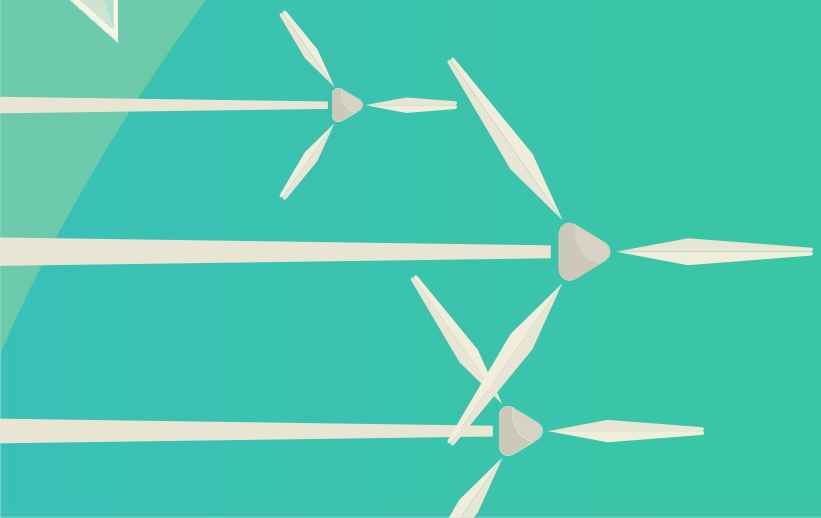
ISSN 0354-8651

energija

| ekonomija | ekologija

List Saveza energetičara
Broj 3 / Godina XXVIII / Septembar 2026.



energija | ekonomija | ekologija

Energija / Ekonomija / Ekologija

Broj 3, Septembar 2026

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

Priprema, tehnička i jezička obrada:
Savez energetičara

Štamparija:
Mašinac, Kragujevac

Tiraž:
100

UDK
620.9
338:620.9
502:620.9

COBISS.SR-ID 108696839

Časopis izlazi četiri puta godišnje

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

energija | ekonomija | ekologija

Sadržaj

[01] Aleksandar PEULIĆ, Srećko ĆURČIĆ
Multisenzorsko prostorno mapiranje energetskih gubitaka u urbanim sredinama: dokaz koncepta / Multisensor Spatial Mapping of Energy Losses in Urban Environments: Proof of Concept

[07] Željko MARKOVIĆ, Dejan STOJČEVSKI, Miloš KOSTIĆ
Procena ostvarene tržišne cene i uticaja integracije baterijskog skladišta energije na ovu cenu kod solarnih fotonaponskih elektrana u Srbiji / Assessment of Capture Price and the Impact of Battery Energy Storage Integration on the Market Value of Solar Photovoltaic Power Plants in Serbia

[14] Aleksandar MILIĆEVIĆ, Srđan BELOŠEVIĆ, Ivan TOMANOVIĆ, Nenad CRNOMARKOVIĆ, Milić ERIĆ, Zoran MARKOVIĆ, Nikola ŽIVKOVIĆ, Ivan LAZOVIĆ
Predikcija toplotne moći uglja termoelektrane „Kostolac B" pomoću modela mašinskog učenja / Machine Learning Models for Predicting the Heating Value of Coal at the "Kostolac B" Thermal Power Plant

[22] Dušan GORDIĆ, Vladimir VUKAŠINOVIĆ, Mladen JOSIJEVIĆ, Nebojša JURIŠEVIĆ
Ka niskougljeničnom zdravstvenom sektoru: sveobuhvatni pregled / Towards a Low-Carbon Healthcare Sector: A Comprehensive Review

[35] Stefan ČUBONOVIĆ, Dragan ĆETENOVIĆ, Nikola VOJNOVIĆ, Aleksandar RANKOVIĆ
Maliciozni napadi na estimator stanja u distributivnim mrežama: Analiza izvodljivosti napada u uslovima male redundanse merenja / Malicious Attacks on the State Estimator in Distribution Networks: Analysis

of Attack Feasibility under Conditions of Low Measurement Redundancy

[41] Miloš BANJAC, Sandra KOVAČEVIĆ
Eksperimentalno određivanje dinamičkih termičkih svojstava zgrade / Experimental Determination of the Dynamic Thermal Properties of a Building

[47] Marija ILIĆ, Dušan DANILOVIĆ, Miroslav CRNOGORAC, Anastasija MIRJANIĆ, Vesna KAROVIĆ-MARIČIĆ, Lola TOMIĆ
Analiza mogućnosti korišćenja napuštenih naftnih i gasnih bušotina kao izvor toplotne energije u Srbiji / Analysis of the Potential Use of Abandoned Oil and Gas Wells as a Source of Thermal Energy in Serbia

[53] Željana RISTIĆ, Mileta ŽARKOVIĆ
Analiza uticaja integracije fotonaponske elektrane na elektroenergetski sistem / Analysis of the Impact of Photovoltaic Power Plant Integration on the Power System

[58] Miodrag VUKOVIĆ, Željko V. DESPOTOVIĆ, Manojlo ŠOŠKIĆ, Stanko VUKOVIĆ
Projektovanje i realizacija sistema baterijskog skladišta električne energije snage 500 kW i kapaciteta 1075 kWh / Design and Implementation of Battery Energy Storage System with 500 kW Power and 1075 kWh Capacity

[70] Đorđe DUKANAC
Unapređenje tačnosti provere registara električne energije pametnih brojila korišćenjem novog postupka / Improving the Accuracy of Checking Electrical Energy Registers of Smart Meters Using a New Procedure

doi: 10.46793/EEE26-3.01P

Originalni naučni rad
UDK 620.9:711.4]:004.9

Multisenzorsko prostorno mapiranje energetskih gubitaka u urbanim sredinama: dokaz koncepta

Aleksandar Peulić[*], Srećko Ćurčić[**]

[*] Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno-matematički fakultet
[**] Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka, Čačak

Rezime **-** Gubici energije u urbanim sredinama predstavljaju jedan od ključnih faktora koji utiču na energetsku efikasnost, održivost i troškove infrastrukture. Tradicionalne metode za analizu energetskih performansi, kao što su stacionarne senzorske mreže, ručne termalne inspekcije i individualni građevinski energetski pregledi, često nisu dovoljno precizne niti vremenski efikasne, jer ne pružaju visok nivo prostorne rezolucije niti pregled mikroklimatskih promena u realnom vremenu. U ovom radu predstavljen je predlog sveobuhvatnog sistema za procenu urbanih energetskih gubitaka koji kombinuje podatke sa senzorske mreže, prostorno-analitičke metode i termalne mape dobijene upotrebom bespilotnih letelica (drone). Predloženi sistem integriše zemaljske ekološke senzore (temperatura, vlažnost, brzina vetra, CO_2), mobilne senzorske jedinice postavljene na vozila javnog prevoza, kao i termalne podatke dobijene letovima bespilotnih letelica. Prikupljeni podaci obrađuju se primenom naprednih metoda prostorne analitike, modela veštačke inteligencije za interpolaciju i fuzije podataka, kao i GIS tehnika za višeslojnu vizuelizaciju. Termalne slike koje generišu bespilotne letelice omogućavaju preciznu detekciju curenja toplote, degradacije materijala, gubitaka kroz krovne i fasadne strukture, ali i identifikaciju urbanih toplotnih ostrva koja klasične metode teško registruju. Predložena metodologija predstavlja skalabilno i isplativo rešenje pogodno za različite urbane konfiguracije i pruža temelje za prediktivne modele, kontinuirani nadzor i razvoj inteligentnih energetskih sistema.

Ključne reči - energetski gubici, mikroklima, bespilotne letilice, IoT senzori, GIS analiza, veštačka inteligencija

I UVOD

Urbanizacija i klimatske promene u poslednjim decenijama značajno utiču na energetsku efikasnost i održivost gradskih sistema. Sve veće koncentracije stanovništva u urbanim sredinama dovode do povećanih energetskih zahteva, kako za grejanje i hlađenje objekata, tako i za javnu infrastrukturu, uključujući osvetljenje, transport i klimatizaciju javnih prostora. Istovremeno, mikroklimatske varijacije, poput urbanih toplotnih ostrva (eng. *heat islands*), nejednakih temperaturnih distribucija i lokalnih anomalija u insolaciji, direktno utiču na performanse energetski intenzivnih sistema, uključujući solarne elektrane, ventilacione sisteme i distribucione mreže. Precizno praćenje i modeliranje ovih fenomena predstavlja ključni izazov za planiranje održivih i energetski efikasnih gradova.

Tradicionalni pristupi, zasnovani na stacionarnim senzorima, ručnim inspekcijama ili analizama na nivou pojedinačnih objekata, često nisu dovoljno precizni niti vremenski efikasni. Ove metode ne omogućavaju visok nivo prostorne rezolucije niti kontinuirani uvid u promene mikroklime u realnom vremenu, što ograničava identifikaciju lokalizovanih izvora gubitaka energije, posebno u kompleksnim urbanim sredinama sa heterogenim tipovima zgrada, materijala i rasporedom zelenih površina. Kao posledica, donošenje strateških odluka o energetskoj infrastrukturi i optimizaciji solarnih panela ili sistema grejanja i hlađenja ostaje neprecizno i nedovoljno informisano. Savremeni pristupi integrišu višeslojne podatke prikupljene putem bespilotnih letelica, IoT senzora i GIS platformi, omogućavajući detaljno mapiranje urbane mikroklime i energetskih gubitaka. Bespilotne letelice pružaju visoko-rezolutne termalne i multispektralne podatke o krovovima, fasadama, zelenim površinama i javnim prostorima, što omogućava identifikaciju toplotnih anomalija, curenja toplote i degradacije materijala. IoT senzori dopunjuju ove podatke kontinuiranim vremenskim serijama parametara okoline, uključujući temperaturu, vlažnost, insolaciju i koncentraciju CO_2.Integracija ovih podataka sa GIS-om omogućava prostorno preciznu analizu energetskih tokova i mikroklimatskih efekata [1,2]. GIS platforma kombinuje informacije o visinskim modelima zgrada, materijalima, senčenju i urbanom zelenilu, čime se kreira slojeviti digitalni model grada. Ovaj model omogućava identifikaciju kritičnih tačaka sa najvećim energetskim gubicima, mapiranje urbanih toplotnih ostrva i optimizaciju rasporeda solarnih panela i zelenih površina.

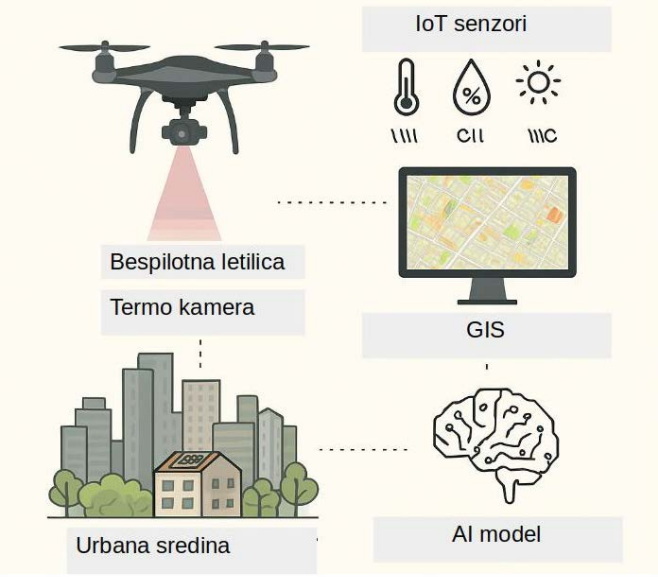
Poseban doprinos ovog rada je primena veštačke inteligencije (AI) u analizi i predikciji energetskih gubitaka. Korišćenjem algoritama mašinskog učenja, poput Random Forest i XGBoost, i generativnih modela kao što je Pix2Pix, moguće je rekonstruisati termalne mape visoke rezolucije, interpolirati nedostajuće podatke i predvideti mikroklimatske parametre sa visokim stepenom tačnosti. AI omogućava simulaciju različitih scenarija „šta ako“ [3,4,5]. Identifikaciju kritičnih zona gubitka toplote i optimizaciju sistema solarnih panela, termoizolacije i rasporeda urbanih zelenih površina. Ovaj integrisani pristup predstavlja skalabilno i primenljivo rešenje za različite urbane konfiguracije, pružajući naučnu osnovu za kontinuirani nadzor, evaluaciju i unapređenje energetske efikasnosti. Implementacija takvog sistema doprinosi smanjenju operativnih troškova, povećanju efikasnosti obnovljivih izvora energije i podršci pametnim gradovima u donošenju strateških odluka o energetskoj

infrastrukturi i urbanom planiranju. Pored toga, sistem omogućava adaptivno planiranje i prediktivno upravljanje energijom, što je posebno važno u kontekstu klimatskih promena i povećanih energetskih zahteva urbanih sredina.

II Arhitektura predloženog koncepta

Predloženi sistem se sastoji od tri ključne komponente, bespilotne letilice, IoT senzorske mreže i GIS-AI integracije [6,7,8]. Bespilotne letilice su opremljene termalnim i multispektralnim senzorima, prikupljaju podatke o temperaturi, insolaciji, zelenim površinama i krovnim strukturama. Primenom algoritama veštačke inteligencije, kreiraju prostorne mape visoke rezolucije za GIS integraciju. Kreiraju visoko-rezolutne prostorne mape za GIS integraciju. IoT senzori su postavljeni na važnim, strateškim mestima, ili na vozilima javnog prevoza, što omogućava merenje temperature, vlažnosti, koncentracije CO_2 i insolacije.

AI modeli (Random Forest, XGBoost, Pix2Pix) predviđaju mikroklimatske parametre i energetske gubitke, koji se intergrišu u GIS prostorni model, tako da se kreira digitalni model grada, što kao rezultat ima preporuke za optimizaciju solarnih panela, raspored zelenih površina i planiranje energetske infrastrukture [9,10]. Arhitektura predloženog koncepta prikazana je na Slici 1.



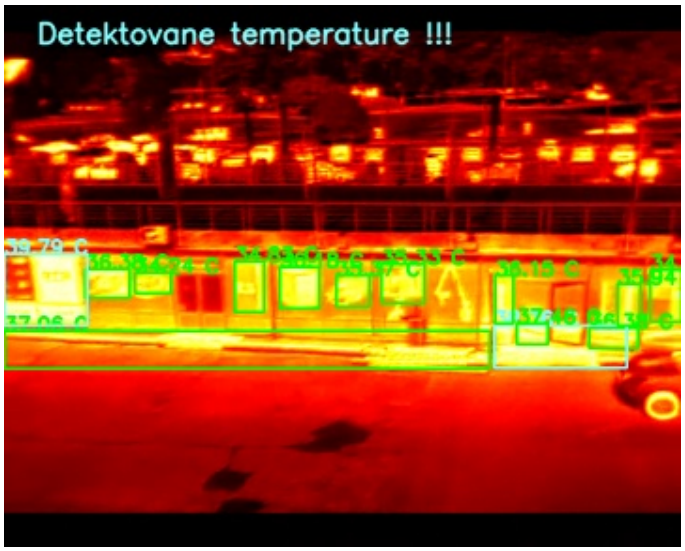
Slika 1. Arhitektura predloženog koncepta

III Metodologija

Prikupljanje podataka obavlja se tako što bespilotne letelice(dron) lete definisanim rutama i snimaju termalne i multispektralne mape, dok IoT senzori beleže podatke u realnom vremenu. GIS integriše visinske modele zgrada, urbane površine i podatke bespilotnih letelica. Za analizu podatakta i AI model u ovom radu je predložen kombinovani dataset koji koristi se za treniranje AI modela. Random Forest i XGBoost modeli predviđaju lokalnu temperaturu, insolaciju solarnih panela, efikasnost i gubitke u mikroklimi. Generativni modeli Pix2Pix mogu da se koriste za rekonstrukciju nedostajuće termalne zone.

Na slici 2, prikazan je termalni snimak područja naselja, dobijen pomoću termo kamere montirane na dron. Snimak je procesiran softverskim algoritmom koji identifikuje i vizualizuje oblasti sa povišenom temperaturom. Prvo je termalna slika konvertovana u sivu skalu radi izdvajanja intenziteta toplote, zatim su primenjene metode binarne segmentacije i detekcije kontura kako bi se identifikovale kritične zone. Za svaku izdvojenu oblast izračunata je prosečna temperatura, koja je prikazana direktno na snimku, dok su zone sa temperaturama iznad definisanog praga istaknute bojom i označene upozorenjem. Ovaj proces omogućava preciznu identifikaciju toplih tačaka u urbanom okruženju i vizuelnu prezentaciju podataka sa visokom prostornom rezolucijom. Pored vizuelne obrade termalnog snimka, kreirana je tabela koja sadrži identifikovane oblasti sa pripadajućim prosečnim temperaturama i koordinatama pravougaonika na snimku. Ova tabela se može kasnije povezati sa podacima dobijenim sa IoT senzora, omogućavajući integrisanu analizu i prikaz u GIS-u. Na osnovu ovih podataka moguće je primeniti algoritme veštačke inteligencije za predikciju i procenu kritičnih zona, detekciju anomalija u distribuciji temperature ili pravljenje modela za praćenje urbanih mikroklimatskih promena.

Takva integracija omogućava kombinovanje vizuelnih i senzorskih podataka za preciznije i automatizovane odluke u realnom vremenu.



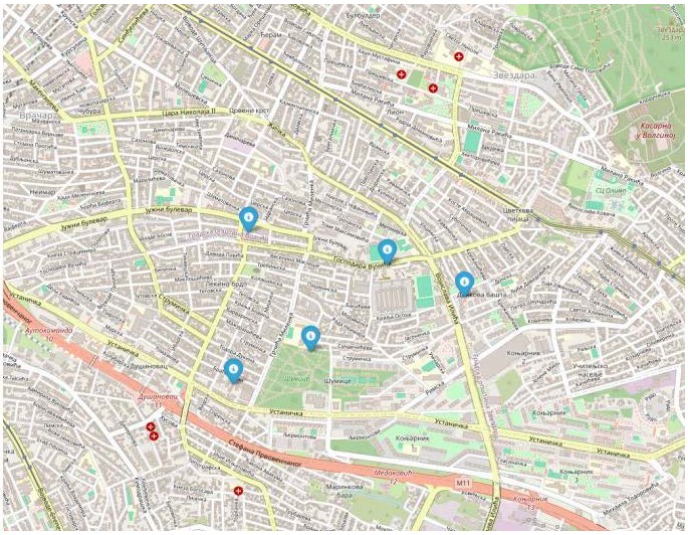
Slika 2. Termalni snimak obrađen za detekciju toplih zona

IoT senzori postavljeni na ključnim lokacijama u urbanom prostoru beleže podatke u realnom vremenu, uključujući temperaturu, vlažnost vazduha, koncentraciju PM2.5 i PM10 čestica. Senzorski čvorovi su geografski raspoređeni tako da pokrivaju različite tipove okoline, uključujući ulice, parkove i javne površine, čime se omogućava detaljna prostorna analiza. Prikupljeni podaci se putem bežične komunikacije šalju u centralnu bazu, gde se automatski organizuju u tabelarni format radi jednostavnijeg pregleda i analize.

Paralelno, GIS sistem integriše visinske modele zgrada, urbane površine i podatke bespilotnih letelica, omogućavajući vizuelizaciju senzorskih informacija u kontekstu urbanog

pejzaža.

Na slici 3. prikazan je raspored senzora po urabnom području u QGIS-u, uključujući njihove koordinate i tipove merenih parametara, što omogućava sinhronizovanu analizu prostornih i vremenskih promena u realnom vremenu.



Slika 3. Raspored senzora po urabnom području

IoT senzori postavljeni na ključnim lokacijama u urbanom prostoru omogućavaju prikupljanje podataka u realnom vremenu, pružajući informacije o osnovnim mikroklimatskim i ekološkim parametrima, kao što su temperatura, vlažnost vazduha i koncentracije PM2.5 i PM10 čestica. Svaki senzor predstavlja samostalni čvor koji kontinuirano meri ove parametre i putem bežične mreže šalje podatke u centralnu bazu, gde se automatski organizuju u tabelarni format radi daljeg pregleda i analize. Pored fiksnih senzorskih tačaka, sistem koristi termalne snimke prikupljene bespilotnim letelicama, koje pokrivaju šire prostorne oblasti i omogućavaju vizualizaciju temperaturnih razlika u gradskom okruženju.

Integracija senzorskih i termalnih podataka zasniva se na geografskoj referenci: koordinate svake senzorske tačke se povezuju sa odgovarajućim oblastima na termalnim snimcima. Na taj način za svaku lokaciju u gradu može se pratiti trenutna mikroklimatska situacija, dok termalni snimci pružaju prostornu distribuciju temperature koja omogućava identifikaciju zona sa specifičnim karakteristikama, poput toplotnih ostrva ili oblasti sa većim zagađenjem vazduha. Takva sinhronizacija podataka omogućava sveobuhvatnu analizu, jer se numerički podaci senzora i prostorne informacije sa termalnih snimaka mogu kombinovati u jedinstvenu tabelu, što omogućava napredne statističke metode i primenu mašinskog učenja, na primer Random Forest, za predikciju mikroklimatskih i ekoloških parametara u urbanom okruženju.

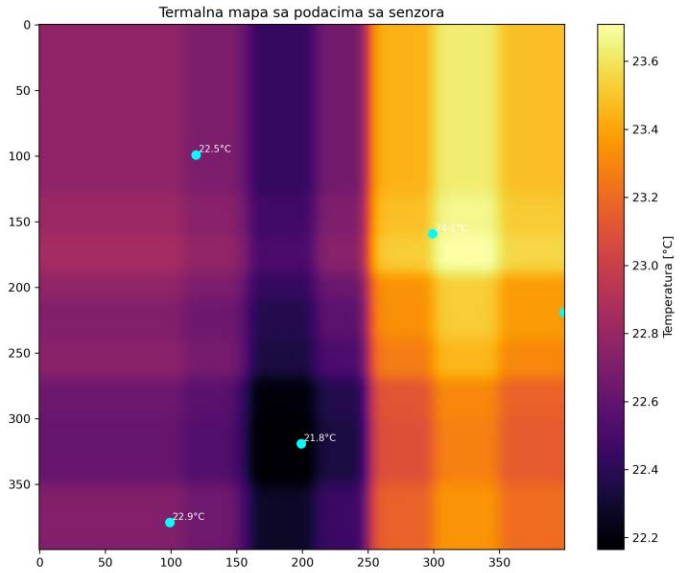
GIS tehnologija igra ključnu ulogu u ovom sistemu, jer omogućava integraciju visinskih modela zgrada, urbane infrastrukture i prostornih podataka sa dronova sa senzorskim informacijama. Time se postiže vizuelizacija urbanog pejzaža u kontekstu mikroklimatskih i ekoloških podataka, omogućavajući identifikaciju ključnih faktora koji utiču na kvalitet života u gradu. GIS takođe omogućava prostornu analizu i filtriranje podataka, npr. prikazivanje svih senzorskih tačaka unutar određenih urbanih zona ili poređenje merenja različitih tipova senzora u realnom vremenu.

Rezultat ove integracije je sveobuhvatna baza podataka koja obuhvata geografski raspored senzora, njihove merenja i prostornu raspodelu temperature sa termalnih snimaka. Tabela 1 prikazuje primer ovakvih kombinovanih podataka. Ovaj sistem omogućava ne samo detaljno praćenje urbanih mikroklimatskih parametara, već i njihovu analizu i vizualizaciju u GIS-u, čime se olakšava donošenje odluka u oblasti urbanog planiranja, zaštite životne sredine i unapređenja kvaliteta života građana.

Tabela 1. Podaci sa IoT senzora

Lokacija	T [°C]	H [%]	UV	PM2.5	PM10
Zona 1	22.5	55.2	6.1	35.4	60.2
Zona 2	24.1	48.7	5.8	40.5	70.1
Zona 3	23.3	52.0	6.3	38.0	65.7
Zona 4	21.8	50.5	5.5	32.7	58.4
Zona 5	22.9	54.1	6.0	36.9	62.3

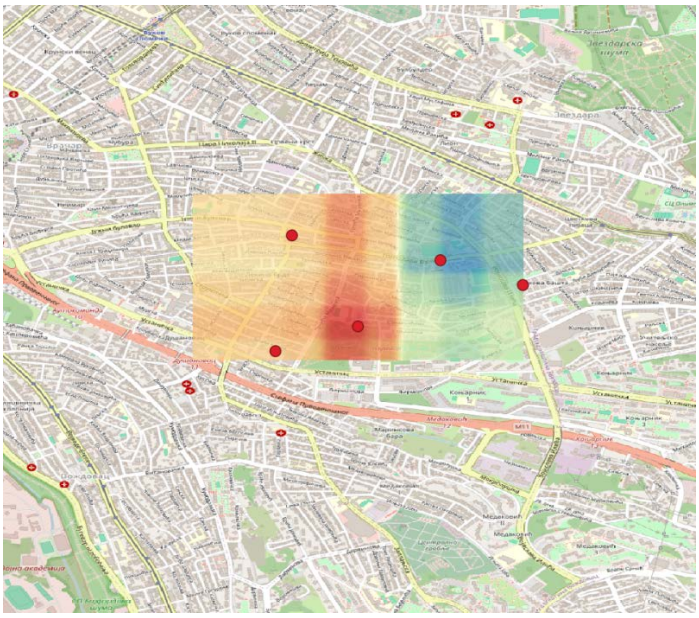
Slika 4. prikazuje interpoliranu termalnu mapu urbanog područja, generisanu kombinovanjem podataka sa termo-kamera drona i realnih IoT senzora raspoređenih na terenu. Na slici su jasno označene cijan tačke, koje predstavljaju lokacije senzora. Boje na mapi predstavljaju temperaturu površine u stepenima Celzijusa, pri čemu svetlije nijanse označavaju višu temperaturu, a tamnije nijanse nižu temperaturu.



Slika 4. Interpolirana termalna mapa sa senzorima i dron podacima

Za generisanje ove mape korišćen je Random Forest algoritam mašinskog učenja zasnovan na grupi stabala odluka. Algoritam je treniran na poznatim tačkama senzora, tj. na koordinatama piksela i njihovim temperaturama. Random Forest funkcioniše tako što kreira veliki broj stabala odluka na slučajnim

podskupovima podataka, svako stablo predviđa vrednost temperature za nepoznate piksele, a konačna predikcija za svaki piksel se dobija prosekom predikcija svih stabala, čime se postiže glatka interpolacija i smanjuje uticaj pojedinačnih grešaka. Ovaj pristup omogućava da se temperatura izmerena na ograničenom broju senzorskih tačaka proširi na celo područje, uz očuvanje lokalnih varijacija i realističnog rasporeda toplotnih vrednosti, što je ključno za analize mikroklime. Prednost Random Forest modela je njegova otpornost na šum u podacima i sposobnost da modeluje nelinearne zavisnosti, što je posebno važno u urbanim sredinama gde se temperatura može brzo menjati zbog različitih površina, vegetacije i zgrada. Na slici se takođe može uočiti detaljna raspodela temperature, sa glatkim prelazima između tačaka senzora, što omogućava vizualno i kvantitativno praćenje termalnih anomalija i identifikaciju kritičnih zona gubitka toplote. Ovakva mapa je idealna za dalje GIS analize, jer omogućava precizno mapiranje temperaturnih varijacija i povezivanje sa prostornim podacima poput zgrada, ulica i zelenih površina. Slika 5 prikazuje isti dataset u formatu GeoTIFF, učitan u QGIS – open source GIS softveru. GeoTIFF je georeferencirani raster format, što znači da svaki piksel mape ima precizno definisane geografske koordinate u standardnom koordinatnom sistemu.



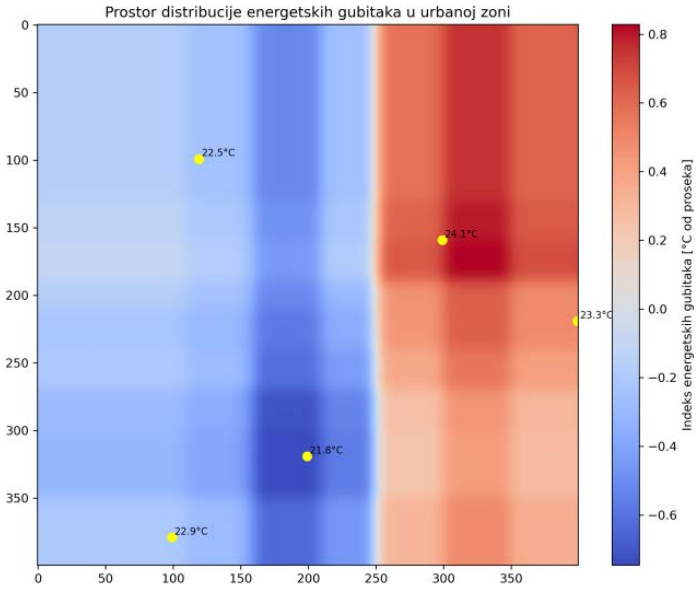
Slika 5. GeoTIFF termalne mape u QGIS-u sa označenim senzorima

Proces uvoza GeoTIFF-a u QGIS omogućava prikaz termalne mape u prostornom kontekstu, direktno preko karte grada, integraciju sa drugim GIS slojevima, kao što su zgrade, saobraćajnice i vegetacija, analize prostorne distribucije temperature uključujući identifikaciju toplih i hladnih zona, izračunavanje statistika po parcelama ili blokovima i planiranje mera za optimizaciju mikroklime. QGIS omogućava interaktivno istraživanje podataka, zumiranje, panoramiranje, primenu kolormapa i kreiranje legendi koje olakšavaju vizualnu interpretaciju. GeoTIFF generisan putem Random Forest interpolacije sadrži temperaturu svakog piksela mapiranu na tačne geografske koordinate. Kada se uveze u QGIS, mapa se može koristiti za overlay sa satelitskim snimcima ili ortofotomapama, simulaciju efekata urbanih objekata na raspodelu toplote, planiranje postavljanja novih senzora ili solarnih panela i analize u vezi sa urbanim toplotnim ostrvima. Kombinacija dron termalne slike, IoT senzorskih tačaka, Random Forest interpolacije i GeoTIFF formata daje realističnu i prostorno preciznu termalnu mapu, GIS-ready dataset koji se može koristiti u softverima otvorenog koda poput QGIS-a i osnovu za dalja istraživanja i optimizaciju urbanih sistema i mikroklime, uključujući identifikaciju kritičnih zona i planiranje adaptivnih intervencija. Ovaj pristup omogućava da se povežu merenja sa tla i drona, obrade AI algoritmom i dobiju visoko kvalitetne prostorne informacije koje mogu da se koriste za naučne i praktične urbanističke analize.

IV Analiza energetskih gubitaka

Analiza energetskih gubitaka u urbanim zonama predstavlja ključni korak u razumevanju prostorne distribucije toplotnih anomalija koje nastaju kao posledica neefikasne izolacije zgrada, različitih materijala u izgradnji urbanih površina, kao i uticaja mikroklimatskih faktora. U okviru ovog istraživanja, energetski gubici procenjeni su na osnovu temperaturnih podataka prikupljenih IoT senzorskom mrežom raspoređenom po odabranoj urbanoj oblasti. Senzori su postavljeni na strateškim lokacijama kako bi obuhvatili različite tipove površina, uključujući stambene i komercijalne zgrade, zelene površine i asfaltirane ulice, čime se omogućava reprezentativan prikaz lokalnih temperaturnih karakteristika. Prikupljeni podaci korišćeni su za kreiranje interpolovane termalne mape čitave oblasti. Za interpolaciju je primenjen algoritam Random Forest, koji omogućava predikciju temperaturnih vrednosti u svim pikselima mape na osnovu poznatih vrednosti sa senzora. Nakon interpolacije, rezultat je dodatno obrađen pomoću Gaussian filtera radi glatkog prikaza, čime su eliminisane nagle lokalne fluktuacije i dobijena je vizualno konzistentna termalna mapa. Energetski gubici definisani su kao odstupanje lokalne temperature od prosečne temperature cele oblasti. Na ovaj način, pozitivne vrednosti indikativno ukazuju na lokacije sa potencijalno većim gubicima toplote, što može biti posledica loše izolacije krovova, zidova i fasada, kao i nedostatka vegetacije ili prisustva površina koje akumuliraju toplotu, poput betona ili asfalta. Negativne vrednosti odstupanja predstavljaju područja sa nižim gubicima toplote, što može ukazivati na bolju izolaciju, senovite zone ili zelene površine koje doprinose smanjenju lokalnih temperatura. Dobijena analiza omogućava prostornu kvantifikaciju energetskih gubitaka i identifikaciju kritičnih tačaka u urbanom okruženju. Na osnovu rezultata moguće je planirati prioritetne intervencije, uključujući poboljšanje izolacije zgrada, uvođenje zelenih krovova, sadnju drveća ili korišćenje reflektujućih materijala na urbanim površinama. Pored toga, prostorna vizualizacija omogućava da se uočavaju koncentrisane zone sa visokim gubicima energije, što je od posebnog značaja za planiranje energetski efikasnih i održivih urbanih sredina. Interaktivne i GIS vizualizacije omogućavaju dalje prostorno istraživanje podataka i pružaju osnovu za povezivanje sa drugim prostornim informacijama, kao što su urbanistički planovi,

struktura saobraćajne mreže i prostorni raspored građevinskih objekata. Analiza energetskih gubitaka u ovom radu stoga ne predstavlja samo kvantitativnu procenu toplotnih anomalija, već i praktičan alat za planiranje održive urbane sredine. Na slici 6, prikazana je termalna mapa sa prikazom prostorne distribucije energetskih gubitaka u urbanoj zoni. Na slici su označene lokacije senzora, a različite boje predstavljaju odstupanja lokalnih temperatura u odnosu na prosečnu temperaturu oblasti, gde crvenije nijanse ukazuju na veće energetske gubitke.



Slika 6. Prostorna distribucija energetskih gubitaka u urbanoj zoni

V ZAKLJUČAK

U ovom radu predstavljen je koncept sveobuhvatnog sistema za procenu energetskih gubitaka u urbanim sredinama, koji integriše podatke sa IoT senzora, termalne i multispektralne snimke bespilotnih letelica, GIS tehnologiju i algoritme veštačke inteligencije. Glavni cilj rada bio je prikazati mogućnost kombinovanja višeslojnih podataka radi detaljnog mapiranja mikroklimatskih parametara i identifikacije zona sa povećanim energetskim gubicima, čime se omogućava donošenje odluka u oblasti urbanog planiranja, energetske efikasnosti i zaštite životne sredine.

Poseban doprinos ovog istraživanja ogleda se u proceni energetskih gubitaka na osnovu odstupanja lokalnih temperatura od prosečne vrednosti posmatrane oblasti. Na osnovu interpolacija termalne površine generisane Random Forest algoritmom, kreirana je prostorna mapa koja jasno izdvaja zone sa izraženim pozitivnim termalnim anomalijama. Ove anomalije ukazuju na mesta gde su energetski gubici verovatno najveći, najčešće usled loše termičke izolacije objekata, prekomerne akumulacije toplote gradskih površina ili nedostatka vegetacije. Istovremeno, hladnije zone predstavljaju oblasti sa manjim gubicima energije i boljim mikroklimatskim uslovima. Dobijena vizualizacija energetskih gubitaka u GeoTIFF formatu i interaktivnom HTML prikazu omogućava dalje prostorne analize u GIS okruženju i predstavlja konkretan izlaz sistema spreman za primenu u realnim urbanim intervencijama.

Predloženi koncept demonstrira kako integracija različitih izvora podataka, primena algoritama veštačke inteligencije za interpolaciju i predikciju, kao i GIS vizualizacija mogu zajedno da pruže prostorno i vremenski preciznu analizu mikroklime, detekciju urbanih toplotnih ostrva i kritičnih tačaka sa povećanim energetskim gubicima. Time se značajno unapređuje planiranje i optimizacija energetske infrastrukture, kao i određivanje prioriteta za intervencije poput unapređenja izolacije, ozelenjavanja i optimizacije građevinskih materijala. Sistem je koncipiran kao skalabilno rešenje primenljivo na različite urbane konfiguracije, što otvara mogućnosti za kontinuirani nadzor i evaluaciju u realnom vremenu. Iako je reč pre svega o prikazu koncepta, u budućnosti se sistem može dodatno unaprediti uvođenjem dinamičkog modeliranja meteoroloških promena, proširenjem senzorskih mreža, primenom naprednijih dron platformi i simulacijom „šta ako“ scenarija radi optimizacije urbanih i energetskih intervencija. Predloženi pristup predstavlja temelj za razvoj inteligentnih energetskih sistema i prelazak sa statičkih analiza na prediktivno i adaptivno upravljanje urbanom energijom, čime se doprinosi smanjenju operativnih troškova, povećanju energetske efikasnosti i razvoju pametnih, održivih i klimatski otpornih gradova.

LITERATURA

[1] Ćurčić, S., Peulić, A. Izrada energetske mape raspoloživih sirovina u geografskom informacionom sistemu (GIS), Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 3, pp. 48-51, 2024. https://doi.org/10.46793/EEE24-3.48C

[2] Ćurčić, S., Stanić G. Raspoloživi energetski potencijali od drvne i biljne biomase sa teritorije opštine Užice, Energija, ekonomija, ekologija, No. 3-4, pp. 177-183, 2017.

[3] Peulić, A., Peulić, M., Jovanović, Ž., Joković, M., Stojković, S., Vagić, N. Locating and categorizing causes of discomfort during transport of patients to medical facilities, Transactions in GIS, Vol. 25, pp. 2963–2981, 2021. https://doi.org/10.1111/tgis.12797

[4] Jovanović, Ž., Blagojević, M., Janković, D., Peulić, A. Patient comfort level prediction during transport using artificial neural network, Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, Vol. 27, No. 4, pp. 2817-2832, 2019. https://doi.org/10.3906/elk-1807-258

[5] Stojković, S., Jovanović, D., Peulić, A. Veštačka inteligencija u geografiji: za ili protiv?, in Proc. *VI Kongres geografa Srbije sa međunarodnim učešćem: Upotreba GIS alata i veštačke inteligencije, knjiga 1*, Zlatibor, pp. 513-523, avgust 2024. https://doi.org/10.5937/KonGef24057S

[6] Dimitrov, S., Iliev, M., Borisova, B., Semerdzhieva, L., Petrov, S. UAS-Based thermal photogrammetry for microscale surface urban heat island intensity assessment in support of sustainable urban development, Sustainability, Vol. 16, No. 5, pp. 1766, 2024. https://doi.org/10.3390/su16051766

[7] Lyu, F., Wang, S., Han, S.Y., Catlett, C., Wang, S. An integrated cyberGIS and machine learning framework for fine-scale prediction of Urban Heat Island using satellite remote sensing and urban sensor network data, Urban Informatics, Vol. 1, No. 6, 2022. https://doi.org/10.1007/s44212-022-00002-4

[8] Mutani, G., Scalise, A., Sufa, X., Grasso, S. Synergising machine learning and remote sensing for urban heat island dynamics: a comprehensive modelling approach, Atmosphere, Vol. 15, No. 12, pp. 1435, 2024. https://doi.org/10.3390/atmos15121435

[9] Afroosheh, S., Askari, M. Fusion of deep learning and GIS for advanced remote sensing image analysis, arXiv, No. 2412.19856, 2024. https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.19856

[10] Hong, X., Sheridan, S., Li, D. Mapping built environments from UAV imagery: a tutorial on mixed methods of deep learning and GIS, Computational Urban Science, Vol. 2, No. 12, 2022. https://doi.org/10.1007/s43762-022-00039-w

AUTORI

dr Aleksandar Peulić, redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Prirodno matematički fakultet, aleksandar.peulic@pmf.kg.ac.rs, ORCID: 0000-0003-3043-6879

dr Srećko Ćurčić, redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet tehničkih nauka, Čačak, srecko.curcic@ftn.kg.ac.rs, ORCID: 0000-0002-6632-293X

Multisensor Spatial Mapping of Energy Losses in Urban Environments: Proof of Concept

Abstract – Energy losses in urban environments represent one of the key factors affecting energy efficiency, sustainability, and infrastructure costs. Traditional methods for analyzing energy performance—such as fixed sensor networks, manual thermal inspections, and individual building energy audits—are often neither sufficiently precise nor time-efficient, as they do not provide high spatial resolution or real-time insight into microclimatic variations. This paper presents a proposal for a comprehensive system for assessing urban energy losses, which combines sensor-network data, spatial-analytical methods, and thermal maps obtained using unmanned aerial vehicles (drones). The proposed system integrates ground-based environmental sensors (temperature, humidity, wind speed, CO_2), mobile sensing units installed on public transportation vehicles, as well as thermal data collected during UAV flights. The collected data are processed using advanced spatial-analytics techniques, artificial intelligence models for interpolation and data fusion, and GIS methods for multi-layer visualization. Thermal images generated by unmanned aerial vehicles enable precise detection of heat leakage, material degradation, energy losses through roof and façade structures, as well as the identification of urban heat-island zones that are difficult to detect using classical methods. The proposed methodology represents a scalable and cost-effective solution suitable for various urban configurations and provides a foundation for predictive models, continuous monitoring, and the development of intelligent energy systems.

Index Terms – Energy losses, Microclimate; Unmanned aerial vehicles, IoT sensors, GIS analysis, Artificial intelligence

Rad primljen: 12.03.2026., prihvaćen: 18.08.2026.

doi: 10.46793/EEE26-3.07M

Originalni naučni rad

UDK 621.311.243/.6:338.5(497.11)

Procena ostvarene tržišne cene i uticaja integracije baterijskog skladišta energije na ovu cenu kod solarnih fotonaponskih elektrana u Srbiji

Željko Marković[*], Dejan Stojčevski[**], Miloš Kostić[***]

[*] SCITECH d.o.o. Beograd

[**] SEEPEX a.d. Beograd

[***] MT KOMEX d.o.o. Beograd

Rezime - Povećanje udela solarnih fotonaponskih elektrana (SFNE) i rast volatilnosti veleprodajnih cena električne energije zahtevaju analize prihoda koje prevazilaze jednostavnu upotrebu prosečne godišnje tržišne cene. Ostvarena ponderisana tržišna cena proizvodnje (CP) predstavlja ključni pokazatelj stvarne tržišne vrednosti proizvodnje. U radu je izvršena procena CP solarnih fotonaponskih elektrana u Srbiji za period 2023–2025. godine. S obzirom na nedostatak javno dostupnih agregiranih satnih podataka o proizvodnji svih SFNE u Srbiji, razvijen je metodološki pristup zasnovan na ERA5 meteorološkoj reanalizi koju objavljuje Copernicus Climate Change Service, kojim je modelovana uniformno raspoređena flota SFNE na celokupnoj teritoriji Srbije. Za proračun su korišćene ostvarene satne cene sa tržišta „dan unapred“ na nacionalnoj berzi SEEPEX. Metodologija je potvrđena poređenjem sa izmerenim satnim podacima o proizvodnji referentne elektrane za 2024. i 2025. godinu, pri čemu su odstupanja izračunatih vrednosti CP bila manja od 2%, što potvrđuje robusnost predloženog pristupa. Dalje je analiziran uticaj integracije baterijskog skladišta energije (BESS) u dve konfiguracije (nominalne snage 25% i 50% od instalisane snage PV elektrane, i kapaciteta 2 sata), simulacijom algoritma optimalnog upravljanja uz potpunu informaciju o budućim cenama. Rezultati pokazuju da integracija BESS sistema povećava CP, ali istovremeno povećava odstupanja dobijenih vrednosti CP između modela uniformno raspoređene SFNE flote i rezultata na nivou pojedinačne, referentne elektrane (5–8%). Predstavljeni okvir omogućava transparentnu i ponovljivu metodologiju za procenu tržišne vrednosti SFNE i hibridne SFNE (sa BESS) u narednim godinama na tržištu Srbije.

Ključne reči – solarne fotonaponske elektrane, ERA5, ostvarena ponderisana tržišna cena proizvodnje, SEEPEX, baterijsko skladište energije (BESS)

I UVOD

Razvoj solarnih fotonaponskih elektrana (SFNE) u Republici Srbiji se poslednjih godina odvija paralelno sa sve izraženijom volatilnošću cena na dan unapred tržištu električne energije. Stoga je ostvarena ponderisana tržišna cena proizvodnje (CP) (eng. *capture price*), danas centralni parametar u modelima prihoda za projekte obnovljivih izvora energije. Za razliku od prosečne godišnje cene koja je ostvarena na tržištu dan unapred, CP odražava realno ostvareni prihod po MWh proizvedene električne energije i direktno utiče na procenu godišnjeg prihoda, proračun neto sadašnje vrednosti (NPV) i interne stope prinosa (IRR), analizu pokrića duga (DSCR) kao i procenu dugoročne kanibalizacije cene[1] u scenarijima rasta proizvodnje iz obnovljivih izvora energije (OIE).

Radi poređenja CP sa ostvarenom prosečnom cenom na berzi, koristi se i pokazatelj koji se naziva stopa ostvarenja tržišne cene (CR) (eng. *capture rate*), i koji je definisan kao odnos CP i prosečne tržišne cene u istom periodu. CR manji od 100% ukazuje na efekat tržišne kanibalizacije, odnosno na činjenicu da proizvodnja dominantno nastaje u satima sa nižim cenama [1].

Imajući u vidu prethodno, jedan od ciljeva ovog rada je da se ustanovi metodologija i izvrši kvalitetna procena CP solarnih fotonaponskih elektrana u Srbiji za prethodne tri godine (2023 – 2025), u situaciji kada su poznate ostvarene satne cene sa dan unapred tržišta SEEPEX i kada potpuni satni podaci o ukupnoj proizvodnji svih SFNE nisu javno dostupni, što je slučaj za Srbiju. Dalje, radi provere pouzdanosti primenjene metodologije, dobijene vrednosti CP biće upoređene sa konkretno izračunatom ostvarenom CP za referentnu SFNE, koja će biti proračunata na osnovu izmerenih satnih podataka o proizvodnji u prethodne dve godine (na brojilu elektrane). Ovakav postupak omogućava kvantifikovanje odstupanja između predloženog modela i realnog postrojenja, te predstavlja osnov za ocenu validnosti predloženog pristupa u kontekstu tržišne analize.

U radu će se dalje analizirati uticaj integracije baterijskog skladišta energije (BESS) (eng. *battery energy storage system*) na ostvarenu CP solarnih fotonaponskih elektrana. U tom smislu, izvršiće se simulacija različitih konfiguracija hibridnog sistema, primenom algoritma optimalnog upravljanja uz pretpostavku potpune informacije o budućim cenama, sa ciljem određivanja uticaja dodatog BESS u hibridnom sistemu na CP i potencijalnog povećanja tržišne vrednosti proizvodnje, kako na nivou modela koji je korišćen za procenu vrednosti CP, tako i za referentnu elektranu koja se koristi za verifikaciju rezultata.

Na kraju, u zaključku rada će se razmotriti implikacije nalaza na

[1] Kanibalizacija cene označava pad ostvarene tržišne vrednosti proizvodnje iz varijabilnih obnovljivih izvora usled njihove vremenske koncentracije i povećane penetracije u sistemu, što dovodi do nižih cena u satima visoke proizvodnje.

buduće tržišno pozicioniranje solarnih i hibridnih sistema u Srbiji, posebno u pogledu daljeg rasta instaliranih kapaciteta i promena strukture tržišta električne energije.

II METODOLOŠKI PRISTUP ODREĐIVANJU CP NA NIVOU SRBIJE

Vodeće međunarodne agencije (kao što su IEA, IRENA i dr.) redovno objavljuju vrednosti CP i CR po pojedinim tehnologijama na nivou pojedinih država ili tržišnih zona. U skladu sa navedenom praksom, CP predstavlja prosečnu cenu električne energije ostvarenu na tržištu, ponderisanu stvarnom satnom proizvodnjom posmatranog postrojenja (ili grupe postrojenja), pa se stoga definiše kao:

$$CP = \frac{\sum_{t=1}^{N} \lambda_t \cdot E_t}{\sum_{t=1}^{N} E_t} \quad (1)$$

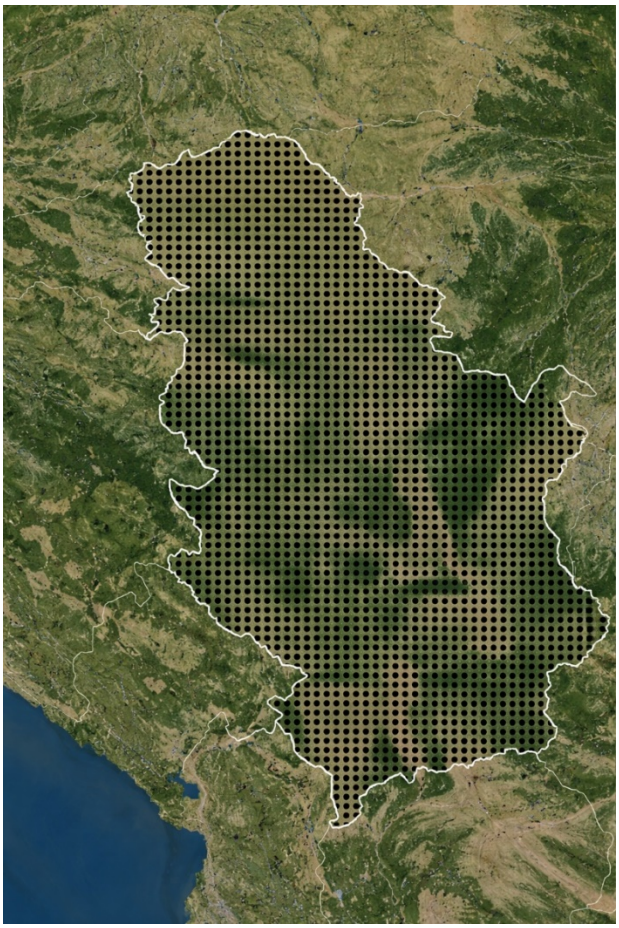
gde je λ_t satna cena električne energije na dnevnom tržištu, a E_t satna proizvodnja elektrane.

Metodološki najadekvatniji pristup za proračun CP podrazumeva korišćenje stvarnih satnih podataka o agregiranoj proizvodnji po tehnologijama, koji su za većinu EU zemalja dostupni putem ENTSO-E Transparency Platform[2], uz kombinovanje sa odgovarajućim satnim cenama sa relevantnog tržišta. Na taj način dobija se reprezentativna vrednost tržišne cene za celokupnu tehnologiju na nivou države, čime se eliminišu efekti vezani za lokaciju pojedinačne elektrane i omogućava uporedivost rezultata između zemalja. Naime, pojedinačno postrojenje reflektuje specifične karakteristike koje su vezane za lokaciju elektrane (mikro-klima, nagib i orijentacija modula, lokalna oblačnost, potencijalna ograničenja nametnuta od strane operatora mreže), što može dovesti do odstupanja u odnosu na prosečno tržišno ponašanje cele tehnologije. Ovakav pristup je naročito značajan u analizama efekta kanibalizacije, jer efekat pada CR zavisi prvenstveno od ukupnog udela tehnologije u sistemu, a ne od performansi pojedinačne elektrane. Zbog toga se u međunarodnoj praksi CP i CR po tehnologijama gotovo uvek definišu na nivou tržišne zone ili države, što omogućava uporedivost rezultata između zemalja i kroz vreme.

Uzimajući u obzir da agregirani satni podaci o proizvodnji svih SFNE u Srbiji nisu javno dostupni, u ovom radu je predložen i primenjen aproksimativni pristup koji metodološki prati princip nacionalne agregacije. U nedostatku stvarnih agregiranih podataka ideja je da se modeluje uniformno raspoređena flota SFNE na celokupnoj teritoriji Republike Srbije, i da se na osnovu poznatih meteoroloških podataka, zasnovanih na ERA5 meteorološkoj reanalizi Copernicus Climate Change Service[3], odrede satne proizvodnje (energetski prinosi) kroz pojednostavljeni, ali fizički konzistentan model satne proizvodnje zasnovan na globalnoj iradijaciji i temperaturnoj korekciji snage za tako modelovanu flotu solarnih elektrana.

Da bi modelovali uniformno raspoređenu SFNE flotu, najpre su iz baze ERA5 za sve sate u prethodne tri godine, preuzete sve dostupne tačke za teritoriju Srbije ERA5 rezolucije (~0.25° × 0.25°). Na taj način je preuzeto tačno 357 tačaka ravnomerno raspoređenih na teritoriji Srbije, kao što je prikazano na Slici 1. Za svaku tačku su preuzete sledeće vrednosti:

- globalno horizontalno zračenje pri tlu (eng. *Surface Solar Radiation Downwards*) - SSRD, [J/m²],
- temperatura vazduha na 2 m visine, T_{2m}, [K].



Slika 1. Grafička reprezentacija tačaka koje učestvuju u formiranju modela SFNE flote Srbije

Nakon toga je, korišćenjem softverskog alata CDO[4] (Climate Data Operators), izvršena prostorna agregacija po satu:

$$\bar{SSRD}(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} SSR\ D_i(t), \bar{T}_{2m}(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} T_{2m,i}\ (t) \quad (2)$$

čime je, posle konverzije podataka o zračenju i temperaturi u odgovarajuće jedinice (W/m² i °C) dobijen reprezentativni satni meteorološki profil na nivou države.

Sledeći korak je modeliranje i proračun satnih proizvodnji ovako modelirane uniformne SFNE flote Srbije. Za određivanje trenutne proizvodnje SFNE se u praksi mogu koristiti različiti modeli koji se, u skladu sa svojim nivoom složenosti, mogu svrstati u tri osnovne grupe:

- fizički detaljni modeli, najvećeg stepena složenosti, koji su zasnovani na jedno-diodnoj (*single-diode*) formulaciji strujno-naponske (*I–V*) karakteristike modula,
- polu-empirijski modeli, srednjeg nivoa složenosti, koji kombinuju transpoziciju sunčeve iradijacije i temperaturne korekcije efikasnosti, i

[2] https://transparency.entsoe.eu/
[3] https://climate.copernicus.eu/
[4] https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo

- pojednostavljeni modeli, koji su zasnovani na globalnom zračenju i linearnim korekcijama.

Izbor modela prvenstveno zavisi i od cilja analize, odnosno, da li se analiziraju tehničke procene energetskog prinosa ili tržišne procene vrednosti proizvodnje. S obzirom da je primarni cilj ovog rada procena tržišnih parametara, a ne precizna tehnička procena energetskog prinosa elektrane, u ovom istraživanju primenjen je pojednostavljeni, ali fizički konzistentan model satne proizvodnje zasnovan na globalnoj iradijaciji i temperaturnoj korekciji snage. Time se zadržava ključni element za analizu tržišne vrednosti – vremenska raspodela proizvodnje, ali se smanjuju ulazne pretpostavke.

Satna proizvodnja po jedinici instalisane snage (1 kWp) modelovana je kao:

$$g(t) = \frac{1}{1000} \cdot \frac{SSRD(t)}{3600} \cdot (1 - L_{sys}) \cdot [1+\gamma_P(T_{cell}(t) - 25)] \quad (3)$$

gde su:

- $g(t)$ proizvodnja po 1 kWp u satu t,
- globalno horizontalno zračenje pri tlu izraženo u W/m^2 $(SSRD(t)/3600)$ koje je deljenjem sa 1000 normalizovano na STC uslove,
- L_{sys} zbirni sistemski gubici,
- γ_P temperaturni koeficijent snage,
- $T_{cell}(t)$ temperatura ćelije PV panela.

U ovom radu usvojeno je: $T_{cell}(t) \approx T_{2m}(t)$ što predstavlja konzervativnu aproksimaciju, jer detaljniji modeli [2] uvode dodatnu zavisnost od vetra i iradijanse.

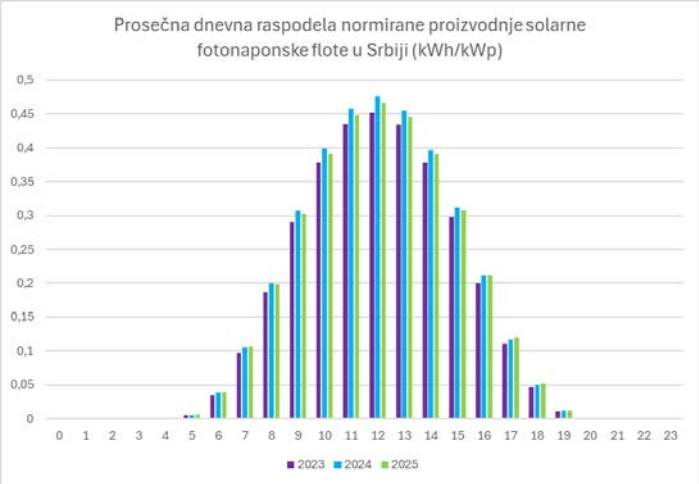
Dalje, zbirni sistemski gubici fotonaponskog sistema u ovom radu pretpostavljeni su na nivou $L_{sys} = 0.15$, što predstavlja tipičnu vrednost korišćenu u analizama proizvodnje fotonaponskih elektrana i obuhvata gubitke u invertorima, DC i AC kablovima, gubitke usled neusklađenosti modula[5], zaprljanje modula i druge operativne gubitke sistema. Ovakva agregirana pretpostavka često se koristi u modelima proizvodnje zasnovanim na meteorološkim podacima, naročito kada se modeluje reprezentativna flota postrojenja na nivou države [3].

Temperaturni koeficijent snage modula uzet je kao $\gamma_P = -0{,}0045/\circ\mathrm{C}$ što odgovara tipičnoj vrednosti za kristalne silicijumske foto-naponske module i predstavlja pad izlazne snage od približno 0,45% po °C povećanja temperature ćelije u odnosu na referentnu temperaturu od 25 °C [2].

Usvajanje jedinstvenih vrednosti zbirnih sistemskih gubitaka i temperaturnog koeficijenta predstavlja uobičajenu aproksimaciju u makroskopskim analizama proizvodnje, gde je cilj reprodukcija reprezentativnog proizvodnog profila tehnologije na nivou tržišne zone, a ne detaljno modelovanje performansi pojedinačne elektrane.

III Rezultati procene CP u Srbiji

Na osnovu prethodno definisanog modela određena je satna normirana proizvodnja $g(t)$ za svaku godinu posmatranog perioda. Radi ilustracije i preglednijeg prikaza dobijenog karakterističnog proizvodnog profila uniformne SFNE flote Srbije, satne vrednosti normirane proizvodnje $g(t)$ agregirane su na nivo prosečnog dana. Prosečna vrednost proizvodnje određena je za svaki sat u toku dana na osnovu svih satnih vrednosti u posmatranoj godini, čime je dobijen reprezentativni dnevni profil proizvodnje SFNE flote, koji je prikazan na slici 2.



Slika 2. Prosečna dnevna raspodela normirane proizvodnje uniformne SFNE flote Srbije

Dalje, u tabeli 1 prikazane su dobijene agregirane godišnje vrednosti specifičnog prinosa uniformne SFNE flote Srbije.

Tabela 1. Agregirane godišnje vrednosti specifičnog prinosa uniformne SFNE flote Srbije

Godina	Specifična proizvodnja (kWh/kWp)	Ekvivalentni puni sati rada (h)
2023.	1.228,20	1.228
2024.	1.296,05	1.296
2025.	1.278,95	1.279

Potrebno je naglasiti da specifična proizvodnja dobijena za model uniformno raspoređene flote ne predstavlja prinos karakterističan za optimalne pojedinačne lokacije, već prostorno reprezentativnu vrednost za teritoriju cele Srbije. Pojedinačne SFNE koje su locirane na konkretnom lokalitetu sa povoljnijim solarnim resursom, uglavnom ostvaruju značajno viši specifični prinos od nacionalnog proseka modelovanog u ovom radu.

Prikazani dnevni profil proizvodnje i godišnji specifični prinosi potvrđuju da model uniformno raspoređene flote daje reprezentativan opis vremenske raspodele i intenziteta proizvodnje solarne tehnologije na nivou Srbije. Sledeći korak u analizi jeste određivanje njene tržišne vrednosti, odnosno izračunavanje CP za svaku posmatranu godinu. U tom cilju, satni profil proizvodnje uparen je sa odgovarajućim ostvarenim satnim cenama na tržištu „dan unapred“ na SEEPEX [4], na način kako

[5] Gubici usled neusklađenosti modula (eng. *mismatch losses*) nastaju zbog razlika u električnim karakteristikama pojedinačnih fotonaponskih modula ili nizova modula, koje mogu biti posledica proizvodnih tolerancija, neujednačenog zagrevanja, zaprljanja ili delimičnog zasenjivanja. U serijski povezanim nizovima, ukupna izlazna snaga ograničena je modulom sa najnižom strujom, što dovodi do smanjenja ukupne proizvodnje sistema.

je to opisano jednačinom (1), čime su dobijene godišnje vrednosti CP za period 2023–2025, a koje su prikazane u tabeli 2.

Tabela 2. Proračunate godišnje vrednosti CP za Srbiju, ostvarena prosečna cena na tržištu „dan unapred“ na SEEPEX i ostvareni CR

Godina	*Capture Price* (EUR/MWh)	Prosečna godišnja cena (EUR/MWh)	*Capture Rate* (%)
2023.	88,51	103,46	85,55
2024.	77,74	101,76	76,40
2025.	67,19	107,87	62,29

U cilju validacije primenjenog metodološkog pristupa, izvršena je i procena ostvarene tržišne cene za jednu referentnu solarnu fotonaponsku elektranu u Srbiji, korišćenjem stvarno izmerenih satnih podataka o proizvodnji. Kao referentna elektrana uzeta je SFNE DeLasol u vlasništvu preduzeća MT Komex d.o.o, koja se nalazi na području opštine Lapovo i ima instalisanu snagu od 11.760 kWp [5]. Elektrana je puštena u rad 2023. godine, pa su stoga korišćeni podaci za 2024. i 2025. godinu. Projektovana godišnja proizvodnja iznosi približno 15,7 GWh, pri čemu se proizvedena električna energija plasira u elektrodistributivni sistem.

Na osnovu satnog proizvodnog profila ove elektrane i odgovarajućih satnih cena električne energije na tržištu „dan unapred“, primenom istog izraza (1), izračunata je ostvarena ponderisana tržišna cena za posmatrane godine, što je prikazano tabelom 3.

Tabela 3. Proračunate godišnje vrednosti CP za SFNE DeLasol, ostvaren specifični prinos i ostvareni CR

Godina	CP (EUR/MWh)	Specifična proizvodnja (kWh/kWp)	CR (%)
2024.	76,22	1.633,84	74,90
2025.	66,09	1.600,13	61,27

Dobijeni rezultati zatim su upoređeni sa vrednostima CP dobijenim na osnovu modela uniformno raspoređene flote na teritoriji Srbije. Poređenje pokazuje da odstupanja između modelovanih i stvarnih vrednosti iznose do 2% (relativna greška je 1,99% za 2024. godinu i 1,66% za 2025. godinu), što potvrđuje da model uniformno raspoređene flote predstavlja adekvatnu aproksimaciju proizvodnog profila solarnih fotonaponskih elektrana na nivou Srbije i može se koristiti za analizu njihove tržišne vrednosti.

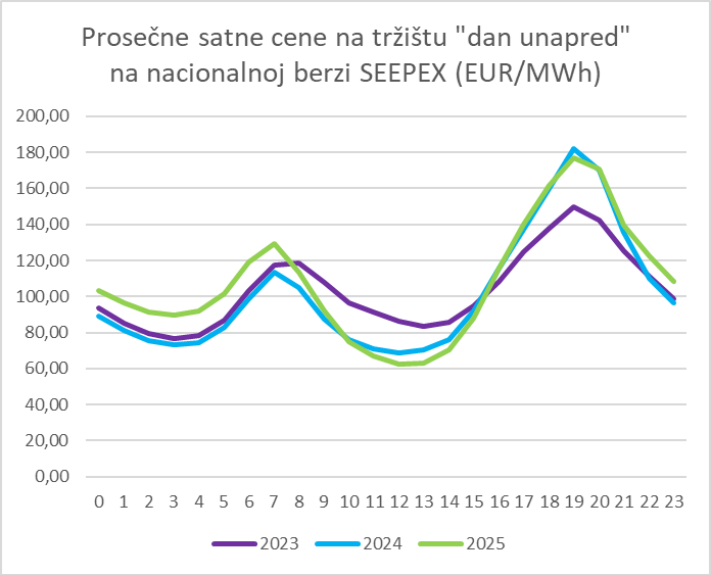
Vidi se da CP za uniformnu flotu Srbije u posmatranom periodu opada redom za 12,17% (2024. u odnosu na 2023.) i 13,57% (2025. u odnosu na 2024.), a slično se dobija i u slučaju SFNE DeLasol, 15,33% (2025. u odnosu na 2024.), odnosno da postoji prisutan efekat kanibalizacije uprkos relativno stabilnim ili čak rastućim godišnjim prosečnim cenama na tržištu električne energije u Srbiji.

