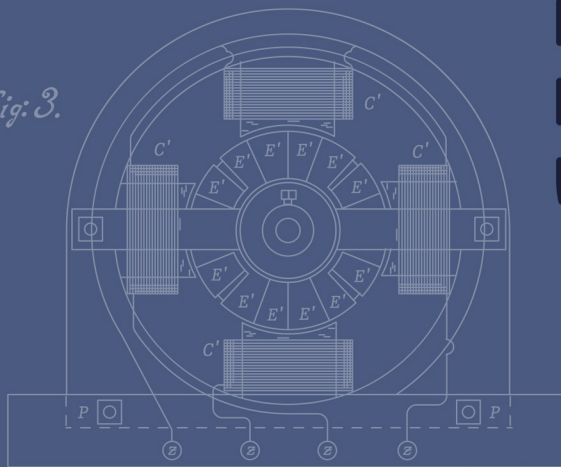


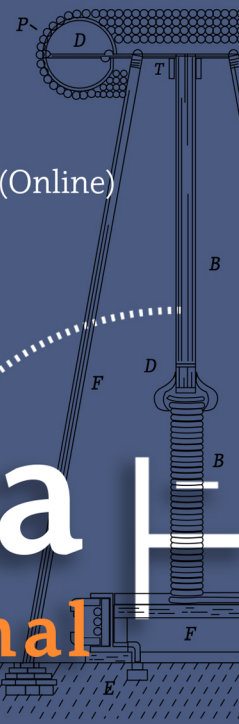


fig. 3.



ISSN 3009-2892 (Online)

UDK 620.9
621.31



WITNESSES
M. Lawson Esq.
Benjamin Miller

Elektroprivreda

Electric Power Industry Journal

2025

Godina 3, Broj 1
Volume 3, Issue 1





Elektroprivreda

Electric Power Industry Journal



Naučno-stručni časopis Akcionarskog društva „Elektroprivreda Srbije”
u suizdavaštvu sa Elektrotehničkim institutom „Nikola Tesla” Beograd



Godina 3, Broj 1

Sadržaj

Impresum	
Reč Uredništva	1-1
Članci	
<i>Tema broja: korišćenje obnovljivih izvora energije i novih tehnologija</i>	
Vladimir M. Šiljkut	
Izazovi i mogućnosti dugoročnog razvoja i dekarbonizacije „Elektroprivrede Srbije”	2-22
Jadranka M. Janjanin, Milan M. Danilović, Željko R. Jovanović	
Analiza potrebnih mesečnih količina električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije za nadoknadu gubitaka u prenosnom sistemu	23-33
Slavica Stojiljković, Vladimir M. Šiljkut	
Prikaz upravljačkih sistema vetrogeneratora	34-46
<i>Ostale oblasti</i>	
Tatjana Cincar Vujović	
Primenjena metrologija u Elektrodistribuciji Srbije	47-57
<i>Dodatak – prilozi</i>	
Uređivačka politika i tematske oblasti časopisa	58-58
Kategorizacija (rangiranje) rukopisa	59-59
Detaljno uputstvo autorima o načinu pripreme članka	60-64

ISSN 3009-2892 = Elektroprivreda (Online)

IZVRŠNI IZDAVAČ

AKCIONARSKO DRUŠTVO „ELEKTROPRIVREDA SRBIJE” BEOGRAD

11 000 Beograd, Balkanska 13

Elektronska prezentacija: www.eps.rs

Telefon Uredništva: +381-11-365-23-63

Imejl: epijournal.editor@eps.rs

Veb-platforma Časopisa: <https://epijournal.eps.rs>

SUIZDAVAČ

ELEKTROTEHNIČKI INSTITUT „NIKOLA TESLA” BEOGRAD

11 000 Beograd, Koste Glavinića 8a

Elektronska prezentacija: www.ieent.org

Telefon: +381-11-39-52-000

Telefaks: +381-11-36-90-487

ZA IZVRŠNOG IZDAVAČA

Dušan Živković, dipl. inž. el.

Generalni direktor EPS AD

ZA SUIZDAVAČA

Dr Dragan Kovačević, dipl. inž. el.

Direktor ETI „Nikola Tesla”

GLAVNI I ODGOVORNI UREDNIK

Dr Vladimir M. Šiljkut, dipl. inž. el.

IZDAVAČKI SAVET

Dr Dragan Kovačević, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla” Beograd

Nebojša Petrović, „Elektromreža Srbije” AD Beograd, predsednik CIGRE Srbija

Vanr. prof. dr Željko Popović, FTN Novi Sad, predstavnik CIRED Srbija

Mr Nenad Šijaković, „Elektromreža Srbije” AD Beograd

Mr Dušan Vukotić, „Elektro distribucija Srbije” DOO Beograd

Prof. dr Vladimir A. Katić, profesor u penziji FTN Novi Sad, predsednik Uređivačkog odbora

Dr Vladimir M. Šiljkut, „Elektroprivreda Srbije” AD Beograd, glavni i odgovorni urednik

UREĐIVAČKI ODBOR

Prof. dr Vladimir A. Katić, profesor u penziji FTN Novi Sad, predsednik

Prof. dr Dragutin D. Salamon, profesor u penziji ETF Beograd, zamenik predsednika

Prof. dr Aleksandar Gajić, Akademija inženjerskih nauka Srbije (AINS),
profesor u penziji Mašinskog fakulteta Beograd

Prof. dr Jovan Nahman, AINS, profesor u penziji ETF Beograd

Prof. dr Nikola Rajaković, predsednik Saveza energetičara Srbije, profesor u penziji ETF Beograd

Prof. dr Mladen Kezunović, Texas A&M University

Prof. dr Miroslav Begović, Texas A&M University

Prof. dr Jovica Milanović, University of Manchester, School for Electrical Engineering

Prof. dr Vladimir Terzija, Newcastle University

Prof. dr Boris Dumnić, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Prof. dr Luka Strezoski, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad

Prof. dr Dragan Tasić, Elektronski fakultet, Niš

Prof. dr Lidija Korunović, Elektronski fakultet, Niš

Prof. dr Dragana Životić, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd

Prof. dr Mića Jovanović, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Vanr. prof. dr Tina Dašić, Građevinski fakultet, Beograd

Doc. dr Jelena Ponoćko, SP Energy Networks i University of Manchester, School for Electrical Engineering

Dr Ana Dajić, Tehnološko-metalurški fakultet, Beograd

Dr Dragoslav Perić, honorarni konsultant, Beograd

Dr Saša M. Stojković, Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija, Beograd

Dr Dragan Kovačević, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd

Dr Ninel Čukalevski, Institut „Mihajlo Pupin”, Beograd

Dr Milinko Radosavljević, Rudarski institut, Beograd

Dr Marija Đorđević, „Elektromreža Srbije” AD, Beograd

Dr Jasna Marković Petrović, EPS AD, Beograd

Dr Rada Krgović, EPS AD, Beograd
Dr Vladimir Đorđević, EPS AD, Beograd
Dr Milorad Pantelić, EPS AD, Beograd
Dr Milisav Tomić, EPS AD, Beograd
Mr Dragan Vlasisavljević, Beograd
Mr Aleksandar Jakovljević, EPS AD, Beograd
Mr Nikola Obradović, „Elektromreža Srbije” AD, Beograd
Vladan Ristić, „Elektromreža Srbije” AD, Beograd
Radovan Stanić, EPS AD, Beograd
Biljana Stekić Jovanović, EPS AD, Beograd
Jovan Ilić, EPS AD, Beograd
Milan Đorđević, EPS AD, Beograd
Radoš Čabarkapa, Elektroenergetski koordinacioni centar, Beograd
Aleksandar Latinović, EPS AD, Beograd
Željko Lazarević, EPS AD, Beograd

TEHNIČKO UREDNIŠTVO

Razvoj, dizajn i uređivanje veb-platforme

Igor Medenica (ED Srbije DOO)
Danilo Mijatović
Radovan Brajović

Lektor i korektor

Milesa Karadžić

Prevodioci

Jasna Đurović
Srđan Bugarić
Ivana Jevtović
Sunčica Đokić Krstić
Ranka Mladenović

Tehnički sekretarijat

Mr Angelina Milovanović
Dejana Kosanović

Časopis „Elektroprivreda“ – *Electric Power Industry Journal*
izlazi dvaput godišnje, isključivo u elektronskom obliku,
na <https://epijournal.eps.rs> i tipa je *Open Access*

COBISS.SR-ID - 121874441

UVODNA REČ UREDNIŠTVA

Poštovani čitaoci i saradnici,

Pred vama je treće, redovno izdanje Časopisa „Elektroprivreda” – *Electric Power Industry Journal*. U želji da zadržimo aktuelnost i da dodatno podstaknemo stručnu i naučnu diskusiju o tome u kom pravcu je tehnički, tehnološki, ekonomsko-finansijski, ali i ekološki i sociološki opravdano usmeriti brod srpske energetike na pučini dekarbonizacije i energetske tranzicije, ovaj broj započinjemo pregledom i mogućnostima novih tehnologija i uvidom u studijska razmatranja mogućnosti korišćenja potencijala kojima Srbija raspolaže.

Naime, u cilju očuvanja što većeg stepena njene energetske nezavisnosti, od presudne važnosti vidimo upravo prioritarno korišćenje resursa kojima sama Srbija raspolaže. Stoga je već od ovog momenta, pa sve do 2050. godine i zahtevanog napuštanja tehnologija zasnovanih na fosilnim gorivima, od izuzetne važnosti činiti promišljene korake da bi se ovakav status – elektroenergetska nezavisnost – zadržao i tokom „zelene” tranzicije i po ostvarenju njenog cilja. Da bi se ostvario jedan takav scenario, koji smatramo jednim opravdanim, prvi neophodan korak je realno, stručno i nepristrasno proceniti resurse koje Srbija ima, i na koje bi se maksimalno mogla osloniti. To se jednako odnosi na potencijale sunčeve energije i vetra, biomase, geotermalne energije, kao i na preostali, dosad neiskorišćeni, hidropotencijal. Naime, novi hidrosistemi sa sedmičnim i sezonskim akumulacijama, a posebno reverzibilne hidroelektrane i pumpno-akumulaciona postrojenja, dodatno bi podstakli izgradnju vetroparkova i solarnih elektrana u Srbiji, neophodnih na putu dekarbonizacije i energetske tranzicije. Ovakvi hidrokapaciteti bi, svojim karakteristikama i adekvatnim pogonom, ublažavali problem naglih i velikih varijacija u proizvodnji energije, koji će se s vremenom uvećavati usled sve većeg udela intermitentnih izvora u nacionalnom proizvodnom portfelju. Uz odgovarajuće angažovanje novih, reverzibilnih hidrokapaciteta u trenucima kada je to i u tržišnom smislu optimalno i najpovoljnije, bio bi ostvarivan dodatni prihod, unapređujući i finansijske performanse elektroprivrede.

Od varijabilne proizvodnje solarnih elektrana i vetroelektrana još ozbiljniji, strateški problem za elektroenergetski sistem Srbije predstavlja činjenica da trenutno gotovo 70% električne energije potiče iz termoelektrana na niskokalorični linit. Stoga je jednako važno da, u saradnji sa naučnom zajednicom, struka istraži i mogućnosti primene novih tehnologija koje bi omogućile postepenu zamenu termokapaciteta u funkciji pokrivanja baznog dela dijagrama opterećenja, i utvrdi čija je primena realistična, najpogodnija i opravdana u našim uslovima i prilikama. Pri tome takođe treba uvažiti važnost obezbeđivanja najvišeg mogućeg nivoa elektroenergetske nezavisnosti Republike Srbije.

Po jedan tekst ovog izdanja posvećen je posebnim aspektima upotrebe intermitentnih „zelenih” izvora; prvi – mogućnosti korišćenja proizvodnje iz elektrana na obnovljive izvore energije za pokrivanje gubitaka električne energije u sistemu, a drugi – upravljačkim sistemima vetrogeneratorâ. Drugu, takođe značajnu, temu ovog broja – metrologiju – čitaocima će približiti jedan zanimljiv i koristan članak o međulaboratorijskom poređenju kontrolnih tela za overu brojila električne energije, Operatora distributivnog sistema.

Na kraju ovog Uvodnika, nadajući se da će vam sadržaj ovog broja biti zanimljiv, aktuelan i od koristi, ponavljamo naš poziv na aktivno učešće čitalačke publike. Dakle, svako ko bude zaintrigiran nekim od stavova, ideja i predloga iznetih u tekstovima koji slede i nađe za shodno da to učini, slobodno može dostaviti Uredništvu svoju diskusiju, polemiku ili lični stav po konkretnom pitanju. Rado ćemo ih razmotriti i sagledati mogućnost za njihovo objavljivanje u narednom broju Časopisa.

U ime Uredništva,



Dr Vladimir Šiljkut
Glavni i odgovorni urednik

Vladimir M. Šiljkut*



Izazovi i mogućnosti dugoročnog razvoja i dekarbonizacije „Elektroprivrede Srbije”

¹ Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije” Beograd

Pregledni rad

Ključne poruke

- Pregled najnovije literature o dekarbonizaciji, tranziciji i cirkularnoj ekonomiji
- Predlog modela dekarbonizovanog elektroenergetskog sistema na primeru Srbije
- Mogućnosti i izazovi za diversifikaciju energenata i primenu novih tehnologija
- Predlog načina transfera znanja u energetsom sektoru iz akademskog domena u domen industrije/privrede

Kratak sadržaj

Zagađenje životne sredine i trošenje resursa za rad i razvoj industrije i nacionalnih ekonomija učinilo je neminovnim iznalaženje tehničko-tehnoloških rešenja koja će omogućiti održivi razvoj u budućnosti. Dekarbonizacija, cirkularna ekonomija i diversifikacija energenata se stoga nameću kao rešenje. I u (elektro)energetskom sektoru one podrazumevaju energetske tranziciju, prvenstveno od sadašnjeg masovnog korišćenja fosilnih goriva ka ekološki prihvatljivijim primarnim energentima, uz povećanje energetske efikasnosti kojim bi se obuhvatilo i povećanje obima korišćenja otpadne toplote i otpadnih materija u procesima proizvodnje toplotne i električne energije. Dekarbonizacija, međutim, otvara niz složenih pitanja i problema; od tehničko-tehnoloških i ekonomsko-finansijskih – načina, dinamike i cene sprovođenja tog dugoročnog procesa – do pitanja njene prihvatljivosti, pravednosti i potrebe sticanja odgovarajućih znanja i svesti. Na primeru Srbije, njenog elektroenergetskog sistema (EES) i „Elektroprivrede Srbije” (EPS) pokazuje se da je potrebno postepeno, tokom nekoliko decenija, uspostaviti takav proizvodni miks koji bi bio zasnovan i oslonjen na različite ekološki prihvatljive energente i na nove tehnologije, koji će biti ne samo izvodljiv i održiv na dugi rok nego i tehnički, finansijski i ekonomski optimalan za srpske uslove i prilike, kao i društveno prihvatljiv. Osim toga, taj miks mora omogućiti profitabilan rad EPS-a uz istovremenu sposobnost da obezbedi stabilnost i pouzdanost rada EES-a Srbije, sigurnost snabdevanja krajnjih korisnika, najviši mogući nivo energetske nezavisnosti i bezbednosti Republike Srbije i zadovoljstvo krajnjih korisnika EES-a i zaposlenih u EPS-u. Pri tome, u najvećoj mogućoj meri treba poštovati i primenjivati principe koji će voditi ka povećanju energetske efikasnosti, uspostavljanju cirkularne ekonomije i smanjenju negativnih uticaja na životnu sredinu, kao i na socijalni aspekt. Izbor najpogodnijih i najprimerenijih novih tehnologija i konkretnih tehničkih rešenja novih kapaciteta za proizvodnju električne i toplotne energije ubuduće treba da bude vršen na osnovu mišljenja i zaključaka do kojih će doći eksperti iz naučnih i stručnih krugova, svojim zajedničkim radom i sinergijskim delovanjem.

Ključne reči

Cirkularna ekonomija, dekarbonizacija, diversifikacija, energenti, energetska efikasnost, energetska tranzicija

Primljeno: 26. februar 2024. Recenzirano: 13. mart 2024.
Izmenjeno: 27. mart 2024. Prihvaćeno: 18. april 2024.

* Vladimir M. Šiljkut, +381-64-897-46-72
E-mail: vladimir.siljkut@eps.rs

1. UVOD

Suočeno sa sve većim zagađenjem životne sredine i sve bržim iscrpljivanjem resursa na kojima se još uvek u ogromnoj meri zasniva funkcionisanje svekolike industrije, nacionalnih ekonomija i opstanak naše civilizacije, čovečanstvo treba da prihvati neminovnost iznalaženja tehničko-tehnoloških rešenja koja će omogućiti održivi razvoj u budućnosti. Dekarbonizacija, cirkularna ekonomija i diversifikacija energenata se stoga nameću kao neminovnost. I u samom energetske sektoru, uključujući i elektroenergetiku, one podrazumevaju energetske tranzicije, prvenstveno od sadašnjeg masovnog korišćenja fosilnih goriva ka ekološki prihvatljivijim primarnim energentima, uz povećanje energetske efikasnosti kojom bi se obuhvatilo i povećanje obima korišćenja otpadne toplote i otpadnih materija u procesima proizvodnje toplotne i električne energije. Na putu dekarbonizacije, međutim, otvara se niz složenih pitanja i problema; od tehničko-tehnoloških i ekonomsko-finansijskih – načina, dinamike i cene sprovođenja tog dugoročnog procesa (koja se mora uporediti s cenom nepreduzimanja neophodnih mera), do društvenih pitanja njene prihvatljivosti i pravednosti i potrebe sticanja odgovarajućih znanja i svesti svih zainteresovanih strana. Tekst koji sledi ima ambiciju da se ovim pitanjima pozabavi, počev od pregleda najnovije svetske literature u ovoj oblasti do analize mogućnosti i skiciranja predloga kako bi ova tranzicija mogla da izgleda na primeru Srbije, njenog elektroenergetskog sistema i najvećeg energetske subjekta, Akcionarskog društva „Elektroprivreda Srbije” (EPS).

Tokom pola veka globalizacija je bila pokretačka snaga u razvoju svetskih ekonomija, [1]. Pored pozitivnih efekata, globalizacija je izazvala i negativne posledice: ubrzane klimatske promene, degradaciju prirodnih resursa i povećane emisije štetnih materija. Zato se u poslednjoj deceniji značaj klimatske politike i dekarbonizacije sve više pojavljuje na svetskoj agendi. Pored toga, nedavni geopolitički događaji, uključujući pandemiju COVID-19, rat u Ukrajini i druge, dodatno naglašavaju važnost „zelenih” rešenja za oporavak i dekarbonizaciju ekonomija. Članak [1] ukazuje na značaj politike dekarbonizacije i identifikuje mogućnost rešavanja ekoloških i energetske problema izazvanih globalizacijom.

Fosilna goriva i dalje učestvuju sa oko 64% u proizvodnji energije i sa preko 80% u emisijama CO₂ koje nastaju ljudskom aktivnošću. Oko 35 milijardi tona CO₂ godišnje potiče od sagorevanja fosilnih goriva. U [2] se predlažu jedinstvena praktična rešenja koja bi obezbedila glatku tranziciju tokom dekarbonizacije, poput jačanja mreža i jačanja interkonekcija, zatim stvaranja manjih i efikasnijih mikromreža, poboljšanja energetske efikasnosti postojećih elektroenergetskih infrastruktura, odgovarajuće

kratkoročne, srednjoročne i dugoročne politike nacionalnih vlada o energiji, ulaganja u tehnologije obnovljivih izvora, kao što su sunce i vetar, u nuklearne tehnologije, nabavku sistema za skladištenje energije i druga ulaganja u tehnološke pogone, uz transparentnost svih procedura zbog suzbijanja korupcije.

Globalni energetske sektor prolazi kroz period istorijskih promena u kojima se dešava velika promena u izvorima energije, [3]. Energetske sektor se pomera ka održivijoj, ekološki prihvatljivijoj proizvodnji i potrošnji svih izvora energije, [4]. Mogućnosti i izazovi globalne energetske tranzicije prevazilaze granice, jer se fluktuacije i nedostaci raspoložive i potrebne energije mogu nadoknaditi samo u regionalnim i globalnim razmerama, [3]. Napuštanje fosilnih goriva (dekarbonizacija), kao put ka postizanju klimatske neutralnosti, podrazumeva masovno energetske restrukturiranje i nova ulaganja. Iz globalne perspektive, prioritet dekarbonizacije je postepeno izbacivanje uglja iz upotrebe. Ono što nesumnjivo karakteriše 21. vek jesu mnoge pilot i alternativne tehnologije koje imaju veliki potencijal za dekarbonizaciju (tzv. menjači igre), niske cene fosilnih goriva (jer izostavljaju eksterne troškove koje nameću zdravlju i životnoj sredini), kao i neophodnost pomeranja kako na strani tražnje tako i na strani ponude u privredi, kako bi se više koristili obnovljivi izvori energije (OIE). Shodno tome, rad [3] analizira i istražuje potencijale tri glavna pokretača restrukturiranja energetske sistema. To su:

- kombinacija signala tržišnih cena i cena CO₂;
- povećana upotreba OIE;
- brza diversifikacija snabdevanja energijom korišćenjem alternativnih tehnologija.

Istraživanje [3] jeste hronološki zasnovano na analizi globalnog energetske sistema, pri čemu se ističu zanemareni debalansi na strani ponude i potražnje energije. Opisno su objašnjeni izvori energije koji danas snabdevaju zemlje Evropske unije (EU), a analiza obuhvata uzroke i posledice ovakvog ishoda. Da bi se razumeli glavni pokretači globalne dekarbonizacije, treba naglasiti da, za razliku od stalnih resursa koji su uvek dostupni, bez obzira na oblik ljudske aktivnosti usmerene na njih, OIE imaju moć regeneracije pod uslovom da intenzitet njihovog obnavljanja nije ugrožen obimom njihove upotrebe. Stoga, korišćenje ovih resursa može biti vremenski ograničeno uprkos njihovoj obnovljivoj prirodi. Shodno toj činjenici, [3] bavi se analizom korišćenja alternativnih izvora, ukazujući na potrebu diversifikacije snabdevanja energijom u kratkoročnom i dugoročnom periodu.

