike EU i deo paketa mera potrebnih za smanjenje emisija gasova staklene bašte u skladu sa Pariskim sporazumom o klimatskim promenama [7]. Direktiva o OIE (engl. *Renewable Energy Directive* - RED) definiše opšti cilj EU za 2030. godinu od najmanje 32% energije iz OIE u finalnoj potrošnji energije. Direktiva prenosi slobodu na države članice da postavljaju svoje nacionalne ciljeve, koji mogu biti i optimističniji, a koji će biti prijavljeni u Nacionalnim energetske i klimatske planovima.

Kada su u pitanju specifični ciljevi za sektor grejanja i hlađenja, Direktiva propisuje godišnje povećanje za 1,3% udela OIE u tom sektoru. Pored toga, propisuje se pravo potrošača da se isključe iz neefikasnih sistema centralizovanog grejanja i hlađenja, kao i pristup trećim stranama za distributere OIE i otpadne toplote mrežama centralizovanog grejanja i hlađenja.

Države članice moraju uvesti odgovarajuće mere u svoje građevinske propise i kodekse kako bi povećale udeo OIE u sektoru građevinarstva. Na primer, moraju uvesti minimalni nivo OIE kako u nove objekte, tako i u objekte koji prolaze kroz značajno renoviranje u svoje građevinske propise i kodekse. Takođe, potrebno je omogućiti potrošačima da učestvuju u

energetskoj tranziciji sa pravom proizvodnje sopstvene obnovljive energije [14].

IV REPUBLIKA SRBIJA

D Uredba o upravljanju energetskom unijom i delovanju u oblasti klime

Uredba o upravljanju (engl. *Governance Regulation* - GR), prvi put uspostavljena 2018. godine, postavlja okvir za saradnju (koordinaciju i izveštavanje) između EU i njenih država članica u pogledu politike o klimi i energiji [15].

Uredba zahteva od država članica EU:

- izradu INEKP za period od 2021. do 2030. godine do 31. decembra 2019. godine, a zatim ponovnu izradu do 1. januara 2029. godine i svakih deset godina nakon toga;
- pripremu strategija za dugoročno postizanje niskih emisija (engl. *Long term strategy* – LTS) sa pedesetogodišnjom perspektivom izveštavanja Evropskoj komisiji, s ciljem doprinosa širim ciljevima održivog razvoja i dugoročnim ciljevima utvrđenim Pariskim sporazumom.

Da bi se obezbedila poboljšana koordinacija i jača posvećenost, državama članicama EU nalaže se Uredbom o upravljanju Energetskom unijom i akcijom za klimu da razviju posebne INEKP-ove, koji će detaljno opisati kako će dostići ove ciljeve. Prvi INEKP-ovi su ocenjeni od strane Evropske komisije 2020. godine. Prema Uredbi o upravljanju, planovi moraju biti ažurirani do 2024. godine, sa prvim nacrtom koji treba dostaviti do 30. juna 2023. godine [16]. Nacionalni energetski i klimatski planovi, koji su tesno povezani sa nacionalnim dugoročnim strategijama renoviranja (LTRS), moraju pružiti ovu informaciju i objasniti kako države članice planiraju da dostignu svoje klimatske i energetske ciljeve.

Uredba o upravljanju takođe zahteva od država članica da razviju dugoročnu strategiju (LTS) do 2020. godine. Ova strategija predstavlja plan dekarbonizacije celokupnog društva na nacionalnom nivou, koji će voditi aktivnosti na nacionalnom nivou u smanjenju emisija iz svih sektora na dugi rok (pokriva period od najmanje 30 godina).

E Evropski klimatski zakon

Evropski klimatski zakon definiše mere EU koje imaju za cilj da pomognu državama članicama u ostvarivanju cilja klimatske neutralnosti do 2050. godine. Opšti cilj ove uredbe jeste smanjenje neto emisija gasova staklene bašte najmanje 55% (u poređenju sa nivoima iz 1990. godine) do 2030. godine. Takođe, regulativa propisuje ograničavanje doprinosa neto uklanjanja na maksimum od 225 miliona tCO_{2eq} kako bi se osigurali dovoljni napor za ublažavanje do 2030. godine [17].

Zahteva se od Evropske komisije da u roku od 6 meseci od svake globalne revizije podataka prema Pariskom sporazumu izveštava Evropski parlament i Savet o napretku koji EU i države članice ostvaruju u ispunjavanju ciljeva ove uredbe. Komisija takođe treba da procenjuje da li su mere EU i nacionalne mere ka tim ciljevima dosledne [17]. Države članice takođe moraju osnovati nacionalno savetodavno telo za klimu koje će pružati stručne naučne savete relevantnim nacionalnim telima i dostaviti svoju tridesetogodišnju strategiju Evropskoj komisiji do 1. januara 2029. godine i dostavljati je svakih deset godina nakon toga, ažurirajući je po potrebi svakih pet godina.

A Zelena agenda za Zapadni Balkan

Proklamovana Sofijskom deklaracijom 2020. godine, Zelena agenda za Zapadni Balkan predstavlja ključni okvir za regionalni razvoj, čije je osnovno načelo suočavanje s izazovima klimatskih promena i ostvarivanje zelene tranzicije. Ova strategija ima za cilj podršku zemljama Zapadnog Balkana u usklađivanju propisa o životnoj sredini s evropskim standardima i normama, omogućavajući im pristup zajedničkom tržištu i promociju održivog razvoja.

Evropski zeleni dogovor [18] (koji je temelj Zelene agende za Zapadni Balkan) postavlja ambiciozne ciljeve u vezi s smanjenjem emisija gasova sa efektom staklene bašte (GHG), OIE, energetskom efikasnošću i zaštitom biodiverziteta. Njome se promoviše ideja intenzivnog održivog razvoja, stvaranje „zelenih“ radnih mesta i unapređenje kvaliteta života građana [19]. Ova agenda predlaže ambiciozne ciljeve u cilju efikasne, inkluzivne i održive primene u Srbiji u svim sektorima, a sa posebnim osvrtnom na sektor domaćinstva i na unapređenje energetske efikasnosti stambenog fonda. Fokusira se na unapređenje strateškog i zakonodavnog okvira, sufinansiranje inovativnih pilot projekata i mobilizaciju dodatnih sredstava za proširenje projekata koji podržavaju zelenu transformaciju domaćinstava u Srbiji. Generalni ciljevi agende su doprinosi dekarbonizaciji, ne samo privrede, već svih ljudskih delatnosti, postizanje ciljeva Pariskog sporazuma, smanjenje zagađenja životne sredine (vazduha, zemljišta i vode) i usklađivanje zakonodavnog okvira sa evropskim standardima. Prioritetne oblasti uključuju dekarbonizaciju i energetske efikasnosti, cirkularnu ekonomiju, zaštitu biodiverziteta, smanjenje zagađenja životne sredine i podršku održivim prehrambenim sistemima, ruralnom razvoju i održivom stanovanju [19].

Republika Srbija je od 2021. godine izvela reforme pravnog okvira u oblasti energetike i klimatskih promena, usvajajući novi zakonodavni paket kroz donošenje Zakona o izmenama i dopunama Zakona o energetici, Zakona o energetskoj efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije, Zakona o korišćenju obnovljivih izvora energije, Zakona o izmenama i dopunama Zakona o korišćenju obnovljivih izvora energije, Zakona o izmenama i dopunama Zakona o rudarstvu i geološkim istraživanjima, Zakona o komunalnim delatnostima, Zakona o planiranju i izgradnji, kao i Zakona o klimatskim promenama. U daljoj analizi pažnja je posvećena zakonskim aktima i uredbama, koji se preklapaju sa regulatornim i strateškim okvirom paketa „Čista energija za sve Evropljane”.

B Zakon o energetskoj efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije

Zakon o energetskoj efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije u Srbiji iz 2021. godine ima za cilj detaljno uređenje uslova i načina efikasnog korišćenja energije i energenata, obuhvatajući širok spektar tema u vezi s tim. Zakon definiše politiku efikasnog korišćenja energije, uspostavlja sistem energetske menadžmenta i propisuje mere politike energetske efikasnosti [21]. Fokusirajući se na korišćenje energije u zgradama, rezidencijalnom sektoru, energetskim delatnostima i kod krajnjih korisnika, zakon obuhvata energetske objekte i usluge. Posebna

pažnja posvećena je finansiranju, podsticajnim merama i drugim inicijativama u oblasti energetske efikasnosti, a posebno za sektor domaćinstva. Zakon takođe predviđa i uređuje osnivanje Uprave za finansiranje i podsticanje energetske efikasnosti, koja će imati ključnu ulogu u sprovođenju ovih mera, ali i dodatno urediti uslove za ugovaranje energetske usluga (ESKO). Sve ove odredbe imaju za cilj regulisanje prava i obaveza kako fizičkih, tako i pravnih lica u vezi s efikasnim korišćenjem energije. Zakon predstavlja sveobuhvatni okvir koji podržava implementaciju politika energetske efikasnosti, stvaranje održivih energetske prakse i doprinosi globalnim naporima u borbi protiv klimatskih promena. Ciljevi Zakona o energetske efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije u Srbiji su stvaranje uslova za efikasno korišćenje energije i unapređenje energetske efikasnosti doprinoseći:

- ostvarivanju ušteda energije;
- povećanju sigurnosti snabdevanja energijom;
- smanjenju uticaja energetskog sektora na životnu sredinu i klimatske promene;
- održivom korišćenju prirodnih i drugih resursa;
- povećanju konkurentnosti privrede;
- poboljšanju uslova za ekonomski razvoj;
- smanjenju energetskog siromaštva.

C Zakon o energetici

Zakon o energetici predstavlja ključni pravni okvir koji reguliše sve aspekte proizvodnje, distribucije, snabdevanja i korišćenja energije u društvu [22]. Ovaj zakon ima za cilj uspostavljanje efikasnog sistema upravljanja energijom, promociju OIE, zaštitu životne sredine i obezbeđivanje sigurnosti i pouzdanosti snabdevanja. Zakon o energetici sadrži odredbe o energetske efikasnosti, diversifikaciji izvora energije, tržišnoj konkurenciji, zaštiti potrošača, kao i merama za smanjenje emisija GHG. Takođe, ovaj zakon usmerava strategiju energetskog sektora ka održivom razvoju, podstičući investicije u nove tehnologije i infrastrukturu naklonjenu racionalnijoj i efikasnijoj upotrebi energije. Zakonom je propisano donošenje Nacionalnog akcionog plana za korišćenje OIE kojim se utvrđuju ciljevi korišćenja OIE za period od najmanje 10 godina [22]. Nacionalni akcioni plan mora biti usklađen sa propisima kojima se uređuje energetska efikasnost i smanjenje emisije GHG gasova.

Iako je Zakon o energetici krovni dokument (i kao takav veoma opšteg karaktera) ipak predviđa mere za pomoć ugroženim domaćinstvima kao energetske ugroženim kupcima. Istovremeno, kroz Zakon je definisan mehanizam obezbeđenja nediskriminatornog pristupa energetske sistemima, kao i konkurencije i efikasnog funkcionisanje tržišta električne energije i prirodnog gasa [22].

Promene u Zakonu o energetici u 2023. godini donele su značajne novitete, posebno uvođenjem obaveze izrade i praćenja sprovođenja INEKP-a [23]. Ove izmene su usklađene sa obavezama prema Ugovoru o Energetskoj zajednici, koji postavlja nacionalne ciljeve u oblasti dekarbonizacije, emisija GHG, OIE, energetske efikasnosti, energetske sigurnosti, unutrašnjeg energetskog tržišta, istraživanja, inovacija i konkurentnosti. INEKP predstavlja ključni instrument za postizanje energetske i klimatske ciljeve do 2030. godine. Plan obuhvata oblasti poput povećanja udela OIE, poboljšanja

energetske efikasnosti, smanjenja emisija GHG, razvoja energetske interkonekcije i podrške istraživanjima i inovacijama u različitim oblastima, pa i u sektoru domaćinstva. Od februara 2021. Ministarstvo rudarstva i energetike radi na izradi INEKP do 2030. godine, sa vizijom do 2050. godine. U decembru 2023. godine je usvojen Nacrt INEKP, zajedno sa nacrtom Izveštaja o strateškoj proceni uticaja INEKP-a na životnu sredinu. INEKP Republike Srbije treba sveobuhvatno sagledati kroz pet dimenzija, i to dekarbonizaciju, energetske efikasnost, energetske sigurnost, unutrašnje energetske tržište, i istraživanje, inovacije i konkurentnost [23].

Nacrtom Strategije razvoja energetike do 2040. godine, sa projekcijama do 2050. godine kroz viziju i ciljeve razvoja predviđeno je intenzivno uvođenje OIE i toplotnih pumpi u proizvodnju toplotne energije u sistemima daljinskog grejanja i u finalnoj potrošnji (sektor domaćinstva), kao i intenzivnu primenu mera energetske efikasnosti i smanjenje specifične potrošnje energije u svim sektorima finalne potrošnje (domaćinstva, industrija, saobraćaj i dr.).

D Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije (OIE)

Zakon o korišćenju OIE Republike Srbije ima ključnu ulogu u regulisanju upotrebe energije iz OIE [24]. Ovaj zakon postavlja jasne ciljeve u vezi s korišćenjem OIE, definiše načine određivanja udela OIE u bruto finalnoj potrošnji energije zemlje i podstiče integraciju ovih izvora na energetske tržište. Posebna pažnja posvećena je sistemima podsticaja za proizvodnju električne energije iz OIE, uključujući garancije porekla električne energije. Zakon takođe omogućava proizvodnju električne energije iz OIE za sopstvenu potrošnju, dok definiše pravila za korišćenje OIE u oblasti toplotne energije i saobraćaja. Nadzor nad sprovođenjem ovog zakona od velike je važnosti, a zakon takođe ostavlja prostor za primenu odredbi drugih zakona u oblasti energetike na pitanja koja nisu direktno obuhvaćena ovim aktom. Sve ove odredbe čine integralni deo šire strategije održivog korišćenja energije u Republici Srbiji.

Zakon predviđa promociju upotrebe OIE u domaćinstvima, pre svega kroz podsticaje, doprinoseći održivijem i ekološki prihvatljivijem energetske sektoru [24]. Ovakve inicijative doprinose ne samo održivosti energetskog sektora već i smanjenju troškova energije za domaćinstva, čineći OIE privlačnim izborom za građane Srbije. Ovaj zakon predviđa dve vrste podsticaja: podsticaje za upotrebu inovativnih tehnologija i novih OIE (poput zelenog vodonika), kao i podsticaje za proizvodnju biogoriva. Obnovljivi vodonik se može koristiti u sektoru grejanja i saobraćaju, i kao zamena za prirodni gas.

E Zakon o klimatskim promenama

Zakon o klimatskim promenama uspostavlja sveobuhvatan sistem za ograničenje emisija GHG i prilagođavanje na klimatske promene u Srbiji [25]. Ovaj zakon uključuje odredbe za monitoring, izveštavanje, kao i izdavanje dozvola za emisije GHG i odobrenja za planove monitoringa. Zakon pokriva emisije GHG izazvane ljudskim aktivnostima i uticaje na različite sektore, postavljaajući okvir za nacionalne i sektorske politike usmerene ka smanjenju emisija.

Ključni elementi ovog zakona su [25]:

- uspostavljanje strategije niskougljeničnog razvoja,

akcionog plana za sprovođenje strategije i programa prilagođavanja klimatskim promenama;

- uspostavljanje procedura za monitoring, izveštavanje, verifikaciju emisija GHG;
- uspostavljanje Nacionalnog inventara GHG;
- definisanje administrativnih taksi, nadzora i drugih povezanih pitanja;
- osiguravanje usklađenosti sa međunarodnim sporazumima o klimatskim promenama, kao što su Okvirna konvencija Ujedinjenih nacija (UN) o promeni klime, Kjoto protokol i Sporazum iz Pariza;
- implementacija sektorskih politika i mera od strane državnih organa radi postizanja ciljeva smanjenja emisija.

Zakon takođe predviđa učešće javnosti u pripremi strategija i planova za klimatske promene i uspostavlja Nacionalni savet za klimatske promene kao savetodavno telo Vlade. Pored toga, definiše mehanizme za informisanje potrošača i pristup informacijama od javnog značaja.

F Zakon o komunalnim delatnostima

Pored navedenih zakona kojima se direktno uređuje zakonski okvir energetske sistema u Srbiji, u analizu energetske politike u sektoru domaćinstava je važno uključiti i zakone koji regulišu komunalne aktivnosti i građevinarstvo, jer su ove delatnosti povezane sa obrascima potrošnje energije i efikasnošću. Razumevanje ovih zakonskih okvira omogućava sveobuhvatniji uvid u činioce koji utiču na potrošnju i način korišćenja energije.

Zakon o komunalnim delatnostima, u skladu s vizijom „čistije energije za sve“, postavlja temelje za održiv i energetski efikasan pristup ključnim komunalnim uslugama [26]. Ovaj zakon ne samo da definiše oblasti poput proizvodnje i distribucije toplotne energije, snabdevanja vodom, upravljanja otpadom i javnog prevoza, već se aktivno usklađuje s ciljevima čistije energije kroz podsticanje na primenu održivijih praksi. Načela "zagađivač plaća" i "potrošač plaća" postavljaju se kao osnova određivanja cena komunalnih usluga, uz naglasak na pokrivanju poslovnih rashoda, ali i podsticanju energetske efikasnosti.

U duhu proglašenja „čistija energija za sve“, posebna pažnja posvećuje se podršci inovativnim rešenjima i tehnologijama koje doprinose smanjenju emisija gasova sa efektom staklene bašte. Cene komunalnih usluga planiraju se s obzirom na princip pristupačnosti, čime se osigurava ravnoteža između održivosti i pristupa građana ključnim uslugama. Jedinica lokalne samouprave, uzimajući u obzir smernice "Paketa čistije energije za sve", ima ovlašćenje da propiše specifične cene za kontrolu korišćenja komunalnih usluga u cilju usklađivanja sa normama i podsticanja ekološki odgovornog ponašanja. Uz ove mere, zakon pruža fleksibilnost u plaćanju cena komunalnih usluga, podržavajući korake ka čistijoj i održivoj energetici za sve građane i domaćinstva [26].

G Zakon o planiranju i izgradnji

Zakon o planiranju i izgradnji u Srbiji predstavlja ključni pravni okvir za upravljanje urbanim razvojem i izgradnjom infrastrukture. Ovaj zakon definiše postupke za stvaranje prostornih planova, izdavanje građevinskih dozvola i

sprovođenje planirane izgradnje. U skladu s vizijom „čistije energije za sve“, Zakon o planiranju i izgradnji se unapređuje kako bi promovisao održivu urbanizaciju i integrisao principe čiste energije u sve faze planiranja [2].

Poseban naglasak stavlja se na podsticanje energetske efikasnosti u izgradnji, promovisanje upotrebe OIE i smanjenje emisija štetnih gasova. Prilikom donošenja prostornih planova Zakon podstiče inkluzivan pristup, uz uključivanje ekoloških aspekata i ciljeva „čistije energije za sve“. Građevinske dozvole se izdaju uz uslove koji promovišu energetsku efikasnost zgrada i primenu ekološki prihvatljivih materijala. Zakon o planiranju i izgradnji predviđa da sve zgrade (bez obzira na starost) dobiju sertifikat o energetskim svojstvima, tzv. energetski pasoš. Zakonom je predviđeno i da se novoizgrađene zgrade ne projektuju i izvode ispod energetskog razreda B [22], [27].

Uvođenje smernica „Paketa čistije energije za sve“ u zakonski okvir ima za cilj postizanje harmonizacije urbanog planiranja sa održivim energetskim rešenjima. Ovaj pristup ne samo da doprinosi smanjenju ekološkog otiska izgradnje, već i podržava globalne napore ka čistijem i energetski efikasnijem urbanom okruženju, posebno zgradarstvu i stambenom fondu.

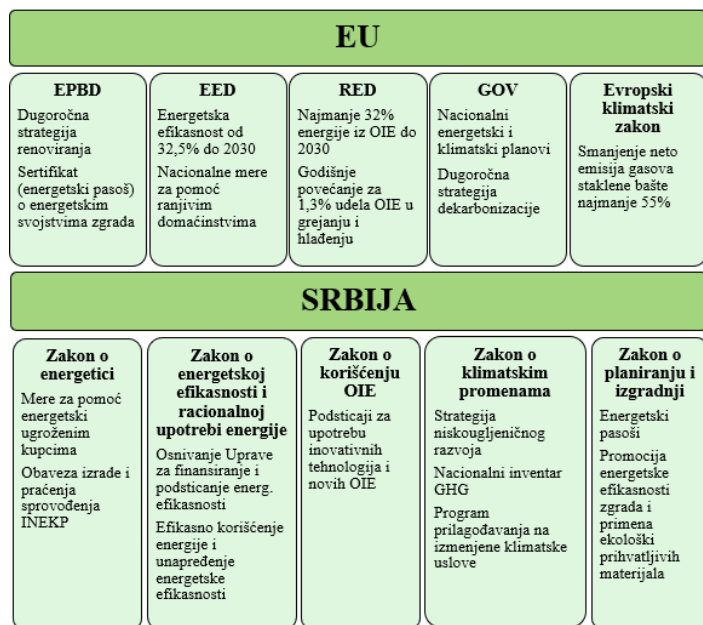
V DISKUSIJA

Zakonodavstvo EU i nacionalna zakonodavstva predstavljaju temeljne dokumente i okvire za postizanje ciljeva i sprovođenje politika na širokom spektru područja. Ovi dokumenti uspostavljaju osnovne principe, prava i obaveze koje države treba da poštuju u skladu sa zajedničkim ciljevima i vrednostima. Kada je u pitanju paket „Čista energija za sve Evropljane“ i poslednje izmene domaćeg zakonodavstva u Srbiji, krovni dokumenti propisuju i niz opštih i pojedinačnih ciljeva koji treba da olakšaju kvantifikovanje stepena ostvarenja ciljeva i samim tim praćenje procesa tranzicije ka tzv. „niskougljeničnom“ društvu (Slika 2). Identifikacija zakonodavnog okvira u energetske tranzicije u domaćinstvima od suštinskog je značaja jer obezbeđuju jasnoću, tj. pomaže zainteresovanim stranama da razumeju pravila i zahteve koje moraju da ispune. Na ovaj način identifikuju se snage, slabosti, mogućnosti i pretnje, što omogućava donošenje bolje informisanih odluka. Razumevanjem regulatornog okvira može se bolje planirati budućnost, uz jasno razgraničavanje prava i obaveza države i pojedinca.

Izvršena analiza energetske politike i zakonodavnog okvira u kontekstu sektora domaćinstva svakako poseduje izvesna ograničenja. Ona se najpre ogledaju u činjenici da je fokus u radu bila analiza pet osnovnih dokumenata iz paketa „Čista energija za sve Evropljane“ i Evropskog zelenog dogovora, kao i zakona u Srbiji koji se tiču uređenja i planiranja razvoja energetske sistema Srbije. Kao takav, ovaj rad teži da identifikuje ključne oblasti energetske politike koje se odnose na prirodu i dinamiku tranzicije koja predstoji domaćinstvima u Srbiji.

Za sveobuhvatniju analizu prikladnosti i efikasnosti regulatornog okvira korisno je uključiti širu interdisciplinarnu ekspertizu, uključujući analizu drugih polja i podzakonskih akata kojima se uređuju oblasti energetike, domaće ekonomije, socijalne politike, demografije, zaštite životne sredine i slično [28]. Nijedna pojava u društvu ne može biti posmatrana apsolutno izolovano, s

obzirom na složenost međusobnih veza i zavisnosti od konteksta [29]. Ovako postavljena analiza može predstavljati prvi korak u boljem razumevanju domaćeg i evropskog konteksta u kome bi trebalo da se odvija tranzicija domaćinstava ka efikasnijem korišćenju energije koja je dobijena pre svega iz OIE. Dalji koraci u istraživanju energetske tranzicije u domaćinstvima mogu biti usmereni na identifikaciju glavnih prepreka, formulaciju mera za otklanjanje ili smanjenje prepreka i ubrzanje energetske tranzicije kroz uključivanje zainteresovanih strana u ovaj proces i kroz razvoj mehanizama za identifikaciju najbolje putanje za ostvarenje zadatih ciljeva energetske politike i pratećeg regulatornog okvira.