U posmatranom periodu (2023 – 2025. godina) je zabeležen rast instalisanih kapaciteta SFNE u Srbiji. Ukupna instalisana snaga solarnih elektrana porasla je sa približno 100 MW u 2023. godini na oko 318 MW u 2025. godini, uz značajno povećanje novih instalacija tokom 2024. i 2025. godine [6]. Uprkos tom rastu, ukupni kapacitet SFNE u Srbiji i dalje je relativno skroman i njegov apsolutni nivo ostaje relativno nizak u poređenju sa kapacitetima u susednim tržišnim zonama. Naime, u državama regiona instalirani kapaciteti SFNE dostižu višestruko veće vrednosti, na primer oko 5,8 GW u Mađarskoj, oko 2,9 GW u Rumuniji i oko 3,1 GW u Bugarskoj [7].

Prethodno ukazuje da uočeni efekti pada cena u dnevnim satima na SEEPEX tržištu su u manjoj meri posledica rasta proizvodnje iz domaćih solarnih elektrana, i da su u značajnoj meri povezani sa kretanjima na integrisanom evropskom tržištu električne energije.

Naime, u uslovima integrisanih evropskih tržišta i prekogranične trgovine električnom energijom, niske ili negativne cene koje se javljaju na tržištima sa visokim udelom solarne proizvodnje mogu se putem prekograničnih tokova preneti i na susedne tržišne zone. U takvim situacijama dolazi do povećanog uvoza električne energije u satima visoke solarne proizvodnje u regionu, što se reflektuje i na formiranje cena na SEEPEX tržištu „dan unapred“, čak i u situaciji kada domaći solarni kapaciteti još uvek nisu dostigli nivo koji bi samostalno mogao proizvesti izražen efekat kanibalizacije cena.

Stoga je u cilju dodatne analize vremenske strukture cena električne energije na tržištu „dan unapred“, izvršena i analiza prosečnih satnih cena za svaku od posmatranih godina. Na slici 3 prikazana je raspodela prosečnih satnih cena na SEEPEX tržištu za period 2023–2025.



Slika 3. Prosečne satne cene na tržištu „dan unapred“ na nacionalnoj berzi SEEPEX

Sa slike 3 se može uočiti da se u svim posmatranim godinama javlja karakterističan dnevni obrazac formiranja cena električne energije, sa minimumom u periodu od 12 do 13 časova i maksimumom u periodu od 19 do 20 časova (često se takav dnevni obrazac u literaturi opisuje pojmom *„duck curve“*). Istovremeno, uočava se trend povećanja dnevnog raspona cena (eng. *price spread*), odnosno razlike između minimalnih i maksimalnih dnevnih cena, pri čemu je taj odnos najizraženiji u 2025. godini. Ovo povećanje razlike između dnevnog minimuma i večernjeg maksimuma dnevnog raspona cena ukazuje na pad

CP, ali sa druge strane predstavlja ključni signal za potencijalnu primenu energetskih skladišta. U takvim uslovima BESS mogu omogućiti vremensko pomeranje proizvodnje iz perioda nižih cena u periode viših cena, čime se povećava ostvarena tržišna vrednost proizvodnje solarnih elektrana.

U tom kontekstu, u nastavku rada analiziran je potencijal povećanja ostvarene tržišne cene SFNE primenom BESS u hibridnoj konfiguraciji kroz simulaciju arbitražne strategije na tržištu „dan unapred". Razvoj ovakvih hibridnih konfiguracija dodatno je podstaknut značajnim padom investicionih troškova BESS u poslednjim godinama što je značajno unapredilo ekonomsku opravdanost njihove primene, i omogućilo njihovu primenu u svrhu tržišne arbitraže i povećanja tržišne vrednosti proizvodnje.

IV Analiza uticaja BESS na ostvarenu CP SFNE

Baterijska skladišta energije omogućavaju vremensko pomeranje proizvodnje električne energije iz perioda nižih tržišnih cena u periode viših cena. U slučaju solarnih elektrana, ovo se najčešće odnosi na pomeranje proizvodnje iz dnevnih sati, kada je proizvodnja SFNE najveća, a cene na tržištu najmanje (često i negativne), u večernje sate, kada proizvodnja iz SFNE opada ili je i nema, dok su cene električne energije uglavnom na maksimalnim vrednostima. Na taj način hibridne elektrane (SFNE+BESS) mogu ostvariti višu ponderisanu tržišnu cenu u odnosu na samostalne solarne elektrane.

U cilju analize uticaja BESS na CP u hibridnoj konfiguraciji SFNE+BESS, u radu su razmatrane dve konfiguracije BESS sistema:

- BESS čija je snaga 25% instalisane snage SFNE sa trajanjem skladištenja 2 sata, i
- BESS čija je snaga 50% instalisane snage SFNE sa trajanjem skladištenja 2 sata.

Ove dve konfiguracije izabrane su kao reprezentativne za hibridne elektrane koji se razmatraju u svrhu tržišne arbitraže. Analize međunarodnih institucija pokazuju da se u savremenim projektima velikih solarnih elektrana najčešće primenjuju baterijski sistemi čija snaga iznosi približno 20–60% instalisane snage solarne elektrane, uz trajanje skladištenja od 2 do 4 sata [8, 9]. Budući da se prosečna razlika u ceni smanjuje sa povećanjem trajanja skladištenja (slika 3), za razmatrane konfiguracije je izabrano trajanje skladištenja od 2 sata.

Rad BESS modelovan je kao problem maksimizacije prihoda od prodaje električne energije na tržištu „dan unapred", uz pretpostavku da se BESS može puniti samo sa energijom proizvedenom u SFNE, bez preuzimanja energije iz mreže. Zadatak algoritma upravljanja BESS jeste određivanje optimalnog rasporeda njegovog punjenja i pražnjenja u toku vremena (u toku jednog dana), uz uvažavanje tehničkih ograničenja sistema. Radi ilustracije, za primer dnevnog dijagrama sa slike 3, BESS bi se punio u 12 i 13 satu, a praznio u 19 i 20 satu.

Matematički, cilj algoritma može se predstaviti kao maksimizacija ukupnog prihoda u posmatranom periodu:

$$\max \sum_{t=1}^{T} \lambda(t) \cdot E_{grid}(t) \tag{4}$$

gde su:

- $\lambda(t)$– cena električne energije u satu t na tržištu „dan unapred",
- $E_{grid}(t)$– količina energije koju hibridna elektrana isporuči u mrežu u satu t,
- T – broj vremenskih intervala u posmatranom periodu.

Količina energije isporučena u mrežu predstavlja zbir direktne proizvodnje SFNE i energije isporučene iz BESS:

$$E_{grid}(t) = E_{PV}(t) - E_{charge}(t) + E_{discharge}(t) \tag{5}$$

gde su:

- $E_{PV}(t)$– proizvodnja SFNE,
- $E_{charge}(t)$– energija koja se skladišti u BESS,
- $E_{discharge}(t)$ – energija koja je isporučena iz BESS u mrežu.

Rad BESS dodatno je ograničen tehničkim karakteristikama sistema. Naime, stanje napunjenosti BESS se mora nalaziti u dozvoljenom opsegu:

$$SoC_{\min} \leq SoC(t) \leq SoC_{\max} \tag{6}$$

gde su $SoC_{\min}$ i $SoC_{\max}$ minimalno i maksimalno dozvoljeno stanje napunjenosti baterije, koji su usvojeni na 10%, odnosno na 90%, respektivno. U praksi se često preporučuje ograničavanje radnog opsega stanja napunjenosti baterije na približno 20–80% odnosno dubina pražnjenja (DoD) (eng. d*epth of discharge*) od 60%, kako bi se usporila degradacija litijum-jonskih ćelija i produžio životni vek BESS sistema [10]. U okviru ove analize usvojen je nešto širi opseg rada od 10–90% (DoD=80%), što predstavlja kompromis između realističnog operativnog režima baterije i potrebe da se u analizi obuhvati veći deo raspoloživog energetskog kapaciteta sistema. Na osnovu rezultata eksperimentalnih studija [11] prethodno ima za posledicu smanjenje životnog veka BESS za približno 25 – 35%, što svakako treba uzeti u obzir prilikom vršenja finansijskih analiza.

Maksimalna energija kojom se BESS može puniti ili prazniti u jednom vremenskom intervalu ograničena je nazivnom snagom BESS:

$$0 \leq E_{charge}(t) \leq P_{BESS}\Delta t,\ 0 \leq E_{discharge}(t) \leq P_{BESS}\Delta t \tag{7}$$

Promena stanja napunjenosti BESS između dva uzastopna vremenska koraka određena je energijom punjenja i pražnjenja uz uvažavanje efikasnosti procesa (eng. *round-trip efficiency*):

$$SoC(t+1) = SoC(t) + \eta_{ch}E_{charge}(t) - \frac{E_{discharge}(t)}{\eta_{dis}} \tag{8}$$

Ukupna efikasnost ciklusa punjenja η_{ch} i pražnjenja η_{dis} je za potrebe ovog rada modelovana sa jedinstvenom vrednošću od 0,9 što je uobičajena vrednost koja se koristi u literaturi [8].

U cilju simulacije rada hibridnog sistema razvijen je satni algoritam upravljanja baterijskim skladištem energije koji je potrebe ovog rada implementiran kao programski modul u Excel VBA okruženju. Algoritam za svaki sat određuje režim rada BESS na osnovu tržišne cene električne energije, raspoložive proizvodnje SFNE i trenutnog stanja napunjenosti baterije (*SoC (t)*).

U svakom vremenskom koraku BESS može biti u jednom od tri

režima rada: punjenje, pražnjenje ili mirovanje. Odluka o režimu rada donosi se uz uvažavanje tehničkih ograničenja baterijskog sistema, uključujući maksimalnu snagu punjenja i pražnjenja, raspoloživi energetski kapacitet baterije BESS i dozvoljeni opseg stanja napunjenosti BESS.

Simulacija rada BESS je u ovom radu zasnovana na pretpostavci potpune informacije o budućim cenama električne energije (tzv. *perfect foresight* pristup). Naravno, u praksi to nije uvek slučaj, jer se odluke o punjenju i pražnjenju donose na osnovu prognoze cena koja se radi u danu *D-1* za dan *D*. Ipak, ovakav idealizovan pristup je izabran jer omogućava procenu maksimalnog teorijskog potencijala povećanja tržišne vrednosti proizvodnje hibridne elektrane uz primenu BESS, dok bi u realnim uslovima ostvareni rezultati mogli biti nešto niži zbog neizvesnosti u prognozi cena. Pored toga, simulacija rada BESS je zasnovana i na pretpostavci da se ciklus punjenja i pražnjenja odvija jednom u toku dana.

Na osnovu prethodno opisanog modela izvršena je simulacija rada hibridnih elektrana za slučaj uniformne SFNE flote Srbije (SFNE+BESS flota Srbije), kao i za korišćenu referentnu SFNE DeLasol (SFNE+BESS DeLasol), za posmatrane godine. Za svaku od razmatranih konfiguracija sistema izračunata je CP na osnovu korigovanog satnog profila isporuke električne energije u mrežu. Rezultati simulacije, uključujući poređenje između SFNE bez baterijskog skladišta i hibridnih konfiguracija sa BESS sistemom, prikazani su sledećim tabelama.

Tabela 4. Godišnje vrednosti CP za različite konfiguracije sistema za slučaj uniformne SFNE flote Srbije

Konfiguracija sistema	2023 CP (€/MWh)	2024 CP (€/MWh)	2025 CP (€/MWh)
SFNE (bez BESS)	88,51	77,74	67,19
SFNE+BESS (25%, 2 sata)	97,11	92,16	81,63
SFNE+BESS (50%, 2 sata)	105,54	106,34	96,02

Tabela 5. Godišnje vrednosti CP za različite konfiguracije sistema za slučaj SFNE DeLasol

Konfiguracija sistema	2024 CP (€/MWh)	2025 CP (€/MWh)
SFNE (bez BESS)	76,22	66,09
SFNE+BESS (25%, 2 sata)	87,48	77,43
SFNE+BESS (50%, 2 sata)	98,30	88,47

Dobijeni rezultati pokazuju da integracija BESS značajno povećava ostvarenu tržišnu cenu hibridne elektrane. Efekat je izraženiji kod konfiguracije sa većom instalisanom snagom baterijskog sistema, što potvrđuje da veći odnos snage baterije i snage SFNE omogućava veći obim vremenskog pomeranja proizvodnje između perioda nižih i viših tržišnih cena.

Poređenje rezultata za model uniformno raspoređene SFNE flote Srbije i referentnu SFNE DeLasol pokazuje da je relativno povećanje CP nešto manje kod referentne elektrane. Razlog za to leži u činjenici da SFNE DeLasol ostvaruje značajno višu specifičnu proizvodnju, koja je reda veličine oko 1600 kWh/kWp godišnje, što je približno 25% više u odnosu na model uniformne SFNE flote za teritoriju Srbije.

Pošto BESS u oba slučaja radi pod istim tržišnim uslovima i prati sličan obrazac dnevne arbitraže, godišnji energetski izlaz BESS ostaje približno sličan. Međutim, zbog veće proizvodnje SFNE DeLasol, relativni odnos energije koja prolazi kroz BESS u odnosu na ukupnu proizvodnju hibridne elektrane je manji. Zbog toga je i relativni uticaj BESS na povećanje CP nešto niži nego u slučaju modela uniformne SFNE flote Srbije.

V ZAKLJUČAK

U radu je razvijen metodološki okvir za procenu ostvarene ponderisane tržišne cene proizvodnje (*capture price*) solarnih fotonaponskih elektrana u Srbiji u uslovima ograničene dostupnosti agregiranih satnih podataka o proizvodnji. U tu svrhu primenjen je pristup zasnovan na modelovanju uniformno raspoređene flote solarnih elektrana na teritoriji Srbije korišćenjem meteoroloških podataka ERA5 reanalize i satnih cena sa tržišta „dan unapred“ na berzi SEEPEX.

Dobijeni rezultati pokazuju da se CP solarnih fotonaponskih elektrana u Srbiji u periodu 2023–2025 smanjuje uprkos relativno stabilnim ili rastućim prosečnim tržišnim cenama električne energije. CP uniformne SFNE flote Srbije je opao sa 88,51 EUR/MWh u 2023. godini na 67,19 EUR/MWh u 2025. godini, dok je CR u istom periodu smanjen sa 85,55% na 62,29%. Ovaj trend ukazuje na prisustvo efekta kanibalizacije cena, pri čemu izvršena analiza u radu sugeriše da se deo ovog efekta prenosi na SEEPEX tržište putem prekogranične trgovine električnom energijom, odnosno da i tržišta sa relativno malim instaliranim PV kapacitetom, kao što je to u slučaju Srbije, mogu doživeti efekat kanibalizacije cena zbog integracije regionalnih tržišta električne energije.

Validacija modela izvršena je poređenjem sa stvarnim satnim podacima o proizvodnji referentne elektrane DeLasol, pri čemu su odstupanja između modelovanih i izračunatih vrednosti CP manja od 2%. Ovakav rezultat potvrđuje da pristup zasnovan na modelu uniformno raspoređene flote može predstavljati pouzdanu aproksimaciju proizvodnog profila solarne tehnologije na nivou države u situacijama kada agregirani podaci nisu dostupni.

U drugom delu rada analiziran je uticaj integracije baterijskog skladišta energije u hibridnoj konfiguraciji SFNE+BESS. Simulacije pokazuju da primena baterijskog skladišta može značajno povećati ostvarenu tržišnu cenu solarne proizvodnje. U slučaju modela uniformne flote povećanje CP dostiže približno 10–18% za konfiguraciju instalisane snage BESS od 25% instalisane snage SFNE, odnosno do oko 40% u slučaju konfiguracije snage instalisane snage BESS od 50% instalisane snage SFNE.

Poređenje sa referentnom elektranom pokazuje da je relativno povećanje CR nešto manje kod postrojenja sa višom specifičnom proizvodnjom. Ovaj rezultat ukazuje da relativni efekat baterijskog skladišta zavisi ne samo od strukture tržišnih cena već i od odnosa između proizvodnog profila SFNE i dimenzionisanja BESS.

Rezultati rada ukazuju da integracija baterijskog skladišta energije može predstavljati efikasan način povećanja tržišne vrednosti solarne proizvodnje u uslovima rastuće volatilnosti cena i izraženijeg dnevnog cenovnog raspona na tržištu električne energije.

Sa porastom udela varijabilnih obnovljivih izvora energije u elektroenergetskom sistemu povećava se potreba za fleksibilnim resursima koji mogu obezbediti usluge balansiranja sistema. U tom kontekstu, baterijska skladišta energije integrisana sa solarnim elektranama mogu predstavljati značajan resurs za pružanje balansnih usluga, što otvara dodatne mogućnosti za optimizaciju prihoda hibridnih elektrana. Stoga će dalja istraživanja, koja autori nameravaju da sprovedu, obuhvatiti razvoj modela optimizacije rada hibridnih elektrana koji, pored arbitraže na spot tržištu električne energije, uključuju i učešće na balansnom tržištu (tržište balansnih kapaciteta i balansne energije) kroz višeslojno ostvarivanje prihoda (eng. *value stacking*).

LITERATURA

[1] Hirth, L. The market value of variable renewables, Energy Economics, Vol. 38, pp. 218-236, 2013. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.02.004

[2] Faiman, D. Assessing the outdoor operating temperature of photovoltaic modules, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, Vol. 16, No. 4, pp. 307-315, 2008. https://doi.org/10.1002/pip.813

[3] Huld, T., Müller, R., Gambardella, A. A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa, Solar Energy, Vol. 86, No. 6, pp. 1803-1815, 2012. https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.03.006

[4] SEEPEX podaci o tržištu, https://seepex-spot.rs/day-ahead-market-data [pristupljeno 09.02.2026]

[5] MT-KOMEX d.o.o. podaci o projektu, https://mt-komex.co.rs/solarna-elektrana-delasol [pristupljeno 09.02.2026]

[6] Jowett, P. Serbia installs 134.3 MW of solar in 2025, PV Magazine, 2026. https://www.pv-magazine.com/2026/01/27/serbia-installs-134-3-mw-of-solar-in-2025/ [pristupljeno 09.02.2026.]

[7] IRENA, Renewable Capacity Statistics 2024, https://www.irena.org/publications [pristupljeno 09.02.2026]

[8] IEA, Grid-scale storage tracking report 2023, https://www.iea.org/reports/grid-scale-storage [pristupljeno 10.02.2026]

[9] Bolinger, M., Seel, J., Kemp, J.M., Warner, C., Katta, A., Robson, D. Utility-scale solar 2023 edition: empirical trends in project technology, cost, performance, and PPA pricing in the United States: Report, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2023. https://emp.lbl.gov/publications/utility-scale-solar-2023-edition [pristupljeno 10.02.2026]

[10] Schmidt, O., Melchior, S., Hawkes, A., & Staffell, I., Projecting the future levelized cost of electricity storage technologies, Joule, Vol. 3, No. 1, pp. 81-100, 2019. https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.12.008

[11] BLAST: Battery Lifetime Analysis and Simulation Tool Suite. https://www.nlr.gov/transportation/blast [pristupljeno 10.02.2026]

AUTORI

mr Željko Marković, dipl. inž. el., SCITECH d.o.o. Beograd, markovic@scitech.rs, ORCID 0009-0009-4661-4917
Dejan Stojčevski, dipl. inž. el., SEEPEX a.d. Beograd, dejan.stojcevski@seepex-spot.rs, ORCID 0009-0006-2389-4264
Miloš Kostić, dipl. inž. maš., MT KOMEX d.o.o. Beograd, milos.kostic@mt-komex.co.rs, ORCID 0009-0007-4360-0267

Assessment of Capture Price and the Impact of Battery Energy Storage Integration on the Market Value of Solar Photovoltaic Power Plants in Serbia

Abstract – The increasing penetration of solar photovoltaic power plants (SPPs) and the growing volatility of wholesale electricity prices require revenue assessments that go beyond the simple use of average annual market prices. The achieved production-weighted market price (CP, Capture Price) represents a key indicator of the actual market value of PV generation. This paper presents an assessment of the CP of solar photovoltaic power plants in Serbia for the period 2023–2025. Due to the lack of publicly available aggregated hourly production data for all SPPs in Serbia, a methodological approach based on the ERA5 meteorological reanalysis published by the Copernicus Climate Change Service was developed to model a spatially uniform fleet of SPPs across the entire territory of Serbia. Realized hourly day-ahead market prices from the national power exchange SEEPEX were used for the calculation. The methodology was validated through comparison with measured hourly production data from a reference power plant for 2024 and 2025, with deviations of calculated values of the CP below 2%, confirming the robustness of the proposed approach. Furthermore, the impact of integrating a Battery Energy Storage System (BESS) was analyzed under two configurations (nominal power equal to 25% and 50% of the installed PV capacity, with a two-hour storage duration), using a simulation of an optimal dispatch algorithm assuming perfect foresight of future prices. The results indicate that BESS integration increases the CP but simultaneously enlarges the deviations of obtained values for the CP between the spatially uniform SPP fleet model and plant-level results for the reference facility (5–8%). The proposed framework provides a transparent and replicable methodology for assessing the market value of solar photovoltaic power plants and hybrid SPP (with BESS) systems in the Serbian electricity market in the coming years.

Index Terms – PV power plants, ERA5, Capture price, SEEPEX, BESS (battery energy storage system)

Rad primljen: 31.03.2026., prihvaćen: 21.08.2026.

doi: 10.46793/EEE26-3.14M

Originalni naučni rad
UDK 662.613:004.8

Predikcija toplotne moći uglja termoelektrane „Kostolac B" pomoću modela mašinskog učenja

Aleksandar Milićević, Srđan Belošević, Ivan Tomanović, Nenad Crnomarković, Milić Erić, Zoran Marković, Nikola Živković, Ivan Lazović

Laboratorija za termotehniku i energetiku, Institut za nuklearne nauke „Vinča" - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu

Rezime - Toplotna moć uglja predstavlja jedan od ključnih parametara za upravljanje procesom sagorevanja i energetskom efikasnošću termoelektrana. Njeno tačno određivanje od suštinskog je značaja za kontrolu potrošnje goriva, optimizaciju rada kotlova i smanjenje negativnih uticaja na životnu sredinu. Iako se toplotna moć uglja tradicionalno određuje laboratorijskim merenjima, ova procedura je vremenski zahtevna za kontinuirano praćenje kvaliteta goriva u realnim uslovima rada termoelektrane. U kontekstu rastućih zahteva za digitalizacijom energetskih sistema i razvojem prediktivnih metoda zasnovanih na bazama podataka, cilj ovog rada je razvoj modela mašinskog učenja za pouzdanu predikciju donje toplotne moći lignita korišćenog u termoelektrani „Kostolac B", na osnovu rezultata laboratorijskih merenja. Baza podataka sa rezultatima tehničke i elementarne analize lignita i donje toplotnoj moći uglja, formirana je na osnovu eksperimentalnih merenja u akreditovanom Odeljenju za karakterizaciju goriva u okviru Laboratorije za termoenergetiku i energetiku Instituta za nuklearne nauke "Vinča". U radu su razvijena tri metode mašinskog učenja na formiranoj bazi: *Linear Regression*, kao bazni, linearni model, *Random Forest* kao robustan ansambl-model zasnovan na agregaciji podataka tokom treninga modela (bagging) i *Gradient Boosting* kao napredna metoda zasnovana na sekvencijalnoj nadogradnji tzv. stabala odlučivanja (decision tree). Za predikciju toplotne moći na osnovu tehničke analize uglja, model linearne regresije je pokazao stabilne i pouzdane rezultate, dok složeniji nelinearni pristupi ne donose dodatnu korist. Pri predikciji toplotne moći zasnovanoj na elementarnoj analizi uglja, modeli linearne regresije i *Gradient Boosting* su ostvarili slične tačnosti na test skupu, pri čemu nelinearni pristupi omogućavaju modeliranje složenijih hemijskih odnosa. Rezultati studije pokazuju da izbor modela zavisi od složenosti dostupnih ulaznih podataka i specifičnih zahteva primene. Primena ovih modela omogućava bržu procenu kvaliteta uglja i podržava efikasnije operativno planiranje, čime se smanjuje potreba za laboratorijskim analizama.

Ključne reči - lignit, toplotna moć, laboratorijska merenja, modeli mašinskog učenja, termoelektrana

I UVOD

Termoelektrane na ugalj imaju značajnu ulogu u elektroenergetskom sistemu Republike Srbije, pri čemu lignit predstavlja dominantno gorivo. Efikasnost i pouzdanost rada termoelektrana zavise od kvaliteta uglja, koji je kod lignita izraženo promenljiv usled složenog i nehomogenog sastava goriva. Ova varijabilnost direktno utiče na sagorevanje goriva, emisije i ukupne performanse sistema [1].

Jedan od najvažnijih pokazatelja kvaliteta uglja jeste njegova toplotna moć, koja predstavlja osnovni parametar za termičke proračune i upravljanje radom kotlova. Toplotna moć se definiše kao količina toplote oslobođena pri potpunom sagorevanju goriva i značajno utiče na potrošnju goriva, stepen korisnosti kotlova, stabilnost procesa sagorevanja i emisije zagađujućih materija u atmosferu. Kod čvrstih fosilnih goriva, a naročito lignita, toplotna moć pokazuje značajnu varijabilnost usled promenljivog sadržaja vlage, pepela i sagorivih komponenti [2].

U zavisnosti od toga da li se uzima u obzir toplota kondenzacije vodene pare nastale sagorevanjem vodonika i isparavanjem vlage, razlikuju se gornja i donja toplotna moć. Donja toplotna moć (DTM) se u praksi najčešće koristi u energetskim proračunima i analizi rada termoelektrana. Kod lignita, koji se odlikuje visokim sadržajem vlage i pepela, razlika između gornje i donje toplotne moći je posebno izražena, što dodatno naglašava značaj njenog pouzdanog određivanja u realnim uslovima rada postrojenja [3]. Toplotna moć uglja se standardno određuje eksperimentalno u laboratorijskim uslovima, najčešće primenom kalorimetrijske bombe, u skladu sa međunarodnim standardom ISO 1928:2020 [4].

Iako ove metode obezbeđuju visoku tačnost i pouzdanost rezultata, njihova primena je ograničena u kontekstu brzog i kontinuiranog praćenja kvaliteta uglja. Ograničenja se prvenstveno odnose na vremensku zahtevnost ispitivanja, troškove analize i nemogućnost neposredne primene u operativnom upravljanju procesima sagorevanja. Dodatni problem u eksploataciji lignita predstavlja njegova nehomogenost, koja proizlazi iz geoloških karakteristika ležišta, različitih zona otkopavanja, kao i mešanja goriva tokom transporta i skladištenja. Promene u sadržaju vlage, pepela i sagorivih komponenti uzrokuju fluktuacije toplotne moći i mogu dovesti do nestabilnosti sagorevanja u kotlovima. Zbog toga se u savremenoj energetici javlja potreba za razvojem alternativnih metoda koje omogućavaju brzu, pouzdanu i dovoljno tačnu procenu energetske vrednosti goriva, uz smanjenje oslanjanja na česta laboratorijska ispitivanja [5].

Razvoj digitalnih tehnologija i metoda mašinskog učenja omogućio je značajan napredak u analizi eksperimentalnih podataka u energetici. Dosadašnja istraživanja pokazala su da

modeli mašinskog učenja mogu ostvariti visoku tačnost u predikciji toplotne moći uglja na osnovu rezultata tehničke i elementarne analize [6]. Prednost ovih modela ogleda se u njihovoj sposobnosti da identifikuju složene i nelinearne zavisnosti između ulaznih parametara i energetskih karakteristika goriva [7]. U tom kontekstu, posebno se ističu modeli nadgledanog učenja [8], koji omogućavaju direktno povezivanje laboratorijskih ulaznih karakteristika sa poznatim vrednostima donje toplotne moći. Ipak, dosadašnja istraživanja pokazuju da je efikasnost modela mašinskog učenja u velikoj meri zavisna od lokalnih karakteristika uglja, što naglašava potrebu za razvojem modela prilagođenih konkretnim termoelektranama [9].

Laboratorija za termoenergetiku i energetiku Instituta za nuklearne nauke „Vinča“ ima dugogodišnju saradnju sa AD „Elektroprivreda Srbije“ na realizaciji različitih projekata termotehničkih ispitivanja u domaćim termoelektranama. U okviru periodično-povremenih ispitivanja emisija zagađujućih materija u vazduh, sprovode se i detaljna određivanja fizičko-hemijskog sastava goriva u skladu sa standardima, uključujući rezultate tehničke i elementarne analize uglja, u akreditovanom odeljenju Laboratorije.

U ovom radu su na osnovu prikupljenih eksperimentalnih podataka razvijeni modeli nadgledanog mašinskog učenja za predikciju donje toplotne moći lignita koji se koristi u termoelektrani „Kostolac B“. Kao ulazne promenljive korišćeni su rezultati tehničke i elementarne analize uglja, dok je donja toplotna moć predstavljala izlaznu veličinu modela. Razvijeni su i upoređeni sledeći modeli: Linear Regression kao bazni linearni model, Random Forest kao ansambl-metoda zasnovana na bagging pristupu i Gradient Boosting kao napredna metoda sekvencijalne nadogradnje stabala odlučivanja. Cilj rada je procena tačnosti i pouzdanosti ovih modela u predikciji toplotne moći lignita, kao i analiza njihove primenljivosti u realnim radnim uslovima termoelektrane.

II OPIS TERMOELEKTRANE „KOSTOLAC B” I ANALIZA UZORAKA LIGNITA

Termoelektrana „Kostolac B“ (TEKO B) nalazi se oko 5 km istočno od termoelektrane „Kostolac A“ i približno 5 km od ušća reke Mlave u Dunav, na desnoj obali reke Mlave. Lokacija termoelektrane smeštena je između naselja Drmno, Bradarac, Kličevac, sela Kostolac i grada Kostolca. Proizvodnja električne energije u TEKO B zasniva se na transformaciji hemijske energije uglja u toplotnu energiju, koja se oslobađa sagorevanjem u kotlovskim postrojenjima. U turbinskim postrojenjima toplotna energija sadržana u radnom medijumu (vodenoj pari) pretvara se u mehaničku energiju, da bi se na kraju mehanička energija u generatoru transformisala u električnu energiju.

Na lokaciji TEKO B, blok B1 pušten je u pogon 1988. godine, dok je blok B2 uveden u rad tri godine kasnije. Oba bloka imaju nazivnu snagu od 348,5 MW i nalaze se u kontinuiranoj eksploataciji. Kotlovi u termoelektrani, tipa Sulzer, namenjeni su sagorevanju sprašenog uglja u letu.

Nakon uzorkovanja uglja u blokovima B1 i B2, uzorci se analiziraju u Odeljenju za karakterizaciju goriva, koje se bavi fizičko-hemijskim i fizičko-mehaničkim ispitivanjima uglja, koksa i pepela uglja, u okviru Laboratorije za termotehniku i energetiku, akreditovane prema standardu ISO 17025. Tehnička i elementarna analiza uglja određuju se pomoću termogravimetrijskog analizatora LECO TGA701 i elementarnog analizatora LECO 628s, redosledno (slika 1). Donja toplotna moć uglja se određuje korišćenjem kalorimetrijske bombe.

Periodična i povremena ispitivanja emisija zagađujućih materija u vazduh na blokovima B1 i B2 izvršena su u periodu od 2015. do 2025. godine. Dobijene vrednosti tehničke i elementarne analize nekoliko uzoraka lignita, zajedno sa odgovarajućim vrednostima donje toplotne moći, prikazane su u Tabeli 1.



Slika 1. Aparatura za elementarnu (LECO 628s**)** i tehničku **(**LECO TGA701) analizu uglja

Tabela 1. Hemijski sastav (tehnička i elementarna analiza) nekoliko uzoraka lignita termoelektrane „Kostolac B“

	2015-B2-2	2018-B1-1	2021-B2-4	2022-B1-3	2025-B2-3
Volatili [%]*	24,26	24,07	23,57	23,18	24,72
Vlaga [%]*	41,96	40,71	39,45	39,94	37,81
Pepeo [%]*	18,02	19,49	22,07	21,35	21,48
Fiksni ugljenik [%]*	15,76	15,73	14,91	15,53	15,99
Ugljenik [%]*	26,51	26,81	25,07	24,09	26,70
Vodonik [%]*	2,31	2,41	2,24	2,30	2,39
Kiseonik [%]*	10,15	9,49	10,13	11,34	10,55
Azot [%]*	0,42	0,37	0,37	0,32	0,40
Sagorljivi sumpor [%]*	0,63	0,72	0,67	0,66	0,67
Donja toplotna moć [kJ/kg]*	9037	9021	8728	8573	9339

* sa dostavnom vlagom

III MODELI MAŠINSKOG UČENJA

Linearna regresija predstavlja jedan od fundamentalnih modela mašinskog učenja, koji se koristi za modelovanje linearne zavisnosti između skupa ulaznih promenljivih i zavisne (ciljne) varijable [10]. Osnovna pretpostavka ovog modela jeste da se ciljna varijabla može izraziti kao linearna kombinacija ulaznih promenljivih i odgovarajućih regresionih koeficijenata, uz dodatak slučajne greške. Parametri modela se najčešće procenjuju metodom najmanjih kvadrata, čime se minimizuje suma kvadrata odstupanja između stvarnih i predviđenih vrednosti. Zbog svoje jednostavne matematičke formulacije i lake interpretabilnosti, linearna regresija omogućava uvid u uticaj pojedinačnih ulaznih promenljivih na izlaznu varijablu. Međutim, njena primena je ograničena u slučajevima kada su odnosi između promenljivih nelinearni ili kada postoje složene interakcije koje model ne može adekvatno da opiše. Uprkos tim ograničenjima, često se koristi kao bazni model i polazna tačka za poređenje sa složenijim metodama mašinskog učenja.

Random Forest je nelinearni ansambl-model zasnovan na kombinovanju velikog broja stabala odlučivanja, sa ciljem poboljšanja tačnosti i stabilnosti predikcije [11]. Ovaj model koristi tzv. tehniku *bootstrap aggregating* (*bagging*), pri čemu se svako stablo trenira na nasumično odabranom podskupu trening podataka, dobijenom uzorkovanjem sa vraćanjem [12]. Dodatno, pri svakoj podeli čvora (*node*) razmatra se samo slučajan podskup ulaznih obeležja, čime se smanjuje korelacija između pojedinačnih stabala i povećava raznovrsnost modela. Konačna predikcija dobija se agregacijom rezultata svih stabala, najčešće izračunavanjem prosečne vrednosti njihovih predikcija u regresionim problemima. Random Forest modeli su poznati po svojoj robusnosti, otpornosti na šum u podacima i smanjenoj sklonosti ka tzv. preprilagođavanju u poređenju sa pojedinačnim stablima odlučivanja. Zahvaljujući ovim karakteristikama, Random Forest se često koristi u problemima sa velikim brojem promenljivih i kompleksnom strukturom podataka.

Gradient Boosting predstavlja naprednu ansambl-metodu koja se zasniva na sekvencijalnoj izgradnji modela, gde se svaki novi model trenira tako da koriguje greške prethodnih modela [13]. Najčešće se kao bazni učenici koriste stabla odlučivanja ograničene dubine, dok se proces učenja zasniva na minimizaciji izabrane funkcije gubitka primenom gradijentnog spusta u prostoru funkcija. Za razliku od Random Forest metode, gde se stabla treniraju nezavisno jedno od drugog, Gradient Boosting uvodi zavisnost između uzastopnih modela, čime se omogućava precizno modelovanje složenih nelinearnih odnosa i interakcija između obeležja. Ovaj pristup često rezultuje visokom tačnošću predikcije, ali istovremeno zahteva pažljivo podešavanje hiperparametara, kao što su stopa učenja, broj stabala i njihova dubina, kako bi se izbeglo preprilagođavanje. Zbog toga se Gradient Boosting najčešće kombinuje sa tehnikama validacije i regularizacije u praktičnim primenama.

Evaluacija performansi modela je ključna za procenu njihove sposobnosti predikcije i generalizacije na testnoj bazi podataka. U ovom radu, tačnost modela je procenjena korišćenjem korena srednje kvadratne greške (RMSE) i srednje apsolutne procentualne greške (MAPE). Srednja apsolutna procentualna greška meri prosečno procentualno odstupanje predviđenih vrednosti od stvarnih vrednosti ciljne varijable. Ova metrika omogućava intuitivnu interpretaciju rezultata, jer grešku izražava u procentima, nezavisno od skale podataka. Niže vrednosti MAPE predstavlja bolju tačnost modela, a metrika je posebno pogodna za poređenje performansi različitih modela [14]. RMSE predstavlja standardnu devijaciju reziduala, odnosno prosečnu udaljenost predviđenih vrednosti od stvarnih. Niža vrednost RMSE podrazumeva veću preciznost predikcije, a ova metrika je posebno korisna kada se želi naglasiti apsolutna greška u istim jedinicama kao ciljne varijable [10]. Kombinacija RMSE i MAPE omogućava potpuniji uvid u performanse modela, jer MAPE pruža relativnu meru greške izraženu u procentima, dok RMSE kvantifikuje apsolutnu preciznost predikcije.

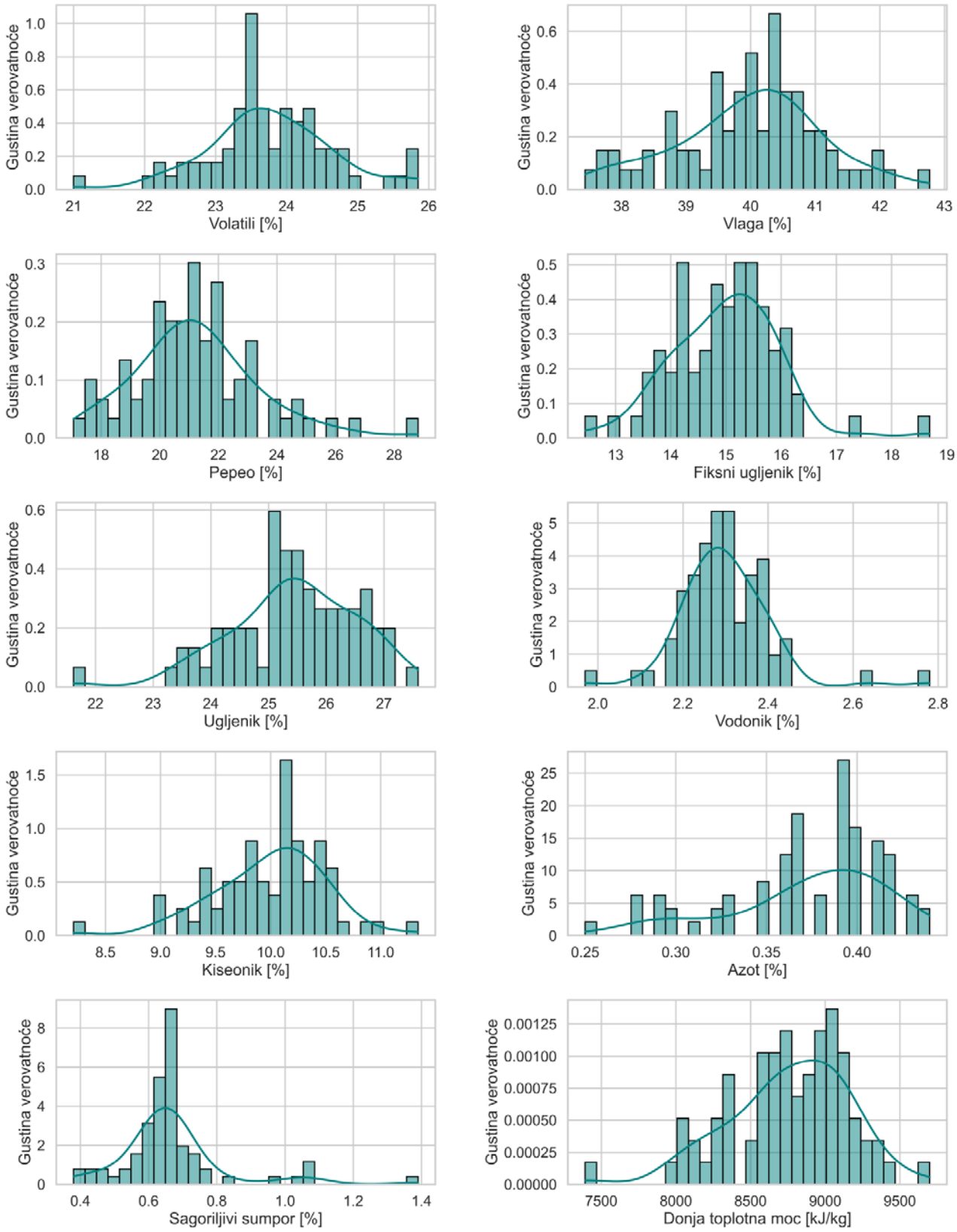
IV STATISTIČKA ANALIZA HEMIJSKOG SASTAVA I DONJE TOPLOTNE MOĆI UGLJA

Pre razvoja i evaluacije prediktivnih modela, sprovedena je deskriptivna statistička analiza hemijskog sastava i donje toplotne moći uzoraka uglja, kako bi se sagledale raspodele podataka i stepen njihove varijabilnosti. Na Slici 2 prikazane su raspodele hemijskog sastava i donje toplotne moći analiziranih uzoraka uglja kroz histograme i krive gustine verovatnoće. Na *y*-osi prikazana je gustina verovatnoće, što omogućava poređenje raspodela različitih parametara nezavisno od njihove apsolutne skale. Površina ispod svake krive normalizovana je na 1, što znači da predstavlja verovatnoću da slučajan uzorak ima vrednost unutar posmatranog intervala. Binovi u histogramima služe za vizuelizaciju raspodele, dok kriva gustine verovatnoće daje kontinualnu procenu raspodele.

Analiza rezultata ukazuje na relativno mali stepen varijabilnosti većine komponenti uglja. Sadržaj volatila iznosi u proseku 23,77 %, uz standardnu devijaciju od 0,88 %. Sličnu homogenost pokazuju i sadržaj vlage (39,98 % ± 1,12 %), ugljenika (25,44 % ± 1,09 %) i vodonika (2,30 % ± 0,11 %). Takođe, sadržaj kiseonika (10,00 % ± 0,51 %) i azota (0,37 % ± 0,04 %) imaju relativno male varijacije, što ukazuje na stabilnost ovih komponenti među uzorcima.

Sadržaji pepela (21,26 % ± 2,14 %) i fiksnog ugljenika (14,99 %

± 0,97 %) ispoljavaju nešto veću varijabilnost, što može biti posledica prisustva različitih mineralnih ostataka u uglju. Najveću varijabilnost među hemijskim komponentama ima sagorljivi sumpor (0,67 % ± 0,16 %), pri čemu su uočljivi i pojedinačni uzorci sa vrednostima značajno različitim od prosečne, što može imati značaj za procenu emisije SO_2.



Slika 2. Histogramske raspodele i krive gustine verovatnoće hemijskog sastava i donje toplotne moći uzoraka lignita

Donja toplotna moć ima prosečnu vrednost od 8759 kJ/kg, uz standardnu devijaciju od 403,9 kJ/kg. Iako su apsolutne vrednosti velike, relativna varijabilnost je mala, što potvrđuje visok stepen homogenosti energetskog sadržaja analiziranih uzoraka uglja.

Sve raspodele, osim raspodele sagorljivog sumpora, približno su simetrične, što se ogleda u sličnim vrednostima srednje vrednosti i medijana. Kombinacija deskriptivne statistike i vizualizacije gustine verovatnoće na Slici 2 potvrđuje da su hemijski sastav i energetski sadržaj uglja u analiziranim uzorcima uglavnom relativno homogeni. Ipak, pojedine komponente, kao što su pepeo, fiksni ugljenik i sagorljivi sumpor, ispoljavaju veći stepen varijabilnosti među uzorcima

V PREDIKCIJA DONJE TOPLOTNE MOĆI UGLJA NA OSNOVU PARAMETARA TEHNIČKE ANALIZE

U ovom poglavlju izvršena je predikcija donje toplotne moći uglja na osnovu parametara tehničke analize, tj. sadržaja: volatila, vlage, pepela i fiksnog ugljenika. Analiza je sprovedena na eksperimentalnoj bazi od 76 uzoraka uglja, od kojih je 55 korišćeno za obuku modela, dok je 21 uzorak izdvojen za nezavisnu evaluaciju performansi modela.

Radi pouzdane procene generalizacione sposobnosti modela, unutar trening skupa primenjena je unakrsna validacija pomoću 5 primeraka (*5-fold cross-validation*). Za Random Forest i Gradient Boosting modele izvršena je optimizacija hiperparametara primenom procedure rešetkastog pretraživanja (*grid search*), dok linearna regresija nije zahtevala dodatno podešavanje zbog svoje jednostavne strukture.

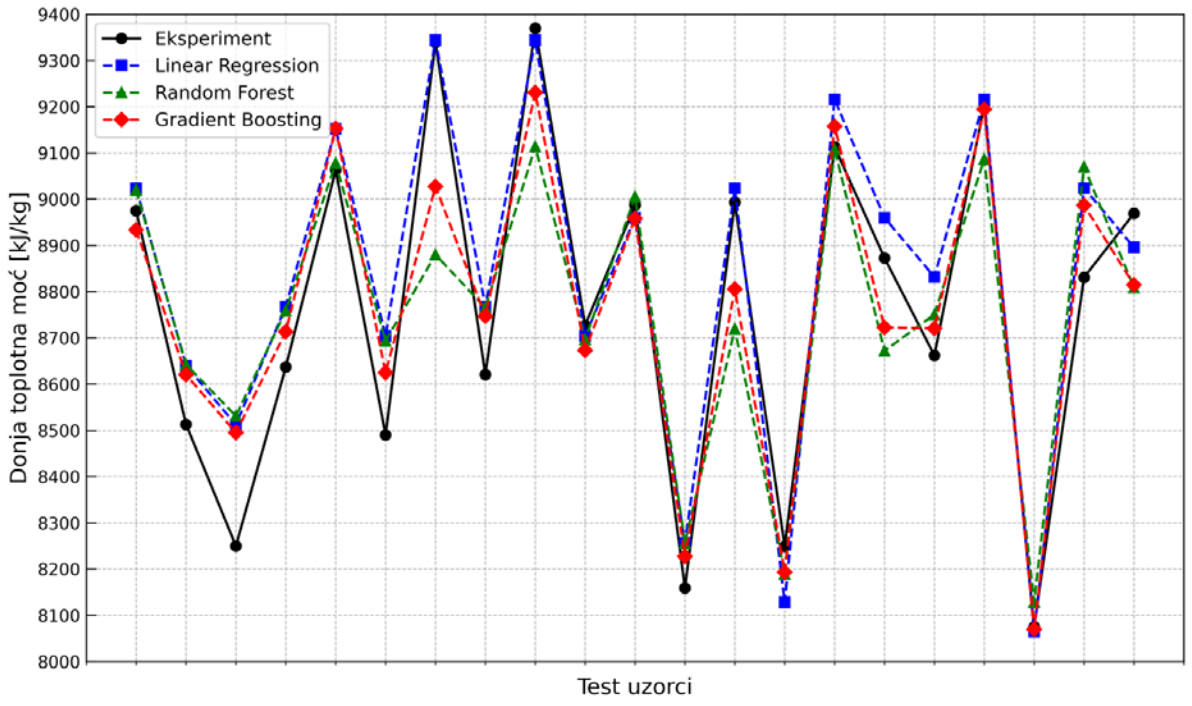
Linearni regresioni model pokazao je najvišu tačnost na test skupu podataka, sa vrednostima RMSE od 118,8 kJ/kg i MAPE od 1,1 %. Na trening skupu ostvarene su slične vrednosti greške (RMSE = 108,9 kJ/kg i MAPE = 1,0 %), što ukazuje na dobru saglasnost između trening i test performansi. Uporedivost grešaka na oba skupa potvrđuje stabilnost modela i odsustvo izraženog preprilagođavanja. Ovi rezultati sugerišu da se dominantna veza između parametara tehničke analize i donje toplotne moći može adekvatno opisati linearnim odnosom.

Random Forest model ostvario je niže greške na trening skupu (RMSE = 85,5 kJ/kg i MAPE = 0,6 %), ali značajno slabije performanse na test skupu (RMSE = 180,9 kJ/kg i MAPE = 1,6 %). Ovakvo performanse sugerišu preprilagođavanje, karakteristično za modele veće složenosti primenjene na ograničenim skupovima podataka.

Gradient Boosting model postiže vrlo visoku tačnost na trening skupu (RMSE = 57,6 kJ/kg i MAPE = 0,4 %), ali pokazuje smanjenu sposobnost generalizacije u poređenju sa linearnom regresijom (RMSE = 130,9 kJ/kg I MAPE = 1,2 %), iako je njegova generalizacija bolja nego kod Random Forest modela.

Ograničena veličina baze podataka, mali broj ulaznih promenljivih, kao i prethodno uočena homogenost parametara tehničke analize, upućuju na to da dominantni odnosi između ulaza i donje toplotne moći mogu biti adekvatno opisani linearnim modelom, dok složeniji nelinearni pristupi ne donose dodatno poboljšanje prediktivnih performansi.

Na Slici 3 prikazano je poređenje eksperimentalno određenih vrednosti donje toplotne moći i predikcija sva tri modela na test skupu podataka dobijenih na osnovu tehničke analize uglja. Vizuelni rezultati jasno ukazuju da linearna regresija daje najdoslednije predikcije duž celog opsega test uzoraka.



Slika 3. Poređenje eksperimentalno određenih i modelom predviđenih vrednosti donje toplotne moći uglja na osnovu tehničke analize

Na osnovu rezultata može se zaključiti da, u slučaju ograničenih skupova podataka i relativno jednostavnih ulaznih parametara, linearna regresija predstavlja optimalan balans između tačnosti, robusnosti i interpretabilnosti. Ovakav pristup omogućava pouzdanu procenu energetske vrednosti uglja isključivo na osnovu podataka tehničke analize, što ima značajnu praktičnu i inženjersku vrednost.

VI PREDIKCIJA DONJE TOPLOTNE MOĆI UGLJA NA OSNOVU PARAMETARA ELEMENTARNE ANALIZE

U ovom poglavlju analizirana je mogućnost predikcije donje toplotne moći uglja na osnovu parametara elementarne analize, koji obuhvataju sadržaj: ugljenika, vodonika, azota, sagorljivog sumpora i kiseonika. Za razliku od tehničke analize, ovi parametri neposrednije odražavaju hemijski sastav goriva, zbog čega se može očekivati izraženija i potencijalno nelinearna zavisnost između ulaznih promenljivih i energetske vrednosti uglja. Evaluacija performansi sprovedena uz istu metodološku postavku kao u prethodnom poglavlju, čime je obezbeđena uporedivost rezultata.

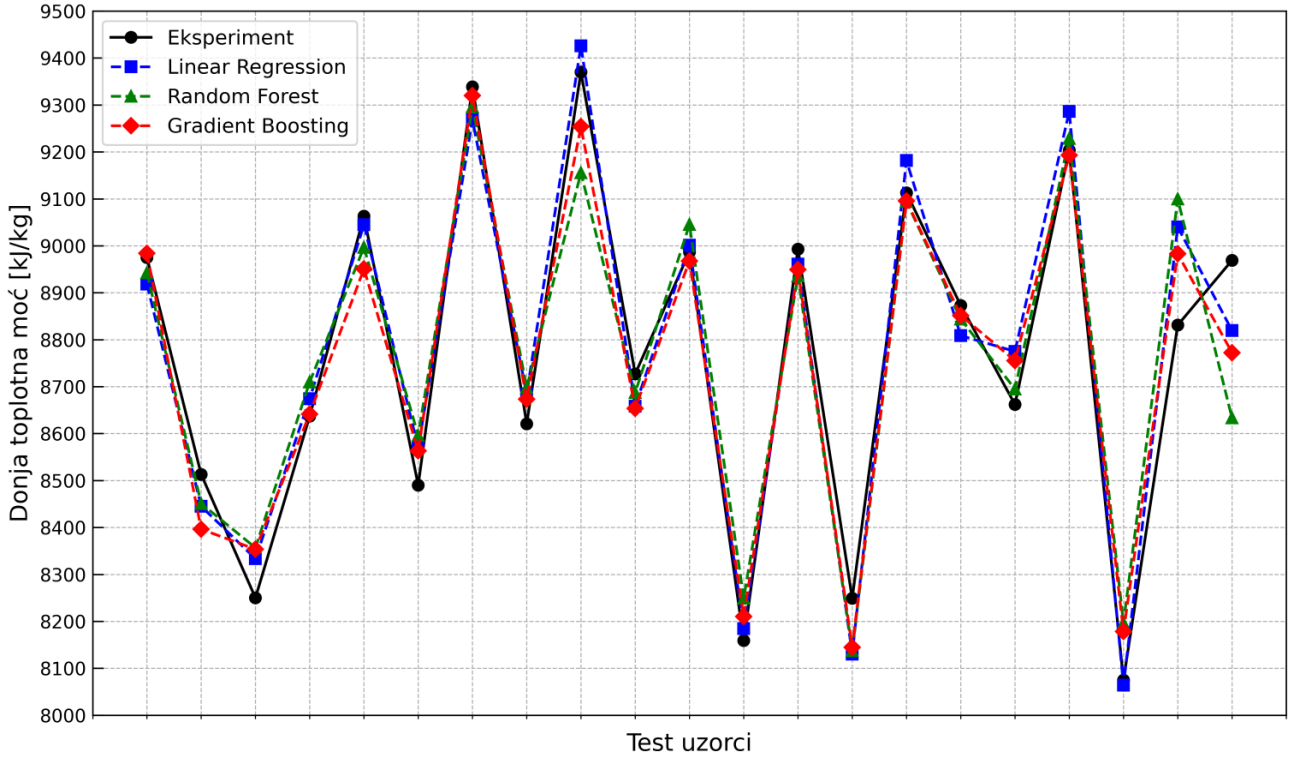
Linearni regresioni model pokazao je vrlo ujednačene performanse na trening i test skupu, sa vrednostima RMSE od 85,9 kJ/kg i 84,6 kJ/kg, kao i MAPE od 0,8 % i 0,8 % na oba skupa, što ukazuje na visoku stabilnost modela i odsustvo preprilagođavanja. Ovi rezultati potvrđuju da značajan deo veze između parametara elementarne analize i donje toplotne moći može biti opisan linearnim odnosom.

Random Forest model ostvario je male greške na trening skupu (RMSE = 64,6 kJ/kg i MAPE = 0,5 %), ali slabije tačnosti na test skupu (RMSE = 123,9 kJ/kg i MAPE = 1,0 %). Ovakav raskorak posledica je izraženog preprilagođavanje usled veće složenosti modela u odnosu na raspoloživi skup podataka.

Gradient Boosting model pokazao je najnižu grešku na trening skupu (RMSE = 54,6 kJ/kg i MAPE = 0,4 %), ali je za razliku od Random Forest pristupa zadržao dobru sposobnost generalizacije, sa test RMSE od 87,8 kJ/kg i MAPE od 0,8 %. Iako je njegova tačnost na test skupu blago slabija u poređenju sa linearnom regresijom po RMSE kriterijumu, razlike su male, dok model pokazuje veću fleksibilnost u opisivanju složenijih zavisnosti između hemijskog sastava i energetske vrednosti uglja.

Na slici 4 prikazano je poređenje eksperimentalno određenih vrednosti donje toplotne moći uglja i predikcija razmatranih modela na test skupu podataka postignutih na osnovu elementarne analize. Za razliku od rezultata na osnovu parametara tehničke analize, gde linearna regresija nadmašuje nelinearne modele, u slučaju elementarne analize Gradient Boosting ostvaruje konkurentne i u pojedinim aspektima povoljnije performanse. Ovo sugeriše da parametri elementarne analize nose bogatiju informaciju o hemijskoj strukturi goriva, pri čemu umereno nelinearni modeli mogu efikasnije da iskoriste dostupne podatke bez izraženog gubitka sposobnosti generalizacije.

Na osnovu rezultata može se zaključiti da linearna regresija i Gradient Boosting predstavljaju dve komplementarne strategije za predikciju donje toplotne moći na osnovu elementarne analize. Linearni regresioni model obezbeđuje stabilnost i interpretabilnost, dok Gradient Boosting omogućava nešto veću fleksibilnost uz očuvanu sposobnost generalizacije. Izbor modela zavisi od konkretnih zahteva primene, pri čemu oba pristupa omogućavaju pouzdanu procenu energetske vrednosti uglja.



Slika 4. Poređenje eksperimentalnih i modelom predviđenih vrednosti donje toplotne moći uglja na osnovu elementarne analize

VII ZAKLJUČAK

U radu su razvijeni modeli mašinskog učenja za predikciju donje toplotne moći lignita korišćenog u blokovima B1 i B2 termoelektrane „Kostolac B", na osnovu rezultata laboratorijskih merenja tehničke i elementarne analize uglja. U tu svrhu sprovedena je deskriptivna statistička analiza hemijskog sastava i donje toplotne moći uzoraka, a zatim razvijeni modeli: linearna regresija, Random Forest i Gradient Boosting. Na osnovu dobijenih rezultata mogu se izdvojiti sledeća zapažanja:

- Analizom raspodele hemijskog sastava i donje toplotne moći utvrđeno je da su većina komponenti uglja relativno ujednačena (na primer, sadržaj volatila iznosi 23,77 % ± 0,88 %, vlage 39,98 % ± 1,12 %, a ugljenika 25,44 % ± 1,09 %). Najveću varijabilnost pokazuju sadržaj pepela 21,26 % ± 2,14 %, fiksnog ugljenika 14,99 % ± 0,97 % i sagorljivog sumpora 0,67 % ± 0,16 %. Donja toplotna moć je homogenog rasporeda, sa prosečnom vrednošću od 8759 kJ/kg i standardnom devijacijom od 403,9 kJ/kg.
- Pri predikciji na osnovu tehničke analize uglja, Linearni regresioni model je pokazao najstabilnije performanse (RMSE trening = 108,9 kJ/kg i RMSE test = 118,8 kJ/kg; MAPE trening = 1,0 % i MAPE test = 1,1 %), dok složeniji nelinearni modeli, Random Forest i Gradient Boosting, ispoljavaju preprilagođavanje i nešto slabije rezultate na test skupu. Rezultati ukazuju da linearan odnos između parametara tehničke analize i donje toplotne moći može biti adekvatno modelovan jednostavnim linearnim modelom.
- Pri predikciji na osnovu elementarne analize uglja, linearni regresioni model i Gradient Boosting ostvarili su sličnu tačnost na test skupu (linearna regresija: RMSE = 84,6 kJ/kg, MAPE = 0,8 %; Gradient Boosting: RMSE = 87,8 kJ/kg, MAPE = 0,8 %). Gradient Boosting je pokazao veću fleksibilnost u modelovanju složenijih hemijskih odnosa, dok linearni model obezbeđuje stabilnost i jednostavnu interpretaciju.
- Uporedna analiza otkriva da modeli zasnovani na parametrima elementarne analize ostvaruju niže greške u predikciji donje toplotne moći u odnosu na modele zasnovane na tehničkoj analizi, što je delom posledica većeg broja ulaznih promenljivih (pet naspram četiri) i njihove neposrednije veze sa hemijskim sastavom goriva.

Analizirani rezultati pokazuju da razvijeni modeli omogućavaju pouzdanu i brzu procenu donje toplotne moći lignita, što može podržati operativno planiranje i optimizaciju sagorevanja u termoelektranama. Međutim, zbog relativno ograničenog obima baze podataka, dalja validacija na većim i raznovrsnijim skupovima uzoraka mogla bi dodatno poboljšati generalizaciju i pouzdanost modela.

ZAHVALNICA

Istraživanje je finansirano od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (broj Ugovora: 451-03-33/2026-03/200017).

LITERATURA

[1] Milićević, A., Marković, Z., Erić, M., Belošević, S., Žarković, M., Marinković, A. Influence of fuel and operation mode on air pollutants emission from pulverized coal-fired power plant: Field experiments and ML predictions, Thermal Science and Engineering Progress, Vol. 57, 103151, 2025. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.103151

[2] Büyükkanber, K., Haykiri-Acma, H., Yaman, S. Calorific value prediction of coal and its optimization by machine learning based on limited samples in a wide range, Energy, Vol. 277, 127666, 2023. https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127666

[3] Zhu, W., Xu, N., Hower J. C. Unveiling the predictive power of machine learning in coal gross calorific value estimation: An interpretability perspective, Energy, Vol. 318, 134781, 2025. https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134781

[4] Coal and coke — Determination of gross calorific value, ISO 1928:2025. https://www.iso.org/standard/86999.html [pristupljeno 06.02.2026]

[5] Kök, M.V., Matuschek, G., Varfolomeev, M.A., Nurgaliev, D.K. Combustion characteristics and efficiency of raw and clean lignite samples by thermal analysis techniques: TG–DTG–MID, DSC, and PDSC applications, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 150, pp. 6013-6027, 2025. https://doi.org/10.1007/s10973-025-14204-w

[6] Guo, Y., Liu, X., Gao, Y., Wang, X., Ding, L., Pan, W., Hua, C., He, Y., Chen, X., Dai, Z., Yu, G., Wang, F. AutoML for calorific value prediction using a large database from the coal gasification practices in China, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, Vol. 12, No. 63, 2025. https://doi.org/10.1007/s40789-025-00763-8

[7] Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. *Deep Learning*, MIT Press, 2016.

[8] Raschka, S., Mirjalili V. *Python Machine Learning: Machine Learning and Deep Learning with Python, scikit-learn, and TensorFlow 2*, Birmingham, Packt Publishing, 2019. https://nuleren.be/ebooks/python-machine-learning-machine-learning-and-deep-learning-with-python-scikit-learn-and-tensorflow.pdf [pristupljeno 06.02.2026]

[9] Milićević, A., Belošević, S., Erić, M., Marković, Z., Tomanović, I., Crnomarković, N., Stojanović, A. Random forest model for determination of the lower heating value of TPP "Kolubara A" coal, in Proc. *Power Plants 2023*, Zlatibor, Serbia, pp. 745-752, 8-10 November 2023. https://vinar.vin.bg.ac.rs/handle/123456789/12766 [pristupljeno 06.02.2026]

[10] Montgomery, D. C., Peck, E. A., Vining, G. G. *Introduction to Linear Regression Analysis*, Wiley, 2021. https://www.kwcsangli.in/uploads/3--Introduction_to_Linear_Regression_Analysis__5th_ed._Douglas_C._Montgomery__Elizabeth_A._Peck__and_G._.pdf [pristupljeno 06.02.2026]

[11] Milićević, A., Belošević, S., Žarković, M., Tomanović, I., Crnomarković, N., Stojanović, A. Stupar, G., Deng, L., Che, D. Biomass and Bioenergy, Vol. 174, 106817, 2023. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106817

[12] Breiman, L. Random Forests, Machine Learning, Vol. 45, pp. 5-32, 2001. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

[13] Friedman J. H. Greedy function approximation: A gradient boosting machine., Machine Learning, Vol. 29, No. 5, pp. 1189-1232, 2001. http://dx.doi.org/10.1214/aos/1013203451

[14] James, G., Witten, D., Hastie, T., Tibshirani, R. *An Introduction to Statistical Learning: with Applications in R*, Springer, 2013.