Klimatske promene, društvene i upravljačke teme i teme u vezi sa zaštitom životne sredine, ESG (*Environment, Social, and Governance*), otvaraju važne debate o izazovima u pravcu energetske tranzicije, upravljanja širokim spektrom zainteresovanih strana, kao i

prednostima i mogućnostima koje se odražavaju na dugoročne izgleda jedne kompanije, uzimajući u obzir brigu za životnu sredinu, finansijske performanse jednog preduzeća, otpornost na poremećaje i sposobnost da održi svoje poslovanje i kontinuitet poslovanja tokom nepovoljnih situacija u odgovarajućim i efektivnim okvirima upravljanja. Zahtevaju se značajna ulaganja u infrastrukturu i tehnologiju, kao i saradnja više zainteresovanih strana, uključujući vladu, industriju i međunarodnu zajednicu. Takođe, važni su modeli upravljanja i jasne mape puta u vezi sa vladinim politikama i podsticajima, kako bi ona bila uspešna, [4].

U elektroenergetici, dekarbonizacija i zamena termoelektrana na uglj solarnim elektranama i farmama vetrogeneratora zahtevaju adekvatno velike kapacitete za skladištenje energije, kako bi se očuvala fleksibilnost i stabilnost rada elektroenergetskog sistema (EES), na koje negativno utiče intermitentnost proizvodnje iz ovih obnovljivih izvora. Ovo je posebno važno za zemlje kao što je Srbija, u kojoj se gotovo 70% električne energije i dalje obezbeđuje iz uglja, i to niskokaloričnog lignita. Pri tome, u Srbiji je i dalje na snazi moratorijum na gradnju nuklearnih elektrana, pa ne postoji jednoznačno rešenje drugog, još ozbiljnijeg problema – nedostatka velike količine energije za pokriće baznog dela dnevnog dijagrama opterećenja (potražnje).

U sličnoj situaciji je, recimo, i Poljska, u kojoj se proizvodnja električne energije takođe bazira na uglju (doduše na kvalitetnijoj vrsti uglja), i koja još uvek nema nuklearnu elektranu, [5]. Superkondenzatori predstavljaju novu generaciju skladišta energije i bili bi jedno od mogućih rešenja za navedene probleme. U [5] pokazuje se da upotreba superkondenzatora predstavlja mogućnost povećanja učesća solarnih elektrana i vetroelektrana na energetskom tržištu. Nadasve, nema potrebe da se sve elektrane na uglj (koje se postepeno gase) zamene nuklearnim. U [5] ističe se da svaka dalja dekarbonizacija i povećanje udela OIE na poljskom energetskom tržištu zahteva izgradnju i angažovanje objekata velikih skladišta energije. Baterijska postrojenja imaju relativno kratak vek trajanja, a sama njihova proizvodnja rezultira značajnim efektima emisija gasova staklene bašte (*Green House Gases*, GHG). I po isteku životnog veka baterije imaju negativan uticaj u domenu životne sredine i troškova, jer predstavljaju opasan otpad koji zahteva odgovarajući tretman. Sa druge strane, široka upotreba superkondenzatora u novoj generaciji skladišta energije otkriva nove mogućnosti i podstiče napore za dekarbonizaciju. Na osnovu godišnje analize proizvodnje električne energije po satu iz vetroelektrana i fotonaponskih elektrana, u [5] predlaže se formula za izračunavanje kapaciteta skladišta električne energije,

proizvedene uglavnom u OIE, koji je neophodan za stabilan rad nacionalne električne mreže.

Uglj i prirodni gas dominirali su i energetskim sektorom zemalja Asocijacija nacija jugoistočne Azije (ASEAN) u prošlosti i doprineli su 77% proizvodnji električne energije u 2019, [6]. Da bi do 2050. godine dostigle nultu vrednost emisija, zemlje ASEAN-a moraju da dekarboniziraju svoj energetski sektor u naredne tri decenije. Na putu dekarbonizacije otvara se ključno pitanje – odabir odgovarajućih novih tehnologija, čija primena treba da je učini mogućom i izvodljivom. Rad [6] izvodi vežbu tehnološkog skininga za deset tehnologija dekarbonizacije za energetski sektor na osnovu holističkog pristupa održivosti, bezbednosti, pristupačnosti, pouzdanosti, spremnosti i uticaja tehnologije. Ova vežba je rezultirala rangiranjem tehnologija za određene zemlje. Uopšteno govoreći, potrebno je istovremeno korišćenje i fosilnih i nefosilnih tehnologija, umesto da se čeka da određene tehnologije sazru. Na fosilnoj strani, prelazak sa uglja na gas za proizvodnju energije i implementacija zahvatanja i skladištenja ugljenika (*Carbon Capture and Storage*, CCS) u termoelektranama na uglj i gas imaju najveći potencijal za dekarbonizaciju. Stoga je u [6] predloženo 11 projekata CCS-a „prvog pokretača” sa potencijalom da ublaže do 22% emisije CO₂ povezanih sa energijom u ASEAN-u. Na strani obnovljivih izvora, hidroenergija ima najveći potencijal. Dalje povećanje kapaciteta verovatno će biti u protočnim hidroelektranama. Unutar ASEAN-a postoji srednji do visok potencijal za dalje korišćenje poljoprivrednih oblasti kao izvora biomase za proizvodnju električne energije, posebno u Indoneziji, Tajlandu, Maleziji i Filipinima. Fotonaponski (PV) solarni sistemi imaju srednji potencijal u zemljama ASEAN-a sa velikom kopnenom površinom, ali je potrebno više istraživanja i razvoja (R&D) u poboljšanju mreže i tehnologijama skladištenja energije. Unutar ASEAN-a energija vetra pati od niske prosečne brzine vetra, ali postoje izuzeci. Potrebno je više istraživanja i razvoja u pogledu vetroturbina za male brzine vetra. Geotermalni resursi se nalaze samo u Indoneziji i na Filipinima i nedovoljno se koriste. Dalja implementacija će zahtevati povoljne vladine politike za podsticanje privatnih investicija i racionalizaciju izdavanja dozvola, između ostalog. Takođe se raspravlja o energetskim politikama koje promovišu brzu dekarbonizaciju energetskog sektora ASEAN-a, na osnovu zaključaka u [6].

Kao što je već pomenuto, dekarbonizacija energetskih sistema zahteva primenu varijabilnih obnovljivih izvora energije (vetar i solarna energija, V-OIE), i to sa sve nižim troškovima. Rast broja i instalisane snage ovih OIE utiče na cene električne energije, što može uticati na investicije u hidroenergiju i na usvajanje opcija na bazi fosilnih goriva za proizvodnju električne energije radi pokrivanje baznog

opterećenja, [7]. Stoga ostaje nejasno da li bi, u odsustvu dobro osmišljene politike, primena više V-OIE zaista smanjila neto emisije ugljenika u energetske sisteme. Studija [7] prvo je razvila tehnokonomski model optimizacije kako bi se istražili uticaji budućih projekcija V-OIE na dugoročne cene električne energije i naknadne investicije u hidroenergiju, koristeći kinesku provinciju Hubei kao studiju slučaja. Zatim su kvantifikovane emisije ugljenika u vezi sa promenom ulaganja u hidroenergiju. Bez intervencija, niža cena električne energije mogla bi do 2050. da dovede do smanjenja investicija u hidroenergiju za 42%. Uz povećani udeo V-OIE i smanjene investicije u hidroenergiju, očekuje se da će energetske sisteme primeniti više rezervnih opcija za fosilna goriva, pa autori [7] tvrde da bi se emisije CO₂ mogle povećati za čak 45%. Stoga bi korišćenje više V-OIE smanjilo investicije u hidroelektrane i neočekivano dodatno otežalo dekarbonizaciju, što ukazuje na mogući paradoks u energetske tranziciji. Taj paradoks zahteva novu i robusnu politiku koja će obezbediti da se koristi od dekarbonizacije ostvare bez obzira na potencijalne promene cena električne energije.

Stope eksploatacije prirodnih resursa ubrzano rastu. Stoga razmišljanje o kružnoj (cirkularnoj) ekonomiji predstavlja priznanje da više ne možemo biti ravnodušni prema ograničenim resursima kojima raspolažemo na našoj planeti. Razvijeni su novi poslovni modeli i alati koji će podržati budućnost otporniju na poremećaje, [8]. Cirkularna ekonomija će svojim regenerativnim konceptima pomoći u smanjenju eksploatacije prirodnih resursa. Dekarbonizacija se može odnositi na udaljšavanje od energetske sisteme koji proizvode ugljen-dioksid (CO₂) i emisije drugih GHG-a ili se može odnositi na uklanjanje nakupljenog ugljenika i naslaga ugljenika iz motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Oba procesa imaju iste ciljeve uklanjanja ugljenika, ali na različite načine. Dekarbonizacija energije uključuje pomeranje celog energetske sisteme kako bi se sprečilo da emisije ugljenika uđu u atmosferu pre nego što se uopšte ispuste, a deo tog procesa takođe uključuje korišćenje tehnologija za zahvatanje ugljenika, radi uklanjanja CO₂ iz vazduha nakon što je već ispušten. Ovo uključuje dekarbonizaciju energetske mreže, dekarbonizaciju lanaca snabdevanja i korišćenje sekvenciranja ugljenika u potrazi za neto nultim emisijama i globalnom ekonomijom koja bi bila ugljenično neutralna. Cirkularna ekonomija će pomoći da se produži životni ciklus proizvoda, sačuvaju resursi koji dovode do nultog rasipanja i potpomogne dekarbonizaciju smanjenjem ugljeničnog otiska. Ciljevi održivog razvoja podstiču implementaciju cirkularne ekonomije i dekarbonizaciju, s integrisanim pristupom svih zainteresovanih strana u društvu. Članak [8] proučava kako cirkularna ekonomija služi kao katalizator dekarbonizacije.

Pregled globalnih emisija CO₂ tokom prošlog veka pokazuje da su emisije iz 80 nacionalnih ekonomija doprinele 95% globalno zabeleženim emisijama, [9]. Među njima, 55 ekonomija je bilo „dekarbonizatorsko“, gde su emisije CO₂ ili već pale ili opadaju, dok je 25 ekonomija bilo zagađivačko, kod kojih su emisije CO₂ i dalje bile u porastu. Godine 2021. globalne emisije CO₂ iznosile su 37,1 Gt_{pa}, s tim što 56% dolazi od zagađivača i 39% od dekarbonizatora. Ako se trenutni trendovi nastave, globalne emisije CO₂ će do 2050. godine dostići 49,6 Gt_{pa}, pri čemu bi 81% dolazilo od zagađivača i 14% od dekarbonizatora. Samo 14 ekonomija će dostići neto nultu emisiju CO₂. Cilj dekarbonizacije za postizanje neto nule izračunava se za svaku ekonomiju. Dekarbonizatori treba da smanje emisije CO₂ za 230 Mt_{pa}, a zagađivači čak za 1365 Mt_{pa} CO₂, počevši od 2021, kako bi dostigli neto nulti cilj do 2050. Kako se dekarbonizacija bude odlagala, tako će se ovaj cilj povećavati svake godine. Analize pokazuju da je udeo OIE u ukupnoj finalnoj potrošnji energije u većini ekonomija porastao, u proseku za samo 4% u poslednjoj deceniji, što je neadekvatno postizanju neto nule do 2050. godine. Stoga se u [9] predlažu putevi za ubrzanje dekarbonizacije i razmatraju se njihove implikacije na politiku. Pri tome je primenjena sledeća metodologija: u prvom koraku se, na osnovu baze podataka o globalnim emisijama CO₂, obavlja uvid u istoriju, na osnovu čega se vrši pomenuta klasifikacija na zagađivače, dekarbonizatore i ostale; u drugom koraku se za prve dve kategorije prognoziraju emisije CO₂ u budućnosti; u trećem koraku se utvrđuju ciljevi dekarbonizacije, za obe kategorije, i pri tome, uzimajući u obzir i pretpostavljenu globalnu potrošnju energije prema bazi podataka o tipovima goriva, diskutuje se o različitim, ekonomsko specifičnim putevima dekarbonizacije: sa dominacijom uglja, sa dominacijom gasa i nafte i sa dominacijom nefosilnih goriva. Na osnovu rezultata prezentovanih u [9] biva jasno da će biti potrebna i druga sredstva dekarbonizacije, uključujući i fosilna rešenja sa niskim sadržajem ugljenika, kroz zahvatanje i skladištenje ugljenika.

Kroz analizu postojeće literature i politika različitih zemalja, u [1] identifikuje se potencijal politika dekarbonizacije, u cilju ublažavanja negativnih uticaja globalizacije na životnu sredinu i energetske sektore. Nalazi [1] sugerisu da usvajanje politika dekarbonizacije može dovesti do smanjenja emisije GHG-a, poboljšanja energetske efikasnosti, razvoja OIE i „zelenih“ radnih mesta, što na kraju doprinosi održivijoj i otpornijoj globalnoj ekonomiji.

U [10] pružaju se informacije koje će pomoći u usvajanju uspešnih mapa puta za dekarbonizaciju ili projekata dekarbonizacije fokusiranjem na lance vrednosti. Autori [10], koristeći primer iz sektora saobraćaja (tj. kompanija u pomorskom sektoru), ističu važnost

razumevanja različitih aktivnosti i procesa uključenih u stvaranje vrednosti i njihovu međuzavisnost od drugih delova lanaca vrednosti u kojima posluju. Oni naglašavaju da dekarbonizaciju treba posmatrati kao zajednički poduhvat više isprepletenih lanaca vrednosti. Samo s ovom širokom perspektivom mogu se dostupna sredstva za dekarbonizaciju proceniti holistički i primeniti u vremenskom okviru koji društvo sve više zahteva.

U sveobuhvatnom razmatranju načina i ishoda dekarbonizacije potrebno je voditi računa i o socijalnom aspektu i pravičnosti tranzicije – od pitanja gašenja pojedinih i otvaranja novih radnih mesta, što podrazumeva i prekvalifikacije, do interakcije sa tržištem u raznim domenima, delatnostima i regionima. Trgovina i dekarbonizacija su dve neodvojive stvari. Istraživanje [11] koristilo je normativni pristup koji se fokusira na pravnim činjenicama. Rezultati su pokazali da dekarbonizacija i trgovina i dalje zahtevaju snažnu politiku zemalja Svetske trgovinske organizacije (STO). Reformulisanje politike STO-a koja se odnosi na primenu principa održivog razvoja zahteva poseban dogovor, uz uzimanje u obzir principa posebnog tretmana za zemlje u razvoju. Ovaj napor je potreban da bi se ostvarile pravda i pravna sigurnost. Mogućnosti za multilateralne pregovore su i dalje otvorene, dok se izazovom može smatrati jaz između razvijenih zemalja i zemalja u razvoju, [11].

U istraživačkom radu [12] ocrtavaju se izgledi za dekarbonizaciju, predviđajući napredak u „zelenim” tehnologijama, integraciju principa cirkularne ekonomije i evoluciju otpornih energetske sistema. Utemeljeno u ovim perspektivama, predlažu se strateške preporuke, naglašavajući potrebu za okvirima holističke politike, javno-privatnom saradnjom, podsticanjem održivog finansiranja, ulaganjem u istraživanje i razvoj i prihvatanjem pravednog tranzicionog pristupa. Ovo istraživanje doprinosi holističkom razumevanju složene interakcije između strategije, izazova i izgleda potrage za dekarbonizacijom u energetski intenzivnim industrijama. Analizirane su različite strategije koje se koriste u tri različita regiona – Kanada, Sjedinjene Države i Afrika. Istraživanje počinje detaljnim ispitivanjem sadašnjeg okruženja strategija dekarbonizacije, obuhvatajući tehnološke inovacije, političke i regulatorne okvire i pristupe zasnovane na tržištu. Prepreke kao što su ekonomska održivost, izazovi za usvajanje tehnologije i društveno-ekonomski uticaji pomno se razmatraju zajedno sa faktorima koji omogućavaju dekarbonizaciju, kao što su vođstvo vlade, tehnološke inovacije i održive finansije. Prikupljeni uvidi daju nacrt za kreatore politike, lidere industrije i zainteresovane strane, kako da se kreću zamršenim putem ka održivoj i otpornoj industrijskoj budućnosti.

Naime, očekuje se da će se industrijske emisije takođe povećati do 2050. godine (u SAD za 15%), što sektor industrije označava kao logičnu metu za napore za dekarbonizaciju, [13]. Putevi tehnologije energetske efikasnosti, kao što su strateško upravljanje energijom, efikasnost sistema, pametna proizvodnja, efikasnost materijala i kombinovana proizvodnja toplotne i električne energije, koji su dobro uspostavljeni, odmah bi smanjili potrošnju energije i emisije. U [13] raspoznata su četiri stuba industrijske dekarbonizacije: energetska efikasnost (kao kratkoročni), elektrifikacija industrije i niskokarbonska goriva, sirovine i energija (sve na srednji i duži rok), i zahvatanje, korišćenje i skladištenje CO₂ (na duži rok).

Dekarbonizacija industrijskog sektora igra ključnu ulogu u uspešnoj energetskoj tranziciji. Ova transformacija je, međutim, veoma skupa i složena, jer će mnogi postojeći proizvodni procesi i postrojenja morati da se delimično ili potpuno zamene kako bi se smanjile emisije CO₂, [14]. Pri ovome se postavlja i pitanje koliko i na koji način će značajna smanjenja emisija CO₂, kao rezultat dekarbonizacije, uticati na korišćenje resursa za proizvodnju određenog proizvoda i na ukupnu cenu održivosti. Članak [14] razmatra odnos između smanjenja CO₂ i efikasnosti korišćenja resursa u procesima industrijske proizvodnje. U tu svrhu, razvijena je metodologija koja holistički procenjuje put dekarbonizacije industrijskog sektora. Ova holistička procena uzima u obzir primarne energente, sirovine i pomoćne i konstruktivne materijale koji se koriste za rad i izgradnju značajnih komponenti postrojenja i sumira ih kao ukupno korišćenje resursa. U tu svrhu, korišćenje resursa je predstavljeno termodinamičkim količinama eksergija, koja uzima u obzir i energetsku i materijalnu komponentu određenog procesa proizvodnje. Energetski i materijalni tokovi u proizvodnom procesu balansiraju se primenom eksergetske analize. Metodologija iz [14] koristi se za trenutno najsavremenije i buduće dekarbonizovane proizvodne procese, u cilju kvantifikacije efekata procesa dekarbonizacije. Upoređivanjem izračunate efikasnosti korišćenja resursa, termodinamički uticaj na održivost puteva dekarbonizacije može biti postavljen u odnosu na količinu uštedenog CO₂. Na primeru proizvodnje amonijaka (NH₃), analiziranom u [14], pokazuje se da dekarbonizacija proizvodnog procesa smanjuje efikasnost upotrebljenih resursa za 14% (kad se umesto konvencionalne proizvodnje NH₃ reformingom metanske (CH₄) pare primeni dekarbonizovani način, proizvodnjom sintetskog gasa putem elektrolize vode i primenom jedinice za odvajanje vazduha). Pad efikasnosti resursa javlja se uglavnom zbog visokog nivoa povratne toplote i energije u konvencionalnom procesu, nasuprot čega stoji električno

veoma intenzivna proizvodnja vodonika u dekarbonizovanom procesu proizvodnje NH_3 .

Slično prethodnom, ni upotreba CH_4 za hemijsku proizvodnju, koja se često smatra budućnošću petrohemijske industrije, istorijski nije mogla da se ekonomski takmiči sa konvencionalnim procesima zbog većih investicionih troškova, [15]. Postizanje održivosti i dekarbonizacije ove industrije, integracijom sa procesom pretvaranja CH_4 u hemikalije, može pružiti priliku za omogućavanje budućnosti za ovakve tehnologije. Procesi pretvaranja gasa u hemikalije (tj. generalno, koncept *Power to X*, *P2X*) predstavljaju efikasan alat za povećanje dekarbonizacionog potencijala obnovljive energije. Dok je trenutna implementacija tehnologija zahvatanja ugljenika, njegovoga korišćenja i skladištenja (*Carbon Capture, Utilization and Storage*, CCUS) od velikog značaja za industrijsku dekarbonizaciju, veoma je poželjan prelazak na „zelenije”, CO_2 -slobodne, procese i korišćenje CO_2 iz spoljnih izvora za proizvodnju vredne robe. Pregled [15] opisuje potencijalne opcije za to kako bi proces „od metana do hemikalija” mogao podržati dekarbonizaciju industrije.

Još jedan od radova koji je pokušao da popuni deo praznine u oskudnom broju studija o ceni dekarbonizacije je i [16]. Ogromna većina studija, članaka i radova koji se bave održivošću usvaja jedan politički ili makroekonomski pristup. Društveni aspekti se retko duboko istražuju, a pitanje cene održivosti se u velikoj meri zanemaruje. Nakon pokušaja da razjasni koncept održivosti i centralnu ulogu koju igra dekarbonizacija, [16] ispituje pitanje globalne cene dekarbonizacije i analizira neke primere kompanija u tom pogledu. Metodologija primenjena u toj studiji zasnovana je na podacima izvučenim iz različitih izveštaja o održivosti, klimatskim promenama i dekarbonizaciji, za makroekonomsku dimenziju, i iz godišnjih izveštaja (za 2020. godinu) proučavanih kompanija. Ovi podaci se obrađuju tako da se izračunaju procenjeni troškovi dekarbonizacije. Čak i ako se dopuštaju velike margine greške zbog nepotpunih dostupnih podataka i parametara koji se ne mogu kontrolisati ili nisu poznati, nalazi [16] pokazuju da moguće procene govore da je cena dekarbonizacije apsolutno zbujujuća. Ona prevazilazi sve što obični građani, menadžeri i, naročito, političari mogu zamisliti. To može biti jak razlog zbog koga je ova tema u velikoj meri zanemarena, jer bi sigurno izazvala društvena previranja širom sveta.

Kada se posmatraju obim napora dekarbonizacije, sektor(i) na koji/e se cilja, vremenski okvir za postizanje ciljeva i specifične tehnologije i pristupi dekarbonizaciji koji se koriste, postoje različiti faktori koji utiču na cenu dekarbonizacije i koji bi u stvari mogli dovesti u rizik profitabilnost tradicionalnih poslovnih modela, [17]. Uopšteno govoreći, kada se uzme u obzir prošireni obim dekarbonizacije (koji ne cilja samo na proizvodni pogon

već i na upotrebu proizvoda), to može uključiti značajne troškove unapred za prelazak sa izvora energije zasnovanih na fosilnim gorivima na čistije alternative, kao što su OIE ili nuklearna energija. U [17] troškovi dekarbonizacije se odnose na cenu transformacije. Čak i ako se troškovi nedekarbonizacije i suočavanja sa uticajima klimatskih promena ne mogu u potpunosti proceniti, kako u ekonomskom tako i u ljudskom smislu, ulaganje u transformaciju podrazumeva značajna ulaganja unapred. Posmatrajući slične inicijative za transformaciju, [17] pruža okvir o tome šta treba uzeti u obzir prilikom transformacije i koje grupe troškova s uticajem na profitabilnost treba uzeti u obzir, uključujući vladine subvencije, poreske olakšice i politike cena ugljenika (takse). One mogu pomoći da se smanje troškovi dekarbonizacije i obezbede jednaki uslovi za tehnologije sa niskim sadržajem ugljenika kako bi se one takmičile sa fosilnim gorivima.