Slika 2. Zakonodavni okvir u EU i Srbiji vezan za domaćinstva

VI ZAKLJUČAK

U poslednjih nekoliko decenija, a posebno sa Evropskim zelenim dogovorom, EU je postepeno usvajala sve ambicioznije ciljeve u vezi sa klimom i energetikom i uvodila ih u zakonodavstvo kako bi ih postigla. Poslednji (tj. najnoviji) paket „Čista energija za sve Evropljane“ uspeo je da ojača evropsko zakonodavstvo i time nametne veću odgovornost za sprovođenje energetske tranzicije državama članicama i kandidatima za EU. Uvođenje nacionalnih ciljeva energetske efikasnosti, dekarbonizacije i povećanje udela OIE kroz zakonodavni okvir predstavlja značajan korak u preciznosti energetske politike i olakšavanju praćenje ostvarenja ciljeva.

Za razliku od zakonodavstva EU, zakonodavstvo u Srbiji ne određuje specifične ciljeve u određenim aspektima energetske tranzicije, ali prepoznaje i propisuje dobar deo obaveza država članica EU koje proističu iz zakonodavnog okvira EU. To između ostalog uključuje implementaciju INEKP-a, izradu planova energetske efikasnosti, izdavanje energetskih pasoša, pružanje podsticaja za korišćenje OIE i povećanje energetske efikasnosti, kao i pružanje pomoći ugroženim domaćinstvima. Jedini dokument sa definisanim specifičnim ciljevima je INEKP (propisan Zakonom o energetici), ali on je trenutno u formi nacrtu.

Kako bi se ciljevi ostvarili i politike sprovele efikasno, neophodno je na nivou države detaljnije precizirati mere i aktivnosti kroz različite operativne alate, kao što su smernice, standardi, inicijative i finansijski instrumenti i doneti sva neophodna planska i druga akta za njihovo izvršavanje. Na lokalnom nivou, sprovođenje EU i nacionalnog zakonodavstva zahteva aktivno učešće relevantnih institucija, organizacija, preduzeća i građana. Nacionalne specifičnosti (oličene prvenstveno u društvenom poretku) svake države članice igraju ključnu ulogu u prilagođavanju i primeni propisanih mera. Stoga, osim usvajanja i prenošenja pravnih normi, važno je uspostaviti mehanizme za razvoj i implementaciju mera i aktivnosti za ubrzanje energetske tranzicije, kao i nadzora, evaluacije i kontrole kako bi se osiguralo postizanje željenih rezultata.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Istraživanje sprovedeno uz podršku Fonda za nauku Republike Srbije, 4344, Forward-Looking Framework for Accelerating Households' Green Energy Transition – FF GreEN / This research was supported by the Science Fund of the Republic of Serbia, #GRANT No 4344, Forward-Looking Framework for Accelerating Households' Green Energy Transition - FF GreEN.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] European Commission, Europe leads the global clean energy transition: Commission welcomes ambitious agreement on further renewable energy development in the EU, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/STATEMENT_18_4_155 [pristupljeno 26.02.2024]
- [2] Fetting, C. The European Green Deal, ESDN Office, Vienna, 2020, https://www.esdn.eu/fileadmin/ESDN_Reports/ESDN_Report_2_2020.pdf [pristupljeno 26.02.2024]
- [3] Mandić-Lukić, J., Milovanović, Đ., Stipić, M., Raković, R., Petrović-Bećirović, S. Energetska tranzicija – inteligentna, pravedna i ekološki prihvatljiva, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 1-21, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.17P>
- [4] Evropska unija, Dugoročna strategija do 2050, https://climate.ec.europa.eu/eu-action/climate-strategies-targets/2050-long-term-strategy_hr [pristupljeno 26.02.2024]
- [5] Pavlović, B. Osnazivanje energetske tranzicije u sektoru domaćinstva u Srbiji: Integrativni pristup, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No.2, pp. 1-9, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-2.01P>
- [6] 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>
- [7] Buildings Performance Institute Europe, A Guidebook to European Building Policy, 2020. https://www.bpie.eu/wp-content/uploads/2020/08/BPIE_Guide-on-Building-Policy_Final.pdf [pristupljeno 26.02.2024]
- [8] Eurostat, Energy consumption and use by households, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20200626-1> [pristupljeno 26.02.2024]
- [9] The General Principles of EU Administrative Procedural Law, 2015. https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/IDAN/2015/519224/IPOL_IDA%282015%29519224_EN.pdf [pristupljeno 26.02.2024]
- [10] Evropska unija, Vrste zakonodavstva, https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/law/types-legislation_hr [pristupljeno 26.02.2024]
- [11] Directive (EU) 2018/844 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2010/31/EU on the energy performance of buildings and Directive 2012/27/EU on energy efficiency, 2018
- [12] Malmberg, F. First and last and always: Politics of the 'energy efficiency first' principle in EU energy and climate policy, *Energy Research & Social Science*, Vol. 101, 103126, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2023.103126>

- [13] Directive (EU) 2018/2002 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 amending Directive 2012/27/EU on energy efficiency, 2018.
- [14] 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, 2018.
- [15] Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Governance of the Energy Union and Climate Action, 2018.
- [16] Bankwatch Network, National energy and climate plans, 2023. https://bankwatch.org/wp-content/uploads/2023/06/2023_06_30_National-energy-and-climate-plans_catalysts-for-the-energy-transition-or-box-ticking-exercises.pdf [pristupljeno 26.02.2024]
- [17] Regulation (EU) 2021/1119 of the European Parliament and of the Council of 30 June 2021 establishing the framework for achieving climate neutrality, 2021.
- [18] European Parliament, Guidelines for the Implementation of the Green Agenda for the Western Balkans Accompanying the Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions An Econom, Brussel, 2020. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020SC0223> [pristupljeno 26.02.2024]
- [19] PK Srbije, Centar za životnu sredinu, tehničke propise i društvenu odgovornost, Zelena agenda za Zapadni Balkan, Beograd, 2020. https://api.pks.rs/storage/assets/Zelena%20agenda%20za%20Zapadni%20Balkan_info.pdf [pristupljeno 26.02.2024]
- [20] Zakon o efikasnom korišćenju energije, Službeni glasnik RS, br. 25/2013, 2013.
- [21] Zakon o energetskej efikasnosti i racionalnoj upotrebi energije, Službeni glasnik RS, br. 40/2021.
- [22] Zakon o energetici, Službeni glasnik RS, br. 145/14, 95/2018 – dr. zakon, 40/2021 i 35/2023 – dr. zakon i 62/2023.
- [23] Integrirani nacionalni i klimatski plan Republike Srbije do 2030. sa vizijom do 2050. Godine 2023. <https://www.mre.gov.rs/tekst/1115/-integrirani-nacionalni-energetski-i-klimatski-plan-republike-srbije-za-period-do-2030-sa-vizijom-do-2050-godine.php> [pristupljeno 26.02.2024]
- [24] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije, Službeni glasnik RS, br. 40/2021 i 35/2023.
- [25] Zakon o klimatskim promena, Službeni glasnik RS, br. 26/2021.
- [26] Zakon o komunalnim delatnostima, Službeni glasnik RS, br. 88/2011, 104/2016 i 95/2018.
- [27] Zakon o planiranju i izgradnji, Sl. glasnik RS, br. 72/2009, 81/2009 - ispr., 64/2010 - odluka US, 24/2011, 121/2012, 42/2013 - odluka US, 50/2013 - odluka US, 98/2013 - odluka US, 132/2014, 145/2014, 83/2018, 31/2019, 37/2019 - dr. zakon, 9/2020, 52/2021 i 62/2023.
- [28] 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>
- [29] Đukić, P., Đukanović, S. Konfuzija u energetskej tranziciji – svet i Srbija danas, Energija, ekonomija, ekologija 3, Vol. 25, No. 3, pp. 17-23, 2023 <https://doi.org/10.46793/EEE22-3.17D>

AUTORI/AUTHORS

dr Boban Pavlović – naučni saradnik, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko – geološki fakultet, boban.pavlovic@rgf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-4765-957X](https://orcid.org/0000-0002-4765-957X)

dr Aleksandar Madžarević - docent, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko – geološki fakultet, aleksandar.madzarevic@rgf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-8997-1393](https://orcid.org/0000-0002-8997-1393)

dr Dejan Ivezić – redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko – geološki fakultet, dejan.ivezic@rgf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-2659-0662](https://orcid.org/0000-0003-2659-0662)

dr Marija Živković – redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko – geološki fakultet, marija.zivkovic@rgf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-5112-8942](https://orcid.org/0000-0001-5112-8942)

dr Dušan Mojić – redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Filozofski fakultet, dmojic@f.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-8571-3223](https://orcid.org/0000-0002-8571-3223)

Energy Transition in Households: Analysis of Serbia's Compliance with the "Clean Energy for All Europeans" Package

Abstract – Due to its complexity and heterogeneity, the household sector represents an essential point in energy transition policies. In the European Union, household energy consumption accounts for about 26% of final energy consumption, while in Serbia, this sector has the largest share in final consumption, accounting for about one-third of final consumption. By implementing energy efficiency measures, significant energy savings can be achieved, which, together with the reduction and substitution of the use of fossil fuels, contribute to a lesser impact on climate change and significant reduction in air pollution. The package of legislative measures "Clean Energy for All Europeans" is a comprehensive set of laws defining European climate and energy policy after 2020. This package encompasses and links a series of topics related to the household sector. Through this package, member states are required to set high goals for energy efficiency and decarbonisation in the construction and revitalization of residential buildings, while simultaneously implementing measures concerning households affected by energy poverty. The Directive on the Energy Performance of Buildings, the Energy Efficiency Directive, the Renewable Energy Directive, the Regulation on the Governance of the Energy Union and Climate Action, and the Regulation on the Establishment of a Framework for Achieving Climate Neutrality cover the main issues related to energy transition policy in households in the European Union. As a member of the Energy Community and a candidate for membership in the European Union, Serbia has committed to harmonizing its energy policy and legislation, accepting technical assistance and support in implementing reforms to adapt the national energy system to European standards. The aim of this paper is to present the regulatory and strategic framework "Clean Energy for All Europeans" in the part related to the household sector and to analyse its transposition into key legal provisions dealing with this topic in the Republic of Serbia.

Index Terms – Energy transition, Clean energy package, Regulatory framework, Energy policy, Households, Serbia

Projektovanje i realizacija fotonaponske elektrane izlazne snage 1500 kW na krovu fabrike „Flash“-Apatin

Marko Đurović*, Arsenije Ćirić*, Željko V. Despotović**

*Institut „Mihajlo Pupin“- Projekt Inženjering, Beograd, Srbija

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

Rezime - U radu su prikazani projektovanje i realizacija fotonaponske elektrane izlazne snage 1500 kW na krovu hale fabrike „Flash“ u Apatinu. Solarna elektrana je povezana na NN sabirnice u transformatorskoj stanici 20/0.4 kV 1600 kVA i preko njih napaja potrošače fabrike. U periodima kada nema dovoljno sunčeve insolacije napajanje potrošača u fabrici se ostvaruje iz elektroenergetske mreže. Solarna elektrana sadrži 3780 fotonaponskih panela monokristalnog tipa, svaki snage 455 W. Krovna površina objekta okrenuta je u pravcu jugozapad - severoistok. Fotonaponski paneli su postavljeni na krovnoj površini proizvodne hale sa upravnim delom. Specifičnost krovne konstrukcije sastavljene od dve celine (krov sa krovnim kosinama i ravni deo krova) je uslovala niz projektantskih rešenja koja će biti detaljnije prikazana u radu. U radu su takođe prikazani dispozicija invertora i njihova međusobna komunikacija, kao i sistem za praćenje izlaznih parametara (napon, struja, snaga) i kvaliteta isporuke električne energije ka potrošačima u fabrici.

Ključne reči – Solarne elektrane, OIE, kupac-proizvođač, invertori, PV moduli

I UVOD

U solarnoj elektrani, zračenje koje dolazi od sunčevih zraka pretvara se u električnu energiju za kućnu ili industrijsku upotrebu koristeći različite sisteme kao što su solarne termoelektrane ili fotonaponske elektrane. Proces proizvodnje električne energije u solarnoj elektrani je potpuno ekološki i ne stvara zagađujuće elemente po životnu sredinu, i jedan je od najefikasnijih obnovljivih izvora energije (OIE) koji trenutno postoje. Zahvaljujući ovim prednostima u poređenju sa energijama proizvedenim iz fosilnih goriva ili neobnovljivih izvora, solarna energija, predstavlja ključno sredstvo za razvoj novog dugoročno održivog modela proizvodnje energije koji je potpuno ekološki prihvatljiv[1-2].

Proizvodnja solarne fotonaponske (PV) energije je proces pretvaranja sunčeve energije u električnu energiju pomoću solarnih panela. Solarni paneli, koji se često nazivaju i PV paneli, kombinovani su u okviru PV sistema u nizove (stringove). PV sistemi se takođe mogu instalirati u konfiguracijama koje su povezane sa elektroenergetskom mrežom („On-Grid“ sistemi) ili van nje (samostalni ili „Off-Grid“). Osnovne komponente ove dve konfiguracije PV sistema uključuju solarne panele, DC i AC kombinovane razvodne kutije, energetske pretvarače (DC/DC, DC/AC), optimizatore, rastavljače i prekidače. PV sistemi povezani na mrežu dodatno

mogu uključivati brojila, baterije, kontrolere punjenja i sisteme za upravljanje radom baterija [3-4].

Postoji nekoliko prednosti i nedostataka proizvodnje PV energije. Što se tiče prednosti, sunčeva svetlost je besplatna i lako dostupna u mnogim delovima zemlje. PV sistemi ne proizvode emisije toksičnih gasova, gasove staklene bašte ili buku. PV sistemi nemaju pokretne delove. PV sistemi smanjuju zavisnost od nafte. PV sistemi imaju mogućnost da generišu električnu energiju na udaljenim lokacijama koje nisu povezane sa mrežom. PV sistemi povezani na mrežu mogu smanjiti račune za električnu energiju. I pored ovih prednosti, PV sistemi imaju veliku početnu investiciju. PV sistemi zahtevaju velike površine za proizvodnju električne energije. Količina sunčeve svetlosti može da varira. Kada ne mogu da obezbede puni kapacitet, PV sistemi zahtevaju skladištenje viškova energije ili pristup drugim izvorima, kao što je elektroenergetska mreža,

Pored konvencionalnih solarnih elektrana, fotonaponski sistemi instalirani na krovovima zgrada poznati kao solarne zajednice, koji proizvode električnu energiju za sopstvenu potrošnju i smanjuju troškove energije (tzv. solarne farme), dva su odlična primera primene solarne energije [3-6].

U ovom radu je prikazana realizacija fotonaponske elektrane izlazne snage 1500 kW na krovu hale fabrike „Flash“ u Apatinu. Solarna elektrana je povezana na NN sabirnice u transformatorskoj stanici 20/0.4 kV 1600 kVA i preko njih napaja potrošače fabrike. U periodima kada nema dovoljno sunčeve insolacije napajanje potrošača u fabrici se ostvaruje iz elektroenergetske mreže. U periodima kada je potrošnja mala, a sunčeva insolacija značajna višak električne energije koji solarna elektrana proizvodi se šalje u elektroenergetsku mrežu. Realizovana solarna elektrana sadrži 3780 fotonaponska panela monokristalnog tipa, svaki snage 455 W. Krovna površina objekta okrenuta je u pravcu jugozapad - severoistok. Specifičnost krovne konstrukcije sastavljene od dve celine (krov sa krovnim kosinama i ravni krov) je uslovala niz projektantskih rešenja koja će biti detaljnije prikazana u nastavku.

II OPIS LOKACIJE SOLARNE ELEKTRANE

Za potrebe investitora „Flash“ SRB d.o.o je izgrađena solarna elektrana na krovu objekta kompanije „Flash“ SRB d.o.o sa sedištem u ulici Italijanskog prijateljstva 2, Apatin. Na krovu objekta kompanije je realizovana solarna elektrana izlazne snage 1500 kW AC. Solarna elektrana se sastoji od 3780 fotonaponskih panela monokristalnog tipa, proizvođača „Ulica Solar“ (svaki panel je snage 455 W). Krovna površina objekta okrenuta je u

pravcu jugozapad - severoistok. Fotonaponski paneli su postavljeni na krovnoj površini proizvodne hale sa upravnim delom. Krov hale je podeljen na dve celine, kao što pokazuje Slika 1: (1) Celina krova sa krovnim kosinama, (2) celina krova sa nagibom krova 4°, u daljem tekstu ravan krov (napomena: ugao nagiba krova do 5° može se smatrati kao ravan krov).

Solarni paneli su postavljeni na pojedinačne krovne kosine pod uglom od 23° tj. fotonaponski paneli prate nagib kosog krova. Na ravnom delu krova nagiba 4° koristi se konstrukcija sa balastima.



Slika 1. Prikaz krova hale "Flash" SRB iz vazduha (slikano dron letelicom)

III ENERGETSKI POTENCIJAL LOKALITETA I ANALIZA SUNČEVOG ZRAČENJA

Prema podacima „PV GIS“[7] optimalni ugao postavljanja solarnih panela za Srbiju iznosi 34°. Predmetna lokacija solarne „Flash“ SRB d.o.o. nalazi se na području grada Apatina i ima prosečnu vrednost godišnjeg solarnog zračenja na horizontalnoj ravni od 1200 kWh/m² do 1300 kWh/m². Prosečna vrednost solarnog zračenja koja se ima na panelima postavljenim sa optimalnim uglom za predmetnu lokaciju iznosi od 1400 kWh/m² do 1500 kWh/m².

Tehničkim rešenjem predstavljenim u ovom radu je obezbeđeno postavljanje solarnih panela na dva načina: (1) Na krovnim kosinama-solarni paneli se instaliraju na izabranu potkonstrukciju tako da prate ugao nagiba krovne kosine od 23°, (2) Na ravnom delu krova-solarni paneli se instaliraju na potkonstrukciju sa balastima. Nagib solarnih panela je 10°. Solarni paneli su orijentisani tako da je jedna polovina okrenuta prema severozapadu, a druga polovina prema jugoistoku. Ovakvim rešenjem postignuta je najveća iskorišćenost krovne konstrukcije, a time je skoro eliminisan uticaj tzv. „sišućeg“ vetra.

Za precizno određivanje prosečne vrednosti globalne solarne radijacije korišćeno je softversko rešenje METEONORM, razvijeno od strane kompanije METEOTEST iz Švajcarske. Program METEONORM sadrži podatke sa 8325 meteoroloških stanica u celom svetu i sa 5 geostacionarnih satelita, kao i sa svih registrovanih meteoroloških stanica u RHMZ-a Srbije. Podaci o globalnoj radijaciji, direktnoj radijaciji, temperaturi i padavinama su dostupni za period od 1996. do 2015. godine.

Sa sistemom baziranim na modelu interpolacije koji je ugrađen u softveru moguće je dobiti precizne podatke za bilo koji lokalitet sa prilično velikom tačnošću. Na Slici 2 su dati prikaz izbora

lokacije za kreiranje projektnih parametara i klimatski parametri dobijeni u METEONORM programu [8-9] za fabričku halu „Flash“ SRB d.o.o.



Climate Data		Location	
Country	Serbia, Republic Of	Location	Apatin (1996-2015, Meteornorm 8.1())
Latitude	45° 39' 13" (45.65°)	Annual sum of global irradiation	1260 kWh/m ²
Longitude	18° 58' 20" (18.97°)	Annual Average Temperature	12.1 °C
Time zone	UTC+1		
Time Period	1996 - 2015		
Source	Meteornorm 8.1()		

Slika 2. Lokalitet za određivanje projektnih parametara solarne elektrane i klimatski parametri dobijeni u METEONORM programu za lokaciju hale „Flash“ SRB d.o.o.

U Tabeli 1 je dat prikaz prosečnih mesečnih vrednosti globalnih radijacija za temperature na lokacijama na kojima su postavljeni solarni paneli elektrane.

Tabela 1. Prikaz prosečnih vrednosti globalnih radijacija na horizontalnoj ravni i prosečne temperature za period od 1996-2015.

	Radijacija na horiz. ravan (kWh/m ²)	Spoljnja prosečna temperatura (°C)
Mesec	1260,2	12
JAN	31,7	0,7
FEB	50,4	2,2
MAR	95,2	7,1
APR	132,5	12,3
MAJ	168,8	17,5
JUN	180,7	21
JUL	188,8	23,1
AVG	165,1	22,8
SEP	106,5	16,8
OKT	76,4	12
NOV	39,6	6,7
DEC	24,5	1,8

Analiza sunčevog zračenja

U ovom delu je dat prikaz kretanja Sunca tokom kratkodnevnicke, ravnodnevnice i dugodnevnice, za prethodno opisanu lokaciju.

Pri izradi trajektorije sunčevog kretanja za predmetnu lokaciju solarne elektrane, korišćeno je softversko rešenje „Sun Earth tools”[10]. Dijagrami i vrednosti u ovom poglavlju poslužili su za sagledavanje kretanja sunca tokom karakterističnih perioda, kako bi se usvojio napadni ugao sunca za potrebe proračuna

Na Slici 3 je dat prikaz trajektorije Sunca tokom kratkodnevnicе (21. decembar), dok je na Slici 8 dat prikaz kretanja sunca tokom kratkodnevnicе u odnosu na ostale mesece u godini.



Slika 3. Prikaz kretanja Sunca tokom dana 21. Decembra - kratkodnevnicа

U Tabeli 2 je dat prikaz trenutka izlaska i zalaska Sunca, elevacije i azimuta kao i trajanje dana, a u Tabeli 3 je dat prikaz Sunčeve pozicije (elevacije i azimuta) u zavisnosti od vremena, sa korakom od 30 minuta.

Tabela 2. Prikaz vremena izlaska i zalaska Sunca tokom kratkodnevnicе

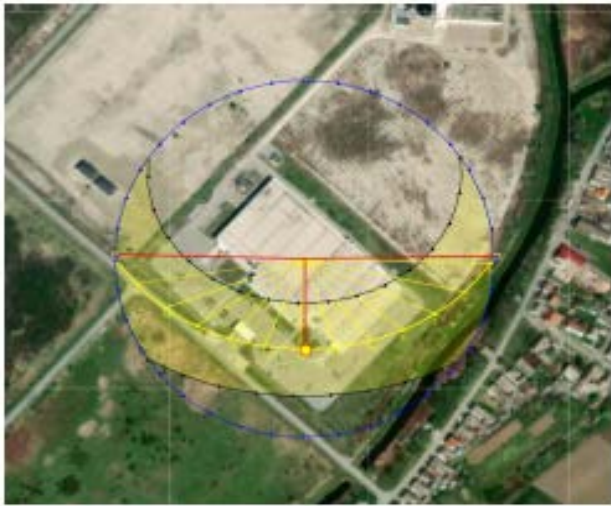
POZICIJA SUNCA	ELEVACIJA	AZIMUT	GEOG.ŠIRINA	GEOG.DUŽINA
21/12/2023 11:42 GMT1	20.91°	179.99°	45.6537674° N	18.9725044° E
SUMRAK	IZLAZAK SUNCA	ZALAZAK SUNCA	AZIM. IZLASKA SUNCA	AZIM.ZALASKA SUNCA
SUMRAK -0.833°	07:21:28	16:02:36	123.65°	236.35°
CIVIL SMRAK -6°	06:47:03	16:36:57	117.67°	242.31°
NAUTIČKI SUMRAK -12°	06:09:17	17:14:43	111.35°	248.63°
ASTRONOMSKI SUMRAK -18°	05:33:05	17:50:55	105.41°	254.57°
DNEVNA SVETLOST	hh:mm:ss	diff. dd+1	diff. dd-1	PODNE
21/12/2023	08:41:08	-00:00:02	00:00:05	11:42:02

Ravnodnevnicа se javlja 21. Marta i 23. Septembra. Pošto su podaci za oba datuma gotovo identični, za potrebe proračuna korišćeni su podaci za 21. Mart. Na Slici 4 je dat prikaz trajektorije Sunca tokom ravnodnevnicе.