AUTORI

dr Aleksandar Milićević – viši naučni saradnik, Institut za nuklearne nauke „Vinča" - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, amilicevic@vin.bg.ac.rs, ORCID 0000-0003-4615-8789

dr Srđan Belošević – naučni savetnik, Institut za nuklearne nauke „Vinča" - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, v1belose@vin.bg.ac.rs, ORCID 0000-0001-9842-8408

dr Ivan Tomanović – viši naučni saradnik, Institut za nuklearne nauke „Vinča" - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, ivan.tomanovic@vin.bg.ac.rs, ORCID 0000-0001-7573-7224

dr Nenad Crnomarković – naučni savetnik, Institut za nuklearne nauke „Vinča" - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, ncrni@vin.bg.ac.rs, ORCID 0000-0001-5482-

082X
dr Milić Erić – viši naučni saradnik, Institut za nuklearne nauke „Vinča" - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, milic@vin.bg.ac.rs, ORCID 0000-0001-6850-3112
dr Zoran Marković – viši naučni saradnik, Institut za nuklearne nauke „Vinča" - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, zoda_mark@vin.bg.ac.rs, ORCID 0000-0003-0553-3263
dr Nikola Živković – viši naučni saradnik, Institut za nuklearne nauke „Vinča" - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, nikolaz@vin.bg.ac.rs, ORCID 0000-0003-3399-1229
dr Ivan Lazović – viši naučni saradnik, Institut za nuklearne nauke „Vinča" - Institut od nacionalnog značaja za Republiku Srbiju, Univerzitet u Beogradu, ivan.lazovic@vin.bg.ac.rs, ORCID 0000-0002-3877-5157

Machine Learning Models for Predicting the Heating Value of Coal at the “Kostolac B” Thermal Power Plant

Abstract – The heating value of coal is one of the key parameters for managing the combustion process and the energy efficiency of thermal power plants. Its accurate determination is essential for controlling fuel consumption, optimizing boiler operation, and reducing negative environmental impacts. Although the heating value of coal is traditionally determined through laboratory measurements, this procedure is time-consuming for continuous monitoring of fuel quality under real operating conditions. With increasing demands for the digitalization of energy systems and the development of data-driven predictive methods, the aim of this study is to develop machine learning models for reliable prediction of the lower heating value of lignite used at the “Kostolac B” thermal power plant, based on laboratory measurements. A database containing the results of proximate and ultimate lignite analyses, as well as its lower heating value, was created from experimental measurements conducted in the accredited Department for Fuel Characterization within the Laboratory for Thermal Engineering and Energy at the “Vinča” Institute of Nuclear Sciences. Three machine learning models were developed using this database: Linear Regression as the baseline linear model, Random Forest as a robust ensemble model based on bagging, and Gradient Boosting as an advanced method based on sequential decision-tree enhancement. For predicting heating value based on the proximate analysis of coal, the linear regression model demonstrated stable and reliable results, while complex nonlinear approaches provided no additional benefit. When predicting heating value based on ultimate coal analysis, both linear regression and Gradient Boosting achieved similar accuracy on the test set, with nonlinear approaches enabling the modelling of more complex chemical relationships. The study results indicate that the choice of model depends on the complexity of the available input data and the specific application requirements. The application of these models enables faster assessment of coal quality and supports more efficient operational planning, thereby reducing the need for laboratory analyses.

Index Terms – Lignite, Heating value, Laboratory measurements, Machine learning, Thermal power plant

Rad primljen: 31.05.2026., prihvaćen: 22.08.2026.

doi: 10.46793/EEE26-3.22G

Originalni naučni rad
UDK 620.9:[614.21:504.7

Ka niskougljeničnom zdravstvenom sektoru: sveobuhvatni pregled

Dušan Gordić, Vladimir Vukašinović, Mladen Josijević, Nebojša Jurišević
Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu

Rezime - Zdravstveni sektor predstavlja jednu od najvećih i najkritičnijih infrastruktura savremenog društva, čiji je udeo od 4-5 % u globalnim emisijama gasova sa efektom staklene bašte. Proces dekarbonizacije ovog sektora postaje imperativ za postizanje nacionalnih i međunarodnih klimatskih ciljeva. U radu se analiziraju ključni izvori emisija unutar zdravstvenih ustanova, uključujući potrošnju energije u zgradama, medicinsku opremu, upravljanje otpadom, logistiku i lanac snabdevanja. Rad sistematizuje sedam ključnih strateških akcija, uključujući snabdevanje dekarbonizovanom energijom, održivu izgradnju, cirkularno zdravstvo i eliminaciju medicinskih praksi niske vrednosti, koje omogućavaju zdravstvenim ustanovama da unaprede održivost uz očuvanje kvaliteta zdravstvenih usluga. Kroz pregled globalnih inicijativa poput "Race to Zero" i primera dobre prakse iz EU projekta DAPHNE, identifikovani su modeli za uspešnu tranziciju ka niskougljeničnom modelu. Zaključno, rad razmatra institucionalne, finansijske i organizacione prepreke, naglašavajući da sistemska dekarbonizacija mora da balansira klimatske ciljeve sa očuvanjem kvaliteta i dostupnosti zdravstvene zaštite. Rad pruža metodološki okvir i preporuke za donosioce politika, menadžment zdravstvenih ustanova i stručnu javnost, sa ciljem ubrzanja tranzicije ka niskougljeničnom zdravstvenom sistemu.

Ključne reči - dekarbonizacija, emisije gasova staklene bašte, zdravstveni sektor

I UVOD

Postoji širok naučni konsenzus da su ljudske aktivnosti (poput intenzivne industrijalizacije, razvoja saobraćaja, rasta stanovništva, urbanizacije i promena u korišćenju zemljišta) glavni pokretači povećanja koncentracije gasova sa efektom staklene bašte (GHG) i posledičnog globalnog zagrevanja. Prema inicijativi Indikatori globalnih klimatskih promena (IGCC) (eng. *Indicators of Global Climate Change*) koja obezbeđuje godišnje, ažurirane i recenzirane procene ključnih klimatskih pokazatelja, globalne emisije svih antropogenih GHG gasova iznosile su približno 55,4 ± 5,1 $GtCO_2e$ godišnje u 2023. godini. [1]. Izveštaj Programa Ujedinjenih nacija za životnu sredinu (UNEP) (eng. *United Nations Environment Programme*) navodi sličnu vrednost od oko 57,1 $GtCO_2e$ za 2023 [2]. Prema EDGAR (eng. *Emissions Database for Global Atmospheric Research*) sveobuhvatnoj, nezavisnoj bazi podataka o emisijama GHG gasova i zagađivača vazduha nastalih ljudskim delovanjem (antropogenim) na globalnom nivou koju održava Zajednički istraživački centar (JRC) Evropske komisije, globalne emisije gasova staklene bašte su u 2024. godini dostigle 53,2 GtCO2e (bez korišćenja zemljišta, promena u korišćenju zemljišta i šumarstva), što predstavlja povećanje od 1,3% u poređenju sa emisijama iz 2023 [3].

Kako bi se ograničilo globalno zagrevanje izazvano antropogenim uticajima, svetski lideri su se dogovorili o međunarodnom sporazumu o klimatskim promenama koji ograničava porast globalne prosečne temperature na najviše 2°C, sa ciljem od 1,5°C u poređenju sa predindustrijskim nivoima [4]-[5]. Na žalost, prema UNEP Izveštaju o jazu u emisijama za 2025. godinu (eng. *Emissions Gap Report*) [6] svet se kreće prema ozbiljnoj eskalaciji klimatskih rizika i šteta. Prema ovom dokumentu, da bi se uskladili sa ciljevima Pariskog sporazuma za 2 °C i 1,5 °C, potrebna su smanjenja godišnjih emisija GHG od 35%, odnosno 55% u 2035. godini, u poređenju sa nivoima iz 2019. godine. S obzirom na obim potrebnih smanjenja, kratak raspoloživ vremenski okvir za njihovu realizaciju i nepovoljnu političku klimu, značajnije prekoračenje praga od 1,5 °C je neizbežno i to sa velikom verovatnoćom već u narednoj deceniji.

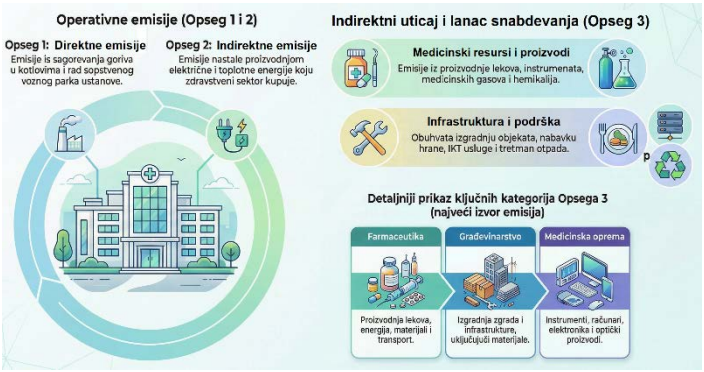
Zdravstveni sistemi širom sveta suočeni su sa jedinstvenim i dubokim izazovom koji se često definiše kao klimatsko-zdravstveni paradoks. Dok je primarna uloga ovih sistema zaštita ljudskog života i unapređenje blagostanja, njihova operativna aktivnost značajno doprinosi globalnoj ekološkoj krizi koja direktno ugrožava javno zdravlje. Prema sveobuhvatnim analizama organizacije Health Care Without Harm i konsultantske kompanije Arup, nivo emisija GHG zdravstvenog sektora je procenjen na 2 $GtCO_2e$ u 2014. godini [7,8]. Ovaj nivo emisija iznosi približno 4-5% ukupnih globalnih GHG emisija [9] i ukazuje na činjenicu da bi zdravstveni sektor, ukoliko bi se posmatrao kao zasebna država, bio peti najveći emiter na svetu, odmah nakon Kine, SAD, Indije i EU, i bio bi uporediv sa Rusijom [10]. Iz ovoga se može zaključiti da, ako čovečanstvo želi da postigne klimatsku neutralnost, zdravstveni sektor mora da bude deo strategije, jer je njegova uloga u emisijama značajna.

Ova činjenica je u poslednjoj deceniji pokrenula intenzivna istraživanja i političke inicijative usmerene ka dekarbonizaciji zdravstvenog sektora. Zato je cilj ovog rada da se na osnovu pregleda najboljih međunarodnih praksi i dostupnih relevantnih naučnih i stručnih izvora, sistematizuju i analiziraju ključni izvori GHG emisija unutar zdravstvenog sektora. Posebna pažnja je posvećena definisanju i sistematizaciji tehničkih, ekonomskih i organizacionih strategija za smanjenje GHG emisija u okviru sektora, koje omogućavaju zdravstvenim ustanovama da unaprede održivost uz očuvanje kvaliteta zdravstvenih usluga.

II GHG EMISIJE ZDRAVSTVENOG SEKTORA

Osnova svake strategije dekarbonizacije počiva na preciznom računovodstvu GHG gasova, koje je međunarodno

standardiziovano Protokolom za obračun i izveštavanje o emisijama gasova sa efektom staklene bašte (eng. Greenhouse Gas (GHG) Protocol) [11]. Prema ovom protokolu emisije gasova sa efektom staklene bašte klasifikuju se u tri osnovne kategorije (opsega) (eng. *scope*), što pruža celovit uvid u ekološki otisak neke organizacije (slika 1). U zdravstvenom sektoru, emisije opsega 1 (*scope* 1) odnose se na direktne emisije gasova sa efektom staklene bašte koje potiču iz izvora u vlasništvu ili pod neposrednom kontrolom zdravstvenih ustanova. One prvenstveno obuhvataju emisije nastale sagorevanjem goriva u bolničkim objektima, kao i emisije iz vozila koja su u vlasništvu ili operativnoj upotrebi zdravstvenih institucija. Emisije opsega 2 (*scope* 2) predstavljaju indirektne emisije u vezi sa proizvodnjom električne i toplotne energije koju zdravstvene ustanove nabavljaju od eksternih dobavljača, pri čemu emisije nastaju tokom procesa proizvodnje energije van samih zdravstvenih objekata. Ostatak čine emisije opsega 3 (*scope* 3), koje obuhvataju indirektne emisije duž celokupnog lanca snabdevanja. Ovaj opseg uključuje emisije koje su u vezi sa proizvodnjom i transportom lekova, medicinske opreme, potrošnog materijala, kao i građevinskih materijala koji se koriste u izgradnji i održavanju zdravstvene infrastrukture (tabela 1).

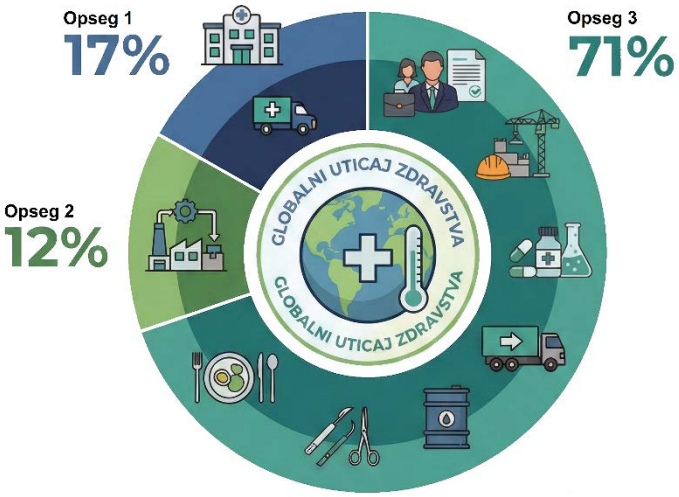


Slika 1. GHG emisije u zdravstvenom sektoru

Analiza podataka o ugljeničnom otisku zdravstva otkriva dominaciju indirektnih emisija nad direktnim (operativnim) emisijama, koje čine samo 17 % [7, 12]. Najveći deo indirektnih emisija pripadaju opsegu 3 koje čine čak 71% ukupnih emisija (slika 2). U zemljama Organizacije za ekonomsku saradnju i razvoj (OECD), emisije opsega 3 u proseku čine oko 79% ukupnih GHG emisija u zdravstvenom sektoru, što ukazuje na to da lanci snabdevanja farmaceutskim proizvodima i medicinskim uređajima predstavljaju ključni izazov u dekarbonizaciji [13]. Najznačajniji izvori u okviru opsega 3 emisija obuhvataju farmaceutske proizvode, koji učestvuju sa 12,0% i odnose se na emisije u vezi sa energijom, materijalima i transportom u procesu proizvodnje lekova, zatim poslovne usluge sa 10,7%, koje uključuju profesionalne usluge poput pravnih, računovodstvenih i konsultantskih aktivnosti. Značajan udeo imaju i hrana i ketering sa 7,2%, što obuhvata proizvodnju hrane i usluge ishrane namenjene pacijentima i osoblju, dok medicinski instrumenti i oprema učestvuju sa 5,2% kroz emisije nastale tokom proizvodnje instrumenata, elektronike i optičkih proizvoda. Građevinarstvo čini 5,6% ukupnih emisija u ovom opsegu i odnosi se na izgradnju infrastrukture i proizvodnju građevinskih materijala [12].

Tabela 1. Kategorije GHG emisija u zdravstvenom sektoru [9], [12]

Opseg emisija	Kategorija GHG emisija	Definicija obuhvata kategorije
opseg 1	funkcionisanje zgrada	direktne emisije iz operativnih aktivnosti zgrada, pretežno iz kotlova (zagrevanje prostora) i spalionica medicinskog otpada
	transport	direktne emisije iz voznih parkova u vlasništvu zdravstvenog sektora, kao i emisije u vezi sa službenim putovanjima zaposlenih
	medicinski gasovi (anestetici)	emisije gasova sa efektom staklene bašte nastale tokom medicinske primene anestetičkih gasova, kao i usled curenja iz sistema za distribuciju medicinskih gasova u zdravstvenim ustanovama.
	rashladni sistemi i klimatizacija	emisije fluorovanih gasova nastale usled curenja rashladnih sredstava iz sistema klimatizacije, rashladnih uređaja i medicinske opreme.
opseg 2	kupljena električna energija, toplota i para	emisije iz proizvodnje električne energije, toplote i pare koju zdravstveni sektor nabavlja od eksternih dobavljača, uglavnom iz postrojenja koja sagorevaju fosilnih goriva
opseg 3	poslovne usluge	emisije u vezi sa profesionalnim uslugama koje nabavlja zdravstveni sektor, uključujući pravne, računovodstvene i konsultantske usluge.
	izgradnja	emisije u vezi sa izgradnjom zgrada i infrastrukture, uključujući proizvodnju i snabdevanje građevinskog materijala.
	električna energija (indirektno)	emisije u vezi sa prenosom i distribucijom električne energije, kao i emisije iz lanca snabdevanja sektora proizvodnje električne energije
	hrana, ketering i smeštaj	emisije u vezi sa proizvodnjom i snabdevanjem prehrambenih proizvoda, uslugama keteringa u zdravstvenim ustanovama, kao i obezbeđivanjem smeštaja za zdravstvene radnike
	fosilna goriva	emisije u vezi sa proizvodnjom fosilnih goriva koje je nabavio zdravstveni sektor (ne uključuje emisije iz sagorevanja)
	informacione i komunikacione tehnologije (IKT)	emisije u vezi sa IT i komunikacionim uslugama, uključujući računarske sisteme, telekomunikacije i izdavaštvo
	proizvedena goriva, hemikalije i gasovi	emisije u vezi sa proizvodnjom hemikalija, gasova i drugih industrijskih proizvoda koji se koriste u zdravstvenim ustanovama
	medicinski instrumenti i oprema	emisije u vezi sa kupljenim medicinskim instrumentima i opremom, uključujući elektroniku i optičke proizvode
	ostali proizvedeni proizvodi	emisije u vezi sa kupljenim proizvodima uključujući plastiku, tekstil, mašine i električnu opremu
	ostale nabavke	emisije u vezi sa robom kupljenom na veliko preko veletrgovaca i posrednika
	proizvodi od papira	emisije u vezi sa proizvodnjom papira i kartona koje nabavlja zdravstveni sektor
	farmaceutski proizvodi	emisije u vezi sa proizvodnjom farmaceutskih proizvoda koje nabavlja zdravstveni sektor, uključujući emisije nastale tokom potrošnje energije, korišćenja sirovina i transporta farmaceutskih proizvoda u lancu snabdevanja
	transport (usluge)	emisije iz transportnih usluga koje zdravstveni sektor ugovara, uključujući teretni i putnički transport
	otpad, voda i sanitacija	emisije u vezi sa sakupljanjem, tretmanom i odlaganjem otpada, snabdevanjem vodom i kanalizacijom, i reciklažom



Slika 2. Globalne GHG emisije zdravstvenog sektora prema kategorijama

Stuktura emisija zdravstvenog sektora je vrlo kompleksna (Tabela 1). Značajan deo emisija koje se javljaju u zdravstvenom sektoru potiče iz aktivnosti koje su zajedničke velikom broju ekonomskih sektora i organizacija poput potrošnje energije, transporta, generisanja otpada, itd. Dominantni deo GHG emisija u ovom sektoru potiče od upotrebe fosilnih goriva, koja se koriste za proizvodnju finalne energije u zdravstvenim ustanovama, kao i za proizvodnju i transport proizvoda neophodnih za njihov rad. Ipak, pored ovih opštih izvora emisija, postoje i specifični izvori karakteristični za zdravstveni sektor, među kojima se posebno izdvajaju anestetički gasovi i inhalatori sa odmerenom dozom (eng. *metered-dose inhalers* – MDI). Inhalacioni anestetički gasovi koji se koriste u opštoj anesteziji su: desfluran, sevofluran, izofluran, halotan i azot-suboksid (N_2O). Ovi gasovi se oslobađaju u atmosferu nakon upotrebe. MDI se koriste u terapiji respiratornih bolesti, kao što su astma i hronična opstruktivna bolest pluća. Ovi inhalatori sadrže propelente iz grupe hidrofluoroalkana (HFA), kao što su HFA-134a (norfluran), HFA-227ea (apafluran), koji imaju visok potencijal globalnog zagrevanja (eng. *global warming potential*) GWP.

U ukupnoj strukturi emisija zdravstvenog sektora, ovi izvori čine relativno mali, ali značajan udeo i predstavljaju dodatni izazov pri proceni emisija na nacionalnom ili regionalnom nivou. Na primer, prema jednoj akademskoj analizi zasnovanoj na podacima National Health Service (NHS) u England [14], emisije koje su u vezi sa inhalacionim anesteticima i MDI čine približno 5% ukupnih emisija zdravstvenog sistema. U okviru te procene, oko 3% ukupnih emisija potiče od MDI, koji se pretežno koriste u primarnoj zdravstvenoj zaštiti, dok približno 2% emisija proizlazi iz primene inhalacionih anestetika, koji se dominantno koriste u ustanovama akutne zdravstvene zaštite, pre svega u bolnicama i operacionim blokovima.

Sistematizovanjem podataka iz naučnih studija [15-18], tehničkih izveštaja i i izveštaja (IPCC AR4, AR5, AR6) [19-21], ekološki uticaj anestetika i propelanata prikazan je u tabeli 2.

Tabela 2. Kategorije GHG specifičnih za zdravstveni sektor (anestetici i propelanti)

Supstanca	Tip (anestetik / propelant)	GWP100[1] (opseg)	Atmosferski vek (opseg) [god]	Tip emisije u zdravstvenom sektoru
Desfluran	Anestetik	2590	14,1	**Opseg 1**
Izofluran	Anestetik	508 - 539	3,0 - 3,7	**Opseg 1**
Azot-suboksid	Anestetik	265 - 310	120 - 121	**Opseg 1, 3**
Sevofluran	Anestetik	125 - 195	1,2 - 1,5	**Opseg 1**
Halotan	Anestetik	50	1,0	**Opseg 1**
Metoksifluran	Anestetik	4	0,15	**Opseg 1**
HFC-227ea	Propelant	3220 - 3600	36,5	**Opseg 3**
HFC-134a	Propelant	1300 - 1530	14,6	**Opseg 3**
HFC-152a	Propelant	124 - 164	1,5	**Opseg 3**

Iako ima manji GWP od nekih halogenovanih anestetika, azot-suboksid (N_2O) ostaje glavni doprinosilac klimatskim promenama zbog svoje izuzetno masovne upotrebe i dugog atmosferskog veka od 120 godina. Emisije N_2O tokom medicinske upotrebe u zdravstvenoj ustanovi pripadaju opsegu 1, dok se emisije koje su u vezi sa njegovom proizvodnjom i lancem snabdevanja klasifikuju kao opseg 3, u skladu sa metodologijom Protokola za obračun i izveštavanje o emisijama gasova sa efektom staklene bašte i analizama klimatskog otiska zdravstvenog sektora. Opsezi za izofluran i sevofluran odražavaju značajne razlike između ranijih procena i najnovijih reevaluacija koje preporučuju niže vrednosti GWP100 (508 za izofluran i 125 za sevofluran) [15]. Opsezi za HFC gasove (134a, 227ea, 152a) potiču iz različitih verzija IPCC izveštaja (od AR4 do AR6), pri čemu se vrednosti GWP-a uglavnom povećavaju u novijim procenama

III Redukcija emisija zdravstvenog sektora

Analiza emisija u zdravstvenom sektoru ukazuje da strategija njegove dekarbonizacije mora da bude multidimenzionalna. Strategija fokusirana isključivo na energetsku efikasnost i snabdevanje energijom iz dekarbonizovanih izvora bolničkih objekata nije dovoljna. Neophodan je sistemski pristup koji obuhvata i kliničke procese, farmaceutsku industriju, proizvodnju medicinske opreme i logističke tokove.

Globalna mapa puta za dekarbonizaciju zdravstva [7] identifikuje sedam ključnih akcija visokog uticaja koje su neophodne kako bi zdravstveni sektor dostigao nultu emisiju gasova sa efektom staklene bašte do 2050. godine:

- snabdevanje zdravstvenog sistema dekarbonizovanom energijom,
- ulaganje u zgrade i infrastrukturu sa nultim emisijama,
- prelazak na održivu mobilnost i transport bez emisija,
- obezbeđivanje zdrave hrane koja je lokalno proizvedena i održivo uzgajana,
- podsticanje razvoja i upotrebe farmaceutskih proizvoda sa

[1] Potencijal globalnog zagrevanja u periodu od 100 godina

niskim ugljeničnim otiskom,
- primena principa cirkularne ekonomije u zdravstvu uz održivo upravljanje otpadom,
- unapređenje efikasnosti zdravstvenog sistema i eliminacija neefikasnih praksi.

Tabela 3. Mapiranje strateških akcija, izvora emisija i mehanizama njihovog smanjenja

Strateška akcija	Izvori emisija	Opseg emisija	Opis mehanizma smanjenja emisija
1.snabdevanje dekarbonizovanom energijom	kupljena električna energija – uključujući prenos, generisanje i uzvodne (dolazne) lance snabdevanja	2, 3	• prelazak na električnu energiju nulte emisije koja se koristi u ustanovama i lancu snabdevanja • unapređenje energetske efikasnosti
2.investiranje u zgrade i infrastrukturu sa nultim emisijama	rad i funkcionisanje objekata, izgradnja	1,3	• primena niskougljeničnih građevinskih materijala • elektrifikacija sistema grejanja i hlađenja • unapređenje energetske efikasnosti
3.prelazak na održiva putovanja i transport bez emisija	transport (direktni i nabavljene usluge)	1,3	• elektrifikacija voznog parka i zamena voznih parkova vozilima sa nultom emisijom • prelazak na održive oblike putovanja • optimizacija saobraćajnih ruta • primena digitalnih tehnologija/telemedicina
4.obezbeđivanje zdrave, lokalno proizvedene i održivo uzgajane hrane	hrana, ketering i smeštaj	3	• nabavka lokalno i održivo proizvedene sveže hrane sa niskim sadržajem ugljenika • smanjenje otpada od hrane i postizanje nulte stope bacanja hrane
5.podsticanje razvoja i upotrebe farmaceutskih proizvoda sa niskim ugljeničnim otiskom	farmaceutski proizvodi	3, 1	• racionalnija upotreba lekova, • optimizacija proizvodnih procesa i razvoj terapijskih alternativa • zamena proizvoda sa visokom emisijom (poput inhalatora i anestetika) zelenim alternativama
6.implementacija cirkularnog zdravstva i održivo upravljanje otpadom	farmaceutski proizvodi, medicinska oprema i instrumenti, proizvedena goriva, hemikalije i gasovi, ostali proizvedeni proizvodi, papirni proizvodi, poslovne usluge, hrana, ketering i smeštaj, fosilna goriva	3	• primena principa cirkularne ekonomije • smanjenje toksičnosti otpada • korišćenje čistih tehnologija tretmana otpada
7.unapređenje efikasnosti zdravstvenog sistema	farmaceutski proizvodi, medicinska oprema i instrumenti, ostali proizvedeni proizvodi, poslovne usluge, rad i funkcionisanje objekata, kupljena električna energija	pretežno 3 (indirektan uticaj na 1 i 2)	• jačanje preventivne zaštite, • smanjenje nepotrebnih medicinskih praksi (testiranja, intervencija) • optimizacija kliničkih tokova rada • uvođenje digitalnih putanja nege i povezivanje smanjenja ugljenika sa kvalitetom nege

Ove akcije su međusobno povezane, a njihova paralelna primena u operativnim procesima, lancu snabdevanja i kroz širu društvenu saradnju, predstavlja preduslov za uspešnu transformaciju zdravstvenog sektora ka klimatskoj neutralnosti bez umanjenja kvaliteta zdravstvene zaštite (tabela 3).

III - 1 Snabdevanje zdravstvenog sistema dekarbonizovanom energijom

Zdravstveni sektor je izrazito energetski intenzivan, a potrošnja električne i toplotne energije predstavlja jedan od dominantnih izvora emisija gasova sa efektom staklene bašte. Zdravstvene ustanove imaju značajne i kontinuirane energetske potrebe za rad različitih sistema, uključujući sisteme grejanja, hlađenja ventilacije i klimatizacije, osvetljenje, medicinsku opremu, sterilizacione procese i digitalnu infrastrukturu, pri čemu je pouzdano snabdevanje, pre svega, električnom energijom ključno za bezbedno i neprekidno pružanje zdravstvene zaštite.

Prelazak zdravstva na dekarbonizovanu energiju znači napuštanje fosilnih goriva u korist energije (pre svega električne) iz obnovljivih i drugih dekarbonizovanih izvora. Ovaj prelazak predstavlja najdirektniji put ka dekarbonizaciji opsega 1 i 2, ključnu meru za smanjenje emisija iz opsega 2, ali i povećanju energetske bezbednosti i otpornosti sistema. Globalna mapa puta identifikuje ovu meru kao osnovu dekarbonizacije, jer omogućava neposredno i dugoročno smanjenje ugljeničnog otiska bolnica i drugih zdravstvenih objekata bez kompromitovanja kvaliteta zdravstvene zaštite.

Potencijal primene obnovljivih izvora energije (OIE), prednosti i izazovi u zdravstvenim ustanovama prikazana su u tabeli 4 [22-29]. Instalacija fotonaponskih (PV) panela na krovovima i fasadama bolnica postaje standardna komponenta dekarbonizacije. Hidroenergija, energija vetra i biogasna postrojenja najčešće se primenjuju u ruralnim bolnicama ili

zdravstvenim ustanovama koje nisu povezane na elektroenergetsku mrežu. Integracija različitih sistema u okviru hibridnih energetskih sistema sa OIE, u kombinaciji sa skladištenjem (električne ili toplotne) energije i inteligentnim sistemima upravljanja (EMS), omogućavaju zdravstvenim ustanovama pouzdano i kontinuirano snabdevanje električnom i toplotnom energijom, istovremeno smanjujući emisije i operativne troškove [30]. Primena hibridnih OIE sistema u bolnicama omogućava optimizaciju proizvodnje i potrošnje energije, dok EMS automatski balansira protok energije između obnovljivih izvora i skladišta. Prelazak na niskougljenične sisteme grejanja često zahteva inovativna rešenja za skladištenje energije [31]. Sistemi kao što su skladištenje toplotne energije u izdani (ATES) (eng. *aquifer thermal energy storage*) [32] i skladištenje toplotne energije u bušotinskim sondama (BTES) (eng. *borehole thermal energy storage*) [33] koriste podzemne vode ili tlo za sezonsko skladištenje toplotne ili rashladne energije.

Tabela 4. Potencijal primene obnovljivih izvora energije (OIE), prednosti i izazovi u zdravstvenim ustanovama

Obnovljivi izvor energije	Primena u zdravstvenim ustanovama	Prednosti	Izazovi
Solarna energija	PV sistemi za napajanje medicinske opreme i rasvete, solarni kolektori za zagrevanje sanitarne vode	Smanjenje zavisnost od fosilnih goriva, povećanje energetske efikasnosti, smanjenje emisija CO_2	Zahteva značajna početna ulaganja i odgovarajuće podsticajne mere za širu primenu
Energija vetra	male vetroturbine integrisane u hibridne energetske sisteme za snabdevanje zdravstvenih ustanova električnom energijom	Diversifikacija energetskih izvora, smanjenje emisija CO_2	Zavisi od lokalnih meteoroloških i geografskih uslova, mogući problemi sa integracijom u postojeću infrastrukturu
Hidroenergija	Male hidroelektrane za napajanje pojedinačnih objekata ili zdravstvenih kompleksa u blizini vodotokova ili kao deo lokalnih mikroenergetskih sistema	Stabilan i pouzdan izvor energije sa niskim operativnim troškovima	Ograničena primena zbog geografskih i hidroloških uslova, regulatorne i ekološke procedure
Biomasa	Kotlovi na biomasu i kogeneracioni sistemi (CHP) za grejanje i proizvodnju električne energije	Korišćenje lokalno dostupnih resursa, smanjenje emisija u odnosu na fosilna goriva	Zahteva kontinuirano i pouzdano snabdevanje biomasom
Geotermalna energija	Geotermalne toplotne pumpe za grejanje, hlađenje i pripremu potrošne tople vode u bolnicama	Visoka efikasnost (COP 3-5), stabilan izvor nezavisan od vremenskih uslova, značajno smanjenje emisija	Visoki početni troškovi instalacije, geološka ograničenja, potreba za tehničkom ekspertizom
Energetsko iskorišćenje otpada	Anaerobna digestija organskog otpada (npr. kuhinjski otpad iz bolnica) ili spaljivanje medicinskog otpada uz proizvodnju energije	Smanjenje količine otpada, proizvodnja energije iz otpada	Zahteva specijalizovanu infrastrukturu i stroge ekološke standarde

Dugoročni ugovori o kupovini električne energije iz obnovljivih izvora (PPA) (eng. *power purchase agreements*) predstavljaju važan mehanizam za dekarbonizaciju zdravstvenog sektora, jer omogućavaju zdravstvenim ustanovama da nabavljaju električnu energiju proizvedenu iz obnovljivih izvora bez potrebe za izgradnjom sopstvenih proizvodnih kapaciteta. Na primer, Boston Medical Center je sklopio 25-godišnji PPA za kupovinu električne energije iz solarne elektrane u saveznoj državi Severna Karolina koji obezbeđuje 100% njihove godišnje potrošnje električne energije iz obnovljivih izvora [34]. I pored toga, Boston Medical Center je nedavno instalirao solarni sistem snage 356 kW na krovu renovirane administrativne zgrade i modelom virtuelnog net merenja (VNM) (eng. *virtual net metering*), dodeljuje kredite za obnovljivu energiju domaćinstvima pacijenata, smanjujući njihove račune za električnu energiju i istovremeno podržavajući njihovo fizičko, ekonomsko i ekološko zdravlje [35].

III - 2 Investiranje u zgrade sa nultim emisijama

Zgrade i infrastrukturni objekti zdravstvenog sektora generišu značajne emisije tokom čitavog životnog ciklusa, od izgradnje i korišćenja, do rekonstrukcije i uklanjanja. U narednom periodu, gradiće se nova zdravstvenena građevinska infrastruktura i relativno veliki broj postojećih zdravstvenih zgrada će biti rekonstruisano i renovirano. Planiranje, projektovanje i izgradnja zdravstvenih objekata moraju da budu usmereni ka zgradama nulte emisije. To podrazumeva korišćenje recikliranih i inovativnih ekološki održivih materijala sa niskim ugljeničnim otiskom pri izgradnji ili rekonstrukciji zgrada, koje treba da budu visoko energetski efikasne, opremljene pametnim energetskim sistemima i napajane energijom iz obnovljivih izvora. Jedan od široko primenjenih okvira za održivu izgradnju bolnica je LEED sertifikacija (eng. *leadership in energy and environmental design*), koja postavlja stroge standarde za ekološki odgovorno projektovanje zgrada [36]. Bolnice sa LEED sertifikatom odlikuju se visokom energetskom efikasnošću i korišćenjem obnovljivih izvora energije, poboljšanim kvalitetom unutrašnjeg vazduha, racionalnom potrošnjom vode, primenom održivih materijala i optimizacijom prostora, što značajno smanjuje njihov ugljenični otisak i doprinosi zdravijem okruženju za pacijente i osoblje. Pored toga, pri planiranju, projektovanju i rekonstrukciji zdravstvenih objekata potrebno je maksimalno optimizovati korišćenje prostora i graditi samo one zgrade koje su apsolutno neophodne [7].

U pojedinim zgradama zdravstvene namene, kao što su bolnice i klinički centri koji neprekidno funkcionišu, sistemi za grejanje, ventilaciju i klimatizaciju vazduha (HVAC) često su odgovorni za više od polovine ukupne potrošnje energije. Visoke stope izmene vazduha, neophodne za kontrolu infekcija u operacionim salama i jedinicama za izolaciju, stvaraju značajno toplotno opterećenje. Modernizacija ovih sistema obuhvata prelazak sa kotlova koji koriste fosilna goriva na toplotne pumpe (vazduh-voda ili zemlja-voda) i integraciju modula za rekuperaciju toplote, čime se postižu značajne uštede energije i smanjenje emisija CO_2.

Pored poboljšanja termoizolacionih karakteristika zgrada, strategije povećanja energetske efikasnosti u zdravstvenom sektoru podrazumevaju i:

- redovne energetske preglede kojima se identifikuju neefikasnosti i prilike za unapređenje energetske efikasnosti,
- zamenu zastarele i ugradnju energetski efikasne opreme za HVAC, električno osvetljenje, IKT (informaciono-komunikacione tehnologije), hlađenje (koja ne koriste GWC potentne F-gasove, poput hidrofluorougljenika (HFC) i hidrohlorofluorougljenika (HCFC)), medicinske opreme, itd.,
- uvođenje sistema pametne automatizacije, tj.korišćenje pametnih (eng. *smart*) sistema koji automatski optimizuju rad grejanja, hlađenja, osvetljenja i potrošnje vode,
- prelazak na LED rasvetu uz ugradnju senzora prisustva radi smanjenja potrošnje električne energije,
- implementaciju sistema za upravljanje zgradama (BMS/EMS) (eng. *building/energy management systems*) kojima se centralizovano upravlja potrošnjom energije uz praćenje (monitoring) u realnom vremenu,
- obuku o načinima štednje energije i motivisanje zaposlenih da sprovode energetski efikasne radne navike [7, 37, 38].

III - 3 Prelazak na održiv saobraćaj i mobilnost bez emisija

Saobraćaj u zdravstvenom sektoru, koji obuhvata transport pacijenata, zaposlenih i medicinskih proizvoda, značajan je izvor GHG emisija iz opsega 1 i 3. Pojedine strategije održivog transporta u zdravstvenom sektoru, zajedničke su za javni saobraćaj i/ili prevoz robe. One obuhvataju elektrifikaciju voznog parka, korišćenje vozila sa nižim emisijama, promociju eko-vožnje, korišćenje javnog prevoza - uključujući zajedničko korišćenje automobila (eng. *carpooling*) i promociju aktivne mobilnosti. Aktivna mobilnost (biciklizam, hodanje) ima neposredne pozitivne efekte na samo na lokalni kvalitet vazduha i smanjenje emisija CO_2 već i na poboljšanje javnog zdravlja [39].

Lokacija zdravstvenih objekata u blizini javnog prevoza i integracija zdravstvene infrastrukture sa urbanim planiranjem poboljšava dostupnost zdravstvenih usluga, što doprinosi smanjenju GHG emisija koje nastaju putovanjima pacijenata, posetilaca i zaposlenih [40].

Jedna od primenjivanih strategija za smanjenje emisija nastalih usled putovanja pacijenata i zaposlenih je primena digitalnih tehnologija telemedicine. Telemedicina je pružanje zdravstvenih usluga na daljinu korišćenjem IKT, bez potrebe da pacijent i zdravstveni radnik budu fizički na istoj lokaciji. Ona podrazumeva korišćenje različitih digitalnih alata, kao što su: video konsultacije između lekara i pacijenta, daljinski monitoring pacijenata (npr. praćenje krvnog pritiska, glukoze ili srčanog ritma putem uređaja), elektronski medicinski kartoni i razmena medicinske dokumentacije, telekonsultacije između lekara radi dijagnostike i donošenja terapijskih odluka [41-43]. Strategije koje uključuju širenje telemedicine imaju potencijal da istovremeno smanje emisije (opsega 1 i 3) i unaprede dostupnost zdravstvenih usluga. Tako, na primer, studija o telemedicini u Brazilu [44] imala je za cilj da proceni smanjenje emisija CO_2, kao i vremena i udaljenosti putovanja, nastalo usled primene telemedicinskih usluga kod pacijenata sa hroničnim oboljenjima. Tokom 4.642 telekonsultacije u periodu jun 2022-novembar 2023, izbegnuto je 4.021 fizičkih poseta zdravstvenoj ustanovi, što je dovelo do ukupne uštede od 21.593 $kgCO_2$ (prosečno 5,4 $kgCO_2$ po konsultaciji), smanjenja pređene udaljenosti za oko 365.160 km i uštede 488.584 minuta tj. 339 dana, 7 sati i 4 minute putovanja.

U budućnosti, dronovi imaju potencijal da postanu pouzdane platforme za medicinsku isporuku, koja uključuje mikrobiološke i laboratorijske uzorke, farmaceutske proizvode, vakcine, hitnu medicinsku opremu, pa čak i transport pacijenata [45], mada do danas malo njih funkcioniše kao potpuno komercijalna usluga [46].

III - 4 Obezbeđivanje zdrave, lokalno proizvedene hrane uz nulti otpad od hrane

Hrana i otpad od hrane doprinose značajnim emisijama unutar zdravstvenog sistema [47]. Zdravstveni sistemi često upravljaju sopstvenim internim sistemima ishrane, od kreiranja jelovnika i odabira izvora hrane, do same pripreme i distribucije obroka pacijentima, osoblju, a neretko i posetiocima. Uporedo sa tim, ovi sistemi moraju da adekvatno upravljaju i ostacima hrane [7].

Delovanje u svakoj fazi ovog lanca ishrane unutar zdravstvenog sektora može da smanji GHG emisije i osigura nutritivno vrednu hranu. Primeri takvih mera obuhvataju:

- nabavku nutritivno bogatih, lokalnih, sezonskih i održivo proizvedenih prehrambenih proizvoda,
- smanjenje zastupljenosti mesa i mlečnih porizvoda kreiranjem obroka primarno zasnovanih na biljnim proteinima poput mahunarki, orašastih plodova i semenki,
- smanjenje generisanja, prikupljanje i prenamena otpada od hrane (osoblje zaduženo za pripremu hrane trebalo bi da bude edukovano o održivim praksama, dok količina otpada od hrane može da se smanji posluživanjem po zahtevu, prikupljanjem jestive hrane za redistribuciju lokalnim zajednicama i preradom ostataka kompostiranjem ili u anaerobnim digestorima) [7, 37, 39].

Takođe, preporučuje se izbegavanje korišćenja jednokratnog posuđa, korišćenje bolničkih dvorišta za uzgoj hrane za pacijente, osoblje ili lokalnu zajednicu, i korišćenje energetski i resursno efikasnih tehnologija za pripremu hrane, njeno podgrevanje i pranje sudova [7, 48, 49].

III - 5 Podsticanje razvoja i upotrebe farmaceutskih proizvoda sa niskim ugljeničnim otiskom

Usled energetski intenzivne proizvodnje i globalnih lanaca snabdevanja, proizvodnja i upotreba farmaceutskih proizvoda i medicinskog potrošno materijal su jedan od najvećih izvora indirektnih emisija u zdravstvu. Podsticanje razvoja nisko-ugljeničnih farmaceutskih proizvoda, racionalizacija propisivanja terapija i zamena proizvoda sa visokim potencijalom globalnog zagrevanja klimatski prihvatljivijim alternativama predstavljaju ključne intervencije [7].

Odgovornost zdravstvenog sektora je da minimizira nepotrebnu potrošnju i rasipanje farmaceutskih proizvoda, osiguravajući da se lekovi propisuju i koriste na racionalan, efikasan i klinički opravdan način. Takav pristup istovremeno doprinosi unapređenju zdravstvenih ishoda i optimizaciji farmakoterapije, ali i predstavlja važan mehanizam za smanjenje GHG emisija. [50]. Studija u Engleskoj pokazala je da bi smanjenje upotrebe farmaceutskih proizvoda za oko 2,5% moglo da predstavlja jednu od intervencija sa najvećim potencijalom za smanjenje emisija [7].

Farmaceutska industrija u velikoj meri zavisi od kompleksnih globalnih lanaca snabdevanja koji uključuju proizvodnju aktivnih farmaceutskih supstanci, hemijskih intermedijera (međuproizvoda) i sirovina uz značajnu emisiju GHG gasova. Zbog toga se sve veća pažnja posvećuje primeni principa zelene hemije i održive hemijske proizvodnje, koji omogućavaju smanjenje potrošnje energije, otpada i upotrebe toksičnih supstanci u procesu proizvodnje lekova [51]. Istovremeno, neophodna je transformacija proizvodnih procesa ka tehnologijama sa niskim ili nultim emisijama, kako bi se smanjio negativan klimatski uticaj farmaceutske proizvodnje, ali i zaštitilo zdravlje lokalnih zajednica koje žive u neposrednoj blizini industrijskih postrojenja. Ovakav pristup podrazumeva unapređenje energetske efikasnosti, primenu obnovljivih izvora energije i razvoj čistijih proizvodnih procesa u okviru farmaceutske industrije [52, 53].

Kao što je već napomenuto, anestetički gasovi i MDI su farmaceutski proizvodi sa značajnim ugljeničnim otiskom i značajnim doprinosom ukupnim emisijama u zdravstvenom sektoru. Strategije ublažavanja u anesteziologiji uključuju: izbegavanje inhalacionih anestetika i korišćenje intravenske anestezije kada je klinički prikladno, izbegavanje desflurana i azot-suboksida ako se koriste inhalacioni anestetici (osim ako ne postoje jasne kliničke indikacije), korišćenje nisko-protočne anestezije (LFA) (eng. *low-flow anesthesia*), uništavanje i hvatanje otpadnih anestetičkih gasova [54, 55].

Inhalatori za astmu i hroničnu opstruktivnu bolest pluća (HOBP) koriste potisne gasove koji imaju značajan GWP. Inhalatori sa HFC-152a propelantom su ekološki prihvatljivije rešenje jer imaju mnogo manji GWP od MDI sa tradicionalnim propelantima (HFC-134a i HFC-227ea) [17]. Alternativa MDI sa propelantom su inhalatori bez potisnih gasova, poput inhalatora sa suvim prahom (DPI) (eng. *dry powder inhaler*) [56] i inhalatora sa mekanom maglicom (SMI) (eng. *soft mist inhaler*) [57], koji terapiju isporučuju bez upotrebe potisnih gasova i imaju značajno manji ugljenični otisak. Prelazak sa MDI na DPI uređaje može da smanji emisije i do 20-40 puta, uz zadržavanje efikasne kontrole bolesti kod pacijenata sa astmom i HOBP [56].

Regulativa (EU) 2024/573 o fluorovanim GHG gasovima (F-gasovima) [58] uspostavlja stroge kvote i postupno smanjenje dostupnosti HFC gasova na tržištu Evropske unije, uključujući propulzivne gasove u inhalatorima, sa ciljem potpunog ograničenja do 2050. godine. Time se podstiče farmaceutska industrija na razvoj verzija inhalatora sa nižim GWP-om i održivijim rešenjima [59].

III - 6 Implementacija cirkularnog zdravstva i održivog upravljanja otpadom

Pristup cirkularne ekonomije podrazumeva postepeno razdvajanje ekonomskih aktivnosti od potrošnje ograničenih prirodnih resursa i dizajniranje sistema u kojem se otpad minimizira ili eliminiše. Principi cirkularne ekonomije često se operacionalizuju kroz „model 8R“, koji obuhvata redizajn (eng. *redesign*), zamenu (eng. *replace*), smanjenje potrošnje resursa (eng. *reduce*), ponovnu upotrebu (eng. *reuse*), popravku (eng. *repair*), ponovnu obradu (eng. *reprocess*), prenamenu (eng. *repurpose*) i reciklažu (eng. *recycle*) [60]. Primena ovih principa u zdravstvenom sektoru omogućava smanjenje potrošnje materijala, produženje životnog ciklusa medicinskih proizvoda i efikasnije upravljanje otpadom, čime se doprinosi smanjenju emisija GHG gasova i unapređenju održivosti zdravstvenih sistema. Cirkularna ekonomija u zdravstvenom sektoru zahteva sistemsku transformaciju lanaca snabdevanja i modela pružanja zdravstvenih usluga. To uključuje prelazak na poslovne modele zasnovane na konceptu „proizvod-kao-usluga“, kao i primenu reverzne logistike koja omogućava povraćaj i ponovnu upotrebu materijala [7], [61-63].

U okviru takvog pristupa, materijali koji se koriste u zdravstvenom sistemu treba da budu netoksični, dugotrajni, ponovo upotrebljivi, reciklabilni i sa niskim ugljeničnim otiskom, dok bi lanci snabdevanja trebalo da budu što kraći i regionalno orijentisani. Poseban izazov predstavlja velika zavisnost zdravstvenog sektora od jednokratnih medicinskih proizvoda, naročito u razvijenim zemljama. Dok su pojedini proizvodi niske složenosti, poput igala i špriceva, opravdano namenjeni za jednokratnu upotrebu uz adekvatno recikliranje, mnogi medicinski uređaji srednje i visoke složenosti mogu biti redizajnirani kako bi omogućili duži životni vek, ponovnu obradu i ponovnu upotrebu materijala [64, 65]. Takođe, široka upotreba plastike na bazi fosilnih goriva u zdravstvenom sektoru zahteva smanjenje njene potrošnje i razvoj održivijih rešenja u proizvodnji i pakovanju medicinskih proizvoda [60].

Zdravstveni sektor generiše značajne količine otpada, uključujući infektivni otpad, oštre predmete, ljudsko tkivo, kao i hemijske i farmaceutske supstance. Neadekvatno upravljanje medicinskim otpadom može da predstavlja ozbiljan rizik po javno zdravlje i životnu sredinu. Procene ukazuju da samo oko 20% otpada u zdravstvenim ustanovama predstavlja opasan otpad koji zahteva poseban tretman, dok preostali deo može da se reciklira ili ponovo obradi ukoliko je pravilno razdvojen [7]. Mnoge zemlje imaju nacionalne propise koji određuju kategorije za razvrstavanje medicinskog otpada i sistem kolor-kodiranja (kodiranje bojama) za kontejnere za otpad. U slučajevima kada takvi nacionalni propisi ne postoje, dostupna je šema koju preporučuje Svetska zdravstvena organizacija, prikazana u Tabeli 5. [66]. Pravilno razvrstavanje otpada omogućava da se njegov najveći deo, koji je u suštini neopasan, reciklira ili ponovo

upotrebi, umesto da se podvrgava skupom tretmanu spaljivanja [67]. Smanjenje otpada optimizacijom pakovanja, efikasnim razdvajanjem i ponovnom upotrebom materijala predstavlja ključni element cirkularne ekonomije u zdravstvenom sektoru.

Tabela 5. Klasifikacija medicinskog otpada prema šemi razdvajanja koju preporučuje SZO

Kategorija zdravstvenog otpada	Primeri otpada	Preporučeni tip i boja kontejnera (WHO)
visoko infektivni otpad	uzorci iz dijagnostičkih laboratorija, otpad od pacijenata u izolaciji	žute autoklavabilne, nepropusne kese ili kontejneri sa biohazard simbolom i oznakom „HIGHLY INFECTIOUS“
infektivni i patološki otpad	otpad kontaminiran krvlju i telesnim tečnostima, laboratorijske kulture, tkiva, organi, delovi tela	žute nepropusne kese ili kontejneri sa biohazard simbolom
oštri medicinski otpad	igle, špricevi, skalpeli, slomljeno staklo	žuti, neprobojni kontejneri sa biohazard simbolom i oznakom „SHARPS“
farmaceutski i citotoksični otpad	istekli lekovi, citostatici, genotoksične supstance	braon plastične kese ili kruti kontejneri sa odgovarajućim hazard simbolima
hemijski otpad	laboratorijski reagensi, dezinfekciona sredstva, rastvarači, polomljeni termometri	braon kese ili kruti kontejneri sa hazard oznakama
radioaktivni otpad	otpad kontaminiran radionuklidima, materijal iz radioterapije	zaštićeni (eng. *shielded*) kontejneri sa simbolom radioaktivnosti
opšti zdravstveni otpad (neopasan)	otpad sličan komunalnom: papir, ambalaža, hrana	crne plastične kese

Tradicionalne metode tretmana medicinskog otpada, poput spaljivanja, dovode do emisija ugljen-dioksida, azotnih oksida, čvrstih čestica i toksičnih jedinjenja kao što su dioksini i furani. Ovi problemi su posebno izraženi kod malih spalionica koje se često koriste u zemljama u razvoju. Zbog toga se sve više preporučuju alternativne tehnologije tretmana sa nižim ugljeničnim otiskom, kao što su autoklaviranje (termomehanički proces sterilizacije koji koristi vlažnu paru pod pritiskom), biološki tretmani (npr. biodigesija), mikrotalasni tretman, hemijska dezinfekcija, itd. [68, 69]. Na taj način moguće je da se istovremeno smanji ugljenični otisak zdravstvenih sistema, ograniči zagađenje vazduha i unapredi zaštita zdravlja pacijenata, zdravstvenih radnika i lokalnih zajednica.

III - 7 Povećanje efikasnosti zdravstvenog sistema i eliminacija neefikasnih praksi

Unapređenje efikasnosti zdravstvenog sistema predstavlja horizontalnu meru sa značajnim potencijalom za smanjenje GHG emisija. Ovaj pristup obuhvata smanjenje i eliminaciju nepotrebnih dijagnostičkih i terapijskih procedura, unapređenje koordinacije nege, jačanje primarne zdravstvene zaštite i integraciju klimatskih ciljeva u kliničke i upravljačke prakse zdravstvenih institucija, koji dovode do smanjenja potrošnje resursa i energije. Istovremeno, ove mere poboljšavaju ishode lečenja i smanjuju finansijski pritisak na zdravstvene sisteme, čime se postiže sinergija između klimatskih i zdravstvenih ciljeva [7].

Savremene analize pokazuju da značajan deo zdravstvene potrošnje otpada na zdravstvenu zaštitu „niske vrednosti“ (engl. *low-value care*), odnosno zdravstvene intervencije (dijagnostičke, terapijske ili preventivne) koje donose malu ili nikakvu korist za pacijenta u odnosu na troškove, rizike ili potencijalne štetne posledice [70]. Smanjenje ovakvih praksi i jačanje preventivnih mera prepoznati su kao strategije koje istovremeno mogu da unaprede kvalitet zdravstvene zaštite i smanje emisije zdravstvenog sektora [71, 72]. Ipak, upozorava se da koncept „vrednosti“ u zdravstvenoj zaštiti zavisi od kliničkog konteksta i društvenih prioriteta i da redukcija zdravstvenih intervencija mora da bude zasnovana na jasnim kliničkim kriterijumima, da klimatski ciljevi ne bi bili pogrešno korišćeni kao opravdanje za smanjenje dostupnosti zdravstvene zaštite [73].

Prema OECD studijama, smanjenje neadekvatnih hospitalizacija i bolje upravljanje praćenjem bolesnika mogu značajno da smanje GHG emisije uz istovremeno unapređenje zdravstvenih ishoda [13].

Uvođenje digitalnih putanja nege predstavlja strategiju kojom se elektronskim sistemima prati i koordinira svaki korak u dijagnostici i lečenju pacijenata. Ovi sistemi omogućavaju bolju koordinaciju između odeljenja, smanjuju greške i nepotrebne procedure, čime se poboljšava kvalitet i sigurnost nege. Istovremeno, optimizacija procesa kroz digitalne putanje doprinosi smanjenju potrošnje resursa, uključujući energiju, materijal i transport, što direktno smanjuje ugljenični otisak zdravstvenog sistema. Na ovaj način, digitalne tehnologije omogućavaju sinergiju između kliničke efikasnosti i održivosti, čime zdravstvene institucije mogu istovremeno da unaprede kvalitet nege i doprinesu ciljevima dekarbonizacije [74].

IV INICIJATIVE ZA DEKARBONIZACIJU ZDRAVSTVENOG SEKTORA

Učešće zdravstvenih organizacija u globalnim klimatskim inicijativama ima dvostruki značaj. Sa jedne strane, doprinosi smanjenju ukupnih emisija sektora, dok sa druge strane zdravstvene institucije kroz svoju društvenu i profesionalnu ulogu mogu značajno da utiču na podizanje svesti o povezanosti klimatskih promena i javnog zdravlja.

U poslednjih nekoliko godina sve veći broj međunarodnih inicijativa usmeren je ka ubrzanju tranzicije ka klimatski neutralnim ekonomijama. U tom kontekstu, jedna od najznačajnijih globalnih inicijativa je Race to Zero[2], kampanja pokrenuta pod okriljem Okvirne konvencije Ujedinjenih nacija o klimatskim promenama (UNFCCC) sa ciljem mobilizacije različitih aktera (država, regiona, gradova, kompanija i institucija) da se obavežu na postizanje neto nultih emisija gasova sa efektom staklene bašte do sredine XXI veka. Zdravstveni sektor je prepoznat kao važan akter u ovoj globalnoj

[2] https://climateaction.unfccc.int/Initiatives?id=Race_to_Zero

tranziciji, imajući u vidu njegov značajan udeo u globalnim GHG emisijama, ali i njegovu ključnu društvenu ulogu u zaštiti zdravlja stanovništva. Kroz partnerstvo sa organizacijom Health Care Without Harm[3], zdravstveni sektor širom sveta pozvan je da se pridruži ovoj inicijativi i preuzme obavezu planiranja i sprovođenja mera za smanjenje svojih GHG emisija. Inicijativa podstiče zdravstvene institucije da izrade transparentne planove i da javno izveštavaju o napretku i implementaciji konkretnih mera za smanjenje emisija u okviru samih zdravstvenih ustanova i njihovih lanaca snabdevanja, čime se osigurava verodostojnost i odgovornost u procesu dekarbonizacije. Više od 100 zdravstvenih organizacija iz preko 30 zemalja, uključujući bolnice i zdravstvene centre, do danas je pristupilo Race to Zero kampanji, demonstrirajući rastuću posvećenost sektora klimatskoj održivosti i otpornosti (slika 3) [75].



Slika 3. Geolokacije zdravstvenih institucija koje su pristupile Race to Zero kampanji

Pored globalnih inicijativa, na evropskom nivou razvija se veliki broj projekata i programa usmerenih na podršku održivoj transformaciji zdravstvenog sektora. Jedan od takvih projekata je DAPHNE *(Decarbonising healthcare in EU regions)*[4]**,** koji se realizuje u okviru programa Interreg Europe, čiji je cilj razmena znanja i razvoj politika koje doprinose smanjenju emisija gasova sa efektom staklene bašte u zdravstvenom sektoru EU. Projekat okuplja više regionalnih i institucionalnih partnera koji zajednički rade na identifikaciji i razmeni uspešnih pristupa za smanjenje emisija u zdravstvenim sistemima. Poseban fokus projekta stavljen je na identifikaciju i promociju dobrih praksi (eng. *good practices*) koje mogu da posluže kao modeli za druge regione i zdravstvene institucije (tabela 6). Dosadašnje dobre prakse obuhvataju širok spektar aktivnosti, uključujući unapređenje energetske efikasnosti bolničkih zgrada, integraciju obnovljivih izvora energije u zdravstvenu infrastrukturu, razvoj održivih modela upravljanja medicinskim otpadom, unapređenje zelenih javnih nabavki, kao i primenu digitalnih tehnologija koje omogućavaju smanjenje potrebe za fizičkim transportom pacijenata i zdravstvenog osoblja.

Dosadašnje dobre prakse obuhvataju širok spektar aktivnosti, uključujući unapređenje energetske efikasnosti bolničkih zgrada, integraciju obnovljivih izvora energije u zdravstvenu infrastrukturu, razvoj održivih modela upravljanja medicinskim otpadom, unapređenje zelenih javnih nabavki, kao i primenu digitalnih tehnologija koje omogućavaju smanjenje potrebe za fizičkim transportom pacijenata i zdravstvenog osoblja.

Tabela 6 Identifikovani primeri dobre prakse u projektu DAPHNE [76]

Br.	Institucija / projekat	Lokacija	Kratak opis intervencije	Strateška akcija
1	Campostaggia Hospital	Italija (Toskana)	Instalacija fotonaponskog sistema iznad parkinga i energetski efikasne rasvete	SA1, SA2
2	St. Maria Hospital	Jaši (Rumunija)	Sveobuhvatna energetska renovacija: termoizolacija, solarni paneli, novi HVAC sistemi, LED rasveta, unapređenje vodovodne i kanalizacione infrastrukture	SA1, SA2, SA4, SA7
3	404 General Military Hospital	Larisa (Grčka)	Energetska modernizacija istorijske bolnice sa ciljem smanjenja potrošnje energije i integracije obnovljivih izvora	SA1
4	Surgical Services – Thessaly	Larisa (Grčka)	Uvođenje antimikrobnih površina i održivih protokola čišćenja u hirurškim službama	SA7
5	Wolica Hospital	Godziesze Małe (Poljska)	Integracija obnovljivih izvora energije i održivo upravljanje resursima radi smanjenja emisija	SA1, SA2, SA6, SA7
6	Regional Hospital Toruń	Torunj (Poljska)	Dizajn bolnice zasnovan na energetskoj efikasnosti i nature-based rešenjima	SA1, SA2
7	Capital & Estates Energy Bureau	Irska	Nacionalni program energetskog menadžmenta i smanjenja emisija u zdravstvenim ustanovama	SA1, SA2
8	VMA Hospital Renovation	Beograd (Srbija)	Energetska rehabilitacija bolničke infrastrukture i smanjenje GHG emisija	SA1, SA2, SA6
9	Low Carbon Healthcare Infrastructure Audit	Belgija	Energetski pregledi zdravstvenih objekata i digitalna platforma za planiranje klimatskih investicija	SA1, SA2, SA7
10	University Clinical Hospital No.1	Šćećin (Poljska)	Energetska efikasnost, obnovljivi izvori energije i e-mobilnost u zdravstvenom sistemu	SA1, SA2, SA3, SA6, SA7
11	Careggi Hospital Waste Protocol	Firenca (Italija)	Sporazum o održivom upravljanju medicinskim otpadom	SA6

Razmena dobrih praksi u okviru projekta DAPHNE omogućava zdravstvenim institucijama i regionalnim vlastima da identifikuju efikasne modele dekarbonizacije koji su već testirani u praksi. Na taj način projekat doprinosi ubrzanju implementacije klimatskih politika u zdravstvenom sektoru i jačanju kapaciteta institucija za

[3] https://noharm.org/
[4] https://www.interregeurope.eu/daphne

sprovođenje mera koje istovremeno doprinose zaštiti životne sredine i unapređenju kvaliteta zdravstvenih usluga.

V Prepreke za dekarbonizaciju zdravstvenog sektora

Uprkos rastućem interesovanju za smanjenje GHG emisija u zdravstvenom sektoru, proces dekarbonizacije suočava se sa brojnim institucionalnim, ekonomskim i organizacionim preprekama. Jedna od ključnih prepreka odnosi se na nedostatak jasnih politika i regulatornih okvira koji bi integrisali klimatske ciljeve u upravljanje zdravstvenim sistemima. U mnogim zemljama klimatska politika i dalje nije sistematski integrisana u zdravstvene strategije, što otežava sprovođenje koordinisanih mera smanjenja emisija [13], [77]. Drugu značajnu prepreku predstavlja ograničena dostupnost finansija. Implementacija održivih tehnologija, energetski efikasne infrastrukture ili niskougljeničnih medicinskih proizvoda često zahteva visoka početna ulaganja, što može da predstavlja izazov za zdravstvene ustanove koje funkcionišu u okviru restriktivnih budžeta [77].

Zdravstveni proizvodi se prvenstveno dizajniraju sa ciljem zadovoljenja kliničke potrebe, efikasnosti i bezbednosti, dok je održivost obično sekundarni kriterijum. Prelazak na održivu proizvodnju kroz unapređenje proizvodnih procesa, korišćenje čistijih izvora energije i primenu novih materijala, zahteva značajna početna ulaganja, a u pojedinim slučajevima i dodatni regulatorni nadzor. Na tržištima koja su posebno osetljiva na cenu, ovi dodatni troškovi mogu da uspore prihvatanje održivijih rešenja. Pored toga, čak i percepcija mogućih negativnih uticaja na performanse proizvoda, njegovu trajnost ili bezbednost može da obeshrabri investicije u ekološki prihvatljivije alternative [78].

Pored finansijskih ograničenja, u literaturi se često ističe i nedostatak znanja i svesti o klimatskom uticaju zdravstvenog sektora među zdravstvenim radnicima i menadžmentom. Nedovoljna edukacija o održivim praksama može da ograniči spremnost institucija da implementiraju inovativna rešenja i promene postojeće modele funkcionisanja [79]

Važnu prepreku predstavljaju i organizacione i kulturne prepreke, uključujući otpor prema promenama i ukorenjene kliničke i administrativne prakse. Uvođenje novih tehnologija, promena u nabavci ili reorganizacija procesa nege često zahteva značajne institucionalne transformacije, što može da izazove otpor unutar organizacija [80].

Dodatni izazov predstavlja nedostatak standardizovanih podataka i metrika za praćenje emisija u zdravstvenom sektoru. Bez pouzdanih sistema za prikupljanje i analizu podataka o emisijama, posebno u okviru emisija lanca snabdevanja (opseg 3), zdravstvene organizacije imaju ograničene mogućnosti da planiraju i prate efekte mera dekarbonizacije [13], [79].

Na kraju, u literaturi se naglašava i etička dimenzija dekarbonizacije zdravstvene zaštite. Postoji zabrinutost da klimatske mere ne smeju dovesti do smanjenja kvaliteta ili dostupnosti zdravstvene zaštite. Zbog toga je važno da mere smanjenja emisija budu zasnovane na jasnim kliničkim kriterijumima i dokazima, kako bi se izbeglo da klimatski ciljevi budu pogrešno interpretirani kao opravdanje za ograničavanje zdravstvenih intervencija [81].