Članak [18] istražuje da li je ekonomska održivost ključ za postizanje duboke dekarbonizacije i neto nulte emisije. Testirana je hipoteza da je popularna podrška politici dekarbonizacije uslovljena verovanjem većine ljudi da će se njihovo ekonomsko blagostanje poboljšati, ili da barem neće patiti usled sprovođenja ovih politika. Dok je rast BDP-a tipična metrika za ekonomsko zdravlje, kao korisniji socioekonomski indikator za procenu političke održivosti klimatskih politika može biti pomenuto otvaranje novih radnih mesta. Konkretno, članak [18] daje uvid u postojeće dokaze o tome da li su klimatske politike dugoročno uspešnije u postizanju duboke dekarbonizacije ukoliko kreatori koji osmišljavaju i sprovode klimatske politike, osim smanjenja emisija GHG-a, podrazumevaju i otvaranje novih radnih mesta. Naime, do danas su se kreatori klimatske politike često fokusirali na smanjenje emisija kao primarni ili čak isključivi kriterijum. Dok su empirijski dokazi i dalje slabi, otkrivamo da otvaranje novih radnih mesta u niskougljeničnim industrijama vodi ka većoj političkoj podršci za klimatske politike koje doprinose dekarbonizaciji. Ipak, faktori zapošljavanja nisu uvek najistaknutiji faktor kod donosilaca odluka.

Rad [19] na sveobuhvatan način razmatra međusobne veze između klimatskih promena, dekarbonizacije i „zelenih” finansija. Hitnost rešavanja klimatskih promena i njihovih katastrofalnih posledica treba da se fokusira na „zelene” finansije kao vitalno oruđe u globalnoj borbi protiv štete po životnu sredinu. „Zelene” finansije uključuju obezbeđenje investicija, zajmova ili kapitala za podršku ekološki prihvatljivim aktivnostima, olakšavajući prelazak na održiviju budućnost. Pregled [19] istražuje teorijski referentni okvir za „zelene” finansije, uključujući i njihove uticaje na klimatske promene, dekarbonizaciju ekonomije, imovinu u vezi sa ugljenikom, upravljanje rizikom, obnovljivu energiju i održivi ekonomski rast. Pored toga, istražuje regionalne fokuse u Aziji, kao što je

značaj „zelenih” finansija u Kini i uverenja i izazove „zelenih” finansija u Bangladešu. Taj pregled takođe govori o budućim uputstvima i preporukama za unapređenje „zelenih” finansija. Pregled ispituje aktuelno istraživanje „zelenih” finansija i kako se može pozabaviti izazovima životne sredine i promovisati održivi razvoj. Više istraživanja treba da se sprovede u glavnim ekonomskim i finansijskim časopisima kako bi se premostio jaz u znanju i podstakao širi naučni angažman u „zelenim” finansijama. Istraživači, kreatori politike, investitori i zainteresovane strane dobiće pomoć iz pouzdanih i čvrstih uvida studije u borbu protiv klimatskih promena i promovisanje održivog razvoja, [19].

Za uspešnu dekarbonizaciju i energetske tranzicije ključno je permanentno unapređivati znanje u toj sveobuhvatnoj i kompleksnoj oblasti, koja podrazumeva okretanje novim tehnologijama i inovativnim tehničkim rešenjima, diversifikaciju primarnih energenata i izvora energije, primenu koncepata cirkularne ekonomije i održivosti, uz obezbeđivanje pomenutih „zelenih” finansija, neophodnih za njihovu implementaciju. Ne manje značajan je i socijalni aspekt i edukacija u cilju podizanja svesti – od neophodnosti zaštite životne sredine preko povećanja energetske efikasnosti do povećanja nivoa spremnosti svih zainteresovanih strana da prihvate primenu savremenih koncepata i tehničko-tehnoloških rešenja, kao i sveobuhvatne promene koje će to doneti.

Naime, pametni proizvodni sistemi omogućavaju istovremeno adresiranje produktivnosti, održivosti i društvenih poboljšanja, [20]. Implementacija takvih sistema u industrijama predstavlja obećavajući način za ispunjavanje zahteva zainteresovanih strana u vezi sa dekarbonizacijom njihovih proizvodnih aktivnosti. Članak [20], na primeru automobilske industrije, nudi novi koncept organizacije sa odnosima između aktera dekarbonizacije (energetski menadžeri i konsultanti), podržan tehničkim dizajnom alata za upravljanje IT znanjem. Upravljanje znanjem u kompanijama može biti realizovano pristupom zasnovanim na ljudstvu (međusobnim odnosima i okviru za upravljanje znanjem) i na IT (ekstrakcijom znanja rudarenjem podataka ili obradom podataka o tehnologijama i korišćenjem sistema upravljanja znanjem – modelovanjem znanja i sistema zasnovanih na znanju). Prilikom modelovanja, ključno je postaviti sledeća pitanja:

- Gde se energija troši?
- Zašto se energija troši?
- Na koji način se energija troši?
- Koje su posledice trošenja energije?

Zavisno od odgovora na ova pitanja, formira se specifikacija ciljeva i definišu ekološki i ekonomski prioritati. Na osnovu njih se mogu kreirati potrebne mere

za dekarbonizaciju. Prilikom modelovanja rešenja treba dati odgovore na sledeća pitanja:

- Ko kreira rešenje (eksterni dobavljač ili interno)?
- Ko verifikuje istraživanje (uspostavlja vezu sa kontekstom)?
- Na koji način rešenje funkcioniše (vrsta rešenja, podrška, tehnologija i praksa, principi rada)?
- Koje su performanse rešenja (ekološki i finansijski ključni pokazatelji performansi, na osnovu kojih se rangiraju sva moguća rešenja, po prioritetima i izabira ono najbolje)?

Na osnovu ovako koncipiranog okvira za kreiranje rešenja, [20], određuju se karakteristike proizvodnog pogona i modelovanje podataka relevantnih za sprovođenje mera dekarbonizacije u jedinstveni koncept, uz omogućavanje prenosivosti takvog rešenja sa jednog proizvodnog kapaciteta na drugi.

Na kraju, ali ne i najmanje značajno, osim razvoja znanja u oblasti, neophodno je poraditi i na podizanju svesti, kako zainteresovanih strana tako i šire zajednice. U tom cilju se sprovede i odgovarajuća istraživanja. Recimo, u [21] analizira se stav predstavnika tzv. generacije Z („zed”) iz Rumunije u pogledu poboljšanja energetske efikasnosti i dekarbonizacije korišćenjem modernih integrisanih tehnologija, kao što su toplotne pumpe, skladištenje toplotne energije i pametno upravljanje sistemom. Koriste se ulazni podaci iz ankete zasnovane na upitnicima, sprovedene između marta i juna 2023. godine, sa 389 validnih odgovora za sledeće svrhe:

- analizirati stav mladih ispitanika prema korišćenju održivih savremenih integrisanih tehnologija, kao što su toplotne pumpe, u cilju povećanja energetske efikasnosti i smanjenja ugljeničnog otiska;
- identifikovati faktore koji mogu uticati na njihov stav prema ovim tehnologijama;
- razumeti načine na koji nastali faktori mogu uticati na odnos prema korišćenju toplotnih pumpi, implicitno vodeći ka poboljšanju energetske efikasnosti i dekarbonizaciji u Rumuniji;
- formulisati politiku i preporuke za poboljšanje energetske efikasnosti i podsticanje dekarbonizacije u Rumuniji.

Studija [21] koristi različite deskriptivne statistike, faktorsku analizu i višestruku regresiju. Rezultati pokazuju da postoji šest kategorija faktora koji utiču na stav predstavnika generacije Z, sa „pokretačima za poboljšanje energetske efikasnosti” zajedno sa „tradicionalnim merama za poboljšanje energetske efikasnosti”, koji imaju najveći uticaj na pokretanje pozitivnog stava prema energetske efikasnosti, unapređenju i dekarbonizaciji. Glavna preporuka politike izvedena iz ove studije odnosi se na razvoj politika i strategija koje podstiču građane ne samo da imaju pozitivan stav ka energetske efikasnosti i

dekarbonizaciji kroz korišćenje toplotnih pumpi nego i prema pokretačima konkretnih akcija za ugradnju tehnologije toplotne pumpe. Još jedna preporuka tiče se daljeg razvoja i proširenja nacionalnih i lokalnih programa za izolaciju spoljašnje površine zgrada i zamenu prozora i spoljnih vrata koja nemaju termoizolaciju. Treća glavna preporuka odnosi se na kampanje za podizanje svesti među stanovništvom o savremenim merama za poboljšanje energetske efikasnosti, kao što su toplotne pumpe.

U vezi sa pomenutim, neophodnim povećanjem energetske efikasnosti u zgradarstvu, valja napomenuti da je urbano okruženje odgovorno za približno 40% svetske potrošnje energije, 30% upotrebe sirovina, 25% čvrstog otpada, 25% korišćenja vode, 12% korišćenja zemljišta i 33% emisije gasova staklene bašte, [22]. Stoga, unapređenje stanja životne sredine i dekarbonizacija postaju sve kritičniji ciljevi i za građevinsku industriju. Održiva gradnja se može postići kroz nekoliko praksi, uključujući: razmatranje procene životnog ciklusa, kružnu (cirkularnu) izgradnju, efikasnost resursa i upravljanje otpadom i obezbeđivanje eko-efikasnih materijala, smanjenje potražnje za energijom i potrošnje i uključivanje OIE i tehnologija sa niskim sadržajem ugljenika. Da bi se postigli ciljevi cirkularne gradnje, od ključne je važnosti edukovati buduću radnu snagu o dekarbonizaciji, cirkularnoj izgradnji i kako da se prevaziđu izazovi povezani sa prelaskom na održivu gradnju. Za studiju [22] anketirano je 120 studenata osnovnih i postdiplomskih studija da bi se sagledao i razumeo jaz u studentskom znanju u vezi sa dekarbonizacijom i kružnom izgradnjom. Istaknuta je važnost uključivanja ovih tema u nastavne planove i programe, kao i u programe upravljanja izgradnjom. Rezultati [22] naglašavaju praznine u znanju učenika koje se odnose na održive prakse i važnost obezbeđivanja buduće radne snage u građevinarstvu sa takvim znanjem, kako bi se uhvatili ukoštac sa globalnim, neizbežnim izazovima. Nalazi [22] doprinose održivom obuhvatu znanja tako što se zalažu za reformisani nastavni plan i program, za pripremu buduće radne snage za usvajanje manje karbonizovanih, više cirkularnih pristupa u inženjeringu i industriji.

Polazeći od ovde apostrofiranih pitanja i uvida u iskustva i trendove opisane u literaturi iz oblasti dekarbonizacije, u poglavlju 2 ovog rada ilustrovan je mogući način koncipiranja dekarbonizovanog EES na primeru Srbije. U potpoglavlju 2.1 najpre su analizirani postojeći i planirani kapaciteti V-OIE i izazovi koje donosi veći obim njihove integracije u EES. Poglavlje 2.2 razmatra mogućnosti konverzije i skladištenja energije (kao rešenja za pomenute probleme), a potpoglavlje 2.3 mogućnosti korišćenja preostalog hidropotencijala rečnih slivova u Srbiji. Potpoglavlje 2.4 sagledava mogućnosti uvođenja novih tehnologija u proizvodni portfelj EPS-a, a potpoglavlje 2.5 predlaže način razmatranja njihovog uvođenja. Na kraju, u poglavlju 3, navedeni su kratki zaključci.

2. KONCIPIRANJE DEKARBONIZOVANOG ELEKTROENERGETSKOG SISTEMA

Moderni EES treba da se zasniva na korišćenju savremenih i inovativnih tehnologija i pristupa. Oni predstavljaju temelj na koji će se oslanjati potporni stubovi jednog budućeg, dekarbonizovanog, efikasnog, održivog i očuvanju životne sredine pogodnog EES-a (ilustrovanog na Slici 1), [23]. Takav sistem će se oslanjati na:

- korišćenje OIE, uključujući i one dispergovane (*Dispersed Energy Resources*, DER), tj. distribuiranu proizvodnju (*Distributed Generation*, DG) i mikromreže;
- skladištenje energije, i to u različitim vidovima, objektima i uređajima:
 - voda;
 - kondenzatorske baterije;
 - toplota u toplotnim akumulatorima;
 - proizvodnja i skladištenje vodonika, odnosno amonijaka i bio-gasa;
- pametne mreže (*Smart Grids*) i pametno merenje (*Smart Metering*);
- unapređenje energetske efikasnosti, kako na strani proizvodnje (uključujući kogeneraciju električne i toplotne energije i vodene/tehnološke pare) tako i na strani potrošnje (korišćenjem energetski efikasnijih uređaja i aparata, izolovanjem zgrada, zamenom stolarije, postojeće rasvete štednim sijalicama);
- učešće potrošnje (odziv potrošnje – *Demand Response* (DR), upravljanje opterećenjem/potrošnjom – *Demand Side Management* (DSM), mikromreže i drugi koncepti);
- otvoreno tržište i fleksibilne tarife (kako bi se podstaklo korišćenje električne energije u periodima i na način kako je to optimalno za EES);
- odgovarajući i pravedan regulatorni okvir (koji je neophodan kako bi se obezbedili uslovi za otvoreno tržište, nediskriminatorne odnose i primenu fleksibilnijih tarifa).



Slika 1. Osnova i potporni stubovi budućeg dekarbonizovanog EES-a /izvor: [23]/

Pri ovome valja naglasiti da se mora voditi računa o usaglašenom i ravnomernom razvoju svih ovih potpornih stubova. Naime, razvoj i korišćenje nekog od njih, koji bi bio nesrazmeran njegovom stvarnom značaju i bez odgovarajuće podrške ili ravnoteže drugih, navedenih komponenti sistema, doveo bi do njegove strukturalne i funkcionalne nestabilnosti, a moguće i do urušavanja i kolapsa, [23].

2.1 Kapaciteti V-OIE i novi izazovi koje donose

Ni tokom 2023. u Srbiji još uvek nije usvojena nova, ažurna Strategija razvoja energetike, a zarad približavanja Evropskoj uniji (EU) i pod spoljašnjim pritiscima prihvataju se politički nametnuti strateški ciljevi u domenu smanjenja emisija CO₂ i GHG-a. Često se paralelno i neusaglašeno, sa različitim stranim konsultantima, radi na izradi nacrtâ pojedinačnih strateških dokumenata (poput *Integrated National Energy and Climate Plan* (INECP) i *National Determined Contribution* (NDC)), a što bi trebalo da usledi tek nakon usvajanja nacionalne Strategije. U takvoj situaciji je, u proleće 2022, u EPS-u zaključeno da se ne može više čekati na njeno donošenje. Zbog toga su u junu 2022. eksperti EPS-a izradili, a tadašnje najviše rukovodstvo kompanije usvojilo, interni dokument EPS-a o viziji njegove postepene dekarbonizacije i strateškog razvoja – „Zeleni put” (*Go Green Road*).

„Zeleni put” EPS-a podrazumeva gašenje najstarijih termoblokova i celih termoelektrana (TE) na lignit, kako onih za koje je država već preuzela tu obavezu po sistemu *Opt-Out* (TE „Morava” i TE „Kolubara” do kraja 2023. ili zimske sezone 2023/24), tako i TENT A1 i A2 i oba bloka TE-KO A, do 2035. godine, uz smanjenje angažovanja preostalih termoblokova. Tokom tog perioda i nadalje planira se realizacija većeg broja elektrana na varijabilne obnovljive izvore energije (V-OIE), dakle – solarnih fotonaponskih elektrana (SE) i vetroparkova / vetroelektrana (VE). Na Slici 2 dati su prostorni raspored i instalisane snage SE i VE čiju izgradnju EPS planira ili već realizuje. Osim njih, na istoj slici su prikazani i ukupni zbrovi instalisanih snaga postojećih i budućih SE i VE čiji su vlasnici ili investitori drugi energetske subjekti, uglavnom privatne kompanije, sa stanjem kakvo je bilo zabeleženo u junu 2023. godine.



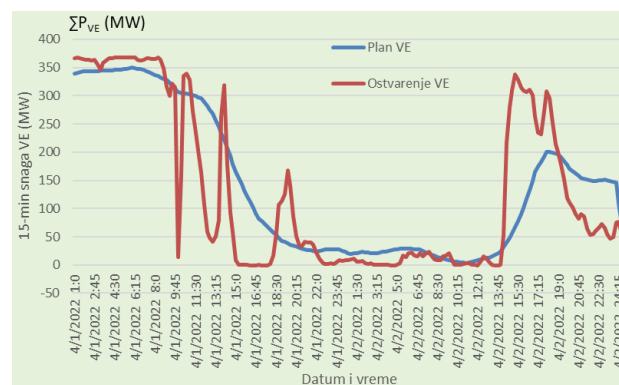
Slika 2. Lokacije i instalisane snage V-OIE kapaciteta (EPS i sumarne snage za privatne)

Već i sa kapacitetima V-OIE postojećim u Srbiji u proleće 2022. godine, zabeleženi su nagli skokovi (*rump-ups*) i padovi (*rump-downs*) suma izlaznih snaga iz ovih elektrana i velike razlike u dan unapred planiranim i ostvarenim njihovim vrednostima, a time i u proizvodnji električne energije. Na Slici 3 dat je realni, uporedni dijagram suma ovih snaga, ΣP_{VE} , zabeležen tokom 1. i 2. aprila 2022. godine.

Jasno je da će daljim, očekivanim i znatnim, povećanjem udela V-OIE u ukupnim proizvodnim kapacitetima EES-a Srbije i proizvodnji električne energije iz njih problem balansiranja u realnom vremenu, ali i balansiranja na sezonskom nivou, biti sve izraženiji.

Osim toga, EES u kome će s vremenom rasti udeo V-OIE suočiće se sa deficitom obrtno rezerve i inercije, te problemima regulacije napona i frekvencije. Jedno od mogućih rešenja je zadržavanje pojedinih generatorskih jedinica (onih u boljem stanju) termoelektrana (TE) na lignit predviđenih za izlazak iz pogona, kao sinhronih kompenzatora, [24], uz odgovarajuće prerade sistema pobude i druge neophodne radove na prilagođavanju ovih jedinica novoj svrsi. One bi EPS-u služile za pružanje pomoćnih usluga operateru prenosnog sistema (OPS) i tako nastavile da budu izvor prihoda. S tim u vezi, međutim, studija [25], rađena svojevremeno za EPS, pokazala je da trenutno vrednovanje pomoćnih usluga u Srbiji nije

dovoljno za tehnoeкономsku opravdanost investiranja u ovakvo tehničko rešenje navedenog problema.



Slika 3. Razlika u planiranoj (za dan unapred) i ostvarenoj ukupnoj snazi VE u Srbiji – realan slučaj

Takođe, vetrogeneratori i fotonaponske elektrane priključuju se na mrežu preko invertora, dakle sklopova energetske elektronike, koji predstavljaju izvor viših harmonika. Sve veći udeo ovih V-OIE će, dakle, predstavljati i sve jači uzrok zaprljanja sinusoidalnog oblika struje i napona u mreži. Stoga će i po ovom osnovu kvalitet isporučene električne energije biti sve ugroženiji.

Kada je reč o DER-u, tj. DG-u, u elektrodistributivnoj mreži se mogu javiti obrnuti tokovi snaga (od niženaponske prema višenaponskoj mreži, umesto uobičajenog), u režimima rada u kojima na pojedinim područjima proizvodnja (recimo iz fotonaponskih panela po krovovima zgrada) premašuje potrošnju. Ovaj problem može iziskivati prepodešavanje releja u sistemu relejne zaštite, tj. njegovu preradu, imajući u vidu da kvarovi u mreži sada mogu biti napojeni sa druge strane, što usmerena zaštita u srednjenaponskim ćelijama napojnih transformatorskih stanica (TS) ne bi mogla da registruje i da odreaguje.

Nesporno je da je neophodan kvalitativni pomerač prema korišćenju OIE. Očigledno je, međutim, da se ekstenzivnim povećanjem udela V-OIE, kakvi su oni bazirani na korišćenju naglo promenljivih i stoga neupravljivih, energija vetra i sunca, pojavljuju novi izazovi i problemi. Prevažadno, sa povećanom intermitentnošću proizvodnje, smanjuju se sposobnost EES-a za balansiranje proizvodnje i potrošnje, fleksibilnost i stabilnost njegovog rada. Moguća rešenja ovoga problema su:

- izgradnja velikog/ih skladišta energije;
- izgradnja brzoreagujućih proizvodnih kapaciteta (kakve su, npr., gasne elektrane; one su, međutim, izgubile status perspektivne opcije u strateškim razmatranjima, jer je gas postao skup, a snabdevanje njime neizvesno).

2.2 Mogućnosti konverzije i skladištenja energije u savremenom EES-u

Za klasičan EES tipičan vid skladištenja energije je korišćenje potencijalne energije vode. Voda se pumpa i skladišti u gornjim akumulacijama hidroelektrana (HE), reverzibilnih HE (RHE) i pumpno-akumulacionih postrojenja (PAP), i to u periodima dana i sezonama sa nižom cenom električne energije, tj. kada postoje njeni viškovi u nacionalnom EES-u ili interkonekciji većeg broja EES-ova. Docnije se ova voda koristi za proizvodnju električne energije, u periodima njenih manjkova, kada je ona najskuplja.

Baterijska postrojenja se koriste za direktno skladištenje električne energije i u novije vreme se forsiraju kao dominantni vid skladištenja u EES-u sa velikim uplivom proizvodnje iz V-OIE, kao što su vetrogeneratori i fotonaponske SE. Masovno korišćenje baterija, međutim, otvara niz novih pitanja i problema koji mogu imati negativan uticaj na životnu sredinu – od masovnog rudarenja, diskutabilnim tehnologijama, litijuma i drugih elemenata neophodnih za proizvodnju baterija preko problematike protivpožarne zaštite i relevantne regulative koja nije upodobljena ovoj tehnologiji do problematike njihovog relativno kratkog životnog veka, nakon čijeg isteka baterije postaju opasan otpad i zahtevaju odgovarajući tretman i angažovanje sertifikovanog operatera, stvarajući ozbiljne troškove i posle perioda njihove eksploatacije.