U Tabelama 4 i 5 su dati trenuci izlaska i zalaska Sunca, kao i položaj Sunca u zavisnosti od vremena tokom ravnodnevnicе.

Tabela 3. Prikaz položaja Sunca tokom kratkodnevnicе u zavisnosti od vremena

DATUM:	21/12/2023 GMT1	
KORDINATE:	45.6537674, 18.9725044	
LOKACIJA:	45.65376740,18.97250440	
VREME	ELEVACIJA	AZIMUT
07:21:28	-0.833°	123.65°
8:00:00	4.53°	130.67°
9:00:00	11.73°	142.52°
10:00:00	17.12°	155.58°
11:00:00	20.25°	169.73°
12:00:00	20.79°	184.4°
13:00:00	18.67°	198.85°
14:00:00	14.14°	212.38°
15:00:00	7.6°	224.71°
16:00:00	-0.46°	235.89°
16:02:36	-0.833°	236.35°



Slika 4. Prikaz kretanja Sunca tokom 21. Marta – ravnodnevnicа

Tabela 4. Prikaz trenutaka izlaska i zalaska Sunca tokom ravnodnevnicе

POZICIJA SUNCA	ELEVACIJA	AZIMUT	GEOG.ŠIRINA	GEOG.DUŽINA
21/03/2023 11:51 GMT1	44.57°	179.86°	45.6537674° N	18.9725044° E
SUMRAK	IZLAZAK SUNCA	ZALAZAK SUNCA	AZIM. IZLASKA SUNCA	AZIM.ZALASKA SUNCA
SUMRAK -0.833°	05:46:10	17:57:25	88.96°	271.32°
CIVIL.SUMRAK -6°	05:16:32	18:27:04	83.65°	276.65°
NAUTIČKI SUMAK -12°	04:41:45	19:01:58	77.27°	283.07°
ASTRONOMSKI SUMRAK -18°	04:06:03	19:37:50	70.42°	289.98°
DNEVNA SVETLOST	hh:mm:ss	diff. dd+1	diff. dd-1	PODNE
21/03/2023	12:11:15	00:03:15	-00:03:13	11:51:47

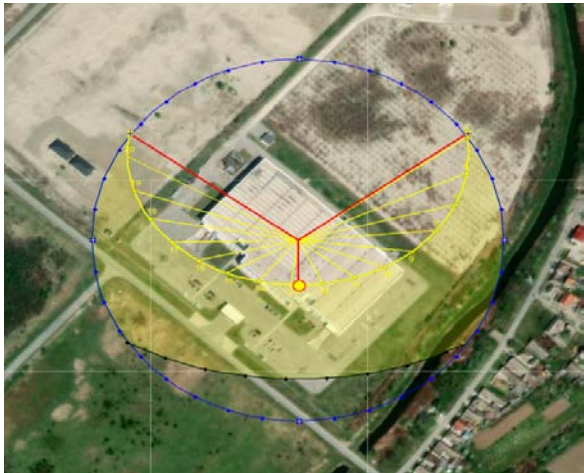
Na Slici 5 je dat prikaz trajektorije sunca tokom dugodnevnice (21. jun). U Tabelama 6 i 7 je dat prikaz izlaska i zalaska Sunca i položaja Sunca u zavisnosti od vremena tokom dugodnevnice.

Obzirom da je najniži upadni ugao tokom solarnog maksimuma kada se javlja kratkodnevica 21. Decembra, za potrebe proračuna potrebnog rastojanja između panela, procenjen je upadni ugao Sunca koji se tada javlja i koji iznosi 20.91°.

Fotonaponski paneli na krovnim kosinama biće orijentisani u pravcu jugozapada, a na ravnom delu krova će polovina biti orijentisana u pravcu severozapada, a druga polovina u pravcu jugoistoka. Prethodnom orijentacijom postiže se optimalno rešenje i u smislu iskorišćenja dostupnih površina krova i u smislu efikasnosti rada i proizvodnje energije solarne elektrane na hali „Flash“ SRB d.o.o.

Tabela 5. Prikaz položaja Sunca tokom ravnodnevnice u zavisnosti od vremena

DATUM:	21/03/2023 GMT1	
KOORDINATE:	45.6537674, 18.9725044	
LOKACIJA:	45.65376740,18.97250440	
VREME:	ELEVACIJA	AZIMUT
05:46:10	-0.833°	88.96°
6:00:00	1.59°	91.44°
7:00:00	11.99°	102.33°
8:00:00	21.96°	114.08°
9:00:00	30.97°	127.51°
10:00:00	38.35°	143.43°
11:00:00	43.17°	162.25°
12:00:00	44.54°	183.02°
13:00:00	42.14°	203.44°
14:00:00	36.51°	221.47°
15:00:00	28.6°	236.64°
16:00:00	19.27°	249.52°
17:00:00	9.16°	260.97°
17:57:25	-0.833°	271.32°



Slika 5. Prikaz kretanja Sunca tokom 21. Juna – dugodnevnica

Tabela 6. Prikaz izlaska i zalaska Sunca tokom dugodnevnice

POZICIJA SUNCA	ELEVACIJA	AZIMUT	GEOG.ŠIRINA	GEOG.DUŽINA
21/06/2023 12:45 GMT1	67.78°	179.46°	45.6537674° N	18.9725044° E
SUMRAK	IZLAZAK SUNCA	ZALAZAK SUNCA	AZIM. IZLASKA SUNCA	AZIM. ZALASKA SUNCA
SUMRAK -0.833°	04:54:39	20:37:06	54.27°	305.73°
CIVIL.SUMRAK -6°	04:16:25	21:15:16	47.17°	312.81°
NAUTIČKI SUMAK -12°	03:25:10	22:06:30	36.94°	323.04°
ASTRONOMSKI SUMRAK -18°	02:14:50	23:16:47	21.44°	338.53°
DNEVNA SVETLOST	hh:mm:ss	diff. dd+1	diff. dd-1	PODNE
21/06/2023	15:42:27	-00:00:01	-00:00:02	12:45:52

Tabela 7. Prikaz položaja Sunca u zavisnosti od vremena tokom dugodnevnice

DATUM:	21/06/2023 GMT1	
KOORDINATE:	45.6537674, 18.9725044	
LOKACIJA:	45.65376740,18.97250440	
VREME	ELEVACIJA	AZIMUT
04:54:39	-0.833°	54.27°
5:00:00	-0.07°	55.23°
6:00:00	9.04°	65.58°
7:00:00	18.91°	75.46°
8:00:00	29.23°	85.44°
9:00:00	39.7°	96.3°
10:00:00	49.91°	109.38°
11:00:00	59.15°	127.11°
12:00:00	65.92°	153.44°
13:00:00	67.6°	188.52°
14:00:00	63.19°	220.27°
15:00:00	54.99°	242.04°
16:00:00	45.17°	257.17°
17:00:00	34.78°	268.99°
18:00:00	24.34°	279.31°
19:00:00	14.19°	289.16°
20:00:00	4.63°	299.21°
20:37:06	-0.833°	305.73°

IV POTKONSTRUKCIJA SOLARNE ELEKTRANE

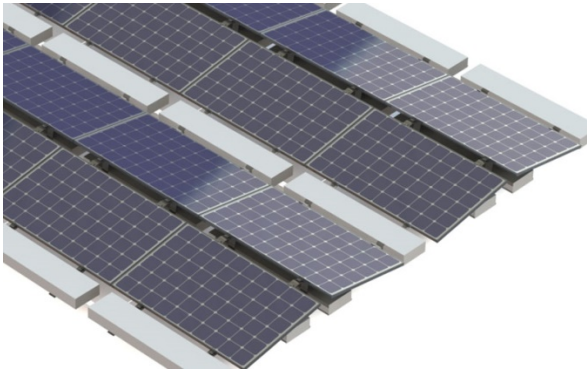
PV moduli solarne elektrane su postavljeni pod unapred definisanim uglom u odnosu na postojeću potkonstrukciju koja se nalazi na krovu objekta, u skladu sa dobijenim podacima o sunčevom zračenju na konkretnoj lokaciji. Primenjeno je tehničko rešenje sa fiksnim uglom (bez automatskog zakretanja panela). Nije predviđeno da se u toku godine u zavisnosti od godišnjeg doba vrši ručno podešavanje ugla nagiba panela, već je obezbeđeno postavljanje solarnih panela u sledeća dva fiksna položaja u zavisnosti od toga na kojoj se krovnoj celini postavljaju:

- 1) na krovnim kosinama nagiba 23° solarni paneli montiraju se na odgovarajuće potkonstrukcije tako da

prate nagib od 23°. Treba napomenuti da su PV paneli su orijentisani u pravcu jugozapada,

- 2) na krovnoj celini ravnog krova fotonaponski moduli montiraju se na potkonstrukciju sa balastima prilagođenu za ravan krov.

Moduli se ređaju u dva reda pod uglom od 10° kao što je prikazano na Slici 6. Paneli su orijentisani u pravcu severozapad – jugoistok (prate granice bočnih strana krova zbog maksimalnog iskorišćenja krovne konstrukcije).



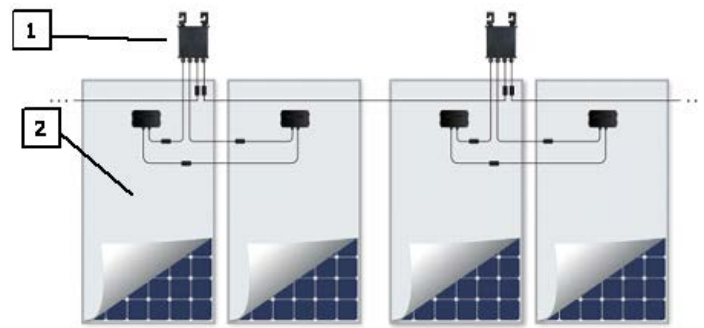
Slika 6. Raspored PV panela za slučaj potkonstrukcije sa balastom koja je prilagođena za ravan krov

Ovakvim načinom montaže obezbeđuje se optimalna apsorpcija sunčevog zračenja za datu lokaciju. Kod fiksnih sistema montaže je izabran optimalan ugao pri kom se dobija maksimalna proizvedena električna energija, a pri tom uvažavajući sledeće parametre: (1) gubitke energije usled refleksije svetlosti, (2) gubitke u izabranom tipu solarnog panela, (3) gubitke u instalaciji, (3) azimut u odnosu na južni pol za pomenutu lokaciju montaže, (4) azimut Zemlje.

Fotonaponski paneli se međusobno povezani tako da formiraju jedan niz ili lanac (popularno nazvan „string“) panela. Postoji više načina međusobnog povezivanja solarnih panela, kao i njihovog povezivanja na energetski pretvarač (inverter). Kada se na jedan inverter ugrađuje po jedan solarni panel, tada se ima tzv. *mikro invertorski sistem*, odnosno mikro invertorska topologija. Kada se solarni paneli vezuju redno u tzv. stringove (lance) dobijamo široko korišćenu topologiju gde su stringovi povezani direktno na odgovarajuće ulaze invertora.

U konkretno realizovanom sistemu je primenjeno rešenje bazirano na primeni optimizatora snage solarnih panela. Solarni paneli se vezuju redno u tzv. stringove (lance), ali na svaki drugi panel se postavlja uređaj koji se naziva optimizator snage solarnog panela. Ovakvo rešenje omogućava da inverter pored energetskog pretvaranja jednosmernog u naizmenični napon ima nadzor nad celokupnim stringom solarnih panela i nad svakim pojedinačnim solarnim panelom u stringu. Ovo primenjeno tehničko rešenje je prikazano na Slici 7.

U ovom projektu je primenjeno distribuirano rešenje rasporeda i povezivanja solarnih panela i invertora. Način povezivanja fotonaponskih panela na invertore zavisi od snage invertora, tako da je moguće ili priključiti manji broj modula na više invertora manje snage koji bi stajao kod solarnih panela (distribuirano rešenje).



Slika 7. Povezivanje solarnih panela u stringove sa implementacijom optimizatora snage solarnog panela; 1 – Solarni panel, 2 - Optimizator – Izvor „SolarEdge Technologies“

Solarni paneli se postavljaju na pojedinačne krovne kosine pod uglom od 23° tj. fotonaponski paneli će pratiti nagib kosog krova, dok se na ravnom delu krova nagiba 4° koristi konstrukcija sa balastima za postavljanje fotonaponskih panela na ravan krov.

Primenjeno je tehničko rešenje standardne potkonstrukcije za montažu solarnih panela proizvodnje „ANTAI SOLAR“. Krovne kosine koriste tehničko rešenje „ANTAI SOLAR“ naziva „MiniRail“ (Slika 8.).



Slika 8. Prikaz "MiniRail" potkonstrukcijskog rešenja, izvor „ANTAI SOLAR“

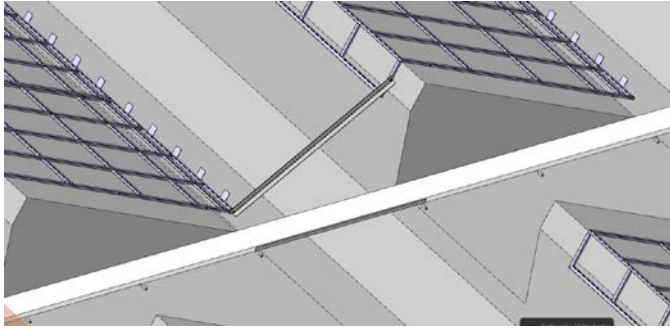
Na ravnom delu krova primenjeno je takođe tehničko rešenje sa betonskim balastima istog proizvođača-ANTAI SOLAR..

V MONTAŽA PNK REGALA I INVERTORA

Glavna trasa kablovskih regala (PNK300) kojom su uvedeni aluminijumski kablovi 4x240 mm² kablove u halu FIORANO, izrađena je od PNK regala dimenzija 300mm x60 mm. Veza PNK regala kablova solarnih panela (PNK50 i PNK100) je ostvarena vijčanom vezom koja je povezana sa potkonstrukcijom panela kao što je prikazano na Slici 9.

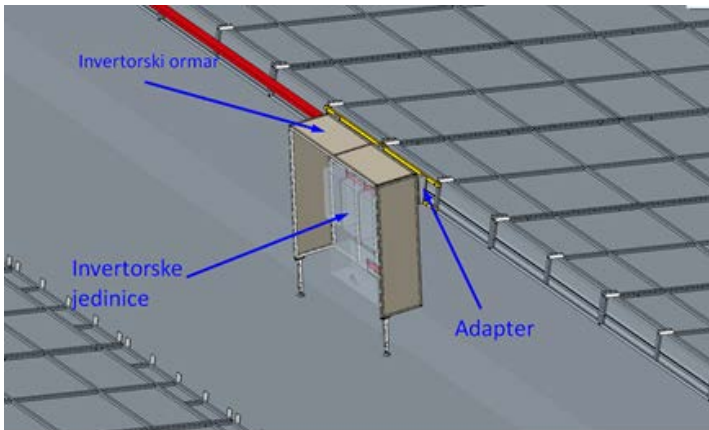
Prelaz sa vrha kosine u podnožje sledeće kosine je ostvareno uz pomoć PNK prevodnice koja je izrađena od hladno oblikovanog pocinkovanog „L“ profila. Glavna trasa PNK300 biće jednim

delom postavljena na „SIKA“ prekrivaču na prolazima između kosina i na ravnom delu krovnih kosina. Drugim delom PNK regali glavne trase vodiče se preko lima na parapetu hale.



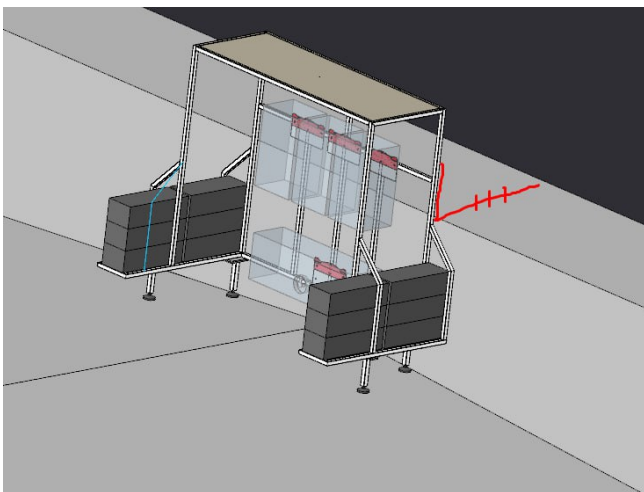
Slika 9. Prikaz vođenja kablova i PNK regala na delu krova sa krovnim kosinama

Invertorske jedinice su smeštene u ormare koji su vijčanom vezom (Slika 10), uz posredstvo adaptera za kompenzaciju ugla nagiba kosine povezane na zadnji deo potkonstrukcije.



Slika 10. Montaža invertorskih ormara na krovnim kosinama

Na ravnom delu krova rešenje za postavljanje invertora je rešenje sa balastima prikazano na Slici 11.



Slika 11. Montaža invertorskih ormara na ravnom delu krova

VI ELEKTROENERGETSKI DEO

Instalirana solarna elektrana na krovu objekta „Flash“ SRB d.o.o. snage 1500 kW (AC) sadrži 3780 fotonaponskih panela postavljenih na dve krovne celine.

Na prvoj krovnoj celini, sa krovnim kosinama, solarni paneli se postavljaju horizontalno orijentisani („landscape“) tako da prate nagib od 23°, na izabranu noseću potkonstrukciju. Postoje 72 krovne kosine od kojih se 70 koristi za postavljanje fotonaponskih modula.

U izvođenju solarne elektrane se koristi 56 krovnih kosina dužine 17,9 m instaliraju solarni paneli. Na ovaj način je na krovne kosine moguće postaviti ukupno po 24 solarna panela. Ostalih 14 kosina planiranih za postavljanje solarnih panela su dužine 20,4 m i na njih je moguće postaviti po 26 solarnih panela. Izlazna snaga PV elektrane u ovom slučaju je 1719,19 kW.

Proizvedena električna energija koristi za sopstvenu potrošnju, sa mogućnošću predaje viška proizvedene električne energije u elektrodistributivni (EDB) sistem po tzv. sistemu „kupac-proizvođač“. [11-13].

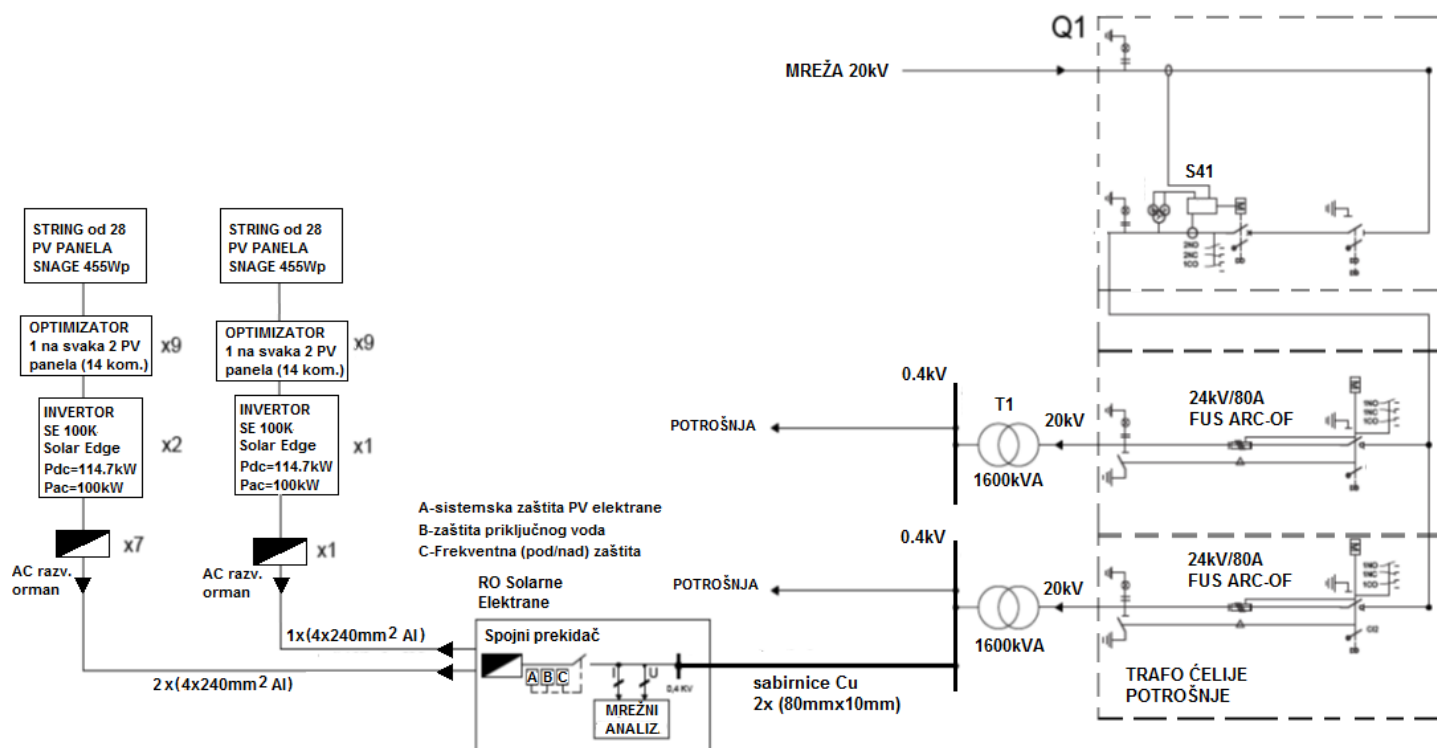
Invertori solarne elektrane (15 kom.) su automatski upravljani i međusobno su povezani preko komunikacione mreže.

Kada je prisutan mreži napon na sabirnicama 0,4 kV, odnosno kada imaju napon sa strane mreže proizvode električnu energiju, što se detektuje preko pametnog merača tzv. „Smart Meter -a“. Ukoliko dođe do prekida mrežnog napajanja na 0,4 kV strani, odnosno isključenja objekta fabrike sa ED mreže na sredjenaponskoj strani, invertori se automatski isključuju. Na ovaj način je obezbeđena zaštita od tzv. „ostrvskog rada solarne elektrane“.