VIII Zaključak

Zdravstveni sektor predstavlja jedan od značajnih, ali često nedovoljno prepoznatih izvora GHG emisija. Rezultati brojnih istraživanja ukazuju da aktivnosti zdravstvenih sistema (potrošnja energije zdravstvenih objekata, upotreba medicinske opreme, transport, kompleksni lanci snabdevanja farmaceutskim i medicinskim proizvodima) generišu značajan ekološki otisak.

U svetlu sve izraženijih klimatskih promena i njihovih posledica po javno zdravlje, transformacija zdravstvenog sektora ka niskougljeničnom modelu predstavlja ne samo ekološki, već i strateški prioritet za dugoročno održiv razvoj zdravstvenih sistema. Dekarbonizacija zdravstvenog sektora je jedan od najsloženijih tranzicionih procesa u savremenom društvu jer zahteva holistički pristup koji integriše tehnološke inovacije, redefinisanje ustaljenih kliničkih praksi i snažnu političku podršku. Sistematskom analizom postojećih saznanja u radu su identifikovane ključne strategije za smanjenje GHG emisija, koje uključuju snabdevanje obnovljivim i drugim dekarbonizovanim izvorima energije, unapređenje energetske efikasnosti zdravstvene infrastrukture, podsticanje korišćenja faramceutskih proizvoda sa niskim ugljeničnim otiskom, održive modele upravljanja medicinskim otpadom, zelene javne nabavke i digitalizaciju zdravstvenih usluga.

Istovremeno, analiza globalnih i evropskih inicijativa pokazuje da se dekarbonizacija zdravstvenog sektora sve više prepoznaje kao važan element klimatske politike. Inicijative poput globalne kampanje Race to Zero i projekti kao što je DAPHNE demonstriraju rastući institucionalni i politički angažman u pravcu razvoja klimatski održivih zdravstvenih sistema, kao i značaj razmene znanja i dobrih praksi među zdravstvenim institucijama i regionima.

Međutim, uprkos postojanju brojnih tehnoloških i organizacionih rešenja, proces dekarbonizacije i dalje je ograničen nizom institucionalnih, finansijskih, infrastrukturnih i organizacionih prepreka. Prevazilaženje ovih barijera zahteva integrisani pristup koji podrazumeva jačanje regulatornih okvira, povećanje investicija u održivu zdravstvenu infrastrukturu, razvoj stručnih kapaciteta i snažniju međunarodnu saradnju.

Ipak se očekuje da će u narednoj deceniji održivost postati sastavni deo upravljanja zdravstvenim sistemima, a ne dodatna ili dobrovoljna aktivnost. Suprotstavljena mišljenja u literaturi uglavnom se odnose na brzinu i obim dekarbonizacije. Dok jedna struja ističe sinergiju između klimatskih i zdravstvenih ciljeva, druga upozorava na potrebu očuvanja kvaliteta i pravičnosti zdravstvene zaštite. Ovi stavovi ukazuju da uspešna dekarbonizacija zahteva pažljivo balansirane, kontekstualno prilagođene politike, koje se sve češće institucionalizuju kroz nacionalne strategije, obavezno izveštavanje o emisijama i integraciju klimatskih ciljeva u zdravstvene politike.

Zahvalnica

Prikazani rezultati su deo istraživanja u okviru projekta Decarbonising healthcare in EU regions - DAPHNE iz programa Interreg Europe, a delimično su finansijski podržani od strane Ministarstva NTRiI RS po Ugovorima 451-03-33/2026-03/200107 i 451-03-34/2026-03/200107 od 05.02.2026. godine.

LITERATURA

[1] Forster, P.M., Smith, C., Walsh, T., Lamb, W.F., Lamboll, R., Cassou, C., Hauser, M., Hausfather, Z., Lee, J.-Y., Palmer, M.D., von Schuckmann, K., Slangen, A.B.A., Szopa, S., Trewin, B., Yun, J., Gillett, N.P., Jenkins, S., Matthews, H.D., Raghavan, K., Ribes, A., Rogelj, J., Rosen, D., Zhang, X., Allen, M., Aleluia Reis, L., Andrew, R.M., Betts, R.A., Borger, A., Broersma, J.A., Burgess, S.N., Cheng, L., Friedlingstein, P., Domingues, C.M., Gambarini, M., Gasser, T., Gütschow, J., Ishii, M., Kadow, C., Kennedy, J., Killick, R.E., Krummel, P.B., Liné, A., Monselesan, D.P., Morice, C., Mühle, J., Naik, V., Peters, G.P., Pirani, A., Pongratz, J., Minx, J.C., Rigby, M., Rohde, R., Savita, A., Seneviratne, S.I., Thorne, P., Wells, C., Western, L.M., van der Werf, G.R., Wijffels, S.E., Masson-Delmotte, V., Zhai, P. Indicators of Global Climate Change 2024: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence, Earth System Science Data, Vol. 17, No. 6, pp. 2641-2680, 2025. https://doi.org/10.5194/essd-17-2641-2025

[2] United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2024: No More Hot Air … Please! With a Massive Gap Between Rhetoric and Reality, Countries Draft New Climate Commitments, United Nations Environment Programme, Nairobi, 2024. https://doi.org/10.59117/20.500.11822/46404

[3] Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Melo, J., Suárez-Moreno, M., Sedano, F., San-Miguel, J., Manca, G., Pisoni, E., Pekar, F. GHG emissions of all world countries - 2025 Report, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2025. https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2025

[4] Mirković, A., Živković, M., Đenadić, S., Lubarda, D., Anyanwa, C. Integrative GHG Assessment in Oil and Gas Industry, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 25, No. 1, pp. 51-58, 2023. https://doi.org/10.46793/EEE23-1.51M

[5] Josijević, M., Gordić, D., Šušteršič, V., Vukašinović, V., Živković, D., Nikolić, J. Metodologija proračuna ugljeničnog otiska proizvoda na primeru mlekare, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 27, No. 3, pp. 48-55, 2025. https://doi.org/10.46793/EEE25-3.48J

[6] United Nations Environment Programme. Emissions Gap Report 2025: Off Target – Continued Collective Inaction puts Global Temperature Goal at Risk, United Nations Environment Programme, Nairobi, 2025, https://wedocs.unep.org/items/9f0bf855-2069-42a6-a856-4b389f740c5c [pristupljeno 03.03.2026]

[7] Global Road Map for Health Care Decarbonization. Methodology Measuring and Projecting Global Health Sector Emissions, Health Care Without Harm, 2022, https://healthcareclimateaction.org/sites/default/files/2022-05/HCWH%20Road%20Map%20for%20Health%20Care%20Decarbonization%20-%20Chapters%202%20and%203_2.pdf [pristupljeno 03.03.2026]

[8] ARUP. Health Care Without Harm Climate-Smart Health Care Series – Green Paper Number One, Health Care Without Harm, https://global.noharm.org/media/4370/download?inline=1 [pristupljeno 03.03.2026]

[9] World Health Organization. Measuring Greenhouse Gas Emissions in Health Systems, World Health Organization, Geneva, 2025, https://www.who.int/publications/i/item/9789240118423 [pristupljeno 03.03.2026]

[10] Distribution of greenhouse gas emissions worldwide in 2024, by major emitter, Statista, https://www.statista.com/statistics/500524/worldwide-annual-carbon-dioxide-emissions-by-select-country [pristupljeno 03.03.2026]

[11] World Resources Institute/WBCSD. The Greenhouse Gas Protocol: A Corporate Accounting and Reporting Standard, World Resources Institute, Washington, 2004, https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf [pristupljeno 03.03.2026]

[12] Health Care Without Harm Europe. Designing a Net Zero Roadmap for Healthcare: Technical Methodology and Guidance, Health Care Without Harm Europe, https://europe.noharm.org/resources/designing-net-zero-roadmap-healthcare-technical-methodology-and-guidance [pristupljeno 03.03.2026]

[13] OECD. Decarbonising Health Systems Across OECD Countries, OECD Health Policy Studies, OECD Publishing, Paris, 2025. https://doi.org/10.1787/5ac2b24b-en

[14] Jabaudon, M., Vallabh, B., Bacher, H.P., Badenes, R., Kehl, F. Balancing patient needs with environmental impacts for best practices in general anesthesia: Narrative review and clinical perspective, Anaesthesia Critical Care & Pain Medicine, Vol. 43, No. 4, 101389, 2024. https://doi.org/10.1016/j.accpm.2024.101389

[15] Espinosa, S., Martínez, F., Antiñolo, M., Nielsen, O.J., Jiménez, E. Updated global warming potentials of inhaled halogenated anesthetics, isoflurane and sevoflurane from new temperature dependent OH-kinetics, Environmental Science: Processes & Impacts, Vol. 27, pp. 2410-2425, 2025. https://doi.org/10.1039/d5em00061k

[16] Talbot, A., Holländer, H.C., Bentzer, P. Greenhouse gas impact from medical emissions of halogenated anaesthetic agents: a sales-based estimate, The Lancet Planetary Health, Vol. 9, No. 3, pp. e227-e235, 2025. https://www.thelancet.com/journals/lanplh/article/PIIS2542-5196(25)00027-0/fulltext [pristupljeno 03.03.2026

[17] Jeswani, H.K., Azapagic, A. Life cycle environmental impacts of inhalers, Journal of Cleaner Production, Vol. 237, 117733, 2019. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117733

[18] Sherman, J., Le, C., Lamers, V., Eckelman, M. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions of Anesthetic Drugs, Anesthesia & Analgesia, Vol. 114, No. 15, pp. 1086-1090, 2012. https://doi.org/10.1213/ane.0b013e31824f6940

[19] Global Warming Potential (GWP): What is it? https://www.manglai.io/en/glossary/global-warming-potential [pristupljeno 07.03.2026]

[20] Global Warming Potentials (IPCC Second Assessment Report), UNFCCC, https://unfccc.int/process/transparency-and-reporting/greenhouse-gas-data/greenhouse-gas-data-unfccc/global-warming-potentials [pristupljeno 07.03.2026]

[21] Greenhouse Gas Protocol. IPCC Global Warming Potential Values, Version 2.0, 2024, https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%202024%29.pdf [pristupljeno 07.03.2026]

[22] Vovk, V., Kister, A., Latif, F., Maican, S.Ş. Renewable Energy Sources in Healthcare as a Factor in Sustainable Development in EU Countries, Sustainability, Vol. 17, No. 24, 11194, 2025. https://doi.org/10.3390/su172411194

[23] Soto, E.A., Hernandez-Guzman, A., Vizcarrondo-Ortega, A., McNealey, A., Bosman, L.B. Solar Energy Implementation for Health-Care Facilities in Developing and Underdeveloped Countries: Overview, Opportunities, and Challenges, Energies, Vol. 15, No. 22, pp. 8602, 2022. https://doi.org/10.3390/en15228602

[24] Atienza-Márquez, A., Domínguez-Muñoz, F., Fernández Hernández, F., Cejudo López, J.M. Solar thermal hot water system in hospitals: Robust design methodology considering uncertainties, Renewable Energy, Vol. 234, 121163, 2024. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121163

[25] Vourdoubas, J. Possibilities of Using Sustainable Energy Technologies including CHP Systems, Solar Photovoltaics and Heat Pumps in Hospitals, European Journal of Energy Research, Vol. 2, No. 2, pp. 1-8, 2022. https://doi.org/10.24018/ejenergy.2022.2.2.52

[26] Misra, S., Jaffer, S. Solar powering public health centers: A systems thinking lens, Solar Compass, Vol. 7, 100052, 2023. https://doi.org/10.1016/j.solcom.2023.100052

[27] Olatomiwa, L., Blanchard, R., Mekhilef, S., Akinyele, D. Hybrid renewable energy supply for rural healthcare facilities, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 30, pp. 121-138, 2018. https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.09.007

[28] Olatomiwa, L., Blanchard, R., Mekhilef, S., Akinyele, D. Hybrid renewable energy supply for rural healthcare facilities, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 30, pp. 121-138, 2018. https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.09.007

[29] Lund, J.W., Toth, A.N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review, Geothermics, Vol. 90, 101915, 2021. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101915

[30] Ba-swaimi, S., Verayiah, R., Ramachandaramurthy, V.K., Alahmad, A.K. An integrated and optimized framework for hybrid renewable and hydrogen energy systems in the healthcare sector: Economic, technical, and environmental assessment, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 115, pp. 361-378, 2025. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.03.102

[31] 8 ways to decarbonise healthcare, EQUANS, https://www.equans.com/news/hospital-decarbonisation-8-ways-cut-emissions-healthcare [pristupljeno 08.06.2026]

[32] Noethen, M., Stemmle, R., Siebert, N., Herrmann, M., Menberg, K., Blum, P., Bayer, P. Identifying aquifer thermal energy storage (ATES) key locations for hospitals in Lower Saxony, Germany, Geothermics, Vol. 130, 103334, 2025. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2025.103334

[33] Ahmadfard, M., Baniasadi, E. Borehole thermal energy storage systems: A comprehensive review using bibliometric and qualitative tools, Applied Energy, Vol. 387, 125638, 2025. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125638

[34] Leung, J., Bailey, A. Buying Clean Electricity: How Cities Benefit from Power Purchase Agreements, Center for Climate and Energy Solutions, Washington, 2018, https://www.c2es.org/wp-content/uploads/2018/09/how-cities-benefit-from-ppas.pdf [pristupljeno 08.02.2026]

[35] BMC launches innovative Clean Power Prescription program, Boston Medical Center, https://www.bmc.org/clean-power-prescription-program [pristupljeno 08.06.2026]

[36] Tavşan, F., Bektaş, U. Sustainable Design Approaches of Leed-Certified Healthcare Buildings, Journal of Interior Design and Academy, Vol. 3, No. 1, pp. 120-132, 2023. https://doi.org/10.53463/inda.20230187

[37] Olawade, D.B., Popoola, T.T., Egbon, E., David-Olawade, A.C. Sustainable healthcare practices: Pathways to a carbon-neutral future for the medical industry, Sustainable Futures, Vol. 9, 100783, 2025. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.100783

[38] Chen-Xu, J., Kislaya, I., Fernandes, R.M., Carvalho, J., Blanco-Rojas, B.J., El-Omrani, O., Miotto, E., Čič, K., Boto, P., Viegas, S. Interventions for increasing energy efficiency in hospitals (Protocol), Cochrane Database of Systematic Reviews, No. 3, CD015693, 2024. https://doi.org/10.1002/14651858.CD015693

[39] Mirow, J., Venne, J., Brand, A. Green health: how to decarbonise global healthcare systems, Sustainable Earth Reviews, Vol. 7, No. 28, 2024. https://doi.org/10.1186/s42055-024-00098-3

[40] Yan, F., Huang, N., Zhang, Y. How Can the Layout of Public Service Facilities Be Optimized to Reduce Travel-Related Carbon Emissions? Evidence from Changxing County, China, Land, Vol. 11, No. 8, pp. 1200, 2022. https://doi.org/10.3390/land11081200

[41] Purohit, A., Smith, J., Hibble, A. Does telemedicine reduce the carbon footprint of healthcare? A systematic review, Future Healthcare Journal, Vol. 8, No. 1, pp. e85-e91, 2021. https://doi.org/10.7861/fhj.2020-0080

[42] Donald, N., Irukulla, S. Greenhouse gas emission savings in relation to telemedicine and associated patient benefits: a systematic review, Telemedicine and e-Health, Vol. 28, No. 11, pp. 1555-1563, 2022. https://doi.org/10.1089/tmj.2022.0047

[43] Ravindrane, R., Patel, J. The environmental impacts of telemedicine in place of face-to-face patient care: a systematic review, Future Healthcare Journal, Vol. 9, No. 1, pp. 28-33, 2022. https://doi.org/10.7861/fhj.2021-0148

[44] Gadenz, S.D., Sperling, S., Moraes, L.B. et al. Impact of telemedicine on reducing travel-related CO_2 emissions in chronic disease care: a cross-sectional study in Northeast Brazil, BMJ Open, Vol. 15, e092424, 2025. https://doi.org/10.1136/bmjopen-2024-092424

[45] Rosser, J.C.Jr., Vignesh, V., Terwilliger, B.A., Parker, B.C. Surgical and Medical Applications of Drones: A Comprehensive Review, JSLS – Journal of the Society of Laparoendoscopic & Robotic Surgeons, Vol. 22, No. 3, e2018.00018, 2018. https://doi.org/10.4293/JSLS.2018.00018

[46] Oakey, A., Grote, M., Smith, A., Cherrett, T., Pilko, A., Dickinson, J., AitBihiOuali, L. Integrating drones into NHS patient diagnostic logistics systems: Flight or fantasy?, PLoS One, Vol. 17, No. 12, e0264669, 2022. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264669

[47] Kouwenberg, L.H.J.A., Cohen, E.S., Hehenkamp, W.J.K., Snijder, L.E., Kampman, J.M., Küçükkeles, B., Kourula, A., Meijers, M.H.C., Smit, E.S., Sperna Weiland, N.H., Kringos, D.S. The Carbon Footprint of Hospital Services and Care Pathways: A State-of-the-Science Review, Environmental Health Perspectives, Vol. 132, No. 12, 126002, 2024. https://doi.org/10.1289/EHP14754

[48] Carino, S., Collins, J., Malekpour, S., Porter, J. Environmentally sustainable hospital foodservices: Drawing on staff perspectives to guide change, Sustainable Production and Consumption, Vol. 25, pp. 152-161, 2021. https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.08.003

[49] Bux, C., Zizzo, G., Amicarelli, V. A combined evaluation of energy efficiency, customer satisfaction and food waste in the healthcare sector by comparing cook-hold and cook-chill catering, Journal of Cleaner Production, Vol. 429, 139594, 2023. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139594

[50] National Institute for Health and Care Excellence (NICE). Medicines optimisation: the safe and effective use of medicines to enable the best possible outcomes, NICE guideline NG5, NICE, London, 2015, https://www.nice.org.uk/guidance/ng5/resources/medicines-optimisation-the-safe-and-effective-use-of-medicines-to-enable-the-best-possible-outcomes-pdf-51041805253 [pristupljeno 10.03.2026]

[51] Colberg, J., Tucker, J.L., Martínez, I., Bailey, J.D., Briddell, C., Koenig, S.G., Kopach, M.E., Michalak, S., Parsons, A., Richardson, P.F., Roschangar, F., Vestergaard, E., Voutchkova-Kostal, A. Environmental Sustainability Strategy of Active Pharmaceutical Ingredient Manufacturing: A Perspective from the American Chemical Society Green Chemistry Institute Pharmaceutical Roundtable, ACS Sustainable Chemistry & Engineering, Vol. 13, No. 27, pp. 10268-10284, 2025. https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.5c01094

[52] Beck, A., Wiedergut, M., Neubauer, N. Towards fossil-free energy supply: Cost-effective decarbonization measures in pharmaceutical energy systems, Applied Thermal Engineering, Vol. 280, Part 2, 128213, 2025. https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.128213

[53] Khalid, S. Sustainable Pharmaceutical Manufacturing: Strategies for Reducing Waste, Energy Consumption, and Environmental Impact, Emerging Pharma, No. 1, pp. 1-16, 2025, https://emergingpub.com/index.php/ep/article/view/56 [pristupljeno 10.03.2026]

[54] The Environmental Impact of Inhaled Anesthetics, American Society of Anesthesiologists, https://www.asahq.org/about-asa/governance-and-committees/asa-committees/environmental-sustainability/greening-the-operating-room/inhaled-anesthetics [pristupljeno 10.03.2026]

[55] Samad, K., Yousuf, M.S., Ullah, H., Ahmed, S.S., Siddiqui, K.M., Latif, A. Anesthesia and its environmental impact: approaches to minimize exposure to anesthetic gases and reduce waste, Medical Gas Research, Vol. 15, No. 1, pp. 101-109, 2025. https://doi.org/10.4103/mgr.MEDGASRES-D-23-00059

[56] Janson, C., Hisinger-Mölkänen, H., Tamasi, L. et al. Switching to the Dry Powder Inhaler: Disease Control with a Lower Carbon Footprint, Pulmonary Therapy, Vol. 11, pp. 753-763, 2025. https://doi.org/10.1007/s41030-025-00319-w

[57] Janson, C., Platz, J.H., Soulard, S., Langham, S., Nicholson, L., Hartgers-Gubbels, E.S. Reducing carbon footprint by switching to reusable soft-mist inhalers, ERJ Open Research, Vol. 9, No. 3, 00543-2022, 2023. https://doi.org/10.1183/23120541.00543-2022

[58] Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014, Official Journal of the European Union, 2024, https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/573/oj [pristupljeno 10.03.2026]

[59] EU Fluorinated Greenhouse Gases Regulation: Guidance for Pharma Manufacturers, Celegence, https://www.celegence.com/eu-fluorinated-greenhouse-gases-regulation-guidance-for-pharma-manufacturers/ [pristupljeno 10.03.2026]

[60] Lima Cano, N.S.S., Marino, M., Brooks, A.L., Eckelman, M.J., Bilec, M.M. Advancing the circular economy of healthcare plastics: A systematic literature review, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 219, 108317, 2025. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108317

[61] Govindan, K., Nosrati-Abarghooee, S., Nasiri, M.M., Jolai, F. Green reverse logistics network design for medical waste management: A circular economy transition through case approach, Journal of Environmental Management, Vol. 322, 115888, 2022. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115888

[62] D'Alessandro, C., Szopik-Depczyńska, K., Tarczyńska-Łuniewska, M., Silvestri, C., Ioppolo, G. Exploring Circular Economy Practices in the Healthcare Sector: A Systematic Review and Bibliometric Analysis, Sustainability, Vol. 16, No. 1, pp. 401, 2024. https://doi.org/10.3390/su16010401

[63] MacNeill, A.J., Hopf, H., Khanuja, A., Alizamir, S., Bilec, M., Eckelman, M.J., Hernandez, L., McGain, F., Simonsen, K., Thiel, C., Young, S., Lagasse, R., Sherman, J.D. Transforming The Medical Device Industry: Road Map To A Circular Economy, Health Affairs, Vol. 39, No. 12, 2020. https://doi.org/10.1377/hlthaff.2020.01118

[64] Moshawih, S., Wong, S.F., Woon, C.O., Lim, M.K., Ong, H.C., Goh, K.W., Gew, L.T., Ming, L.C. Transforming healthcare sustainability: Circular economy approaches and stakeholder collaboration, Sustainable Futures,

Vol. 10, 101199, 2025. https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101199

[65] Keil, M., Viere, T., Helms, K., Rogowski, W. The impact of switching from single-use to reusable healthcare products: a transparency checklist and systematic review of life-cycle assessments, European Journal of Public Health, Vol. 33, No. 1, pp. 56-63, 2023. https://doi.org/10.1093/eurpub/ckac174

[66] World Health Organization. Safe Management of Wastes from Health-Care Activities, World Health Organization, Geneva, 2014, https://www.who.int/publications/i/item/9789241548564 [pristupljeno 10.03.2026]

[67] Mohamed, N.H., Khan, S., Jagtap, S. Waste 4.0 – transforming medical waste management through digitalization and automated segregation, Discover Sustainability, Vol. 5, 630008, 2024. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00593-9

[68] Attrah, M., Elmanadely, A., Akter, D., Rene, E.R. A Review on Medical Waste Management: Treatment, Recycling, and Disposal Options, Environments, Vol. 9, No. 11, pp. 146, 2022. https://doi.org/10.3390/environments9110146

[69] Matos, C.A.S., Lange, L., Betim, L.S., Dias, A.L.S. Evaluation of the Efficiency of Autoclaving Healthcare Waste Using Biological and Chemical Indicators, Detritus, Vol. 9, pp. 181-188, 2020. https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13902

[70] Parker, G., Hunter, S., Born, K., Miller, F.A. Mapping the Environmental Co-Benefits of Reducing Low-Value Care: A Scoping Review and Bibliometric Analysis, International Journal of Environmental Research and Public Health, Vol. 21, No. 7, pp. 818, 2024. https://doi.org/10.3390/ijerph21070818

[71] Barratt, A.L., Bell, K.J., Charlesworth, K., McGain, F. High value health care is low carbon health care, Medical Journal of Australia, Vol. 216, No. 2, pp. 67-68, 2022. https://doi.org/10.5694/mja2.51331

[72] Rasheed, F.N., Baddley, J., Prabhakaran, P., De Barros, E.F., Reddy, K.S., Vianna, N.A., Marten, R. Decarbonising healthcare in low and middle income countries: potential pathways to net zero emissions, BMJ, Vol. 375, n1284, 2021. https://doi.org/10.1136/bmj.n1284

[73] Hart, J., Lignou, S., Sheehan, M. Environmental sustainability and the limits of healthcare resource allocation, Bioethics, Vol. 39, No. 6, pp. 538-545, 2025. https://doi.org/10.1111/bioe.13395

[74] Lokmic-Tomkins, Z., Davies, S., Block, L.J., Cochrane, L., Dorin, A., von Gerich, H., Lozada-Perezmitre, E., Reid, L., Peltonen, L.-M. Assessing the carbon footprint of digital health interventions: a scoping review, Journal of the American Medical Informatics Association, Vol. 29, No. 12, pp. 2128-2139, 2022. https://doi.org/10.1093/jamia/ocac196

[75] Race to Zero Partners, Health Care Without Harm, https://healthcareclimateaction.org/racetozero [pristupljeno 20.03.2026]

[76] DAPHNE | Good practice – Interreg Europe, https://www.interregeurope.eu/daphne/good-practices [pristupljeno 20.03.2026]

[77] Duindam, D. Transitioning to Sustainable Healthcare: Decarbonising Healthcare Clinics, a Literature Review, Challenges, Vol. 13, No. 2, pp. 68, 2022. https://doi.org/10.3390/challe13020068

[78] Low-Carbon, Climate-Resilient Health Care Supply Chains: High-Level Health Care Climate Action Principle #3, Asian Development Bank, Manila, https://www.adb.org/publications/health-care-supply-chains [pristupljeno 20.03.2026]

[79] Walsh, S.J., O'Leary, A., Bergin, C. et al. Primary healthcare's carbon footprint and sustainable strategies to mitigate its contribution: a scoping review, BMC Health Services Research, Vol. 24, 1630, 2024. https://doi.org/10.1186/s12913-024-12068-8

[80] Aboueid, S., Beyene, M., Nur, T. Barriers and enablers to implementing environmentally sustainable practices in healthcare: A scoping review and proposed roadmap, Healthcare Management Forum, Vol. 36, No. 6, pp. 405-413, 2023. https://doi.org/10.1177/08404704231183601

[81] Hantel, A., Senay, E., Hlubocky, F.J., Walsh, T.P., Johnston, H., Cronin, A., DuVall, A.S., Revette, A., Nava-Coulter, B., Siegler, M., Richie, C., Abel, G.A. The ethics of climate change and health-care delivery: a national survey of US-based physicians, The Lancet Planetary Health, Vol. 9, No. 8, 101289, 2025. https://doi.org/10.1016/j.lanplh.2025.101289

AUTORI

dr Dušan Gordić - redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, gordic@kg.ac.rs, ORCID 0000-0002-1058-5810

dr Vladimir Vukašinović - vanredni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, vladimir.vukasinovic@kg.ac.rs, ORCID 0000-0001-6489-2632

dr Mladen Josijević - docent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, mladenjosijevic@gmail.com, ORCID 0000-0001-9619-0897

dr Nebojša Jurišević - viši naučni saradnik, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, jurisevic@kg.ac.rs, ORCID 0000-0002-1609-6313

Towards a Low-Carbon Healthcare Sector: A Comprehensive Review

Abstract – The healthcare sector represents one of the largest and most critical infrastructures of modern society, accounting for approximately 4–5% of global greenhouse gas emissions. The decarbonisation of this sector has become imperative for achieving national and international climate targets. The paper analyses key sources of emissions within healthcare facilities, including energy use in buildings, medical equipment, waste management, logistics and the supply chain. The work systematises seven key strategic actions, including the supply of decarbonised energy, sustainable construction, circular health and the elimination of low-value medical practices, which enable health institutions to improve sustainability while preserving the quality of health services.

Through a review of global initiatives such as "Race to Zero" and examples of good practice from the EU project DAPHNE, models for a successful transition to a low-carbon model have been identified. In conclusion, the paper considers institutional, financial and organizational obstacles, emphasizing that systemic decarbonisation must balance climate goals with preserving the quality and availability of health care. The paper provides a methodological framework and recommendations for policymakers, management of healthcare institutions and the professional public to accelerate the transition to a low-carbon healthcare system.

Index Terms – Decarbonisation, Greenhouse gas (GHG) emissions, Health sector

Rad primljen: 30.03.2026., prihvaćen: 15.08.2026.

doi: 10.46793/EEE26-3.35C

Originalni naučni rad
UDK 621.316.1:004.056

Maliciozni napadi na estimator stanja u distributivnim mrežama: Analiza izvodljivosti napada u uslovima male redundanse merenja

Stefan Čubonović[*], Dragan Ćetenović[*], Nikola Vojnović[**], Aleksandar Ranković[*]

[*] Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerziteta u Kragujevcu
[**] Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu

Rezime - U poslednjoj deceniji je intenzivirana upotreba informaciono-komunikacionih tehnologija u distributivnim mrežama. Takve tehnologije su izložene rizicima od malicioznih sajber napada, što predstavlja pretnju po rad distributivnih mreža. Jedna od mogućih meta takvih napada u distributivnim mrežama je i estimator stanja. Klasični algoritmi za detekciju loših podataka, među kojima se najčešće sreću statističke metode kao sto su χ^2 test ili test najvećeg normalizovanog reziduala, ne mogu da detektuju maliciozne napade injektiranjem lažnih podataka (false data injection attacks - FDIAs) ukoliko su ovi vešto prikriveni. Međutim, zbog male redundanse merenja karakteristične za distributivne mreže, napadači su u problemu da prikriju napad, pa ga u tom slučaju čak i klasični algoritmi za detekciju loših podataka mogu prepoznati. To omogućuje detekciju FDIAs bez dodatnih finansijskih ulaganja koja bi iziskivala implementacija sofisticiranih rešenja. Ovaj rad se bavi analizom izvodljivosti FDIAs u distributivnim mrežama, nastojeći da dovede u vezu izvodljivost napada i redundansu merenja. Rezultati analize se mogu upotrebiti da ukažu operatoru distributivnog sistema da li postoji potreba za sofisticiranim tehnikama za detekciju FDIAs ili ne, a zavisno od merne infrastrukture mreže kojom operator upravlja.

Ključne reči - BDD, FDIA, pseudo merenja, WLS

I UVOD

Savremeni koncept distributivne mreže ne označava samo fizičku infrastrukturu prenosa i distribucije električne energije, već i njenu integraciju sa informaciono-komunikacionim tehnologijama. Tradicionalna infrastruktura dopunjena je sa naprednim mernim uređajima, uređajima energetske elektronike i komunikacionim kanalima, omogućavajući dvosmerni protok podataka i nadzor u realnom vremenu. Uređaji kao što su PMU (eng. *phasor measurement units*) omogućavaju prikupljanje i razmenu informacija o stanju mreže u gotovo svakom trenutku. Međutim, upravo te nove tehnologije otvaraju vrata novim pretnjama, a to su sajber napadi. Takvi napadi su sofisticirano dizajnirani tako da mogu ozbiljno ugroziti stabilnost i sigurnost celog EES-a. Primeri ovakvih incidenata odavno nisu samo teorijska konstrukcija već i realan scenario. Napad na ukrajinsku elektrodistributivnu mrežu 2015. godine [1], poznat kao BlackEnergy napad, doveo je do masovnog nestanka struje. Slični pokušaji su zabeleženi i u Sjedinjenim Američkim Državama [2] i nekim Evropskim zemljama [3], što potvrđuje da sajber bezbednost predstavlja jedan od ključnih izazova savremenih EES-a. Razvijeni su brojni algoritmi za detekciju loših podataka (*bad data detection* – BDD), među kojima dominiraju statističke metode kao što su χ^2 test i LNR (*largest normalized residual*) test [4, 5]. Ovi testovi, iako najviše korišćeni i efikasni u detekciji loših podataka, mogu pokazati određena ograničenja u slučaju izuzetno naprednih i dobro koordinisanih napada, kao što je maliciozni napad injektiranjem lažnih podataka (*false data injection attacks* - FDIA) [6]. Iako se ovakvi napadi u teoriji mogu konstruisati tako da ostanu neprimećeni od strane tradicionalnih detektora loših podataka, u distributivnim mrežama ograničena merna redundansa može značajno smanjiti mogućnost njihove izvodljivosti, što u dosadašnjim istraživanjima nije u potpunosti razmatrano. Stoga se postavlja pitanje: „Da li je realizacija pažljivo dizajniranih FDIA napada moguća u odsustvu kontrole nad pseudo merenjima?“.

Ovaj rad ima 6 delova. Nakon uvoda, u drugom delu rada, prikazana je teorijska osnova koja se odnosi na metod minimizacije sume otežanih kvadrata reziduala merenja (*weighted least squares* - WLS) u estimaciji stanja (*state estimation* - SE), standardne testove loših podataka (χ^2 i LNR) i osnovne principe dizajniranja FDIA napada. Treći deo opisuje karakteristike korišćene distributivne mreže, tipove merenja i način implementacije napada. Četvrti deo odnosi se na rezultate i analizu, sa posebnim akcentom sa posebnim akcentom na analizu uslova pod kojima FDIA napadi mogu ili ne mogu proći nezapaženo kroz tradicionalne detektore u uslovima ograničene merne redundanse. U petom delu dat je zaključak ovog istraživanja. Šesti deo predstavlja pregled korišćene literature.

II TEORIJSKA OSNOVA PRIMENJENIH METODA

U ovom delu prikazani su osnovni teorijski koncepti neophodni za razumevanje ostatka rada. Najpre, se razmatra problem SE u EES-ima, sa posebnim akcentom na WLS metodu, koja u praksi predstavlja standardni pristup. Nakon izvršene SE sprovodi se detekcija loših podatka, zbog toga je neophodno da se upoznamo sa tradicionalnim metodama, χ^2 test i LNR test, koje se koriste za identifikaciju merenja sa neuobičajenim odstupanjima. Na kraju, se uvodi pojam FDIA i objašnjava osnovni princip njihovog načina izvođenja.

II.1 Estimacija stanja WLS metodom

Cilj SE je da kroz matematički model i dostupna merenja proceni vektor stanja posmatranog dela EES-a. Vektor stanja se obično definiše poznavanjem amplituda napona $|V_i|$ i faznih stavova napona θ_i po čvorovima u tom sistemu. Procena ovih veličina je

važna, jer poznavajući njih možemo stvoriti tačnu sliku o stanju posmatranog dela EES-a. Suprotno, ako su ove veličine kompromitovane greškama ili namernim napadima ceo sistem postaje nepouzdan. Zbog toga SE predstavlja važan deo savremenog sistema za nadzor i upravljanje.

WLS metoda zasnovana na minimizaciji sume otežanih kvadrata reziduala merenja je najkorišćenija u praksi. Cilj optimizacije je pronaći vektor stanja x koji će minimizirati funkciju cilja (jednačina 1), najčešće upotrebom iterativnog Njutn-Rapsnovog postupka [8]:

$$J(\boldsymbol{x}) = [\boldsymbol{z} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})]^T \boldsymbol{R}^{-1} [\boldsymbol{z} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})]. \quad (1)$$

gde su:

- $\boldsymbol{z}$ – vektor merenja;
- $\boldsymbol{x}$ – vektor stanja ($|V_i|$ i θ_i);
- $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})$ – nelinearna vektorska funkcija koja povezuje vektor stanja i vektor merenja;
- $\boldsymbol{R} = \boldsymbol{W}^{-1}$ – matrica kovarijansi grešaka merenja;
- $\boldsymbol{W}$ – težinska matrica, inverzna matrici kovarijansi grešaka merenja.

Nelinearna vektorska funkcija $\boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})$ zasniva se na datom skupu jednačina (2) injektiranja i tokova snaga [5]:

$$\begin{aligned} P_i &= |V_i| \sum_{j=1}^{n} |V_j| \left(G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}\right) \\ Q_i &= |V_i| \sum_{j=1}^{n} |V_j| \left(G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}\right) \quad (2) \\ P_{ij} &= |V_i|^2 G_{ij} - |V_i| |V_j| (G_{ij} \cos\theta_{ij} + B_{ij} \sin\theta_{ij}) \\ Q_{ij} &= -|V_i|^2 B_{ij} - |V_i| |V_j| (G_{ij} \sin\theta_{ij} - B_{ij} \cos\theta_{ij}) \end{aligned}$$

Iz prethodno navedenih izraza (2) jasno je da promena magnitude ili faznog ugla napona utiče na vrednosti injektiranja i tokova snaga, što predstavlja osnovu za razumevanje strukture napada vektora analiziranog u daljem tekstu rada.

Efikasnost WLS estimacije prisutna je u prenosnim mrežama sa bogatom mernom infrastrukturom. Međutim, u distributivnim mrežama broj merenja je često osiromašen, što značajno smanjuje redundansu merenja i čini proces osetljivijim na greške i napade. Upravo zbog toga, analiza WLS metode predstavlja osnovu za razumevanje ranjivosti sistema na FDIA napade.

II.2 χ^2 test detekcije loših podataka

Jedna od najčešće korišćenih BDD metoda u procesu SE je χ^2 test. Ovaj test se zasniva na statističkom ispitivanju veličine reziduala, odnosno razlike između izmerenih i procenjenih vrednosti merenja. Funkcija cilja u WLS metodi ima oblik:

$$J(\boldsymbol{x}) = [\boldsymbol{z} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})]^T \boldsymbol{R}^{-1} [\boldsymbol{z} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})] = \boldsymbol{r}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{r}. \quad (3)$$

Gde je $\boldsymbol{r} = \boldsymbol{z} - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x})$ vektor reziduala merenja. Funkcija $J(\boldsymbol{x})$ generalno prati χ^2 raspodelu sa stepenom slobode jednakim broju merenja umanjenom za broj stanja [5]:

$$J(\boldsymbol{x}^*) \sim \chi^2(m - n), \quad (4)$$

gde su m broj merenja, n broj promenljivih stanja i $\boldsymbol{x}^*$ rešenje problema procene stanja dobijeno primenom WLS metode.

Ideja testa podrazumeva da se u slučaju kada je vrednost funkcije cilja $J(\boldsymbol{x}^*)$ veća ili jednaka od unapred definisanog praga τ_{χ^2}, zaključuje da u merenjima postoji loš podatak (test je pozitivan). U suprotnom, kada je vrednost funkcije cilja $J(\boldsymbol{x}^*)$ manja od unapred definisanog praga τ_{χ^2}, pretpostavlja se da su sva merenja konzistentna (test je negativan). Izbor prave vrednosti praga τ_{χ^2} je izuzetno bitan, jer premala vrednost može dovesti do lažne detekcije postojanja lošeg podatka, a prevelika vrednost može sakriti postojanje lošeg podatka. Prednost χ^2 testa ogleda se u jednostavnoj primeni. Međutim, ovaj test pruža samo globalni indikator postojanja loših podataka, bez informacija o njihovoj tačnoj lokaciji. Zbog toga se u praksi često kombinuje sa dodatnim metodama, kao što je LNR test, koje omogućavaju identifikaciju konkretnih merenja odgovornim za odstupanje.

II.3 LNR test detekcije loših podataka

Za razliku od χ^2 testa, koji predstavlja globalni indikator konzistentnosti merenja, LNR test omogućava identifikaciju konkretnih merenja koja su potencijalno degradirana. Suština metode je da se izračunaju normalizovani reziduali svih merenja u posmatranom delu EES-a i da se najveći od njih upredi sa unapred zadatim pragom. Normalizovani reziduali definišu se sledećim izrazom [5]:

$$r_i^N = \frac{r_i}{\sqrt{\sigma_{r_i}^2}}, \quad (5)$$

gde su r_i rezidual *i*-tog merenja, a $\sigma_{r_i}^2$ njegova varijansa.

Vrednost unapred definisanog praga τ_{LNR} najčešće iznosi 3 [5]. Međutim, postoje i drugi načini definisanja statičkog [8] ili dinamičkog praga [9], ali Bez obzira na način odabira, logika testa je sledeća: „Ukoliko vrednost najvećeg normalizovanog reziduala premaši zadati prag, odgovarajuće merenje se označava kao loše.“. Prednost LNR testa ogleda se u njegovoj sposobnosti lokalizacije merenja koje izaziva nekonzistentnost. Međutim, pokazano je da LNR test, kao i χ^2 test, može biti ranjiv na pažljivo projektovane FDIA napade, posebno u distributivnim mrežama gde je broj merenja ograničen.

II.4 Maliciozni napad injektiranjem lažnih podataka (FDIA)

Poseban oblik sajber napada usmeren na proces SE u posmatranom delu EES-a predstavlja FDIA. Ideja ovih napada jeste da delovanje napadača ostane nevidljivo za tradicionalne testove, poput χ^2 i LNR testa. Za projektovanje ovakvih napada nije potrebno poznavati celokupnu sliku posmatranog dela EES-a, već je dovoljno poznavanje samo vektora merenja. Promene u vektoru merenja se pažljivo biraju tako da reziduali ostaju konzistentni čime se zaobilaze pomenuti testovi detekcije loših podataka. Posledica toga je da operator dobija izobličenu, ali naizgled validnu sliku stanja posmatranog dela EES-a.

Posmatrajmo standardni SE model:

$$z_i = h_i(x_i) + e_i, \quad (6)$$

pri čemu je:

- $z \in R^m$ – vektor merenja,
- $x \in R^n$ – vektor stanja,
- h(·) – nelinearna vektoska funkcija i
- $e \sim N(0, R)$ – vektor greške merenja za koji se smatra da

prati Gausovu raspodelu sa nultom srednjom vrednošću i kovarijansnom matricom R.

Da bi FDIA bio uspešan, u literaturi se često prave sledeće pretpostavke [7], [10]:

- napadač može pristupiti merenjima u realnom vremenu u posmatranom delu EES-a (područje S), definisanom skupom čvorova;
- napadač ima mogućnost da izmeni sva merenja unutar tog dela EES-a;
- napadač poseduje apriori znanje o topologiji sistema i parametrima vodova u posmatranom delu mreže.

U praksi ove pretpostavke predstavljaju idealan scenario, čija je ostvarivost u distributivnim mrežama sa ograničenom mernom infrastrukturom često upitna.

Neka je m_s skup indeksa merenja u području S, a I_S skup indeksa pripadajućih stanja. Tada se merenje $\boldsymbol{z}_i$ u prisustvu napada modeluje kao:

$$\boldsymbol{z}_i^{(\boldsymbol{a})} = \begin{cases} \boldsymbol{z}_i, i \notin m_S \\ \boldsymbol{z}_i + \boldsymbol{a}_i, i \in m_S \end{cases}, \quad (7)$$

gde je $\boldsymbol{a}_i$ i-ti element vektora napada $\boldsymbol{a}$.

Pretpostavimo da napadač raspolaže istim merenjima $\boldsymbol{z}_i, i \in m_S$ i istim lokalnim stanjem $\boldsymbol{x}_i$ kao i operator u kontrolnom centru. Ako originalna merenja prolaze tradicionalne testove, tada će i napadnuta merenja $\boldsymbol{z}_i^{(\boldsymbol{a})}$ proći test, pod uslovom da važi:

$$\boldsymbol{a}_i = \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_i + \boldsymbol{c}_i) - \boldsymbol{h}(\boldsymbol{x}_i), \quad (8)$$

gde $\boldsymbol{c}_i$ predstavlja promenu i-te napadnute komponente stanja.

U prilog ovoj tvrdnji postoji i matematički dokaz dat u sledećem delu teksta.

Ako je rezidual originalnog merenja:

$$\boldsymbol{r}_i = \boldsymbol{z}_i - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i) \leq \tau, \quad (9)$$

tada je rezidual napadnutog merenja za $i \in M_S$:

$$\boldsymbol{r}_i^{(\boldsymbol{a})} = \boldsymbol{z}_i^{(\boldsymbol{a})} - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i + \boldsymbol{c}_i) = \boldsymbol{z}_i + \boldsymbol{a}_i - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i + \boldsymbol{c}_i), \quad (10)$$

Dodavanjem i oduzimanjem $\boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i)$ i uzimanjem u obzir jednačine (8) i (9) dobija se jednačina (11):

$$\boldsymbol{r}_i^{(\boldsymbol{a})} = \boldsymbol{z}_i + \boldsymbol{a}_i + \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i) - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i) - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i + \boldsymbol{c}_i)$$

$$\boldsymbol{r}_i^{(\boldsymbol{a})} = \boldsymbol{z}_i + \boldsymbol{a}_i - \boldsymbol{a}_i - \boldsymbol{h}_i(\boldsymbol{x}_i) = r_i. \quad (11)$$

Pošto je $\boldsymbol{r}_i \leq \tau$, detektori loših podataka neće reagovati pozitivno. Drugim rečima, ako je originalno merenje konzistentno, napadač može dizajnirati vektor napada tako da i novo merenje ostane „nevidljivo“ za detekciju.

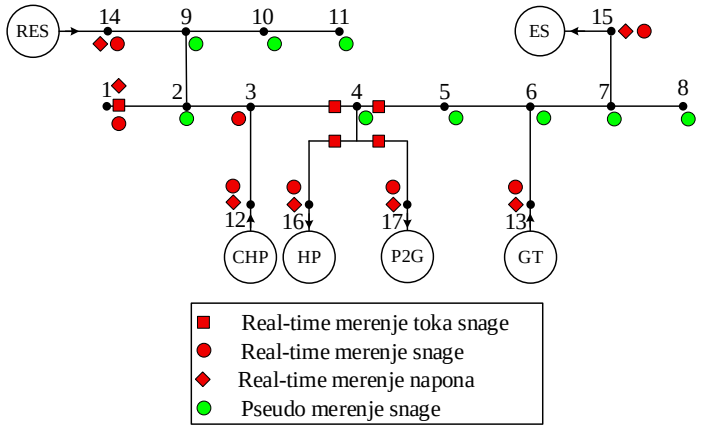
Da bi ovo bilo moguće, u literaturi se pretpostavlja da napadač poseduje dovoljno računarske snage da proceni lokalni vektor stanja $\boldsymbol{x}_i, i \in I_S$. Ova pretpostavka se uglavnom zasniva na činjenici da SCADA merenja nisu sinhronizovana i da se prikupljaju različitim brzinama u različitim delovima sistema. Međutim, prisustvo real-time merenja zasnovanih na μPMU uređajima, koja su vremenski sinhronizovana i poseduju visoku frekvenciju uzorkovanja, značajno ograničavaju mogućnost napadača da blagovremeno proceni stanje sistema i konstruiše pravi vektor $\boldsymbol{a}_i$. Time se dodatno dovodi u pitanje izvodljivost pažljivo dizajniranih FDIA napada u distributivnim mrežama sa real-time merenjima i ograničenom mernom redundansom.

III Opis sistema i FDIA implementacija

U ovom poglavlju detaljno su opisani korišćeni podaci, model posmatrane mreže i tipovi merenja. Prikazan je način implementacije napada sa ciljem analize ranjivosti tradicionalnih testova loših podataka na FDIA napade u distributivnim mrežama. Zatim je predstavljena procedura formiranja vektora napada i dizajn modifikovanih merenja.

III.1 Opis test sistema i merenja

Za potrebe istraživanja korišćen je test sistem sa 17 čvorova, koji predstavlja deo distributivne mreže. Topologija mreže sa konfiguracijom merenja prikazana je na slici 1. RES (renewable energy source) predstavlja obnovljivi izvor energije koji predaje aktivnu snagu u mrežu, dok je sistem za skladištenje energije (ES) u režimu potrošnje, odnosno preuzima snagu iz mreže. Na sabirnicu 12 priključen je kogenerativni agregat (CHP), koji takođe predaje snagu u mrežu. Na sabirnicu 13 vezana je gasna turbina (GT), čiji je režim rada proizvodnja električne energije. Na sabirnici 16 nalazi se toplotna puma (HP), koja u datom režimu rada preuzima snagu iz mreže. Na sabirnicu 17 priključen je *Power-to-Gas* (P2G) konvertor, koji takođe predstavlja potrošača električne energije. Struktura mreže je odabrana tako da obezbedi realne uslove za primenu SE, ali i da bude dovoljno pregledna za analizu FDIA napada.



Slika 1. Topologija mreže i konfiguracija merenja test sistema sa 17 čvorova

Iz posmatranog sistema dobijamo informacije o različitim tipovima merenja, čime se obezbeđuje minimalni stepen redundanse potreban za sprovođenje WLS SE, odnosno postojanje većeg broja međusobno zavisnih merenja u odnosu na broj nepoznatih stanja. Ova merenja uključuju:

- tokove snaga u različitim granama (u realnom vremenu),
- injektiranje snaga (u realnom vremenu),
- napone po čvorovima (u realnom vremenu),
- injektiranje snaga za čvorove bez direktnog merenja (pseudo merenja).

III.2 Opis izvedenog napada

Kako bi se ispitala ranjivost sistema napad je konstruisan tako da proveri izvodljivost prikrivenog FDIA napada nad real-time merenjima napona. U tom slučaju razlikujemo dva scenarija:

Scenario A, matematički prikaz dat je jednačinom (11). Meta napada je moduo napona $|V|$. Napad je simuliran u svakom čvoru pojedinačno. U okviru svakog slučaja menjano je isključivo jedno merenje, ali su dodatno ispitani i različiti novi perturbacije kako bi se ispitala osetljivost sistema na različite intenzitete napada.

$$\boldsymbol{c}_i = \begin{cases} |\boldsymbol{\Delta V}|_k, i = k \\ 0,\ i \neq \mathrm{k} \end{cases}, \tag{12}$$

Scenario B, matematički prikaz dat je jednačinom (12) meta napada ugao napona θ. Napad je ponovo simuliran u svakom čvoru pojedinačno i u okviru svakog slučaja promenjeno je po jedno merenje.

$$\boldsymbol{c}_i = \begin{cases} \boldsymbol{\theta}_k, i = k \\ 0,\ i \neq \mathrm{k} \end{cases}, \tag{13}$$

Izvodljivost ovih scenarija definiše se isključivo na osnovu strukture napadnog vektora $\boldsymbol{a}$ i to na sledeći način:

1. napad se smatra *izvodljivim* samo ako vektor $\boldsymbol{a}$ ne sadrži veličine koje se odnose na pseudo merenja,
2. dok se svaki scenario u kome je za prikrivanje napada neophodno uključiti pseudo merenja u vektor $\boldsymbol{a}$ klasifikuje kao *neizvodljiv*.

IV Analiza izvodljivosti FDIA napada u uslovima ograničene merne redundanse

Imajući u vidu ograničenu mernu redundansu karakterističnu za distributivne mreže, može se očekivati da prostor za konstruisanje prikrivenog FDIA napada, opisanog u prethodnom delu rada, bude ograničen. U tom smislu, analiza rezultata ima za cilj da ispita u kojoj meri struktura mernog sistema utiče na izvodljivost napada, kao i da li u takvim uslovima tradicionalni BDD algoritmi mogu zadržati svoju efikasnost.

Tabela 1. Struktura izvodljivosti napada u Scenariju A **($|\boldsymbol{\Delta V}| = \boldsymbol{0.1}$)**

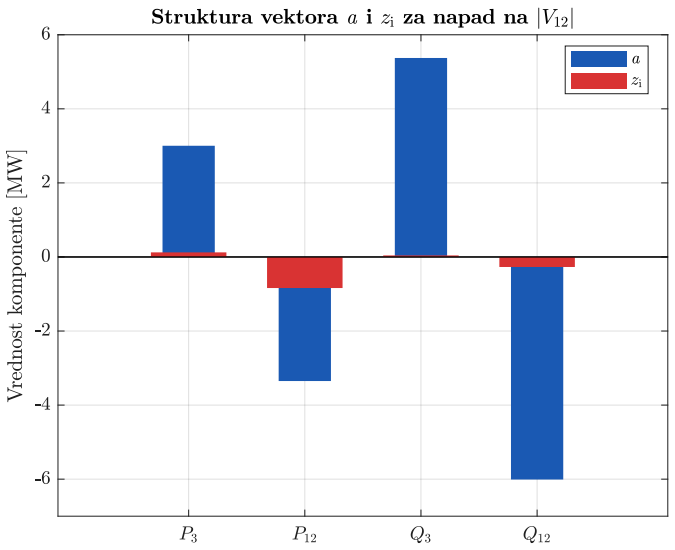
Meta napada	Pogođena PQ injektiranja	Pogođeni tokovi snaga	Pseudo merenja uključena	Izvodljiv: ■ - DA ■ - NE
$\|V_1\|$	2	2	Da	
$\|V_{12}\|$	4	0	Ne	
$\|V_{13}\|$	4	0	Da	
$\|V_{14}\|$	4	0	Da	
$\|V_{15}\|$	4	0	Da	
$\|V_{16}\|$	4	2	Da	
$\|V_{17}\|$	4	2	Da	

U nastavku su detaljno prikazani rezultati po scenarijima, uz diskusiju uloge merne redundanse i rasporeda merenja u mreži na izvodljivost napada. Napadi su simuliran u svakom čvoru pojedinačno i izveden je promenom amplitude napona i faznog ugla napona za vrednosti koje su izabrane kao kompromis između uočljivog poremećaja i pokušaja zadržavanja napada u realističnim granicama rada distributivne mreže.

Analiza strukture vektora $\boldsymbol{a}$ za Scenario A, kada je perturbacija magnitude napona 0.1 r.j, prikazana je u tabeli 1.

Iz tabele vidimo da napad u svakom od posmatranih čvorova izaziva promenu aktivnih i reaktivnih injektiranja, kao i tokova snaga u granama [5]. U samo jednom analiziranom slučaju, čvor 12, uočeno je da je za uspešno izveden napad nepotrebno uključivanje pseudo merenja u vektor $\boldsymbol{a}$. S obzirom na definisani kriterijum izvodljivosti, prema kome se napad smatra neizvodljivim ukoliko zahteva manipulaciju pseudo merenja, može se zaključiti da samo 1 od 7 analiziranih napada zadovoljava uslov izvodljivosti.

Usredsredimo se na napadnuti čvor 12. Na slici 2 prikazane su nenulte komponente vektora $\boldsymbol{a}$ (ΔP_3, ΔP_{12}, ΔQ_3 i ΔQ_{12}) i njima odgovarajuće veličine iz vektora $\boldsymbol{z}_i$ (P_3, P_{12}, Q_3 i Q_{12}). Na osnovu legende sa slike 1 se može potvrditi da se korišćene veličine isključivo odnose na real-time merenja aktivnih i reaktivnih injektiranja i tokova snaga, dok nijedna komponenta vektora $\boldsymbol{a}$ ne obuhvata pseudo merenja.

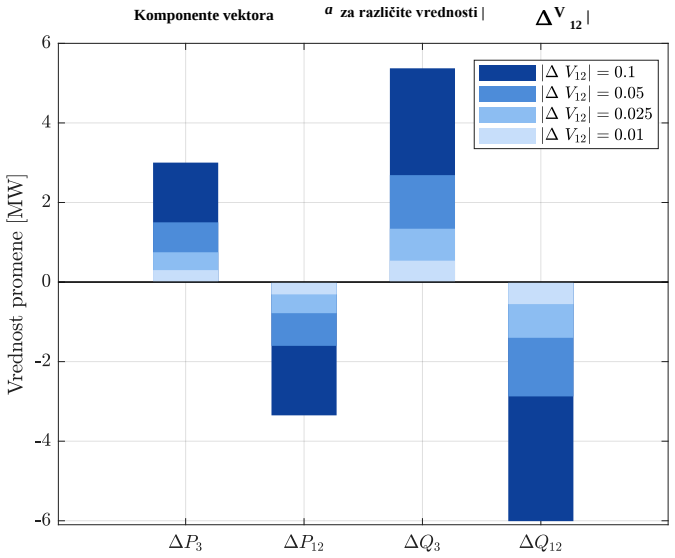


Slika 2. Nenulte komponente vektora $\boldsymbol{a}$ i $\boldsymbol{z}_i$ za promenu magnitude napona $|\boldsymbol{V_{12}}|$ od 0.1 r.j.

U cilju provere robusnosti dobijenog rezultata za čvor 12, dodatno su analizirani slučajevi sa manjom perturbacijom magnitude napona – slika 3.

Dobijeni rezultati pokazuju da struktura napadnog vektora ostaje nepromenjena, tj. nenulte komponente su iste kao u prvom slučaju ali proporcionalno manjeg intenziteta.To ukazuje da izvodljivost napada u čvoru 12 ne zavisi od konkretne vrednosti perturbacije, već od topologije mreže i konfiguracije merenja u njegovoj okolini.

Nakon analize napada na magnitudu napona, razmatra se Scenario B, u kome je meta napada fazni ugao napona θ. Kao i u prethodnom scenariju, napad je simuliran pojedinačno u svakom čvoru sa dostupnim real-time merenjem ugla, pri čemu je izvodljivost procenjivana na osnovu strukture napadnog vektora $\boldsymbol{a}$, što je prikazano u tabeli 2.

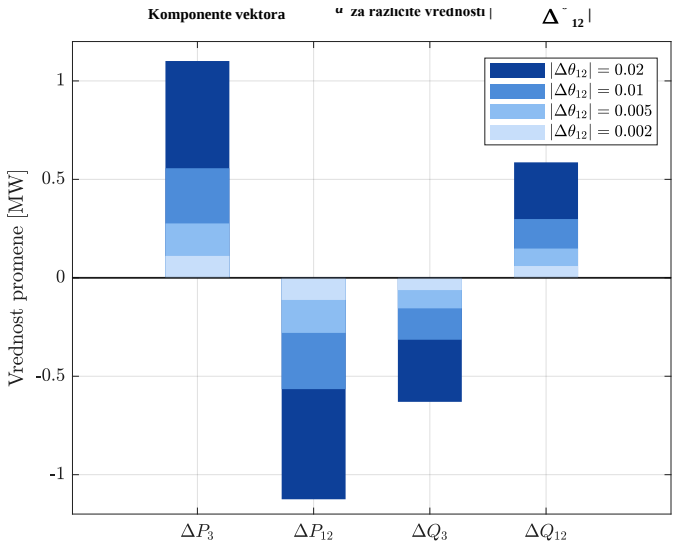


Slika 3. Nenulte komponente vektora $\boldsymbol{a}$ za različite vrednosti perturbacije magnitude napona $|\boldsymbol{\Delta V_{12}}|$

Tabela 2. Struktura izvodljivosti napada u Scenariju B $(|\boldsymbol{\Delta\theta}| = \boldsymbol{0.01})$

Meta napada	Pogođena PQ injektiranja	Pogođeni tokovi snaga	Pseudo merenja uključena	Izvodljiv: - DA - NE
$\|\theta_{12}\|$	4	0	Ne	
$\|\theta_{13}\|$	4	0	Da	
$\|\theta_{14}\|$	4	0	Da	
$\|\theta_{15}\|$	4	0	Da	
$\|\theta_{16}\|$	4	2	Da	
$\|\theta_{17}\|$	4	2	Da	

Uočavamo da je struktura napada ista, kao u prethodnom scenariju. Pogledajmo rezultate na slici 4, pa ćemo izvesti zaključak.



Slika 4. Nenulte komponente vektora $\boldsymbol{a}$ za različite vrednosti perturbacije ugla napona $|\boldsymbol{\Delta\theta_{12}}|$

Karakteristične veličine koje se pojavljuju u vektoru napada $\boldsymbol{a}$ su iste bez obzira da li je meta napada magnituda ili fazni ugao napona, što je i očekivano s obzirom na formulaciju jednačina injektiranja i tokova snaga (2). Veličine menjanju svoj intenzitet proporcionalno nivou perturbacije i prate njegovu promenu ali se ne menjaju po poziciji u mreži. Što opet potvrđuje činjenicu da izvodljivost napada u čvoru 12 ne zavisi od konkretne vrednosti perturbacije, već od topologije mreže i konfiguracije merenja u njegovoj okolini. Ovi rezultati sugerišu da ograničena merna redundansa i raspored merenja u mreži, mogu predstavljati faktor koji u većini slučajeva otežava konstrukciju prikrivenog FDIA napada, čak i bez primene sofisticiranih metoda detekcije.

Pored pojedinačnih napada na jednu veličinu (V ili θ), razmotrena je i hipotetička situacija u kojoj bi napadač istovremeno pokušao da kompromituje dve mete, na primer magnitude napona u čvorovima 12 i 13. S obzirom na već uočenu potrebu uključivanja pseudo merenja čak i pri pojedinačnim perturbacijama (osim u čvoru 12), može se zaključiti da bi istovremena promena dve magnitude napona dodatno povećala broj pogođenih merenja u vektoru $\boldsymbol{a}$. U takvom napadu bi manipulacija pseudo merenja bila neizbežna, pa bi napad prema usvojenom kriterijumu izvodljivosti, bio klasifikovan kao neizvodljiv.

V ZAKLJUČAK

U ovom radu analizirana je izvodljivost FDIA napada u distributivnoj mreži sa ograničenom mernom redundansom, pod pretpostavkom da napadač nema mogućnost manipulacije pseudo merenja. Dobijeni rezultati ukazuju da u većini razmatranih slučajeva promena magnitude ili faznog ugla napona zahteva promenu pseudo merenja, čime se, prema usvojenom kriterijumu, takvi napadi mogu smatrati neizvodljivim.

U 6 od 7 čvorova napada se smatra neizvodljivim. Izuzetak je čvor 12, kod koga je pokazano da je moguće konstruisati napad isključivo kroz real-time merenja. Dodatna analiza različitih nivoa perturbacije pokazala je da struktura vektora $\boldsymbol{a}$ ostaje nepromenjena, dok se njegove komponente menjaju proporcionalno meti napada. Ovakvo ponašanje sugeriše da izvodljivost napada nije posledica intenziteta perturbacije, već prvenstveno topološke pozicije čvora i rasporeda merenja u njegovoj neposrednoj okolini.

Rezultati dobijeni u radu ukazuju da ograničena merna redundansa, koja je karakteristična za distributivne mreže, može značajno suziti prostor za realizaciju prikrivenih FDIA napada. U takvim uslovima tradicionalni BDD algoritmi mogu biti efikasni u velikom broju scenarija. Takođe, analiza pokazuje da otpornost sistema nije podrazumevana i da zavisi od konkretne konfiguracije merenja. Prethodno navedeno može poslužiti kao osnova za procenu ranjivosti distributivne mreže i kao pomoć dispečeru pri odlučivanju o potrebi uvođenja sofisticiranijih tehnika detekcije napada.

ZAHVALNICA

Istraživanja prezentovana u ovom radu su delimično finansirana sredstvima Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS, ugovor br. 451-03-33/2026-03/200132 čiji je realizator Fakultet tehničkih nauka u Čačku - Univerziteta u Kragujevcu.