Kao alternativni, sve više se pojavljuju sistemi za skladištenje otpadne toplote, pa čak i toplotne energije nastale konverzijom viškova električne energije, koja bi u klasičnom EES-u (bez V-OIE) predstavljala svojevrsnu jeres. Sada je, međutim, tehnički i tehnološki već dostupno

i u primeni skladištenje toplotne energije u velikim podzemnim, posebno izolovanim, termalnim skladištima ili u specijalnim konstrukcijama na bazi kompozitnih materijala (npr. Al-C ili Si-C) koji se zagrevaju viškovima električne energije, a u periodima njenih manjkova i viših cena akumulirana toplota se koristi za dobijanje vodene pare radi proizvodnje električne energije u postojećim termokapacitetima.

Jednu od ključnih uloga u dekarbonizaciji odigraće proizvodnja vodonika (elektrolizom vode, uz utrošak viškova električne energije u EES-u ili iz obližnjih V-OIE) i njegovo komprimovanje, skladištenje i docnije korišćenje. Jedna od upotreba H₂ jeste i njegovo sagorevanje u gorivim ćelijama, u cilju proizvodnje električne energije, naročito pogodno u periodima njenih viših cena na tržištu. Iako nije reč o sasvim novoj tehnologiji, još uvek nije komercijalizovano korišćenje tzv. regenerativnih gorivnih ćelija, u kojima se mogu odvijati oba procesa (i elektroliza i sagorevanje vodonika).

Viškovi električne energije iz V-OIE mogu se koristiti i za obradu biomase (npr. žetvenih ostataka i sl.) i proizvodnju i skladištenje bio-gasa, koji se potom može koristiti za proizvodnju električne i toplotne energije.

Osim skladištenja u cilju docnije, ponovne proizvodnje električne energije, viškovi električne energije u EES-u mogu se iskoristiti za njenu konverziju u druge oblike energije i energente koji se neće koristiti u samom EES-u. Tako pored pomenute konverzije u toplotnu energiju, njenog skladištenja i mogućeg korišćenja u sistemima daljinskog grejanja, moguća je primena koncepta P2X, u kome se viškovi električne energije, osim za, takođe pomenutu, proizvodnju vodonika ili bio-gasa, mogu koristiti za dobijanje različitih vrsta goriva, npr. amonijaka (NH₃) (zeleni amonijak se proizvodi tehnološkim Haber–Bošovim postupkom u kome se zeleni vodonik sjedinjuje sa azotom), metana (CH₄) ili drugih biogoriva namenjenih za sagorevanje u vozilima i ostalim transportnim sredstvima.

Na Slici 4 prikazane su različite opcije konverzije, skladištenja i docnijeg korišćenja viškova energije, kako u samom EES-u, za ponovnu proizvodnju električne energije, tako i izvan njega – toplotne energije za sisteme daljinskog grejanja, proizvodnju zelenog i plavog vodonika, metanola i drugih organskih goriva.

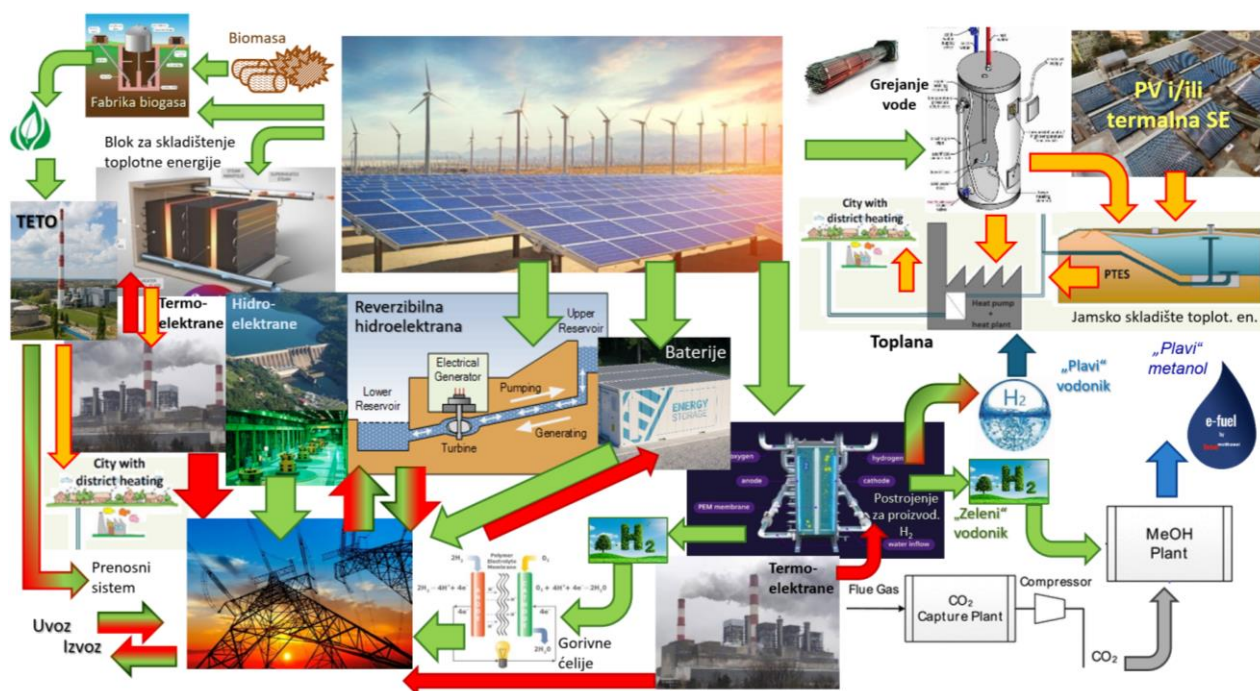
Primenom jednog ovakvog holističkog pristupa i koncepta diversifikacije primarnih energenata i uvođenja novih tehnologija, značajno bi se uvećala fleksibilnost i sposobnost energetskeg sistema, pa i EES-a kao njegovog integralnog dela, za balansiranje sve većih i bržih (strmijih) promena koje unose V-OIE i za sezonsko izravnavanje (bilansiranje) razlika u proizvodnji električne energije. Osim toga, maksimalnim, pa i višenamenskim i višekratnim, korišćenjem resursa kojima sama Srbija raspolaže (voda, vetar, sunce, biomasa), i to na način prikazan na Slici 4 – međusobno povezani, sa visokim stepenom rekuperativnosti – značajno bi se doprinelo očuvanju i unapređenju sigurnosti rada EES-a i energetske nezavisnosti zemlje. Koncept sa Slike 4 podrazumeva i povećanje energetske efikasnosti (npr. većim korišćenjem otpadne toplote iz TE u sistemima daljinskog grejanja) i smanjenje zagađenja životne sredine (npr. prikazanim uvođenjem tehnologija i postrojenja za zahvatanje CO₂

radi njegovog skladištenja i korišćenja u procesima dobijanja organskih biogoriva). Takođe, Slika 4 ilustruje i neke od načina na koje bi se, u prelaznom periodu do 2050. i njihovog konačnog gašenja, preostale TE na lignit mogle „ozeleneti” (npr. korišćenjem dela vodene pare koji bi mogao biti dobijen iz viškova električne energije iz V-OIE konvertovanih u toplotnu energiju i uskladištenu u blok od kompozitnih materijala, koji ujedno predstavlja i generator vodene pare). Slično važi i za termoelektreane-toplane (TE-TO) na mazut i gas; bio-gas dobijen iz biomase i viškova električne energije, ukoliko je u dovoljnoj meri prečišćen,

može supstituisati prirodni gas i biti upotrebljen u postojećim gasnim turbinama ovih postrojenja.

Na Slici 4 zelene strelice označavaju tokove i konverzije obnovljivih resursa i „čiste” električne energije, crvene strelice električnu ili toplotnu energiju dobijenu iz neobnovljivih, fosilnih energenata, a narandžaste strelice toplotnu energiju koja potiče iz OIE.

U nastavku teksta će neki od pomenutih i na Slici 4 prikazanih resursa i tehnologija biti nešto detaljnije prikazani.



Slika 4. Opcije konverzije, skladištenja i docnijeg korišćenja viškova energije u EES-u i izvan njega

2.3 Mogućnosti korišćenja preostalog hidropotencijala slivova u Srbiji

2.3.1 Projekti novih HE i RHE. Oba uslova za uspešno balansiranje intermitentne proizvodnje iz V-OIE (navedena na kraju potpoglavlja 2.1) ispunjavaju RHE. U EPS-u je u toku druga faza razvoja investiciono-tehničke dokumentacije i projekta RHE „Bistrica”, planirane snage 656 MW. Trebalo bi da njena izgradnja bude završena do 2031. godine. Odabrano je tehničko rešenje sa četiri jedinice snage po 164 MW, sa Frensisovim turbinama i agregatima sa mogućnošću promenljive (podesive) brzine obrtanja u oba režima (i pumpnom i generatorskom), [26]. Ova, kao i moguća RHE „Đerdap 3”, snage do 2400 MW, dobile su status projekata od posebnog, tj. nacionalnog značaja za Republiku Srbiju.

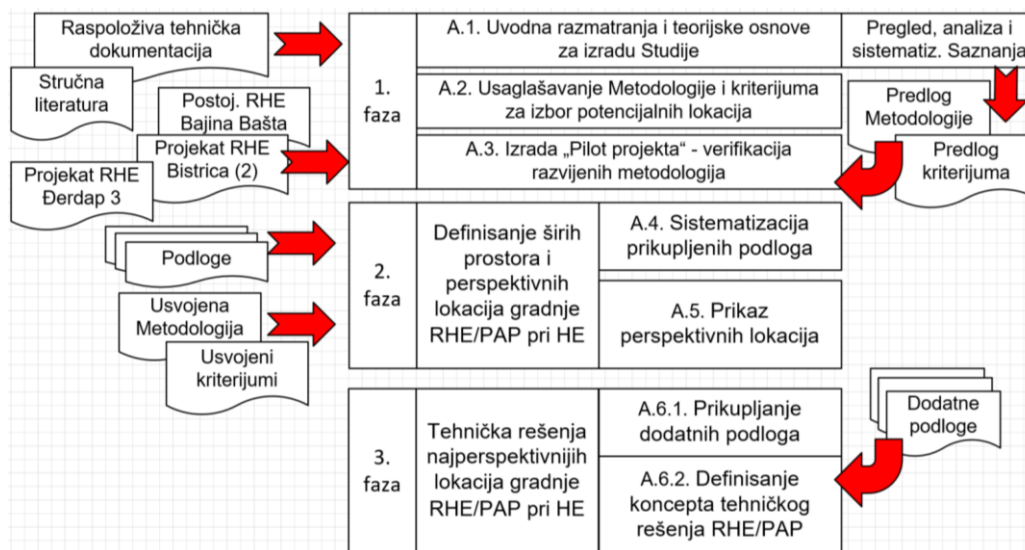
Stručna literatura, [27] i [28], kao najbolju, win-win opciju sugerise hibridne sisteme V-OIE i RHE, na zajedničkoj ili prostorno bliskim lokacijama. U takvim slučajevima viškovi električne energije iz obližnjih V-OIE kapaciteta koriste se u RHE tokom njihovog pumpnog režima rada za transport i skladištenje vode u njihovim gornjim akumulacijama. Na ovaj način se smanjuju gubici

u električnoj mreži i doprinosi optimizaciji rada EES-a. Krajnji cilj upravo i jeste ova optimizacija i smanjenje vršnih snaga u sistemu, jer to znači da je u njemu onda potrebno manje proizvodnih kapaciteta, a time i manje finansijskih sredstava za investiranje.

Osim razvoja projekata dve navedene buduće RHE, u EPS-u je u toku i izrada studije [29] kojom se istražuju mogućnosti i drugih potencijalnih lokacija za izgradnju novih RHE i PAP pri postojećim i planiranim HE. Na Slici 5 ilustrovani su sadržaj i dijagram toka izrade ove studije. Krajem 2023. godine okončana je druga faza njene izrade. Primenom kriterijuma i metodologije koji su utvrđeni u prvoj fazi (završenoj juna 2023), izvršena je eliminacija svih neodgovarajućih područja na teritoriji cele Republike Srbije (uključujući i KiM), odnosno definisana su šira područja koja su pogodna i raspoznat set potencijalnih lokacija za gradnju novih RHE ili PAP uz HE. Takođe je, radi testiranja usvojene metodologije, izvršeno vrednovanje i rangiranje pojedinih lokacija. Studijom neće biti obuhvaćene (osim kao referentne, poređenja radi) postojeća RHE „Bajina Bašta” i već odranije prepoznate lokacije RHE „Bistrica” i RHE „Đerdap 3”, čiji se projekti već nalaze u određenim fazama razvoja.

Što se tiče klasičnih HE, planira se izgradnja sistema HE na Gornjoj Drini i ponovni razvoj projekata sistema „Moravskih HE” i „Ibarskih HE”. Pregled procenjenih vrednosti instalisanih snaga i godišnje proizvodnje svih HE

u ova tri sistema dat je u Tabeli I. Za sve HE planirana je izgradnja betonskih brana, gravitacionog tipa, a proizvodna postrojenja bila bi opremljena Kaplanovim turbinama.



Slika 5. Algoritam izrade Studije [29] – istraživanja mogućnosti potencijalnih lokacija za RHE i PAP

Tabela I. Procenjene instalisane snage i godišnje proizvodnje električne energije u potencijalnim HE

HE / sistem HE	Instalisana snaga (MW)	Godišnja proizvodnja (GWh)
Buk Bijela	93,5÷114,5	332,3÷354,3
Foča	44,2÷53,6	175,9÷185,0
Paunci	43,2	166,7
Gornja Drina - ukupno	180,9÷211,3	674,9÷706,0
Ljubičevo	29,7	133
Mijatovac	29,2	125,5
Svilajnac	28,8	128
Trnovče	29,3	128,1
Varvarin	28,9	122,9
Moravske HE - ukupno	145,9	637,5
Bela glava	14,29	54,76
Bojanići	10,25	36,11
Cerje	13,24	50,16
Dobre strane	14,46	55,59
Glavica	9,74	37,22
Gokačnica	10,82	37,95
Gradina	11,18	42,00
Lakat	13,54	54,64
Maglić	13,45	51,89
Ušće	9,87	35,37
Ibarske HE - ukupno	120,84	455,70
Ukupno nove HE	447,64÷478,04	1.768,1÷1.799,2

EPS je formirao zajedničko preduzeće sa „Elektroprivredom Republike Srpske” u cilju realizacije projekta sistema HE na Gornjoj Drini, kojim je predviđena izgradnja tri HE: „Buk Bijela” (u toku), „Foča” i „Paunci”, u regionu grada Foče u Bosni i Hercegovini, tj. Republici Srpskoj. Studija izvodljivosti i Idejno rešenje urađeni su 2012/13. Potpisani su koncesioni ugovori za sve tri HE.

Tokom 2020. i 2021. godine rađene su tehnokonomske analize. Naknadno je urađena i dodatna analiza izvodljivosti. Tokom 2023. sproveden je tender za izvođača radova na izgradnji HE „Buk Bijela”.

Projekat „Moravskih HE” treba ponovo razmotriti i eventualno razviti. Planira se izgradnja pet protočnih HE u kaskadi. Dosad su urađene predinvesticiona Studija mogućeg korišćenja hidropotencijala Velike Morave, Preliminarna studija izvodljivosti sa Generalnim projektom sistema HE, izvršena su geodetska istraživanja reke Velike Morave, a sprovedena su i batimetrijska istraživanja njenoga korita.

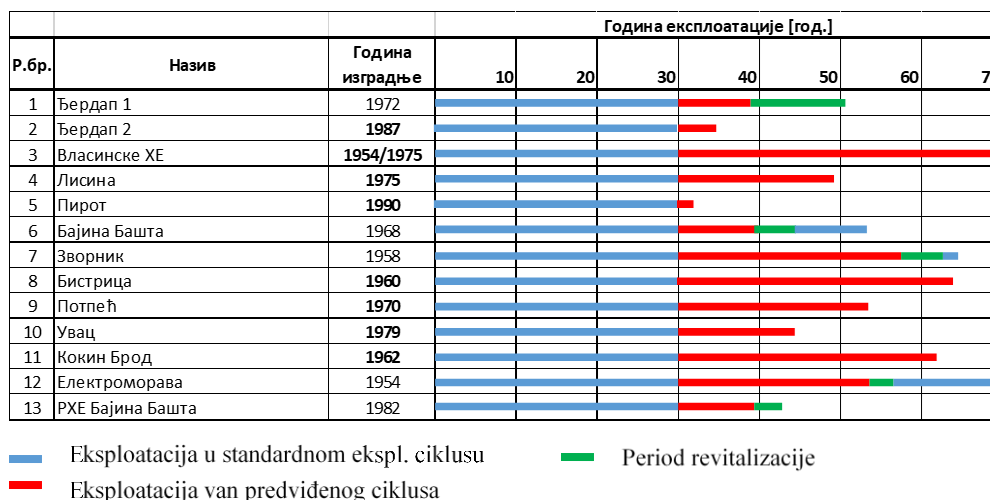
Projekat „Ibarskih HE” takođe treba ponovo razmotriti i eventualno razviti. Planira se izgradnja do deset protočnih HE u kaskadi, manjih pojedinačnih instalisanih snaga. Dosad su urađeni Generalni projekat sa Prethodnom studijom izvodljivosti, koji su revidirani i usvojeni od strane Republičke revizione komisije. Urađen je potom, za svaku HE pojedinačno: Idejni projekat sa Studijom izvodljivosti; Prostorni plan područja posebne namene (PPPPN) sa direktnom implementacijom, koji je usvojila Vlada RS; pripremljen je Glavni projekat koji obuhvata izmeštanje puta, u dve sekcije (za HE „Dobre strane” i HE „Bela glava”), uključujući i ciljana istraživanja. Osim toga, urađena je i procena uticaja na životnu sredinu i društvo (Environmental and Social Impact Assessment, ESIA) prema standardima EU, za potrebe potencijalnih kreditora.

Da bi se, međutim, stekla realistična slika o mogućnostima i opravdanosti realizacije ovih ali i drugih mogućih hidroenergetskih objekata, neophodno je stručno i nepristrasno sagledati mogućnosti korišćenja preostalog hidrokapaciteta, tj. vodnih resursa u Srbiji. S tim u vezi, prvi i osnovni korak predstavlja merenje proticaja na slivovima reka. Jednu studiju o ovoj temi nedavno je realizovao Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, [30].

2.3.2 Revitalizacije postojećih (R)HE. Hidro-energetski objekti EPS-a takođe su stari po više decenija i oprema u većini njih je (bila) dosegla kraj svog životnog veka. Povoljna okolnost je što ključni građevinski objekti HE, poput brane za formiranje njene akumulacije, imaju daleko duži životni vek od mašinske i elektro opreme ugrađenih u

nju, tako da se njihovom zamenom novom opremom praktično može višestruko produžiti životni vek HE kao celine. Zbog toga je, tokom poslednje decenije i nešto duže, preduzet niz revitalizacija postojećih HE i planiraju se i razvijaju projekti revitalizacije drugih HE i RHE „Bajina Bašta”.

Tabela II. Godine izgradnje HE, njihov eksploatacioni ciklus i revitalizacije /izvor: [31]/



Ove revitalizacije najčešće podrazumevaju i povećanje instalisanih snaga HE i godišnje proizvodnje iz njih. U Tabeli II, [31], prikazane su godine izgradnje klasičnih HE u vlasništvu i upravljanju EPS-a, ilustrovano koliko dugo su (bile) eksploatisane duže od planiranog životnog veka i koje od njih su već revitalizovane ili je revitalizacija u njima trenutno u toku.

Završene su revitalizacije sistema HE „Elektromorava” (HE „Ovčar Banja” i HE „Međuvršje”), HE „Bajina Bašta”, HE „Zvornik” i HE „Đerdap 1”. Revitalizacijom sistema HE „Elektromorava” (2008–2010) i ugradnjom četvrtog agregata (od 600 kW) u HE „Ovčar Banja” povećana je instalisana snaga ovog sistema za 25%, pa je njegova trenutna ukupna snaga 18 MW, sa instalisanim protokom od 50 m³/s. Revitalizacijom HE „Bajina Bašta” (2009–2013) povećana je snaga elektrane sa 368 MW na 420 MW, povećanjem stepena korisnosti i protoka. Godišnja proizvodnja elektrane povećana je za oko 40 GWh. Revitalizacijom HE „Zvornik” (2015–2020) njena snaga je povećana za dodatnih 30 MW i sada iznosi ukupno 122,3 MW. Sukcesivnom revitalizacijom svih agregata u HE „Đerdap 1” (2009–2023) instalisani protok po agregatu povećan je sa 800 m³/s na 840 m³/s, što je uz povećanje stepena korisnosti agregata uslovalo povećanje instalisane snage sa 176 MW na 190 MW pri nominalnom faktoru snage $\cos \varphi = 0,9$.

U toku je revitalizacija RHE „Bajina Bašta”. Ugovor o radovima je potpisan još krajem 2019. godine. Međutim, usled raznih dešavanja u svetu (pandemija virusa korona, rat u Ukrajini i posledični poremećaji na tržištu) dolazilo je do odlaganja početka radova. Početak radova je bio planiran za april 2024. godine.

Planiraju se i razvijaju projekti revitalizacija sistema „Vlasinskih HE”, HE „Bistrica”, HE „Potpec” (uz ugradnju četvrtog agregata) i HE „Đerdap 2”.

Projektom revitalizacije „Vlasinskih HE” planira se povećanje instalisane snage za oko 8 MW (sada je snaga snižena na oko 100 MW, zbog stanja opreme). Planirano povećanje snage očekuje se usled povećanja stepena korisnosti, za oko 3-5% u prvoj fazi revitalizacije, i za još oko 1-3% u drugoj fazi. Takođe, planirano je da se omogući rad agregata sa nešto višim instalisanim protokom (sa dosadašnjih 18 m³/s na 20 m³/s). Nakon revitalizacije očekuje se povećanje proizvodnje za oko 3%, sa 300 GWh na 310 GWh.

Rekonstrukcija HE „Potpec” planirana je u dve faze. Prva faza bi obuhvatala izgradnju mašinske zgrade sa dodatnim četvrtim agregatom (snage 13,3 MW i instalisanog protoka od 40 m³/s), dok bi druga faza obuhvatala rekonstrukciju postojeća tri agregata, uz povećanje stepena korisnosti jedinica za 2-4%, instalisanog protoka i – posledično – ukupne instalisane snage postojećih agregata, za 7,5 MW.

Postojeća HE „Bistrica” planira se za adaptaciju i investiciono održavanje. Umesto standardne rekonstrukcije agregata sa povećanjem instalisane snage izvršice se zamena opreme uz zadržavanje iste instalisane snage agregata. Pri tome se očekuje povećanje stepena korisnosti agregata za 2-4% i povećanje godišnje proizvodnje za oko 5-7%. Ugradnjom nove opreme, većeg stepena korisnosti, smanjiće se protok (sa 18 m³/s na oko 16,6 m³/s) i gubici u dovodno-odvodnim organima ove HE.