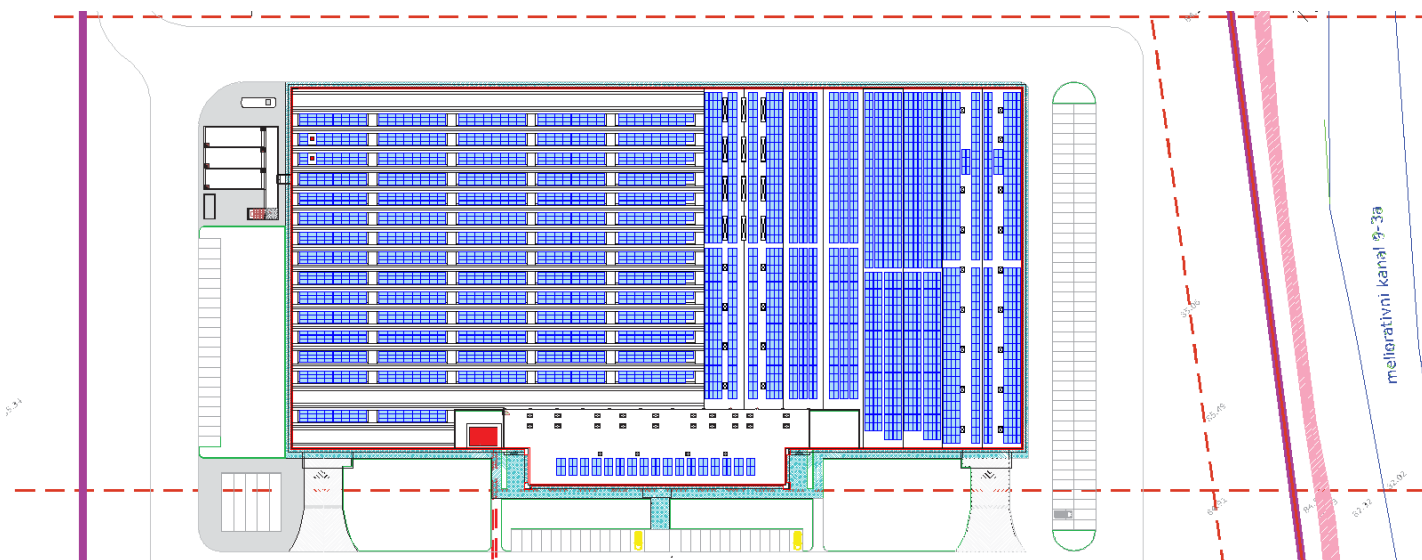
Solarna elektrana se sastoji od sledeće specificirane elektroenergetske opreme:

- 3780 fotonaponskih panela snage 455 W (Proizvođača „Ulica Solar“ model „UL-455M-144HV“),
- 15 invertora snage 100 kW (proizvođač „SolarEdge“ model „SE100K-RW001BNC4“),
- 1890 optimizatora snage solarnih panela (proizvođač „SolarEdge“ model „P950-4RMXMBY“),
- Sistema za monitoring (implementiran u opremi proizvođača invertora i optimizatora, uz primenu odgovarajućeg softverskog sistema proizvođača „SolarEdge“),
- 8 AC ormara,
- 1 sabirni AC ormar solarne elektrane (ROSOL),
- „Smart meter“ – Pametni merač snage i energije,
- strujni transformatori pametnog merača snage i energije.

Na Slici 12 je prikazana principna blok šema elektroenergetskog dela solarne elektrane, dok je na Slici 13 prikazana dispozicija rasporeda solarnih panela (pogled odozgo). Jednopolna električna šema solarne elektrane je data na Slici 14. Za ovu konfiguraciju solarne elektrane je ugrađeno 15 invertora snage 100 kW. Na invertore snage 100 kW vezuje se po 9 stringova, svaki string sa 28 panela u nizu. Na svakom stringu nalazi se po 14 optimizatora snage solarnog panela, odnosno na 1 optimizator se implementiraju 2 solarna panela.



Slika 12. Blok šema elektroenergetskog dela solarne elektrane

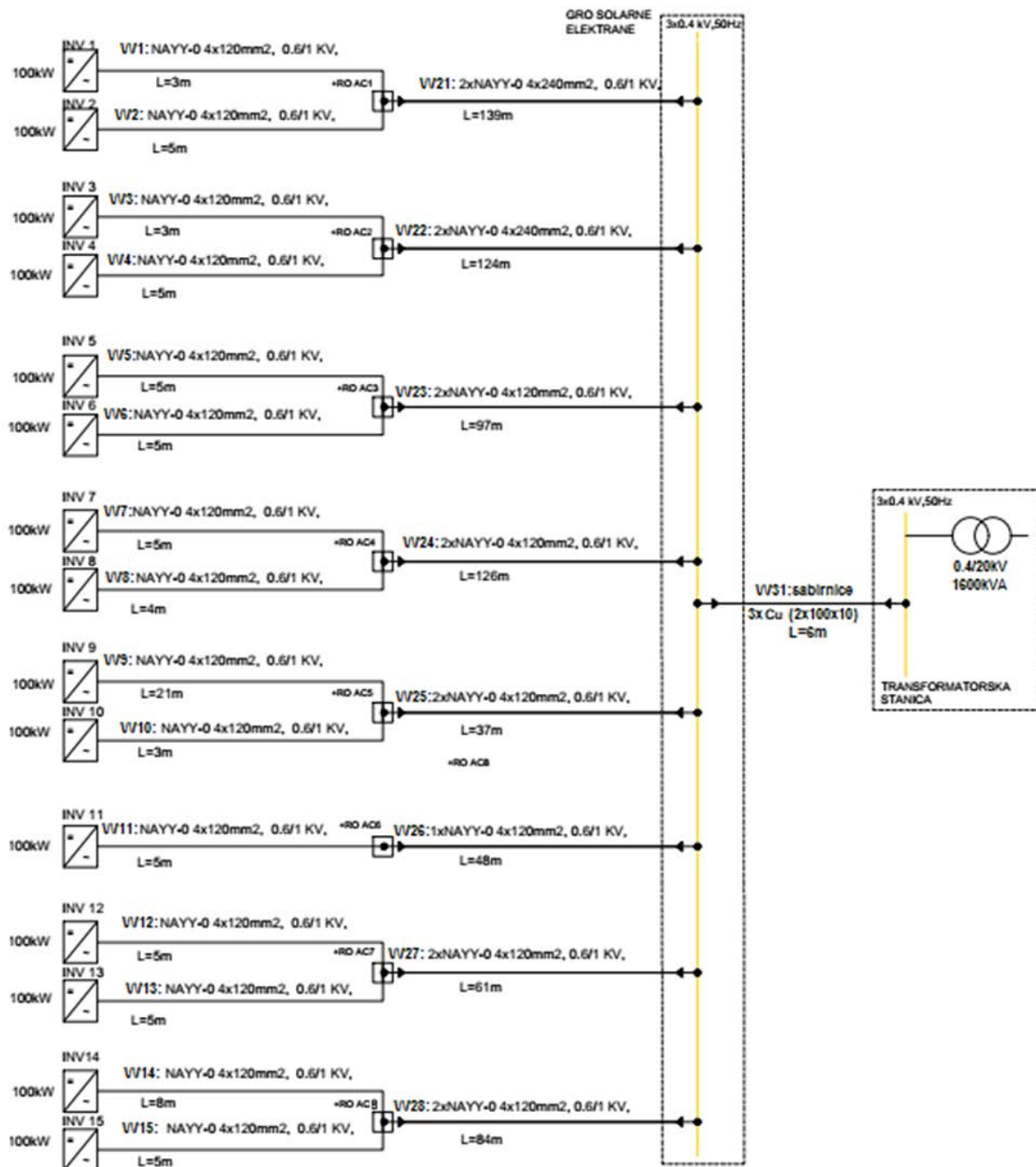


Slika 13. Dispozicija rasporeda solarnih panela - pogled odozgo

AC razvodni ormani solarne elektrane obezbeđuju povezivanje invertora u odgovarajuće grupe na AC strani. Takođe u njima se nalaze odgovarajuće AC prenaponske zaštite. AC ormani su za spoljašnju montažu sa stepenom zaštite IP 65. Ukupno je instalirano 8 razvodnih AC ormana. Na sedam AC razvodnih ormana su povezana dva invertora od po 100 kW. Stoga je maksimalna izlazna snaga iz svakog AC ormana 200 kW. Na jednom AC razvodnom ormanu je povezan jedan inverter snage 100 kW. Jednopolna šema jednog tipskog AC ormana data je na Slici 15.

Prethodno opisani AC razvodni ormani su povezani na na

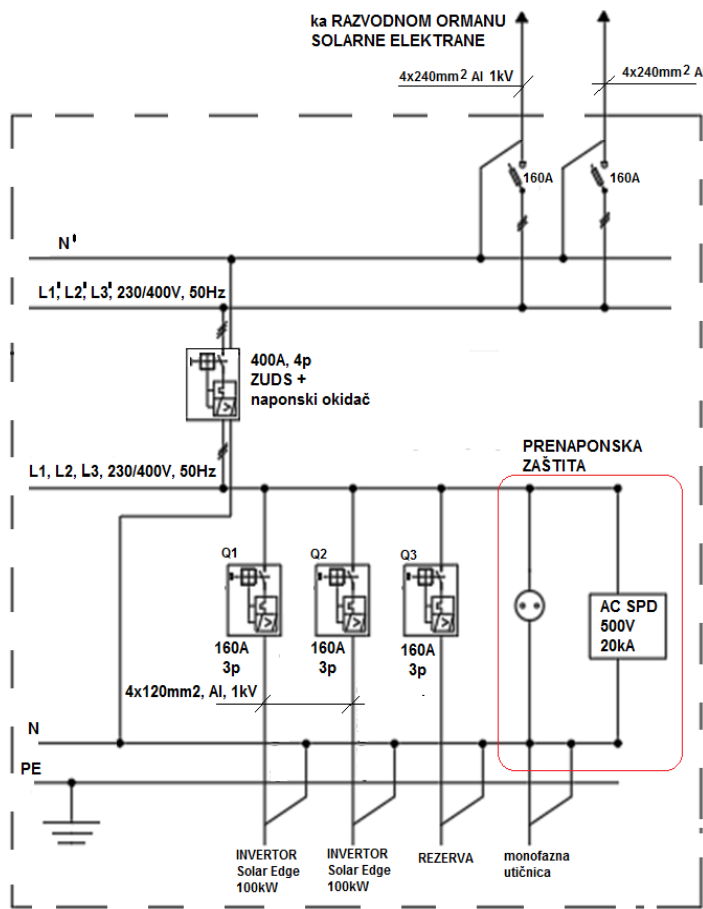
razvodni orman solarne elektrane (+ROSOL) preko odgovarajućih energetskih kablova. AC ormani se montiraju na zidnu površinu koja postoji na krovu objekta elektrane. Sva oprema montira se unutar ormana. Na dnu AC ormana su obezbeđeni otvori sa uvodnicama za uvod sledećih kablova: (1) aluminijumski kablovi preseka $4 \times 150 \text{ mm}^2$ – dva otvora (odnosno jedan otvor kod ormana na koji se vezuje samo jedan inverter), (2) aluminijumski kabl preseka $4 \times 240 \text{ mm}^2$ – dva otvora (odnosno jedan otvor kod ormana na koji se vezuje samo jedan inverter), za kablove koji idu ka +ROSOL. Razvodni orman solarne elektrane (+ROSOL) je smešten u prostoriji hale „Flash“ SRB d.o.o.. Izlazna snaga iz ovog ormana je 1500 kW.



Slika 14. Jednopolna električna šema solarne elektrane

+ROSOL prihvata kablove iz razvodnih ormara AC1....AC 8. U +ROSOL je ugrađen spojni prekidač kojim će se +ROSOL vezivati putem glavnog voda elektrane sa razvodnim postrojenjem. U okviru +ROSOL je ugrađena sistemska zaštita, koja se sastoji od naponske i frekventne zaštite. U slučaju nestanka napona na distributivnoj mreži ova zaštita ujedno omogućava automatsko isključenje elektrane sa distributivnog elektroenergetskog sistema na spojnom prekidaču (prema standardu DIN VDE 0126). Preko odgovarajućeg automatskog zaštitnog prekidača (kompakt prekidač za 2500A) se obezbeđena je prekostrujna zaštita solarne elektrane (preopterećenje i kratak spoj) i zaštita priključnog voda.

U sklopu elektroenergetskog dela su izvedene zaštite na DC strani i zaštite na AC strani. Zaštite na DC strani obuhvataju: (1) optimizatore, koji omogućavaju trenutno smanjenje napona na 1 volt ukoliko dođe do greške u toku rada solarne elektrane, (2) zaštita od atmosferskih pražnjenja, (3) prenaponska zaštita na ulaznoj strani (DC strani) invertora, (4) GPV zaštitni osigurači svakog stringa solarne elektrane. Zaštite na AC strani obuhvataju: (1) zaštitu od ostrvskog rada elektrane, (2) zaštitu od struje kratkog spoja i zaštitu od preopterećenja koje se ostvaruju prekidačima na izlazu iz invertora, (3) zaštitu od diferencijalne struje, (4) zaštitu od prenapona, (5) zaštitu od pojave prevelike jednosmerne komponente u izlaznoj struji elektrane.



Slika 15. Jednopolna šema AC razvodnog invertorskog ormana

Za paralelni rad elektrane sa mrežom, elektrana je opremljena odgovarajućom zaštitnom opremom:

- koja osigurava uslove paralelnog pogona: pod (nad) naponska zaštita; pod (nad) frekventna zaštita; zaštite su tako podešene da kod nestanka napona u mreži dođe do isključenja solarne elektrane sa mreže,
- zaštitom od smetnji i kvarova u mreži (zaštita od preopterećenja, kratkog spoja (u mreži i u elektrani),
- zaštitom od ostrvskog rada,
- zaštitom od smetnji i kvarova u elektrani,
- uređajem sa mogućnošću memorisanja događaja koji su prouzrokovali uključenje zaštite

Razdvajanje kola jednosmerne i naizmenične struje (PV izvorna kola- jednosmerna i invertorska izlazna kola-naizmenična) je obezbeđeno načinom izvođenja potpuno odvojenih i na propisnom rastojanju udaljenih (kablovske staze, nosači kablova i sl.), a prema NEC 2014 690.31. PV provodnici sistema su identifikovani i grupisani u skladu sa zahtevima. Sredstva za identifikaciju označena su odvojenim bojama kodiranja, markiranjem trake i sl.

VII KOMUNIKACIONI DEO I PRAĆENJE RADA SOLARNE ELEKTRANE

Praćenje proizvedene električne energije iz solarne elektrane omogućuje se pristupom internet stranici proizvođača opreme „SolarEdge“, odakle se udaljenim pristupom sa računara i

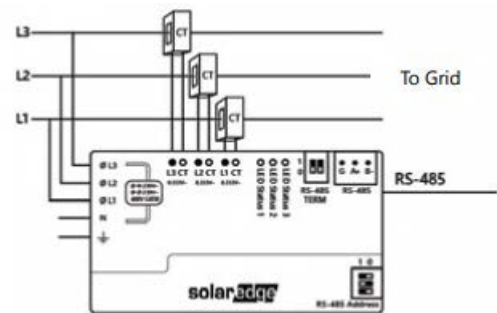
mobilnog telefona očitavaju trenutne vrednosti i istorija proizvodnje i korišćenja solarne električne energije.

Za mobilne telefone postoji takođe Android aplikacija koja omogućuje da se prati status uključenosti elektrane, trenutna i mesečna proizvodnja elektrane. Sistem je projektovan da u realnom vremenu dostavlja informacije o uključenosti sistema, trenutnoj proizvodnji električne energije, invertoru ili pojedinačnom solarnom panelu, sa mesečnim i godišnjim praćenjem proizvedene električne energije.

Za praćenje rada elektrane neophodna je ETHERNET konekcija kartice invertora sa lokalnom računarskom mrežom. Komunikaciona kartica na glavnom invertoru (tzv. MASTER), putem komunikacije sa ruterom se povezuje na internet, gde šalje podatke na odgovarajući Web server, kome se pristupa sa interneta. Sa internet portala, na internet stranici proizvođača invertora i na aplikaciji za mobilne telefone, moguće je očitavati parametre poput uključenosti sistema, vrednosti dnevne, mesečne i godišnje proizvodnje iz sistema. Radi omogućavanja udaljenog praćenja rada elektrane na portalu solar.web potrebno je da se odobri pristup spolja ka IP adresi invertora.

Elektrana je projektovana da napaja instalaciju proizvodnog pogona kompanije „Flash“ SRB d.o.o. iz Apatina, dok bi se višak proizvedene energije predao u sistem EDB-a posredstvom ugovora Korisnika i EDB-a.

Za praćenje radnih parametara solarne elektrane koristi se uređaj „Energy Meter with Modbus Connection - SolarEdge“. Uređaj se montira na DIN šine u ormanu +ROSOL. Na Slici 16 je prikazana blok šema povezivanja pametnog brojila na provodnik mreže solarne elektrane.



Slika 16. Električna šema povezivanja pametnog brojila solarne elektrane

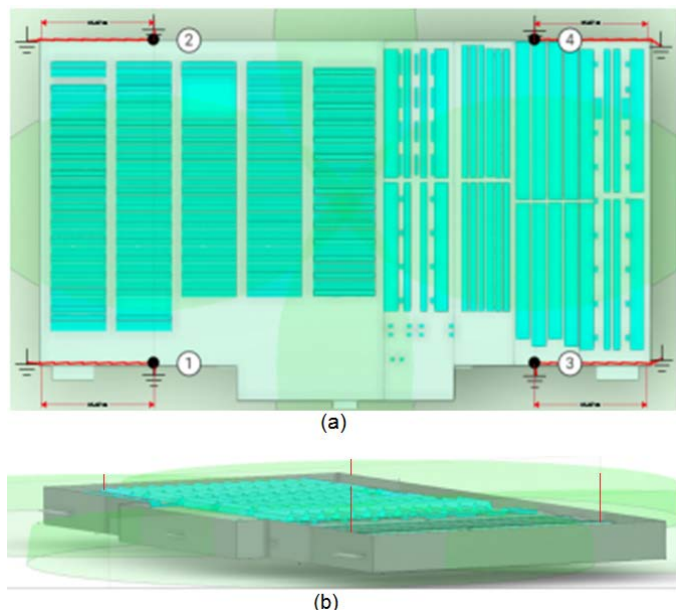
Karakteristike pametnog brojila „Energy Meter with Modbus Connection - SolarEdge“: (1) nominalni napon 400 Vac, klasa tačnosti 1, stepen mehaničke zaštite IP20, interfejs prema invertoru – RS485, vreme odziva 200 ms.

VIII GROMOBRANSKA ZAŠTITA SOLARNE ELEKTRANE

Za solarnu elektranu i objekat na koji se postavljaju fotonaponski paneli je izvedena gromobranska zaštita pomoću četiri štapne hvataljke sa uređajem za rani start.

Zaštitna zona ovog gromobrana pokriva celu površinu krova objekta, te zaštitne hvataljke štite pored objekta i solarnu elektranu koja je montirana na krovu objekta.

Aluminijumska potkonstrukcija solarnih panela je galvanski povezana sa spušnim provodnicima preko kojih su i gromobranske hvataljke povezane sa sistemom zaštitnog uzemljenja objekta (temeljni uzemljivač objekta i konturni uzemljivač objekta - pocinkovana čelična traka FeZn 25mm x4 mm). Na Slici 17 je prikazana dispozicija gromobranskih hvataljki na krovu objekta.



Slika 17. Dispozicija prihvata sistema gromobranske zaštite solarne elektrane; (a) pogled odozgo, (b) korner jugo-istok

Na Slici 18(a) je dat prikaz i dispozicija gromobranskog sistema sa pogledom odozgo, dok je na Slici 18(b) dat prikaz kornera jugo-istok.

IX REZULTATI PROJEKTA

Prilikom projektovanja korišćen je specijalizovan program „Valentine Software PV Sol Premium 2022“. U ovom poglavlju dat je prikaz proizvodnje solarne elektrane „Flash“ SRB d.o.o. snage 1500 kW. Proračunski program „Valentine Software PV Sol Premium 2022“ [14] je specijalizovan softverski alat za proračune fotonaponskih sistema. PV Sol programski paket sadrži bazu svih proizvođača panela, invertora i baterija koje se redovno ažuriraju. Pored toga u sebi sadrži integrisan softver za meteorološke podatke „Meteonorm“ [8-9].

Primenom preciznih meteoroloških parametara softver ima mogućnost proračuna uticaja senke na solarnu elektranu, te daje veoma precizne proračune proizvodnje električne energije.

Proračun prinosa električne energije radi se na bazi 3D modela i uzima u obzir kretanje sunca na svakih sat vremena i 365 dana u godini. Takođe, program poseduje mogućnost podešavanja da se analiza proračuna proizvodnje obračunava na jednogminutnom nivou. Pri proračunu proizvodnje solarne elektrane je korišćen 3D model sa usvojenom konfiguracijom solarne elektrane koja je prikazana na prethodnom blok dijagramu i jednopolnoj šemi.

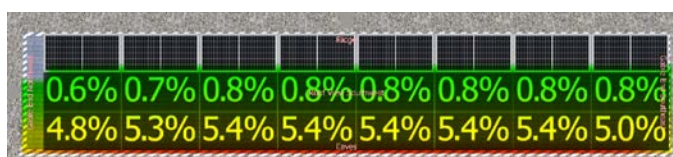
Gubici u kablovima su dobijeni prema detaljno sprovedenom proračunu pada napona i trajno dozvoljenih struja. Za primenjeno

rešenje izgrađene solarne elektrane ovi gubici iznose maksimalnom iznosu 3% od ukupne izlazne snage solarne elektrane.



Slika 18. Prikaz 3D modela solarne elektrane

Na Slici 18 je dat 3D izometrijski prikaz modela solarne elektrane koji je bio osnova za proračun i procenu proizvodnje električne snage i električne energije. Na ovom prikazu se jasno uočavaju dve krovne celine: kosi krov i ravni deo krova sa pripadajućim solarnim panelima. Takođe na osnovu ovog modela je izvršena procena uticaja senke na krovim kosinama i na ravnom delu krova solarne elektrane. U tom smislu su dati 2D prikazi na neke karakteristične delove krova solarne elektrane. Na Slici 19 je dat 2D prikaz postavljanja solarnih panela sa uticajem senke na krovim kosinama 1-4. Na Slici 20 je dat 2D prikaz postavljanja solarnih panela sa uticajem senke na ravnom delu krova.



Slika 19. Prikaz uticaja senke na solarne panele na krovim kosinama



Slika 20. Prikaz uticaja senke na solarne panele na ravnom delu krova

U Tabeli 8 su dati proračunski parametri solarne elektrane, dok je u Tabeli 9 dat prikaz izvoda proračuna ostvarene proizvodnje dobijenog na osnovu 3D modela, specifičnih parametara lokacije dobitaka (nagib, orijentacija, refleksija i sl.) i gubitaka (zaprljanje, nanosi i sl.). U Tabeli 10 je dat prikaz očekivanog prinosa solarne elektrane snage 1500 kWp AC.