LITERATURA

[1] Whitehead, D.E., Owens, K., Gammel, D., Smith, J. Ukraine cyber-induced power outage: Analysis and practical mitigation strategies, in Proc. *70th Annual Conference for Protective Relay Engineers (CPRE)*, College Station, TX, USA, pp. 1-8, 03-06 April 2017. https://doi.org/10.1109/CPRE.2017.8090056

[2] U.S. Department of Energy, *Cyber threat and vulnerability analysis of the U.S. electric sector*, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, 2016. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2017/01/f34/Cyber%20Threat%20and%20Vulnerability%20Analysis%20of%20the%20U.S.%20Electric%20Sector.pdf [pristupljeno 23. 02. 2026]

[3] Win, H. Assessing the Vulnerabilities of Europe's Interconnected Power Grid: Lessons from the 2025 Spain-Portugal Blackout, Energy, 2025. https://www.academia.edu/129139254/Assessing_the_Vulnerabilities_of_Europes_Interconnected_Power_Grid_Lessons_from_the_2025_Spain_Portugal_Blackout [pristupljeno 23. 02. 2026]

[4] Mili, L., Van Cutsem, Th., Ribbens-Pavella, M. Bad Data Identification Methods In Power System State Estimation-A Comparative Study, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 104, No. 11, pp. 3037-3049, 1985. https://doi.org/10.1109/TPAS.1985.318945

[5] Abur, A., Exposito, A.G. Power System State Estimation: Theory and Implementation, Marcel Dekker, New York (NY, USA), 2004. https://doi.org/10.1201/9780203913673

[6] 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. 21-32, 2011. https://doi.org/10.1145/1952982.1952995

[7] Hug, G., Giampapa, J. Vulnerability Assessment of AC State Estimation With Respect to False Data Injection Cyber-Attacks, IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 3, pp. 1362-1370, 2012. https://doi.org/10.1109/TSG.2012.2195338

[8] Monticelli, A. *State Estimation in Electric Power Systems: A Generalized Approach*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1999. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-4999-4

[9] Krsman, V. *Specijalizovani algoritmi za detekciju, identifikaciju i estimaciju loših podataka u elektrodistributivnim mrežama*, Novi Sad, Fakultet tehničkih nauka, 2017. https://hdl.handle.net/21.15107/rcub_nardus_8404 [pristupljeno 23. 02. 2026]

[10] Liang, J., Sankar. L., Kosut, O. Vulnerability analysis and conse quences of false data injection attack on power system state estimation, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 31, No. 5, pp. 3864-3872, 2016. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2015.2504950

AUTORI

Stefan Čubonović - asistent, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerziteta u Kragujevcu, stefan.cubonovic@ftn.kg.ac.rs, ORCID 0000-0002-0240-5349

Dragan Ćetenović - vanredni profesor, Fakultet tehničkih nauka u Čačku. Univerziteta u Kragujevcu, dragan.cetenovic@ftn.kg.ac.rs, ORCID 0000-0001-5087-4863

Nikola Vojnović – vanredni profesor, Fakultet tehničkih nauka Univerziteta u Novom Sadu, nikola.vojnovic@uns.ac.rs, ORCID 0000-0001-8361-2085

Aleksandar Ranković - redovni profesor, Fakultet tehničkih nauka u Čačku, Univerziteta u Kragujevcu, aleksandar.rankovic@ftn.kg.ac.rs, ORCID 0000-0002-7205-9584

Malicious Attacks on the State Estimator in Distribution Networks: Analysis of Attack Feasibility under Conditions of Low Measurement Redundancy

Abstract – In the last decade, the use of information and communication technologies in distribution networks has intensified. Such technologies are exposed to the risk of malicious cyber-attacks, which poses a threat to the operation of distribution networks. One of the potential targets of such attacks in distribution networks is the state estimator. Classical bad data detection algorithms, most commonly statistical methods such as the χ^2 test and the Largest Normalized Residual test, are unable to detect malicious false data injection attacks (FDIAs) if these attacks are skilfully concealed. However, due to the low measurement redundancy characteristic of distribution networks, attackers face difficulties in concealing the attack, in which case even classical bad data detection algorithms may be able to identify it. This enables the detection of FDIAs without additional financial investments that would be required for the implementation of sophisticated detection solutions. This paper analyzes the feasibility of FDIAs in distribution networks, aiming to relate attack feasibility to measurement redundancy. The results of the analysis can be used to inform distribution system operators whether there is a need for sophisticated FDIA detection techniques, depending on the measurement infrastructure of the network under their control.

Index Terms – BDD, FDIA, Pseudo measurements, WLS

Rad primljen: 12.04.2026., prihvaćen: 05.09.2026.

doi: 10.46793/EEE26-3.41B

Originalni naučni rad
UDK 697.1:699.86]:519.876

Eksperimentalno određivanje dinamičkih termičkih svojstava zgrade

Miloš Banjac, Sandra Kovačević
Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet

Rezime **-** Efektivni toplotni otpor i efektivni toplotni kapacitet predstavljaju ključne parametre za opis termodinamičkog ponašanja zgrada, posebno u uslovima promenljivih spoljašnjih uslova i naprednih sistema upravljanja. U ovom radu predstavljena je eksperimentalna metodologija za njihovo pouzdano određivanje. Metodologija se zasniva na kontrolisanom unosu toplote i analizi vremenskog odziva unutrašnje temperature zgrade, pri čemu se zgrada modeluje kao dinamički sistem opisan najjednostavnijim 1R-1C modelom. Prikazane su matematičke osnove metode, analitička rešenja za tipične pobude i postupak identifikacije efektivnih parametara. Posebna pažnja usmerena je na ulogu efektivnog toplotnog kapaciteta i ograničenja kvazistacionarnih proračunskih metoda, kod kojih se uticaj termičke mase uvodi posredno. Rezultati pokazuju da ova metoda omogućava direktno i na fizičkim principima zasnovano određivanje dinamičkih termičkih karakteristika postojećih zgrada, što ga čini pogodnim alatom za energetske analize, verifikaciju mera energetske efikasnosti i unapređenje sistema upravljanja.

Ključne reči - efektivni toplotni otpor, efektivni toplotni kapacitet, RC model, dinamičko ponašanje zgrade, termički odziv

I UVOD

U savremenoj inženjerskoj praksi procena energetskih performansi i termičkog ponašanja zgrada sve više prevazilazi okvire stacionarnih i kvazistacionarnih proračunskih pristupa. Povećana primena grejanja sa prekidima, niskotemperaturnih sistema, naprednih strategija upravljanja i obnovljivih izvora energije zahteva pouzdano poznavanje termodinamičkih karakteristika zgrade, a ne samo njenog stacionarnog energetskog bilansa.

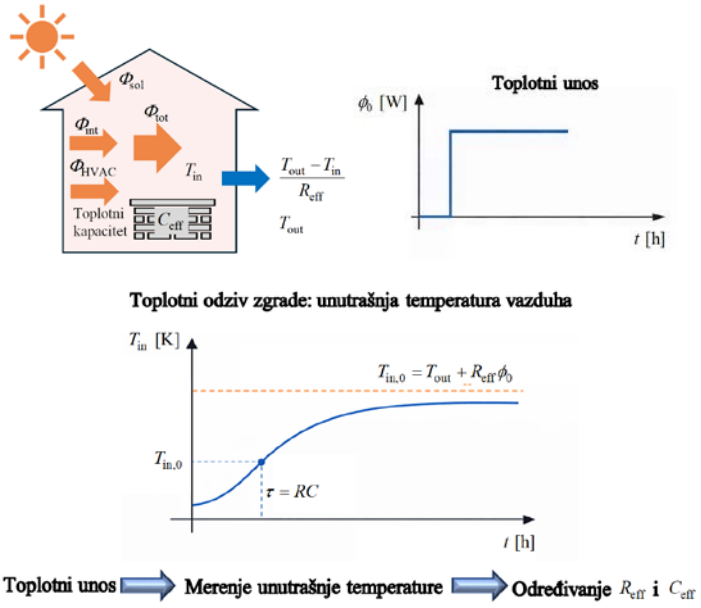
Za opis termodinamičkog ponašanja zgrada koriste se modeli različitog stepena fizičke zasnovanosti. Tzv. modeli bele kutije (rng. *white-box models*) zasnivaju se na detaljnom fizičkom opisu konstrukcije i tehničkih sistema zgrade i zahtevaju potpunu geometrijsku i materijalnu dokumentaciju objekta [1]. Iako su pogodni za projektovanje novih zgrada, njihova primena u eksperimentalnoj karakterizaciji postojećih objekata je ograničena, jer su osetljivi na nesigurnosti ulaznih podataka i ne omogućavaju direktno određivanje efektivnih dinamičkih parametara [2].

Sa druge strane, tzv. modeli crne kutije (eng. *black-box models*) uspostavljaju matematičku vezu između ulaznih i izlaznih veličina isključivo na osnovu merenja, bez eksplicitne povezanosti sa fizičkom strukturom zgrade i fizičkim pojavama [1]. Iako mogu postići dobru aproksimaciju u okviru kalibrisanog opsega, njihovi parametri nemaju fizičko značenje, što onemogućava interpretaciju u terminima termičke inercije, otpornosti ili akumulacije toplote [2] .

U tom kontekstu, tzv. modeli sive kutije (eng. *grey-box models*), odnodno R-C modeli, predstavljaju optimalan kompromis, jer zadržavaju jasnu fizičku interpretaciju parametara, a istovremeno omogućavaju njihovu identifikaciju isključivo na osnovu eksperimentalnih podataka [1,2]. Dva parametra imaju fundamentalni značaj u okviru ovog modela, i to:

- efektivni toplotni otpor R_{eff} , koji karakteriše ukupni otpor razmene toplote između zgrade i spoljašnjeg okruženja,
- efektivni toplotni kapacitet C_{eff} , koji opisuje sposobnost zgrade da akumulira toplotu u dinamičkim uslovima.

Njihov proizvod definiše vremensku konstantu τ_{eff} (jednačina), koja predstavlja meru termičke inercije i osnovni indikator termodinamičkog odziva sistema.



Slika 1. Test toplotnog odziva 1R-1C modela zgrade

Kako eksperimentalno određivanje efektivnog toplotnog otpora i efektivnog toplotnog kapaciteta predstavlja ključni korak u karakterizaciji dinamičkih termičkih svojstava zgrade, u ovom radu opisan je kontrolisani eksperimentalni postupak zasnovan na stepenastoj pobudi toplotnog unosa i analizi temperaturnog

odziva u okviru 1R-1C modela sive kutije, kojim je moguće pouzdano odrediti navedena dva parametra. S obzirom na metodološku sličnost sa klasičnim testom toplotnog odziva koji se primenjuje u drugim oblastima termičkih sistema, za potrebe ovog rada postupak je nazvan test toplotnog odziva zgrade (eng. *building thermal response test*, B-TRT), slika 1.

II Fizički i matematički 1C-1R model zgrade

Fizički model zgrade, u okviru pristupa modela sive kutije 1R-1C, aproksimira se kao termodinamički sistem prvog reda (slika 1), koji:

- sadrži termičku masu, temperature $T_{\text{in}}(t)$ i efektivnog toplotnog kapaciteta C_{eff}, i
- okolinu zgrade koji čini okolni vazduh temperature $T_{\text{out}}(t)$.

Pri tome se pretpostavlja:

- da se temperatura termičke mase (zgrade) menja tokom vremena $T_{\text{in}}(t)$, kao i da je uniformna po celoj zapremini (termičkoj masi);
- da su toplotni gubici transmisijom i ventilacijom, koje zgrada razmenjuje sa okolnim vazduhom proporcionalni razlici temperatura $T_{\text{out}}(t) - T_{\text{in}}(t)$, a obrnuto proporcionalni efektivnom toplotnom otporu zgrade R_{eff};
- da je pored gubitaka toplote transmisijom i ventilacijom, zgrada izložena energetskim dejstvima Sunčevog zračenja Φ_{sol}, unutrašnjih toplotnih izvora Φ_{int} (od ljudi i električnih uređaja) i uticaja rada sistema za grejanje, hlađenje, ventilaciju ili klimatizaciju Φ_{HVAC}.

U skladu sa pretpostavljenim uslovima, energetski bilans zgrade se može napisati u obliku:

$$C_{\text{eff}} \frac{\mathrm{d}T_{\text{in}}}{\mathrm{d}t} = \frac{T_{\text{out}} - T_{\text{in}}}{R_{\text{eff}}} + \Phi_{\text{HVAC}} + \Phi_{\text{int}} + \Phi_{\text{sol}}, \qquad (1)$$

pri čemu je dodatno pretpostavljeno da važi korelacija da se promena unutrašnje energije zgrade U može izraziti preko promene temperature zgrade:

$$\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}t} = C_{\text{eff}} \frac{\mathrm{d}T_{\text{in}}}{\mathrm{d}t}, \qquad (2)$$

gde efektivni ili ukupni toplotni kapacitet zgrade, C_{eff}, obuhvata zbirni efekat termičke mase zgrade, a efektivni termički otpor zgrade, R_{eff}, objedinjuje otpor prolaženju toplote kroz sve građevinske elemente termičkog omotača zgrade (zidove, prozore, krov, podrum), kao i otpor ventilacionim gubicima toplote.

Jednačina energetskog bilansa zgrade, jednačina (1), može se predstaviti u obliku:

$$\frac{\mathrm{d}T_{\text{in}}(t)}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} T_{\text{in}}(t) = \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} T_{\text{out}}(t) + \frac{\Phi_{\text{tot}}(t)}{\tau_{\text{eff}}}, \qquad (3)$$

gde je sa τ_{eff} označena efektivna vremenska konstanta zgrade:

$$\tau_{\text{eff}} = R_{\text{eff}}\ C_{\text{eff}},$$

a sa Φ_{tot} označen zbir svih toplotnih protoka:

$$\Phi_{\text{tot}} = \Phi_{\text{HVAC}} + \Phi_{\text{int}} + \Phi_{\text{sol}}.$$

U matematičkom smislu jednačina (3) predstavlja nehomogenu diferencijalnu jednačinu prvog reda:

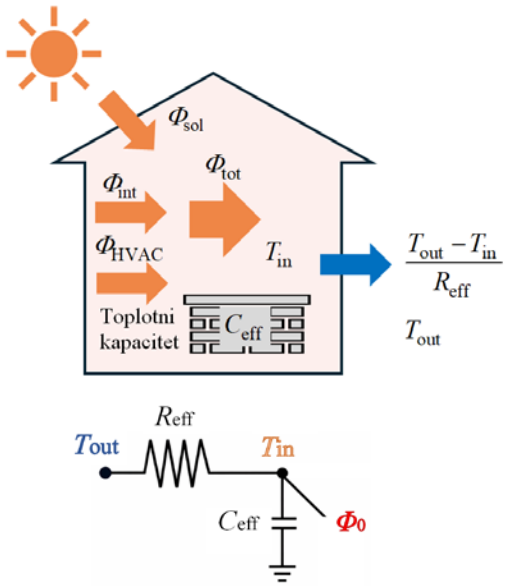
$$\dot{T}_{\text{in}} + a_{\text{eff}}\ T_{\text{in}} = f(t) \qquad (4)$$

gde je sa a_{eff} označena efektivna toplotna difuzivnost zgrade:

$$a_{\text{eff}} = \frac{1}{R_{\text{eff}}\ C_{\text{eff}}} = \frac{1}{\tau_{\text{eff}}}.$$

Opšte rešenje ove jednačine sastoji se od homogenog (nestacionarnog) i partikularnog (stacionarnog) dela, koji odgovaraju prelaznom i prinudnom temperaturnom odzivu zgrade [3].

Iako jednostavan, ovaj model omogućava analizu osnovnog dinamičkog ponašanja i procenu vremenske konstante zgrade τ_{eff}.



Slika 2. Šematski prikaz 1R-1C modela zgrade (gore) i odgovarajuća analogija sa električnim kolima (dole)

III Analitičko rešenje 1R-1C modela pri stepenastoj pobudi

Pod stepenastom pobudom podrazumeva se nagla promena toplotnog unosa iz početnog stanja na konstantnu vrednost Φ_0, koja se održava tokom eksperimenta, tj.:

$$\Phi(t) = \Phi_0 H(t),\ t \geq 0 \quad \Rightarrow \quad \Phi(t) = \Phi_0.$$

Pod ovim uslovom jednačina (3) prelazi u oblik:

$$\frac{\mathrm{d}T_{\text{in}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} T_{\text{in}} + \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} T_{\text{out}} + \frac{1}{C_{\text{eff}}} \Phi_0. \qquad (5)$$

Jednačina (5) može se napisati u obliku linearne nehomogene diferencijalne jednačine prvog reda sa konstantnim koeficijentima:

$$\frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{in}}}{\mathrm{d}t}+\frac{1}{\tau_{\mathrm{eff}}}T_{\mathrm{in}}=b\,, \tag{6}$$

gde je sa b označena konstanta:

$$b=\frac{1}{\tau_{\mathrm{eff}}}T_{\mathrm{out}}+\frac{1}{C_{\mathrm{eff}}}\Phi_0\,.$$

III.1 Rešenje za stalnu temperaturu spoljašnjeg vazduha

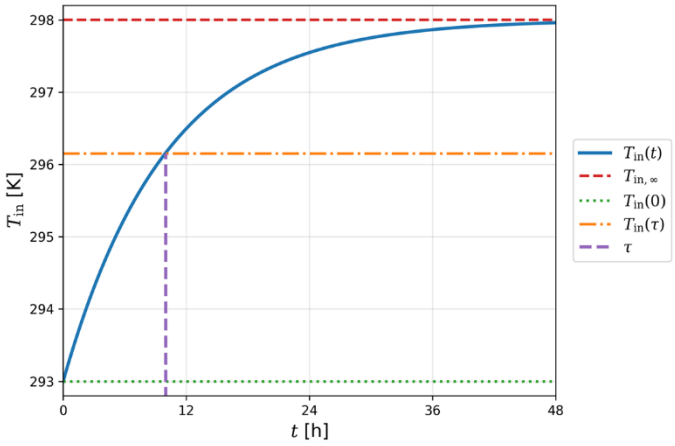
Nakon sprovedene stepenaste pobude, uz dodatni uslov da se temperatura spoljašnjeg vazduha tokom trajanja ove pobude ne menja, odnosno da je stalna:

$$T_{\mathrm{out}}(t)=T_{\mathrm{out}}=\mathrm{const}\,,$$

nakon izvesnog vremena i temperatura unutrašnjeg vazduha će se ustaliti:

$$\frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{in}}}{\mathrm{d}t}=0\,,$$

tj. sistem će preći u stacionarno stanje (slika 2).



Slika 3. Promena temperature zgrade tokom stepenaste pobude toplotnog unosa

Korišćenjem jednačine (5) može se odrediti dostignuta temperatura unutrašnjeg vazduha:

$$T_{\mathrm{in},\infty}=T_{\mathrm{out}}+R_{\mathrm{eff}}\,\Phi_0\,, \tag{7}$$

što ujedno predstavlja stacionarni (partikularni) deo rešenja jednačine (6).

Homogeni (nestacionarni) deo rešenja jednačine (6) dobija se uvođenjem odgovarajuće smene:

$$\vartheta_{\mathrm{in}}(t)=T_{\mathrm{in}}(t)-T_{\mathrm{in},\infty}\quad\Rightarrow\quad T_{\mathrm{in}}(t)=T_{\mathrm{in},\infty}+\vartheta_{\mathrm{in}}(t)\,, \tag{8}$$

pa jednačina (6) prelazi u oblik:

$$\frac{\mathrm{d}T_{\mathrm{in}}}{\mathrm{d}t}+\frac{1}{\tau_{\mathrm{eff}}}(T_{\mathrm{in},\infty}+\vartheta_{\mathrm{in}})=b\,. \tag{9}$$

Budući da je $(1/\tau_{\mathrm{eff}})T_{\mathrm{in},\infty}=b$ jednačina (8) prelazi u homogenu diferencijalnu jednačinu:

$$\frac{\mathrm{d}\vartheta_{\mathrm{in}}}{\mathrm{d}t}+\frac{1}{\tau_{\mathrm{eff}}}\vartheta_{\mathrm{in}}=0\,,$$

čije je rešenje:

$$\vartheta_{\mathrm{in}}(t)=K_1\,e^{-t/\tau_{\mathrm{eff}}}\,. \tag{10}$$

Konstanta K_1 određuje se iz početnog uslova:

$$t=0,\quad T_{\mathrm{in}}(0)=T_{\mathrm{in},0}\,,$$

iz čega sledi da je:

$$T_{\mathrm{in}}(0)=T_{\mathrm{in},\infty}+K_1=T_{\mathrm{in},0}\quad\Rightarrow\quad K_1=T_{\mathrm{in},0}-T_{\mathrm{in},\infty}\,. \tag{11}$$

Konačno opšte rešenje jednačine (6) može se napisati u obliku:

$$T_{\mathrm{in}}(t)=T_{\mathrm{in},\infty}+(T_{\mathrm{in},0}-T_{\mathrm{in},\infty})\,e^{-t/\tau_{\mathrm{eff}}}\,. \tag{12}$$

Iz dobijenog rešenja može se zaključiti da je:

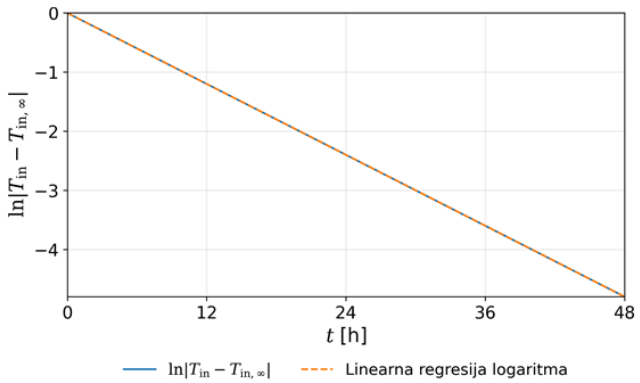
- $T_{\mathrm{in},\infty}=T_{\mathrm{out}}+R_{\mathrm{eff}}\,\Phi_0$ novouspostavljena ustaljena temperatura sistema,
- eksponencijalni član prolazni (nestacionarni) odziv sistema koji se smanjuje sa protokom vremena t,
- τ_{eff} efektivna vremenska konstanta zgrade odgovorna je za brzinu dostizanja stacionarnog stanja (za veće vrednosti τ_{eff} ostvaruje se sporiji odziv sistema).

Na osnovu predstavljenog analitičkog rešenja 1R-1C modela, može se definisati eksperimentalni postupak, odnosno tzv. test toplotnog odziva zgrade B-TRT, kojim se određuju efektivni toplotni otpor R_{eff} i efektivni toplotni kapacitet zgrade C_{eff}. Test se sprovodi pod pretpostavkom da se temperatura spoljašnjeg vazduha tokom trajanja stepenaste pobude topotom ne menja.

Procedura B-TRT testa započinje definisanjem početnog termičkog stanja zgrade, pri čemu je potrebno obezbediti da:

1) temperature unutrašnjeg i spoljašnjeg vazduha budu ustaljene pre početka eksperimenta;
2) u trenutku $t=0$ zgrada počinje da se zagreva toplotnim izvorom poznate i konstantne toplotne snage Φ_0, koja se održava nepromenjenom tokom trajanja testa;
3) se tokom eksperimenta kontinuirano mere unutrašnja temperatura vazduha $T_{\mathrm{in}}(t)$, temperatura spoljašnjeg vazduha $T_{\mathrm{out}}(t)$, koja bi trebalo da bude konstantna;
4) na osnovu zabeleženog temperaturnog odziva $T_{\mathrm{in}}(t)$, slika 3, određuje se nova kvazistacionarna vrednost unutrašnje temperature $T_{\mathrm{in},\infty}$, iz koje se efektivni toplotni otpor zgrade računa prema relaciji:
$$R_{\mathrm{eff}}=\frac{T_{\mathrm{in},\infty}-T_{\mathrm{out}}}{\Phi_0} \tag{13}$$
5) se vremenska konstanta sistema τ_{eff} određuje iz nestacionarnog dela temperaturnog odziva, primenom 63 % kriterijuma [4,5] ili log-linearne regresije odstupanja temperature od stacionarne vrednosti (slika 3). Alternativno, τ_{eff} se može odrediti linearnom regresijom logaritma odstupanja temperature od stacionarne vrednosti u funkciji vremena (slika 4);
6) se nakon određivanja R_{eff} i τ_{eff} efektivni toplotni kapacitet dobija se direktno iz relacije:

$$C_{\text{eff}} = \frac{\tau_{\text{eff}}}{R_{\text{eff}}}. \quad (14)$$



Slika 4. Određivanje τ_{eff} log-linearnom regresijom

III.2. Rešenje za promenu spoljašnje temperature u obliku sinusne funkcije (realni uslovi)

U realnim uslovima temperatura spoljašnjeg vazduha se menja (nije konstantna). Pod pretpostavkom da se ona može aproksimirati sinusnom funkcijom:

$$T_{\text{out}}(t) = \bar{T}_{\text{out}} + A_{\text{out}} \sin(\omega t), \quad (15)$$

uz nepromenjen uslov stepenaste toplotne pobude, $\Phi(t) = \Phi_0 \; H(t), \; t \geq 0$ jednačina prelazi u oblik:

$$\frac{\mathrm{d}T_{\text{in}}}{\mathrm{d}t} = \underbrace{\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} T_{\text{in}} + \frac{1}{C_{\text{eff}}} \Phi_0}_{\text{konstantni deo}} + \underbrace{\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} (\bar{T}_{\text{out}} + A_{\text{out}} \sin(\omega \tau))}_{\text{periodični deo}}. \quad (16)$$

Desna strana jednačine (16) sastoji se od konstantnog i promenljivog dela, odnosno sagledavajući fizičku pozadinu ove jednačine, može se primetiti da je zgrada izložena jednim konstantnim poremećajem - DC pobudom (*Direct Component*) i jednim sinusnim poremećajem - AC pobudom (*Alternating Component*). Zbog toga se pretpostavlja da će se rešenje ove jednačine, tzv. odziv sistema, sastojati iz dva dela:

$$T_{\text{in}}(t) = T_{\text{DC}} + \theta(t), \quad (17)$$

gde su:

- T_{DC} - srednja vrednost temperature zgrade, odnosno unutrašnjeg vazduha (konstantni deo rešenja), i
- $\theta(t)$ - oscilujuća razlika temperature unutrašnjeg vazduha od njegove srednje vrednosti (periodični deo rešenja).

Da bi se diferencijalna jednačina (16), ovako definisanog 1R-1C modela, neophodno je razdvojiti srednju i periodičnu komponentu temperaturnog odziva. Polazeći od pretpostavke da se promena spoljašnje temperature vazduha može aproksimirati sinusnom funkcijom, temperaturni odziv zgrade se, nakon prolaska nestacionarnog režima, može predstaviti kao superpozicija konstantne (DC) i periodične (AC) komponente. U tom smislu, unutrašnja temperatura vazduha može se zapisati kao zbir srednje vrednosti i sinusno promenljivog dela, pri čemu srednja komponenta odgovara kvazistacionarnom režimu, dok periodična komponenta predstavlja prinudni odziv sistema na vremenski promenljive spoljašnje uslove.

Određivanje konstantnog dela rešenja, tj. srednje vrednosti temperature zgrade, dobija se uvođenjem pretpostavljenog oblika rešenja (17) u jednačinu (16). Budući da je prvi izvod po vremenu pretpostavljenog rešenja:

$$\frac{\mathrm{d}T_{\text{in}}}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t}. \quad (18)$$

Jednačina (17) se može napisati u obliku:

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{\tau_{\text{eff}}}(T_{\text{DC}} + \theta) = \left(\frac{1}{\tau_{\text{eff}}} \bar{T}_{\text{out}} + \frac{1}{C_{\text{eff}}} \Phi_0 \right) + \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} A_{\text{out}} \sin(\omega \tau) \quad (19)$$

Razlaganjem jednačine (19) na delove koje zavise, odnosno nezavise od vremena, sledi da konstantni deo rešenja, tj. srednja vrednost temperature zgrade, odnosno unutrašnjeg vazduha mora biti jednaka:

$$T_{\text{DC}} = \bar{T}_{\text{out}} + \frac{\tau_{\text{eff}}}{C_{\text{eff}}} \Phi_0 = \bar{T}_{\text{out}} + R_{\text{eff}} \; \Phi_0. \quad (20)$$

Dobijeni rezultat upućuje da čak i pri promenljivoj temperaturi spoljašnjeg vazduha $T_{\text{out}}(t)$, srednji porast unutrašnje temperature i dalje zavisi od R_{eff} i Φ_0.

Istovremeno, preostali deo jednačine:

$$\frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} \theta = \frac{1}{\tau_{\text{eff}}} A_{\text{out}} \sin(\omega \tau). \quad (21)$$

predstavlja diferencijalnu jednačinu prvog reda sa sinusnom pobudom, pa se njeno rešenje sastoji se od nestacionarnog dela, koji se pretpostavlja u obliku funkcije:

$$\theta_{\text{tr}}(t) = K_2 \; e^{-t/\tau_{\text{eff}}}. \quad (22)$$

i prinudnog periodičnog dela, koji se pretpostavlja u obliku funkcije:

$$\theta_{\text{p}}(t) = A_{\text{i}} \sin(\omega t - \varphi), \quad (23)$$

gde su:

- A_{i} amplituda oscilovanja unutrašnje temperature, a
- φ fazno kašnjenje promene temperature unutrašnjeg vazduha (fazni pomak) u odnosu na temperaturu spoljašnjeg vazduha.

Za sistem prvog reda odgovarajuće konstante izračunavaju se pomoću izraza [6,7]:

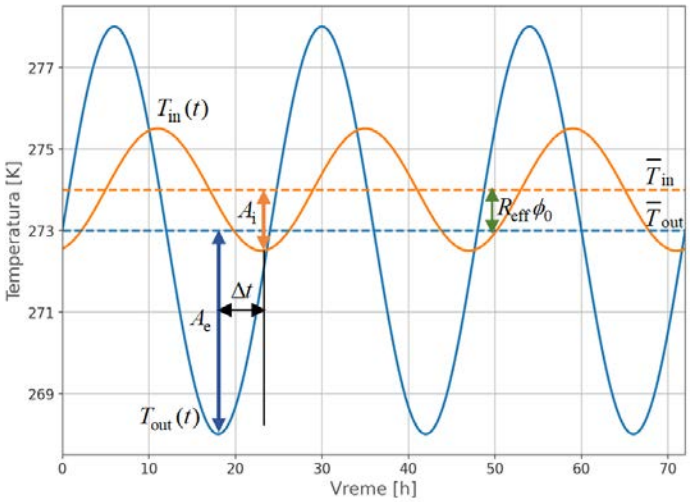
$$A_{\text{i}} = \frac{A_{\text{e}}}{\sqrt{a + (\omega \tau_{\text{eff}})^2}}, \text{ i } \varphi = \arctan(\omega \tau_{\text{eff}}) \quad (24)$$

Konačno, kombinovanjem oba rešenja, srednje i promenljive komponente dobija se:

$$T_{\text{in}}(t) = \bar{T}_{\text{out}} + R_{\text{eff}} \; \Phi_0 + \frac{A_{\text{e}}}{\sqrt{a + (\omega \tau_{\text{eff}})^2}} \sin(\omega \tau_{\text{eff}} - \varphi) + K_2 \; e^{-t/\tau_{\text{eff}}} \quad (25)$$

Sa prolaskom vremena, prelazni član $K_2\ e^{-t/\tau_{\text{eff}}}$ nestaje, pa sistem prelazi u kvaziperiodični režim (slika 5):

$$T_{\text{in}}(t) \approx \overline{T}_{\text{out}} + R_{\text{eff}}\ \Phi_0 + \frac{A_{\text{e}}}{\sqrt{a + (\omega\ \tau_{\text{eff}})^2}} \sin(\omega\ \tau_{\text{eff}} - \varphi) \cdot \quad (26)$$



Slika 5. Promene temperature spoljašnjeg i unutrašnjeg vazduha u kvaziperiodičnom oscilujućem režimu, tokom B-TRT, za slučaj promene temperature spoljašnjeg vazduha po sinusnoj funkciji

Kao i u prethodnom, procedura B-TRT testa započinje određivanjem početnog termičkog stanja zgrade, pri čemu je potrebno obezbediti da:

1) su unutrašnji uslovi, odnosno tempetratura T_{in} bude stabilna tokom dužeg vremenskog perioda pre početka eksperimenta;
2) u trenutku $t = 0$ zgrada počinje da se zagreva toplotnim izvorom poznate i konstantne toplotne snage Φ_0, koja se održava nepromenjenom tokom trajanja testa;
3) se tokom eksperimenta kontinuirano mere unutrašnja temperatura vazduha $T_{\text{in}}(t)$, spoljašnja temperature vazduha $T_{\text{out}}(t)$, kao i snaga grejača Φ_0;
4) na osnovu zabeleženog temperaturnog odziva, slika 5, nakon prolaska prelaznog režima i ulaska u kvaziperiodični oscilujući režim, potrebno je odrediti srednju vrednost temperature unutrašnjeg $\overline{T}_{\text{in}}$ i spoljašnjeg vazduha $\overline{T}_{\text{out}}$ i odredti efektivni toplotni otpor prema izrazu:

$$R_{\text{eff}} = \frac{\overline{T}_{\text{in}} - \overline{T}_{\text{out}}}{\Phi_0}; \quad (27)$$

5) se na osnovu izmerenog faznog kašnjenja promene temperature unutrašnjeg vazduha (faznog pomaka φ) u odnosu na temperaturu spoljašnjeg vazduha ili vrednosti amplitude oscilacija temperature spoljašnjeg i unutrašnjeg vazduha može odrediti efektivna vremenska konstanta [6,7]:

$$\tau_{\text{eff}} = \frac{\tan\varphi}{\omega} \text{ ili } \tau_{\text{eff}} = \frac{1}{\omega}\sqrt{\left(\frac{A_{\text{e}}}{A_{\text{e}}}\right)^2 - 1}; \quad (28)$$

6) nakon određivanja efektivnog toplotnog otpora i efektivne vremenske konstante, efektivni toplotni kapacitet zgrade dobija se iz izraza:

$$C_{\text{eff}} = \frac{\tau_{\text{eff}}}{R_{\text{eff}}}. \quad (29)$$

IV Zaključak

U ovom radu prikazana je matematička podloga, zasnovana na 1R-1C modela sive kutije i metodologija sprovođenja testa toplotnog odziva zgrade (B-TRT), kao kontrolisanog eksperimentalnog postupka za utvrđivanje efektivnog toplotnog otpora R_{eff} i efektivnog toplotnog kapaciteta zgrade C_{eff}.

Posebno su razmotrena dva tipična režima spoljašnjih uslova. Prvi, za slučaj konstantne temperature spoljašnjeg vazduha**,** kada se R_{eff} određuje nakon uspostavljanja stacionarnih uslova, dok se vremenska konstanta, τ_{eff}, određuje iz prelaznog, nestacionarnog i eksponencijalnog dela odziva, nakon čega sledi i određivanje C_{eff}. U drugom slučaju, vremenski promenljive temperature spoljašnjeg vazduha**,** R_{eff} se dobija iz srednjih vrednosti temperatura unutrašnjeg i spoljašnjeg vazduha po ulasku u kvazisatcionarni oscilujući režim, dok se τ_{eff} određuje iz amplitudnog prigušenja i/ili faznog pomaka između oscilujućih temperatura. Toplotni kapacitet, C_{eff}, se i u ovom slučaju određuje kao odnos dva prethodno određene parametra. Na taj način, B-TRT prevazilazi ograničenja kvazistacionarnih metoda u kojima je uticaj termičke mase implicitno uveden i često nedovoljno reprezentativan za realno dinamičko ponašanje zgrade. Predložena metodologija omogućava eksperimentalno zasnovanu karakterizaciju postojećih zgrada i predstavlja praktičnu osnovu za pouzdanije dinamičko modeliranje, evaluaciju mera energetske efikasnosti i unapređenje strategija upravljanja potrošnjom energije.

Acknowledgement

U radu su prikazani rezultati istraživanja podržanog od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija RS po Ugovoru 451-03-34/2026-03/200105 od 05.02.2026. godine.

Literatura

[1] Li, Y., O'Neill, Z., Zhang, L., Chen, J., Im, P., DeGraw, J. Grey-box modeling and application for building energy prediction: A review, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 146, 111174, 2021. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111174

[2] Shahcheraghian, A., Madani, H., Ilinca, A. From White to Black-Box Models: A Review of Simulation Tools for Building Energy Management and Their Application in Consulting Practices , Energies, Vol. 17, No. 2, pp. 376, 2024. https://doi.org/10.3390/en17020376

[3] Åström, J., Murray, R.M. *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*, Princeton University Press, 2008. https://www.cds.caltech.edu/~murray/books/AM08/pdf/am08-complete_28Sep12.pdf [pristupljeno 16. 03. 2026]

[4] Madsen, H., Holst, J. Estimation of continuous-time models for the heat dynamics of a building, Energy and Buildings, Vol. 22, No. 1, pp. 67-79, 1995. https://doi.org/10.1016/0378-7788(94)00904-X

[5] Bacher, M., Madsen, H. Identifying suitable models for the heat dynamics of buildings, Energy and Buildings, Vol. 43, No. 7, pp. 1511-1522, 2011. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.02.005

[6] Berthou, T., Stabat, P., Salvazet, R., Marchio, D. Development and validation of a gray box model to predict thermal behavior of occupied office buildings, Energy and Buildings, Vol. 74, pp. 91-100, 2014. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.038

[7] Jiménez, M., Madsen, H., Andersen, J.L. Identification of the main thermal characteristics of building components using MATLAB, Building and Environment, Vol. 43, No. 2, pp. 170-180, 2008. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.030

AUTORI

dr Miloš Banjac – red. prof., Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mbanjac@mas.bg.ac.rs, ORCID 0000-0001-8659-8581
Sandra Kovačević – istraživač pripravnik, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, skovacevic@mas.bg.ac.rs, ORCID 0009-0007-2567-6735

Experimental Determination of the Dynamic Thermal Properties of a Building

Abstract – The effective thermal resistance and the effective thermal capacitance represent key parameters for describing the thermodynamic behaviour of buildings, particularly under varying external conditions and in the presence of advanced energy management systems. This paper presents an experimental methodology for their reliable determination. The methodology is based on a controlled heat input and the analysis of the time response of the indoor temperature, with the building modelled as a dynamic system described by an equivalent 1R-1C model. The mathematical foundations of the method, analytical solutions for typical excitations, and the procedure for identifying the effective parameters are presented. Special emphasis is placed on the role of the effective thermal capacitance and on the limitations of quasi-steady-state calculation methods, in which the influence of thermal mass is introduced indirectly. The results demonstrate that the proposed method enables a direct and physically based determination of the dynamic thermal characteristics of existing buildings, making it a suitable tool for energy analysis, verification of energy efficiency measures, and improvement of energy management systems.

Index Terms – Effective thermal resistance, Effective thermal capacitance, RC model, Building thermal dynamics, Thermal response

Rad primljen: 23.03.2026., prihvaćen: 18.08.2026.

doi: 10.46793/EEE26-3.47I

Originalni naučni rad
UDK 553.98:620.91

Analiza mogućnosti korišćenja napuštenih naftnih i gasnih bušotina kao izvor toplotne energije u Srbiji

Marija Ilić, Dušan Danilović, Miroslav Crnogorac, Anastasija Mirjanić, Vesna Karović-Maričić, Lola Tomić
Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Rezime **-** Naftne i gasne bušotine kod kojih dalja proizvodnja ugljovodonika nije ekonomski opravdana zatvaraju se, odnosno konzerviraju ili likvidiraju, čime dobijaju status napuštenih bušotina. S obzirom na to da njihove dubine dosežu od 1000 m do više od 2000 m, one dopiru do toplijih Zemljinih slojeva i predstavljaju velik neiskorišćeni geotermalni potencijal. Na području Srbije nalazi se preko 1000 napuštenih naftnih i gasnih bušotina pogodnih za dobijanje toplotne energije. Pored domaćih istraživanja, slične studije širom sveta pokazuju da ovakvi objekti mogu pružiti značajnu podršku lokalnim i regionalnim sistemima daljinskog grejanja, što ih čini važnim faktorom u strategijama energetske tranzicije. Troškovi opremanja postojećih dubokih bušotina i primene odgovarajućih tehnologija predstavljaju samo manji deo ulaganja u poređenju sa izradom novih, zbog čega se one mogu smatrati vrednim postojećim materijalnim resursom. Toplotna energija dobijena na ovaj način pripada geotermalnoj energiji, te se samim tim klasifikuje kao energija iz obnovljivih izvora. Proces eksploatacije zasniva se na zatvorenom sistemu cirkulacije radnog fluida unutar same bušotine – ohlađeni fluid se utiskuje kroz prstenasti međuprostor, zagreva se u dubljim slojevima i kroz tubing vraća na površinu. U radu su prikazane tehničke mogućnosti i prednosti korišćenja napuštenih bušotina za proizvodnju toplotne energije.

Ključne reči - napuštene naftne i gasne bušotine, toplotna energija, geotermalna energija

I UVOD

Izrada bušotina predstavlja dominantan deo kapitalnih troškova geotermalnih sistema, pa se razmatranje ponovne upotrebe napuštenih naftnih i gasnih bušotina nameće kao ekonomski opravdano rešenje za proizvodnju geotermalne energije. Troškovi opremanja postojećih dubokih bušotina za proizvodnju toplotne energije znatno su manji od izrade novih. Zbog toga se napuštene bušotine mogu smatrati značajnim postojećim materijalnim resursom [1].

Prema procenama u literaturi, u svetu postoji između 20 i 30 miliona naftnih i gasnih bušotina koje su završile svoj radni vek, a njihov energetski potencijal može se iskoristiti za proizvodnju obnovljive, pre svega toplotne energije . Iskorišćavanje postojeće bušotinske infrastrukture omogućava racionalniju upotrebu resursa, smanjenje ekoloških opterećenja i povećanje ukupne energetske efikasnosti sistema. Ovakav koncept direktno doprinosi energetskoj tranziciji, smanjenju potrošnje fosilnih goriva i razvoju savremenih tehnologija zasnovanih na obnovljivim izvorima. U zavisnosti od temperaturnih uslova u donjem delu bušotine, ove bušotine mogu biti pogodne za proizvodnju toplotne energije [1,2].

Iako su ideje o korišćenju napuštenih naftnih bušotina postojale i ranije, njihova praktična i komercijalna primena za eksploataciju geotermalne energije postaje aktuelna krajem 20. i početkom 21. veka, zahvaljujući napretku u tehnologiji razmene toplote.

Primer primene zatvorenih geotermalnih sistema u Panonskom basenu predstavlja mađarski pilot-projekat realizovan primenom WeHEAT tehnologije (eng. *wells for heat exchanging advanced technology*). Postrojenje je testirano u januaru 2021. godine na napuštenoj naftnoj bušotini KIHA-ÉK-14 (Kiskunhalas), dubine 1900 m, u koju je ugrađen koaksijalni izmenjivač toplote na dubini od 1800 m. Uslovi geotermalnog gradijenta od 45 °C/km omogućavaju stabilnu isporuku toplotne energije u rasponu od 300 kW do 900 kW. Energetska efikasnost sistema, prema operativnim podacima, iznosi oko 96%. Ostvareni kapacitet omogućava grejanje staklenika površine 1–1,5 ha ili stambenih i poslovnih objekata grejne površine do približno 30.000 m². Troškovi prenamene napuštene bušotine iznosili su oko 10% troškova konvencionalnih geotermalnih sistema [3].

U Sloveniji je u toku izgradnja geotermalne elektrane na napuštenoj bušotini Pg-8 koja će koristiti njen geotermalni potencijal na dubini od 3000 m. Elektrana će biti snage 50 kW, zatvorenog sistema i kao radni fluid koristiće se amonijak. Očekuje se da će postrojenje godišnje proizvoditi oko 400 MWh električne energije [4].

U Republici Hrvatskoj sproveden je postupak revitalizacije napuštene bušotine Pčelić-1, dubine 4772 m, s ciljem određivanja raspoložive toplotne energije uz korišćenje dubinskih izmenjivača toplote. Temperatura na dnu bušotine iznosi 206,2 °C, a analizom je utvrđeno da maksimalno potencijalno godišnje korišćenje toplotne energije u varijabilnom sistemu iznosi 1750 MWh, uz maksimalnu snagu grejanja od 1,5 MW tokom zimskog perioda. Analiza takođe ukazuje da je moguće ostvariti konstantno iskorišćenje toplotne energije snage 400 kW za direktno industrijsko grejanje tokom perioda od 20 godina, uz stabilnu temperaturu fluida od oko 50 °C [5].

Na naftnom polju Villafortuna Trecate u Italiji, koje predstavlja jedno od najvećih naftnih polja u Evropi, planira se primena dubinskog izmenjivača toplote u cilju proizvodnje toplotne i električne energije. Ležište se nalazi na dubini između 5800 i 6100 m, sa temperaturom od oko 160-170 °C [6].

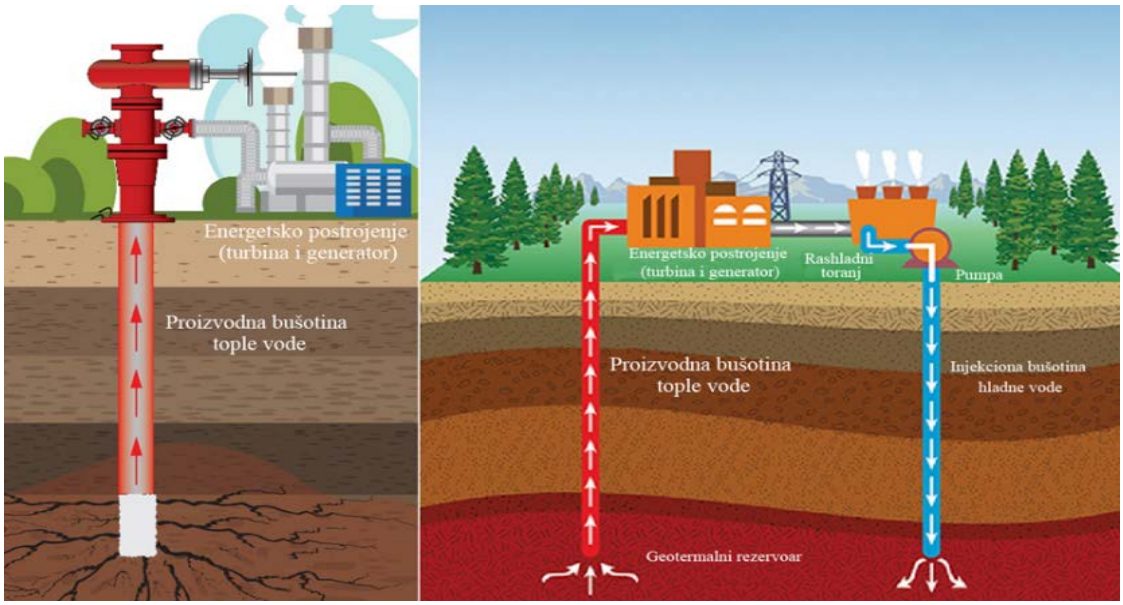
U Egiptu se razmatra izgradnja geotermalnih elektrana primenom korišćenja napuštenih naftnih i gasnih bušotina, čime se početni

troškovi smanjuju za 40% do 60%. Na polju Zapadne pustinje (Western Desert), gde su temperature oko 125 °C, primenom modifikovanog binarnog ciklusa može se ostvariti snaga od 3,063 MW. S druge strane, u regionu Sueckog zaliva, koji karakterišu visoke temperature do 300 °C, predložena je primena modifikovanog "Flash" parnog ciklusa kojom se postiže maksimalna snaga od 44,6 MW [7].

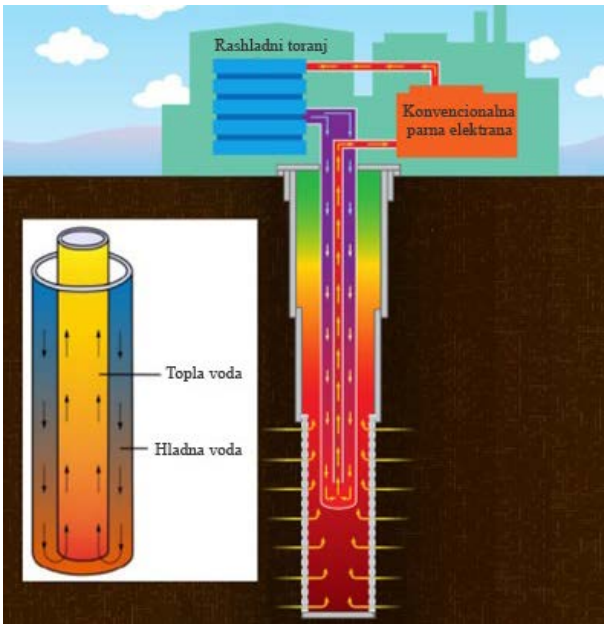
II PREDNOSTI KORIŠĆENJA NAPUŠTENIH BUŠOTINA U ODNOSU NA KONVENCIONALNE GEOTERMALNE SISTEME

Korišćenje konvencionalnih geotermalnih sistema zasniva se na dva osnovna koncepta. Prvi podrazumeva da se geotermalna voda, nakon iskorišćenja toplotne energije, ispušta u okolinu, što može imati negativan uticaj na životnu sredinu (slika 1 – levo).

Drugi koncept zasniva se na sistemu sa dve bušotine, pri čemu se geotermalna voda eksploatiše kroz proizvodnu bušotinu, dok se nakon iskorišćenja reinjektira u ležište putem utisne bušotine (slika 1 – desno). Iako ovaj pristup sprečava površinsko zagađenje i održava pritisak u ležištu, on zahteva dodatne investicione i operativne troškove, koji se odnose na izradu dodatne bušotine i potrošnju energije potrebne za proces utiskivanja fluida [8].



Slika 1. Korišćenje klasične geotremalne bušotine



Slika 2. Princip korišćenje napuštenih bušotina

Princip korišćenja napuštenih bušotina razlikuje se od konvencionalnih sistema po tome što se ista bušotina koristi i za zagrevanje radnog fluida i za njegovo vraćanje nakon iskorišćenja. Prenos toplotne energije ostvaruje se cirkulacijom odgovarajućeg radnog fluida kroz bušotinu. Radni fluid se kroz međuprostor između tubinga i eksploatacione kolone utiskuje u bušotinu, gde se zagreva usled kontakta sa toplim stenskim masama, a zatim se zagrejan fluid kroz tubing dovodi na površinu (slika 2). Na površini se toplotna energija koristi za proizvodnju toplotne energije, nakon čega se ohlađeni fluid vraća u istu bušotinu.

Opisani sistem je ekološki potpuno bezbedan, jer ne dolazi do ispuštanja iskorišćenog fluida u okolinu. Dodatna prednost ogleda se u relativno maloj potrošnji energije za cirkulaciju radnog fluida, budući da je sistem hidraulički uravnotežen i funkcioniše po principu zatvorene U-cevi, pri čemu se ista količina fluida istovremeno nalazi u međuprostoru i tubingu [9-12].

III VRSTE NAPUŠTENIH BUŠOTINA I MOGUĆNOSTI KORIŠĆENJA

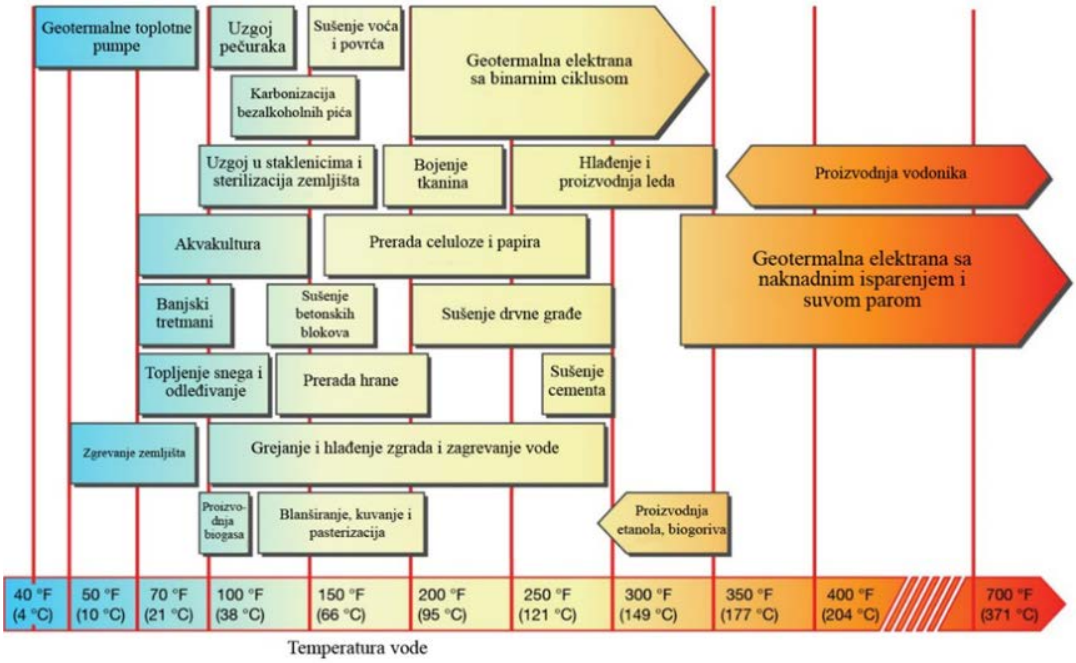
Napuštene bušotine, u zavisnosti od načina zatvaranja, mogu se podeliti na konzervirane, koje su privremeno zatvorene, i likvidirane, koje su trajno zatvorene. Konzervacija bušotina predstavlja postupak privremenog zatvaranja, pri čemu se zadržava mogućnost njihovog ponovnog korišćenja u budućnosti. Konzervirane bušotine se u određenom vremenskom periodu

nalaze van upotrebe, ali se mogu ponovo koristiti u svrhu razvoja naftnih, gasnih i kondenzatnih polja, eksploatacije geotermalnih, industrijskih i mineralnih voda, kao i za podzemno skladištenje fluida. U skladu sa planiranim periodom nekorišćenja, konzervacija se deli na kratkoročnu i dugoročnu. Dugoročna konzervacija primenjuje se kada se planira da bušotina bude van funkcije duže od jedne godine i zahteva sveobuhvatne mere kako bi se obezbedila njena dugoročna stabilnost. Kratkoročna konzervacija odnosi se na period do jedne godine i podrazumeva manje obimne zaštitne mere, uz očuvanje funkcionalnosti bušotine [13,14].

S obzirom na to da se konzervacijom zadržava mogućnost ponovnog korišćenja, konzervirane bušotine predstavljaju efikasno rešenje za buduću prenamenu [15,16].

Likvidirane bušotine predstavljaju trajno zatvorene bušotine. Postupak obuhvata postavljanje cementnog mosta unutar bušotine, čime se osigurava stabilnost i sprečava dalji prodor fluida. Zatim sečenje slobodnog dela eksploatacione kolone, uklanjanje preostale opreme,postavljanje još jednog cementnog mosta ispod vrha bušotine, kako bi se dodatno osigurala bušotina. Nakon toga se demontira erupcioni uređaj, čime se uklanja sva preostala oprema sa bušotine, i na vrhu bušotine se postavlja pokrovna kapa. Na kraju se vrši i sanacija zemljišta, uključujući obnovu vegetacije i vraćanje zemljišta u prvobitno stanje [13]. Za razliku od konzerviranih bušotina, likvidirane bušotine zahtevaju znatno veće troškove i radove za eventualno ponovno korišćenje, jer uključuju uklanjanje cementnih mostova, otvaranje bušotine i instalaciju opreme [14].

Napuštene bušotine se mogu koristiti za proizvodnju toplotne energije [6,1,17] pri čemu potencijal zavisi ne samo od temperature na dnu bušotine, već i od temperature radnog fluida na izlazu, koja određuje količinu korisne toplote dostupne na površini. Pregled različitih oblasti primene napuštenih bušotina u zavisnosti od temperature radnog fluida na ušću bušotine prikazan je na slici 3.



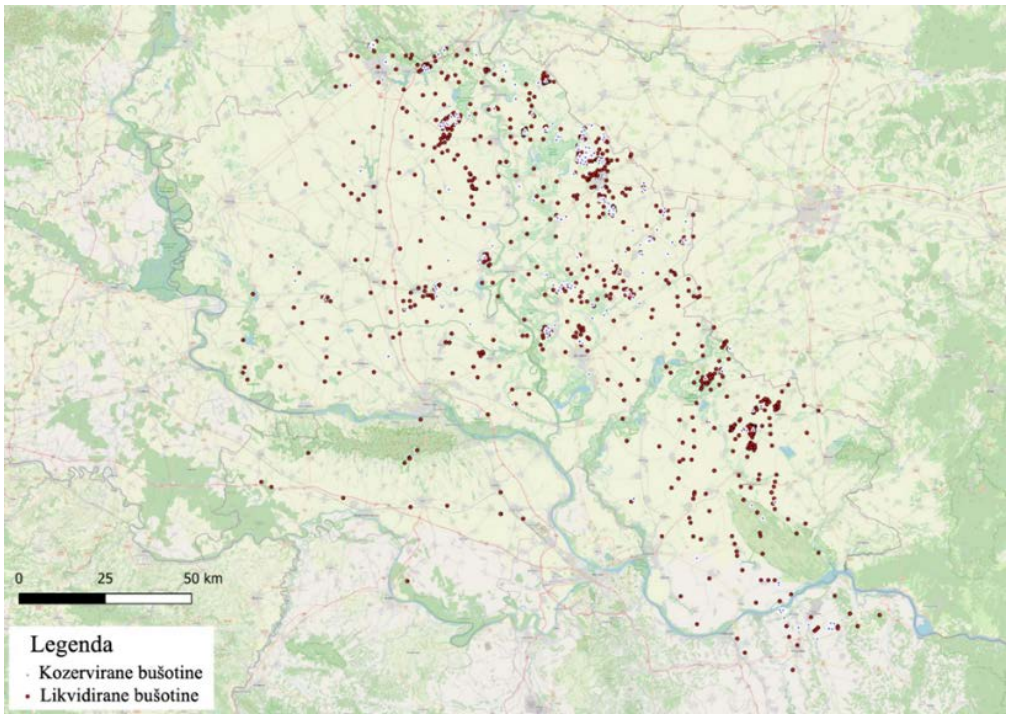
Slika 3. Mogućnosti primene napuštenih bušotina

III MOGUĆNOSTI PRIMENE NAPUŠTENIH BUŠOTINA ZA PROIZVODNJU TOPLOTNE ENERGIJE U SRBIJI

U Republici Srbiji primena napuštenih bušotina za proizvodnju toplotne i električne energije još uvek nije započeta. Ipak, značajan potencijal za ovakvu primenu postoji, s obzirom na to da se na teritoriji Vojvodine nalazi približno 1011 naftnih i gasnih bušotina koje više nisu u funkciji eksploatacije nafte i gasa. Ovu grupu čine istražne bušotine, iscrpljene proizvodne bušotine, kao i tzv. negativne bušotine.

S obzirom na to da se najveći broj napuštenih bušotina nalazi na teritoriji Vojvodine, gde dominira ravničarski prostor sa razvijenom poljoprivrednom proizvodnjom i disperzno raspoređenim naseljima, izbor njihove buduće namene treba razmatrati u skladu sa prostornim položajem bušotine u odnosu na potencijalne potrošače. Naime, ekonomska opravdanost primene napuštenih bušotina u velikoj meri zavisi od dužine toplovodnih instalacija, jer povećanje rastojanja između izvora i potrošača dovodi do većih investicionih troškova i toplotnih gubitaka. Zbog toga je racionalno da se bušotine koje se nalaze u neposrednoj blizini poljoprivrednih površina koriste prvenstveno za zagrevanje plastenika, sušenje poljoprivrednih proizvoda ili grejanje farmi za uzgoj životinja, dok se bušotine koje se nalaze u blizini urbanih sredina mogu efikasno primenjivati za grejanje stambenih, komercijalnih i javnih objekata.

Od ukupnog broja napuštenih bušotina 213 je konzervirano, dok je preostalih 798 likvidirano. Prema tome, likvidirane bušotine čine oko 79% ukupnog broja, dok je udeo konzerviranih bušotina približno 21%. Prostorni raspored napuštenih bušotina je takođe određen i grafički prikazan na slici 4.



Slika 4. Napuštene bušotine u Srbiji

Proizvedena toplotna energija iz napuštenih bušotina se može koristiti za zagrevanje plastenika i životinjskih farmi, sušenje žitarica, voća i drugih proizvoda, grejanje kuća, zgrada i banjskih kompleksa.

Za potrebe zagrevanja plastenika potrebne su relativno niske temperature grejnog medijuma, koje se u praksi najčešće kreću u opsegu 20–30 °C. Konkretna vrednost zavisi od konstruktivnih karakteristika plastenika, stepena toplotne izolacije i režima rada sistema grejanja, što ovu namenu čini posebno pogodnom za primenu niskotemperaturnih geotermalnih izvora. Upravo zbog toga, zagrevanje plastenika predstavlja jednu od najperspektivnijih oblasti primene napuštenih bušotina, jer se zahtevane temperature mogu ostvariti bez dodatnih sistema za podizanje temperaturnog nivoa, što doprinosi visokoj energetskoj efikasnosti i smanjenju investicionih i operativnih troškova. Za potrebe grejanja, plastenici zahtevaju instalisanu snagu od oko 200 W/m². Toplotni potencijal napuštene bušotine dubine 2000 m, pri temperaturnom padu radnog fluida od 20 °C (sa 40 °C na izlazu iz bušotine na 20 °C nakon hlađenja), iznosi približno 251 kW (toplotne snage). Primenom niskotemperaturnog sistema grejanja sa režimom 40/20 °C, jedna napuštena bušotina može da obezbedi dovoljno toplote za grejanje približno 1255 m² plasteničkog prostora.

Objekti namenjeni uzgoju životinja imaju relativno umerene temperaturne zahteve, koji su u domenu niskotemperaturnog grejanja i niži u poređenju sa stambenim objektima. Stabilan i kontinuiran izvor toplote predstavlja ključni zahtev ovakvih objekata, što napuštene bušotine čini pogodnim izvorom energije za ovu namenu. Primena geotermalne toplote omogućava pouzdano održavanje potrebnih mikroklimatskih uslova, uz smanjenje potrošnje konvencionalnih energenata i operativnih troškova sistema grejanja. Energetski zahtevi farmi za uzgoj životinja su nešto manji i iznose približno 150 W/m². U okviru primene niskotemperaturnog sistema grejanja sa temperaturnim režimom 40/20 °C, napuštena bušotina može predstavljati izvor toplotne energije dovoljan za pokrivanje potreba grejanja od oko 1500 m² objekata namenjenih uzgoju životinja.

Grejanje stambenih i komercijalnih objekata zahteva viši temperaturni nivo u odnosu na poljoprivredne objekte, ali se i dalje može realizovati primenom niskotemperaturnih sistema grejanja, posebno u objektima sa dobrom toplotnom izolacijom. Bušotine sa temperaturom fluida na izlazu u opsegu od 45 do 50 °C mogu efikasno pokriti energetske potrebe ovakvih objekata, naročito kada se primenjuju sistemi podnog grejanja ili niskotemperaturni radijatori. Na ovaj način ostvaruje se smanjenje potrošnje fosilnih goriva i povećanje ukupne energetske efikasnosti sistema. Za potrebe grejanja komercijalnih i stambenih objekata razmatra se primena niskotemperaturnog sistema grejanja sa temperaturnim režimom 50/30°C i instalisanom specifičnom snagom od 100 W/m². Pod ovim uslovima, toplotni potencijal jedne napuštene bušotine dovoljan je za pokrivanje energetskih potreba objekta ukupne grejne površine od približno 2300 m². Predviđeno je da sistem funkcioniše tokom grejne sezone u trajanju od 180 dana godišnje, sa dnevnim vremenom rada od 16 sati, uz koeficijent iskorišćenja sistema od 0,7.

U industrijskim postrojenjima napuštene bušotine mogu se koristiti kao izvor toplotne energije za tehnološke procese koji zahtevaju kontinuirano snabdevanje toplotom na niskom ili srednjem temperaturnom nivou. Prednost ovakve primene ogleda se u neprekidnom režimu rada tokom čitave godine, čime se postiže visok stepen iskorišćenja raspoloživog toplotnog potencijala bušotine. Zbog stalnog opterećenja sistema, industrijska primena omogućava povoljnije ekonomske

pokazatelje u poređenju sa sezonskim potrošačima. Zbog neprekidnog režima rada, 24h dnevno, industrijska primena omogućava maksimalno godišnje iskorišćenje toplotnog potencijala napuštenih bušotina, čime se postiže kraći period povraćaja investicije u poređenju sa primenama koje su ograničene na grejnu sezonu.

Banjski i rekreativni objekti predstavljaju posebno povoljne potrošače toplotne energije dobijene iz napuštenih bušotina, s obzirom na produženi period korišćenja sistema grejanja tokom godine. Temperaturni zahtevi ovih objekata kompatibilni su sa niskotemperaturnim geotermalnim izvorima, dok produženo vreme rada omogućava stabilno i efikasno iskorišćenje toplotnog potencijala bušotine. Pored grejanja prostora, ovakvi sistemi mogu se koristiti i za pripremu sanitarne tople vode, čime se dodatno povećava energetska opravdanost primene. Za potrebe grejanja banjskih i rekreativnih objekata predviđena je instalisana specifična snaga od približno 200 W/m², uz primenu niskotemperaturnog sistema grejanja sa režimom 45/28°C. U takvim radnim uslovima, toplotna energija dobijena iz jedne napuštene bušotine može obezbediti zagrevanje objekata ukupne površine od oko 1071 m². U poređenju sa grejanjem stambeno-poslovnih objekata, banjski i rekreativni kompleksi omogućavaju znatno duže vreme eksploatacije sistema tokom godine, sa minimalno 200 dana rada za potrebe grejanja, prosečnim dnevnim vremenom korišćenja od 16 sati i faktorom iskorišćenja sistema od 0,7.