Projektom revitalizacije HE „Đerdap 2” planirano je povećanje instalisane snage agregata na 32 MW, povećanjem stepena korisnosti 1-2% i povećanjem instalisanog protoka po agregatu na 475 m³/s. Očekuje se povećanje godišnje proizvodnje sa 1600 GWh na 1745 GWh.

Iz Tabele II može se zaključiti da pored HE koje su do sada revitalizovane ili su planirane za revitalizaciju ostaje

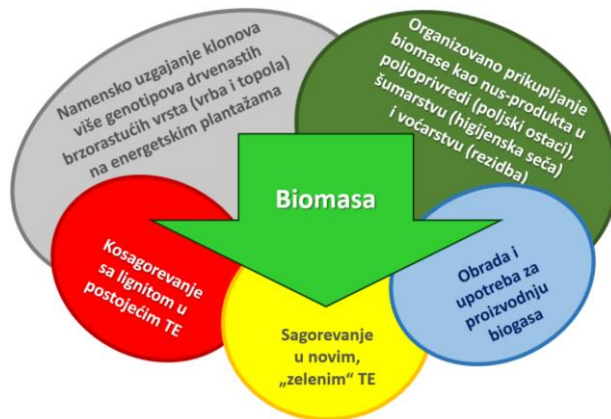
potreba za ubrzanom revitalizacijom i svih preostalih postojećih hidrokapaciteta, kao što su HE „Uvac”, HE „Kokin Brod”, PAP „Lisina”, ali i HE „Pirót” kao poslednje izgrađene velike HE u EES-u Srbije, [31].

2.4 Mogućnosti uvođenja novih tehnologija u proizvodni portfelj i njihovog korišćenja

Još veći problem od varijabilne proizvodnje iz V-OIE i posledičnog smanjenja balansnih mogućnosti, fleksibilnosti i stabilnosti EES-a, predstavlja činjenica da proizvodni kapaciteti iz V-OIE neće moći u potpunosti da nadomeste ogromni udeo koji sada u pokrivanju potrošnje imaju TE (u Srbiji je on i do 70%). Dakle, osnovno je pitanje – na koji način se može kompenzovati manjak energije za pokriće baznog opterećenja, koji će se svakako javiti i bivati sve veći sa gašenjem pojedinih termokapaciteta EPS-a koji kao primarno gorivo koriste niskokalorični lignit? Čini se da su ključ tranzicije EPS-a i Republike Srbije ka održivoj budućnosti pomenuta diversifikacija primarnih goriva i uvođenje i korišćenje jednog broja različitih, novih tehnologija. Najperspektivnije deluje pomenuta proizvodnja i korišćenje H_2 , uz ekstenziju sa N_2 – proizvodnja i korišćenje NH_3 . Vodonik je i ključ za dekarbonizaciju industrije i transporta (pogon brodova, recimo, prelazi na NH_3). Stoga se osnovano može očekivati da će upravo ove tehnologije biti glavni oslonac dekarbonizacije i energetske tranzicije. U nastavku sledi osvrt i na ostale tehnologije, njihove mogućnosti i ograničenja.

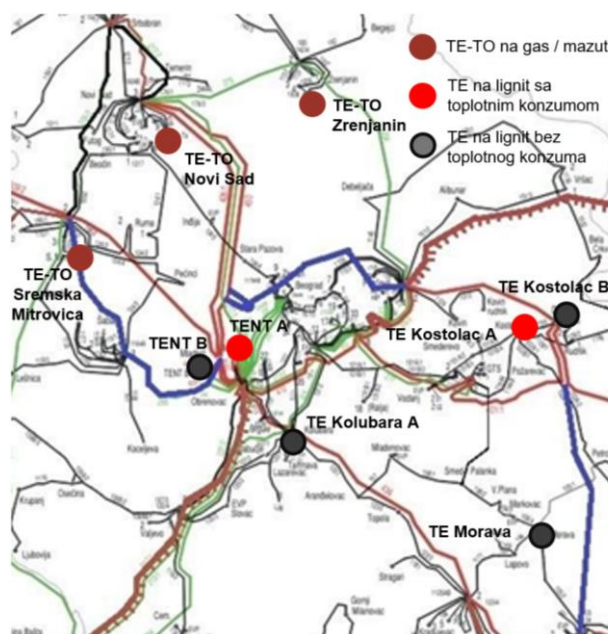
2.4.1 Biomasa. Na Slici 6 prikazani su načini obezbeđivanja i korišćenja biomase kao energenta u EES-u. Biomasa se može obezbeđivati na dva načina. Prvi je namensko uzgajanje klonova više genotipova drvenastih brzorastućih vrsta, kao što su vrbe i topole, na tzv. energetskim plantažama. Ovaj način ima stanovite prednosti jer doprinosi odvodnjavanju, poboljšana je rekultivacija tla fitoekstrakcijom, tlo se prečišćava od teških metala, a sama uzgojena biomasa ima visoku kalorijsku vrednost, oko 19.000 kJ/kg. Drugi način je organizovano prikupljanje biomase kao nusproizvoda u poljoprivredi (poljski, tj. žetveni ostaci), šumarstvu (drvo dobijeno higijenskom sečom šuma) i u voćarstvu (redovnim i higijenskim orezivanjem).

U oba slučaja obezbeđivanja biomase potrebna je složena logistička podrška u smislu dopreme biomase do mesta njene obrade i korišćenja, s tim što je ovaj problem daleko izraženiji u slučaju prikupljanja biomase kao nusprodukta drugih procesa. S tim u vezi, ozbiljan nedostatak biomase kao energenta predstavljaju troškovi njenog transporta, koji značajno rastu za rastojanja veća od 50 km. Izrazita mana organizovanog prikupljanja biomase kao nusproizvoda je i nemogućnost pouzdanog planiranja njene kalorijske vrednosti i raspoložive količine po hektaru, u odnosu na namensko uzgajanje biomase, kod kojeg ovog problema nema. Jedna od pogodnosti biomase, kad je reč o njenom korišćenju u EPS-u, jeste mogućnost njenog prikupljanja ispred fronta rudarskih radova na kopovima.



Slika 6. Načini obezbeđivanja i korišćenja biomase kao energenta u EES-u

Način na koji bi se, uvođenjem i korišćenjem tehnologija na biomasu, mogao „ozeleneti” termoenergetski deo proizvodnog portfelja EPS-a, ilustrovan je na slikama 7 i 8.

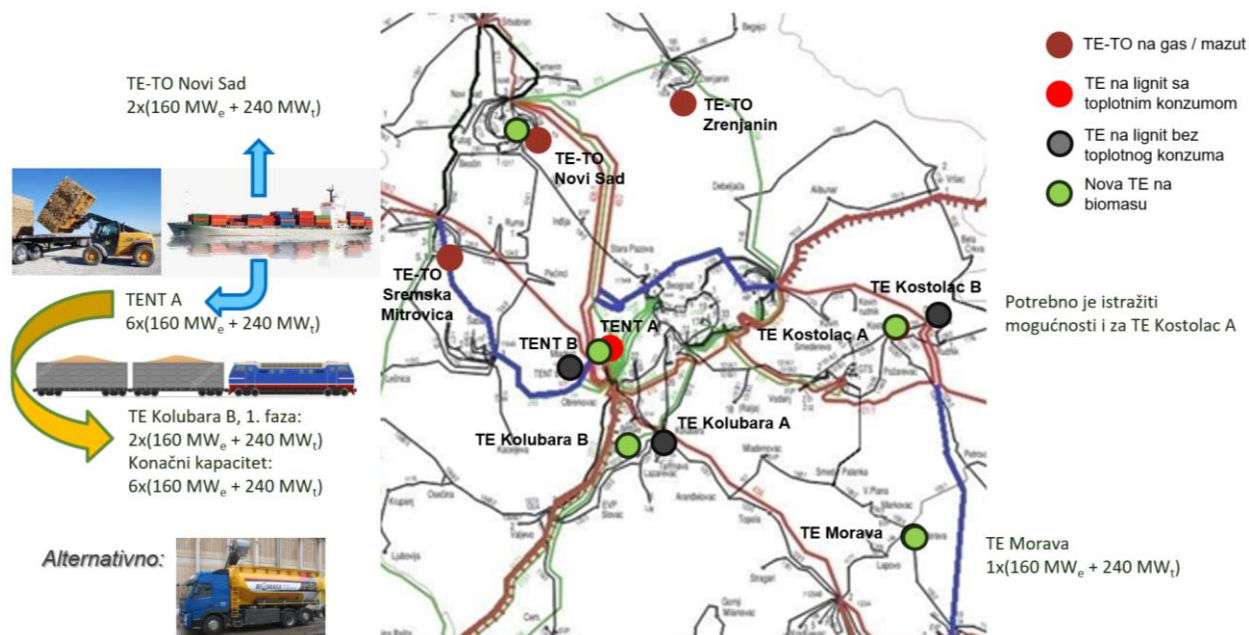


Slika 7. Postojeći termokapaciteti EPS-a

Na Slici 7 dato je postojeće stanje i lokacije TE u Srbiji (bez KiM). Na Slici 8 prikazano je moguće supstituisanje pojedinih postojećih kapaciteta na lignit novim postrojenjima na biomasu, tipiziranih snaga 1×160 ili 2×160 MWe. Na Slici 8 ilustrovan je i način na koji bi se u Srbiji, u slučaju većeg obima korišćenja biomase kao jednog od primarnih energenata u EES-u, mogli smanjiti troškovi njenog transporta. Srećna okolnost je da se sve tri TE-TO u sklopu EPS-a nalaze u Vojvodini (od kojih je TE-TO Novi Sad pored samog Dunava). Vojvodina je najveći izvor biomase potekle iz poljoprivredne proizvodnje. Biomasa se za sada ni izbliza ne koristi onoliko koliko je to moguće. Drugo, i većina preostalih, velikih TE na lignit, nalazi se uz Dunav i Savu, pa bi doprema biomase do njih bila moguća najjeftinijim, rečnim transportom. Što se tiče nešto udaljenije lokacije za ranije planiranu TE „Kolubara B”, transport biomase do nje bio bi moguć istim

železničkim vagonima koji iz Rudarskog basena „Kolubara” transportuju lignit za TE „Nikola Tesla” (TENT) A i B, a koji, sada, u povratku ka kopu idu prazni.

Pretovar biomase bi se sa brodova radio u pristaništima uz TENT A i TENT B.



Slika 8. Ideja o korišćenju biomase u EPS-u, uz smanjenje troškova transporta

Što se tiče strane samog korišćenja biomase, izdvajaju se tri osnovna vida (Slika 6). Prvi je mogućnost kosagorevanja sa lignitom u postojećim TE. Ono bi dovelo do umanjenja taksi na emisije CO₂, smanjenja utroška mazuta, kao i količina pepela, sumpora i emisije GHG-a. Pri tome, relativno mali udeo biomase u kosagorevanju značajno povećava kalorijsku vrednost smese u odnosu na čist lignit. Prilagođavanje za kosagorevanje ne zahteva veća ulaganja u postojeće proizvodne kapacitete.

Drugi vid korišćenja biomase je njeno sagorevanje u novim, „zelenim” TE. U slučaju Srbije njihove moguće lokacije date su na Slici 8. Već je pomenuto da u svetu postoje gotova tehničko-tehnološka rešenja elektrana na biomasu, tipiziranih snaga. To su najčešće kogenerativna postrojenja (TE-TO), za proizvodnju električne i toplotne energije. Kao podvarijanta, moguća su rešenja ovih TE-TO sa dodatnim postrojenjima za hvatanje CO₂, njegovo komprimovanje i skladištenje. U tom slučaju, ovakve elektrane na biomasu izuzimaju se iz sistema plaćanja taksi na emisije CO₂.

Treći, poseban vid korišćenja biomase, prikazan na Slici 6, predstavlja njena obrada i upotreba u proizvodnji biogasa.

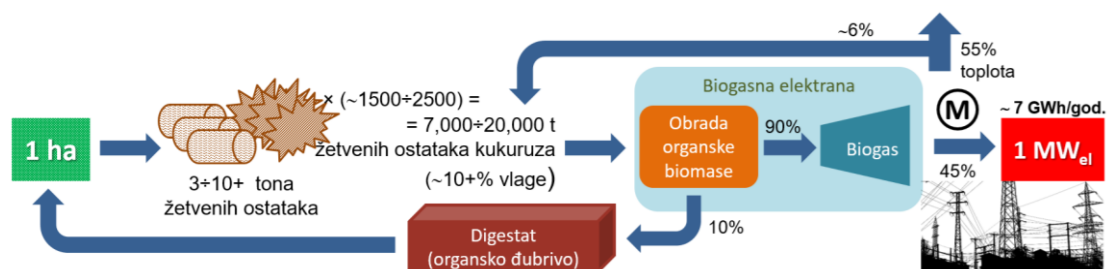
2.4.2 Bio-gas. Bio-gas je izuzetno pogodan za kogenerativnu proizvodnju toplotne i električne energije. Proizvodnja električne energije iz bio-gasa je, za razliku od one iz V-OIE, potpuno upravljiva (nije varijabilna). Pri

tome ova postrojenja mogu da rade i preko 7000 sati godišnje, pa imaju izuzetno visok faktor korišćenja kapaciteta. Osim toga, sam bio-gas je pogodan za transport i sagorevanje. Tako jednu od prednosti proizvodnje i upotrebe bio-gasa predstavlja mogućnost njegovog sagorevanja u urbanim zonama (npr. CH₄), uz minimalne emisije štetnih materija/gasova.

Zavisno od primenjene tehnologije, za snagu od 1 MW_{el}, tj. 7 GWh električne energije godišnje dobijene iz bio-gasa, zahteva se od oko 7000 t do 20.000 t žetvenih ostataka kukuruza. Sa 1 ha dobija se od 3 t do preko 10 t žetvenih ostataka (količina varira od vrste useva, godine i klimatskih uslova).

Kao nusproizvod iz bio-gasnog postrojenja, nakon obrade organske biomase, dobija se digestat. On predstavlja organsko đubrivo i kao takvo se direktno vraća na njive. I to je element cirkularne ekonomije, koja je jedna od odlika predloženog holističkog pristupa sa Slike 4. Važno je napomenuti da digestat ima veću moć fertilizacije zemljišta od samih žetvenih ostataka (od kojih, inače, nastaje), a koji bi u to isto zemljište bili zaorani nakon žetve.

Ceo proces proizvodnje i korišćenja bio-gasa za proizvodnju električne i toplotne energije (od koje se deo vraća u sam proces pripreme biomase), ilustrovan je na Slici 9, sa naznačenim tokovima i bilansima mase i energije i koeficijentima iskorišćenja.



Slika 9. Proces proizvodnje i korišćenja bio-gasa za proizvodnju električne i toplotne energije

Međutim, ozbiljan nedostatak i prepreku za širi obim proizvodnje i korišćenja bio-gasa predstavljaju visoki investicioni troškovi koji prate ova postrojenja. U zavisnosti od tehnologija, instalisani 1 MW_{el} postrojenja za proizvodnju bio-gasa i elektrane na ovo gorivo zahteva investiciju u opsegu od čak 4 do 6 miliona evra. U poređenju sa SE i VE, na primer, postrojenje na bio-gas ima značajno veće investicione troškove. Stoga se energetske subjekti za proizvodnju električne energije još uvek radije opredeljuju za gradnju SE i VE nego za elektrane na bio-gas. Kada se ovoj činjenici doda i ranije pomenuti problem eksponencijalnog rasta troškova transporta bio-mase (naročito kao nusprodukta u poljoprivredi) za areale poluprečnika većeg od oko 50 km, jasno je da i eksploatacioni troškovi postrojenja za proizvodnju bio-gasa i elektrane na ovo gorivo bivaju znatni.

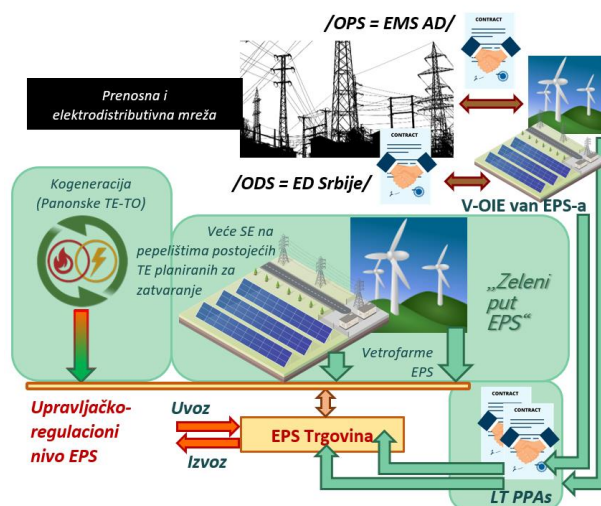
Ipak, moguće rešenje ili barem ublaženje ovih nedostataka (a pre svega transportnih troškova) leži u pomenutoj činjenici da je transport samog bio-gasa tehnički i tehnološki daleko jednostavniji, a time i jeftiniji od transporta biomase kao primarnog energenta. Naime, posle filtriranja/prečišćavanja bio-gasa i ekstrakcije (oko 30%) CO₂ iz njega, moguće je ubrizgavati bio-gas u postojeće gasovode namenjene za transport prirodnog gasa. Druga mogućnost je da bio-gas, pod pritiskom od 4 bar do 10 bar, bude transportovan kroz zasebne, jeftine gasovode od polietilena, čak i na veoma velika rastojanja. Stoga bi za EPS bio-gasne tehnologije mogle biti interesantne i razmatrane prvenstveno po konceptu koji bi činile sledeće komponente:

- decentralizovana proizvodnja bio-gasa, u već postojećim i budućim postrojenjima, manjih kapaciteta (za koja se žetveni ostaci prikupljaju sa većeg broja manjih, lokalnih areala), a koja su sada isključivo u vlasništvu lica i subjekata izvan EPS-a;
- otkup proizvedenog bio-gasa od strane EPS-a i njegov transport postojećim gasovodima za prirodni gas ili zasebnim, novim i jeftinijim gasovodima od polietilena;
- centralizovana potrošnja bio-gasa u postojećim TE-TO EPS-a, koje već imaju mogućnost kogeneracije.

Dodatna povoljna okolnost za primenu jednog ovakvog koncepta je i ta što se tri postojeće TE-TO EPS-a nalaze u Vojvodini, najvećoj žitnici Republike Srbije. Ova činjenica bi takođe povoljno uticala na smanjenje operativnih troškova u vezi sa eventualnom proizvodnjom i korišćenjem bio-gasa u EES-u Srbije i u proizvodnom portfelju EPS-a. Na ovaj način, korišćenjem bio-gasa, postojeće TE-TO EPS-a bi efektivno i efikasno postale

integralni deo koncepta njegovog „Zelenog puta”, čije su komponente prikazane na Slici 10. Nadasve, smanjila bi se uvozna zavisnost od prirodnog gasa i time doprinelo povećanju stepena energetske nezavisnosti Srbije.

Osim opisanog koncepta dobijanja bio-gasa iz biomase i mogućnosti njegovog korišćenja u proizvodnom portfelju EPS-a, u daljoj budućnosti bi bila moguća i primena bio-gasnih tehnologija zasnovanih na korišćenju niskokaloričnih ugljeva, s obzirom na to da EPS raspolaže preostalim količinama lignita u svojim površinskim kopovima u „Kolubari” i „Kostolcu”. Ipak, tehnologije direktnog dobijanja bio-gasa iz lignita danas su i dalje prilično daleko od komercijalne prihvatljivosti i praktične primene.



Slika 10. Komponente koncepta „Zelenog puta” EPS-a.

OPS – operator prenosnog sistema,

ODS – operator distributivnog sistema,

LT PPA – ugovor privatnog proizvođača i EPS-a o dugoročnom otkupu električne energije (Long-Term Power Purchase Agreement)

2.4.3 Proizvodnja, skladištenje i korišćenje vodonika.

Kao jedno od rešenja problema koje u EES unosi sve veći upliv V-OIE nude se vodonične tehnologije. Kao što je već napomenuto, viškovi proizvedene električne energije u EES-u mogu biti iskorišćeni za dobijanje vodonika elektrolizom i za njegovo komprimovanje, u cilju skladištenja. Ukoliko se električna energija za elektrolizu pribavlja isključivo iz OIE, kao produkt elektrolize javlja se „zeleni” vodonik. U realnosti, međutim, viškovi mogu poticati i iz klasičnih elektrana, pa i iz TE. Ukoliko, npr. do 20% električne energije za elektrolizu vodi poreklo iz njih,

a 80% i više iz OIE, kao rezultat procesa dobija se „plavi” vodonik. Tako proizvedeni vodonik, koji bi se dalje koristio kao nosilac energije, u budućnosti može predstavljati svojevrsnu kopču unutar energetskog sistema – između EES-a i ostalih sektora i sistema. Naime, ne samo da bi se javljao kao produkt rada EES-a nego bi se njegovim sagorevanjem u gorivim ćelijama (Slika 4, sredina dole) ponovo mogla dobijati, i u EES injektirati, električna energija. U drugim sektorima pak „plavi” vodonik se može koristiti kao jedan od primarnih energenata u sistemima daljinskog grejanja; dakle, za dobijanje toplotne energije (Slika 4, sredina desno i gore). „Zeleni” vodonik se, u kombinaciji sa CO₂, zahvaćenim u odgovarajućim postrojenjima u sklopu TE ili TE-TO, može koristiti za proizvodnju „plavog” metanola, koji služi kao gorivo za automobile, kamione, brodove i avione (Slika 4, dole desno).

2.4.4 Jamska termalna skladišta. Kao što je već pomenuto, u svetu već postoje i koriste se velika jamska termalna skladišta (*Pit Thermal Energy Storage*, PTES). Najviše iskustva i primene ovo tehničko rešenje našlo je u Danskoj. Ova skladišta se koriste tako što se viškovi električne energije iz sistema koriste za zagrevanje i sezonsko skladištenje vode (Slika 4, gore desno). Ona se potom koristi u kasnoj jesenjoj i zimskoj sezoni, najčešće za sisteme daljinskog grejanja. Obloga jame, kao i materijali od kojih se gradi njena prekrivka, obezbeđuje dobru izolaciju, kako tokom više meseci ne bi dolazilo do prevelike kondukcije toplote i hlađenja vode. Najčešće se, u kombinaciji sa jednom takvom jamom, kao oprema za zagrevanje vode koriste ili polja termalnih solarnih kolektora ili fotonaponski solarni paneli iz kojih se viškovi električne energije koriste za rad električnih grejača. Na drugoj strani, zajedno sa jamom i solarima ovaj sistem čini i toplotna pumpa, a moguća je i kombinacija toplotne pumpe i (postojeće) toplane za daljinsko grejanje. Što se tiče toplotne pumpe, moguće je koristiti pumpu sa kompresorom (kada se kao pogonska mašina uglavnom koristi električni motor, gasna turbina ili gasni motor), ili apsorpcionu toplotnu pumpu.