Tabela 8. Proračunski parametri solarne elektrane

Solarna elektrana „Flash“ SRB d.o.o.		
Izlazna snaga solarnih panela	1,719.90	kWp
Specifični godišnji prinos	1,116.40	kWh/kWp
Odnos performansi	87.13	%
Uticaj senke na solarnu elektranu	2.9	%
Godišnja proizvodnja	1,920,904	kWh/god
Godišnja proizvodnja nakon prve godine (uračunata degradacija solarnih panela nakon prve godine rada)	1,907,915	kWh/god
Godišnja potreba invertora za solarnom energijom u stanju mirovanja	810	kWh/god
CO ₂ emisije su izbegnute	1,824,089	kg / god

Tabela 9. Proizvodnja solarne elektrane

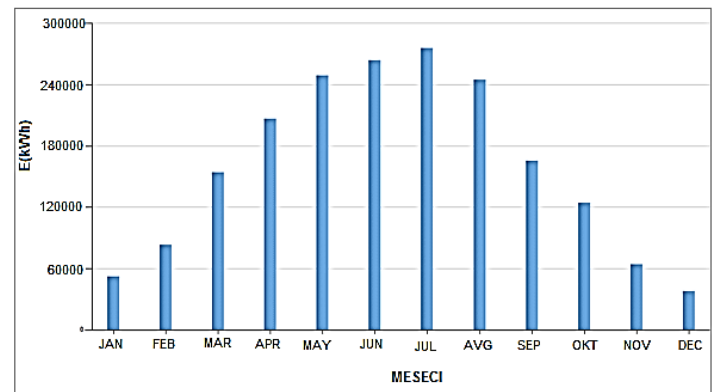
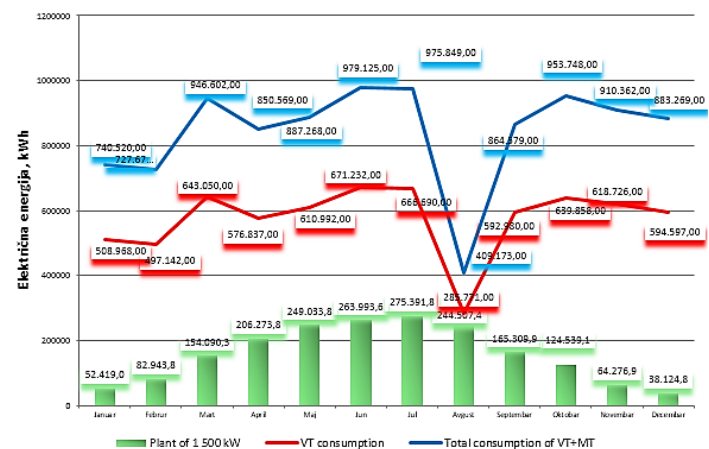
Globalno zračenje- horizontalno	1,260.20	kWh/m ²	
Globalno zračenje – horizontalno (odstupanje)	-12.60	kWh/m ²	-1.00 %
Odstupanje od standardnog spektra	5.68	kWh/m ²	0.46 %
Refleksija tla (Albedo)	28.17	kWh/m ²	2.25 %
Orijentacija i nagib površine modula	-0.14	kWh/m ²	-0.01 %
Senčenje nezavisno od modula	-29.90	kWh/m ²	-2.33 %
Refleksija na površini modula	1,251.41	kWh/m ²	
Globalno zračenje na modulu			
1,251.41kWh/m ² x 8216.102m ² = 10,281,679kWh			
Globalno PV zračenje	10,281,679.33	kWh	
Zaprljanje	0.00	kWh	0.00 %
STC konverzija (procenjena efikasnost modula 20,93 %)	-8,129,494.99	kWh	-79.07 %
Nazivna PV energija	2,152,184.34	kWh	
Delimično senčenje specifično za modul	-46,323.14	kWh	-2.15 %
Performanse pri slabom osvetljenju	-16,521.08	kWh	-0.78 %
Odstupanje od nazivne temp. modula	-62,414.11	kWh	-2.99 %
Diode	-1,870.60	kWh	-0.09 %
Nepodudaranje (informacije o proizvođaču)	0.00	kWh	0.00 %
Nepodudaranje (konfiguracija/senčenje)	-7,734.91	kWh	-0.38 %
Optimizator snage (DC konverzija/kliping)	-10,118.53	kWh	-0.50 %
PV energija (DC) bez invertorskog klipa	2,007,201.96	kWh	
Obrezivanje na račun maks. AC snage/cos fi	-174.84	kWh	-0.01 %
MPPT	0.00	kWh	0.00 %
PV energija (DC)	2,005,756.59	kWh	
Energija na ulazu invertora	2,005,756.59	kWh	
Ulazni napon odstupa od nazivnog napona	0.00	kWh	0.00 %
DC/AC konverzija	-45,650.45	kWh	-2.28 %
Potrošnja u stanju pripravnosti (inverter)	-809.98	kWh	-0.04 %
Ukupni gubici kablova	-39,202.12	kWh	-2.00 %
PV energija (AC) minus upotreba u stanju pripravnosti	1,920,094.04	kWh	
PV generator energije (AC mreža)	1,920,904.01	kWh	

Tabela 10. Prikaz očekivanog prinosa energije u toku prve godine rada

„Flash“ SRB d.o.o. – 1500 KW AC snage	
Mesec	Energija u kWh
Januar	52419
Februar	82943,8

Mart	154090,3
April	206273,8
Maj	249033,8
Jun	263993,6
Jul	275391,8
Avgust	244507,4
Septembar	165309,9
Oktobar	124539,1
Novembar	64276,9
Decembar	38124,8
Suma:	1.920.904,01

Na Slici 21 je dat grafički prikaz proizvodnje solarne elektrane po mesecima i na godišnjem nivou. Na Slici 22 je dat prikaz uporedne potrošnje električne energije u objektu i planirane proizvodnje solarne elektrane.

**Slika 21.** Grafički prikaz proizvodnje solarne elektrane po mesecima na nivou jedne godine**Slika 22.** Uporedni prikaz proizvodnje i potrošnje energije fabrike "Flash" SRB d.o.o.

Na Slikama 23-28 su prikazani pojedini delovi realizovane solarne elektrane na krovu fabrike „Flash“ d.o.o. Na Slici 23 je dat prikaz montaže solarnih panela na ravnom delu krova fabrike. Na Slici 24 je dat raspored solarnih panela na krovnim kosinama. Uočavaju se dva tipa krovnih kosina o kojima je bilo reči u prethodnom delu rada. Na Slici 25 je data dispozicija montaže i ugradnje AC invertorskog sabornog ormara i položaj invertorske grupe 2x100kW u odnosu na njega. Na Slici 26 je dat prikaz jedne invertorske grupe SolarEdge 2x100kW. Na Slici 27 je

prikazan izgled unutrašnjosti +ROSOL, raspored zaštitnih prekidača i sabirničkog sistema. Uočava se kablovski dovod sa AC invertorskih ormara sa gornje strane +ROSOL.



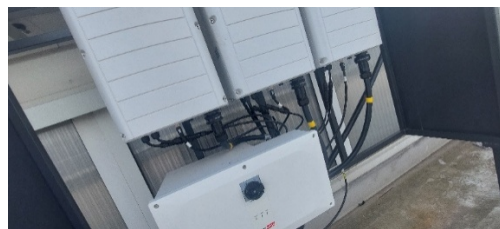
Slika 23. Raspored solarnih panela na ravnom delu krova



Slika 24. Raspored solarnih panela na krovnim kosinama



Slika 25. Dispozicija montaže i ugradnje AC razvodnog ormara i invertorske grupe



Slika 26. Prikaz invertorske grupe SolarEdge 2x100kW



Slika 27. Prikaz unutrašnjosti +ROSOL snage 1500kWac

X ZAKLJUČAK

U radu su prikazani projektovanje i realizacija solarne krovne elektrane fabrike „Flash“ d.o.o. izlazne snage 1500kW. Poseban akcenat u radu je dat na proračune koji se tiču energetske kapaciteta sunčevog zračenja za datu lokaciju objekta. Takođe u radu su dati rezultati realizacije i izvođenja solarne elektrane, sa detaljnim opisom rešenja potkonstrukcije sistema solarnih panela koja je prilagođena specifičnim karakteristikama i dispozicijom krova fabrike. U radu je opisana elektroenergetski deo, kao i način povezivanja DC/AC mrežnih pretvarača (invertora). Na kraju su dati ključni rezultati projektovanja, kao i rezultati realizacije solarne elektrane. Solarna elektrana na krovu fabrike „Flash“ d.o.o u Apatinu je tehnički izvedena krajem Marta 2024. Trenutno je u fazi priprema za integraciju sa elektroenergetskom distributivnom mrežom. Očekuje se povezivanje na mrežu i finalno puštanje u rad u naredna dva meseca.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Publikacija ovog rada je podržana najvećim delom iz komercijalnog projekta firme Institut „M.Pupin“-Projekt Inženjering i firme Calcedonia (Ugovor br. 1507/23 od 15.05.2023.), a jednim delom kroz krovni projekat Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija Republike Srbije, Ugovor br. 451-03-66/2024-03/200034 od 05.02.2024.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] The breakthrough agenda report, Accelerating sector transitions through stronger international collaboration, IRENA, IEA Publications,

- International Energy Agency, 2023.
<https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2023> [pristupljeno 4.01.2024]
- [2] Microgeneration Certification Scheme ('MCS'). Guide to the Installation of Photovoltaic Systems, London EC3M 3BE, 2012.
<https://static.solartricity.ie/wp-content/uploads/2014/07/MCS-guide-to-installation.pdf> [pristupljeno 10.01.2024]
- [3] Luque, A., Hegedus, S. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, A John Wiley and Sons, United Kingdom, 2011.
- [4] Wenham, S.R., Green, M.A., Watt, M.E., Corkish, R. *Applied Photovoltaics*, Earthscan in the UK and USA, 2007.
- [5] Vukovic, M., Despotovic, Z.V., Simonovic, B. Design and construction of a photovoltaic solar power plant of 500 kW on the roof of the factory "GRUNER" Serbian Ltd. -Vlasotince, in Proc. *Proceedings of International Symposium Power Plants 2021*, Belgrade, Serbia, 17-18 November, 2021.
<https://e2021.drustvo-termicara.com/book> [pristupljeno 12.01.2024]
- [6] Vukovic, M., Despotovic, Z.V., Simonovic, 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] PVGIS User manual.
- [8] https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis/getting-started-pvgis/pvgis-user-manual_en [pristupljeno 12.01.2024]
- [9] Remund, J., Müller, S., Schmutz, M., Barsotti, D., Studer, C., Cattin, R. *Meteonorm Handbook Part I: Software V.7*, Meteotest, Bern, 2020.
https://meteonorm.com/assets/downloads/mn73_software.pdf [pristupljeno 12.01.2024]
- [10] Remund, J., Müller, S., Schmutz, M., Barsotti, D., Studer, C., Cattin, R., *Meteonorm Handbook Part II: Theory V.7.3.4*, Meteotest, Bern, 2020.
https://meteonorm.com/assets/downloads/mn73_theory.pdf [pristupljeno 12.01.2024]
- [11] Tools for consumers and designers of solar.
https://www.suneearthtools.com/dp/tools/pos_sun.php [pristupljeno 12.01.2024]
- [12] Wicki, L., Pietrzykowski, R., Kusz, D. Factors determining the development of prosumer photovoltaic installations in Poland, *Energies*, Vol. 15, No. 16, pp. 5897, 2022. <https://doi.org/10.3390/en15165897>
- [13] Karalus, S., Köpfer, B., Guthke, P., Killinger, S., Lorenz, E. Analysing grid-level effects of photovoltaic self-consumption using a stochastic bottom-up model of prosumer systems, *Energies*, Vol. 16, No. 7, pp. 3059, 2023.
<https://doi.org/10.3390/en16073059>
- [14] Jiang, A., Yuan, H., Li, D. Energy management for a community-level integrated energy system with photovoltaic prosumers based on bargaining theory, *Energy*, Vol. 225, 120272, 2021.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120272>
- [15] Valentine Software PV Sol Premium 2022. <https://valentin-software.com/en/tag/pvsol-premium-2022/> [pristupljeno 15.01.2024]

AUTORI/AUTHORS

Marko Đurović, - master maš.inž, IMP Projekt Inženjering, marko.djurovic@impprojekt.com, ORCID [0009-0001-7461-8044](https://orcid.org/0009-0001-7461-8044)
Arsenije Ćirić - master maš.inž., IMP Projekt Inženjering, arsenije.ciric@impprojekt.com
Željko V. Despotović- PhD E.E., Univerzitet u Beogradu, Institut "M.Pupin", zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710) (autor za korespondenciju)

Design and Realization of a Photovoltaic Power Plant with an Output Power of 1500 kW on the Roof of the "Flash" - Apatin Factory

Abstract – The paper presents the realization of a photovoltaic power plant with an output power of 1500 kW on the roof of the "Flash" factory hall in Apatin, Serbia. The solar power plant is connected to the LV bus-bars in the 20/0.4 kV 1600 kVA transformer station and supplies the factory's consumers through them. In periods when there is not enough solar insolation, the power of consumers in the factory is realized from the power grid. The solar power plant contains 3780 mono-crystalline photovoltaic panels, each with a power of 455 W. The roof surface of the building faces southwest - northeast. Photovoltaic panels are installed on the roof surface of the production hall with the administrative part. The specificity of the roof structure composed of two units (a roof with roof slopes and a flat roof) caused a series of design solutions that will be presented in more detail in the paper. The paper also shows the disposition of DC/AC power converters-inverters and their mutual communication, as well as the system for monitoring output parameters (voltage, current, power) and the quality of electricity delivery to consumers in the factory.

Index Terms – Solar power plants, RES, Prosumer, Inverter, PV modules

U susret revitalizaciji turbina HE Đerdap 2: Merenje rasporeda vektora brzina na ulazima turbina

Dušan Prodanović*, Damjan Ivetić*, Predrag Vojt**, Milan Ćušić**

* Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

** Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ a.d., Beograd

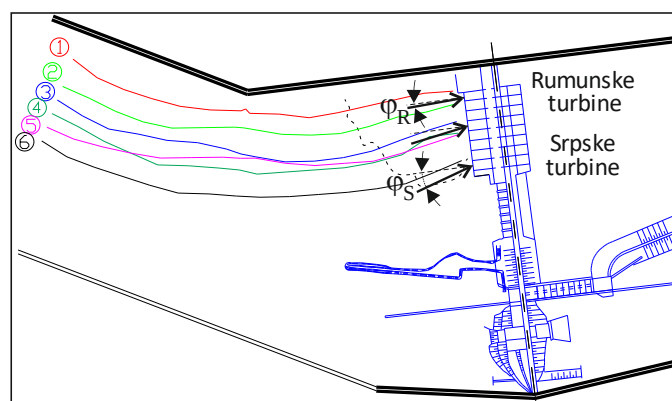
Rezime - Kontinualno merenje protoka na brojnim turbinama hidroelektrana se standardno radi nekom od relativnih metoda (na primer Winter-Kennedy). Umesto da se meri složeno polje brzina u jednoj proticajnoj ravni i da se njenom integracijom dobije protok, meri se samo jedna karakteristična veličina a na fizičkom modelu se odrede parametri preslikavanja vrednosti te veličine u trenutni protok. Najčešće se koristi Winter-Kennedy metoda gde se merenjem razlike pritisaka dobija relativna (indeksna) vrednost protoka. Merna nesigurnost tako određenog protoka je znatno veća od nesigurnosti merenja ostalih relevantnih veličina za određivanje optimalnih radnih uslova turbine. Da bi se smanjila merna nesigurnost, potrebno je „apsolutnim merenjima“ celog polja brzina odrediti trenutni protok i preračunati, u realnim uslovima, korekcije indeksne metode. To se posebno odnosi na hidroelektrane čija dispozicija nije „idealna“ kao što je bila na fizičkom modelu, kao što je HE „Đerdap 2“ sa poznatim problemom „kosog dostrujavanja“. Sa ciljem bolje procene hidrauličke efikasnosti turbina i prikupljanja podataka o realnim uslovima rada turbina i ulazne rešetke, a zbog planiranih radova na revitalizaciji, projektovan je i primenjen inovativni sistem za apsolutno merenje protoka koji je prikazan u ovom radu. Na pokretni ram, pozicioniran na ulazu u turbinu uzvodno od grube rešetke, postavljeno je 15 elektromagnetnih (EM) senzora u jednoj horizontalnoj ravni, zajedno sa dva redundantna akustična Doppler senzora. Svaki od senzora meri sve tri komponente brzina. Ram se podiže duž cele visine proticajnog preseka snimajući celo polje brzina. Položaj rama se prati pomoću dva enkodera, dok se dva senzora pritiska koriste za merenje dubine vode. Merenja su sinhronizovana sa lokalnim SCADA sistemom odakle se preuzimaju podaci o radu turbine. Uvažavajući specifičnosti mernog sistema, novorazvijenih EM sonde i postojećih hidrauličkih uslova, razvijena je adekvatna procedura za procenu nesigurnosti izmerenog protoka. U ovom radu je prikazana merna metoda i dati su neki rezultati merenja na agregatima HE „Đerdap 2“.

Ključne reči - Merenje brzine, Merna nesigurnost, Elektromagnetni senzori, Hidroelektrane, Cevne turbine.

1 UVOD

Na deonici reke Dunav, u zoni zajedničkog interesa Republike Srbije i Republike Rumunije, nalaze se dve velike hidroelektrane (HE): „Đerdap 1“ i „Đerdap 2“ koje predstavljaju ključne elemente elektroenergetskog sistema. U narednom periodu je planirana revitalizacija cevni agregata na HE „Đerdap 2“ pri čemu je jedan od ciljeva i podizanje

hidrauličke efikasnosti. Na ulazu u HE „Đerdap 2“ se javlja fenomen dostrujavanja vode pod značajnim uglom [1, 2]. Zbog toga što realni uslovi dostrujavanja (slika 1) nisu kao na modelu, neophodno je kvantifikovati postojeće uslove i proveriti hidrauličke karakteristike turbina pre, kao i nakon revitalizacije.



Slika 1. HE „Đerdap 2“ sa prilaznim strujnicama Dunava (fizički model, Institut „Jaroslav Černi“ [1])

Merenje protoka na kratkim objektima kao što je ulaz u turbinu HE „Đerdap 2“ je hidraulički komplikovan zadatak. U opštem slučaju, merenje protoka na agregatima HE je definisano kroz nekoliko pravilnika i standarda [3,4]. Iako su cevne, ili Kaplanove turbine za male padove u relativno rasprostranjenoj upotrebi, ne postoje jasne preporuke za merenja protoka u ovim slučajevima. Pored toga, na ulazu u HE „Đerdap 2“ se javlja fenomen dostrujavanja vode pod značajnim uglom u horizontalnoj ravni, čime je polje raspoloživih rešenja za merenje protoka, dodatno suženo [2]. Rešenje koje je prihvaćeno za pouzdano određivanje protoka u specifičnim hidrauličkim uslovima na ulazima u turbine HE „Đerdap 2“ je zasnovano na metodi Brzina-Proticajni presek [5,6]. Za potrebe ovog sistema, projektovane su nove 3D EM sonde, koje su praktično funkcionisale kao EM (hidrometrijska) krila. Petnaest EM sonde je postavljeno na kruti čelični ram širine 14,5 m i visine 3,1 m, koji se može spuštati i podizati po visini proticajnog preseka. Zajedno sa dva enkodera položaja, dva senzora dubine i dva redundantna ADV senzora brzine, prikupljani su podaci pomoću kojih je određena srednja profilska brzina i površina proticajnog preseka. Budući da je sistem inovativnog karaktera [7], posebno je razvijena procedura za procenu merne nesigurnosti protoka [8], koji se dobija proizvodom srednje profilske brzine i površine proticajnog preseka. U sklopu ove procedure,

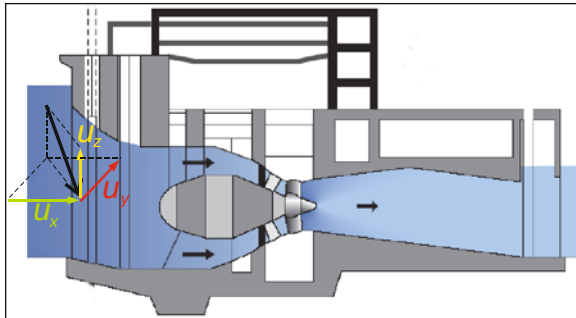
obračunavaju se merne nesigurnosti sistematskog i statističkog karaktera, po različitim veličinama, kao i merna nesigurnost usled varijabilnosti protoka tokom trajanja jednog merenja.

U ovom radu je detaljno predstavljena novorazvijena procedura merenja rasporeda brzina na ulazima u turbine HE „Đerdap 2“, oprema koja se koristi i prateći softver. Dati su neki dobijeni rezultati merenja na turbini A7, sa komentarima i preporukama za poboljšanje.

II METODOLOGIJA

Prema standardu [3] koji određuje načine obavljanja terenskih ispitivanja karakteristika turbina, na turbinama HE „Đerdap 2“ ne postoje adekvatni uslovi da se obavi merenje protoka, jer ne postoji dovoljno dugačka deonica u kojoj je strujanje pravolinijsko. U takvim uslovima, standard dozvoljava da se protok i dalje određuje metodom Brzina-Proticajni presek, odnosno integracijom izmerenog polja podužne komponente brzine U_x i proticajne površine A , pri čemu merenja treba obaviti korišćenjem adekvatne, standardom definisane opreme. Merni profil je obično nizvodno od ulazne rešetke, u niši koja se koristi za brzi predturbinski zatvarač.

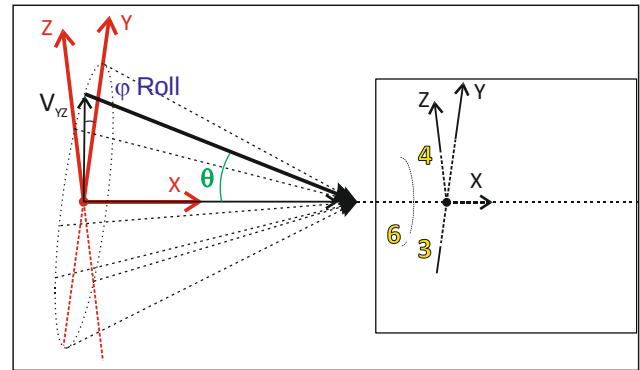
Iz tehničkih razloga, na HE „Đerdap 2“ nije moguće postaviti opremu na profilu brzog predturbinskog zatvarača, već je odlučeno da se meri uzvodno, ispred ulazne rešetke. Da bi se obavilo merenje protoka u takvim uslovima, na osnovu slike 2 se vidi da je neophodno koristiti opremu koja može da izmeri podužnu U_x komponentu brzine sa zadovoljavajućom tačnosti u uslovima postojanja značajne druge dve komponente brzina U_y i U_z , a da pri tome sama oprema tokom merenja ne utiče bitno na rad turbine. Pri tome, treba izmeriti celokupno polje brzina pri jednom radnom protoku turbine koji je približno konstantan.



Slika 2. Cevna turbina sa kosim dostrujavanjem koje onemogućava standardno merenje protoka

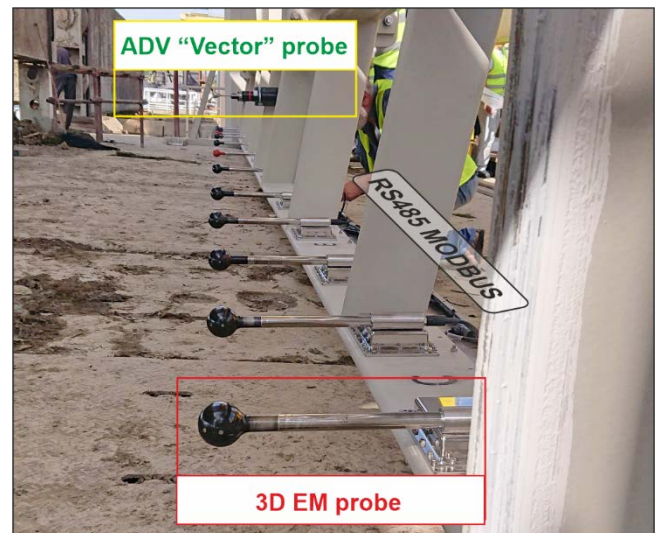
Standardna merenja pomoću hidrometrijskih krila ne obezbeđuju dovoljno pouzdana merenja podužne U_x komponente brzine u uslovima kao sa slike 2. Zbog toga su merenja brzina obavljena novorazvijenim elektromagnetnim (EM) sondama LOG-xXYZ-65 (slika 3) proizvođača „Svet Instrumenata“ [9] koja su u stanju da mere sve tri komponente brzina i to u osnovnom smeru kao i u povratnom toku, što je posebno važno zbog povratnih strujanja (negativno U_x) koje se javlja na ulazu u turbine HE „Đerdap 2“. Zbog važnosti podužne komponente brzine u proračunu protoka, svaka sonda meri tu komponentu sa dva odvojena para elektroda, jedan postavljen po glavnom prečniku (slika 3, elektroda 3 i 1 koja se ne vidi) a drugi pod 45° (elektroda 6 i 5 koja se ne vidi).

Prečnik sferne merne glave EM sonde je 63 mm a ukupna merna zona sonde je prečnika oko 120 mm, kao kod klasičnih hidrometrijskih krila. Merni opseg sonde je ± 5 m/s, tačnost merenja brzina je bolja od 1 % a prag osetljivosti je 0,3 mm/s. Svaka sonda ima u sebi logger sa memorijom za 486.720 merenja, akumulator za samostalni rad kao i priključak za mrežni rad preko RS485 sa MODBUS protokolom. Brzina uzorkovanja je minimum 1 sekunda, mada interno, sonda radi u znatno bržem režimu a finalni podatak je interno osrednjen.