Namena napuštenih bušotina direktno zavisi od temperature radnog fluida na izlazu iz bušotine, koja predstavlja jedan od ključnih tehničkih parametara za izbor sistema grejanja i krajnjeg potrošača. Bušotine sa nižim temperaturnim nivoom fluida (oko 40°C) posebno su pogodne za niskotemperaturne sisteme grejanja, kao što su plastenici i objekti za uzgoj životinja, gde su potrebne relativno niske temperature, ali kontinuiran i pouzdan izvor toplote [19]. Sa porastom temperature fluida na 45–50°C proširuje se spektar mogućih primena, uključujući grejanje stambenih i komercijalnih objekata, banjskih i rekreativnih kompleksa, kao i industrijskih postrojenja, dok u pojedinim slučajevima postoji i potencijal za proizvodnju električne energije korišćenjem odgovarajućih tehnologija.

Mogućnosti primene napuštenih bušotina prikazane su u tabeli 1, pri čemu se temperatura radnog fluida na izlazu kreće između 40 i 50 °C, što je temperaturni opseg koji je najzastupljeniji među postojećim bušotinama. Takve bušotine mogu efikasno snabdevati toplotnom energijom plastenike, farme za uzgoj životinja, stambene i komercijalne objekte, industrijska postrojenja, kao i banjske i rekreativne komplekse, a u određenim slučajevima postoji i potencijal za proizvodnju električne energije.

Za definisanje energetskog potencijala usvojen je maseni protok radnog fluida od 3 kg/s, u skladu sa tehničkim karakteristikama bušotine (prečnik eksploatacione kolone 244,5/220,0 mm i prečnik tubinga 73,0/62,0 mm). Temperatura fluida na vrhu bušotine zavisi od režima rada sistema i varira u rasponu od 40 do 50°C, što je osnov za dalje razmatranje mogućnosti prenamene bušotina u energetske sisteme. Ovaj pristup predstavlja standardnu pretpostavku u proračunima zatvorenih geotermalnih sistema, koja omogućava dalje razmatranje prenamene napuštenih bušotina u energetske sisteme i odabir adekvatnog tipa potrošača.

Tabela 1. Primena napuštenih bušotina za zagrevanje

	Zagrevanje				
Niskotemperaturni sistem grejanja, °C	Plastenika	Farmi	Komercijalnih i stambenih objekata	Industrija	Banje i rekreacija
	40/20	40/20	50/30	50/30	45/28
Temperatura na vrhu bušotine, °C	40	40	50	50	45
Maseni protok, kg/s	3	3	3	3	3
Izračunate vrednosti					
Toplotna snaga, kW	251	251	251	251	214,2
Površina grejanja, m²	1 255	1 500	2300	-	1071

VIII ZAKLJUČAK

Korišćenje napuštenih naftnih i gasnih bušotina predstavlja značajan potencijal u energetskoj tranziciji sa fosilnih goriva ka obnovljivim izvorima energije, posebno zbog mogućnosti ponovne upotrebe postojeće infrastrukture koja je često tehnički očuvana i ekonomski amortizovana. Konzervirane bušotine imaju prednost jer se minimalnim intervencijama mogu relativno brzo privesti novoj nameni, dok likvidirane bušotine zahtevaju znatno veća ulaganja i složene tehničke zahvate, što povećava troškove ponovne upotrebe.

Energetski potencijal jedne bušotine omogućava grejanje 1200–2300 m² prostora, u zavisnosti od tipa objekta, čime se smanjuje potrošnja drugih izvora energije i povećava energetska efikasnost sistema. Takva primena otvara mogućnost upotrebe u plastenicima, farmama, stambenim i industrijskim objektima, a pretvaranjem napuštenih bušotina u izvor energije može se takođe doprineti ekonomskoj održivosti i razvoju proizvodnje proizvoda veće tržišne vrednosti, posebno u poljoprivredi. Prenamena napuštenih bušotina u izvor toplotne energije predstavlja efikasno, ekonomski i ekološki opravdano rešenje, sa značajnim potencijalom za dalju primenu u Srbiji.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je podržan od strane projekta „Forward-Looking Framework for Accelerating Households' Green Energy Transition – FF GreEN“ koji se realizuje sredstvima Fonda za nauku Republike Srbije (grant br.4344).

LITERATURA

[1] Ilić, M., Živković, M., Danilović, D., Crnogorac, M., Karović Maričić, V., Tomić, L. Određivanje teorijskog termičkog potencijala napuštenih naftnih i

gasnih bušotina, Tehnika, Vol. 78, No. 6, pp. 667-672, 2023. https://doi.org/10.5937/tehnika2306667I

[2] Xianbiao, B., Weibin, M., Huashan, L. Geothermal energy production utilizing abandoned oil and gas wells, Renewable energy, Vol. 41, pp.80-85, 2012. https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.10.009

[3] Szekszárdi,A., Békési, E., Gáti, M., Sulyok, I., Toth, K. WeHEAT SYSTEMS: a sustainable closed loop heating technology in the field of geothermal energy, in Proc. *European Geothermal Congress 2022*, Berlin, Germay, Geothermal Solutions, 459, pp. 1-10, 17-21 October 2022.

[4] SI-Geo-Electricity, Pilot project – Pilot geothermal power plant on existing Pg-8 well, Ministry of Cohesion and Regional Development, Republic of Slovenia, 2024. https://si-geo-electricity.si/wp-content/uploads/2022/10/SI-Geo-Electricity-eng.pdf [pristupljeno 15.12.2025]

[5] Macenić, M., Kurevija, T. Revitalization of abandoned oil and gas wells for a geothermal heat exploitation by means of closed circulation: Case study of the deep dry well Pčelić-1, Interpretation, Vol. 6, No. 1, pp. 1-9, 2018. https://doi.org/10.1190/INT-2017-0079.1

[6] Alimonti, C., Soldo, E. Study of geothermal power generation from a very deep oil well with a wellbore heat exchanger, Renewable Energy, Vol. 86, pp. 292-301, 2016. https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.08.031

[7] Moustafa, A.M., Shehata, A.S., Shehata, A.I., Hanafy, A.A. Reuse of Abandoned oil and gas wells for Power generation in Western Dessert and Gulf of Suez fields of Egypt, Energy Reports, Vol. 8, Supplement 9, pp. 1349-1360, 2022. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.07.067

[8] Liu, S., Taleghani, A.D. Closed-loop geothermal systems: Critical review of technologies, performance enhancement, and emerging solutions, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 225, 116177, 2026. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116177

[9] Gao, Q., Jin, G., Yu, H., An, E., Ghassemi, A., Zhou, D., Meng, H. Heat extraction from abandoned petroleum wells utilizing coaxial borehole heat exchanger in Ordos basin, China. Renewable Energy, Vol. 230, 120806, 2024. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120806

[10] Liu, R.-J., Jia, L.-R., Zhang, W.-S., Yu, M.-Z., Zhao, X.-D., Cui, P. Study of Heat Transfer Characteristics and Economic Analysis of a Closed Deep Coaxial Geothermal Heat Exchanger Retrofitted from an Abandoned Oil Well, Sustainability, Vol. 16, No. 4, 1603, 2024. https://doi.org/10.3390/su16041603

[11] Hu, X., Jonathan Banks, J., Guo, Y., Liu, W.V. Unlocking geothermal energy by repurposing abandoned wells as enhanced geothermal systems for sustainable heat production: A numerical investigation, Journal of Hydrology, Vol. 651, 132577, 2025. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132577

[12] Ashena, R. Analysis of Some Case Studies and a Recommended Idea For Geothermal Energy Production From Retrofitted Abandoned Oil and Gas Wells, Geothermics, Vol. 108, 102634, 2023. https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102634

[13] Api recommended practice, Environmental Protection for Onshore Oil and Gas Production Operations and Leases, 2009. https://www.api.org/~/media/files/policy/exploration/api_rp_51r.pdf [pristupljeno 18.12.2025]

[14] Ilić M., Danilović D., Crnogorac M., Karović-Maričić V., Tomić L., Mirjanić A. Well completion of suspended and abandoned wells for the production of thermal and electrical energy, Underground mining engineering, Vol. 1, No. 45, pp. 95-104, 2024. https://doi.org/10.5937/podrad2445095I

[15] Ojaghi, H., Shahin, M., Simjoo, M., Chahardowli, M.. Repurposing abandoned oil and gas wells for geothermal energy extraction: A review of concepts, challenges, and opportunities, Applied Energy, Vol. 401, 126816, 2025. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.126816

[16] Chukwuemeka, A., Oluyemi, G., Mohammed, A., Njuguna, J. Plug and abandonment of oil and gas wells – A comprehensive review of regulations, practices, and related impact of materials selection, Geoenergy Science and Engineering, Vol. 226, 2023. https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.211718

[17] Davis A., Michaelides E. Geothermal power production from abandoned oil wells, Energy, Vol. 34, No. 7 pp. 866–872, 2009. https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.03.017

AUTORI

Marija Ilić - asistent, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, marija.g.ilic@rgf.bg.ac.rs , ORCID 0000-0002-5184-6685
Dušan Danilović - vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, dusan.danilovic@rgf.bg.ac.rs, ORCID 0000-0002-2969-040X
Miroslav Crnogorac - docent, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, miroslav.crnogorac@rgf.bg.ac.rs, ORCID 0000-0002-8078-2684
Anastasija Mirjanić - asistent, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, anastasija.mirjanic@rgf.bg.ac.rs ORCID 0009-0008-3965-2782
Vesna Karović-Maričić - redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, vesna.karovic@rgf.bg.ac.rs, ORCID 0000-0002-6323-1311
Lola Tomić - asistent, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, lola.tomic@rgf.bg.ac.rs, ORCID 0000-0002-6107-1780

Analysis of the Potential Use of Abandoned Oil and Gas Wells as a Source of Thermal Energy in Serbia

***Abstract* –** Oil and gas wells where further hydrocarbon production is no longer economically viable are shut in, i.e., suspended or plugged and abandoned, thereby acquiring the status of abandoned wells. Since their depths range from 1,000 m to over 2,000 m, they reach warmer geological formations and represent a vast, untapped geothermal potential. In the territory of Serbia, there are over 1,000 abandoned oil and gas wells suitable for thermal energy extraction. Alongside domestic research, similar studies worldwide demonstrate that such facilities can provide significant support to local and regional district heating systems, making them a vital factor in energy transition strategies. The costs of retrofitting existing deep wells and applying appropriate extraction technologies represent only a fraction of the investment required for drilling new wells, which is why they can be considered a valuable existing material resource. The thermal energy obtained in this manner falls under geothermal energy and is therefore classified as a renewable energy source. The exploitation process is based on a closed-loop circulation system of the working fluid within the wellbore itself – the cooled fluid is injected through the annulus, heated in the deeper formations, and returned to the surface through the tubing. This paper presents the technical possibilities and advantages of repurposing abandoned wells for thermal energy production.

***Index Terms* –** Abandoned oil and gas wells, Thermal energy, Geothermal energy

Rad primljen: 12.03.2026., prihvaćen: 18.08.2026.

doi: 10.46793/EEE26-3.53R

Stručni rad
UDK 621.311.243:621.316

Analiza uticaja integracije fotonaponske elektrane na elektroenergetski sistem

Željana Ristić, Mileta Žarković
Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet u Beogradu

Rezime **-** Sve veća integracija fotonaponskih elektrana donosi nove izazove u pogledu efikasnog rada, pouzdanosti i stabilnosti elektroenergetskih sistema. Optimalno mesto priključenja i dimenzionisanje fotonaponskih izvora imaju ključnu ulogu u smanjenju tehničkih gubitaka, poboljšanju naponskih prilika i povećanju ukupne energetske efikasnosti elektroenergetskog sistema. U ovom radu razmatra se opšti optimizacioni pristup za određivanje pogodnih lokacija i nominalnih snaga fotonaponskih elektrana, pri čemu je korišćena standardna IEEE mreža, sa ciljem unapređenja rada elektroenergetskog sistema u različitim radnim uslovima. Različita angažovanja generatora uzeta su u obzir kako bi se uvideo njihov uticaj na ponašanje elektroenergetskog sistema. Performanse elektroenergetskog sistema posmatraju se na osnovu više kriterijuma, kao što su smanjenje gubitaka, poboljšanje naponskog profila i povećanje operativne stabilnosti, uz poštovanje tehničkih ograničenja. Dobijeni rezultati ukazuju da optimalna integracija fotonaponskih elektrana može značajno doprineti efikasnijem i pouzdanijem radu elektroenergetskog sistema, pružajući osnovu za planiranje budućih elektroenergetskih sistema sa većim udelom obnovljivih izvora.

Ključne reči - fotonaponske elektrane, optimalno lociranje i dimenzionisanje, optimizacija elektroenergetskog sistema, poboljšanje naponskog profila, smanjenje gubitaka snage, integracija obnovljivih izvora energije.

I UVOD

Analiza tokova snaga koristi se za planiranje, projektovanje i upravljanje elektroenergetskim sistemima, sa ciljem održavanja sigurnog i ekonomičnog rada sistema. Prvi proračuni tokova snaga predstavljali su kompleksne matematičke probleme temeljene na rešavanju linearnih i nelinearnih jednačina. Pojavom raznih softverskih alata, zasnovanih na alternativnim i inovativnim algoritmima, znatno su se povećale tačnosti proračuna tokova snaga [1]. Pravilan proračun tokova snaga važan je za održavanje proizvodnje i potrošnje električne energije, kako bi se redukovali gubici snage i troškovi proizvodnje, u suprotnom bi došlo do velikih problema u mreži. Svaki proračun tokova snaga započinje definisanjem problema i formulisanjem matematičkog modela za rešavanje sistema linearnih i nelinearnih jednačina. Nakon definisanja problema i formulacije matematičkog modela, neophodno je odrediti i izabrati iterativni postupak koji će biti korišćen. Ovaj rad je motivisan pronalaženjem optimalnog mesta priključenja i veličine solarne elektrane za različite radne režime. Generalno, moguće je integrisati elektroenergetski sistem koji kombinuje koncentrisanu solarnu elektranu, sistem za skladištenje toplotne energije i hibridno napajanje, sa ciljem unapređenja održivosti i ekonomske efikasnosti rada sistema. Poseban akcenat stavljen je na optimizaciju rada kroz minimizaciju operativnih i ekoloških troškova [2]. Treba uočiti i probleme koji se javljaju pri optimalnom planiranju i upravljanju elektroenergetskim sistemom sa integrisanim obnovljivim izvorima energije, razvojem matematičkog modela optimizacije koji uzima u obzir tehnička ograničenja sistema, varijabilnost proizvodnje i zahteve potrošnje. Posebno je istaknuta važnost koordinisanog upravljanja izvorima i opterećenjem radi postizanja stabilnog rada sistema u uslovima povećanog udela obnovljivih izvora energije [3].

Cilj rada je određivanje optimalnih lokacija i instalisanih snaga fotonaponskih elektrana primenom optimizacionog pristupa na standardnoj IEEE-14 mreži, radi unapređenja performansi elektroenergetskog sistema u različitim radnim uslovima. Analizom različitih angažovanja generatora ispituje se njihov uticaj na gubitke, naponski profil i operativnu stabilnost uz poštovanje tehničkih ograničenja. Rad je koncipiran u četiri poglavlja, gde prvo poglavlje predstavlja uvodni deo. Drugo poglavlje prikazuje metodologiju i IEEE-14 test sistem sa njegovim karakteristikama. Treće poglavlje prikazuje najznačajnije rezultate i njihovu analizu, dok četvrto poglavlje sumira rezultate.

II METODOLOGIJA

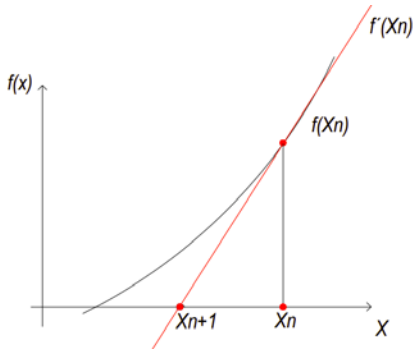
Najčešći iterativni postupak koji se koristi je *Newton Raphson-ov* metod. Metod zahteva definisanje nepoznatih i poznatih parametara u analiziranom sistemu. Promenljive koje su od interesa i ulaze u proračun su moduo i fazni stav napona, aktivna i reaktivna snaga injektiranja, kao i aktivna i reaktivna snaga potrošnje. Nakon definisanja poznatih i nepoznatih veličina, neophodno je klasifikovati čvorove. Podela čvorova prema tipu je prikazana u Tabeli 1.

Tabela 1. Klasifikacija čvora elektroenergetskog sistema

tip čvora	poznate veličine	nepoznate veličine
generatorski (P, U)	P, U	Q, θ
potrošački (P, Q)	P, Q	U, θ
slack (balansni)	U, θ	P, Q

Kod generatorskih čvorova se aktivna snaga održava na zadatoj

vrednosti pomoću turbinskih regulatora, dok se efektivna vrednost napona održava pomoću regulatora pobude. Potrošački čvorovi održavaju aktivnu i reaktivnu snagu na konstantnoj vrednosti, dok se kod balansog čvora na zadatoj vrednosti održavaju moduo i fazni stav napona. *Newton Raphson-ova* metoda smatra se standardnim postupkom za iterativno rešavanje sistema nelinearnih jednačina prilikom proračuna raspodele tokova snaga u elektroenergetskom sistemu. Ovaj postupak poseduje vrlo dobre karakteristike s obzirom na kvadratnu konvergenciju, tako da se danas gotovo svi moderni programi za proračun tokova zasnivaju na ovoj metodi. Matematička formulacija je data na Slici 1.



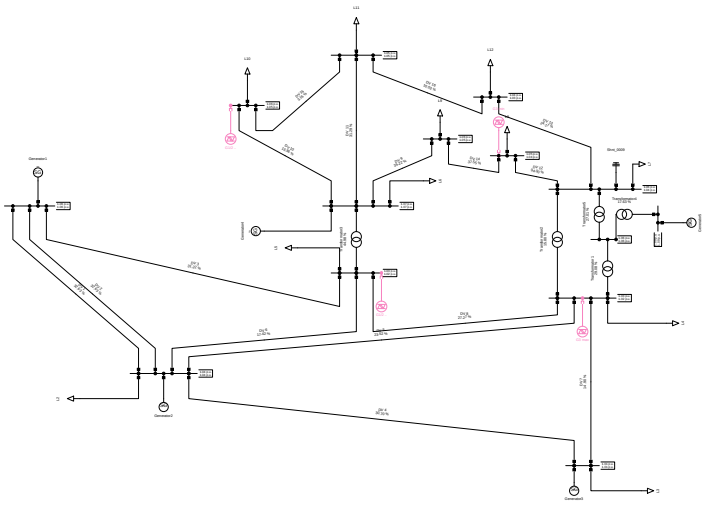
Slika 1. Matematička formulacija *Newton Raphson-ovog* postupka

Iterativni postupak se izvodi na osnovu *Slike 1*, pri čemu je krajnja interpretacija data formulom (1).

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (1)$$

Za siguran rad mreže moraju se poštovati ograničenja aktivne i reaktivne snage generatora u svakom trenutku. Stoga neophodno je da budu ispunjeni uslovi (2) i (3).

$$P_{g,min} < P_g < P_{g,max} \quad (2)$$
$$Q_{g,min} < Q_g < Q_{g,max} \quad (3)$$



Slika 2. IEEE-14 test sistem

Za analizu se razmatra sistem sa više međusobno povezanih čvorova i velikim brojem opterećenja. IEEE-14-čvorni sistem predstavlja pogodan izbor za takvu analizu, jer ima dva glavna izvora koji napajaju 14 međusobno povezanih čvorova sa više opterećenja [4]. Za kompenzaciju reaktivne snage, IEEE14 sistem uključuje tri statička kompenzatora postavljena na različitim lokacijama [5,6]. Istraživanja pokazuju da visoka penetracija PV sistema može dovesti do naponskih odstupanja i potrebe za dodatnom regulacijom reaktivne snage, pri čemu invertori imaju značajnu ulogu u održavanju stabilnosti napona [7,8]. Analiza optimalne lokacije distribuiranih izvora predstavlja važan aspekt unapređenja naponskog profila i smanjenja gubitaka u mreži [9]. Standardizovani test sistemi, poput IEEE-14-čvornog sistema, često se koriste za evaluaciju uticaja integracije obnovljivih izvora zbog svoje reprezentativne strukture i pogodnosti za simulacione analize naponske stabilnosti [10]. Analiza sistema je vršena u softverskom alatu *DIgSILENT* [11], na IEEE-14 sistemu, koji je prikazan na Slici 2.

U cilju analize uticaja integracije proizvodnje na rad elektroenergetskog sistema, izvršeno je ispitivanje zavisnosti snage gubitaka i ukupnog pada napona u mreži od nivoa aktivne snage priključenog generatora. Alat u *DIgSILENT, Hosting Capacity*, omogućava sistematsku analizu uticaja priključenja novih izvora proizvodnje (*distributed energy resources – DER*) ili dodatnog opterećenja (eng. *spare load capacity*) na elektroenergetski sistem. *Hosting capacity* se definiše kao maksimalni nivo nove proizvodnje ili potrošnje koji se može priključiti na mrežu bez narušavanja propisanih tehničkih ograničenja sistema, uključujući kriterijume napona, termička ograničenja elemenata mreže, stabilnost sistema i uslove zaštite, pri čemu se ne razmatraju investicije u proširenje ili rekonstrukciju mrežne infrastrukture.

Ograničenja koja određuju prihvatljivi nivo integracije nove proizvodnje ili potrošnje mogu se kvantifikovati pomoću indeksa performansi (eng. *performance index*). Ovaj indeks predstavlja objedinjenu meru odstupanja od dozvoljenih operativnih granica i može biti definisan na osnovu prekoračenja naponskih limita, preopterećenja vodova i transformatora, podešavanja zaštitnih uređaja, kao i drugih relevantnih operativnih kriterijuma.

U ovom radu, razvijen je matematički model optimizacije koji uzima u obzir tehnička ograničenja sistema, varijabilnost proizvodnje i zahteve potrošnje.

III Analiza rezultata

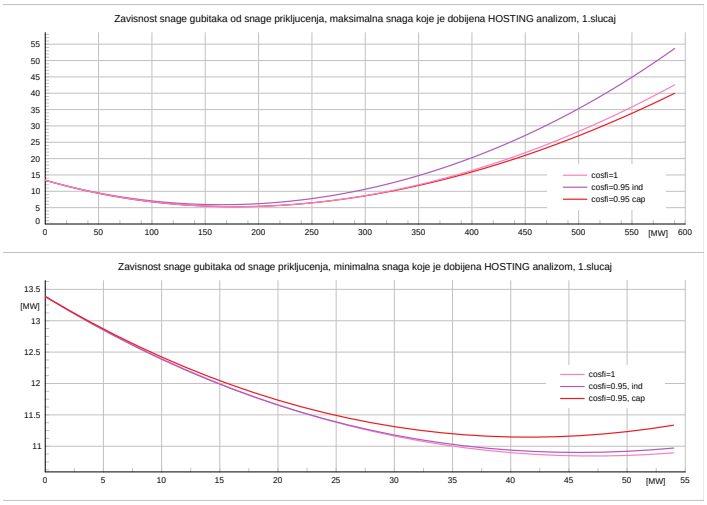
U nastavku rada, na osnovu *Hosting capacity* analize, uz poštovanje naponskih i termičkih ograničenja, dobijene su različite vrednosti maksimalnih snaga priključenja na određene čvorove, uključujući aspekt uticaja lokacije priključenja pri promeni faktora snage. Posebna pažnja posvećena je prikazu zavisnosti snage gubitaka i ukupnog pada napona od nivoa proizvodnje generatora. Grafički prikazi su formirani za karakteristične granične slučajeve, odnosno za minimalne (označene zelenim vrednostima u tabelama) i maksimalne (označene crvenim vrednostima u tabelama) dozvoljene vrednosti priključne snage identifikovane tokom simulacija. Na ovaj način omogućeno je sagledavanje ponašanja sistema u kritičnim radnim tačkama, odnosno u uslovima kada se mreža nalazi blizu operativnih ograničenja. U daljem tekstu će biti prikazana analiza kroz tabelu i grafike za svaki od slučajeva, respektivno.

Najpre je analiziran slučaj rada generatora sa faktorom snage *cosφ*=1, odnosno bez razmene reaktivne snage sa mrežom. Rezultati prikazani u Tabeli 2 pokazuju da maksimalna dozvoljena aktivna snaga značajno varira u zavisnosti od lokacije priključenja.

Tabela 2. Aktivna snaga priključenog generatora, pri *cosφ*=1

čvor	max aktivna snaga priključenog generatora [MW]
14	87,860
13	127,540
12	56,180
11	100,020
10	96,620
9	292,020
7	196.613
5	600
4	590

Ovakvo ponašanje je očekivano, jer električna udaljenost čvora od izvora napajanja, impedansa vodova, kao i lokalna opterećenja utiču na naponske prilike i mogućnost prihvatanja dodatne proizvodnje. Primećuje se da pojedini čvorovi omogućavaju priključenje znatno većih snaga, što ukazuje na manju osetljivost napona na povećanje injektirane aktivne snage.



Slika 3. Zavisnost snage gubitaka od snage priključenja, za slučaj *cosφ=1*, kapacitivno, koja je dobijena *HOSTING* analizom

Na gornjem dijagramu, Slika 3, uočava se karakterističan parabolični (U-oblik) trend krive gubitaka, što predstavlja tipično ponašanje elektroenergetskog sistema pri postepenom povećanju lokalne proizvodnje. U početnoj fazi integracije, pri nižim vrednostima aktivne snage, dolazi do smanjenja ukupnih gubitaka sistema. Ovaj efekat je posledica činjenice da lokalna proizvodnja pokriva deo lokalne potrošnje. Sa daljim povećanjem priključene snage dostiže se tačka minimalnih gubitaka, koja odgovara približnom balansu između lokalne proizvodnje i lokalne potrošnje. U toj tački su tokovi kroz pojedine delove mreže minimalni, te sistem ostvaruje energetski optimum sa aspekta gubitaka. Nakon prelaska ove tačke dolazi do promene režima rada sistema, gde lokalna proizvodnja premašuje lokalnu potrošnju. Uticaj faktora snage jasno je izražen u ovom opsegu.

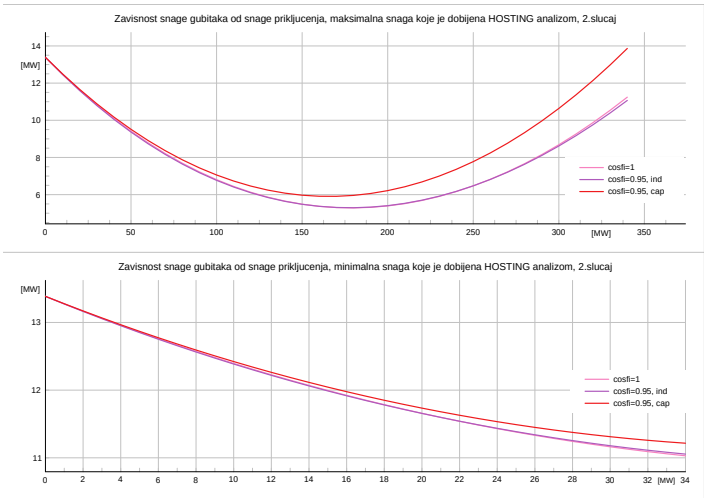
Induktivni režim rada dovodi do većih ukupnih gubitaka u odnosu na rad sa *cosφ*=1, usled dodatne reaktivne komponente struje koja povećava efektivnu vrednost ukupne struje u vodovima. Nasuprot tome, kapacitivni režim pokazuje povoljnije energetske performanse pri višim nivoima proizvodnje, jer doprinosi kompenzaciji reaktivne snage u mreži i redukciji ukupnih tokova.

Za razliku od prethodnog slučaja, na donjem grafiku , Slika 3 ne uočava se parabolični karakter krive, već monotono opadanje gubitaka sa porastom priključene snage. Ovakvo ponašanje ukazuje da sistem u celokupnom analiziranom opsegu ostaje u režimu lokalnog pokrivanja potrošnje. U ovom slučaju ograničenja koja su zadata (naponska i/ili termička) nastupaju pre dostizanja optimalne tačke (minimalnih gubitaka), što znači da tehnički kriterijumi ograničavaju integraciju proizvodnje već u početnoj fazi.

Razmatran je i slučaj rada generatora sa induktivnim faktorom snage (*cosφ*=0,95), čiji su rezultati dati u Tabeli 3. U ovom režimu rada, generator preuzima deo reaktivnog opterećenja iz mreže, što dovodi do drugačijeg uticaja na naponski profil i tokove snaga.

Tabela 3. Aktivna snaga priključenog generatora, pri *cosφ=0,95* induktivno

čvor	max aktivna snaga priključenog generatora [MW]
14	43,380
13	71,860
12	35,620
11	48,180
10	58,580
9	80,020
7	114,095
5	340
4	330,50



Slika 4. Zavisnost snage gubitaka od snage priključenja, za slučaj *cosφ*=0,95, induktivno, koja je dobijena *HOSTING* analizom

Može se uočiti da su maksimalno dozvoljene aktivne snage u ovom slučaju značajno niže u odnosu na režim sa jediničnim faktorom snage. Usled induktivnog rada, sistem brže dostiže operativna ograničenja, što ograničava integraciju novih izvora.
I u ovom slučaju na gornjem grafiku, Slika 4, uočava se karakterističan parabolični (U-oblik) trend krive gubitaka. U početnoj fazi povećanja proizvodnje dolazi do smanjenja ukupnih gubitaka. Sa daljim povećanjem priključene snage sistem dostiže tačku minimalnih gubitaka, koja odgovara približnom balansu između lokalne proizvodnje i lokalne potrošnje, dok se daljim povećanjem snage proizvodnje, povećavaju gubici.

U poređenju sa prvim analiziranim slučajem, maksimalna *hosting* snaga u ovom scenariju je niža (oko 350 MW), ali i ukupni nivo gubitaka u čitavom opsegu je niži.

Nasuprot tome, u slučaju opsega snage, do približno 35 MW (donji grafik na Slici 4), sistem ostaje u zoni u kojoj lokalna proizvodnja ne premašuje lokalnu potrošnju. U tom režimu dolazi isključivo do smanjenja gubitaka, što rezultuje monotonim opadanjem gubitaka bez pojave optimalne tačke.

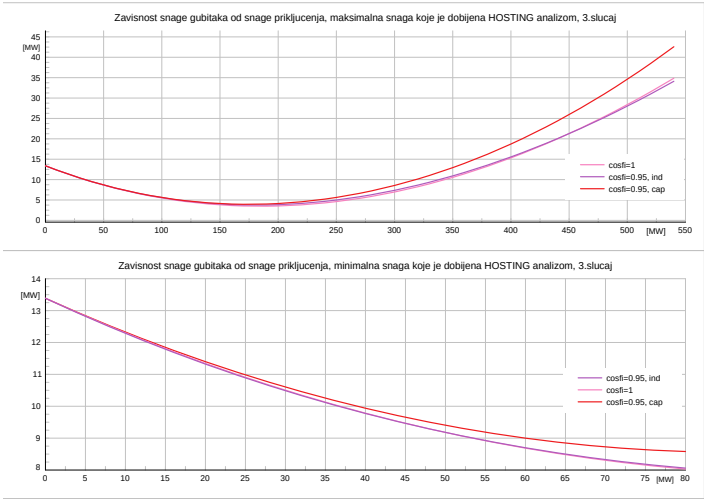
Tabela 4. Aktivna snaga priključenog generatora, pri $cos\varphi$=0,95 kapacitivno

čvor	max aktivna snaga priključenog generatora [MW]
14	105,780
13	113,460
12	112,820
11	111,540
10	84,660
9	256,180
7	196,613
5	512,500
4	558

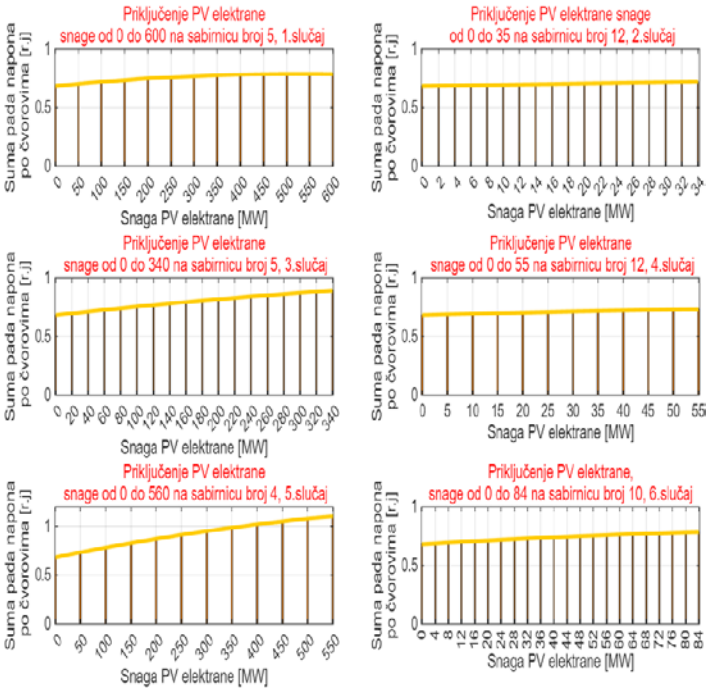
Nasuprot rezultatima iz Tabele 3, rezultati prikazani u Tabeli 4 za kapacitivni režim rada ($cos\varphi$=0,95 kapacitivno) pokazuju poboljšanje maksimalno dozvoljene aktivne snage u odnosu na induktivni slučaj, a u pojedinim čvorovima čak i u odnosu na rad sa $cos\varphi=1$. Kapacitivni rad generatora podrazumeva injektiranje reaktivne snage u mrežu, što doprinosi lokalnom podizanju napona.

I u ovoj analizi, trend gornjeg grafika, Slika 5 je tipičnog U-izgleda. Uticaj faktora snage ostaje konzistentan sa prethodnim analizama. Kapacitivni režim rada rezultuje najvećim ukupnim gubicima, usled dodatne reaktivne komponente struje koja povećava efektivnu vrednost ukupne struje u mreži. Induktivni režim pokazuje povoljnije karakteristike pri višim nivoima proizvodnje, zahvaljujući delimičnoj kompenzaciji reaktivne snage u sistemu. Donji grafik, Slika 5, kao i u prethodnim slučajevima, dovodi do zaključka da su ograničenja *hosting* analize dostignuti pre nego optimalna radna tačke.

U nastavku rada biće prikazana zavisnost sume padova napona od snage proizvodnje PV elektrane. Analiza je sprovedena tako što su za svaki posmatrani faktor snage izračunati ukupni mrežni gubici, a zatim je uočen režim rada pri kojem su ti gubici minimalni. Grafici su potom prikazani upravo za onaj faktor snage koji daje najmanje ukupne gubitke, kako bi se sagledao naponski odziv sistema u najpovoljnijem režimu rada.



Slika 5. Zavisnost snage gubitaka od snage priključenja, za slučaj $cos\varphi=0,95$, kapacitivno, koja je dobijena *HOSTING* analizom



Slika 6. Zavisnost sume pada napona od snage prikljucenja, pri $cos\varphi$=0,95, induktivno (levi grafici) i $cos\varphi$=1 (desni grafici)

Prikazani rezultati potvrđuju da suma padova napona raste sa povećanjem priključene snage PV elektrane u svim analiziranim čvorovima, pri čemu je porast približno linearan u celom razmatranom opsegu. Intenzitet promene napona značajno zavisi od lokacije priključenja. Sabirnice 4 i 5 omogućavaju integraciju znatno većih snaga (≈560 MW i ≈600 MW), uz relativno umeren porast naponskih odstupanja. Nasuprot tome, sabirnice 12 i 10 pokazuju izraženiju naponsku osetljivost, te se dozvoljena granica integracije dostiže pri znatno nižim nivoima proizvodnje

(≈35MW i ≈84 MW). U svim slučajevima naponsko ograničenje predstavlja dominantan kriterijum koji je definisanim *hosting* kapacitetetom. Ako se posmatra relacija pada napona, dominantan uticaj na amplitudu ima realan deo relacije 4.

$$\underline{U_1} = \underline{U_2} + \frac{P_2*R+Q_2*X}{\underline{U_2^*}} + j\frac{P_2*X+Q_2*R}{\underline{U_2^*}} \quad (4)$$

Prema datoj relaciji, porast injektirane aktivne snage direktno utiče na promenu naponskog profila. Rezultati jasno potvrđuju da izbor lokacije priključenja ima presudan značaj u proceni integracionog potencijala distribuirane proizvodnje.

IV Zaključak

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da lokacija priključenja i režim rada generatora imaju presudan uticaj na maksimalno dozvoljenu snagu, kao i na ponašanje gubitaka i ukupnih padova napona u mreži. U budućim istraživanjima model bi se mogao unaprediti uključivanjem detaljnije vremenske analize, odnosno višesatne ili višednevne optimizacije sa realnim profilima potrošnje i proizvodnje iz obnovljivih izvora. Dodatno je moguće izvršiti optimalno planiranje i upravljanje elektroenergetskim sistemom sa integrisanim obnovljivim izvorima energije, što predstavlja ključni korak ka unapređenju pouzdanosti, stabilnosti i ekonomske efikasnosti rada elektroenergetskog sistema. Rad bi mogao da se unapredi i korišćenjem optimalnog proračuna tokova snaga (OPF), gde bi se u obzir uzela optimalna raspodela proizvodnje električne energije, tako da se zadovolji potražnja uz minimalne troškove ili gubitke, pri čemu se poštuju sva tehnička ograničenja sistema.

Literatura

[1] Jozsa, L. *Tokovi snaga u mreži*, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Elektrotehnički fakultet, Osijek, 2009.

[2] Li, Mengyu, Liu, Y., Li, J., Li, F., An, Y, Gao, X. Optimizing sustainable energy integration: A novel approach using concentrated solar plant and hybrid power supply, Electric Power Systems Research, Vol. 237, 111050, 2024. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.111050

[3] Liang, C., ding, C., Zuo, X., Li, J., Guo, Q. Capacity configuration optimization of wind-solar combined power generation system based on improved grasshopper algorithm, Electric Power Systems Research, Vol. 225, 109770, 2023. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2023.109770

[4] Aziz, N.F.A., Rahmat, N.A., Muhammad-Sukki, F., Rahman, T.K.A., Yasin, Z.M., Wahab, N.A., Salim, N.A. A new weak area identification method in power system based on voltage stability, Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC), Vol. 9, No. 2-11, pp. 171-177, 2017.

[5] Ghosh, N., Sharma, S., Bhattacharjee, S. A load flow based approach for optimum allocation of distributed generation units in the distribution network for voltage improvement and loss minimization, International Journal of Computer Applications, Vol. 50, No. 15, pp. 15-17, 2012. https://doi.org/10.5120/7847-1075

[6] Poornazaryan, B., Karimyan, P., Gharehpetian, G. B., Abedi, M. Optimal allocation and sizing of DG units considering voltage stability, losses and load variations, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 79, pp. 42-52, 2016. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2015.12.034

[7] Turitsyn, K., Sulc, P., Backhaus, S., Chertkov, M. Local control of reactive power by distributed photovoltaic generators, in Proc. *2010 first IEEE international conference on smart grid communications*, Gaithersburg, MD, USA, pp. 79-84, 4-6 October 2010. https://doi.org/10.1109/SMARTGRID.2010.5622021

[8] Tonkoski, R., Turcotte, D., El-Fouly, T.H. Impact of high PV penetration on voltage profiles in residential neighborhoods, IEEE Transactions on Sustainable Energy, Vol. 3, No. 3, pp. 518-527, 2012. https://doi.org/10.1109/TSTE.2012.2191425

[9] Acharya, N., Mahat, P., Mithulananthan, N. An analytical approach for DG allocation in primary distribution network, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 28, No. 10, pp. 669-678, 2006. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.02.013

[10] IEEE Power Systems Test Case Archive – IEEE 14 Bus System. https://electricgrids.engr.tamu.edu/electric-grid-test-cases/ieee-14-bus-system/ [pristupljeno 20.02.2026]

[11] DIgsilent, Power system solutions, https://www.digsilent.de/en/downloads.html [pristupljeno 20.02.2026]

Autori

Željana Ristić – diplomirani inženjer elektrotehnike i računarstva Elektrotehnički fakultet, rz253022m@student.etf.bg.ac.rs, ORCID 0009-0009-5284-7995

Mileta Žarković – vanredni profesor, Elektrotehnički fakultet, mileta@etf.bg.ac.rs, ORCID 0000-0001-5855-6595

Analysis of the Impact of Photovoltaic Power Plant Integration on the Power System

Abstract – The increasing integration of photovoltaic power plants introduces new challenges in terms of efficient operation, reliability, and stability of power systems. The optimal placement and sizing of photovoltaic sources play a crucial role in reducing technical losses, improving voltage profiles, and enhancing the overall energy efficiency of the power system. This paper presents a general optimization approach for determining suitable locations and nominal capacities of photovoltaic power plants, using the standard IEEE 14-bus test system, with the aim of improving power system performance under different operating conditions. Various generator dispatch scenarios are considered in order to analyse their impact on system behaviour. Power system performance is evaluated based on multiple criteria, including loss reduction, voltage profile improvement, and enhancement of operational stability, while satisfying all technical constraints. The obtained results indicate that the optimal integration of photovoltaic power plants can significantly contribute to a more efficient and reliable operation of the power system, providing a solid foundation for planning future power systems with a higher share of renewable energy sources.

Index Terms – Photovoltaic power plants, Optimal placement and sizing, Power system optimization, Voltage profile improvement, Power loss reduction, Renewable energy integration

Rad primljen: 12.03.2026., prihvaćen: 18.08.2026.

doi: 10,46793/EEE26-3.58V

Stručni rad
UDK 621.311.243:621.355

Projektovanje i realizacija sistema baterijskog skladišta električne energije snage 500 kW i kapaciteta 1075 kWh

Miodrag Vuković[*], Željko V. Despotović[**], Manojlo Šoškić[***], Stanko Vuković[*]

[*] Conseko d.o.o, Beograd, Srbija
[**] Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu,
[***] Naftna Industrija Srbije –NIS a.d., Novi Sad

Rezime **–** U radu su prikazani projektovanje i realizacija baterijskog skladišta električne energije, tzv. *Battery Energy Storage System* (BESS) snage 500kW i kapaciteta 1075kWh koje predstavlja deo sistema fotonaponske elektrane (FNE) Smederevo snage 3159 kWp (2450kW AC) koji je vlasništvo firme NIS a.d. Novi Sad. Predviđeni sistem baterijskog skladišta sastoji se od pet baterijskih modula pojedinačne snage 100 kW i kapaciteta 215 kWh, čime se postiže ukupan kapacitet litijumskih baterija (LiFePO4) od 1075 kWh. U okviru baterijskog skladišta je predviđen multi-level bidirekcioni energetski pretvarač koji obezbeđuje dvosmerni protok električne energije. Svi predviđeni moduli u sklopu sistema baterijskog skladišta poseduju sledeće sertifikate: CE -EMC, CE -LVD, IEC 62619, IEC 63056, CEI-016, UN 38.3, nCEI-021, što potvrđuje usklađenost sa međunarodnim standardima bezbednosti. Između ostalog, u radu su predstavljeni detalji topologije skladišta i prikaz konfiguracije koja je projektovana i prilagođena FNE Smederevo. Celokupan rad sistema BESS se upravlja putem *Energy Management System* (EMS) kontrolera, koji je u stalnoj komunikaciji sa kontrolerom solarne elektrane, NIS-ovom energetskom platformom za praćenje rada FNE, RTU jedinicom (daljinska stanica EDS-a) i SCADA sistemom operatora sistema.

Ključne reči – baterijsko skladište električne energije, fotonaponske elektrane, balansiranje, baterijski kontroler, energetska elektronika, energetski pretvarači

I UVOD

Intenzivni porast proizvodnje energije iz obnovljivih izvora (prevashodno sunca i vetra) pokrenuo je odgovarajuću potražnju za sistemima za skladištenje energije u baterijama (BESS) tzv. *Battery Energy Storage System*s (BESS). U cilju smanjenja potrošnje fosilnih goriva, novim ciljevima zemalja u vezi sa klimatskim promenama, nižim troškovima baterija i nagli porast proizvodnje solarne i energije vetra, potreba za sistemima za skladištenje nikada nije bila veća. Sistemi koji generišu i skladište energiju sve više postaju standard i većina predstojećih izgradnji skladišta energije sa dvosmernim (tzv. *bidirekcionim*) tokom energije biće prilagođena solarnim i vetroelektranama i koristiće se u slučajevima kada za to postoje zahtevi [1-5].

Energetska industrija je podeljena u tri ključne kategorije: rezidencijalna, komercijalna ili industrijska i komunalna. Principski prikaz ove podele i njena povezanost se obnovljivim izvorima energije (OIE) je dat na blok dijagramu na Slici 1.

Proizvodnja energije iz obnovljivih izvora beleži porast u svim ovim segmentima, što uslovljava povećanu potražnju za skladištenjem električne energije. Na primer, korišćenjem mikro-mreža, domaćinstva i preduzeća su počela da proizvode i skladište solarnu energiju kako bi uštedeli novac i obezbedili rezervno napajanje kada za tim ima potrebe [6]. Takođe, neke zemlje pružaju podsticaje za instaliranje solarnih panela kako bi se smanjilo opterećenje elektroenergetske mreže ili prelazak na električna vozila [7] kako bi se postigli ciljevi neto nulte emisije.

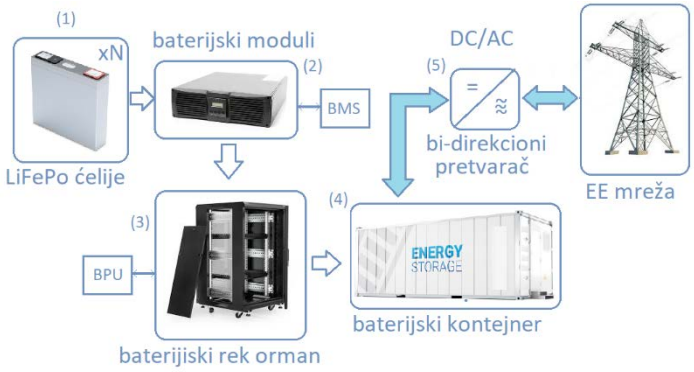
Iz perspektive velikih kompanija iz elektroenergetskog sektora i komunalnih usluga, BESS sistem nudi povećanje kapaciteta i niže troškove jer poseduje uskladištenu energiju dostupnu kada je potražnja velika [8-9]. Za razliku od tradicionalnih oblika proizvodnje, BESS sistemima nije potrebno dugo vreme za uključivanje ili isključivanje. Ova mogućnost je u značajnoj meri poboljšana upotrebom uređaja energetske elektronike i energetskih pretvaračkih sistema koji se razvijaju rapidno. Na ovaj način ovi sistemi nude brzo i pouzdano rešenje za balansiranje električnog sistema po potrebi [4], [9].



Slika 1. Principski blok dijagram tri ključna pravca energetske industrije i njihova povezanost sa OIE

Sistem za skladištenje energije u baterijama je veliki sistem baterija povezan na električnu mrežu. Principska blok šema jednog tipičnog sistema sa litijumskim baterijama kao osnovom

energetskog skladišta je data na Slici 2. Kao što se vidi sa ove slike glavne komponente ovog sistema su: (1) pojedinačne baterijske ćelije (standardno Li-jonske), koje se nalaze u baterijskom sistemu, pretvaraju hemijsku energiju u električnu energiju, (2) baterijski moduli koji se sastoje od ćelija raspoređenih u serijske i paralelne kombinacije; baterijski moduli takođe sadrže sistem za upravljanje baterijama tzv. *Module Battery Managemst System* (MBMS) koji prati i kontroliše rad ovih ćelija, (3) baterijski rek, koji sadrži nekoliko modula povezanih serijski i jedinicu za zaštitu baterije tzv. *Battery Protection Unit* (BPU), u praksi poznatu i kao rek kontroler baterije, (4) kontejner koji sadrži nekoliko rekova u paraleli i može imati dodatne komponente koje pomažu u upravljanju ili kontroli modula unutar kontejnera, (5) DC/AC energetski pretvarač, tzv. *Power Conversion System* (PCS) ili dvosmerni invertor koji pretvara jednosmerni (DC) napon proizveden na baterijama u naizmenični (AC) napon koji se isporučuje elektroenergetskoj mreži ili industrijskim i rezidencijalnim korisnicima. Takođe, ovaj pretvarački sistem puni baterije uzimajući energiju iz elektroenergetske mreže kada je to potrebno. Treba napomenuti da zaštitna jedinica BPU uključuje sistem za upravljanje baterijama (BMS) i prati napon, temperaturu i stanje napunjenosti baterije. Takođe reguliše cikluse punjenja i pražnjenja baterije.



Slika 2. Principski prikaz standardnog BESS

BESS obično sadrži i neke bezbednosne sisteme kao što su sistem za kontrolu požara, detektor dima i sistem za kontrolu temperature ili čak sisteme za hlađenje, grejanje, ventilaciju i klimatizaciju. Šta je uključeno zavisiće od toga šta je potrebno za održavanje bezbednog i efikasnog rada BESS-a.

Sistemi za skladištenje energije u baterijama (BESS) zahtevaju sveobuhvatnu strategiju zaštitnih kola. U okviru BESS-a, glavna područja zahtevnog projektovanja su zaštita od prekomernih struja, struje zemljospojeva, pojave luka i lučnog bljeska i prenaponske zaštite koje u ovim sistemima treba da obezbede zaštitu opreme i sistema od kratkotrajnih prolaznih prenapona.

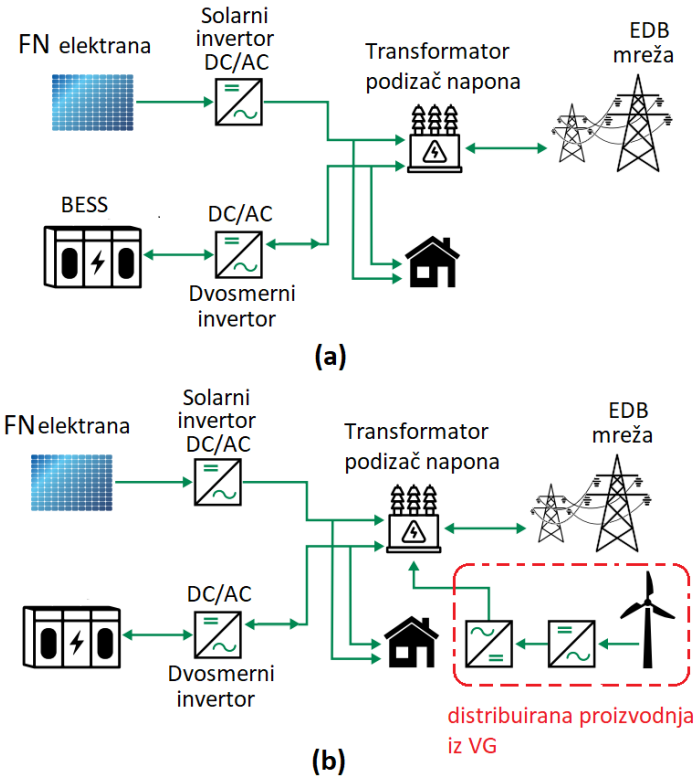
U ovom radu su prikazani rezultati projektovanja i realizacije baterijskog skladišta električne energije-BESS snage 500kW i kapaciteta 1075kWh. Baterijsko postrojenje predstavlja deo sistema u fotonaponske elektrane (FNE) Smederevo snage 3159 kWp (2450kW AC) koji je vlasništvo firme NIS a.d. Novi Sad.

U okviru baterijskog skladišta je predviđen „*multi-level*“ dvosmerni energetski pretvarač koji obezbeđuje dvosmerni protok električne energije. Između ostalog, u radu su predstavljeni detalji topologije skladišta i prikaz konfiguracije koja je projektovana i prilagođena FNE Smederevo.

Projektom je predviđeno da se celokupan rad sistema BESS upravlja putem odgovarajućeg kontrolera, tzv. *Energy Management System* (EMS), za koji je predviđena komunikaciji sa kontrolerom FNE, NIS-ovom energetskom platformom za praćenje rada FNE, zatim sa RTU jedinicom (daljinska stanica EDS-a) i SCADA sistemom operatora sistema.

II Osnovne arhitekture BESS sistema

Postoje dva opšta načina na koja su komponente sistema za skladištenje energije povezane – ili naizmeničnom strujom (AC) ili jednosmernom strujom (DC). Razlika leži u putanji kojom električna energija prolazi nakon što se proizvede. Iako solarni paneli generišu jednosmernu struju, a solarne baterije skladište električnu energiju u jednosmernoj struji, krajnjim korisnicima je potrebna naizmenična električna energija[10]. Stoga, je elektroenergetsko pretvaranje neophodno i postoje različiti načini da se ono ostvari. U nastavku je dat kraći pregled dve osnovne arhitekture i dato kraće poređenje u pogledu prednosti i mana ovih sistema.



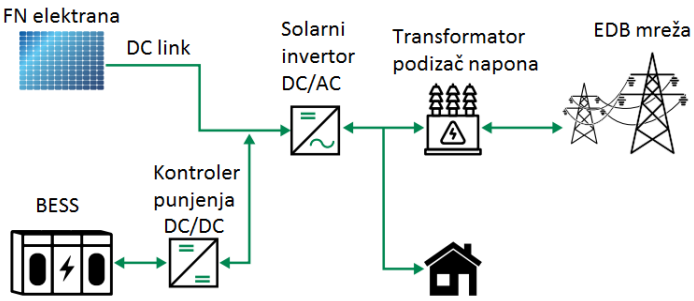
Slika 3. AC spregnuti fotonaponski sistem sa BESS; (a) bez AC distribuirane proizvodnje, (b) sa distribuiranom proizvodnjom na AC strani (vetrogenerator)

AC spregnuti sistem je prikazan na Slici 3. Na Slici 3(a) je prikazan sistem bez distribuirane proizvodnje na AC strani (odsustvo vetrogeneratorskih jedinica), dok je na Slici 3(b) prikazan sistem sa distribuiranom proizvodnjom na AC strani (predstavljenom vetrogeneratorskim sistemom),

Generalno, za oba prethodna slučaja, prikazani sistem na Slici 3, (koga čine FNE + BESS) sadrži dva DC/AC invertorska pretvarača: fotonaponski i bi-direkcioni (dvosmerni), pri čemu je ovaj drugi u kombinaciji sa baterijskim skladištem-BESS. Ovaj sistem nudi relativno visoku fleksibilnost, jednostavnu instalaciju, naročito za naknadne tzv. *retrofitne ugradnje*, odnosno idealan je za rekonstrukcije.

Naročito je ova arhitektura isplativa ako već postoji fotonaponski sistem. Takođe se može zadržati mrežni invertor u cilju uštede troškova. Sistem je manje efikasan jer se energija koju koriste baterije više puta konvertuje. Svaki nivo konverzije stvara i više gubitaka u sistemu. Tendencija proizvođača invertora je razvoj ovih modula sa visokim stepenom iskorišćenja (standardno iznad 96%).

Na Slici 4 je prikazana arhitektura DC spregnutog fotonaponskog sistema. Ovaj sistem je baziran na jednom invertoru za napajanje opterećenja, što je povoljno sa finansijskog aspekta (DC/DC kontroler punjenja je jeftiniji od invertora).



Slika 4. DC spregnuti fotonaponski sistem sa BESS

Manji broj DC/AC pretvarača (invertora) smanjuje troškove eksploatacije i održavanja. U ovom sistemu su iz ovog razloga manji gubici energije. Kraće kablovske trase između FNE i BESS doprinose smanjenju gubitaka. Ova arhitektura nije primerena za *retrofitne* sisteme (sisteme za rekonstrukciju). Potrebna je zamena postojećeg invertora, a u mnogim slučajevima je potrebno ostvariti rekonfiguraciju ožičenja fotonaponskih nizova, a i dobija se složenija instalacija sa postojećim fotonaponskim sistemom.

III Tehnički opis projektovanog BESS u sklopu FNE

U ovom poglavlju je dat opšti opis tehničkog rešenja baterijskog skladišta električne energije (BESS). Uz solarnu elektranu na istoj građevinskoj parceli, predviđeno je postavljanje baterijskog skladišta električne energije nazivne snage 500 kW i ukupnog skladišnog kapaciteta 1075 kWh. Sistem BESS je definisan na osnovu tehničkog zadatka Naručioca-NIS a.d. za nabavku, montažu i puštanje u rad baterijskog skladišta po principu „ključ u ruke“, kao podrške optimalnom radu solarne elektrane FNE Smederevo, instalisane snage 3118.5 kWp (2475 kW AC).

Na Slici 5 je prikazana topologija sistema BESS, 500kW/1075kWh.

Predviđeni sistem skladišta sastoji se od pet baterijskih modula tipa FLEX 215 AIO, pojedinačne snage 100 kW i kapaciteta 215 kWh, čime se postiže ukupan kapacitet od 1075 kWh, a izlazna snaga BESS sistema odgovara snazi mrežnog transformatora prividne snage od 500 kVA.

Svaki modul je smešten u samostalni čelični orman dimenzija 160 cm × 114 cm × 224 cm, sa stepenom zaštite IP55. Baterijski moduli su bazirani na litijum-gvožđe-fosfatnim ($LiFePO_4$) ćelijama.

Pored baterijskih modula, sistem obuhvata i energetski transformator nominalne snage 500 kVA, naponskog odnosa 400 V/800 V, frekvencije 50 Hz, sa spregom zvezda–zvezda Yy0. Transformator služi za prilagođavanje napona BESS modula na naponski nivo FNE i nalazi se u samostalnom kontejneru neposredno pored BESS modula.

Baterijsko skladište se fizički smešta u neposrednoj blizini kontejnerske transformatorske stanice FNE, na delu slobodne površine u okviru definisane građevinske parcele, u skladu sa ograničenjima infrastrukturnih koridora (gasovod, produktovod i sl.).

Svi moduli i oprema BESS sistema predviđeni u projektovano rešenje FNE biće priključeni na sabirnice 800 V u okviru transformatorske stanice 0,8 kV/10 kV, preko trofaznog energetskog transformatora 0,4kV /0,8kV, 50Hz.

Celokupan rad BESS sistema se upravlja putem EMS (*Energy Management System*) kontrolera proizvodnje Eniris (*SmartgridOne*), koji je u stalnoj komunikaciji sa:

- kontrolerom solarne elektrane,
- RTU jedinicom (daljinska stanica EDS), i
- SCADA sistemom operatora sistema.

EMS omogućava konfigurisanje više režima rada skladišta (punjenje/pražnjenje, kontrola snage i frekvencije, korekcija faktora snage), kao i prilagođavanje dinamičkom radu FNE i potrebama elektrodistributivne (EDB) mreže.

IV Tehnički opis baterijskog sistema

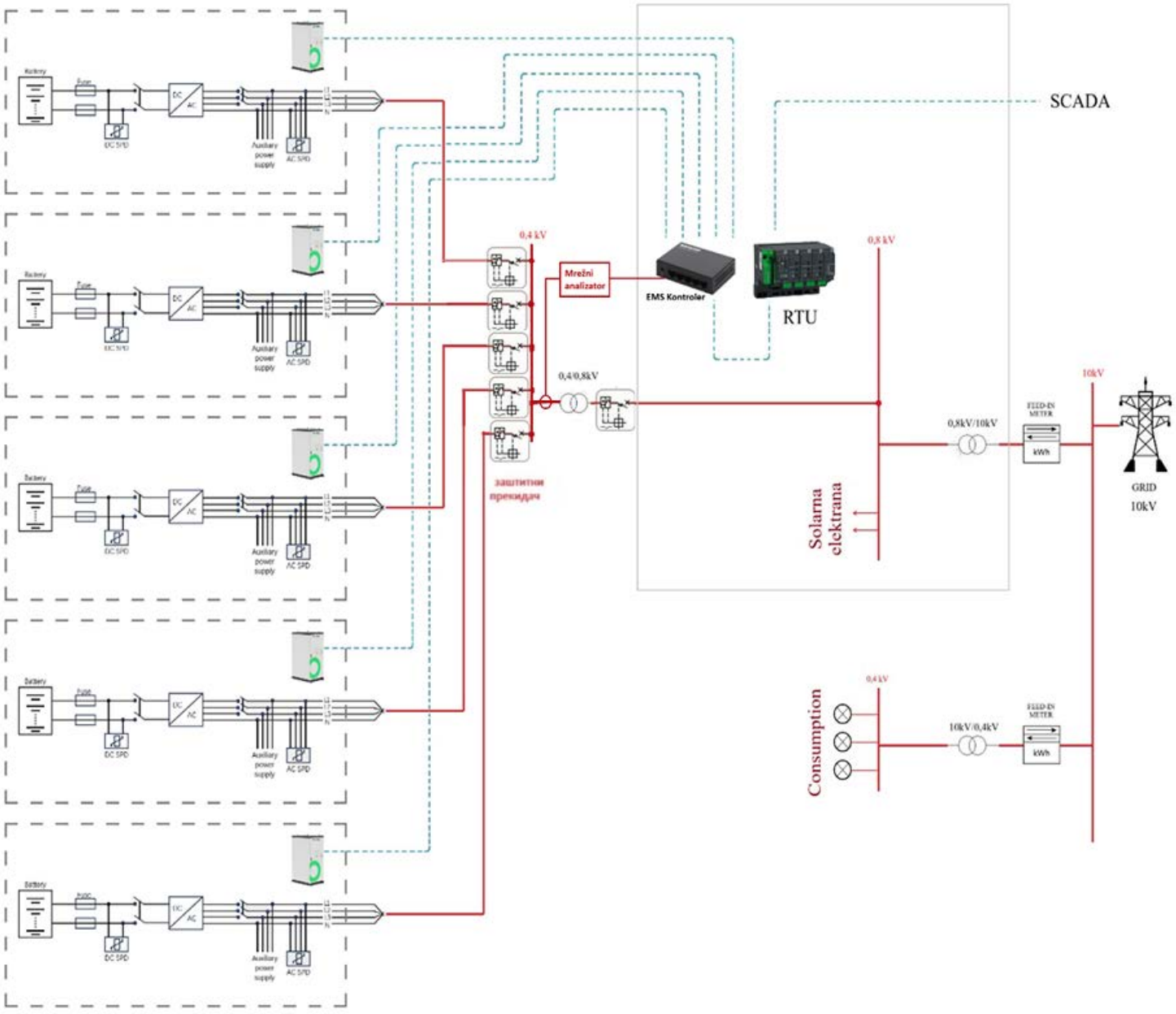
Baterijski moduli su povezani serijski i kombinovani su u rekovima. Serijska veza rezultuje višim naponom sistema. Paralelna veza nekoliko rekova povećava performanse i kapacitet skladištenja. Trofazni energetski pretvarač vrši dvosmernu konverziju energije (DC←→AC) i pored same baterije, presudan je za protok snage i performanse. Na Slici 6 je prikazan izgled projektovanog baterijskog rek ormana[13-14].

Svaki baterijski modul sadrži sledeće komponente:

- $LiFePO_4$ baterijske ćelije, kapaciteta 280 Ah, povezane u seriju od 15 jedinica u jedan visokonaponski string (800 Vdc),
- PCS (*Power Conversion System*) – dvosmerni AC/DC i DC/AC pretvarač koji omogućava punjenje i pražnjenje baterija,
- BMS (*Battery Management System*) – sistem za nadzor i upravljanje radom baterija, uključujući kontrolu napona, struje, temperature i statusa napunjenosti baterijskih modula,
- GPC (*Grid Power Control*) modul – komponenta za upravljanje energetskom interakcijom sa mrežom, odgovoran za stabilnost i usklađenost sa zahtevima mreže,
- Dvopolni i trofazni zaštitni prekidači sa zaštitom od

preopterećenja i kratkih spojeva na AC i DC stranama,
- FSS (*Fire Suppression System*) – automatizovani sistem za otkrivanje i gašenje požara pomoću aerosola unutar svakog ormana, aktiviran senzorima dima i temperature,
- Klima uređaj – sistem za kontrolu temperature u ormanu, sa vazdušnim hlađenjem.