Što se tiče EPS-a, primena PTES-a bila bi moguća za naselja koja se toplotnom energijom za daljinsko grejanje sada snabdevaju iz TE koje su planirane za gašenje. Takođe, postoji interes EPS-a da učestvuje u razvoju i realizaciji projekta PTES-a za Novi Sad, tim pre što su planirane lokacije ovog postojanja, uključujući i napojno solarno polje, u neposrednoj blizini TE-TO Novi Sad. Realizacija ovakvih tehničkih rešenja donekle bi bila olakšana, i tehnički i finansijski, i to u pogledu građevinskih radova, jer bi za iskop i oblikovanje jama mogla biti korišćena postojeća rudarska mehanizacija EPS-a.

2.4.5 Korišćenje geotermalne energije. Osim za daljinsko grejanje ili pripremu tople vode, geotermalna energija može da se koristi i za proizvodnju električne energije. U tom slučaju se, međutim, zahteva veoma visoka temperatura radnog fluida, i od preko 190°C. U Evropi i svetu su razvijene i u upotrebi tri vrste elektrana na geotermalnu energiju:

- sa suvom parom;

- sa fleš parom;
- sa binarnim ciklusom.

Elektrana sa suvom parom koristi toplu vodu iz tzv. proizvodnog bunara, temperature fluida su preko 150°C. Nakon prolaska kroz turbinu para ide u hladnjak odakle se fluid vraća u zemlju, tzv. injekcionim bunarom. Ovu vrstu elektrana karakteriše relativno niska cena, ali je njihova primena geografski ograničena.

Elektrana sa fleš parom ispred turbine poseduje i tzv. fleš boiler, iz koga se deo fluida direktno vraća u zemlju, a deo ubrizgava u turbinu. Temperature fluida su preko 180°C. Ovo je dominantan tip geotermalne elektrane kada je reč o globalno instalisanim kapacitetima.

Elektrana sa binarnim ciklusom kao ključni element sadrži izmenjivač toplote. On se fluidom napaja iz proizvodnog bunara, iz njega se rashlađeni fluid vraća u zemlju preko injekcionog bunara, ali je na drugoj, sistemskoj strani, izmenjivač spregnut i sa turbinom (koju napaja fluidom) i sa suvim hladnjakom (preko koga prima fluid iskorišćen u turbini). Zbog ovako povećane efikasnosti, potrebne temperature fluida su kod ovog tipa elektrane niže, nešto preko 100°C. Takođe je važno istaći da se ovaj tip elektrane koristi za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije (tj. za grejanje).

Danas se širom sveta koriste dva tipa binarnih sistema:

- *Organic Rankine ciklus* (ORC), koji koristi organski radni fluid (propan ili izobutan);
- *Kalina ciklus*, koji kao radni fluid koristi smesu dve supstance (npr. vode i amonijaka).

Izazovi koji stoje pred širom primenom geotermalne energije za proizvodnju električne energije su transfer znanja i tehnologija iz gasne i naftne industrije i činjenica da srpska legislativa još uvek ne omogućava brži razvoj geotermalnih elektrana, niti subvencije i finansiranje početnih projekata. U slučaju eventualne poslovne i strateške odluke EPS-a da u budućnosti razvija i projekte geotermalnih elektrana, izazov transfera znanja i tehnologija bi mogao biti prevladan u saradnji sa drugim velikim, nacionalnim energetskim subjektom, Naftnom industrijom Srbije (NIS).

2.4.6 Nuklearna energija. Čak i uz široku i kombinovanu primenu svih pomenutih i opisanih novih tehnologija, postoji opasnost da će se, gašenjem za to predviđenih TE i smanjenjem angažovanja preostalih, pojavljivati sve veći manjak električne energije u proizvodnom portfelju EPS-a, pa i u EES-u Srbije u celini. Sa druge strane, najveći deo bazne energije koja će se do 2050. godine pojavljivati kao nedostajuća, i stoga kritična, najlakše je podmiriti iz budućih nuklearnih elektrana (NE).

Izgradnja i korišćenje NE ima, dakako, i drugih svojih prednosti, ali i nedostataka. U prilog ukidanju postojećeg moratorijuma na izgradnju NE u Srbiji i opredeljivanje EPS-a za razvoj projek(a)ta NE, govore sledeće činjenice:

- faktor kapaciteta NE je oko 85%;
- godišnja proizvodnja je i do 8 TWh po jednoj jedinici u NE, snage do oko 900+ MW;
- dostupne su pouzdane i kompaktne NE (generacije III+, IV);
- Tehnologije SMR (*Small Modular Reactors*) postaju sve bezbednije i stoga prihvatljivije za javnost;

- na raspolaganju je obilje otpadne toplote iz NE za grejanje stanova, industrije, staklenika;
- NE ne zahtevaju nikakvu rezervu, skladištenje energije niti balansiranje;
- nema velikih troškova za električnu energiju koja bi bila utrošena za konverziju u druge oblike energije ili goriva.

Od nedostataka koji prate primenu nuklearnih tehnologija treba istaći sledeće:

- osim tehnologije, i nuklearno gorivo se takođe mora nabaviti iz inostranstva, tako da bi postojao veoma visok stepen energetske zavisnosti Srbije;
- zavisnost od isporučilaca tehnologije, isporučilaca goriva i zemlje koja bi kod nas brinula i o isluženom radioaktivnom gorivu je najviša moguća i politički veoma upitna;
- moratorijum na gradnju NE je i dalje na snazi;
- upitni su problemi u vezi sa eventualnim posjedovanjem nuklearnih tehnologija (u slučaju Srbije, zbog političkih odnosa u regionu);
- nedostatak eksperata obrazovanih u ovoj oblasti;
- upitno je da li bi bilo moguće u Srbiji primeniti, u datom trenutku raspoloživa, najnovija tehnička i tehnološka rešenja;
- upitno je i prihvatanje nuklearnih tehnologija u javnosti kad se ima u vidu da i visoko tehnološki razvijene zemlje napuštaju te tehnologije;
- pitanje je i to da li bi razvoj tehnologije zasnovane na fuziji u međuvremenu (npr. do završetka planiranja, projektovanja i izgradnje prve/ih NE) prevazišao trenutno raspoloživa i, naročito – za Srbiju dostupna, tehnička rešenja bazirana na fisijonij tehnologiji.

O svim ovim aspektima i otvorenim pitanjima (ne ograničavajući se, naravno, samo na njih) potrebno je povesti računa pri razmatranju opcije opredeljivanja za razvoj i realizaciju projekata NE u EPS-u, tj. Srbiji.

2.5 Način razmatranja uvođenja novih tehnologija

Na putu dekarbonizacije i energetske tranzicije, pred EPS i druge energetske subjekte u Republici Srbiji, osim strateških i dugoročnih, postavljaće se i zadaci davanja mišljenja o nekom konkretnom problemu, projektu, studiji, tehničkoj dokumentaciji ili inovaciji. I u jedna i u druga razmatranja poželjno je uključivati eksperte u konkretnim oblastima koji su članovi akademske zajednice – univerzitetske i naučno-istraživačke. Sa njima bi se razmatrale i mogućnosti primene:

- najnovijih rezultata naučnih istraživanja;
- novih tehnologija i inovativnih tehničkih rešenja;
- najbolje raspoložive prakse.

Jedan od mogućih načina stvaranja formalno-pravnog okvira za ovakvo, sinergijsko delovanje akademske zajednice i energetske subjekte jeste zaključivanje bilateralnih sporazuma o naučno-tehničkoj saradnji. Na taj način stvaraju se uslovi za uspostavljanje tešnje saradnje elektroprivrede sa obrazovnim i naučnim ustanovama koje se bave istraživanjem i razvojem u oblastima od interesa za elektroprivrednu delatnost.

Najvažniji ciljevi koji bi mogli biti dostignuti ovakvom sinergijom naučno-istraživačkog rada sa jedne i stručne prakse i iskustva sa druge strane sledeći su:

- stvoriti potrebne uslove za unapređenje i dalji razvoj proizvodnih kapaciteta EPS-a;
- imati zaposlene u EPS-u koji su obrazovani u oblastima novih tehnologija i inovativnih rešenja i motivisani za njihovu primenu;
- realizacija strateških ciljeva EPS-a i Republike Srbije u energetskom sektoru.

Ovakav koncept saradnje i uspostavljanja timskog rada olakšao bi kretanje EPS-a i Republike Srbije na putu dekarbonizacije, energetske tranzicije i uspostavljanja održivog razvoja i cirkularne ekonomije.

3. ZAKLJUČAK

Potrebno je postepeno, tokom nekoliko decenija koje su pred nama, uspostaviti takav proizvodni miks, koji bi bio zasnovan i oslonjen na različite ekološki prihvatljive energente i na nove tehnologije, koji će biti ne samo izvodljiv i održiv na dugi rok nego i tehnički, finansijski i ekonomski optimalan za srpske uslove i prilike, kao i društveno prihvatljiv. Osim toga, taj miks mora biti dovoljan za profitabilan rad EPS-a i u stanju da obezbedi:

- stabilnost i pouzdanost rada EES-a Srbije;
- sigurnost snabdevanja krajnjih korisnika;
- najviši mogući nivo energetske nezavisnosti i bezbednosti Republike Srbije;
- zadovoljstvo i krajnjih korisnika EES-a i zaposlenih u EPS-u.

Pri tome u najvećoj mogućoj meri treba poštovati i primenjivati principe koji će voditi ka povećanju energetske efikasnosti, uspostavljanju cirkularne ekonomije i smanjenju negativnih uticaja na životnu sredinu kao i na socijalni aspekt.

Izbor najpogodnijih i najprimerenijih novih tehnologija i konkretnih tehničkih rešenja novih kapaciteta za proizvodnju električne i toplotne energije u buduću treba da bude vršen na osnovu mišljenja i zaključaka do kojih će doći eksperti iz naučnih i stručnih krugova svojim zajedničkim radom i sinergijskim delovanjem.

Da bi se sve ovo ostvarilo, neophodna su ulaganja i u sticanje novih znanja i stalno unapređenje znanja u konkretnim tehničkim i tehnološkim oblastima. Osim toga, potrebno je uložiti napore i sredstva i u podizanje svesti, širega kruga zainteresovanih strana i javnosti u celini, o neophodnosti primene novih tehnologija i kvalitativnog pomeraja od fosilnih ka obnovljivim energentima i održivog budućnosti.

LITERATURA

- [1] Korohod, A., Decarbonization as One of the Ways to Solve the Problems of Globalization, 2023, DOI: 10.15837/aijes.v17i1.5761
- [2] Engr Olushola Aina, Decarbonization, Opportunities and Dilemma for Developing Countries, *American Journal of Computing and Engineering*, ISSN 2790-5586 (Online), Vol.7, Issue 1, pp 1 – 12, 2024
- [3] Vojinovic, I., Understanding Main Drivers of Global Decarbonization, 2024, Mediterranean Conference on

- Medical and Biological Engineering and Computing International Conference on Medical and Biological Engineering, DOI: 10.1007/978-3-031-49062-0_93
- [4] Diaz, S., Al Hammadi, N., El Nasr, A. S., et al., Green Corridor: A Feasible Option for the UAE Decarbonization Pathway, Opportunities & Challenges
- [5] Nowrot, A.; Manowska, A., Supercapacitors as Key Enablers of Decarbonization and Renewable Energy Expansion in Poland, *Sustainability* 2024, 16, 216. <https://doi.org/10.3390/su16010216>
- [6] Lau, H. C., Decarbonization of ASEAN's power sector: A holistic approach, 2023, *Energy Reports* 9(3): 676-702, DOI: 10.1016/j.egy.2022.11.209
- [7] Li, X. (S.), Liu, P., Energy transition paradox: Solar and wind growth can hinder decarbonization, 2024, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, DOI: 10.1016/j.rser.2023.114220
- [8] Ghosh, Sadhan K., Ghosh, Sannidhya K., Circular Economy Catalysing Decarbonization, Chapter in the book: *Circular Economy Adoption*, 2023, DOI: 10.1007/978-981-99-4803-1_1
- [9] Lau, H.C., Tsai, S.C., Global Decarbonization: Current Status and What It Will Take to Achieve Net Zero by 2050, *Energies* 2023, 16, 7800, <https://doi.org/10.3390/en16237800>
- [10] Petersen, M., Renken, K., Adopting a Value Chain Focus to Tackle Decarbonization, Chapter in the book: *Maritime Decarbonization*, 2023, DOI: 10.1007/978-3-031-39936-7_6
- [11] FX Joko Priyono, Trade And Decarbonization: Opportunities and Challenges, 2023, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1270 012003, doi: 10.1088/1755-1315/1270/1/012003
- [12] Onyinyechukwu Chidolue et al., Decarbonization strategies in energy-intensive industries: Cases from Canada, USA, and Africa, *International Journal of Science and Research Archive*, 2024, 11(01), 361–370, DOI: <https://doi.org/10.30574/ijrsra.2024.11.1.0065>
- [13] Sundaramoorthy, S., Kamath, D., Nimbalkar, S., Price, C., Wenning, T., Cresko, J., Energy Efficiency as a Foundational Technology Pillar for Industrial Decarbonization, *Sustainability* 2023, 15, 9487. <https://doi.org/10.3390/su15129487>
- [14] Leisin, M.; Radgen, P., Holistic Assessment of Decarbonization Pathways of Energy-Intensive Industries Based on Exergy Analysis, *Sustainability* 2024, 16, 351. <https://doi.org/10.3390/su16010351>
- [15] Nesterenko, N. et al., Methane-to-chemicals: a pathway to decarbonization, Chemistry, Special topic: Green Carbon Science – A Scientific Basis for Carbon Neutrality, 2023, Published by Oxford University Press on behalf of China Science Publishing & Media Ltd.
- [16] Martin, J., Baccarani, C., Brunetti, F., Sustainability and decarbonization: can we afford it? - Some implications for management, 25th Excellence in Services International Conference, University of Upsala – Gotland – Sweden, April 2023, ISBN 9791221015904
- [17] Cruceru, C., Dumitrașcu, D. D., The discrepancy of managing decarbonization & profitability, 2023, The 8th International Conference "Management Strategies and Policies in the Contemporary Economy", DOI: 10.53486/icspm2023.58
- [18] Gallagher, K. S., Oh, S., Job creation and deep decarbonization, *Oxford Review of Economic Policy*, 2023, 39, 765–778, <https://doi.org/10.1093/oxrep/grad038>
- [19] Chengbo Fu, Lei Lu, Mansoor Pirabi, Advancing green finance: a review of climate change and decarbonization, *Digital Economy and Sustainable Development* (2024) 2:1, <https://doi.org/10.1007/s44265-023-00026-x>
- [20] Succar, S.A., Brissaud, D., Evrard, D., Flick, D., De la Fontaine, D., Decarbonization Measure: A Concept towards the Acceleration of the Automotive Plant Decarbonization, *Systems* 2023, 11, 335. <https://doi.org/10.3390/systems11070335>
- [21] Tantau, A.; Goia, S.I.; Dinca, V.M.; Paunescu, C.; Stamule, S.; Stamule, T.; Bogdan, A. Exploring the Generation Z Attitude towards Energy Efficiency Improvement and Decarbonization through Heat Pumps: An Empirical Study in Romania, *Sustainability* 2024, 16, 1250, <https://doi.org/10.3390/su16031250>
- [22] Müller, C.C., Pradhananga, P., El Zomor, M., Pathways to decarbonization, circular construction, and sustainability in the built environment, 2024, *International Journal of Sustainability in Higher Education*, DOI: 10.1108/IJSHE-09-2023-0400
- [23] Šiljkut V. M., „Uticaj potrošača na održivu dekarbonizaciju budućeg elektroenergetskog sistema”, *Zbornik radova, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”*, br. 31, str. 13-38, 2021, doi:10.5937/zeint31-34268
- [24] Rasool, A.A., Abbas, N.M., Sheikhyounis, K., Determination of optimal size and location of static synchronous compensator for power system bus voltage improvement and loss reduction using whale optimization algorithm, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2022, 1(8(115)), 26-34, doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.251760>
- [25] „Preliminarna analiza mogućnosti korišćenja proizvodnih jedinica planiranih po NERP-u za Opt-Out, za pružanje pomoćne usluge regulacije

napona”, Studija za EPS, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, 2021.

- [26] „RHE 'Bistrica' – analize i investiciono-tehnička dokumentacija”, studija i idejno rešenje za EPS, konzorcijum „Energoprojekt-Hidroinženjering” AD Beograd i „Elektroenergetski koordinacioni centar” DOO Beograd, 2021.
- [27] Kusakana, K.: 'Optimal scheduling for distributed hybrid system with pumped hydro storage', *Energy Conversion and Management*, 2016, (111), pp. 253–260.
- [28] Kocaman, A.S., Modi, V.: 'Value of pumped hydro storage in a hybrid energy generation and allocation system', *Applied Energy*, 2017, (205), pp. 1202–1215.
- [29] „Studija o mogućnostima izgradnje reverzibilnih hidroelektrana i pumpno-akumulacionih postrojenja

u Srbiji”, studija za EPS, 2. faza, „Definisanje širih prostora i perspektivnih lokacija gradnje RHE i PAP pri HE”, konzorcijum „Energoprojekt-Hidroinženjering” AD Beograd i Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 2023.

- [30] „Harmonizacija i obrada ulaznih podataka za izradu studije optimalnog korišćenja hidroenergetskih kapaciteta EPS AD, na vremenskom horizontu 1926–2018. godina”, projekat, Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet, 2023.
- [31] Ilić, J., „Aktuelni projekti rekonstrukcije, adaptacije i investicionog održavanja postojećih hidroelektrana i RHE u EPS AD”, stručno-naučni skup „Hidroenergetika regiona jugoistočne Evrope”, SANU, 2023.

BIOGRAFIJA



Vladimir M. Šiljkut je rođen 1966. godine u Beogradu, gde je diplomirao 1994. i doktorirao 2015. godine na Elektrotehničkom fakultetu. Radio je u „Elektrodistribuciji Beograd” (1995–2013) na poslovima planiranja, razvoja i istraživanja distributivnih mreža, vodio Laboratoriju za brojila električne energije i Centar za integrisani sistem

menadžmenta. U „Elektroprivredi Srbije” vodio je Sektor za trgovinu i odnose sa tarifnim kupcima u Direkciji za distribuciju električne energije (2013–2015). Potom je (2015/16) vodio i koordinirao projekte na smanjenju gubitaka u Operatoru distributivnog sistema. Od 2016. do 2022. bio je šef Službe za pripremu novih ulaganja u elektrane i obnovljive izvore energije, na kojoj poziciji je i trenutno, a u periodu od marta 2022. do jula 2023. bio je savetnik za poslovni sistem direktora EPS-a. Više od jedne

decenije bio je angažovan i kao gostujući predavač za oblasti distribucije i maloprodaje električne energije i elektrana i razvodnih postrojenja, na Višoj elektrotehničkoj školi u Beogradu. (Ko)autor je više od 75 članaka i radova (od toga četiri članka u međunarodnim časopisima), objavljenih u publikacijama ili prezentovanih na brojnim nacionalnim, regionalnim i međunarodnim konferencijama. Ovi radovi su iz domena metoda prognoze opterećenja, optimalnog planiranja mreže, procene gubitaka električne energije, obnovljivih izvora energije, upravljanja opterećenjem, energetskih transformatora, metrologije i dr. Koautor je i jedne praktične knjige iz elektrodistribucije i maloprodaje električne energije na srpskom jeziku. Član je Srpskog nacionalnog komiteta CIRED, njegovog Izvršnog odbora, najviše aktivan u sesiji 1 – Komponente mreže (kao predsednik) i u sesiji 5 – Planiranje distributivnih mreža.

Vladimir M. Šiljkut (Šiljkut)¹

Challenges and opportunities for long-term development and decarbonization of the Electric Power Industry of Serbia

¹ Joint Stock Company *Elektroprivreda Srbije*, Belgrade*

Review article

Highlights

- Review of new literature on decarbonization, transition and circular economy
- Proposal of a decarbonized power system model, based on the example of Serbia
- Opportunities and challenges for energy sources diversification and application of new technologies
- Proposal of ways to transfer knowledge in the energy sector of academia into the domain of industry / economy

Abstract

Environmental pollution and resources consumption for the industry operation and development of national economies have made it inevitable to find technical and technological solutions that will enable sustainable future development. Decarbonization, circular economy and diversification of energy sources are therefore imposed as a solution. In the (power) energy sector, they imply energy transition, primarily from the current mass use of fossil fuels to ecologically more acceptable primary energy sources, with an increase in energy efficiency, including an increase in waste heat's and waste materials' usage in the processes of heat and electricity production. Decarbonisation, however, raises complex issues and problems; from technical-technological, economic and financial ones - that long-term process' manners, dynamics and implementation costs, to the issue of its acceptability, fairness and the need to acquire appropriate knowledge and awareness. The example of Serbia, its electric power system (EPS) and "Electric Power Industry of Serbia" (EPIS) shows that it is necessary to establish gradually such a production mix, which would be based and relied on different, environmentally friendly energy sources and on new technology, which will be not only feasible and sustainable in the long term, but also technically, financially and economically optimal for Serbian conditions and opportunities, as well as socially acceptable. That mix must allow the profitable operation of EPIS and be able to ensure the stability and reliability of Serbian EPS operation, security of supply to end-users, the highest possible level of energy independence and security of the Republic of Serbia, and the satisfaction of end-users and EPIS employees. At the same time, the principles that will lead to an increase in energy efficiency, the establishment of a circular economy and the reduction of negative impacts on the environment, as well as on the social aspect should be respected and applied. The selection of the most suitable and appropriate new technologies and particular technical solutions for new capacities for the electricity generation and heat production in the future should be made on the basis of opinions and conclusions reached by experts from scientific and professional circles, through their joint work and synergistic action.