Slika 3. 3D EM sonda sa definisanim koordinatnim sistemom

Sistem za merenje protoka je koncipiran tako da se 15 EM sondi postave u jednoj horizontali na kruti čelični ram, dužine 14,5 m, koji se spušta u vodu uzvodno od grube rešetke kroz vođice grajfera, na ulazu u turbinu, pomoću portalnog kрана. Ukupna visina (dubina) do dna ulaznog profila je 32 m. Postepenim pomeranjem rama po celoj visini preseka (sa ili bez zastajkivanja) se snima polje brzina. Na slici 4 je prikazan detalj donje horizontalne grede, sa postavljenim EM sondama.

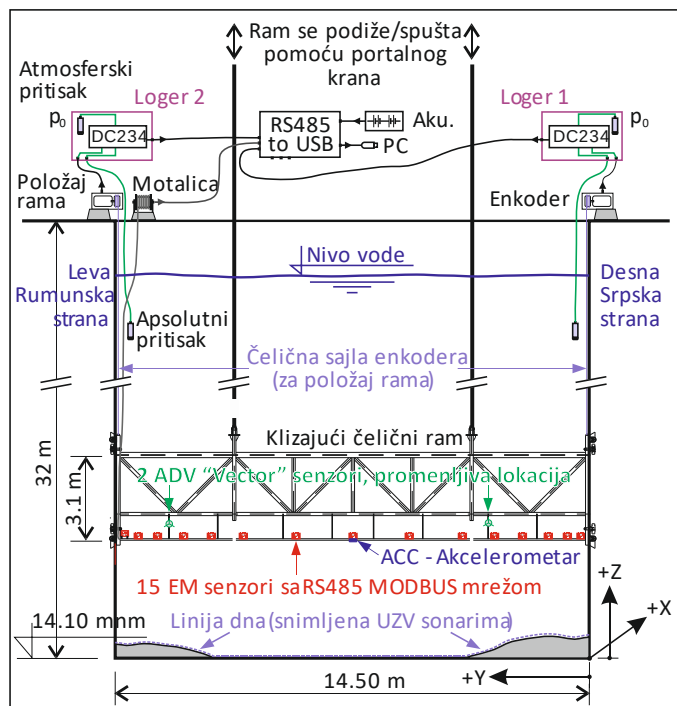


Slika 4. Ram sa postavljenim EM i ADV (UZV) sondama

Kao kontrolno merenje brzine, pored EM sondi, na merni ram (slika 4 gore) su postavljene i dve trokomponentne ADV sonde „Vector“ proizvođača NORTEK [10]. Tačnost sonde je 1%. Da bi se obezbedio neometan i pouzdan rad ADV sonde, korišćene su u autonomnom radu, samo sa lokalnim loggerom i sa baterijskim pogonom, bez spajanja na komunikacioni sistem.

Kompletan merni sistem je prikazan na slici 5. Čelični ram dimenzija 14,5x3,1 m se diže i spušta pomoću kрана kroz vođice predviđene za rad grajfera. Na ramu je u prvim ispitivanjima bio postavljen i akcelerometar, da se provere oscilacije rama, frekvencija i amplituda pri različitim režimima rada turbine.

Položaj rama se meri kontinualno preko dve čelične sajle koje se namotavaju na shaft-ekoder, tačnosti bolje od 0,025 %. Koriste se dva pretvarača, tako da se prati i eventualna nagnutost rama.



Slika 5. Skica korišćenog sistema za merenje rasporeda brzina

Položaj slobodne površine (nivo) vode se meri pomoću senzora apsolutnog pritiska, odvojeno sa leve i sa desne strane preseka, klase 0,2 %. Za svako merenje nivoa se koriste po dva senzora u paru: jedan za merenje pritiska u vodi na poznatoj dubini a drugi za merenje atmosferskog pritiska i kompenzaciju.

Stvarni oblik dna se proverava UZV sonarima pre sprovedenih merenja. Sonari mere razdaljine do 50 m pod vodom sa rezolucijom 0,5 %. Koriste se 4 sonara postavljena sa donje strane noseće grede (ne vide se na prikazanim slikama).

Sve EM sonde su povezane na ramu pomoću RS485 mreže podvodnim kablovima. Na površini terena se nalazi motalica na ručni pogon, sa klizajućim kontaktima. U istu mrežu su spojena i dva shaft-ekodera za položaj rama i dva sistema za merenje nivoa vode. Iako svi logeri imaju sopstvenu bateriju, izvedeno je i dodatno napajanje preko RS485 kabla, pomoću akumulatora. Komunikacija sa svim uređajima se ostvaruje koristeći MODBUS protokol. Svaka od sonde u svom internom logeru čuva širi set podataka sa vremenskom diskretizacijom od 1 sekunde, dok se preko RS485 veze svi podaci šalju nadzornom sistemu u realnom vremenu, sa diskretizacijom od 2 sekunde (osim ADV sonde, koje nisu povezane u sistem).

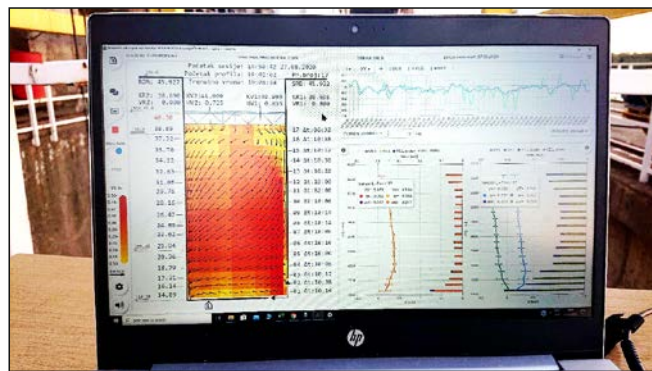
Usvojena metodologija snimanja profila brzina na ulazu u turbinu sa pokretnim ramom je kompromis između dva

suprostavljena zahteva. Sa stanovišta merne nesigurnosti, kao i neustaljenosti protoka, bolje bi bilo postaviti fiksni ram koji ceo ulazni profil istovremeno snima pomoću nekih 230 sonde. Pošto se koriste sonde koje mogu da mere sve tri komponente vektora brzine u jednoj tački, cena takvog sistema bi bila „prilično“ visoka. Takođe, takav sistem bi značajno povećao pad nivoa na mernoj rešetki, što bi na turbinama HE „Đerdapa 2“ bio relativno veliki pad s obzirom da je ukupni pad oko 7 m. Sa druge strane, pokretni ram je osetljiv na neustaljenost rada turbine, tako da korišćena metodologija zahteva da se sve merene veličine „normalizuju“ prema jednom referentnom protoku (ili snazi turbine).

Snimanje polja brzina može biti inkrementalno (sa „zastajkivanjem“ na određenom profilu, dok se ne skupi dovoljno podataka za osrednjavanje merenja) i kontinualno (ram kontinualno klizi od najniže do najviše kote, približno konstantnom brzinom). Metoda sa zastajkivanjem vrši bolje osrednjavanje ali je ukupno vreme trajanja merenja dugačko (oko 10 min u jednom profilu, mereno oko 17-18 profila) pa je velika šansa da će doći do nekog poremećaja u radu turbine i da će se drastično promeniti radni uslovi. Sa druge strane, metodom kontinualnog merenja se može obaviti profilisanje relativno brzo (prosečna brzina podizanja rama 0,045 m/s i visina 27 m), ali je velika standardna devijacija merenih brzina. Obe metode su proverene i postignuti rezultati su dati u nastavku.

III SOFTWARE ZA AKVIZICIJU I OBRADU PODATAKA

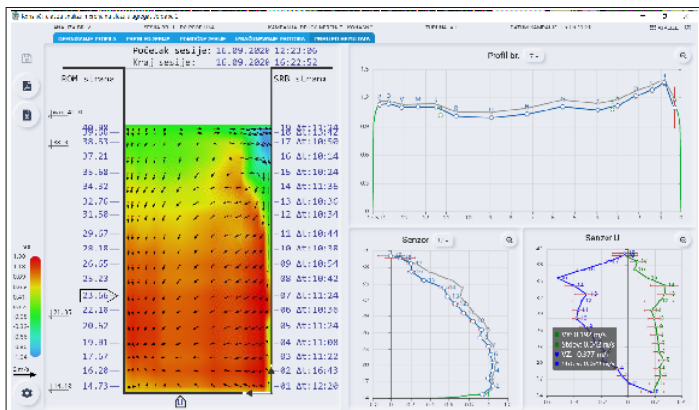
Softveri za akviziciju i obradu su pravljeni za Windows PC računare i izvršavaju se na jednom prenosnom računaru.



Slika 6. Namenski software za monitoring akvizicije

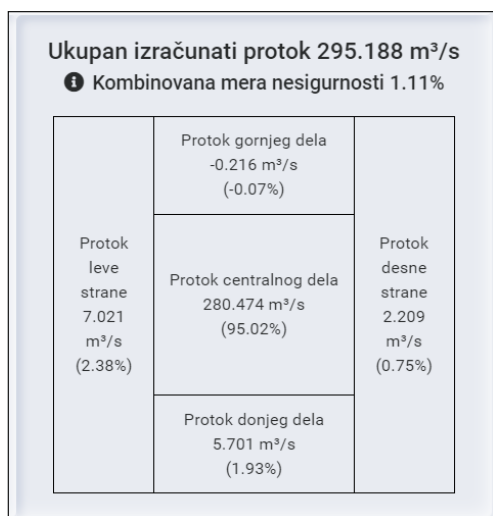
Softver za akviziciju se sastoji od dve komponente: programa „DC234Server“ (DC234 [9]) za upravljanje radom RS485 mreže i komunikaciju sa svim uređajima na toj mreži i programa „RealTimeHydroVisual“ (RTHV [11]) za praćenje, upravljanje, vizuelizaciju i prikupljanje podataka tokom merenja. DC234 je opšti komunikacioni program sa sofisticiranim upravljačkim interfejsom i nije predviđen za neiskusne korisnike. On se izvršava u pozadini i direktno komunicira sa glavnim upravljačkim programom RTHV, sa grafičkim interfejsom i funkcijama prilagođenim konkretnom poslu snimanja rasporeda brzina na ulazu u turbinu. Korisnik započinje novi posao (kampanju, merenje na određenoj turbini) i u okviru njega obavlja više različitih profilisanja (sesija, rad pri različitim uslovima). U svakoj sesiji može da odabere da li je u pitanju

kontinualno profilisanje ili inkrementalno, sa zastajkivanjem, kao i da unese druge bitne parametre. Tokom merenja, grafički se prikazuju svi očitani podaci (slika 6), stanje merne opreme, standardne devijacije brzina, crta se realni položaj rama i slično. Ukoliko zbog korišćenja Windows okruženja dođe do povremenog „zastoja“ u komunikaciji i „preskakanja“ nekog merenja, oni će biti naknadno učitani direktno iz logera.



Slika 7. Software za obradu merenih rezultata i proračun protoka (prikazan ekran provere profila brzina po visini i širini)

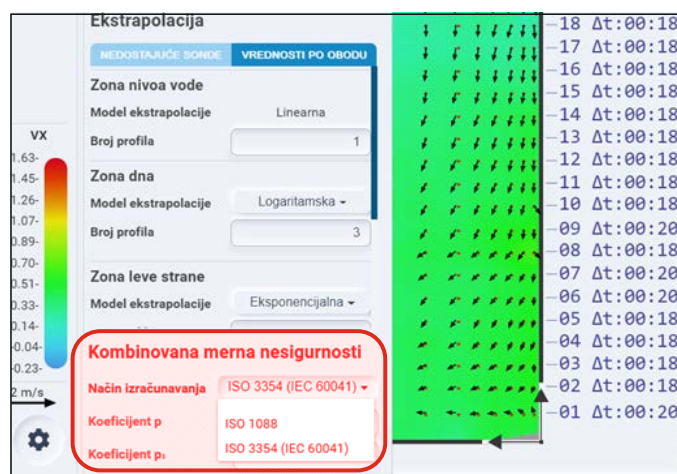
Softver za obradu podataka „AnalysisHydroVisual“ (AHV [11]) se pokreće u off-line-u. Softver AHV omogućava preuzimanje podataka očitanih na ADV sondama, sa SCADA-e turbine kao i direktno preuzimanje merenih podataka iz logera EM sonde ako je tokom merenja dolazilo do prekida u podacima. Obrada podataka podrazumeva detaljan pregled podataka sa SCADA-e i izbor referentnog perioda, normalizaciju svih merenih podataka, interpolaciju merenja u prostoru između EM sonde i ekstrapolaciju prema zidovima i površini vode, pregled svih komponenti brzina (slika 7) i upoređivanje EM i ADV podataka, korekcije merenih podužnih komponenti u zonama gde je došlo do blokade senzora i na kraju, proračun protoka (slika 8) sa svim informacijama o komponentama izračunatog protoka u centralnoj mernoj zoni (oko 95 % površine) i u ekstrapolovanim zonama kao i komponentama merne nesigurnosti.



Slika 8. Izračunat protok za obrađen profil brzina

IV ANALIZA NEODREĐENOSTI MERENJA

Sprovedena je detaljna analiza merne nesigurnosti svake od komponenti mernog sistema. Osnovne smernice za definisanje procedure za određivanje merne nesigurnosti su preuzete iz ISO standarda. Kao što je već navedeno, problematika merenja protoka ispred ulaza u turbinu ne spada u standardnu proceduru, a kao poseban kuriozitet je što merenja mogu da se posmatraju kao klasična merenja u rekama i kanalima (otvoreni tokovi) mada zbog specifičnosti vodozahvata mogu spadati i u sisteme pod pritiskom (tečenje u tunelima) jer se sav protok zahvata na velikoj dubini. Zbog toga su razvijene dve metodologije proračuna merne nesigurnosti, jedna se zasniva na postavkama standarda ISO 748 [12] i ISO 1088 [13] (standardi za merenje protoka u rekama pomoću hidrometrijskih krila), a druga metodologija je razvijena na osnovu ISO 3354 [14] (odnosno, IEC 60041 [3]) koji se koristi kod tokova pod pritiskom.



Slika 9. Izbor metodologije za proračun merne nesigurnosti

U osnovi obe metodologije je da ukupnu mernu nesigurnost izmerenog protoka čine tri komponente: sistematska nesigurnost, statistička nesigurnost i novo dodata nesigurnost izmerenog protoka usled varijabilnosti uslova na agregatu tokom merenja. Sistematsku nesigurnost definišu odstupanja determinističkog karaktera koja se mogu javiti u proceni protoka kao i osnovnih veličina preko koje se određuje protok, dubina, širina proticajnog preseka i brzina. Statističku nesigurnost definišu uticaji na merni rezultat koji su stohastičkog karaktera, koji se javljaju kao posledice promene mernih uslova kao i nesavršenosti merne opreme. Ovdje su se našle nesigurnosti usled konačnog broja mernih tačaka po vertikalima i horizontalima, nesigurnosti samih merila, nesigurnosti usled veličine napadnog ugla kao i usled turbulentnih pulzacija u toku. Konačno, budući da merenja, tokom jedne merne sesije, mogu trajati i po nekoliko sati, tokom kojih je teško održati protok konstantnim, uvedena je nesigurnost usled varijabilnosti uslova tokom trajanja merne sesije. U izradi metodologija korišćene su preporuke date u GUM [15]. Svi detalji su dati u izveštajima [5, 16] kao i u radu [17]. Na slici 9 je prikazan izbor metodologije za proračun merne nesigurnosti, koji korisnik ima u programu za obradu podataka: metodologija koja se oslanja na ISO 748 i ISO 1088 koji se standardno koriste za merenja u otvorenim tokovima pomoću hidrometrijskih krila, ili

metodologija koja je razvijena na osnovu ISO 3354 [15] (odnosno, IEC 60041) koji se koristi kod tokova pod pritiskom.

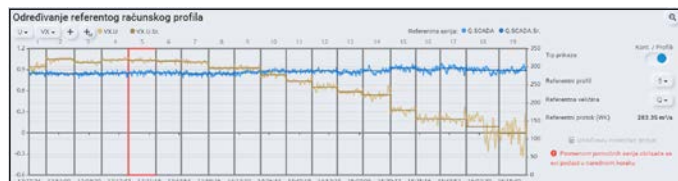
V REZULTATI MERENJA I DISKUSIJA

Merenja na ulazima u turbine je organizaciono i vremenski zahtevan posao, koji traži značajno angažovanje i Korisnika. Rad turbine na kojoj se meri treba da bude ustaljen u dužem vremenskom periodu. Ali, isto se odnosi i na rad dve susedne turbine jer one značajno utiču na strujnu sliku dostrujavanja pa samim time i na radni režim turbine na kojoj se meri. Što sve zahteva pomno praćenje hidrološke situacije (rast, stagnacija ili opadanje protoka Dunavom) i dobru koordinaciju sa glavnim EPS dispečerima.

Potrebno vreme osrednjavanja U inkrementalnom režimu profilisanja koji obezbeđuje veću tačnost, korisnik sam odlučuje koliko će dugo ram mirovati na određenoj koti. Softver RTHV pomaže korisniku time što u realnom vremenu prikazuje, pored trenutnih vrednosti svih komponenti brzina i njihove standardne devijacije. Kada se ram pozicionira na određeni profil, standardne devijacije postepeno opadaju kako raste vreme osrednjavanja.

Da bi se proverila kolika je neustaljenost strujanja prilikom konstantnog rada turbine, urađen je duži snimak rasporeda brzina u jednoj ravni (oko ose turbine), bez pomeranja rama i bez osrednjavanja. Na tako dobijenim rezultatima snimanja brzina u „stacionarnim“ uslovima vidi se da, pored „bržih“ oscilacija brzina („šum“ usled relativno brzih vrtloga vode), postoji i sporija komponenta varijacije od nekih 3 minuta. U razgovoru sa drugim istraživačima potvrđeno je da su uočene te spore varijacije protoka, koje najverovatnije potiču od automatike turbine. Naime, turbina je podešena za rad sa konstantnom snagom i povremeno se sprovodni aparat turbine podešava prema ostalim uslovima. Na osnovu učinjenih provera kao i na osnovu iskustva sa obavljenih merenja, zaključeno je da je optimalno vreme osrednjavanja na jednom profilu 10 minuta.

Neustaljenost rada tokom profilisanja Inkrementalno profilisanje znači da će jedna merna sesija trajati par sati. U tom periodu će turbina automatski održavati snagu, ali će, ukoliko se promene radni uslovi usled rada okolnih agregata ili dotoka Dunavom, dolaziti do varijacija u protoku. Prema usvojenoj metodologiji, te varijacije će biti kompenzovane prema jednom, izabranom referentnom protoku.



Slika 10. Neustaljenost protoka tokom snimanja profila brzina (plava linija) i odabir referentnog protoka

Na slici 10 je prikazan redovan režim merenja gde nije bilo velikih varijacija u dotoku na turbinu (mereno sa WK davačem, plava linija, protok u m^3/s prikazan na desnoj osi dijagrama). U prvoj polovini merenja je dotok bio oko $280 \text{ m}^3/\text{s}$ da bi se u drugom delu merenja popeo na $290 \text{ m}^3/\text{s}$. Na istom dijagramu je

oker bojom nacrtana i podužna komponenta brzine za EM sondu na vertikali U (vertikala je označena na slici 7), trenutne vrednosti i osrednjene po profilu. Kako merenja kreću od dna profila pa idu na gore, vidi se da brzine postižu maksimum na mestu gde se nalazi turbina (profili 2-7) da bi u zoni u blizini površine vode došlo i do negativnih brzina usled velikih vrtloga.

Korisnik je u obradi rezultata odabrao profil 5 kao referentni (označen crvenim pravougaonikom na slici 10) sa protokom od $283,35 \text{ m}^3/\text{s}$ u odnosu na koji se sve merene brzine normalizuju. To podrazumeva da se za sve ostale profile računa koeficijent neustaljenosti kao odnos referentnog i protoka na WK za taj profil, a onda se merenja brzina na EM sondama u svakom od profila dele sa tako dobijenim koeficijentima, prema [3] i [15]. Ovakvo „linearno“ normalizovanje je primenljivo samo za relativno male promene tokom rada. Moguće je da tokom profilisanja dođe do značajne promene režima rada turbine najčešće zbog potreba dispečera koji promeni režim rada turbine. S obzirom da se koristi WK merač koji je u osnovi nelinearan i, verovatno pogrešno podešen, ovakve veće promene nije moguće kompenzovati i potrebno je odbaciti takva merenja.

Primer regularnog merenja Primenom inkrementalnog profilisanja, sa osrednjavanjem od 10-tak minuta po profilu i sa 18 do 19 snimljenih profila po visini, obavljena su merenja protoka na agregatu A7 (27. i 28.08.2020.) pri tri protoka, Q_{max} , Q_{sr} i Q_{min} . Tokom snimanja, susedne turbine A6 i A8 su radile sa istim snagama kao i turbina A7, obezbeđujući što simetričniju strujnu sliku na dotoku. U tabeli 1 su dati postignuti rezultati proračuna protoka preko integracije merenog rasporeda brzina i protoka očitano na SCADA-i merenog na WK-u. U poslednjoj koloni je data relativna greška WK merača.

Na slici 11 je dat prikaz rasporeda brzina na ulazu u agregat A7, za slučaj maksimalnog protoka. Podužna komponenta brzine U_x je predstavljena bojama, sa skalom koja je data uz levu ivicu slike. Komponente U_y (poprečna komponenta) i U_z (vertikalna komponenta) su prikazane kao vektori na mestima gde su se fizički nalazile EM sonde tokom merenja (data je skala za dužinu vektora od 1 m/s). Isprekidanom linijom je prikazan i položaj ulaza u cevnu turbinu, odnosno, realni nizvodni proticajni profil.

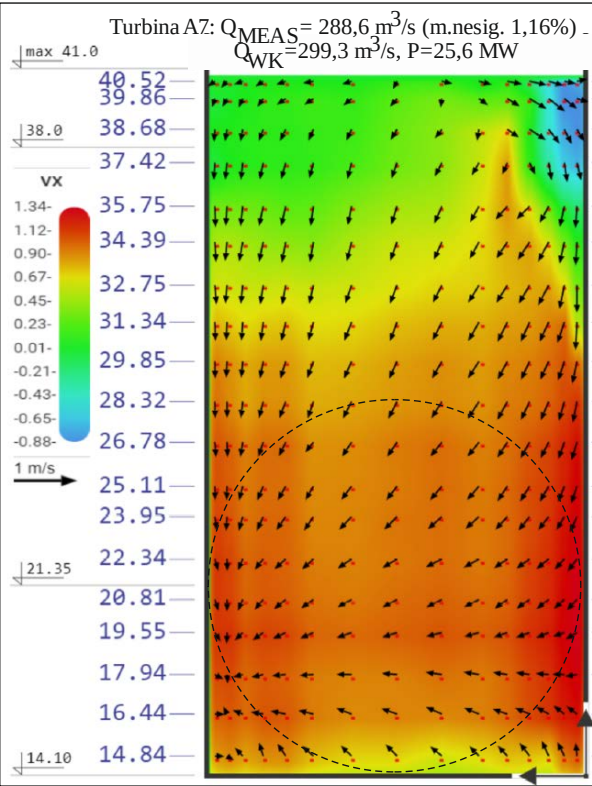
Na prikazanom profilu brzina se jasno uočava postojanje značajne poprečne komponente brzine od desnog ka levom zidu u zoni glavnog proticajnog profila. Takođe, u gornjoj zoni se vidi postojanje vrtloga, koji prouzrokuje i negativne podužne brzine kao i poprečnu brzinu vode ka desnom zidu. Očekivano, u gornjoj zoni su vertikalne brzine usmerene na dole.