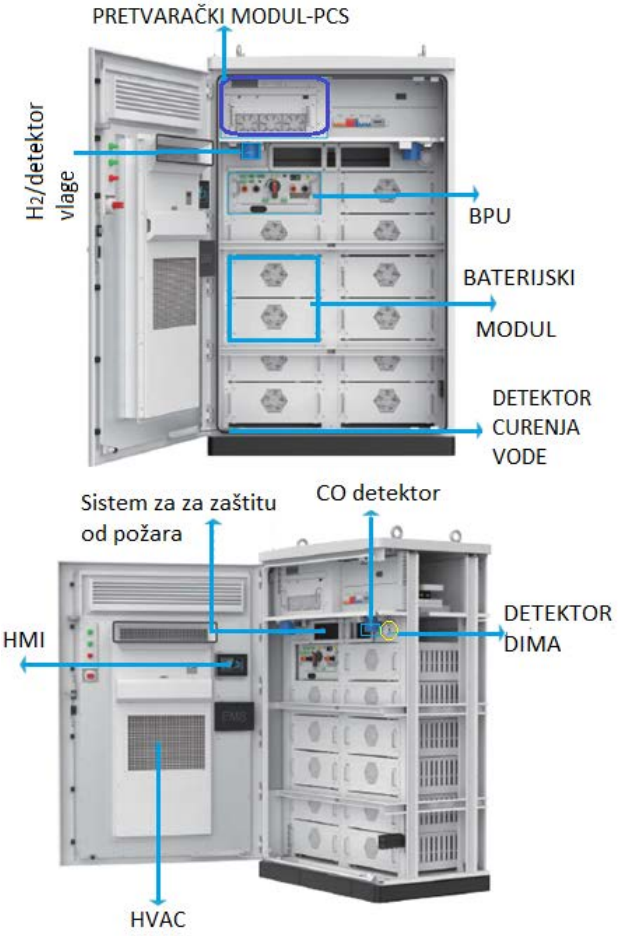
Svi projektovani moduli poseduju sledeće sertifikate: CE -EMC, CE -LVD, IEC 62619, IEC 63056, CEI-016, UN 38.3, CEI-021, što potvrđuje usklađenost sa međunarodnim standardima bezbednosti.



Slika 5. Topologija projektovanog BESS 500kW/1075 kWh, povezivanje na EEM i komunikacione veze u sistemu

Svaki baterijski modul kapaciteta 100 kW/215 kWh priključuje se na niskonaponsku sabirnicu napona 400 V preko kablova tipa XP00 4×95 mm², 1 kV, Cu koji se polažu u podzemne kablovske kanale u zaštitnoj PVC ili PEH cevi. Na strani transformatora, svaki od ovih vodova zaštićen je četvoropolnim kompakt prekidačem nazivne struje 200 A, a maksimalne radne struje 160 A, kao što je prikazano na Slici 5.

Svaka baterijska jedinica poseduje sopstveni dvosmerni energetski pretvarač (PCS – *Power Conversion System*), koji konvertuje jednosmernu struju u naizmeničnu (DC/AC) prilikom pražnjenja (invertorski režim), odnosno naizmeničnu u jednosmernu (AC/DC) prilikom punjenja (ispravljački režim). Kao ključna komponenta za upravljanje protokom energije, PCS ima presudnu ulogu u performansama i efikasnosti sistema.



Slika 6. Prikaz projektovanog rek ormana BESS[13-14]

Izlazni AC napon svakog PCS-a je 400 V, 50 Hz. Izlaz svih pet PCS jedinica paralelno se povezuje na niskonaponske sabirnice (0,4 kV), smeštene u ormanu energetskog transformatora 400 V/ 800 V, snage 500 kVA. Taj transformator služi za prilagođavanje naizmeničnog napona baterijskog sistema sa 400 V na 800 V, što je napon na koji je priključen srednjenaponski transformator 0,8 kV /10 kV u trafo-stanici solarne elektrane.

Na izlaznoj strani energetskog transformatora (sekundar 800 V), predviđena je zaštita priključnih kablova BESS-a tropolnim kompakt prekidačem sa prekostrujnom zaštitom nominalne struje 400 A, pri nazivnom naponu 800 V i frekvenciji 50 Hz.

BESS sistem je preko kablova XP00 1x240 mm², 1kV, Cu povezan sa sabirnicom 800 V na primarnoj strani transformatora 0,8 kV/10 kV. Na toj sabirnici se nalazi i priključak solarne elektrane snage 2475 kW, tako da su BESS i FNE direktno povezani paralelno na istu tačku u elektroenergetskom sistemu. Ovakva konfiguracija omogućava efikasnu razmenu energije i fleksibilno upravljanje energetskim tokovima preko EMS sistema.

Na Slici 7 je prikazan prednji izgled desnog dela baterijskog modula sa PCS i AC instalacijama. Na prednjem panelu se vide uređaji sa zaštitama i glavni prekidač. Treba napomenuti da su QF2 i QF3 su upareni preko „interlock“ zaštite.



Slika 7. Prikaz prednjeg izgleda baterijskog modula sa AC zaštitama (1) Glavni prekidač QF1 za AC vezu, (2) SCB1 automatski prekidač za odvodnik prenapona, (3) QF2 prekidač za napajanje sopstvene potrošnje (klime, BMS, osvetljenje i dr.), (4) SCB2 automatski za odvodnik prenapona sopstvene potrošnje, (5) QF3 kao rezerva i nije povezan sa bilo kojim instalacijama.

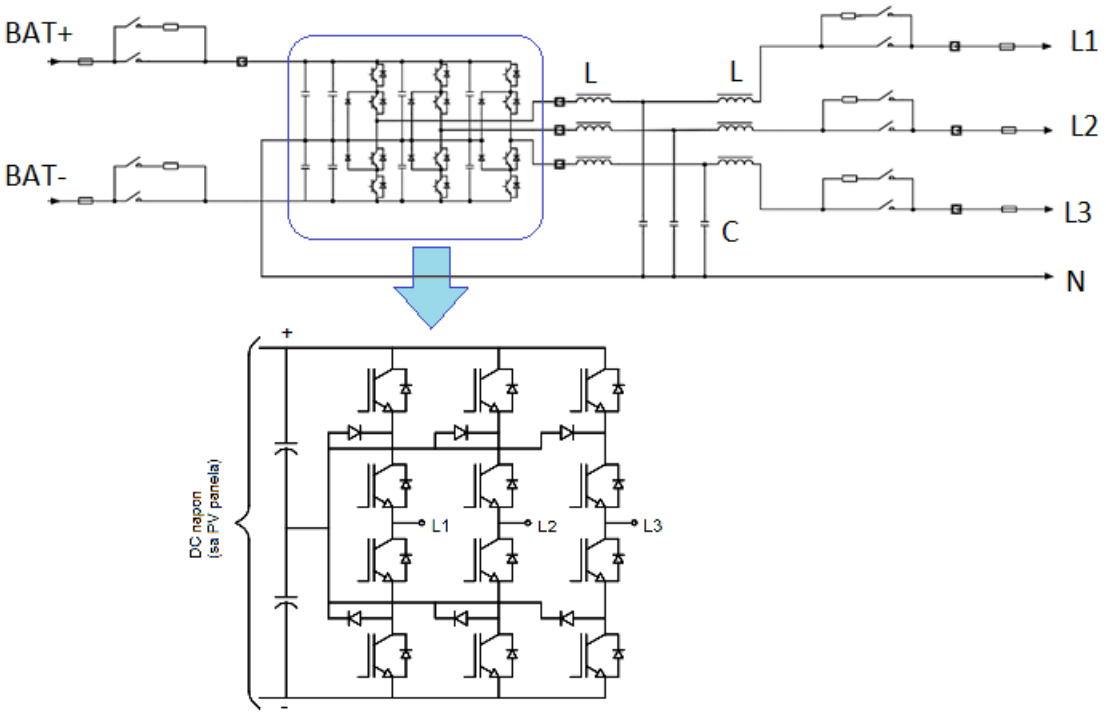
V BIDIREKCIONI ENERGETSKI PRETVARAČ

Energetski pretvarač u sistemu za skladištenje energije, tzv. PCS (*Power Conversion System*), kao što pokazuje Slika 8, je baziran IGBT topologiji sa tri nivoa i fiksiranom neutralnom tačkim (tzv. *„three-level neutral point clamped“*-3L NPC topologija) i može da kontroliše proces punjenja i pražnjenja baterije i da konvertuje naizmenični (AC) napon u jednosmerni (DC) i obrnuto. PCS se dakle sastoji od dvosmernog AC/DC konvertora, LCL filtra, drajvera za pobudu IGBT tranzistora i pripadajuće kontrolne jedinice. PCS kontrolna jedinica prima kontrolne instrukcije preko komunikacionog interfejsa, puni ili prazni bateriju i podešava aktivnu snagu i reaktivnu snagu na izlazu pretvarača.

PCS kontrolna jedinica energetskog pretvarača za skladištenje energije komunicira sa BMS-om preko CAN interfejsa kako bi dobila informacije o statusu baterije, ostvarila zaštitno punjenje i pražnjenje baterije i osigurala bezbedan rad baterije. Istovremeno, PCS komunicira sa sistemom za upravljanje energijom EMS preko RS485 interfejsa kako bi ostvarila smanjenje vršnih napajanja i popunjavanje „propada“, regulaciju vršnih napajanja i frekventnu regulaciju, virtuelno povećanje kapaciteta i rezervno *Off-grid* napajanje.

Energetski pretvarač za skladištenje energije takođe podržava više režima punjenja i pražnjenja kao što su režimi: konstantni napon, konstantna struja i *„floating“* punjenje.

Osnovne tehničke karakteristike IGBT pretvarača sa tri nivoa (jednog PCS modula) prema AC mrežnoj strani su: izlazni napon 3x230 V, 400 V, 50 Hz (+15%/-10%), nominalna izlazna snaga 105 kW, maksimalna izlazna snaga 116 kW, maksimalna izlazna struja 170 A, faktor snage ≥0,98, faktor izobličenja izlazne struje pri nominalnoj snazi THDi ≤3%, DC komponenta inherentno sadržana u izlaznoj struji ≤0,5%.



Slika 8. Prikaz topologije bidirekcionog energetskog pretvarača sa AC zaštitama

Tehničke karakteristike na DC strani: opseg radnog napona je u opsegu 615–950 Vdc, maksimalna snaga i struja u režimu kada dvosmerni pretvarač radi kao punjač su 105kW i 170A, respektivno.

Dvosmerni energetski pretvarač je sertifikovan prema sledećim normama: TUV CE-EMC EN 61000-6-2:2019; EN 61000-6-4:2019, TUV CE-LVD EN 62477-1, TUV EN50549-1.

Prikazana 3L NPC na Slici 8 se odlikuje relativno visokom efikasnošću na prekidačkoj učestanosti (tipično 10kHz-20kHz), relativno jednostavnom kontrolom, redukovanim brojem DC izvora. Ova topologija je podesna za „*fault-tolerant*“ primene strujne regulacije. Upotreba neutralnih spregnutih dioda može rešiti pitanje balansiranja napona i neujednačenih gubitaka i napona između IGBT prekidača i neutralne tačke [11-12].

Mane ove topologije su kompleksnost kola za balansiranje napona, nejednaka raspodela gubitaka između IGBT prekidača na donjoj i gornjoj strani polumosta, kao i porast broja primenjenih dioda sa porastom nivoa invertora (za nivoe > 3).

U Tabeli 1 su dati pregledno prekidački statusi prekidačkih elemenata (IGBT prekidača i dioda) za jednu fazu topologije invertora sa tri nivoa (jedna vertikala trofaznog 3L NPC mosta) koja je data na Slici 9. Posmatrani su prekidači Q1-Q4 i diode D1-D2.

Tabela 1. Prekidački statusi za topologiju 3L NPC

IGBT	$V_{out}=+V_{dc}/2$	$V_{out}= V_N=$ ref 0	$V_{out}= -V_{dc}/2$
Q1	ON	OFF	OFF
Q2	ON	ON	OFF
Q3	OFF	ON	ON
Q4	OFF	OFF	ON

Na Slici 9 su prikazane sekvence uključivanja prekidačkih elementa (IGBT prekidača i NPC dioda) u skladu sa statusima koji su prikazani u Tabeli 1. Prikazane sekvence uključenja se odnose na jednu fazu trofaznog izlaza dvosmernog invertora (vertikala 1 IGBT invertorskog trofaznog mosta).

Na Slici 10 su dati karakteristični talasni oblici napona za ovu topologiju. Na Slici 10(a) su prikazani talasni oblici faznih napona V_{L1-N}, V_{L2-N}, V_{L3-N} u odnosu na neutralnu tačku N u DC-međukolu dvosmernog invertora, dok su na Slici 10(b) prikazani talasni oblici međufaznih napona V_{L1-L2}, V_{L1-L3}, V_{L2-L3}..

VI NAČIN RADA BESS

Sistem baterijskog skladišta električne energije (BESS) je direktno povezan na elektroenergetski sistem FNE, sa ciljem optimizacije korišćenja proizvedene energije, stabilizacije rada mreže i omogućavanja različitih režima eksploatacije.

BESS sistem omogućava rad u više operativnih režima, u zavisnosti od potreba elektrane i zahteva distributivnog sistema.

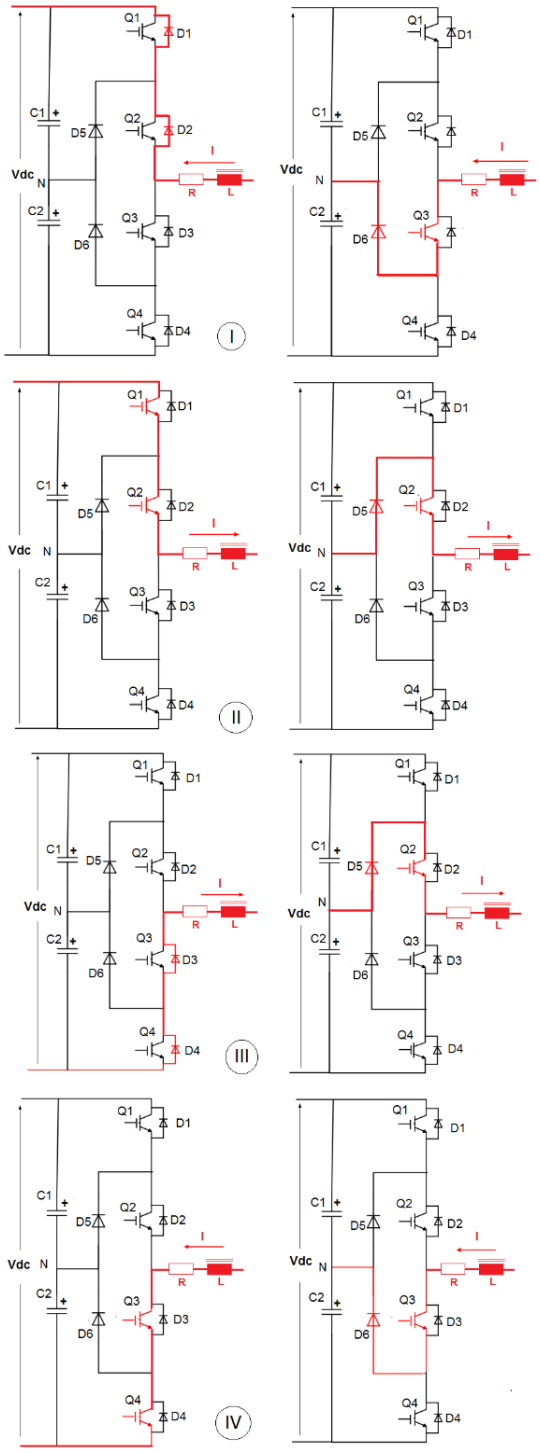
Punjenje baterija (režim AC/DC) - ispravljački režim je predviđen isključivo iz proizvodnje solarne elektrane. Energija se posredstvom opisanog 3L NPC pretvarača usmerava ka baterijama u periodu kada je proizvodnja FNE veća od trenutne potrošnje ili kada je potrebno „skladištiti“ višak energije za kasniju upotrebu.

Pražnjenje baterija (režim DC/AC) - invertorski režim je omogućen u nekoliko režima, kao što su:

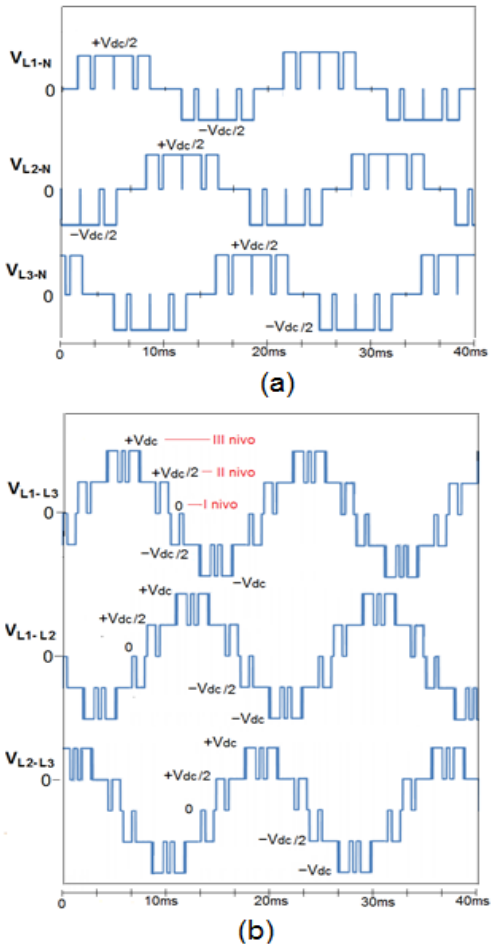
- *Renewable Power Arbitrage* – isporuka energije u mrežu u trenucima kad je to najisplativije,
- *Power Factor Correction* – održavanja faktora snage u dozvoljenim granicama (korekcija faktora snage),

- *Capacity Compensation* – kompenzacija kapaciteta,
- *Frequency Regulation* – održavanje frekvencije mreže u stabilnim granicama (npr. punjenje kada je frekvencija > 50 Hz, pražnjenje kada je < 50 Hz).

Radom sistema upravlja EMS kontroler (*Energy Management System*), koji je u komunikaciji sa kontrolerom FNE i RTU jedinicom (daljinskom stanicom). EMS obezbeđuje rad po zadatom režimu i komunikaciju sa SCADA sistemom.



Slika 9. Sekvence I,II,III i IV uključenja prekidačkih elemenata (dioda i IGBT prekidača) za induktivno opterećenje [11-12]



Slika 10. Talasni oblici i spektri harmonika faznih napona i jednog međufaznog napona za topologiju invertora sa tri nivoa (3L NPC); (a) talasni oblici tri fazna napona, (b) talasni oblici tri međufazna napona [11-12]

Sistem zaštite

BESS je opremljen sa više nivoa zaštita počev od pojedinačnih komponenti do celokupnog sistema. Zaštite se realizuju unutar svakog modula, u ormanima za priključenje i na nivou priključka ka elektroenergetskom sistemu.

Unutar svakog FLEX 215 AIO modula predviđene su sledeće zaštite:

- prekostrujna i kratkospojna zaštita na DC strani koja je realizovana automatskim dvopolnim zaštitnim prekidačima,
- prekostrujna i kratkospojna zaštita na AC strani koja je realizovana tropolnim prekidačima sa termičkim magnetnim okidačem,
- zaštita od prenapona sa ugrađenim odvodnicima prenapona na AC i DC stranama,
- termička zaštita je bazirana na temperaturnim senzorima koji nadgledaju radne uslove, uz mogućnost automatskog isključenja u slučaju prelaska graničnih vrednosti,
- protivpožarna zaštita (*Fire Suppression System-FSS*) je bazirana na automatskom sistemom za detekciju i gašenje požara pomoću aerosolne gasne supresije, a aktiviranje sistema se bazira na senzorima dima i temperature,

- BMS (Battery Management System), obezbeđuje neprekidan nadzor nad naponima, strujama i temperaturom pojedinačnih ćelija i kompletnog baterijskog reka.

Sistem komunikacija

Svi uređaji u sistemu su povezani preko integrisane komunikacione mreže, koja omogućava kontrolu, nadzor i prikupljanje podataka u realnom vremenu. Komunikacija se realizuje putem Modbus TCP/IP protokola. Ključne komponente komunikacione arhitekture:

- EMS kontroler (*Eniris SmartgridOne*), koji predstavlja centralnu upravljačku jedinicu BESS-a. Obezbeđuje rad po definisanim režimima, kao i prijem i izvršenje komandi sa SCADA sistema,
- SCADA interfejs omogućava daljinski nadzor, upravljanje i evidenciju parametara rada preko RTU jedinice,
- RTU (daljinska stanica EDS) uspostavlja komunikaciju između BESS sistema, kontrolera FNE i distributivnog sistema,
- komunikacioni orman u transformatorskoj stanici sadrži glavni mrežni *switch* preko koga se povezuju EMS, RTU i kontroler solarne elektrane.

Ovakva komunikaciona arhitektura omogućava BESS sistemu da u realnom vremenu reaguje na uslove u mreži, koordiniše rad sa FNE i ispunjava tehničke zahteve operatera sistema.

U pogledu komunikacija između daljinske stanice i predviđenog EMS kontrolera, kao i kontrolera za FNE, predviđeno je povezivanje ovih uređaja na zajedničkom *switch*-u, gde će se komunikacija sa kontrolerom solarne elektrane, kao i RTU, odvijati putem Modbus TCP/IP protokola.

Unutar transformatorske stanice 0,8 kV/10 kV predviđen je komunikacioni rek za glavni komunikacioni *switch* u okviru transformatorske stanice, a koji bi kao čvorište za komunikaciju RTU (smešten kod ormana mernog mesta), kontroler elektrane i kontroler BESS sistema.

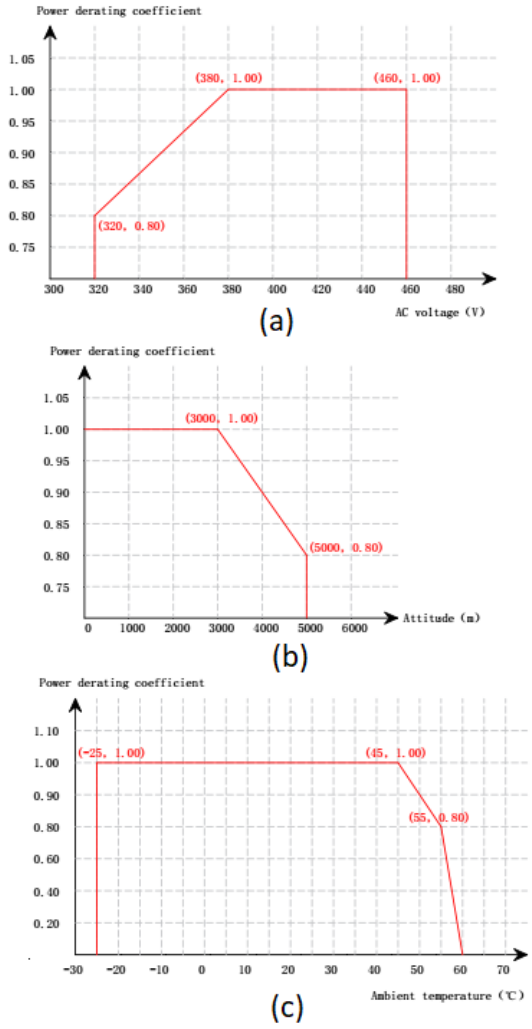
VII VERIFIKACIJA PERFORMANSI BESS

U ovom poglavlju su dati rezultati verifikacije performansi BESS koje su bile ključne u projektovanju i i izboru elektroenergetske opreme.

Na Slici 11 su prikazane krive korekcionog koeficijenta snage (*Power Derating Factor - PDF*) dvosmernog energetskog pretvarača PCS u zavisnosti od naizmeničnog napona, nadmorske visine i temperature okoline.

PCS u sklopu BESS radi punom snagom i punom strujom do određenog mrežnog napona, maksimalne temperature okoline ili čak i nadmorske visine. Kada mrežni napon i (ili) temperatura okoline pređu granične vrednosti oni nastavljaju da rade sa smanjenim nominalnim vrednostima kako bi sprečili oštećenje poluprovodničkih i mehaničkih komponenti. Slično važi i za nadmorsku visinu, pogotovu za nadmorske visine iznad 3000m.

Sa prikazanog dijagrama na Slici 11(a) se uočava da je u opsegu naizmeničnog napona 380–460 Vac koeficijent K_{pdfV}=1. U najnepovoljnijem slučaju za naizmenični napon 320 Vac ovaj faktor ima minimalnu vrednost K_{pdf_min} = 0,8. Na Slici 11(b) je prikazana zavisnost koeficijenta PDF u funkciji nadmorske visine. Do 3000 m se ne uzima korekcija snage, ali iznad tih vrednosti, na primer za nadmorsku visinu 4000m korekcioni koeficijent je 0,9. Na Slici 11(c) je dat prikaz korekcionog koeficijenta snage u funkciji ambijentalne temperature. U opsegu -25–45°C korekcioni faktor K_{pdfT} =1, dok za temperature iznad +45°C ovaj koeficijent opada. Tako na primer za +55 °C (gornja granična temperatura) ovaj koeficijent iznosi 0,8.

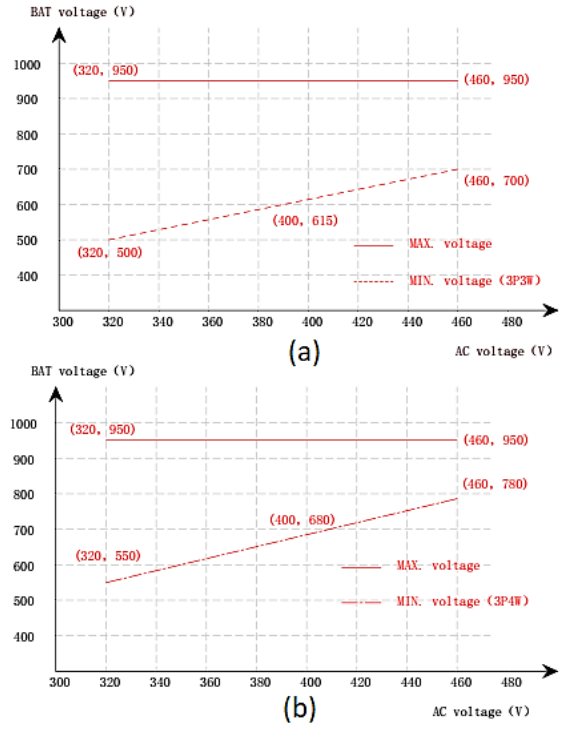


Slika 11. Krive koeficijenta snage PDF za PCS; (a) u funkciji naizmeničnog napona, (b) u funkciji nadmorske visine, (c) u funkciji temperature okoline [15]

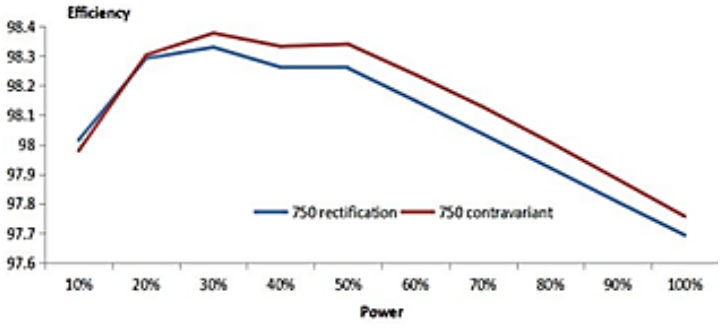
Slika 12 prikazuje krive opsega napona baterije koje odgovaraju različitim AC naponima za PCS modul u trofaznom trožičnom sistemu-3P3W i trofaznom četvorožičnom sistemu-3P4W situacijama. Grafik promene napona baterije u zavisnosti od AC napona za trofazni trožični sistem je prikazan na Slici 12(a). Uočava se da je pri maksimalnom AC naponu u opsegu 320Vac-460Vac, DC maksimalni baterijski napon 950Vdc. Za minimalni napon u 3P3W sistemu i za mrežni napona 320Vac baterijski napon je 500Vdc, dok je za 460Vac baterijski naponn 700Vdc. Slično važi i za trofazni četvorožični sistem -3P4W, za koga su prikazane karakteristike na Slici 12(b), kod koga se vidi da je

opseg DC napona 550Vdc-780Vdc, dok je njegova maksimalna vrednost 950Vdc.

Na Slici 13 je predstavljen dijagram efikasnosti PCS modula (dvosmernog IGBT pretvarača) u zavisnosti od snage, a za vrednosti DC napona 750Vdc u režimu ispravljača AC/DC (plavi dijagram) i u invertorskom režimu DC/AC (crveni dijagram). Dijagram je dobijen merenjem za trofazno ožičenje sa četiri provodnika 3P4W, koje je primenjeno i u ovom projektu. Uočava se da je najveći stepen iskorišćenja najveći u opsegu snaga 20–50% od nominalne i njegove vrednosti su oko 98,3–98,4%. Takođe se može uočiti da je efikasnost neznatno veća (0.1%-0.2%) u invertorskom režimu u odnosu na ispravljački režim. Efikasnost pri punoj snazi je oko 97,7–97,8%.



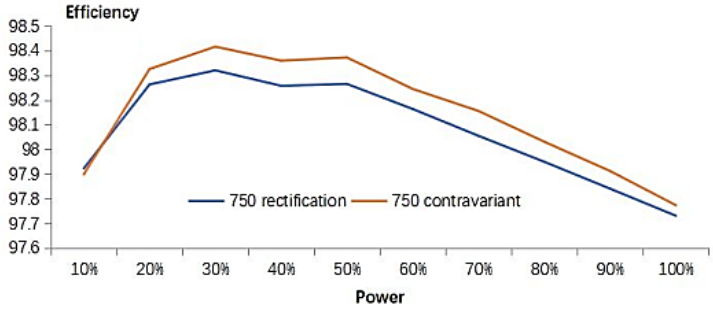
Slika 12. Krive opsega promena napona baterije u BESS za dve konfiguracija AC mrežnog napona; (a) trofazni trožični sistem 3P3W, (b) za trofazni četvorožični sistem 3P4W[15]



Slika 13. Efikasnost PCS modula za slučaj AC/DC i DC/AC režima rada i 3P4W sistem ožičenja [15]

Slika 14 prikazuje dijagram efikasnosti PCS modula (dvosmernog IGBT pretvarača) u zavisnosti od snage, a za vrednosti DC napona 750 Vdc u režimu ispravljača AC/DC (plavi dijagram) i u invertorskom režimu DC/AC (crveni dijagram). Dijagram je meren za trofazno ožičenje sa tri provodnika -3P3W. Uočava se da je najveći stepen iskorišćenja najveći u opsegu snaga 20–50% od nominalne. Efikasnost pri punoj snazi 100% je oko 97,7–97,8%.

U ovom slučaju nešto je veća razlika stepena iskorišćenja za AC/DC i DC/AC režim. Njena vrednost se kreće od 0,2–0,4%.



Slika 14. Efikasnost PCS modula za slučaj AC/DC i DC/AC režima rada i 3P3W sistem ožičenja[15]

Analiza ukupnog harmonijskog izobličenja struje THDi

U okviru ovog projekta izvršena je analiza ukupnog harmonijskog izobličenja struje (THDi – *Total Harmonic Distortion*) za BESS, koje se priključuje na niskonaponsku stranu TS 0,4/0,8 kV. Pri ovoj analizi je pretpostavljeno da je na sabirnice 0,8 kV, 50Hz priključen isključivo baterijski sistem BESS 500kW i nije razmatran uticaj harmonika koji potiču iz FNE koja je preko solarnih invertora priključena na sabirnice 0,8 kV, 50Hz.

Baterijsko skladište koje čini 5 zasebnih baterijskih sistema je izvedeno preko dvosmernog pretvarača – PCS proizvođača POWEROAD nominalne snage 100 kW, ukupno 500 kW, koji omogućava razmenu energije između DC sabirnice i AC mreže.

U radu invertora u sklopu dvosmernog pretvarača javljaju se viši harmonici struje usled impulsnog (PWM) upravljanja, pa je potrebno izvršiti procenu i proračun ukupnog harmonijskog izobličenja. Ukupno harmonijsko izobličenje je izračunato uz uvažavanje svih pet baterijskih sistema zajedno. Metodologija proračuna *THD*i je bazirana na relaciji:

$$THD_I = \sqrt{\frac{I_2^2+I_3^2+I_4^2+\cdots+I_n^2}{I_1^2}} \cdot 100\% \qquad (1)$$

gde su:

- I_1 – efektivna vrednost osnovne (fundamentalne) komponente struje (na učestanosti 50 Hz),
- $I_2, I_3, \ldots, I_n$ – efektivne vrednosti viših harmonika do n-tog reda.

Proračun je izvršen na osnovu mernih podataka proizvođača invertora i rezultata simulacije u softveru za analizu kvaliteta električne energije.

U analizi su razmatrani harmonici do 50. reda (tj. do učestanosti 2500 Hz). U okviru projekta su za svaku od faza L1, L2, L3 u Tabeli 2 prikazane, a potom toga i analizirane vrednosti pojedinačnih harmonika struja, njihove kvadratne vrednosti kao i

procentualni udeo svakog od harmonika u odnosu na nominalnu struju invertora od 151 A.

Za sistem baterijskog skladišta BESS 500 kW proizvođača POWEROAD pregledno su prikazani rezultati testiranja za svaku od fazu invertora (L1, L2, L3) na grafikonima na Slici 15. Testovi su dobijeni u invertorskom režimu, odnosno režimu pražnjenja baterijskog skladišta i pri nominalnoj faznoj struji od 151A, odnosno pri opterećenju na AC strani od 100% Pn.

Tabela 2. Tabelarni prikaz merenja harmonijskog sastava AC napona BESS

	Faza L1				Faza L2				Faza L3			
No	In [A]	In^2 [A^2]	[%]		In [A]	In^2 [A^2]	[%]		In [A]	In^2 [A^2]	[%]	
3	1.5	2.25	0.9934	1.4901	1.5	2.25	0.9934	1.4901	1.5	2.25	0.9934	1.4901
4	0.242	0.0586	0.1603	0.1603	0.188	0.0353	0.1245	0.1245	0.087	0.0076	0.0576	0.0576
5	0.356	0.1267	0.2358	0.2358	0.29	0.0841	0.1921	0.1921	0.207	0.0428	0.1371	0.1371
6	0.108	0.0117	0.0715	0.0715	0.132	0.0174	0.0874	0.0874	0.119	0.0142	0.0788	0.0788
7	0.456	0.2079	0.302	0.302	0.25	0.0625	0.1656	0.1656	0.578	0.3341	0.3828	0.3828
8	0.099	0.0098	0.0656	0.0656	0.09	0.0081	0.0596	0.0596	0.093	0.0086	0.0616	0.0616
9	0.429	0.184	0.2841	0.2841	0.29	0.0841	0.1921	0.1921	0.388	0.1505	0.257	0.257
10	0.089	0.0079	0.0589	0.0589	0.084	0.0071	0.0556	0.0556	0.085	0.0072	0.0563	0.0563
11	0.905	0.819	0.5993	0.5993	0.914	0.8354	0.6053	0.6053	0.879	0.7726	0.5821	0.5821
12	0.098	0.0096	0.0649	0.0649	0.099	0.0098	0.0656	0.0656	0.083	0.0069	0.055	0.055
13	0.632	0.3994	0.4185	0.4185	0.611	0.3733	0.4046	0.4046	0.653	0.4264	0.4325	0.4325
14	0.065	0.0042	0.043	0.043	0.071	0.005	0.047	0.047	0.064	0.0041	0.0424	0.0424
15	0.434	0.1884	0.2874	0.2874	0.433	0.1875	0.2868	0.2868	0.433	0.1875	0.2868	0.2868
16	0.062	0.0038	0.0411	0.0411	0.073	0.0053	0.0483	0.0483	0.066	0.0044	0.0437	0.0437
17	0.406	0.1648	0.2689	0.2689	0.42	0.1764	0.2781	0.2781	0.367	0.1347	0.243	0.243
18	0.093	0.0086	0.0616	0.0616	0.084	0.0071	0.0556	0.0556	0.081	0.0066	0.0536	0.0536
19	0.292	0.0853	0.1934	0.1934	0.314	0.0986	0.2079	0.2079	0.349	0.1218	0.2311	0.2311
20	0.063	0.004	0.0417	0.0417	0.068	0.0046	0.045	0.045	0.08	0.0064	0.053	0.053
21	0.168	0.0282	0.1113	0.1113	0.208	0.0433	0.1377	0.1377	0.22	0.0484	0.1457	0.1457
22	0.075	0.0056	0.0497	0.0497	0.092	0.0085	0.0609	0.0609	0.066	0.0044	0.0437	0.0437
23	0.15	0.0225	0.0993	0.0993	0.151	0.0228	0.1	0.1	0.153	0.0234	0.1013	0.1013
24	0.263	0.0692	0.1742	0.1742	0.232	0.0538	0.1536	0.1536	0.162	0.0262	0.1073	0.1073
25	0.15	0.0225	0.0993	0.0993	0.143	0.0204	0.0947	0.0947	0.122	0.0149	0.0808	0.0808
26	0.102	0.0104	0.0675	0.0675	0.092	0.0085	0.0609	0.0609	0.069	0.0048	0.0457	0.0457
27	0.186	0.0346	0.1232	0.1232	0.25	0.0625	0.1656	0.1656	0.198	0.0392	0.1311	0.1311
28	0.088	0.0077	0.0583	0.0583	0.097	0.0094	0.0642	0.0642	0.069	0.0048	0.0457	0.0457
29	0.306	0.0936	0.2026	0.2026	0.49	0.2401	0.3245	0.3245	0.455	0.207	0.3013	0.3013
30	0.094	0.0088	0.0623	0.0623	0.102	0.0104	0.0675	0.0675	0.076	0.0058	0.0503	0.0503
31	0.228	0.052	0.151	0.151	0.428	0.1832	0.2834	0.2834	0.423	0.1789	0.2801	0.2801
32	0.056	0.0031	0.0371	0.0371	0.067	0.0045	0.0444	0.0444	0.057	0.0032	0.0377	0.0377
33	0.106	0.0112	0.0702	0.0702	0.179	0.032	0.1185	0.1185	0.186	0.0346	0.1232	0.1232
34	0.037	0.0014	0.0245	0.0245	0.042	0.0018	0.0278	0.0278	0.039	0.0015	0.0258	0.0258
35	0.109	0.0119	0.0722	0.0722	0.116	0.0135	0.0768	0.0768	0.107	0.0114	0.0709	0.0709
36	0.032	0.001	0.0212	0.0212	0.034	0.0012	0.0225	0.0225	0.031	0.001	0.0205	0.0205
37	0.093	0.0086	0.0616	0.0616	0.09	0.0081	0.0596	0.0596	0.083	0.0069	0.055	0.055
38	0.028	0.0008	0.0185	0.0185	0.026	0.0007	0.0172	0.0172	0.028	0.0008	0.0185	0.0185
39	0.054	0.0029	0.0358	0.0358	0.066	0.0044	0.0437	0.0437	0.078	0.0061	0.0517	0.0517
40	0.026	0.0007	0.0172	0.0172	0.026	0.0007	0.0172	0.0172	0.024	0.0006	0.0159	0.0159
41	0.07	0.0049	0.0464	0.0464	0.07	0.0049	0.0464	0.0464	0.071	0.005	0.047	0.047
42	0.029	0.0008	0.0192	0.0192	0.026	0.0007	0.0172	0.0172	0.023	0.0005	0.0152	0.0152
43	0.073	0.0053	0.0483	0.0483	0.067	0.0045	0.0444	0.0444	0.07	0.0049	0.0464	0.0464
44	0.024	0.0006	0.0159	0.0159	0.024	0.0006	0.0159	0.0159	0.023	0.0005	0.0152	0.0152
45	0.052	0.0027	0.0344	0.0344	0.062	0.0038	0.0411	0.0411	0.068	0.0046	0.045	0.045
46	0.026	0.0007	0.0172	0.0172	0.024	0.0006	0.0159	0.0159	0.023	0.0005	0.0152	0.0152
47	0.062	0.0038	0.0411	0.0411	0.06	0.0036	0.0397	0.0397	0.062	0.0038	0.0411	0.0411
48	0.03	0.0009	0.0199	0.0199	0.025	0.0006	0.0166	0.0166	0.024	0.0006	0.0159	0.0159
49	0.064	0.0041	0.0424	0.0424	0.061	0.0037	0.0404	0.0404	0.063	0.004	0.0417	0.0417
50	0.025	0.0006	0.0166	0.0166	0.023	0.0005	0.0152	0.0152	0.021	0.0004	0.0139	0.0139

Prema standardima SRPS EN 50160, dozvoljeni nivo ukupnog harmonijskog izobličenja (*Total Harmonik Distortion* - THD) struje u tački priključenja priključenja za sisteme ovog naponskog nivoa mora biti manji od 5 %.

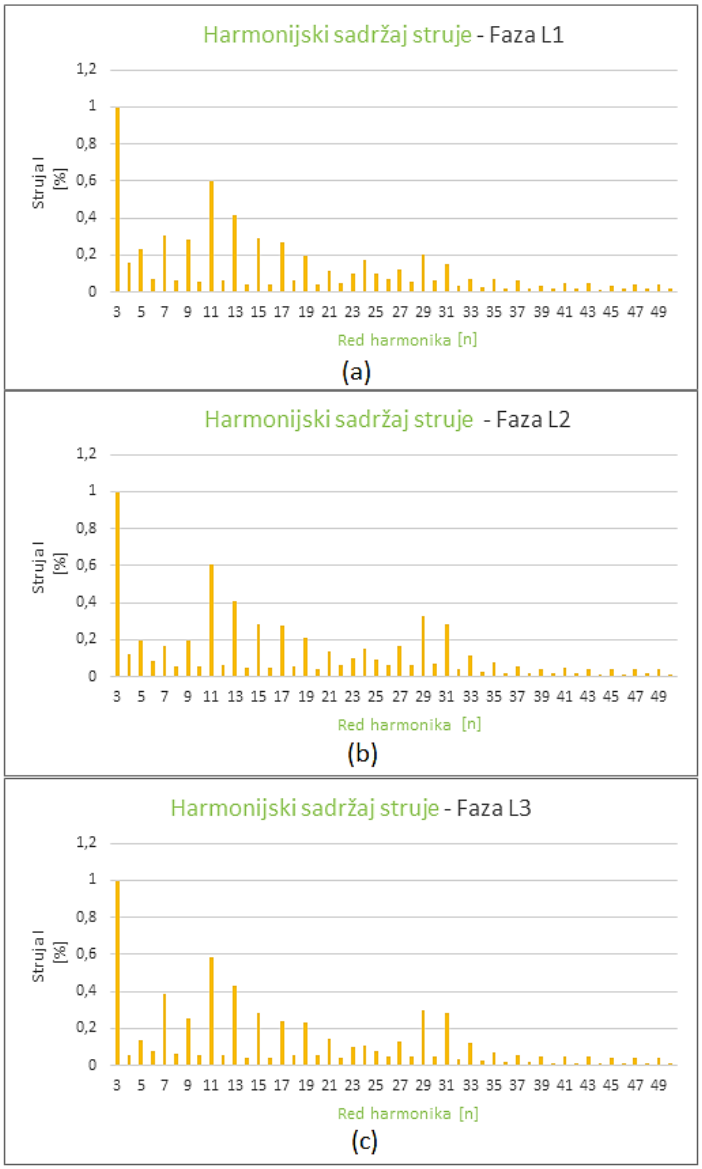
Izračunata vrednost THD struje za predmetni BESS sistem snage 500 kW/1075 kWh uz uvažavanje svih pet baterijskih sistema (svaki snage 100kW) je iznosila 2,22 %, što je u granicama propisanih vrednosti. Tabelarni prikaz THD po fazama i ukupni THD celokupnog BESS sistema su dati u Tabeli 3.

Tabela 3. Rezultati ukupnog THD po fazama kao i ukupni za kompletan BESS

L1	THD [%]	2,285	< 5%
L2	THD [%]	2,181	< 5%
L3	THD [%]	2,194	< 5%
Ukupni THD		2,22	< 5%

VIII ZAKLJUČAK

U radu je su predstavljeni rezultati projektovanja baterijskog sistema za skladištenje električne energije 500 kW/1075 kWh u sklopu FNE izlazne snage 2045 kW. Cilj rada je bio da se predstave neka praktična projektantska iskustva u projektovanju prvog baterijskog skladišta značajnijeg kapaciteta na domaćim prostorima. Ulaskom u ovu investiciju kompanija NIS a.d.-Novi Sad je pokazala posvećenost u smanjenju emisija CO_2. Nosilac idejnog projekta, projekta za građevinsku dozvolu i projekta za izvođenje, a ujedno realizator i implementator na ovom projektu je firma je Conseko d.o.o iz Beograda.



Slika 15. Prikaz harmonijskog sadržaja izlaznih faznih struja PCS modula baterijskog skladišta 500 kW/1075 kWh proizvodnje POWEROAD pri izlaznoj snazi 100% Pn u režimu pražnjenja

Procena očekivane efikasnosti od BESS uzima u obzir da će se baterijskoj skladište koristiti za pomoćnu uslugu regulacije frekvencije. Periodi godine u kojima se može očekivati da će se koristiti usluga regulacije, t.j. usluga stabilizacije mreže kada je mreža podopterećena, što uzrokuje rast frekvencije, odnosno kada je mreža preopterećena (niža frekvencija mreže), na primer

tokom večernjih časova gotovo tokom čitave godine, ili jutarnjih časova u radnim danima, pretpostavlja da će se za pomoćne usluge baterijsko skladište koristiti 300 dana u godini, odnosno za 300 ciklusa godišnje.

Tokom korišćenja baterije, odnosno njenog prolaska kroz velike brojeve punjenja i pražnjenja dolazi do postepenog degradacije kapaciteta baterije, koji je na godišnjem nivou oko 1,25 %, ukoliko baterija prolazi jedan ciklus dnevno. Pored toga, tehnički kapacitet baterije nije istovremeno i iskoristivi kapacitet. Ukoliko se pretpostavi da je efikasnost ciklusa punjenja i pražnjenja koja uzima u obzir gubitke energije na baterijama (ali i samim energetskim transformatorima) 90% RTE, kao i da se neće prazniti svih 100% kapaciteta već 88% od raspoloživog kapaciteta dubine pražnjenja, radi produženja veka baterija, za prosečnu dnevna iskorišćenost i pod pretpostavkom 300 ciklusa godišnje (za regulacione usluge) dobija se godišnja energija 255,42 MWh. To znači da je procenjeno smanjenje emisija na godišnjem nivou oko 280,7 tCO_2.

Zahvalnica

Publikovanje i objava ovog rada su najvećim delom finansirani od strane firme Conseko d.o.o iz Beograda, koja je bila projektantska i izvođačka firma BESS 800Vdc/500kW/1075kWh sklopu integralnog sistema FNE elektrane 2045kWac, a za potrebe kompanije NIS a.d.-Novi Sad, kao Investitora projekta BESS i vlasnika kompletnog sistema. Jednim delom finansiranje je podržano od strane Ministarstva nauke, tehnološkog razvoja i inovacija, za period 2026. (Ugovor pod evidencionim brojem 451-03-33/2026-03/200034).

Literatura

[1] Mohamad, F., Teh, J., Lai, C.M., Chen, L.R. Development of Energy Storage Systems for Power Network Reliability: A Review, Energies, Energies, Vol. 11, No. 9, pp. 2278, 2018. https://doi.org/10.3390/en11092278

[2] Zhang, Y., Campana, P.E., Lundblad, A., Yan, J. Comparative study of hydrogen storage and battery storage in grid connected photovoltaic system: Storage sizing and rule-based operation, Applied Energy, Vol, 201, pp. 397-411, 2017. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.03.123

[3] Oliveira Farias, H.E., Neves Canha, L. Battery energy storage systems (BESS) overview of key market technologies, in Proc. IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA), Lima, Peru, pp. 1-5, 18-21 September 2018. https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2018.8511796

[4] IEEE Guide for Design, Operation, and Maintenance of Battery Energy Storage Systems, both Stationary and Mobile, and Applications Integrated with Electric Power Systems, in: Li, X. (ed.) *IEEE Std 2030.2.1-2019*, pp. 1-45, 2019. https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8930450

[5] Chavhan, S., Mohale,V., Kumbhar, M. A Review of recent advancements and challenges in battery energy storage system (BESS), in Proc. *1st International Conference on Innovative Sustainable Technologies for Energy, Mechatronics, and Smart Systems* (ISTEMS), Dehradun, India, pp. 1-6, 26-27 April 2024. https://doi.org/10.1109/ISTEMS60181.2024.10560221

[6] Vuković, M., Despotović, Ž. V. Primena baterijskih sistema kod solarnih elektrana, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 27.No. 3, pp. 56-23, 2025. https://doi.org/10,46793/EEE25-3.56V

[7] Đerić, M., Despotović, Ž.V, Kostić, M., Ilić, U. Eksploataciona ispitivanja brzih punjačkih stanica za E-automobile snaga 120 kW i 240 kW, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 27, No. 3, pp. 73-83, 2025. https://doi.org/10,46793/EEE25-3.73D

[8] Padmanabhan, N., Bhattacharya, K., Ahmed, M. Battery energy storage systems in energy and reserve markets, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 35, No. 1, 2020. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2936131

[9] Zagoras, N., Balasubramaniam, K., Karagiannidis, I., Makram, E.B. Battery Energy Storage Systems, in Proc. *2015 North American Power Symposium* (NAPS), Charlotte, NC, USA, pp. 1-6, 04-06 October 2015. https://doi.org/10.1109/NAPS.2015.7335215

[10] Vukovic, M., Despotovic, Z.V. Practical aspects of the application of battery storage in photovoltaic power systems, SPECIAL SESSION: New considerations of power systems flexibility: case study of Southeast Europe, in Proc. *20th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems* (SDEWES), Dubrovnik, 05-10 October 2025.

[11] Despotović, Ž.V. Uticaj uređaja energetske elektronike PV elektrana na kvalitet isporuke električne energije u distributivnu mrežu, in Proc. *37. Savetovanje CIGRE* Srbija 2025, Kopaonik, 26-30 Maj 2025. https://doi.org/10,46793/CIGRE37.B4.03

[12] Despotović, Ž.V. Exploitation problems in the operation of photovoltaic power plants, in Proc. *International Conference POWER PLANTS 2025*, Zlatibor, 04-07 November 2025.

[13] Poweroad Renewable Energy Co., Ltd. Environmental, Social and Governance (ESG) Report, https://poweroad.com/wp-content/uploads/2025/09/POWEROAD-2024-ESG-Report.pdf [pristupljeno 15.02.2026]

[14] POWEROAD FLEX 215 AIO - All-in-one Air Cooling Outdoor Cabinet ESS https://poweroad.com/wp-content/uploads/2025/12/FLEX-215-AIO-All-in-one-ESS_Flyer.pdf [pristupljeno 15.02.2026]

[15] Technical specification EPCS-series PCS module, Document version 01-(20231102) release date 2023-11-02, https://enjoypowers.com/wp-content/uploads/2023/06/Enjoypowers-EPCS-for-BESS-Technical-Specification-V.2.4.pdf [pristupljeno 15.02.2026]

Autori

Miodrag Vuković – Dr , Conseko.d.o.o, Beograd, Srbija, m.vukovic@conseko.rs, ORCID 0000-0003-0158-192X
Željko V.Despotović- Dr, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, Srbija, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID 0000-0003-2977-6710 **(koresponding autor)**
Manojlo Šoškić-Dipl.el.inž., NIS a.d.-Novi Sad, Srbija, manojlo.soskic@nis.rs, ORCID 0009-0000-6155-112X
Stanko Vuković – Master el. inž., Conseko.d.o.o, Beograd, Srbija, stanko.vukovic@conseko.rs, ORCID 0009-0007-5709-7295

Design and Implementation of Battery Energy Storage System with 500 kW Power and 1075 kWh Capacity

Abstract – The paper presents the design and implementation of the battery energy storage system (BESS) with a power of 500 kW and a capacity of 1075 kWh, which is part of the system of the photovoltaic power plant Smederevo with a power of 3159 kWp (2450 kW AC), which is owned by the company NIS a.d. Novi Sad. The planned BESS consists of five battery modules of the individual power type of 100kW and a capacity of 215kWh, which achieves a total lithium battery

(LiFePO4) capacity of 1075kWh. Within the BESS, a multi-level bidirectional power converter is provided, which ensures a bi-directional flow of electricity. All intended modules within the BESS have the following certificates: CE-EMC, CE-LVD, IEC 62619, IEC 63056, CEI-016, UN 38.3, nCEI-021, which confirms compliance with international safety standards. Among other things, the paper presents the details of the warehouse topology and the configuration that was designed and adapted to photovoltaic power plant Smederevo. The entire operation of the BESS system is managed by the EMS (Energy Management System) controller, which is in constant communication with the controller of the PV power plant, system for monitoring of photovoltaic power plant for NIS, the RTU unit (remote station EDS) and the SCADA system of the system operator.

Index Terms – Battery energy storage system, Photovoltaic power plants, Balancing energy, Battery controller, Power electronics, Power converters

Rad primljen: 12.03.2026., prihvaćen: 01.09.2026.

doi: 10.46793/EEE26-3.70D

Stručni rad
UDK 621.317.785:006.91

Unapređenje tačnosti provere registara električne energije pametnih brojila korišćenjem novog postupka

Đorđe Dukanac
Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd, Kneza Miloša 11, 11000 Beograd, Srbija

Rezime **-** U ovom radu predlaže se novi, metrološki pouzdaniji postupak za proveru registara električne energije (EE) pametnih brojila različitih klasa tačnosti u postupku overavanja brojila, u odnosu na one koji su propisani odgovarajućim važećim domaćim pravilnicima, međunarodnom preporukom OIML-a i SRPS IEC standardom. Podnosilac zahteva za overavanje brojila često postavlja kratke rokove za završetak overe i traži što nižu cenu overe, ne ulazeći u pouzdanost primenjenih metoda overe. U domaćim pravilnicima uvedene su čak četiri različite definicije za proveru registara aktivne EE klasa tačnosti A, B, C, 2, 1, 0,5S i 0,2S, uključujući i one reaktivne EE klasa tačnosti 2 i 3. Na primer, u domaćem Pravilniku o brojilima aktivne električne energije klase tačnosti 0,2S od 23.12.2016. godine propisano je poređenje zadate energije i energije očitane na registru brojila, uz kriterijum da relativna razlika bude manja od 1/10 NDG (najveće dozvoljene greške) brojila. Međutim, u kontrolnom telu „Elektromreža Srbije“, radi dobijanja rezultata u širem opsegu tolerancije, kao kriterijum se uzima NDG, a najmanje vreme ispitivanja se uzima prema istoj formuli iz Pravilnika. Tako se dobija jedna gruba, slabo pouzdana metoda čije je korišćenje prećutno podržano od strane nadzornog organa, tj. Direkcije za mere i dragocene metale. Novi postupak se zasniva na sinhronom merenju srednje slučajne greške i njenom posrednom uklanjanju iz ukupne greške registra, uz korišćenje strogog kriterijuma 1/10 NDG za relativnu grešku.

Ključne reči - ispitni (impulsni) izlaz, kontrolno telo, provera registra, najveća dozvoljena greška, pametno brojilo.

I UVOD

Zakonska metrologija je oblast metrologije koju država uređuje zakonskim putem zbog njenog širokog značaja i predstavlja osnov za poverenje građana u ispravne rezultate merenja u zvaničnim trgovinskim transakcijama.

Zakonska kontrola brojila električne energije (EE) obuhvata sledeće aktivnosti: ocenjivanje usaglašenosti brojila sa propisanim zahtevima (koje obavlja imenovano ili ovlašćeno kontrolno telo (KT)), ispitivanje i odobrenje tipa (sertifikaciju) brojila, zatim prvo, periodično i vanredno overavanje (koje obavlja ovlašćeno KT), metrološki nadzor (nad ovlašćenim KT-om) i sl. [1].

Ocenjivanje usaglašenosti (pregled, kontrolisanje) brojila EE je svaka aktivnost kojom se utvrđuje da li je pojedinačno merilo, partija merila ili proizvedena serija merila usaglašena sa svim propisanim zahtevima koji se primenjuju na taj tip merila.

I-1 Obaveze ovlašćenog KT-a za overavanje brojila EE u Republici Srbiji

Direkcija za mere i dragocene metale (DMDM) je organ uprave zadužen za poslove metrologije u okviru Ministarstva privrede, čiji je zadatak, između ostalog, da ovlašćuje (na tri godine) pravna lica (akreditovana KT-a) za poslove overavanja brojila (tj. za kontrolisanje i žigosanje brojila iz obima akreditacije), zatim da vrši metrološki nadzor bar jednom godišnje (koji obuhvata i proveru da li je usaglašenost merila sa propisanim zahtevima ocenjena prema propisanom postupku), da nadzire rad ovlašćenih KT-a, da priprema strategiju i propise iz oblasti metrologije itd. [2]. Tehnički propis u pripremi dostavlja se Ministarstvu privrede radi objavljivanja u skladu sa pravilima potvrđenih međunarodnih sporazuma čiji je potpisnik Republika Srbija [3].

Akreditaciono telo Srbije (ATS) izdaje KT-u za kontrolisanje brojila, posle utvrđivanja njegove kompetentnosti, uključujući i metode kontrolisanja, četvorogodišnji sertifikat da ispunjava zahteve za ocenjivanje usaglašenosti EE brojila prema propisima, u zadatom obimu akreditacije (koji obuhvata klase tačnosti i vrste overavanja brojila). U međuvremenu, ATS svake godine obavlja nadzorna ocenjivanja KT-a, koja podrazumevaju i proveru čitavog postupka ocenjivanja usaglašenosti brojila sa propisima u KT-u pred tehničkim ekspertom koji može biti i iz DMDM-a.

Overavanje brojila EE vrši ovlašćeno KT ili DMDM nakon sprovedenog postupka pregleda brojila, čime se potvrđuje da je merilo u skladu sa odobrenim tipom merila, odnosno da ispunjava propisane metrološke zahteve. Ono ima za rezultat označavanje (žigosanje) merila, odnosno izdavanje uverenja o overavanju merila [2].

Važeći međunarodni dokumenti na koje bi domaći pravilnici trebalo da se oslanjaju u pogledu overavanja brojila EE, pa tako i provere registara EE brojila (iz odeljka *I-2*), sledeći su:

- Međunarodna preporuka OIML R 46-1/-2 (2012) za brojila aktivne EE (klase tačnosti A, B, C i D), izdata od strane Međunarodne organizacije za zakonsku metrologiju, čija je Srbija članica. U njoj piše: „Države članice OIML-a treba da sprovode ove preporuke u najvećoj mogućoj meri.“ [4]
- Međunarodni i srpski standard SRPS EN IEC 62052-11:2022 „Oprema za merenje električne energije – Opšti zahtevi, ispitivanja i uslovi ispitivanja – Deo 11: Merna oprema“, koji se odnosi na brojila svih klasa tačnosti za aktivnu i reaktivnu EE [5].

Važeći domaći pravilnici kojima se propisuju zahtevi u pogledu overe brojila, pa tako i provere registara EE brojila, sledeći su:

- Pravilnik o brojilima aktivne električne energije klase tačnosti 0,2S, „Službeni glasnik RS“, br. 104/2016 [6];
- Pravilnik o overavanju brojila aktivne električne energije klase tačnosti A, B, C, 2, 1 i 0,5S, „Službeni glasnik RS“, br. 14/2024 [7];
- Pravilnik o brojilima reaktivne električne energije klase tačnosti 2 i 3, „Službeni glasnik RS“, br. 118/2013 i 86/2014 [8].

Standardizacija je centralni element sistema za dokazivanje usaglašenosti proizvoda [1]. Tehnički zahtevi propisuju se tehničkim propisom neposredno, navođenjem tih zahteva u tekstu propisa, ili posredno, pozivanjem na objavljeni srpski standard ili drugu tehničku specifikaciju (član 6. Zakona o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti [3]).

Glavna razlika između brojila klasa tačnosti A, B i C i, respektivno, brojila klasa tačnosti 2, 1 i 0,5S, jeste u tehničkom standardu korišćenom za sertifikaciju klase brojila EE:

- klase tačnosti A, B i C sertifikovane su Direktivom o mernim instrumentima (MID), evropskim i srpskim standardom SRPS EN 50470-3 [9];
- klase tačnosti 2, 1 i 0,5S sertifikovane su od strane Međunarodne elektrotehničke komisije (IEC), standardima SRPS EN IEC 62053-21 i SRPS EN IEC 62053-22 [10,11].

I-2 Značaj provere registara EE brojila i sadržaj rada

Prema Pravilima o radu prenosnog sistema (iz 2023. god.) navodi se: „8.4.7. Prikupljeni podaci o predatoj, odnosno preuzetoj električnoj energiji za obračunski period iz registara energije brojila i podaci o 15-minutnim dijagramima opterećenja predate, odnosno preuzete električne energije su osnovni obračunski merni podaci.“ [12]. Zato se autor ovog rada već pet godina bavi značajnom temom provere i podešavanja registara EE brojila.

Provera registra EE brojila je, prema domaćim pravilnicima [6-8], jedno od obaveznih merenja pri prvom, periodičnom i vanrednom overavanju brojila EE. Da bi se niz brojila kontrolisao zajedno, potrebno je da brojila budu iste vrste, sa istim naznačenim vrednostima napona, struje (I_n) i najveće struje (I_m), istom klasom tačnosti i vrstom sprege. Podnosilac zahteva za overavanje brojila često istovremeno podnosi veliki broj brojila na overu, koja pri tome mogu biti i različitih naznačenih osobina (npr. za naznačene struje 1 A i 5 A). Čak i brojila EE koja zadovoljavaju uslove za ispitivanje u istom nizu često moraju biti podeljena u nekoliko nizova, jer kapacitet neke slobodne ispitne stanice može biti nedovoljan da se ispitaju istovremeno.

O najboljim načinima podešavanja registara EE brojila, uzimajući u obzir razna gledišta, pisano je u literaturi [13-18]. Posebno je istaknuto koji su nedostaci sekundarnog podešavanja brojila s rezolucijom na tri decimalna mesta, koje su bolje mogućnosti i zašto su one bolje. U [17] dati su primeri odbijanja brojila EE sa overavanja zbog nedovoljne zaštite zakonski relevantnog softvera koja je predviđena uverenjem o odobrenju tipa brojila.

U ovom radu predlaže se nova metoda za proveru registra EE brojila. Predložena metoda je nova jer kao takva do sada nije neposredno prepoznata u odgovarajućim domaćim pravilnicima, međunarodnoj preporuci OIML-a i SRPS IEC standardu [4,5]. Od presudnog značaja u novoj metodi, da bi sama provera registra EE imala smisla, jesu metrološka pouzdanost, tačnost i preciznost merenja neto (čiste) greške registra. Pritom, cilj je da se ne dozvoli da ona ostane zamaskirana često mnogo većom slučajnom greškom brojila, uz primenu znatno oštrijeg kriterijuma. Teži se i tome da se, što je moguće više, skrati vreme provere registra EE.

Drugo poglavlje ovog rada odnosi se na analizu definicija provere registra EE brojila, prema važećim domaćim pravilnicima za pametna statička (elektronska) brojila [6-8], uz raspravu o različitim propisanim načinima relativnog poređenja, kriterijumima i najmanjem potrebnom vremenu provere registra EE za različite klase brojila i vrstu EE (aktivnu ili reaktivnu). U tom pogledu, komentarisan je način relativnog poređenja, kriterijum i najmanje potrebno vreme provere registra EE brojila koji se koriste u ovlašćenom KT-u „Elektromreža Srbije AD“ (KT EMS AD) za overavanje brojila EE.

U trećem poglavlju biće izvršeno poređenje definicija važećih domaćih pravilnika za proveru registra EE brojila različitih klasa tačnosti [6-8] sa važećom međunarodnom preporukom OIML-a i SRPS IEC standardom [4,5]. Biće objašnjeno da su, prema njima, provera registra EE i provera konstante brojila relat. poređenja sa istim članovima u razlici u brojiocu, ali sa različitim imeniocima.