Keywords

**Circular Economy, Decarbonization, Diversification, Energy Efficiency,
Energy Sources, Energy Transition**

Received: February 26th, 2024 Reviewed: March 13th, 2024Modified: March 27th, 2024 Accepted: April 18th, 2024

*Vladimir M. Šiljkut (Šiljkut), +381-64-897-46-72

E - mail: vladimir.siljkut@eps.rs

Jadranka M. Janjanin¹, Milan M. Danilović², Željko R. Jovanović¹

Analiza potrebnih mesečnih količina električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije za nadoknadu gubitaka u prenosnom sistemu

¹ Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije” Beograd*² Agencija za energetiku Republike Srbije

Stručni rad

Ključne poruke

- Varijabilnost srednjih satnih vrednosti tehničkih gubitaka u prenosnom sistemu
- Aproksimacija proizvodnje elektrana iz OIE
- Mogućnost nadoknade tehničkih gubitaka u prenosnom sistemu iz OIE

Kratak sadržaj

U toku je „zelena“ tranzicija – kretanje energetskog sektora ka klimatskoj neutralnosti do 2050. godine i stoga je bitno blagovremeno planirati i osigurati održivost postojećih procesa. Identifikacija mogućnosti i izbor akcija su neizostavni u planiranju budućeg rada. Neretko se događa da izabranom akcijom ne postignemo željene rezultate, pa se moramo podvrgnuti iterativnim procesima. Kako bi se izbegla primena brzih akcija i nemogućnost sprovođenja potrebnih analiza, ključno je na vreme osmatrati i osmišljavati procese, pogotovo ukoliko proističu iz zakonski definisanih dužnosti.

Kada govorimo o operatoru prenosnog sistema, kao jednu od dužnosti iz Zakona o energetici prepoznavamo nabavku električne energije za nadoknadu tehničkih gubitaka u prenosnom sistemu. U ovom radu ćemo se posvetiti detaljnijoj analizi izabranog načina nabavke tehničkih gubitaka u prenosnoj mreži iz obnovljivih izvora energije. Autori rada su izabrali vetar, sunce i otpad kao izvore električne energije koje će koristiti u planiranju nabavke električne energije za nadoknadu gubitaka. Ovaj rad predstavlja nastavak analize koja je započeta u radu „Obnovljivi izvori energije kao resurs za kupovinu električne energije za nadoknadu gubitaka u prenosnom sistemu”. Sa nivoa sagledavanja godišnjih potreba električne energije za nadoknadu gubitaka u prenosnom sistemu proizvedenu iz obnovljivih izvora energije spuštamo se na mesečni nivo.

Ovaj rad može poslužiti kao smernica za ublažavanje ukupnih rizika i neizvesnosti operatora prenosnog sistema prilikom nabavke električne energije za nadoknadu tehničkih gubitaka u prenosnom sistemu na putu ka čistoj energiji do 2050. godine. Kroz rad ćemo sagledati da li je jedan od osnovnih principa tranzicije da je prelazak na čistu energiju objektivna i inkluzivna, opravdana u slučaju operatora prenosnog sistema.

Ključne reči

Aproksimacija proizvodnje iz obnovljivih izvora energije, gubici, klimatska neutralnost

Napomena:

Ovaj članak se tematski nadovezuje na tekst *Obnovljivi izvori energije kao resurs za kupovinu električne energije za nadoknadu gubitaka u prenosnom sistemu*, koji je objavljen 1. novembra 2024. u drugom, specijalnom izdanju „Elektroprivrede”, posvećenom izabranim nagrađenim radovima na 36. savetovanju CIGRE Srbija

Primljeno: 16. decembar 2024. Recenzirano: 16. januar 2025.

Izmenjeno: 1. februar 2025. Odobreno: 13. februar 2025.

* Korespondirajući autor: Jadranka Janjanin, +381 64 8408 661

Imejl: jadranka.janjanin@ems.rs

1. UVOD

Političke smernice Evropske komisije i dalje su usmerene ka ostvarivanju ciljeva postavljenih u Evropskom „zelenom” dogovoru, [1]. Zahvaljujući evropskim merama, obnovljivi izvori energije (OIE) dostigli su rekordan nivo, čineći 50% proizvodnje električne energije u EU tokom 2023. godine, [1].

Prema navodima u Direktivi Evropske unije (EU) 2013/2413, energetska sektor trenutno u EU doprinosi sa preko 75% ukupnih emisija gasova sa efektom staklene bašte, i zato su OIE od fundamentalnog značaja za postizanje klimatske neutralnosti EU do 2050. godine, [2]. U julu 2021. godine, kao deo paketa za Evropski „zeleni” dogovor, Evropska komisija je predložila da se do 2030. godine udvostruči udeo obnovljive energije u energetskom miksu, u poređenju sa 2020. godinom, kako bi dostigao procenat udela od najmanje 40%, [2].

U radu [3] napomenuto je da nekoliko evropskih operatora prenosnog sistema teži da nabavku električne energije za nadoknadu tehničkih gubitaka (u daljem tekstu: gubitaka) ostvari iz OIE kako bi doprineli rešavanju problema emisije gasova sa efektom staklene bašte i pokušano je da se sagleda po kom planu bi operator prenosnog sistema u Republici Srbiji mogao da nabavlja električnu energiju za nadoknadu gubitaka i nađe se među operatorima koji će olakšati „zelenu” tranziciju. Polazna tačka za analizu potreba operatora prenosnog sistema za električnom energijom na mesečnom nivou će biti aproksimacija godišnje ukupno ostvarene proizvodnje po tipu elektrana, u periodu 2019–2023. godine, u odnosu na obračunske vrednosti gubitaka prikazanih u Tabeli I, [3], uvažavajući korekciju obračunskih vrednosti gubitaka za 2023. godinu.

Tabela I Aproksimacija godišnje ukupno ostvarene proizvodnje po tipu elektrana, u periodu 2019–2023. godine, u odnosu na obračunske vrednosti gubitaka. Izvor: [3]

Godina		2019	2020	2021	2022	2023
Tip elektrane	Instalisana snaga	Godišnja proizvodnja elektrana [MWh]				
na otpad	110 MW	674.520	676.368	674.520	674.520	674.520
na vetar	30 MW	66.559	72.583	80.528	70.237	78.861
na sunce	50 MW	63.108	73.709	50.066	49.245	41.183
Ukupno [MWh]		804.187	822.660	805.114	794.002	794.564
Gubici [MWh]		805.914	798.352	844.972	801.999	926.420

Za izabrane tipove elektrana i navedene godine iz Tabele I u nastavku rada biće razložena potreba za električnom energijom za nadoknadu gubitaka po mesecima.

2. APROKSIMACIJA RADA ELEKTRANA NA OIE

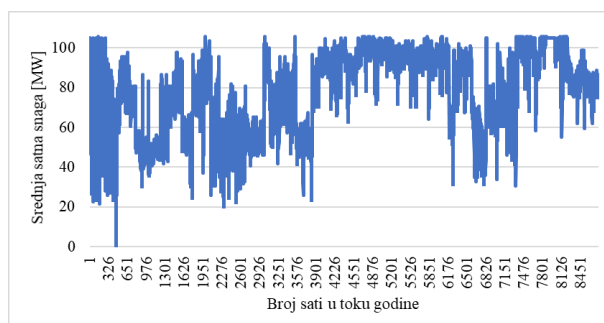
2.1 Elektrana na otpad

U novembru 2024. godine svečano je otvoreno prvo postrojenje za energetska iskorišćenje otpada u Srbiji odobrene snage od oko 35 MW. Ova elektrana termički obrađuje čvrst, neopasan, komunalni otpad i proizvodi „zelenu” toplotnu i električnu energiju. Realizacijom izgradnje TE-TO Vinča, nove sanitarne deponije, postrojenja za ponovno iskorišćenje građevinskog otpada i otpada od rušenja, i postrojenja za tretman procednih voda, ova investicija predstavlja ključan korak ka unapređenju održivog upravljanja komunalnim otpadom u Beogradu i značajnom poboljšanju kvaliteta životne sredine, [4].

Izgradnja TE-TO Vinča ima višestruke benefite kao što su unapređenje ekološke i socijalne sredine, zatvaranje stare deponije, koja predstavlja značajan rizik po životnu sredinu u regionu, smanjenje emisije gasova koji doprinose efektu staklene bašte, sprečavanje negativnih uticaja na životnu sredinu, kao što je narušavanje okolnog predela zbog odlaganja otpada na deponiju, i lokalno zagađenje vode i vazduha, [4].

Na osnovu podataka objavljenih na platformi [5], zemlje u našem okruženju koje u svojim proizvodnim kapacitetima imaju instalisane elektrane na otpad su Slovenija, Austrija, Hrvatska, Mađarska i Bugarska. Elektrane na otpad u ovim zemljama postoje već nekoliko godina što nam je bilo od pomoći prilikom procene dijagrama satnih vrednosti proizvodnje.

Poslednjih meseci TE-TO Vinča je u svom radu pokazala da postiže srednje satne vrednosti proizvodnje bliske instalisanoj snazi. Rukovodeći se ovom činjenicom i satnim dijagramima proizvodnje mađarske elektrane na otpad, odlučili smo da aproksimaciju srednjih satnih vrednosti proizvodnje iz elektrane na otpad instalisane snage 110 MW izvršimo u skladu sa dijagramom na Slici 1, za sve posmatrane godine, uz uvažavanje činjenice da je 2020. godina bila prestupna, odnosno sa 366 dana.



Slika 1. Aproksimacija srednjih satnih vrednosti proizvodnje iz elektrane na otpad instalisane snage 110 MW na godišnjem nivou

Dijagram proizvodnje sa Slike 1 odgovara ukupnoj godišnjoj proizvodnji elektrane na otpad instalisane snage 110 MW od 674.520 MWh za sve godine u periodu posmatranja 2019–2023. godine, osim prestupne kada iznosi 676.368 MWh.

Proizvodnja posmatrane elektrane na otpad po mesecima u skladu sa aproksimiranim dijagramom je prikazana u Tabeli II.

Tabela II Proizvodnja elektrane na otpad po mesecima, u periodu 2019–2023. godine

MWh	2019/2021/ 2022/2023	2020
Januar	49.400	49.400
Februar	37.900	39.748
Mart	51.815	51.815
April	36.973	36.973
Maj	52.771	52.771
Jun	56.757	56.757
Jul	71.147	71.147
Avgust	71.064	71.064
Septembar	63.724	63.724
Oktobar	48.097	48.097
Novembar	70.028	70.028
Decembar	64.844	64.844

Kao što je navedeno u radu, [3], vrednost gubitaka se u najvećem broju sati u toku godine kreće između 90 MW i 110 MW, tako da proizvodnja elektrane na otpad daje sigurnost operatoru prenosnog sistema da će obezbediti nesporni deo električne energije za nadoknadu gubitaka.

Za rad elektrane na otpad instalisane snage 110 MW potrebno je obezbediti dovoljnu količinu komunalnog čvrstog otpada kako bi se realizovao aproksimirani dijagram proizvodnje. Osvrnuli smo se malo na statističke podatke komunalnog otpada zemalja u Evropi koje u proizvodnji električne energije koriste elektrane na otpad. Kako bismo utvrdili domaći potencijal za obezbeđivanje dovoljne količine komunalnog čvrstog otpada za proizvodnju električne energije iz elektrane na otpad instalisane snage 110 MW, posmatrali smo ukupno generisani komunalni otpad [6] i ukupno instalisanu snagu svih proizvodnih grupa po tipu proizvodnje elektrane na otpad, [7], po izabranim zonama trgovanja u 2022. godini (Tabela III).

Iz Tabele III zaključuje se da je instalisana snaga proizvodnih grupa po tipu proizvodnje elektrane na otpad u zoni trgovanja Srbija najbliža zoni trgovanja Mađarska dok je ukupno generisani komunalni otpad duplo manji od mađarskog. U poređenju sa zonom trgovanja Nemačka–Luksemburg ukupno generisani komunalni otpad u Srbiji je oko 57 puta manji. Sve ovo nam ukazuje da bi bilo potrebno pre izgradnje elektrane na otpad instalisane snage 110 MW ispitati na koji način se može obezbediti dovoljna količina komunalnog čvrstog otpada u zoni trgovanja Srbija.

Tabela III Ukupno generisani komunalni otpad i instalisana snaga proizvodnih grupa po tipu proizvodnje elektrane na otpad u izabranim zonama trgovanja u 2022. godini.

Zona trgovanja	Generisani komunalni otpad po stanovniku [kg/stanovniku], [6]	Broj stanovnika [x 1.000.000], [8,9]	Ukupno generisani komunalni otpad po zoni trgovanja [x 1.000.000 kg]	Ukupno instalisana snaga proizvodnih grupa po tipu proizvodnje elektrane na otpad [MW], [7]
(1)	(2)	(3)	(4)=(2)x(3)	(5)
Nemačka-Luksemburg	1.314	85,1	111.821,4	1.832
Francuska	539	68,2	36.759,8	968
Belgija	677	11,7	7.920,9	384
Austrija	835	9,1	7.598,5	80
Mađarska	406	9,6	3.897,6	49
Srbija	295	6,6	1.947,0	32
Bugarska	445	6,4	2.848,0	6
Slovenija	487	2,1	1.022,7	6
Hrvatska	478	3,9	1.864,2	6

2.2 Elektrana na vetar

Elektrane na vetar su prvi put priključene na prenosni sistem Republike Srbije krajem 2018. godine i do decembra 2024. godine je njihova instalisana snaga dostigla 477 MW. Određivanju instalisane snage elektrane na vetar potrebne za nadoknadu dela gubitaka sprovedeno je na osnovu aproksimiranih satnih vrednosti proizvodnje iz elektrana na vetar u periodu 2019–2023. godine. Za aproksimaciju proizvodnje iz elektrane na vetar korišćene su obračunske srednje satne vrednosti snage i utvrđena je vrednost instalisane snage od 30 MW.

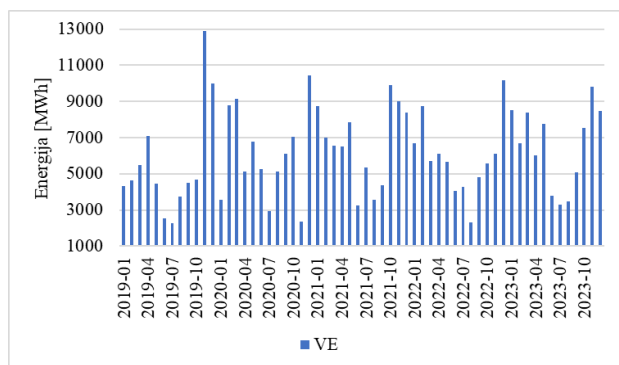
Izrađeni su dijagrami srednjih satnih vrednosti proizvodnje iz elektrane na vetar instalisane snage 30 MW sa svaku godinu perioda posmatranja od 2019. do 2023. godine koji su prikazani na Slici A.1, datoj u Dodatku 1 ovog članka.

Proizvodnja posmatrane elektrane na vetar po mesecima u skladu sa aproksimiranim dijagramima je prikazana u Tabeli IV.

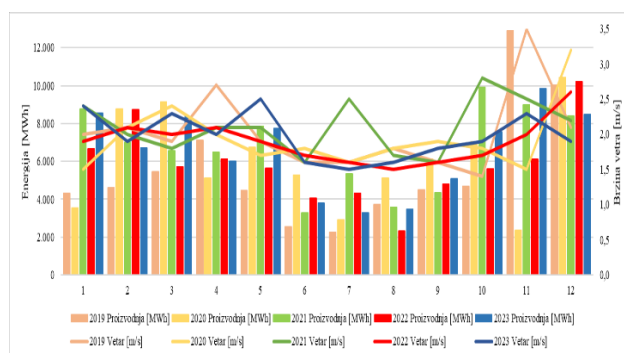
Tabela IV Proizvodnja elektrane na vetar po mesecima, u periodu 2019–2023. godine

MWh	2019	2020	2021	2022	2023
Januar	4.297	3.546	8.749	6.673	8.539
Februar	4.611	8.777	7.007	8.747	6.692
Mart	5.459	9.128	6.575	5.720	8.374
April	7.093	5.139	6.494	6.120	6.021
Maj	4.463	6.756	7.840	5.653	7.753
Jun	2.546	5.262	3.269	4.050	3.789
Jul	2.263	2.925	5.334	4.296	3.291
Avgust	3.727	5.137	3.577	2.305	3.470
Septembar	4.502	6.107	4.362	4.791	5.098
Oktobar	4.673	7.035	9.920	5.586	7.545
Novembar	12.909	2.350	8.996	6.107	9.818
Decembar	10.016	10.421	8.405	10.189	8.471

Grafički prikaz proizvodnje elektrane na vetar po mesecima, u periodu 2019–2023. godine (Slika 2) jasno ukazuje na varijabilnost proizvodnje od meteoroloških parametara, prevashodno od brzine vetra. Ostvarena brzina vetra je posmatrana za teritoriju Beograda. Izgrađene elektrane na vetar u Srbiji nisu u ovoj oblasti, ali je podatak dovoljno precizan da se opiše zavisnost proizvodnje elektrane na vetar od ovog parametra.



(a)



(b)

Slika 2. Proizvodnja iz elektrane na vetar instalisane snage 30 MW za period 2019–2023. godine; (a) u kontinuitetu po mesecima; (b) uporedni prikaz sa srednjom brzinom vetra po mesecima u navedenom periodu

U pojedinim mesecima razlika u proizvodnji doseže iznad 10 GWh, odnosno u istom mesecu u različitim godinama proizvodnja može biti pet puta veća. Najveći uzrok ovako velike razlike u proizvedenoj električnoj energiji je brzina vetra. Razlika između srednjih vrednosti brzine vetra na mesečnom nivou u mesecima sa najvećom razlikom u proizvedenoj električnoj energiji je bila 2 m/s.

2.3 Elektrana na energiju sunca

Jedna od glavnih prednosti koncentrovanih solarnih elektrana (CSP elektrane) u odnosu na solarne fotonaponske elektrane (PV elektrane) jeste ta što može biti opremljena rastopljenim solima u kojima se može skladištiti toplota, omogućavajući generisanje električne energije i kada nema sunčevog zračenja, [10].

Prilikom određivanja instalisane snage elektrane na sunce potrebne za nadoknadu dela gubitaka korišćeni su dostupni podaci sa platforme ENTSO-E za transparentnost, za zonu trgovanja Hrvatska za period 2019–2023. godine, [5]. Na osnovu podataka o ukupno ostvarenoj proizvodnji po tipu elektrane na sunce načinom PV, [11], utvrđeno je da je potrebna instalisana snaga elektrane na sunce 50 MW. Nakon toga je urađena aproksimacija satnih vrednosti proizvodnje za period posmatranja.

Izrađeni su dijagrami srednjih satnih vrednosti proizvodnje iz solarne PV elektrane, instalisane snage 50 MW, za svaku godinu perioda posmatranja od 2019. do 2023. godine, koji su prikazani na Slici A.2, datoj u Dodatku 1 ovog članka.

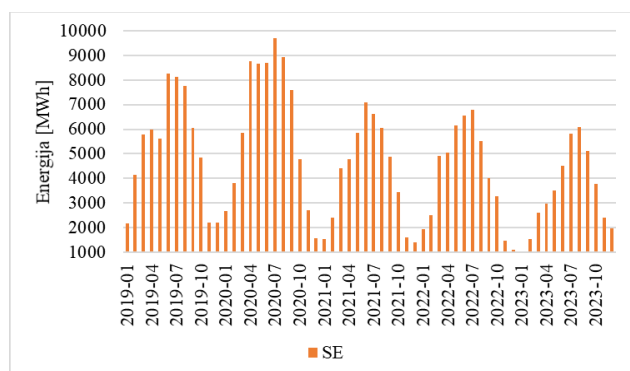
Proizvodnja posmatrane solarne PV elektrane po mesecima u skladu sa aproksimiranim dijagramima prikazana je u Tabeli V.

Tabela V Proizvodnja solarne PV elektrane po mesecima, u periodu 2019–2023. godine

MWh	2019	2020	2021	2022	2023
Januar	2.162	2.658	1.529	1.935	921
Februar	4.145	3.791	2.392	2.500	1.534
Mart	5.790	5.859	4.421	4.919	2.587
April	5.987	8.782	4.778	5.050	2.975
Maj	5.609	8.658	5.851	6.141	3.517
Jun	8.251	8.692	7.097	6.567	4.522
Jul	8.131	9.691	6.639	6.775	5.811
Avgust	7.760	8.940	6.058	5.529	6.088
Septembar	6.037	7.584	4.874	4.006	5.108
Oktobar	4.854	4.779	3.438	3.268	3.757
Novembar	2.189	2.701	1.594	1.454	2.398
Decembar	2.193	1.574	1.395	1.101	1.965

Tokom proteklih nekoliko decenija dogodio se značajan pad troškova proizvodnje električne energije iz solarnih PV elektrana i očekuje se da će se upotrebom solarnih PV elektrana taj trend nastaviti uz povećanje efikasnosti i poboljšanja pouzdanosti, izdržljivosti i dužeg veka trajanja elektrane, [12]. Međutim, ono što možemo zaključiti iz grafičkog prikaza proizvodnje solarne PV elektrane po mesecima, u periodu 2019–2023. godine (Slika 3), jeste sezonska zavisnost od vremenskih uslova, odnosno potencijala sunca i oblačnosti. U ovom radu smo koristili ostvarenu oblačnost za teritoriju Beograda uz pretpostavku da je identična za posmatranu elektranu u posmatranom periodu.

Sa Slike 3 zaključujemo da razlika u proizvodnji ove elektrane na sunce u toku istog meseca u različitim godinama dostiže vrednost od oko 5 GWh, odnosno može biti skoro tri puta veća. Bitan razlog za ostvarivanje ovako velike razlike u proizvodnji je oblačnost. Razlika između srednjih vrednosti oblačnosti na mesečnom nivou za posmatrani mesec sa najvećom proizvodnjom je bila tri puta manja za isti taj mesec sa najmanjom proizvodnjom.



(a)

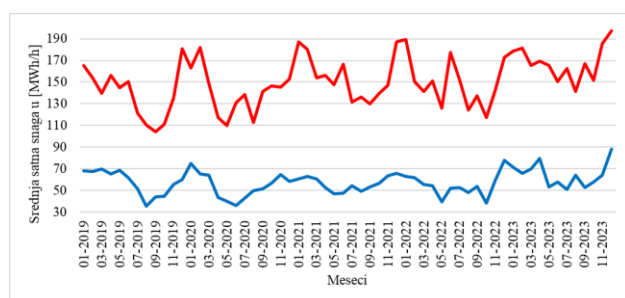


(b)

Slika 3. Proizvodnja iz elektrane na sunce instalisane snage 50 MW za period 2019–2023. godine; (a) u kontinuitetu po mesecima; (b) uporedni prikaz sa oblačnošću po mesecima u navedenom periodu

3. GUBICI U PRENOSNOJ MREŽI

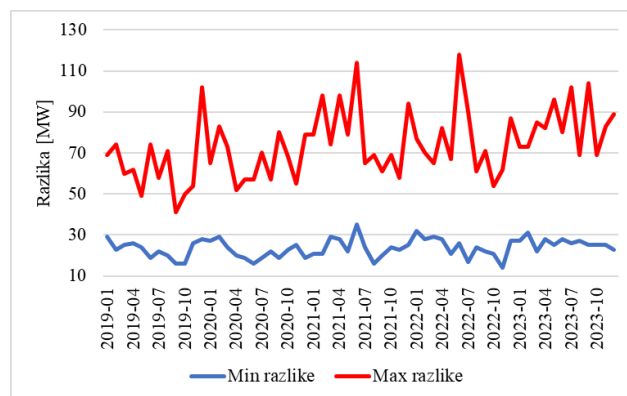
Osvrnućemo se na kretanje minimalnih i maksimalnih obračunskih srednjih satnih vrednosti gubitaka za period posmatranja od 2019. do 2023. godine (Slika 4).