Prikazan raspored brzina na A7 je jedan od „boljih“ rezultata. Raspored brzina, uglavnom poprečne komponente U_y dosta zavisi od položaja turbine na brani, pa agregati bliže sredini brane, A1, A2... imaju značajnije poprečne komponente od udaljenijih A7 i A8. To je i bilo pokazano na modelskim ispitivanjima [1], gde je bilo jasno da agregati bliže Rumunskoj strani kao i Rumunski agregati rade u boljim uslovima, a to je sada potvrđeno i ovim merenjima.

Interesantni su i rezultati ispitivanja uticaja rada susednih agregata na strujno polje radnog agregata. Merenja su pokazala da je taj uticaj značajan, te da je bolje da više agregata radi sa sličnom snagom nego da jedan radi a drugi da ne radi.

Tabela 1. Rezultati merenja rasporeda brzina i obračuna protoka na turbini A7

Datum	EM sonde		SCADA		Merna nesigurnost				Relativna greška WK (Qwk-Q)/Q * 100
	Vreme profilisanja (od-do)	Obračunat protok Q	Referentni profil i vreme (od-do)	Protok Qwk	Sistematska nesigurnost	Nesigurnost usled varijabilnosti protoka	Slučajna (statistička) nesigurnost	Kombinovana nesigurnost	
	hh:mm	m ³ /s	-	m ³ /s	%	%	%	%	%
27.08.2020.	09:43–13:23	288,6	Prof. 7 10:54-11:05	299,3	0,13	0,71	0,91	1,16	3,7
28.08.2020.	11:37–15:11	202,5	Prof. 7 12:46-12:57	220,8	0,13	0,35	0,95	1,02	9,0
27.08.2020.	14:50-19:34	108,1	Prof. 6 15:48-15:58	122,4	0,13	0,42	1,47	1,53	13,2

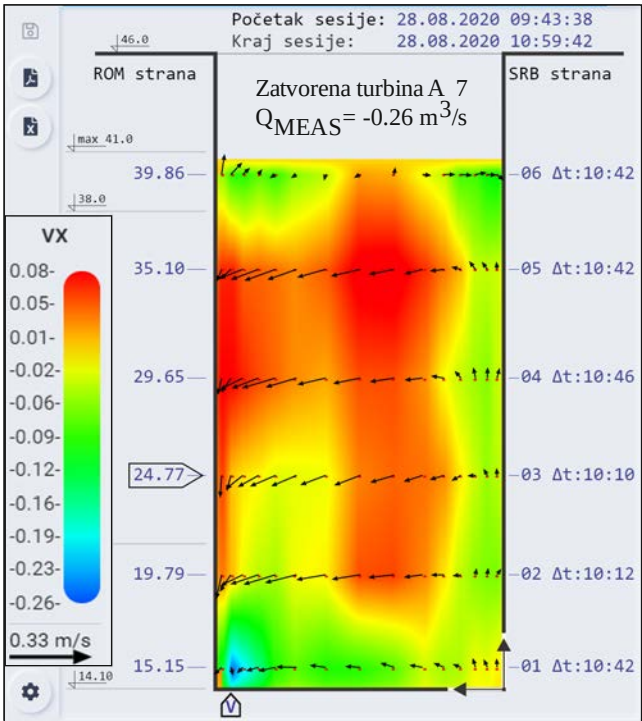


Slika 11. Rezultati snimanja polja brzina na agregatu A7

Inkrementalno ili kontinualno merenje Tokom niza merenja na agregatima (ovde je prikazan samo agregat A7) više puta je poređeno inkrementalno i kontinualno merenje. Osnovna prednost kontinualnog merenja je što se ceo proticajni profil snimi za petnaestak minuta, dok je za inkrementalno snimanje potrebno par sati (tokom kojih agregat mora da radi sa stabilnim protokom). Međutim, najmanja brzina podizanja rama koju kran može da postigne je 0,05 m/s (uz veliko grejanje motora), što ne dozvoljava kvalitetno merenje brzine i osrednjavanje, pa su merne nesigurnosti u takvom režimu do 5 %! Zbog toga se u finalnim rezultatima koriste samo rezultati dobijeni inkrementalnim profilisanjem.

Test nultog protoka Dobar test rada merne opreme je snimanje rasporeda brzina na ulazu u turbinu pri nultom protoku. Zbog rada okolnih agregata, postoji jaka vrtložna komponenta ispred

ulaza u turbinu, sa značajnim negativnim podužnom komponentom U_x . Ta komponenta je „zadužena“ i za pomeranje naslaga trave: evidentno je nakon zaustavljanja turbine kako okolne turbine polako „izvlače“ travu iz profila!

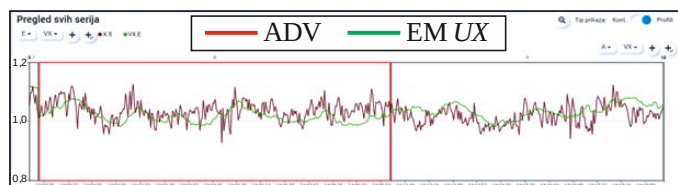


Slika 12. Rezultati snimanja nultog polja brzina na agregatu A7

Na slici 12 je dat rezultat snimanja polja brzina na agregatu A7 pri zatvorenom sprovodnom aparatu turbine. Izmerene brzine su u opsegu od par cm/s dok je obračunati protok $-0,26 \text{ m}^3/\text{s}$. Na žalost, korišćeno je samo 6 mernih profila tako da je jako grubo snimljen raspored brzina, pa je i procenjena kombinovana merna nesigurnost jako velika. I pored toga, na slici se lepo vidi vrtlog koji cirkuliše unutar preseka, praveći pozitivne i negativne brzine. Iz rasporeda brzina i dobijenih rezultata se vidi da sonde dobro mere i brzine daleko ispod $0,05 \text{ m/s}$ u oba smera. Obračunati protok od $-0,26 \text{ m}^3/\text{s}$ najverovatnije nije pokazatelj da voda zaista „ističe“ iz agregata i ide nazad prema Dunavu, već je to greška merenja, koja je ispod $0,1\%$ punog opsega merne opreme od $300 \text{ m}^3/\text{s}$!

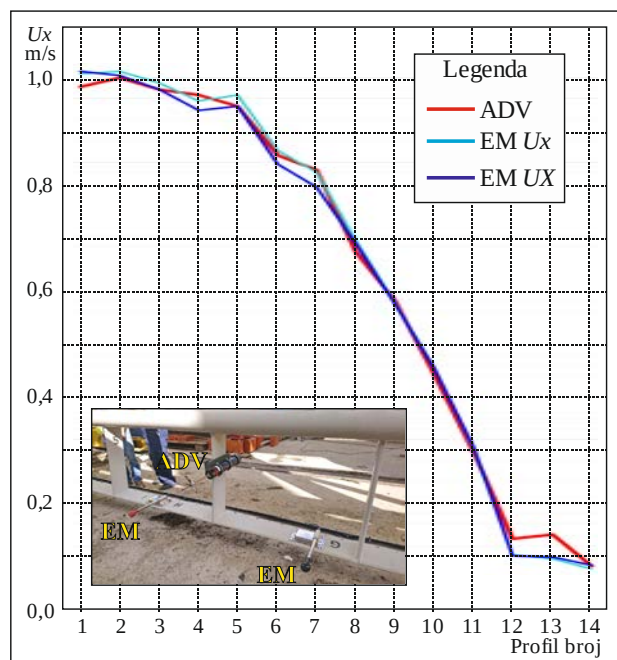
Poređenje ADV i EM sonde Osnovu mernog sistema čini 15 komada EM sonde. Sonde su posebno dizajnirane i napravljene [9] za posao merenja na HE „Đerdap 2“, tako da je postojala opravdana sumnja u kvalitet opreme i dobijene rezultate merenja. Da bi se potvrdilo funkcionisanje EM sonde predviđena je bila i montaža dve ADV sonde, od renomiranog proizvođača [10].

Tokom pripreme merne opreme i kalibracije sonde na mernom kanalu u Institutu „Jaroslav Černi“, vršen je niz provera i uporednih merenja. Sva ispitivanja na kanalu su bila rađena sa nosačem koji je geometrijski istovetan sa mernim ramom, da bi se otklonio uticaj geometrije rama na strujnu sliku vode. Kao potvrda dobrog rada EM sonde, urađena su i poređenja pokazivanja sonde u realnim radnim uslovima.



Slika 13. Fluktuacije brzina na ADV i EM sondi (bez prostorne korekcije)

Na slici 13 je dato direktno poređenje sirovih brzina sa jedne EM sonde i najbliže ADV sonde. ADV sonda meri „brže“ i vidi sitnije vrtloge. Sa dijagrama se vidi da su razlike u trenutnim brzinama reda veličine par cm/s, što je za merni opseg EM sonde oko 1 %. Zbog načina montaže, te dve sonde ne mere brzine u istoj tački, već u dve razmaknute tačke i po visini i po širini, tako da nije ni moguće očekivati bolje slaganje izmerenih brzina.



Slika 14. Rezultati poređenja osrednjenih i korigovanih brzina na ADV i EM sondama

Kada se obavi detaljnija analiza merenih rezultata, uz korekcije očitavanja (prostornu interpolaciju) usled različitih lokacija sonde, dobijen je rezultat prikazan na slici 14. Poređene su obe

komponente podužne brzine koju snima EM interpolovane na lokaciju ADV sonde.

VIII ZAKLJUČAK

Zbog dispozicije elektrane HE „Đerdap 2“ i hidrauličkih uslova, postojeći posredni sistemi za određivanje protoka pomoću Winter-Kennedy metode i preko karakteristika turbine, koji su inicijalno podešeni u odnosu na sprovedena modelska ispitivanja, nisu bili do sada proveravani direktnim merenjima protoka. Razlog za to je što postojeći standardi ne definišu pravila za merenja u uslovima kada postoji izrazita neravnomernost komponente brzine. S obzirom na to da je u planu skora revitalizacija cevnih agregata uz podizanje hidrauličke efikasnosti, bilo je neophodno kvantifikovati postojeće karakteristike turbina, a pre svega omogućiti pouzdano određivanje protoka u realnim radnim uslovima.

U radu je prikazana razvijena metodologija koja omogućava merenje protoka na bilo kom agregatu HE „Đerdap 2“ bez njegovog zaustavljanja i posebnih pripremnih radnji. Prikazana je merna oprema, prateći sistemi i softver za merenja i obradu, koji su uspešno primenjeni na šest turbina HE „Đerdap 2“. Na osnovu dobijenih rezultata, uz dodatno aktivno uključivanje i kolega koji bi obavili indeksna ispitivanja uz prethodno sređivanje i tariranje merne opreme u elektrani, moguće je izvršiti kvalitetnije podešavanje ugrađenih Winter-Kennedy merača protoka.

Pored podatka o protoku, tokom obavljenih merenja na dva agregata se pokazalo da je jako koristan i podatak o izmerenim nivoima ispred rešetke. Sa stanovišta sistema koji upravlja radom agregatom, to je redundantan podatak ali se pokazalo da je zgodan za proveru merenja nivoa i padova na turbinama koje koristi postojeća SCADA.

Tokom primene razvijene metodologije snimanja profila brzina, uočeni su i problemi vezani za plivajuću travu: turbine tokom rada privlače dosta plutajuće trave koja „dolazi“ plutajući u paketima. Pokazalo se da trava ne smeta tokom merenja pod vodom („ne kači“ se na EM ni ADV sonde) a najugroženije su sonde u gornjim profilima, kada ram svojim dizanjem „pokupi“ travu i iznese je iz profila. Da bi se smanjio uticaja trave potrebno je grajferom pre merenja obaviti detaljno čišćenje rešetke. Redovna procedura podrazumeva samo skidanje i odnošenje krupnijih balvana i grana, dok se trava rastrese i vrati ponovo u vodu! Potrebno je grajferom čišćenje obaviti pri maloj snazi agregata, dok je trava „zalepljena“ za rešetke i tu travu izneti iz profila. Takođe, uočeno je da rad susednih agregata utiče na kretanje trave u dovodu na agregat gde se meri: ako susedni agregati promene režim rada, „njihova“ trava će preći u profil koji se meri (ako se smanji protok na susednim agregatima) ili će povući travu iz merenog agregata (ako se poveća protok).

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Rad je rezultat posla koji je Institut „Jaroslav Černi“ zaključio sa investitorom JP „Elektroprivreda Srbije“, Ogranak HE Đerdap, 2019. i 2022. godine, a u okviru kojeg je Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu imao priliku da razvije prikazanu metodologiju i koncipira softvere za akviziciju i obradu podataka. U ovom radu se prikazuje samo metodologija merenja, dok se za sve konkretne podatke i rezultate merenja čitao

upućuju na investitora. Autori rada se posebno zahvaljuju kolegama sa HE „Đerdap 2“ koji su aktivno učestvovali u pripremi merenja, obuci i organizaciji merenja tokom 2020. i 2023. godine.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“. Hidraulički model HE „Đerdap 2“ – Izveštaj ispitivanja na hidrauličkom modelu uslova dostrujavanja na turbine, Beograd, 2006.
- [2] Prodanović D., Pavlović D., Branislavljević N. Merenje protoka na kratkim objektima u hidraulički neregularnim uslovima na primeru HE „Đerdap 2“, Vodoprivreda, Vol. 43, No. 252-254, pp. 103-115, 2011.
- [3] IEC 60041. International standard: field acceptance tests to determine the hydraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines. European Equivalent: EN 60041, 1999.
- [4] Performance Test Code. Code 18: Hydraulic Turbines and Pump-Turbines, American Society of Mechanical Engineers, New York, USA, 2002.
- [5] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Svet Instrumenata. Izveštaj o sistemu za merenje protoka na prilazima HE „Đerdap 2“, Beograd, 2020.
- [6] Ivetić D., Prodanović D., Vojt., P. Novel discharge measurement system at the turbine intakes of Iron Gate 2 hydropower plant: a system description, 8th International Conference Contemporary Achievements in Civil Engineering, Subotica, Srbija, April, 2021.
- [7] Prodanović D., Ivetić D., Milivojević N., Vojt P., Cvitkovic M. Sistem za merenje protoka na ulazima u cevne turbine na bazi elektromagnetnih senzora brzine. Tehničko rešenje priznato od strane Ministratsva nauke, 2022. <https://grafar.grf.bg.ac.rs/handle/123456789/3319> [pristupljeno 07.03.2024]
- [8] Ivetić D., Prodanović D., Milivojević N., Vojt., P. Uncertainty assessment of flow measurements at Iron Gate 2. 13th International conference on hydraulic efficiency measurement IGHEM, Grenoble, 2022.
- [9] Svet Instrumenata, <http://www.si.co.rs/> [pristupljeno 07.03.2024]
- [10] NORTEK, <https://www.nortekgroup.com/products/vector-300-m> [pristupljeno 07.03.2024]
- [11] Vodena, <https://vodena.rs/> [pristupljeno 07.03.2024]
- [12] ISO 748, Velocity area methods, International Standards Organization, Geneva, 2007.
- [13] ISO 1088, Collection of data for determination of errors in measurement by velocity area methods, International Standards Organization, Geneva, 2007.
- [14] ISO 3354, Measurement of clean water flow in closed conduits, Velocity-area method using current-meters in full conduits and under regular flow conditions, International Standards Organization, Geneva, 2008
- [15] Joint committee for Guides in Metrology, Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM), International Organization for Standardization, 2008.
- [16] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Svet Instrumenata. Merenje protoka na agregatima HE „Đerdap 2“, Izveštaj, Beograd, 2023.
- [17] Ivetić D., Prodanović D., Vojt P. Određivanje protoka na prilazima cevni turbina uz pomoć EM senzora brzine: Određivanje nesigurnosti izmerenog protoka. SDHi i SDH, Beograd, 2021.

AUTORI/AUTHORS

Dušan Prodanović – prof. dr, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, dprodanovic@grf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-0156-7271](https://orcid.org/0000-0003-0156-7271)
Damjan Ivetić – doc. dr, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, divetic@grf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-7475-6108](https://orcid.org/0000-0001-7475-6108)
Predrag Vojt – samostalni istraživač, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ a.d., Beograd, predrag.vojt@jcerni.rs, ORCID [0009-0003-9975-3896](https://orcid.org/0009-0003-9975-3896)
Milan Ćusić – vodeći istraživač, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“ a.d., Beograd, milan.cusic@jcerni.rs, ORCID [0009-0008-6582-5421](https://orcid.org/0009-0008-6582-5421)

Preparing for Revitalization of the Turbines of the Đerdap 2 HPP: Measurement of Velocity Distribution at Turbine Inlets

Abstract – The continuous flow measurement on hydroelectric turbine units is conventionally carried out using the relative methods (mostly Winter-Kennedy), where the complex velocity field in flow cross section is replaced by a single measured quantity. On a physical model, mapping parameters are determined. The Winter-Kennedy method is most used, where this relative (index) flow quantity is obtained by measuring differential pressure. The measurement uncertainty of the determined flow using this method is usually significantly higher than the uncertainty of other relevant quantities for determining the optimal turbine operating conditions. To reduce the flow uncertainty, it is necessary to perform "absolute measurements" of the entire velocity field and determine the necessary corrections to the index method under real operating conditions. This is especially true for plants where disposition is different from one used on physical model, which is the case of “Đerdap 2” and recognized problem of skewed inflow. With the aim of better assessing the hydraulic efficiency of turbines and to collect data on the actual operating velocity distribution in the inlet section in front of trash-rack needed for planned revitalization works, an innovative system for absolute flow measurement has been designed and implemented. The moving frame was designed and installed at the turbine inlet, upstream from the trash-rack. The 15 electromagnetic (EM) sensors and two redundant acoustic Doppler sensors were installed on horizontal bar. Each sensor measures all three velocity components. The frame moves by lifting along the entire height of the flow section, allowing the entire velocity field to be scanned. The position of the frame is tracked by two encoders, while two pressure sensors are used to measure the water depth. Measurements are synchronized with the local SCADA system, so appropriate turbine operation data are also used. Considering the specificities of the measurement system itself with newly developed EM sensors, as well as hydraulic conditions, an adequate procedure has been developed to assess the uncertainty of the measured flow. This paper presents the measurement method and provides some measurement results on the units of the “Đerdap 2” hydroelectric power plant.

Index Terms – Velocity measurement, Measuring uncertainty, Electromagnetic sensors, Hydro power units, Bulb turbines

Uticaj solarnih panela i skladišta električne energije na gubitke u niskonaponskoj mreži

Siniša Spremić, Aleksandar Antonić

Elektrodistribucija Srbije – Tehnički centar Novi Sad

Rezime - Najveći deo tehničkih gubitaka električne energije u distribuciji električne energije su tehnički gubici u niskonaponskim vodovima. Tehnički gubici električne energije su gubici koji nastaju u distribuciji električne energije od transformatora do potrošača u elektrodistributivnoj opremi. Komercijalni gubici obuhvataju neovlašćeno korišćenje električne energije i gubitke zbog grešaka merne opreme. Glavni izvor tehničkih gubitaka električne energije nastaje protokom električne struje kroz provodnike. Solarni paneli ugrađeni kod potrošača mogu uticati na smanjenje gubitaka smanjenjem protoka električne struje, tj. električne energije kroz niskonaponske vodove. Uvođenjem skladišta električne energije (u daljem tekstu: baterija) može se ostvariti dodatni uticaj na smanjenje gubitaka električne energije korišćenjem uskladištene električne energije u baterijama u vreme vršnih opterećenja. U radu je dat prikaz pretpostavljenog dnevnog dijagrama simetričnog opterećenja niskonaponskog voda sa proračunom gubitaka po satima bez uticaja solarnih panela te sa uticajem solarnih panela bez skladištenja električne energije i sa skladištenjem električne energije. Uticaji solarnih panela bez i sa skladištenjem električne energije su takođe prikazani dnevnim dijagramom, kao i vrednosti napona na kraju niskonaponskog voda. U proračunu se za niskonaponski vod koristi ekvivalentni vod sa pola dužine i punim satnim opterećenjem.

Ključne reči - solarni panel, skladištenje električne energije, niskonaponski, nadzemni vod, opterećenje, tehnički gubici

I UVOD

U svetu se već duže vreme koriste u većoj meri solarni paneli za proizvodnju električne energije i u manjoj meri termalni kolektori za zagrevanje za sopstvene potrebe i/ili za isporuku u elektrodistributivnu ili prenosnu mrežu. Zbog upotrebe invertora i uticaja na kvalitet električne energije obavljene su analize uticaja na kvalitet električne energije u elektrodistributivnoj mreži [1, 2] na više mesta u Srbiji. Prema proračunima priključenje solarnih elektrana na elektrodistributivnu mrežu ima povoljan uticaj na smanjenje gubitaka u prenosnoj mreži [3]. Ukoliko snaga solarnih panela u domaćinstvima i kod malih poslovnih potrošača ne prelazi minimalnu snagu niskonaponskog (u daljem tekstu: NN) voda može se očekivati da će se gubici u NN mreži smanjiti. Povećanje gubitaka se može očekivati samo kad solarni paneli imaju veću proizvodnju snage od snage potrošnje na delu NN mreže. Domaćinstva i mali poslovni potrošači na NN distributivnoj mreži će zbog niže cene uglavnom koristiti sisteme na mreži (*on grid*). Sistemi na mreži rade paralelno sa mrežom i zavisni su od električne mreže.

Ovakve solarne elektrane čine 90 % tržišta kod privatnih, ali i poslovnih objekata [4].

U radu je dat pretpostavljeni dnevni dijagram simetričnog opterećenja pretpostavljenog prosečnog NN izvoda. Dati su pretpostavljeni dnevni dijagrami proizvodnje solarnih panela priključenih na NN izvod, dela koji se skladišti u baterijama i dela koji se koristi prilikom proizvodnje električne energije. Ovime se prave greške u odnosu na stvarno stanje. Sve prethodno navedene pretpostavke odudaraju od stvarnih parametara pojedinih NN izvoda, dijagrami opterećenja NN izvoda su različiti, postoji nesimetrija opterećenja, proizvodnja električne snage solarnih elektrana je zavisna od godišnjeg doba i o osunčanosti, tj. o vremenskim prilikama (oblačnost i magla) i atmosferskom stanju (zagađenost vazduha prašinom i dimom). Bez obzira na zanemarenja može da se sagleda mogućnost i proceni uticaj na smanjenje gubitaka električne snage i električne energije bez i sa prisustvom solarnih panela na NN izvodima sa i bez baterija.

Takođe treba da se detaljno sagledaju i vrednuju uticaji solarnih panela na smanjenje gubitaka električne energije na višim nivoima napajanja: transformatorima x/0.4 kV, 35/x kV i 110/x i srednjenaponskim vodovima.

II PRETPOSTAVKE, ZANEMARENJA I OPIS MODELA PRORAČUNA

Pretpostavke za izradu modela proračuna su sledeće:

- napon na početku voda (0,4 kV sabirnice transformatorske stanice (u daljem tekstu: TS)) je simetričan i po fazi i po veličini,
- razmatraju se samo ustaljeni režimi bez kvarova.
- struja potrošača se zadaje sa faktorom snage, tj. faznim uglom struje potrošača u odnosu na početni napon na 0,4 kV sabirnicama TS x/0,4 kV. Time je stvarni fazni ugao između napona i struje potrošača različit od zadatog i u proračunu se izračunava i prikazuje,
- neutralni provodnik je iste vrste provodnika i preseka kao fazni provodnici (što je stvarno stanje na najvećem delu mreže) i za gubitke je bitno u slučaju nesimetričnog opterećenja
- podaci o radnom otporu i induktivnom otporu provodnika su korišćeni iz fortranskih paketa računarskih programa za izračunavanje gubitaka u elementima mreže, J.P. Elektrovojvodina, 1992.