U četvrtom poglavlju biće dat predlog, objašnjen primerom, za uvođenje u primenu nove metode za proveru registra EE, dobijene kombinovanjem postojećih metoda i kriterijuma iz pomenute važeće međunarodne preporuke OIML-a i SRPS IEC standarda [4,5]. Pri tome se u novom postupku primenjuje strogi kriterijum od 1/10 najveće dozvoljene greške (NDG) brojila, kao što je to zadato u odgovarajućoj međunarodnoj preporuci OIML-a [4], srpskom i međunarodnom SRPS IEC standardu za sve klase tačnosti brojila [5] i domaćim pravilnicima za određene klase tačnosti brojila (0,2S, A, B i C aktivne EE i 2 i 3 reaktivne EE) [6-8]. Ovim postupkom garantuje se pouzdanost dobijenog rezultata, tj. neto greške registra, pri relativnom poređenju vrednosti EE iz datog registra brojila i EE sa ispitnog izlaza brojila, uz optimalno određivanje najmanjeg potrebnog vremena za proveru registra.

U petom poglavlju iznet je zaključak u kome je izložena svrha pisanja ovog rada, sa glavnim ishodima ovog istraživanja.

II ZAHTEVI IZ MEĐUNARODNIH DOKUMENATA [4,5] I ČEŠKOG PRAVILNIKA U POGLEDU PROVERE REGISTRA EE BROJILA

Prvo treba istaći da se provera registra EE razmatra sa tri gledišta:

- način (referenca) relativnog poređenja EE registra brojila;
- kriterijum (merilo) za proveru registra EE brojila;
- najmanje potrebno vreme provere registra EE brojila.

Međunarodnom preporukom OIML R 46-1/-2 [4] utvrđuju se metrološki i tehnički zahtevi koji se primenjuju na brojila aktivne električne energije klasa tačnosti A, B, C (i D) koja podležu

zakonskim metrološkim kontrolama. U njoj je dat način relativnog poređenja EE iz registra brojila, kriterijum za proveru registra EE i najmanja potrebna energija koja se zahteva pri proveri registra EE. Definicija glasi: „Energija koja prolazi kroz brojilo izračunava se korišćenjem broja impulsa sa izlaza za ispitivanje; određuje se relativna razlika između ove energije i registrovane energije. Ova relativna razlika ne sme biti veća od jedne desetine osnovne maksimalno dozvoljene greške. Provera se izvodi pri jednoj proizvoljnoj struji $I \geq I_{tr}$.“. I_{tr} je prelazna struja pri kojoj i iznad koje je proizvođač naznačio da brojilo bude u okviru najmanje NDG koja odgovara klasi tačnosti brojila. Najmanja potrebna EE za proveru registra EE iz [4] data je kasnije u tekstu u jednačini (1) u odeljku *III-1*, a može neposredno da se dobije iz date definicije, uzimajući da je najmanja moguća razlika EE iz registra i sa ispitnog izlaza jednaka rezoluciji registra EE [16,17].

Ispitivanje konstanti brojila u postupku overavanja brojila u ovoj preporuci definisano je na isti način kao i provera registara EE brojila, uz kriterijum od 1/10 NDG brojila, samo sa različitim imeniocem u relativnom odnosu, jer u tom slučaju u imeniocu nije EE sa ispitnog izlaza brojila, već EE iz registra brojila.

Međunarodni i srpski standardi posebnih zahteva za opremu za merenje EE su:

- SRPS EN 50470-3:2022 za statička brojila naizmenične aktivne EE klasa tačnosti A, B i C [9];
- SRPS EN IEC 62053-21:2022 za statička brojila naizmenične aktivne EE klasa tačnosti 0,5, 1 i 2 [10];
- SRPS EN IEC 62053-22:2022 za statička brojila naizmenične aktivne EE klasa tačnosti 0,1S, 0,2S i 0,5S [11] i
- SRPS EN IEC 62053-23:2022 za statička brojila naizmenične reaktivne EE klasa tačnosti 2 i 3 [19].

Oni se svi pozivaju na međunarodni i srpski standard opštih zahteva za opremu za merenje EE SRPS EN IEC 62052-11:2022 [5]. U njemu se u članu 7, „Metrološki zahtevi i ispitivanje radnih osobina“, definiše ispitivanje konstante brojila na isti način kao u odgovarajućoj međunarodnoj preporuci OIML-a [4], samo bez eksplicitnog navođenja jednačine (1) iz odeljka *III-1*.

U trećem pasusu ovog odeljka opisano je da je ispitivanje konstanti brojila (tj. optičkog i električnog davača brojila) slično proveri registra EE [4], samo je pitanje koji se podatak o izmerenoj EE uzima kao referentni; ovde je to podatak EE iz registra, a pri proveri registra EE to je podatak EE sa ispitnog izlaza brojila. Ako se traži ispitivanje konstante brojila na ovaj način, u odnosu na zabeleženu EE u registru brojila, to znači da relativna razlika EE sa ispitnog izlaza brojila i EE iz registra brojila treba da zadovoljava upravo kriterijum da bude manja od 1/10 NDG (jer se slučajne greške brojila u EE dobijenoj sa ispitnog izlaza brojila i EE koja je zabeležena u registru brojila poništavaju u brojiocu pri proračunu relativne greške). Pri tome je zadato da se koristi jedan od uređaja za skeniranje impulsa (koji mogu da dolaze sa optičkog ispitnog izlaza ili elektronskog ispitnog izlaza brojila).

Kao praktičan primer poštovanja odgovarajuće međunarodne preporuke OIML-a i standarda [4,5], u Češkoj Republici, stalnoj članici Evropske unije i OIML-a, na isti način se definiše provera brojača u odgovarajućem češkom pravilniku, broj 0111-OOP-C022-24, za brojila aktivne EE klasa tačnosti A, B, C, 2, 1, 0,5, 0,5S i 0,2S i reaktivne energije klasa tačnosti 0,5S, 1S, 2 i 3 [20].

III ISTORIJA PROBLEMA NEPODESNOG NAČINA PROVERE REGISTRA EE U PRAKSI I NEDOSLEDNOSTI U DOMAĆIM PRAVILNICIMA

Biće razmatrana pre svega brojila EE za koja je KT EMS AD akreditovan i ovlašćen za overavanje, i to brojila aktivne EE klasa tačnosti 0,2S, 0,5S, 1, B i C i reaktivne EE klasa tačnosti 2 i 3.

Kao jedan od motiva za pisanje ovog odeljka, treba samo napomenuti da ni u poslednjem domaćem pravilniku, objavljenom u Službenom glasniku br. 14/2024 [7], za klase tačnosti brojila aktivne EE A, B, C, 2, 1 i 0,5S (videti odeljak *III-10*), nisu uvek izneta sva tri gledišta iz prvog pasusa *II* poglavlja u definicijama za proveru registra EE. Umesto da se u domaćim pravilnicima propisani postupci za proveru registra EE što više preciziraju, vidi se da tokom vremena oni postaju sve neodređeniji. Pitanje je ko ima koristi od ovako propisanih načina provere registara EE brojila, kada je poznato da poverenje proizvođača EE, korisnika brojila i potrošača EE u rezultate merenja raste samo ako je ono metrološki pouzdano, precizno i tačno.

III-1 Zahtevi domaćeg pravilnika i istorija provere registara aktivne EE brojila klase tačnosti 0,2S u KT-u EMS AD

U prvom pasusu odeljka 7, Priloga 3 „Overavanje brojila“, Pravilnika o brojilima aktivne električne energije klase tačnosti 0,2S od 23.12.2016. godine [6] (tri dana pre nego što je autor ovog rada počeo da radi u KT-u EMS AD i koji kasnije nikada nije rukovodio KT-om), piše: „Provera registra vrši se tako što se u brojilo dovede energija da bi se utvrdila jednakost impulsnog izlaza i registra energije.“ U drugom pasusu se navodi najmanja energija potrebna za proveru registra koja se izračunava prema obrascu (1), koji je isti kao u međunarodnoj preporuci OIML-a [4], tj.

$$E_{min} = \frac{1000 \cdot R}{b\ [\%]}\ [Wh] \qquad (1)$$

gde su: R – rezolucija registra energije izražena u [Wh]; b [%] – NDG izražena u [%]. Jednačina (1) se izvodi iz uslova da relativna razlika očitanih EE iz registra i sa ispitnog izlaza brojila bude manja od 1/10 NDG (videti literaturu [16,17]).

Međutim, kontradiktorno prvom pasusu, u trećem pasusu ovog Pravilnika [6] piše: „Razlika između zadate energije i očitane energije na registru ne može biti veća od jedne desetine dozvoljene greške pri nominalnim vrednostima.“ Takođe, piše i: „Ispitivanje se vrši na jednoj vrednosti struje $I \geq 0{,}05\ I_n$.“ Umesto EE sa nekog od ispitnih impulsnih izlaza brojila (optičkog ili električnog za daljinsko merenje), tj. izlazne EE brojila iz prvog pasusa ovog Pravilnika [6], u trećem pasusu pominje se ulazna (zadata) EE brojilu koja se meri preko etalona EE. EE očitana sa registra brojila sadrži, pored neto greške registra, i slučajnu grešku brojila (koju sadrži i EE skenirana sa ispitnog izlaza). S druge strane, vrednost merena etalonom ne sadrži slučajnu grešku brojila. Dakle, pošto se poredi relativna razlika EE iz registra, koja je zbir neto EE iz registra (koja se traži) i slučajne greške brojila, i ulazne energije koja se dovodi brojilu, a koja ne sadrži slučajnu grešku brojila, propisani kriterijum iz trećeg

pasusa Pravilnika [6], da ona ne sme biti veća od 1/10 NDG, praktično je teško ostvariv, netačan, neprecizan i nepouzdan.

Stari domaći propis pod nazivom „Metrološko uputstvo za overavanje elektronskih (statičkih) višefunkcijskih brojila električne energije“, koji je bio na snazi do 31.12.2024. godine, za brojila klasa tačnosti 0,2S, 0,5S, 1 i 2 za aktivnu EE i brojila klasa tačnosti 2 i 3 za reaktivnu EE, objavljen je 2007. godine [21]. U njemu je, u odeljku 3.4.1., za ispitivanje brojčanika propisano: „Ispitivanje se vrši postupkom neprekidnog opterećenja naznačenom (osnovnom) strujom brojila. Vreme trajanja ovog ispitivanja treba izabrati tako da se odnos vrednosti energije koju registruje brojčanik brojila i vrednosti energije koja se dobije množenjem konstante davača impulsa i broja impulsa koje je registrovao brojač impulsa priključen na davač impulsa za daljinsko merenje, može odrediti sa tačnošću koja je najmanje 4 puta veća od klase tačnosti ispitivanog brojila, za svaki brojač.“ Prva rečenica je protivrečna rečenici izloženoj u odeljku 3.2.5.3., koja glasi: „Ispitivanje prikazivača vrši se pri opterećenju 100 % I_n, cosφ=1 ili I_m, cosφ=1, za brojila aktivne EE i pri opterećenju 100 % I_n, sinφ=1 ili I_m, sinφ=1, za brojila reaktivne EE“. Dakle, gledajući oba navedena odeljka ovog Metrološkog uputstva [21], kriterijum za izračunatu relativnu grešku ublažen je 2,5 puta za klasu brojila 0,2S u odnosu na odgovarajuću međunarodnu preporuku OIML-a i SRPS IEC standard [4,5]. Dakle, preko definicije vremena ispitivanja brojača, posredno su navedeni merilo relativne greške i referenca za relativno poređenje EE pri proveri registra, tj. električni davač impulsa za daljinsko merenje.

III-2 Suština problema primene nedovoljno pouzdane i precizne metode provere registra EE u KT-u EMS AD za brojila svih klasa tačnosti za koje je ono akreditovano

Treba imati na umu da je greška prikazane EE u registru zbir:

- neto greške registra koja se pri proveri registra traži i
- slučajne greške brojila EE.

Pri proveri tačnosti (slučajne greške) brojila preko nekog od dva ispitna izlaza (optičkog ili električnog za daljinsko merenje), uslov je da relat. razlika EE sa ispitnog izlaza brojila (koja ne sadrži neto grešku registra) i EE izmerene etalonom bude manja od NDG.

Da se ne bi uzimao kriterijum od 1/10 NDG za relativno poređenje EE iz registra brojila i ulazne EE izmerene etalonom koja se dovodi brojilu, kao prema Pravilniku [6], u KT-u EMS AD se kao kriterijum primenjivalo poređenje sa NDG brojila. Međutim, slučajna greška brojila koju obuhvata EE iz registra može da bude npr. samo 1,68 puta manja od NDG, ali i 200 puta manja od NDG (Slika 2 iz *III-5*). Zato takav metod nije dovoljno metrološki tačan, precizan i pouzdan, jer se poredi EE iz registra brojila koja sadrži zbir grešaka brojila (tj. neto grešku registra EE i slučajnu grešku brojila, koje mogu da budu i različitog znaka) sa ulaznom EE koju meri etalon-brojilo, a koja ne sadrži slučajnu grešku brojila ni neto grešku registra brojila. Zato je to gruba metoda kojom se dopuštaju velike neto greške pokazivanja registra EE, zamaskirane ukupnom greškom registra, uz predugo vreme provere registra EE brojila.

Na još veće iznenađenje, najmanje potrebno vreme provere registra u KT-u EMS AD računato je prema najmanjoj potrebnoj energiji za proveru registra EE prema jednačini (1) iz odeljka *III-1*, koja važi za mnogo stroži metod (pri 1/10 NDG), tj. onaj zadat odgovarajućom međunarodnom preporukom OIML-a i SRPS standardom [4,5]. Na taj način dobijeno je predugačko vreme trajanja ovakve provere registra EE u KT-u EMS AD, čak i uz primenu najveće struje brojila, za cosφ=1. Jednačina (1) može lako da se izvede preko načina relativnog poređenja EE iz registra u odnosu na EE dobijenu sa ispitnog impulsnog izlaza brojila i strogog kriterijuma 1/10 NDG, što je prikazano u literaturi [16,17].

Ova opisana gruba metoda korišćena u KT-u EMS AD za brojila EE svih klasa tačnosti za koje je KT EMS AD akreditovan i ovlašćen za overavanje, uz primenu jednačine (1), prećutno je podržana od strane DMDM-a – državnog organa uprave i ATS-a.

III-3 Razvrstavanje metoda razmatranih u ovom radu za proveru registra EE pametnih brojila

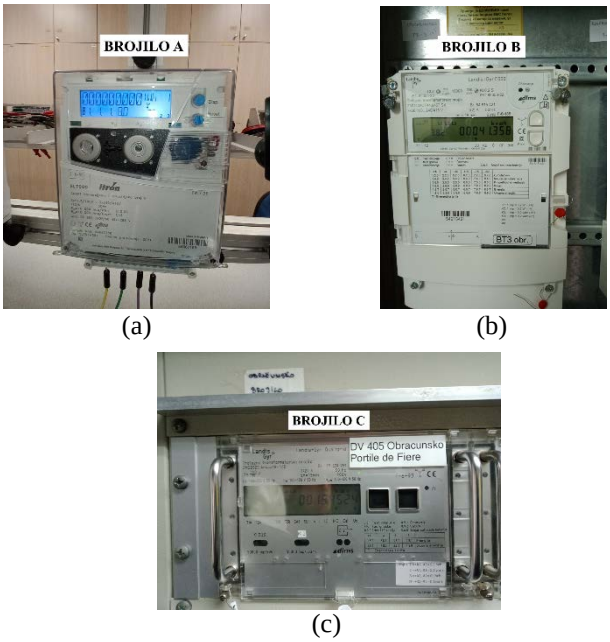
U ovom radu razmatraju se četiri metode za proveru registra EE:

- Metoda 1 koja se primenjuje u KT-u EMS AD, a koja izlazi iz okvira domaćih pravilnika [6-8], opisana u odeljku *III-2*;
- Metoda 2 za procenu tačnosti primene Metode 1, koja se zasniva na oduzimanju slučajne greške brojila, izmerene u posebnom merenju provere tačnosti brojila preko optičkog ispitnog izlaza brojila, od ukupne greške registra EE brojila dobijene iz Metode 1, pri istom naznačenom naponu, najvećoj struji u sve tri faze i faktoru snage 1;
- Metoda 3 koja je definisana odgovarajućom međunarodnom preporukom OIML-a i SRPS IEC standardom [4,5]; to je metoda relativnog poređenja EE na registru brojila i EE dobijene na nekom od impulsnih ispitnih izlaza brojila, i tu je razumno postavljen uslov da relativna greška bude manja od 1/10 NDG, jer se slučajne greške u razlici dveju dobijenih EE poništavaju u brojiocu;
- Nova Metoda 4, koja je objašnjena u poglavlju IV.

III-4 Posledice sekundarnog podešavanja registara EE brojila A klase 0,2S i kako je vreme provere registara brojila A vraćeno na ono prema starom domaćem propisu posle 4,5 godine

Najčešći slučaj u prenosnom sistemu Srbije je brojilo EE koje je sekundarno podešeno u kWh, klase 0,2S, naznačenog faznog napona 57,735 V, struje 1 A, maksimalne struje 2 A i konstante 10000 impulsa/kWh [13-18]. Kada je u pitanju brojilo A, na slici 1a, koje nema radni režim sa registrom EE sa rezolucijom većom od 3 decimalna mesta, pa tako ni ispitni režim za prebacivanje na 4 decimalna mesta, najmanje vreme provere registra EE, prema Pravilniku [6], iznosilo bi neprekidno 14 sati i 26 minuta, što predstavlja veliko radno opterećenje za kontrolora [13-18], a za obično dve tarife i dva smera električne struje, to vreme je za četiri posebna registra EE četvorostruko, tj. 57 sati i 44 minuta. Kada su u pitanju brojila B i C sa slika 1b-c, koja imaju radni režim i ispitni režim u slučaju potrebe prebacivanja rezolucije na 4 decimalna mesta (ali to ne bi smelo da bude praksa, da se brojila podešavaju sa rezolucijom manjom od 4 decimalna mesta zbog tačnosti očitavanja i proračuna gubitaka EE na elementima mreže [15,18]), ova vremena ispitivanja su 10 puta manja, tj. 1 sat i 27 minuta za 1 registar, odnosno 5 sati i 47 minuta za 4 registra. Brojila proizvođača sa slike 1 se dosta dugo ugrađuju za

merenje EE u prenosnom sistemu Republike Srbije. 2005. godine nabavljeno je 770 ovakvih brojila [22]. Kasnije je kupljeno npr. 405 komada od 2015-2023. g., npr. za rezervu i kao dodatna, tzv. kontrolna brojila.



(a) (b) (c)

Slika 1. (a) Brojilo A bez mogućnosti, a (b) i (c) brojila B i C s mogućnošću prikaza EE u registru brojila u radnom režimu ili ispitnom režimu s rezolucijom i na četiri decimalna mesta

Posle izlaganja autora ovog članka o problemu opisanom u prethodnom pasusu za brojila A pomenutih naznačenih osobina, 24.6.2021. godine na međunarodnoj konferenciji ENERGETIKA 2021 [13], dakle, posle više od 4,5 godina, upućen je zvanični pismeni zahtev EMS AD-a DMDM-u, pod brojem 900-00-OPP-1566/2021, zaveden 20.7.2021. Posle izlaganja autora ovog rada na konferenciji CIRED Srbija 2.9.2021. [14] i e-pošte autora DMDM-u o ovom problemu, tek 10.9.2021. DMDM je poslao instrukciju EMS AD-u, zavedenu pod brojem 393-4/0-05-2947/2, prema kojoj se dozvoljava smanjenje vremena provere registra EE brojila A 2,5 puta [15,16]. Dakle, posebnom instrukcijom DMDM-a, vreme provere registra EE brojila A ponovo je vraćeno na vreme zadato prema starom domaćem propisu opisanom u 3. pasusu odeljka *III-1* [15,16,21]. U instrukciji se ne spominje način relativnog poređenja EE iz registra brojila. Deo sadržaja instrukcije DMDM-a, kojom je omogućeno smanjenje vremena provere registra EE, pre svega zbog nepoštovanja čl. 66 Zakona o radu u pogledu dužine dnevnog odmora, dat je u literaturi [15].

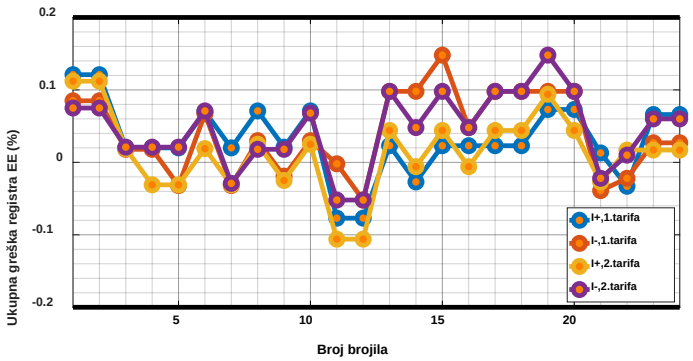
Razlog koji je naveden u instrukciji DMDM-a je: „Etaloni i merna oprema koji čine merni sistem za pregled brojila imaju odgovarajuću tačnost tako da proširena merna nesigurnost mernog sistema za pregled brojila bude najmanje tri puta manja od najveće dozvoljene greške brojila.“ Ovo je rečenica iz Priloga 2 Pravilnika [6]. Pominjanjem tačnosti merne opreme u instrukciji DMDM-a, na posredan način se shvata da DMDM podržava poređenje pokazivanja registra EE brojila sa etalonom merene EE na ulazu brojila. Ono što se ne pominje, a što je ključno, jeste dozvoljeni kriterijum odstupanja relativne greške dobijene ovakvim poređenjem. U Metodi 3, iz odeljka *III-3*, prema odgovarajućoj međunarodnoj preporuci OIML-a i standardu [4,5], porede se veličine EE koje meri samo brojilo, tj. EE iz registra ekrana brojila i EE dobijene na ispitnom izlazu brojila, što nema neposredne veze sa mernim sistemom, jer se porede izmerene vrednosti EE sa brojila na njegova dva izlaza – ekranu brojila i ispitnom izlazu.

U [23], za najnepovoljniju mernu tačku 1, pri cosφ=1, za struju 1 A i uključene sve tri faze, dokazano je da je proširena merna nesigurnost analiziranog mernog sistema (sa etalonom aktivne EE klase tačnosti 0,02) za ispitivanje brojila u KT-u EMS AD daleko manja od najvećeg odstupanja od ±33,3 % NDG brojila i iznosi svega 12,7 % NDG (tj. 2,62 puta manje). Uprošćen pristup DMDM-a ovom problemu, koji se prema njihovoj instrukciji smatra ispravnim, bazira se na odnosu mernih nesigurnosti. Budući da je proširena merna nesigurnost merne opreme u KT-u EMS AD 2,62 puta manja od granične vrednosti, vreme provere registra EE brojila može se smanjiti za isti taj faktor.

III-5 1. Primer primene Metode 1 za proveru registra EE brojila i Metode 2 za procenu efekata Metode 1

Na slici 2 i slici 3 prikazani su rezultati dobijeni primenom Metode 1 i Metode 2 (iz odeljka *III-3*), respektivno, za proveru registra EE brojila, za ukupnu i neto grešku registara EE kod 24 brojila A. Brojila su za dve tarife i dva smera struje (tj. pozitivan smer od elektroenergetske mreže ka mernom mestu i negativan smer od mernog mesta ka mreži), različitih godina proizvodnje od 2004. do 2020. godine, overena u periodu 2021–2023. godine, sa naznačenim podacima iz prvog pasusa odeljka *III-4*.

Pri Metodi 1, koja se primenjuje u KT-u EMS AD, ali sa velikim stepenom neodređenosti, svi rezultati su u okvirima ±NDG, tj. smatraju se ispravnim, što odgovara i kontroloru. Da je uzeto 2,5 puta duže vreme, rezultati bi mogli biti samo još dalje od ±NDG.

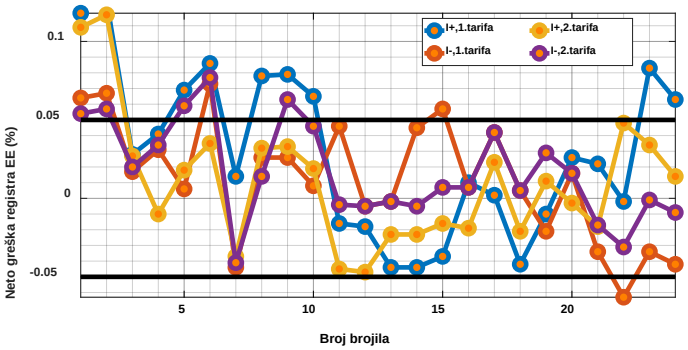


Slika 2. Metoda 1: Ukupna greška 4 registra aktivne EE za 24 brojila A za dve tarife i pozitivan i negativan smer struje, overena u periodu 2021–2023. g., sa nazivnim osobinama iz odeljka *III-4*

Slučajna greška 24 brojila A kretala se u opsegu od [-0,061–0,119] %, što je [-3,28–1,68] puta manje od |±NDG| brojila. Najmanja izmerena slučajna greška bila je 0,001 %, tj. 200 puta manja od |±NDG|.

Pri Metodi 2, da bi važila jednačina (1), za 2,5 puta manju uzetu najmanju potrebnu EE brojila, potrebno je kriterijum za relativno poređenje podići 2,5 puta, tj. uzeti ±¼ NDG, tj. ±0,05 %, umesto

±0,02 %. Ako je rezultat za neto grešku jednog od 4 registra prevazišao donje ili gornje ograničenje koja su označena crnim linijama, ta brojila, u ovom slučaju čak 10, trebalo je ponovo ispitati u dužem vremenskom periodu ili proglasiti neispravnim.

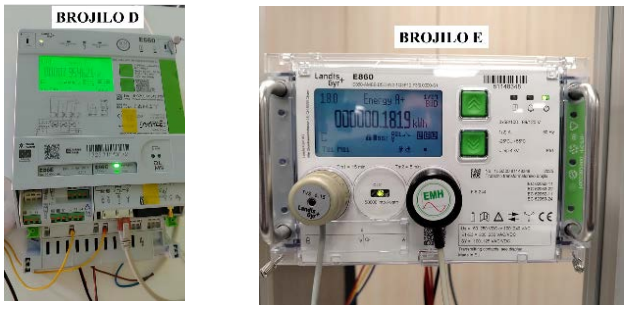


Slika 3. Metoda 2: Neto greška četiri registra aktivne EE za 24 brojila A za dve tarife i pozitivan i negativan smer struje, overena u periodu 2021-2023. g., sa nazivnim osobinama iz odeljka *III-4*

III-6 2. Primer primene Metode 1 za proveru registra EE brojila i Metode 2 za procenu efekata Metode 1

U EMS AD-u je od 2025. započeta postepena ugradnja 808 novih pametnih brojila D i E, prikazanih, respektivno, na slici 4a i slici 4b, i opisanih u literaturi [24]. Ona su klase tačnosti 0,2S, od toga 530 za naznačenu (najveću) struju 1(2) A (i od toga 119 brojila E), sa mogućnošću prikaza EE u registru brojila sa rezolucijom na 6 decimalnih mesta i sa 10–11 cifara EE na ekranu. Predstavljaju unapređene verzije brojila B i C sa većim mogućnostima u praćenju kvaliteta EE. Godine 2025. sprovedena je prva overa 49 brojila D i 24 brojila E za ugradnju u postrojenjima za EMS AD.

Umesto ranije korišćenih visokopreciznih brojila C, od 2025. godine počela je ugradnja visokopreciznih brojila E na mestima međudržavne razmene energije [25], tako da je njihova tačnost bitna u oba smera električne struje, tj. prenosa EE.

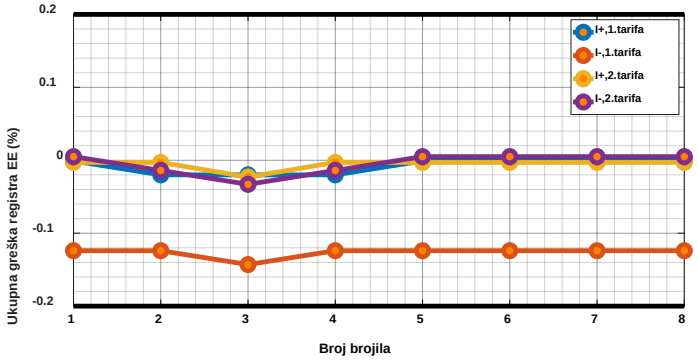


(a) (b)

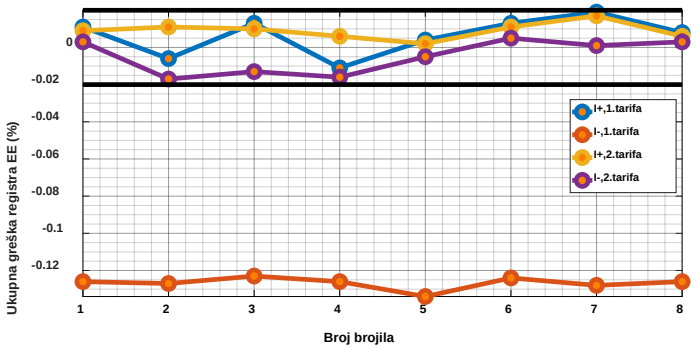
Slika 4. (a) Brojilo D i (b) brojilo E sa mogućnošću prikaza EE u registru brojila sa rezolucijom od šest decimalnih mesta

U sledećem primeru razmatra se 8 pametnih brojila E, sekundarno podešenih u kWh i sa rezolucijom na 4 decimalna mesta, sa naznačenim međufaznim naponom 100 V, naznačenom strujom 1 A, maksimalnom strujom 2 A i konstantom 50000 impulsa/kWh.

Na slici 5 i slici 6 prikazani su rezultati za ukupnu i neto grešku registara EE za dve tarife i dva smera struje za 8 brojila E, iste 2025. godine proizvodnje, pri overi 2025. god., uz običnu Metodu 1 i naknadnu Metodu 2 provere registra, respektivno. Pri Metodi 1 KT-a EMS AD, pogodnoj za kontrolora, ali sa velikim stepenom neodređenosti, svi rezultati su u okviru ±NDG, odnosno ispravni.



Slika 5. Obična Metoda 1: Ukupna greška 4 registra aktivne EE za 8 brojila E, za dve tarife i dva smera struje, overenih 2025. g



Slika 6. Naknadna Metoda 2: Neto greška 4 registra aktivne EE za 8 brojila E, za dve tarife i dva smera struje, overenih 2025. g.

Slučajna greška za 8 brojila E bila je u opsegu [-0,033–0,01] %, što je [-6,06–20] puta manje od |±NDG| brojila. Najmanja slučajna greška bila je 0,000, tj. beskonačno puta manja od |±NDG|.

Pri naknadnoj Metodi 2 iz *III-3*, kriterijum za relativno poređenje pooštren je na ±1/10 NDG, tj. ±0,02 %. Rezultati za neto grešku registara EE (u %) svih osam brojila za prvu tarifu (T1) i negativan smer struje (I-) daleko su prevazišli donje ograničenje relativne greške označeno crnom linijom, i svih 8 brojila trebalo je ponovo ispitati u dužem vremenskom trajanju ili proglasiti neispravnim. Iz ovakvih rezultata ispitivanja pokazuje se da su sva brojila prema Metodi 2 neispravna zbog prekoračenja neto greške registra EE i do 2,48 puta u odnosu na ograničenje. To znači da bi se pri uvozu EE dobijala ispravna pokazivanja registara EE, a pri izvozu EE uz nedozvoljenu i do 2,48 puta veću neto grešku registra EE (T1, I-).

III-7 Koji je razlog i kako su problemi predugog trajanja provere registara EE i smanjene tačnosti proračuna gubitaka EE na elementima mreže primenom brojila A klase 0,2S još pre 20 godina mogli da budu izbegnuti u EMS AD-u?

Razlog sekundarnog podešenja registara EE je što, npr., zaposleni za obračunsko i kontrolno merenje EE u EMS AD-u ne moraju da misle o prenosnom odnosu brojila koja odnose na teren radi ugradnje, niti o posebnom podešavanju prenosnih odnosa mernih transformatora u samim brojilima pre davanja brojila na overu (jer se oba prenosna odnosa stavljaju kao 1:1). Međutim, zaposleni u EMS AD-u u Sektoru za obračun EE i pristup prenosnom sistemu moraju o tome da misle i da vrše naknadnu ispravku u obračunu.

Problem sa predugom proverom registara EE bio bi pet puta manji da su nadležni službenici ova brojila A, radi merenja EE i njene naplate u prenosnom sistemu u EMS AD-u, rešili da ih primarno podešavaju na dva ili tri decimalna mesta, zavisno od količine EE koja protiče na datom mernom mestu [15,18]. To je moguće jer imaju devetocifreni ekran, i tada bi ovo vreme provere registra EE bilo pet puta kraće za rezoluciju registra na dva decimalna mesta, tj. po jednom registru 2 sata i 54 minuta za brojilo A, za 400 kV i 220 kV mreže. Kada bi rezolucija primarno podešenog registra bila na tri decimalna mesta, vreme provere registra bilo bi 50 puta kraće, tj. 17 minuta i 20 sekundi, za npr. 110 kV mrežu.

Potrebno je ispuniti uslov da registar beleži i prikazuje, počevši od nule, najmanje 1500 h vrednosti aktivne ili reaktivne energije koja odgovara maksimalnoj električnoj struji na referentnom električnom naponu i $\cos\varphi = 1$ ili $\sin\varphi = 1$, respektivno [6,8]. Za brojila sa osobinama iz *III-4* to je 520 kWh sekundarne EE [18].

Pored 5–50 puta kraćeg vremena provere registra EE kod brojila A (ako se pretpostavi da se poslednja vidljiva cifra zaokružuje na ekranu brojila, a ako ne, to je 10–100 puta), primarno podešavanje registra EE brojila A, kao u 1. pasusu, ima i sledeće prednosti:

- smanjile bi se greške pri proračunu gubitaka EE na elementima mreže [15,18]. (Ova tvrdnja važi i za brojila D i E kada se u radnom režimu podešavaju na sekundarni način sa rezolucijom na 3, umesto na 4 decimalna mesta, odnosno ako se ne bi podešavala na primarni način sa rezolucijom na 2–4 decimalna mesta, zavisno od vrednosti konstante);
- povećala bi se pouzdanost obračuna EE i zaštite zakonski relevantnog softvera brojila, jer bi podatak o pravim prenosnim odnosima mernih transformatora bio overen [15];
- tada bi bila ispunjena tačka 8.6.8. Pravila o radu prenosnog sistema, gde piše: „EMS AD je odgovoran za čuvanje, odnosno ažuriranje konfiguracije merne opreme, tako da ona uvek bude kompatibilna sa karakteristikama mesta priključenja.“ [12]. (Ova tvrdnja važi za sva brojila A-E.)

III-8 Kako je problem tačnosti pokazivanja EE brojila B i C još pre 20 godina mogao da bude strogo izbegnut u EMS AD-u?

Nikakvog opravdanog razloga nije bilo niti ima za sekundarno podešavanje brojila B i C u radnom režimu na tri decimalna mesta, kada je zahtev za očitavanje ovih brojila pre prolaska kroz nulu brojčanika svega 520 kWh (videti uslov iz 3. pasusa odeljka *III-7*), a što je rađeno kako bi se usaglasili rezultati na brojilima A, B i C po broju decimalnih mesta. To je onda, pri proveri registara EE, uključivalo privremenu promenu rezolucije registara EE brojila B i C na četiri decimalna mesta, pa posle provere registara EE vraćanje brojila B i C u radni režim na tri decimalna mesta.

Isključivim sekundarnim podešavanjem brojila B i C na četiri decimalna mesta, smanjile bi se greške pri proračunu gubitaka EE na elementima elektroenergetskog sistema (EES-a) 5–10 puta. Npr., i kada bi takvo brojilo podešeno na 4 decimalna mesta radilo godinu dana sa najvećom strujom, što je malo verovatno, zabeležilo bi svega 3034,5 kWh za godinu dana, tj. 3,3 puta manje od maksimalnog opsega cifara tako podešenog registra EE brojila.

III-9 Zašto bi bio najbolji primarni način podešavanja brojila D i E u elektroenergetskoj mreži pod nadzorom EMS AD-a?

Brojila D i E imaju prikaz registra ekrana na novim verzijama od 11 cifara, tako da je primarno podešavanje ovih brojila lako ostvarivo i poželjno i za najveće protoke EE na mernim mestima, tj. u prenosnom EES-u sa najvišim naznačenim naponom 400 kV, i to na tri decimalna mesta za brojila sa konstantom 10000 imp./kWh, a za veće konstante brojila do 100000 imp./kWh i na 4 decimalna mesta kod 11-cifarskog registra EE brojila. Time bi se smanjile greške pri proračunu gubitaka na elementima EES-a [15,18] i povećala bi se pouzdanost obračuna EE i zaštita zakonski relevantnog softvera brojila (videti 2. tačku iz 4. pasusa odeljka *III-7*). I pored znatno unapređenog beleženja i pokazivanja EE u registrima u pogledu broja cifara na ekranu, nažalost, brojila D i E se u EMS AD-u uglavnom i dalje podešavaju na sekundarni način pokazivanja EE u registrima.

III-10 Zahtevi domaćeg pravilnika za proveru registara aktivne EE brojila klasa tačnosti A, B, C, 2, 1 i 0,5S

Prema Pravilniku o overavanju brojila aktivne električne energije klase tačnosti A, B, C, 2, 1 i 0,5S [7], koji je na snazi od 1.1.2025. godine, u tabeli 5 odeljka 2.3.4.: „Provera registra“, pri jediničnom faktoru snage i najvećoj struji brojila, navodi se:

- za elektronska brojila klasa A, B i C daje se način poređenja EE iz registra i kriterijum, tj. piše da: „Relativna razlika između zabeležene energije na registru i energije koja je propuštena kroz brojilo klase A, B i C, u vidu broja impulsa na izlazu za ispitivanje, ne sme biti veća od 1/10 NDG.“. Ovo odgovara definiciji provere registra EE u odgovarajućoj međunarodnoj preporuci OIML-a i SRPS IEC standardu [4,5] s obzirom na referencu relativnog poređenja pri proveri registra EE brojila i kriterijum za ocenu relativne greške ovog poređenja. Najmanje potrebno vreme provere može se dobiti preko najmanje potrebne energije koju treba propustiti kroz brojilo prema jednačini (1), koja se izvodi iz definicije;
- za elektronska brojila klase tačnosti 2 i 1 daje se samo vreme ispitivanja, tj. piše: „Ispitivanje prikazivača se vrši u vremenskim intervalima koji nisu kraći od 20 s.“ Slično je napisano u tački 3.2.5.4. starog propisa opisanog u 3. pasusu odeljka *III-1* [21], ali piše: „Ispitivanje tačnosti mora se vršiti u vremenskim intervalima koji nisu kraći od 20 s.“, a to je relativno poređenje EE sa ispitnog izlaza brojila u odnosu na EE izmerenu etalonom i predstavlja slučajnu grešku brojila, tj. ne obuhvata neto grešku registra što je osnov provere registra EE brojila. Dakle, nema ni kriterijuma provere registra brojila, ni reference relativnog poređenja pri proveri registra brojila. Zadato vreme je kraće 207,84 puta od

vremena provere registra prema starom Metrološkom uputstvu [21], za zamišljena brojila istih osobina i podešavanja kao za brojilo „A“ sa slike 1a, ali klase tačnosti 1. To odgovara kriterijumu 52 NDG, umesto 1/10 NDG prema odgovarajućoj međunarodnoj preporuci OIML-a i SRPS IEC standardu [4,5];

- za elektronska brojila klase tačnosti 0,5S daje se samo vreme ispitivanja, tj. piše: „Vreme ispitivanja treba izabrati tako da se odnos vrednosti energije (zabeležene na registru i energije – ovaj deo je ispušten u ovom Pravilniku [7]) koja je dobijena množenjem konstante davača impulsa i broja impulsa koje je registrovao brojač impulsa priključen na davač impulsa za daljinsko merenje, može odrediti sa tačnošću najmanje 2%.“. Dakle, preko određenja za vreme ispitivanja registra EE brojila, posredno su navedeni kriterijum provere registra EE i referenca relativnog poređenja pri proveri EE registra, a to je EE sa električnog davača impulsa za daljinsko merenje. Kriterijum je 16 puta blaži nego prema starom propisu [21], tj. 4 puta veći od NDG, a 40 puta veći od 1/10 NDG prema međunarodnoj preporuci OIML-a i SRPS IEC standardu [4,5].

Na kraju je u Napomeni 4 Pravilnika [7] predstavljen način provere konstante brojila ili konstante električnog davača za daljinsko merenje, koji je sada zajednički za klase tačnosti A, B, C, 2, 1 i 0,5S aktivne EE. On je identičan kao u starom primenjivanom propisu (koji se odnosio na klase 2, 1, 0,5S i 0,2S aktivne EE), opisanom u 3. pasusu odeljka *III-1* [21], u odeljku 3.4.1. (zato se neće ponavljati). Dakle, preko određenja za vreme ovog ispitivanja posredno su navedeni kriterijum provere konstante brojila (¼ NDG) i referenca relativnog poređenja pri proveri konstante brojila, tj. električni davač impulsa za daljinsko merenje. Dakle, sugeriše se definicija različita od one date odgovarajućom međunarodnom preporukom OIML-a i SRPS IEC standardom [4,5].

I na još veće iznenađenje, na kraju Napomene 4 Pravilnika [7] piše novost: „Davač impulsa za daljinsko merenje ne treba ispitivati, ako se ispitivanje tačnosti brojila barem u jednoj ispitnoj tački obavi preko impulsa iz davača impulsa za daljinsko merenje.“. Ovo opisano merenje, koje je deo uobičajene overe brojila, neuporedivo je brže (reda do 15 min.) od provere konstante davača za daljinsko merenje, pa poništava potrebu za njom ako se izvede.

III-11 Zahtevi domaćeg pravilnika za proveru registara reaktivne EE brojila klase tačnosti 2 i 3

Prema „Pravilniku o brojilima reaktivne električne energije klase tačnosti 2 i 3“, „Provera registra se vrši da bi se utvrdio odnos između registra i ispitnog izlaza, tako što se kroz brojilo propusti energija E, gde je $E \geq E_{min}$.“ [8]. Zatim se navodi jednačina (1) iz odeljka *III-1*, pri $I \geq 0{,}2I_n$. Na kraju piše: „Relativna razlika između zabeležene energije na registru i energije koja je propuštena kroz brojilo u vidu broja impulsa na ispitnom izlazu, ne može biti veća od jedne desetine NDG.“. Ova definicija odgovara odgovarajućoj međunarodnoj preporuci OIML-a i SRPS IEC standardu [4,5].

IV PREDLOG I PRIMER PRIMENE NOVE METROLOŠKI POUZDANE METODE 4 ZA PROVERU REGISTARA EE PAMETNIH BROJILA

Nova Metoda 4 zasniva se na relativnom poređenju EE iz registra sa zadatom ulaznom EE brojila, merenom etalonom, a zatim se od te ukupne greške registra oduzima, preko optičkog ispitnog izlaza, merena srednja slučajna greška brojila iz dve vrednosti merene tokom 80 % vremena provere registra.

Nova Metoda 4 proverena je na primeru brojila F klase 0,5S, sa slike 7, sa sledećim naznačenim veličinama: struja 5 A, najveća struja 6 A, fazni napon 57,735 V. Konstanta brojila je 40000 imp./kWh, a konstanta impulsnog davača za daljinsko merenje je 10000 imp./kWh. Proizvedeno je 2004. godine i služi kao probno brojilo u KT-u EMS AD. Ovo brojilo je sekundarno podešeno u radnom režimu sa rezolucijom registra EE na 4 decimalna mesta.



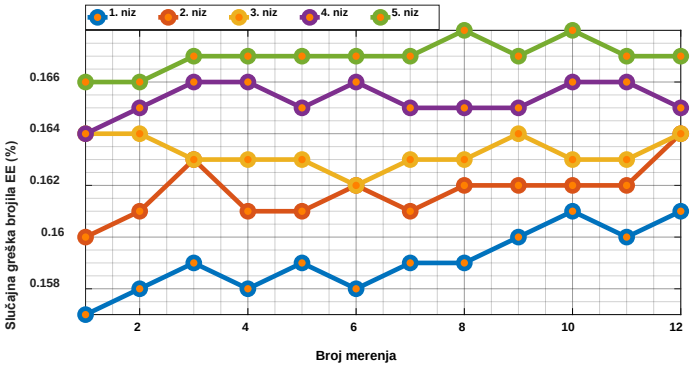
Slika 7. Ogledna postavka za istraživanje nove Metode 4 za proveru registra EE koju čini brojilo F (iste vrste kao brojilo B, ali drugih parametara) na ispitnoj stanici „B“ u KT-u EMS AD

Na slici 8 prikazano je pet grupa od po 12 uzastopnih merenja slučajne greške brojila pomoću optičkog ispitnog izlaza, pri čemu je svako merenje trajalo po pet minuta. Vidi se kolebanje greške u prvoj, drugoj i ostalim grupama od po 12 merenja za najviše 0,004 %, 0,003 % i 0,002 %, respektivno. Takođe, dolazi i do podizanja krivih na slici 8 tokom merenja i stalnog opterećenja brojila najvećom strujom, tj. do blagog porasta srednje vrednosti 12 slučajnih grešaka iz ovih grupa merenja sa 0,159 % na 0,167 %.

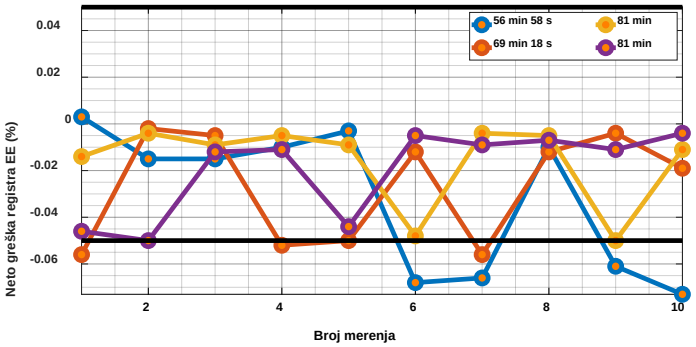
Vreme provere registra EE brojila, izračunato prema najmanjoj potrebnoj EE iz jednačine (1), iznosi 11 minuta i 33 sekunde. Na slici 9 prikazana je neto greška registra aktivne EE brojila (u %) za 1. tarifu EE, dobijena preko Metode 3 u tri vremenska perioda od po 10 mernih tačaka prema odgovarajućoj međunarodnoj preporuci OIML-a i SRPS IEC standardu [4,5], tj. neposrednim relativnim poređenjem sadržaja iz registra EE i aktivne EE sa optičkog ispitnog izlaza brojila. Utvrđeno je iz mnogih merenja, pri I_m i $\cos\varphi = 1$, da tek za vreme od otprilike 81 minut više ne dolazi do prekoračenja kriterijuma 1/10 NDG ni u jednoj tački u dve grupe od po 10 merenja. Ovo je 7 puta duže od najmanjeg potrebnog vremena izračunatog preko EE iz jednačine (1), što je nepraktično. Pri samom brojanju impulsa optičkim davačem može doći do greške pri otpočinjanju i završetku protoka električne struje kroz brojilo, što otežava zadovoljenje strogog kriterijuma.

Da bi se izbeglo predugačko trajanje provere registra preko Metode 3 i uprošćeno, nedovoljno pouzdano merenje primenom Metode 1, predlaže se nova Metoda 4. Na slici 10 prikazane su

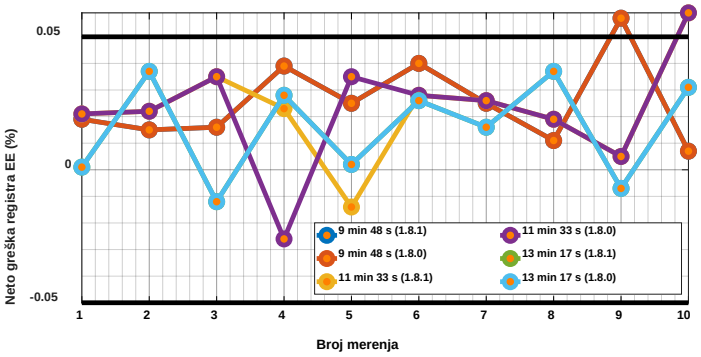
neto greške registara aktivne EE brojila za 1. tarifu EE (1.8.1) i ukupnu EE (1.8.0) za tri vremenska perioda od po 10 merenja.



Slika 8. Pet grupa od po 12 uzastopnih merenja slučajne greške brojila F preko optičkog ispitnog davača u trajanju od po 5 min



Slika 9. Neto greška registra aktivne EE brojila F za 1. tarifu EE, prema Metodi 3 iz preporuke OIML-a i standarda [4,5]



Slika 10. Neto greške registara aktivne EE brojila F za 1. tarifu EE i ukupnu EE prema novoj Metodi 4 za tri vremenska perioda

Negde se krive za 1. tarifu EE i ukupnu EE poklapaju za ista vremena provere registara EE brojila. Rezultati u granicama greške od 1/10 NDG brojila dobijeni su za 15 % duže vreme od onog prema jednačini (1). Međutim, ova Metoda 4 metrološki je tačnija i pouzdanija od Metode 1, jer se zasniva na istoj referenci poređenja (kao posrednoj) i istom merilu odstupanja relativne neto greške registra EE od 1/10 NDG, što je određeno odgovarajućom međunarodnom preporukom OIML-a i SRPS standardom [4,5].

V ZAKLJUČAK

U ovom radu predlaže se novi postupak radi unapređenja metrološke tačnosti, pouzdanosti i preciznosti provere registara EE pametnih brojila, sa težnjom određivanja objektivne granice za najmanje potrebno vreme provere registara. Ovo je neophodno da bi se osiguralo poverenje proizvođača, korisnika i potrošača u tačnost, pouzdanost i preciznost registara EE brojila i sveli rokovi overavanja brojila na najmanju moguću meru. Dakle, s jedne strane neophodna je primena odgovarajućeg postupka ocenjivanja usaglašenosti registara EE sa važećim domaćim pravilnicima, ali je s druge strane važan i razvoj novih, unapređenih postupaka koji bi u budućnosti bili propisani u domaćim i stranim pravilnicima.

Na osnovu vrednosti EE iz registara pametnih brojila vrši se obračun EE za snabdevanje potrošača, gubitaka EE u mreži i EE u međudržavnoj razmeni. Zato je neophodno da ta brojila ispunjavaju visoke zahteve u pogledu tačnosti registara EE.

Srbija je članica OIML-a i kandidat za članstvo u Evropskoj uniji. Za razne klase tačnosti brojila i vrste EE, nedovoljna i ponekad nedosledna razjašnjenja u domaćim pravilnicima u pogledu provere registara EE mogu da dovedu do proizvoljnih načina njihovog izvođenja. Ovo dovodi do metrološki nepouzdanih kriterijuma i rezultata, prema kojima ne mogu dovoljno precizno i tačno da se odrede neto greške registara EE brojila, koje bi trebalo da se uklope u opštepoznati kriterijum 1/10 NDG iz odgovarajuće međunarodne preporuke OIML-a, kao i SRPS IEC standarda [4,5].

Npr. Pravilnikom [6] (iz 2016. god.), pri proveri registra EE brojila klase 0,2S nametnuta je metoda relativnog poređenja pokazivanja EE iz registra sa zadatom EE koja se meri etalonom, a da kriterijum bude 1/10 NDG, dok se u praksi u KT-u EMS AD koristi NDG. DMDM je 10.9.2021. posebnom instrukcijom KT-u EMS AD smanjio vreme provere registra brojila A (iz odeljka *III-4*) 2,5 puta, kao prema starom Metrološkom uputstvu [21]. Dalje, u Pravilniku [7] objavljenom 2024. godine, zadato je čak 16 puta kraće najmanje potrebno vreme provere registra EE brojila klase 0,5S u odnosu na staro metrološko uputstvo iz 2007. godine, a čak 64 puta kraće u odnosu na vreme zadato preporukom OIML-a i SRPS standardom [21,4,5]. S druge strane, za brojila klasa 2 i 1 zadato je najmanje potrebno vreme provere registra od 20 s [7].

Ne treba postavljati cilj da se overi brojilo po svaku cenu, što pre i bilo kako, već osnovni cilj treba da bude poštovanje strogih pravila radi postizanja metrološke preciznosti, tačnosti i pouzdanosti. Usvajanjem metode za proveru registara EE brojila po Metodi 1 sa kriterijumom NDG umesto 1/10 NDG, uz prećutnu saglasnost nadležnih državnih organa, kao u KT-u EMS AD, dobijaju se nedovoljno precizni rezultati, zamaskirani slučajnom greškom brojila. Ovo je podstaknuto strahom da ne dođe do eventualnog ponavljanja merenja sa još dužim vremenom provere registra EE i da se overa ne završi u okviru ugovorenog roka.

U primerima brojila različitih proizvođača i konstanti brojila pokazano je kako primenom Metode 1, koja se primenjuje u KT-u EMS AD, svih 24 brojila A i 8 brojila E imaju ispravne rezultate kada se relativna ukupna greška registra brojila poredi

sa ±NDG brojila. Međutim, kada se primeni Metoda 2, tada 10 brojila A i nijedno od brojila E ne ispunjavaju postavljeni zahtev da neto greška svih registara EE brojila (dobijena oduzimanjem slučajne greške) bude manja od ±1/10 NDG. Kod brojila A uzeta je 2,5 puta manja EE koja prolazi kroz brojilo od one kada bi kriterijum bio ±1/10 NDG, zbog 2,5 puta kraćeg vremena provere registra EE datog prema instrukciji DMDM-a. Pri tome je slučajna greška koja je oduzeta od ukupne greške brojila dobijena iz provere tačnosti brojila ranije, uz iste uslove merenja kao pri proveri registra EE.

Predložena Metoda 4 provere registara EE brojila je nova jer nije neposredno preporučena u odgovarajućim važećim domaćim pravilnicima, međunarodnoj preporuci OIML-a i SRPS IEC standardu. Primena nove Metode 4 predstavljena je na probnom brojilu F, klase 0,5S. Pokazalo se da je potrebno vreme provere registra ovog brojila 15 % duže od najmanje potrebnog, datog jednačinom (1) za EE, kao u međunarodnoj preporuci OIML-a [4].

Ovom novom Metodom 4 za proveru registra EE brojila postiže se sledeće:

- relativno se poredi vrednost EE dobijena iz registra brojila i posredno dobijena vrednost EE na ispitnom izlazu brojila, kao razlika ukupne greške registra brojila i srednje slučajne greške brojila, koja je merena uporedo 80 % vremena;
- poredi se neto relativna greška registra brojila sa strogim uslovom, tj. treba da bude manja od 1/10 NDG brojila;
- značajno se smanjuje vreme provere registra EE u odnosu na primenu Metode 3 neposrednog merenja EE preko broja impulsa sa ispitnog izlaza brojila, uzetog za referencu.

Primenom nove Metode 4 izbegla bi se dosadašnja neprecizna i slabo pouzdana merenja na osnovu kojih nije bilo moguće da se tačno i nedvosmisleno utvrdi stvarna (neto) greška registra EE.

LITERATURA

[1] Popović, P., Živković V. *Osnovi standardizacije i metrologije*, Univerzitet Singidunum, Beograd, 2011.

[2] Zakon o metrologiji, Službeni glasnik RS, br. 15/2016. https://www.paragraf.rs/propisi_download/zakon_o_metrologiji.pdf [pristupljeno 19.02.2026]

[3] Zakon o tehničkim zahtevima za proizvode i ocenjivanju usaglašenosti, „Službeni glasnik RS“, br. 49/2021. https://pravno-informacioni-sistem.rs/eli/rep/sgrs/skupstina/zakon/2021/49/2 [pristupljeno 19.02.2026]

[4] International organization of legal metrology. *OIML R 46-1/-2: Active electrical energy meters*, 2012. https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r046-1-2-e12.pdf [pristupljeno 19.02.2026]

[5] SRPS EN IEC 62052-11:2022. Oprema za merenje električne energije – Opšti zahtevi, ispitivanja i uslovi ispitivanja – Deo 11: Merna oprema, https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:63393 [pristupljeno 19.02.2026]

[6] Pravilnik o brojilima aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 S, Službeni glasnik RS, br. 104/2016. https://www.dmdm.rs/images/dokumenti/podzakonski_propisi/pravilnik_o_brojilima_aktivne_elektricne_energije_klase_tacnosti_02_s.pdf [pristupljeno 19.02.2026]

[7] Pravilnik o overavanju brojila aktivne električne energije klase tačnosti A, B, C, 2, 1 i 0,5 S, Službeni glasnik RS“, br. 14/2024. https://www.dmdm.rs/sr/dokumenti/podzakonski-propisi [pristupljeno 19.02.2026]

[8] Pravilnik o brojilima reaktivne električne energije klase tačnosti 2 i 3, Službeni glasnik RS, br. 118/2013 i 86/2014. https://www.dmdm.rs/images/dokumenti/podzakonski_propisi/Pravilnik_o_brojilima_reaktivne_elektricne_energije.pdf [pristupljeno 19.02.2026]

[9] SRPS EN 50470-3:2022 Electricity metering equipment - Part 3: Particular requirements - Static meters for AC active energy (class indexes A, B and C), 2022. https://iss.rs/en/project/show/iss:proj:67613 [pristupljeno 19.02.2026]

[10] SRPS EN IEC 62053-21:2022 Electricity metering equipment - Particular requirements - Part 21: Static meters for AC active energy (classes 0.5, 1 and 2), 2022. https://iss.rs/sr_Cyrl/project/show/iss:proj:63394 [pristupljeno 19.02.2026]

[11] SRPS EN IEC 62053-22:2022 Electricity metering equipment - Particular requirements - Part 22: Static meters for AC active energy (classes 0.1S, 0.2S and 0.5S), 2022. https://webstore.iec.ch/en/publication/29987 [pristupljeno 19.02.2026]

[12] Pravila o radu prenosnog sistema, 2023. file:///V:/DOWNLOADS/Pravila-o-radu-prenosnog-sistema-07.11.2023-1.pdf [pristupljeno 19.02.2026]

[13] Dukanac, Đ. Analiza vremena ispitivanja i greške očitavanja pametnih brojila električne energije u zavisnosti od njihovog podešenja, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 21, No. 1, pp. 50-55, 2021. https://doi.org/10.46793/EEE21-1.50D

[14] Dukanac, Đ. Analiza vremena provere registara aktivne električne energije i greške očitavanja električnih brojila pri različitim načinima podešenja prenosnih odnosa mernih transformatora u brojilima, in Proc. *XII savetovanje o elektrodistributivnim mrežama sa regionalnim učešćem,* Srbija, Vrnjačka Banja 30 avgust - 3 septembar 2021. https://www.cired.rs/wp-content/uploads/Radovi/VB2021/STK4/R-4.17_20373_Djordje%20Dukanac_ANALIZA%20VREMENA%20PROVERE%20I%20TACNOSTI%20REGISTARA%20AKTIVNE%20ENERGIJE%20ELEKTRICNIH%20BROJILA%20PRI%20RAZLICITIM%20NACINIMA%20PO.pdf [pristupljeno 19.02.2026]

[15] Dukanac, Đ. Drawbacks of Using Smart Meters of Accuracy Class 0.2S, Phase Current 1 A, and Phase Voltage 58 V in High-Voltage Stations That Display Secondary Electrical Energy With a Resolution of Three Decimal Places, in Proc. *37th Conference CIGRE Serbia 2025*, Kopaonik, Serbia, pp. 889–905, May 26-30, 2025. https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B5.12

[16] Dukanac, Đ. Challenges in Verifying Electrical Energy Registers in the Process of Verifying Smart Meters in Terms of Domestic Regulations and Measurement Capabilities and by Comparison With International Standards and Regulations, in Proc. *37th Conference CIGRE Serbia 2025*, Kopaonik, Serbia, pp. 869–888, May 26-30, 2025. https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B5.11

[17] Dukanac, Đ. Mogućnosti za unapređenje kontrolisanja brojila električne energije klasa tačnosti 0,2S i 0,5S, in proc. *Energetika 2022 - dugoročni i kratkoročni izazovi započete energetske tranzicije u Srbiji*, Zlatibor, Srbija, 21-24. jun 2022. [pristupljeno 19.02.2026]

[18] Dukanac, Đ. Optimalno podešavanje rezolucije registra električne energije pametnog brojila, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. XXIV (2022), No. 2, pp. 75–85, 2022. https://doi.org/10.46793/EEE22-2.75D

[19] SRPS EN IEC 62053-23:2022 Electricity metering equipment - Particular requirements - Part 23: Static meters for reactive energy (classes 2 and 3), 2022. https://iss.rs/en/project/show/iss:proj:63396 [pristupljeno 19.02.2026]

[20] Czech Metrology Institute. Measure of a general nature, number: 0111-OOP-C022-24, laying down the metrological and technical requirements for specified instruments, including test methods for type-approval, verification and checking of specified measuring instruments: ‘electricity meters’, 2024. https://infosnake.net/services/wtomonitor/?id=86130 [pristupljeno 19.02.2026]

[21] Metrološko uputstvo za overavanje elektronskih (statičkih) višefunkcijskih brojila električne energije, „Glasnik ZMDM“ 1/07. https://www.dmdm.rs/images/dokumenti/podzakonski_propisi/MUP_elbrojila_el_en_visenamenski_1_07.pdf [pristupljeno 19.02.2026]

[22] Jurišević, I., Stanojević, V., Ignjatović, A. Novi sistemi za daljinsko prikupljanje i obradu podataka sa brojila na prenosnoj mreži Srbije, Elektroprivreda, Vol. 58, No. 4, 2006.

[23] Dukanac, Đ. Analiza ispunjenosti uslova za mernu nesigurnost sistema za kontrolu pametnih brojila i smanjenje vremena provere registra, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 2, pp. 61-70, 2024. https://doi.org/10.46793/EEE24-2.61D

[24] Dukanac, Đ. Advantages of Applying Smart Energy Meters of High Accuracy Classes to Collect Data on Power Quality in Electric Power

System, in Proc. *37th Conference CIGRE Serbia 2025*, Kopaonik, Serbia, pp. 849-868, May 26-30, 2025. https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B5.10

[25] Landis+Gyr E860, https://www.landisgyr.com/us/en/home/devices/asia-pacific/e860 [pristupljeno 19.02.2026]

AUTORI

Đorđe Dukanac - doktor elektrotehnike i računarstva, Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd, Srbija, djordje.dukanac@ems.rs, ORCID: 0000-0002-1090-3129

Improving the Accuracy of Checking Electrical Energy Registers of Smart Meters Using a New Procedure

Abstract – In this paper, a new, metrologically more reliable procedure is proposed for checking the electric energy (EE) registers of smart meters of different accuracy classes in the meter verification procedure, in relation to those prescribed by the corresponding valid domestic regulations and the international recommendation of the OIML and the SRPS IEC standard. The applicant for meter verification often sets short deadlines for the completion of the verification and requests the lowest possible verification price, without considering the reliability of the verification methods used. In domestic regulations, as many as four different definitions have been introduced for checking registers of active EE accuracy classes A, B, C, 2, 1, 0.5S, and 0.2S, including those of reactive EE accuracy classes 2 and 3. For example, in the domestic Rulebook on active electricity meters of accuracy class 0.2S from December 23, 2016, a comparison of the set energy and the energy read on the meter register is prescribed, with the criterion that the relative difference should be less than 1/10 of the MPE (maximum permissible error) of the meter. However, in the inspection body "Elektromreža Srbije", in order to obtain results in a wider range of tolerance, MPE is taken as a criterion, and the minimum test time is taken according to the same formula from the Rulebook. Thus, a rough, poorly reliable method is obtained, the use of which is tacitly supported by the supervisory authority, i.e., the Directorate for Measures and Precious Metals. The new procedure is based on synchronous measurement of the mean random error and its indirect removal from the total register error, using a strict 1/10 MPE criterion for relative error.

Index Terms – Test (pulse) output, Inspection body, Register check, Maximum permissible error, Smart electricity meter

Rad primljen: 12.03.2026., prihvaćen: 01.09.2026.

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

https://savezenergeticara.online/