Zanemarenja koja su korišćena za pojednostavljenje modela proračuna:

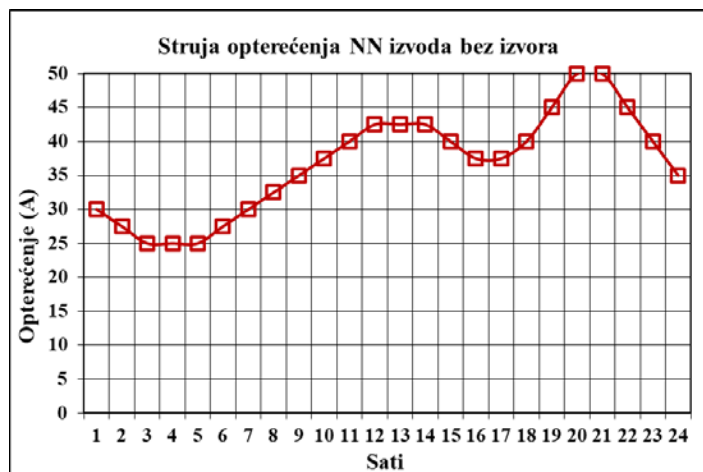
- zanemaruju se kapacitivnosti vodova zbog malog uticaja na rezultat proračuna,

- zanemaruje se uticaj višestrukog uzemljenja neutralnog provodnika zbog malog uticaja na struju kroz neutralni provodnik u ustaljenom režimu bez kvara [5],
- ne razmatra se povećanje gubitaka usled povećanja temperature provodnika,
- kod nadzemnih vodova se zanemaruje uticaj na nesimetriju od faznog provodnika (posebno izvedenog) za javno osvetljenje koji je obično manjeg preseka od provodnika voda, a javno osvetljenje koristi nulti provodnik NN izvoda.

Model proračuna je prikazan u [6], s tim da se koristi jedna deonica, tj. ekvivalentni vod sa pola dužine i punim satnim opterećenjem potrošača i punom satnom snagom proizvodnje solarnih panela za dnevni dijagram (24 sata).

III PODACI I REZULTATI PRORAČUNA

Pretpostavka je da će se najveći broj solarnih panela napraviti u domaćinstvima tipa porodična kuća u gradu ili porodična kuća sa pomoćnim objektima na selu. Ova domaćinstva su češće priključena na NN nadzemnu mrežu izvedenu golim provodnicima ili ređe samonosivim kablovskim snopom. U najmanjem delu su priključena na NN kablovsku (podzemnu) mrežu. U proračun su ubačeni podaci o NN nadzemnom vodu sa presekom aluminijumskog provodnika od 50 mm^2 i za fazne i za neutralni provodnik što je još uvek najčešća vrsta NN nadzemnog voda. Pretpostavljeni NN izvod je dužine 400 m (10 deonica po 40 m), a u proračun ulazi 200 m. Procenjeno je da je prosečna potrošnja električne energije pojedinačnog potrošača iz kategorije domaćinstvo (uvećano za uticaj potrošača iz kategorije ostala potrošnja) oko 500 kWh mesečno odnosno 6000 kWh godišnje. Maksimalna snaga svih potrošača je 34,6 kVA sa pretpostavljenim faktorom snage potrošača je 0,95. Maksimalna snaga solarnih panela je 20,8 kW.

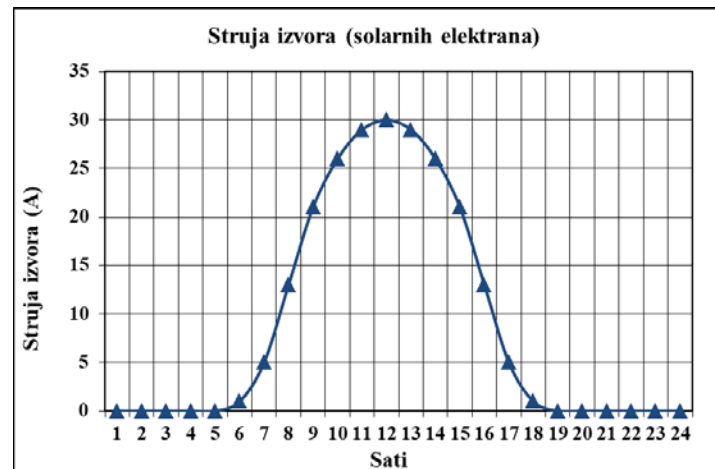


Slika 1. Dijagram struje NN izvoda bez izvora

Na slici 1 je prikazan pretpostavljeni prosečan dijagram simetričnog opterećenja NN izvoda bez izvora, tj. solarnih panela isto kao u [7]. Maksimalna struja opterećenja je 50 A u večernjim satima, a minimalna 25 A u posleponoćnim satima.

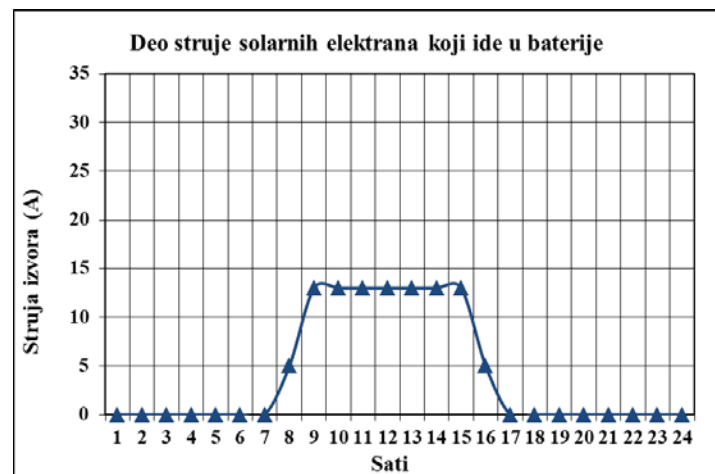
Na slici 2 je prikazan pretpostavljen dijagram simetričnih struja izvora (solarnih panela) sa faktorom snage jednakim 1. Vidi se

da proizvodnja solarnih panela postoji 13 sati. Isti dijagram je korišćen u [7].



Slika 2. Dijagram struje izvora (solarnih panela)

Na slici 3 je prikazan dijagram struje koju solarni paneli skladište u baterije i čini deo struje prikazane na slici 2. Satne struje su proizvoljno odabrane za uravnoteženije opterećenje NN izvoda.



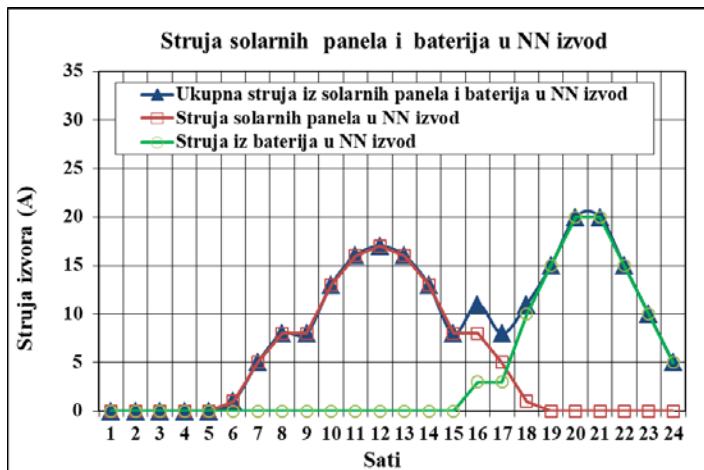
Slika 3. Dijagram struje koja se iz solarnih panela skladišti u baterijama

Struja solarnih panela koja ide u baterije je u većem delu dijagrama konstantna.

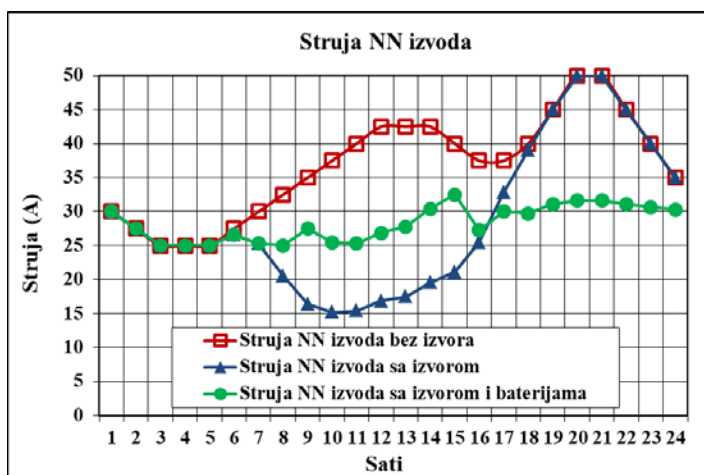
Na slici 4 je prikazan dijagram sa strujama koje daju u NN izvod solarni paneli i baterije i njihova zajednička struja. Jedan deo struje (snage) solarnih panela se koristi prilikom proizvodnje električne energije i taj deo je uglavnom promenljiv. Deo koji je uskladišten u baterijama se koristi u večernjim satima za pokrivanje vršnog opterećenja, a time za uravnoteženje opterećenja NN izvoda.

Na slici 5 je prikazan dijagram sa strujama na NN izvodu. Tu se nalaze struja NN izvoda bez izvora, struja NN izvoda sa svom strujom izvora bez baterija i struja NN izvoda sa izvorom i baterijama. Očigledno je da se odabirom struja (snaga) izvora i baterija dobila značajno ujednačenija vrednost struja (snaga) po satima. Moglo je da se uradi da struje po satima budu potpuno

jednake, ali ovako odabrano verovatno više odgovara nekim stvarnim uslovima. Da bi baterije mogle da pokriju struju od 20 A u 20. i 21. satu baterije moraju biti kapaciteta da daju izlaznu snagu od oko 13.9 kW.



Slika 4. Dijagram struja solarnih panela i baterija koju daju u NN izvod

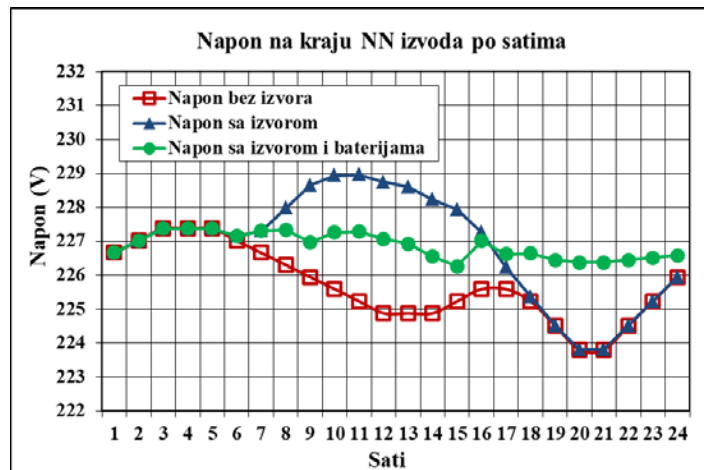


Slika 5. Dijagram struja NN izvoda bez izvora, sa izvorom bez baterija i sa izvorom sa baterijama

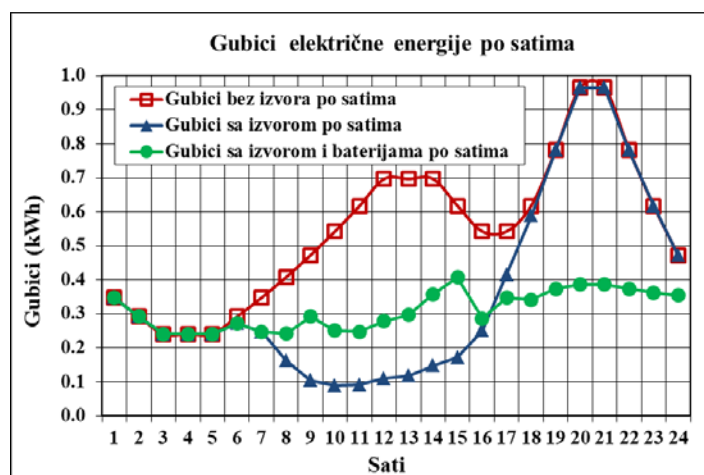
Na slikama 1 i 2 se vidi da je maksimalna struja izvora veća od minimalne struje potrošača. Maksimalna struja izvora i minimalna struja potrošača su u različitim vremenskim razdobljima tako da prema prikazanim dijagramima neće doći do toka struje (snage) sa NN izvoda u srednjenaponsku mrežu preko transformatora $x/0.4$ kV. Na slici 6 je prikazan dijagram vrednosti napona na kraju NN izvoda u toku 24 sata.

U periodu kada izvor daje svu struju (snagu) u NN izvod u trenutku proizvodnje dolazi do osetnog smanjenja pada napona. U vreme kada su najveća opterećenja na NN izvodu i time najniži naponi izvor ne može da utiče na poboljšanje napona. Očigledno je da smanjenje korišćenja električne energije u trenutku proizvodnje solarnih panela i skladištenje dela i kasnije korišćenje tog dela proizvedene električne energije iz baterija smanjuje padove napona u vreme vršnih opterećenja potrošača i doprinosi ujednačavanju vrednosti napona tokom dana.

Na slici 7 je prikazan dijagram satnih gubitaka električne energije na NN izvodu u toku 24 sata. Ovaj dijagram je sličan dijagramu struje sa slike 5 jer su gubici snage i električne energije proporcionalni sa kvadratom struje.



Slika 6. Dijagram napona na kraju NN izvoda bez izvora i sa izvorom sa i bez baterija



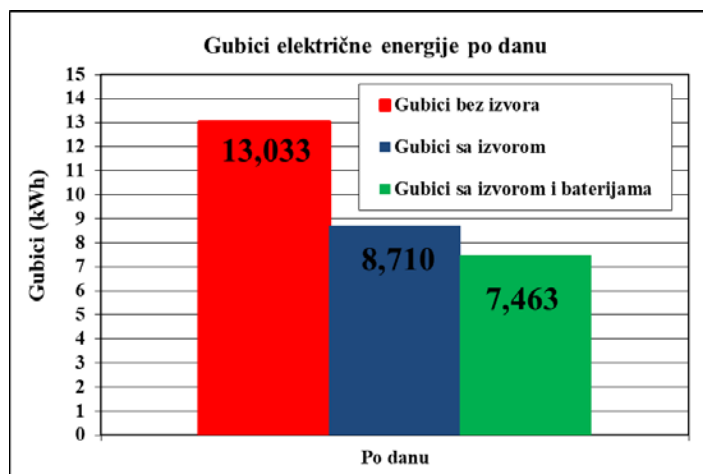
Slika 7. Dijagram gubitaka električne energije NN izvoda

S obzirom da su prethodno prikazani dijagrami za pretpostavljeno usrednjeno opterećenje pretpostavljenog prosečnog NN izvoda kod ovakvog NN izvoda bi bilo mnogo dana sa značajno većim opterećenjem. Time bi i gubici mogli biti značajno veći, a vrednosti napona značajno niže od onih prikazanih na slikama 6 i 7. Moguće je da bude i obrnuto, manja opterećenja, manji gubici i veće vrednosti napona. U stvarnosti postoji mnogo NN izvoda sa značajno većim dužinama i/ili sa značajno većim opterećenjima. Tada su gubici električne energije značajno veći od ovde prikazanih, a vrednosti napona duž i na kraju NN izvoda su značajno manji od ovde prikazanih i u određenim vremenskim razdobljima odstupaju od dozvoljenih prema standardu.

Proračun je obavljen sa zadatim naponom na početku NN izvoda vrednosti $400/\sqrt{3}$ V. Napon na početku se stvarno menja zbog promene opterećenja i posledično padova napona u transformatoru $x/0.4$ kV i SN mreži. Takođe i zbog rada

automatske regulacije napona i promene položaja regulacione sklopke pod opterećenjem na transformatoru 110/x kV. Priključenje solarnih panela na NN izvode treba da bude praćeno. U slučaju priključenja veće snage solarnih panela na TS x/0.4 kV treba prethodno proračunima, a kasnije merenjima proveriti potrebu promene položaja besteretnog menjača transformatora x/0.4 kV. Ukoliko se na nekom većem području koje napaja TS 110/x kV priključuje veća snaga solarnih panela moguće je da će se ukazati potreba za prepodešavanjem parametara automatske regulacije napona. U svakom slučaju je neophodno da odgovarajuće stručne službe prate uticaj solarnih panela na dnevne promene opterećenja i napona po radnim i neradnim danima i po sezonama. Neophodno je sagledati i uticaje vremenskih prilika i atmosferskog stanja.

Na slici 8 su prikazane vrednosti dnevnih gubitaka električne energije NN izvoda za prethodne proračune slučajeva kad nema izvora, sa izvorom bez baterija i sa izvorom sa baterijama.



Slika 8. Dnevni gubici električne energije na NN izvodu bez izvora i sa izvorom sa i bez baterija

Dnevni gubici električne energije na NN nadzemnom izvodu bez izvora (solarnih panela) iznose 13,033 kWh, sa izvorom bez baterija 8,71 kWh i sa izvorom sa baterijama 7,463 kWh. Smanjenje gubitaka sa izvorom iznosi 4,323 kWh, tj. gubici električne energije su manji za 33,17%. Smanjenje gubitaka sa izvorom i baterijama u odnosu na slučaj bez izvora je 42,74%. Korišćenje samo izvora, tj. solarnih panela daje veoma značajno smanjenje gubitaka električne energije u NN izvodima. Korišćenje izvora i baterija doprinosi još značajnijem smanjenju gubitaka električne energije. Procentualno najveći deo gubitaka u elektrodistributivnoj mreži je u NN nadzemnim vodovima tako da se priključenjem solarnih panela u domaćinstvima može ostvariti velika ušteda na gubicima električne energije.

Na području Elektrodistribucije Srbije ima oko 35.000 trafostanica x/0.4 kV, a od toga oko 24.000 (oko dve trećine) napaja gradska, prigradska i seoska područja sa NN nadzemnim izvodima. Svaka od tih trafostanica ima u proseku po tri NN izvoda. Prostim množenjem uštede gubitaka za jedan prosečan NN izvod sa opterećenjima i izvorom koji je ovde prikazan za slučaj bez baterija se dobije smanjenje gubitaka na NN izvodima od oko 114.000.000 kWh na godišnjem nivou.

Neophodno je detaljno sagledati mogućnosti skladištenja električne energije iz solarnih panela u vreme moguće veće proizvodnje solarnih panela od potrošnje na NN izvodima i korišćenje iste u vreme vršnih opterećenja. Ovo bi moglo imati dodatni značajan povoljan uticaj na smanjenje gubitaka i poboljšanje naponskih prilika. Zbog dodatnih troškova ulaganja u akumulatorske baterije potrebno je dodatno podstaći vlasnike solarnih panela. Predlog novog modela obračuna električne energije kupcima-proizvođačima je prikazan u [8].

Potrebno je ustanoviti način praćenja uticaja priključenih solarnih panela na čitavom elektrodistributivnom području na svim naponskim nivoima. Ovo se odnosi na veličine napona, tokove struja (snaga), veličine faktora snage, gubitke električne energije i parametre kvaliteta električne energije. Razvijanje pametne mreže (*smart grid*) u ovom pravcu bi pomoglo u mogućnosti praćenja i analize.

IV ZAKLJUČAK

Priključenje solarnih panela prema prikazanom proračunu ima značajan uticaj na smanjenje gubitaka i poboljšanje napona na NN izvodima elektrodistributivne mreže. Dodatni povoljan uticaj na smanjenje gubitaka i uravnoteženje vrednosti napona tokom dana imaju i baterije uravnoteženjem vrednosti struja (snaga) na NN vodu.

Određena sredstva se odvajaju kao podrška i podsticaj većem korišćenju solarnih panela, ali su ta sredstva do sada bila mala. Ako solarni paneli potrošača isporučuju električnu energiju u NN distributivnu mrežu kada je to povoljno u smislu smanjenja gubitaka i poboljšanja kvaliteta električne energije, posebno u doba vršnih opterećenja, neophodno je zbog koristi usled smanjenja gubitaka podstaći potrošače na priključenje solarnih panela uz ugradnju baterija za skladištenje električne energije.

S obzirom na visoku cenu baterija neophodno je sagledati koristi od ugrađivanja baterija i sagledati mogućnost da se tarifnim sistemom ili na drugi način podstaknu potrošači da ugrade baterije.

Korišćenje solarnih panela znači izbegavanje korišćenja fosilnih goriva i time povoljan uticaj na životnu sredinu. I to može biti razlog za odvajanje više sredstava za podsticaj ugradnje solarnih panela i ugradnju baterija.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Grujić, A., Todorović, S. Kvalitet električne energije generisane iz krovne PV elektrane stambenog objekta u Vranju, in Proc. XI Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem (CIRED Srbija), Kopaonik, R-2.12, pp. 24-28. Septembar 2018.
- [2] Čorba, Z., Milićević, D., Dumnić, B., Katić, V., Popadić, B. Ispunjenje kriterijuma dozvoljenih struja viših harmonika pri priključenju fotonaponskih elektrana na distributivni sistem, in Proc. XI Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem (CIRED Srbija), Kopaonik, R-2.13, pp. 24-28. Septembar 2018.
- [3] Simović, V., Žerajić, M. Procena uticaja integracije solarnih elektrana na niskom i srednjem naponu na smanjenje vrednosti gubitaka aktivne snage u prenosnom sistemu, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 1, pp. 81-83, 2022. <https://doi.ub.kg.ac.rs/2021/10-46793-eee22-1-81s/>
- [4] Vuković, M., Ostojić, B. Koncept korišćenja mini solarnih centrala u domaćinstvima, in Proc. 36. Savetovanje Energetika 2021, Zlatibor, Srbija, rad 46, 22-25 Jun 2021.

- [5] Ćirić, R., Ochoa, L.F., Feltrin, A.P., Nouri, H. Analiza kvarova u četverožičnim distributivnim mrežama, *Elektrodistribucija: bilten o distribuciji električne energije*, No. 1, pp. 34-42, 2006.
- [6] Spremić, S., Obradović, D. Razmatranje gubitaka u niskonaponskim vodovima sa prikazom rezultata proračuna, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 1, pp. 68-73, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.68S>
- [7] Spremić, S., Antonić, A. Uticaj solarnih panela na gubitke u niskonaponskoj mreži, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 3, pp. 56-59, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-3.56S>
- [8] Grujić, D., Kuzman, M., Đurišić, Ž. Novi model obračuna električne energije kupaca-proizvođača, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 2, pp. 56-67, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-2.57G>

AUTORI/AUTHORS

Siniša Spremić - dipl.el.inž., Elektrodistribucija Srbije - Tehnički centar Novi Sad, sinisa.spremic@ods.rs, ORCID [0000-0003-3669-3999](https://orcid.org/0000-0003-3669-3999)

Aleksandar Antonić - dipl.el.inž., Elektrodistribucija Srbije - Tehnički centar Novi Sad, aleksandar.antonc@ods.rs, ORCID [0009-0003-0633-8926](https://orcid.org/0009-0003-0633-8926)

The Influence of Solar Panels and Electric Energy Storage on Losses in the Low-Voltage Network

Abstract – The largest part of technical losses of electricity in electricity distribution are technical losses in low-voltage lines. Technical losses of electricity are losses that occur in the distribution of electricity from transformers to consumers in electrical distribution equipment. Commercial losses include unauthorized use of electricity and losses due to errors in metering equipment. The main source of technical losses of electricity is caused by the flow of electric current through conductors. Solar panels installed by consumers can affect the reduction of losses by reducing the flow of electric current, i.e. of electricity through low-voltage lines. The introduction of electricity storage (batteries) can have an additional impact on the reduction of electricity losses by using the stored electricity in batteries at times of peak loads. The paper presents the assumed daily diagram of the symmetrical load of the low-voltage line with the calculation of hourly losses without the influence of solar panels and with the influence of solar panels without electricity storage and with electricity storage. The impacts of solar panels without and with electricity storage are also shown in a daily diagram, as well as the voltage values at the end of the low-voltage line. In the calculation, an equivalent line with half the length and full hourly load is used for the low-voltage line.

Index Terms – Solar panel, Electricity storage, Low voltage, Overhead line, Load, Technical losses

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