Slika 4. Minimalne i maksimalne srednje satne vrednosti gubitaka po mesecima za period 2019–2023. godine. Izvor: [3]

Sa Slike 4 uočava se da se minimalne srednje satne vrednosti gubitaka kreću u opsegu od 35,5 MW do 88,3 MW, dok se maksimalne srednje satne vrednosti gubitaka kreću u opsegu od 104,2 MW do 197,3 MW.

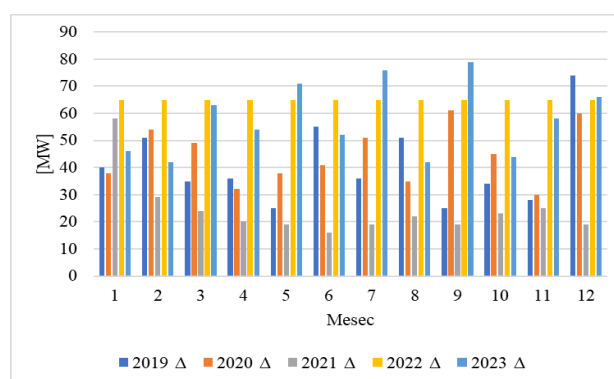
U toku jednog dana nije očekivano da će se javiti i minimalna i maksimalna srednja satna vrednost gubitaka za određeni mesec. Stoga, da bi bolje bila shvaćena fluktuacija gubitaka na dnevnom nivou unutar jednog meseca, posmatrali smo razliku između minimalne i maksimalne srednje satne vrednosti gubitaka na dnevnom nivou, po mesecima (Slika 5).



Slika 5. Razlika između minimalne i maksimalne srednje satne vrednosti gubitaka na dnevnom nivou po mesecima za period 2019–2023. godine

Sa Slike 5 može se videti da u zavisnosti od godine posmatranja u istom mesecu razlika između minimalne i maksimalne srednje satne vrednosti gubitaka na dnevnom nivou se može kretati od 19 MW do 79 MW.

Uporedne razlike između minimalne i maksimalne srednje satne vrednosti gubitaka na dnevnom nivou prikazane su na Slici 6.



Slika 6. Uporedni prikaz razlike između minimalne i maksimalne srednje satne vrednosti gubitaka na dnevnom nivou po mesecima za period 2019–2023. godine

Slika 6 nam otkriva nepredvidivost kretanja gubitaka po mesecima u toku godine i upravo ova nepredvidivost omogućava da se za njihovu nadoknadu koriste intermitentni OIE.

4. ANALIZA Odstupanja obračunskih SATNIH VREDNOSTI GUBITAKA OD APROKSIMIRANE PROIZVEDENE ELEKTRIČNE ENERGIJE IZ OIE

U idealnim situacijama prognozirane vrednosti gubitaka odgovarale bi obračunskim vrednostima gubitaka. Pod ovom pretpostavkom započinjemo analizu odstupanja obračunskih satnih vrednosti gubitaka od aproksimirane proizvedene električne energije iz OIE.

Za period posmatranja od 2019. godine do 2023. godine u svakom satu smo uporedili zbir aproksimirane proizvodnje izabranih OIE u skladu sa Poglavljem 2 i vrednosti obračunskih gubitaka. Na osnovu sprovedenog proračuna dobili smo rezultate iz Tabele VI (a) – (g).

Na osnovu Tabele VI dobija se jasna slika o količinama električne energije koje je potrebno dokupiti (manjak), odnosno prodati (višak) kako bi balansna grupa na tržištu električne energije koja u svom sastavu ima gubitke bila u potpunosti izbalansirana. Agregiranjem mesečnih podataka iz Tabele VI na godišnji nivo dobijamo Tabelu VII na osnovu koje zaključujemo da se na godišnjem nivou manjak električne energije može kretati od oko 13% do skoro 20% dok se viškovi mogu kretati od oko 6% do oko 16% u odnosu na godišnju vrednost gubitaka.

Tabela VI Odstupanje aproksimirane proizvodnje od obračunskih vrednosti gubitaka po mesecima u periodu 2019–2023. godine; (a) ukupna proizvodnja; (b) obračunski gubici; (v) manjak energije; (g) višak energije

MWh	2019	2020	2021	2022	2023
Januar	55.859	55.604	59.678	58.008	58.860
Februar	46.656	52.316	47.299	49.147	46.126
Mart	63.064	66.760	62.811	62.454	62.776
April	50.053	50.936	48.245	48.143	45.969
Maj	62.843	68.185	66.462	64.565	64.041
Jun	67.554	70.711	67.123	67.374	65.068
Jul	81.541	83.763	83.120	82.218	80.249
Avgust	82.551	85.141	80.699	78.898	80.622
Septembar	74.263	77.415	72.960	72.521	73.930
Oktober	57.624	59.911	61.455	56.951	59.400
Novembar	85.126	75.079	80.618	77.589	82.243
Decembar	77.053	76.839	74.644	76.134	75.280

(a)

MWh	2019	2020	2021	2022	2023
Januar	79.109	82.401	83.982	85.231	83.859
Februar	68.208	75.196	76.311	64.235	73.986
Mart	79.692	73.995	78.363	68.618	80.263
April	73.545	53.931	71.216	66.616	85.683
Maj	74.514	50.725	68.381	59.107	70.315
Jun	70.306	57.238	66.950	60.943	71.214
Jul	59.314	62.359	62.993	61.647	66.531
Avgust	55.245	60.244	58.602	60.694	69.758
Septembar	49.675	58.162	59.726	63.307	68.391
Oktober	52.191	73.139	66.322	62.337	71.426
Novembar	65.332	72.160	65.560	67.633	85.229
Decembar	78.783	78.802	86.565	81.630	99.766

(b)

MWh	2019	2020	2021	2022	2023
Januar	23.924	27.444	26.272	28.396	25.882
Februar	22.072	23.354	29.465	15.678	27.916
Mart	17.745	12.277	17.347	11.381	18.852
April	24.089	9.189	23.635	19.310	39.776
Maj	13.938	2.171	8.294	4.447	10.294
Jun	6.902	1.231	7.716	4.147	10.187
Jul	148	525	322	601	896
Avgust	27	105	66	183	755
Septembar	413	615	1.304	2.411	3.452
Oktober	4.439	16.234	9.628	9.604	13.829
Novembar	459	4.446	1.514	2.074	7.289
Decembar	6.992	7.561	16.559	9.905	25.022

(v)

MWh	2019	2020	2021	2022	2023
Januar	674	647	1.968	1.173	883
Februar	520	473	453	590	56
Mart	1.117	5.085	1.795	5.217	1.365
April	597	6.151	664	837	62
Maj	2.267	19.630	6.375	9.905	4.020
Jun	4.150	14.705	7.889	10.578	4.041
Jul	22.375	21.929	20.449	21.172	14.614
Avgust	27.333	25.001	22.163	18.387	11.619
Septembar	25.001	19.868	14.538	11.625	8.991
Oktober	9.872	3.006	4.761	4.218	1.803
Novembar	20.253	7.365	16.572	12.030	4.303
Decembar	5.262	5.597	4.638	4.409	536

(g)

Tabela VII Odstupanje aproksimirane proizvodnje od obračunskih vrednosti gubitaka po godinama u periodu 2019–2023. godine

Godina		2019	2020	2021	2022	2023
Tip elektrane	Instalisana snaga	Godišnja proizvodnja elektrana [MWh]				
na otpad	110 MW	674.520	676.368	674.520	674.520	674.520
na vetar	30 MW	66.559	72.583	80.528	70.237	78.861
na sunce	50 MW	63.108	73.709	50.066	49.245	41.183
Ukupno [MWh]		804.187	822.660	805.114	794.002	794.564
Manjak [MWh]		121.148	105.152	142.122	108.137	184.150
Višak [MWh]		119.421	129.457	102.265	100.141	52.293
Gubici [MWh]		805.914	798.352	844.972	801.999	926.420

Odstupanje satne vrednosti proizvodnje od potrošnje, u našem slučaju gubitaka, neizostavni je deo rada elektroenergetskog sistema, stoga je bitno raditi precizne prognoze proizvodnje i precizne prognoze potrošnje/gubitaka kako bi se blagovremeno proračunao očekivani manjak, odnosno višak električne energije i osmislio način kako da se manjak nadoknadi, odnosno višak potroši ili proda.

5. ZAKLJUČAK

Tranzicija ka klimatskoj neutralnosti zahteva transformaciju elektroenergetskog sistema vođenu ogromnim ulaganjima kako bi se integrisao veliki broj obnovljivih izvora energije i novih tehnologija u cilju sigurnog i održivog rada prenosnog sistema dostupnog za trenutne i buduće korisnike, kao i ostvarilo optimalno funkcionisanje i dalji razvoj jedinstvenog evropskog tržišta električne energije.

Klimatske promene uzrokuju češće ekstremne vremenske prilike, kao što su suše i oluje, koje dodatno mogu povećati varijabilnost i neizvesnost proizvodnje i potrošnje, a ponekad utiču i na dostupnost mrežne infrastrukture. U ovakvim okolnostima neizvesnost prognoze raste i greške u planiranju su neminovne. Što je veća neizvesnost u radu elektroenergetskog sistema, to je prognoza gubitaka teža, odnosno gubici su teže predviđivi.

Oslanjanje na proizvodnju električne energije iz izvora zavisnih od vremenskih prilika zahteva odgovarajuće mere kojima se mogu prevazići situacije kada vetar i sunce nisu dovoljni da elektrane koje ih koriste kao resurse svojom proizvodnjom pokriju potrebnu količinu gubitaka ili su pak preterani pa proizvodnja iz ovih elektrana prevazilazi potrebne količine.

Trenutno se evropski operatori prenosnog sistema ne mogu pohvaliti softverskim rešenjima sa preciznim prognozama gubitaka na vremenskom horizontu dan unapred kada se lakše može obezbediti potrebna količina električne energije za nadoknadu gubitaka bilo na bilateralnom ili na organizovanom tržištu dan unapred. U budućnosti će se nastojati da se ulože dodatni napor u cilju razvijanja sofisticiranih alata koji će unaprediti kvalitet prognoze gubitaka. Dosta nade se polaže u rešenja na bazi veštačke inteligencije.

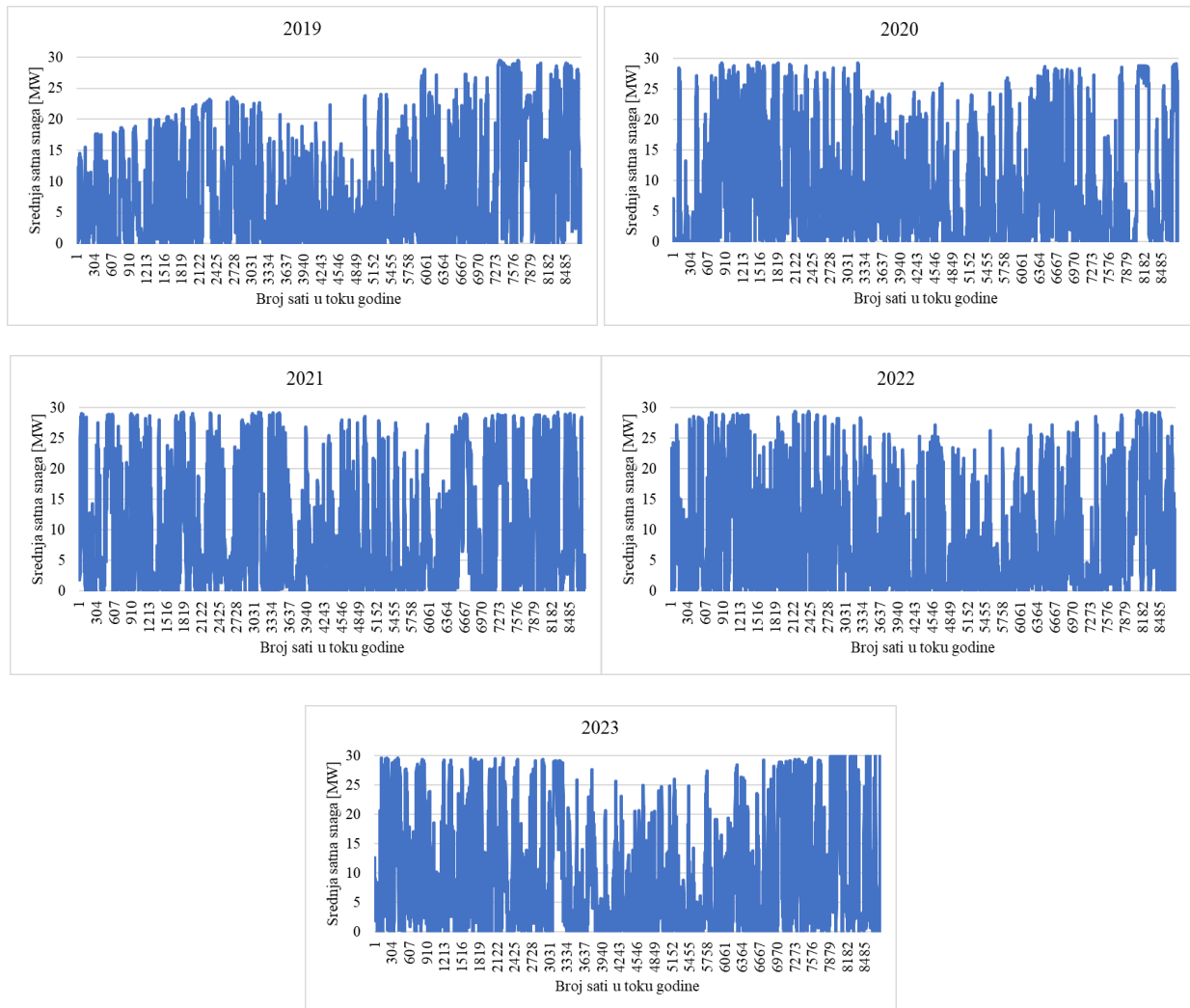
Na unutarrednevnom vremenskom horizontu prognoze gubitaka su preciznije, ali je neizvesnija mogućnost nabavke, odnosno prodaje očekivanog manjka, odnosno viška električne energije. Prevazilaženje trenutnog nedostatka ponude i potražnje za električnom energijom na unutarrednevnom vremenskom horizontu očekujemo da će se dogoditi spajanjem domaćeg tržišta električne energije sa jedinstvenim evropskim tržištem. Stupanjem na snagu Zakona o izmenama i dopunama Zakona o energetici „Sl. glasnik RS” br. 94/2024, Republika Srbija je preuzela odredbe tzv. Paketa za integraciju električne energije koji sadrži devet propisa EU, među kojima se nalaze i oni koji treba da omoguće spajanje tržišta električne energije.

Obračunske vrednosti gubitaka za posmatrani period od pet godina u prošlosti šalju nam signal da je vrednost srednje satne snage gubitaka u samo 0,06% sati pala ispod 45 MW, što ukazuje da iz proizvodnog portfelja elektrana na OIE u svakom satu tokom godine moramo obezbediti ovu vrednost, odnosno izabrati resurs koji će omogućiti približno konstantnu proizvodnju u svakom satu.

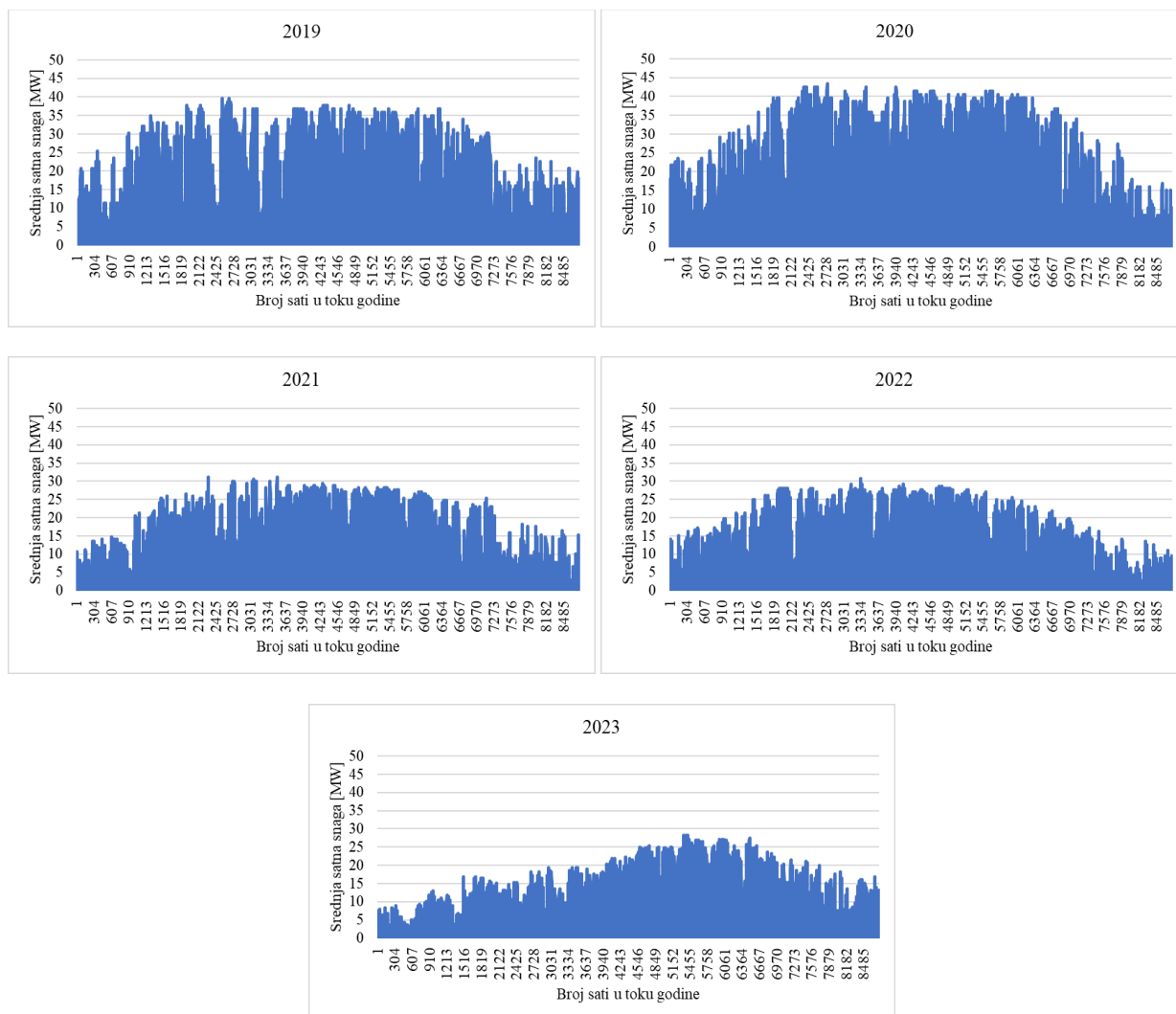
LITERATURA

- [1] Ursula von der Leyen, Candidate for the European Commission President, „Political Guidelines for the Next European Commission 2024–2029“, pp. 5,8, [Internet]. Dostupno na: https://commission.europa.eu/document/e6cd4328-673c-4e7a-8683-f63ffb2cf648_en
- [2] Directive (EU) 2023/2413 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652 [Internet]. Dostupno na: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2023/2413/oj>
- [3] Jadranka M. Janjanin, Željko R. Jovanović, Jelena J. Obradović, „Obnovljivi izvori energije kao resurs za kupovinu električne energije za nadoknadu gubitaka u prenosnom sistemu EMS AD Beograd“, „Elektroprivreda“, God. 2, Br. 2, 2024, 49-61, [Internet]. Dostupno na: <https://epijournal.eps.rs/radovi/09%20Janjanin-Jovanovic-Obradovic%20Final%20CIR%20za%20publikovanje-v2.pdf>
- [4] Beo čista energija d. o. o, [Internet]. Dostupno na: <https://www.bcenergy.rs/rs/projekat-jpp-u-oblasti-upravljanja-otpadom-u-beogradu/ciljevi-i-benefiti-projekta/>
- [5] ENTSO-E Transparency Platform, [Internet]. Dostupno na: <https://transparency.entsoe.eu/generation/r2/actualGenerationPerProductionType/show>
- [6] Eurostat, „Municipal waste statistics“, [Internet]. Dostupno na: <https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/SEPDF/cache/10360.pdf>
- [7] EMS AD Beograd, „Pravila o objavljivanju ključnih tržišnih podataka“, [Internet]. Dostupno na: <https://ems.rs/wp-content/uploads/2022/08/Pravila-o-objavljivanju-kljucnih-trzisnih-podataka-preciscen-tekst-20220307-1.pdf>
- [8] Eurostat, „Population on 1 January“, [Internet]. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/interactive-publications/demography-2024#population-structure>
- [9] Republika Srbija Republički zavod za statistiku, „Ključni pokazatelji - Procenjen broj stanovnika na dan 1. januar 2023. godine“, [Internet]. <https://www.stat.gov.rs/sr-latn/oblasti/stanovnistvo/procene-stanovnistva>
- [10] IRENA, [Internet]. Dostupno na: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Solar-energy>
- [11] IRENA, [Internet]. Dostupno na: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Wind-energy>
- [12] Solar Power Europe, [Internet]. Dostupno na: <https://www.solarpowereurope.org/interests/research-innovation>

DODATAK 1



Slika A.1. Aproksimacija srednjih satnih vrednosti proizvodnje iz elektrane na vetar instalisane snage 30 MW za period 2019–2023. godine



Slika A.2. Aproximacija srednjih satnih vrednosti proizvodnje iz elektrane na suncе instalisane snage 50 MW za period 2019–2023. godine

BIOGRAFIJE



Jadranka Janjanin je rođena u Beogradu. Diplomirala je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu na smeru Elektroenergetski sistemi i skoro 20 godina radi u operatoru prenosnog sistema EMS AD Beograd.

Svoj radni vek započela je u Direkciji za upravljanje prenosnim sistemom

gde ostaje do 2012. godine, nakon čega prelazi u Direkciju za tržište električne energije. Trenutno je na poziciji rukovodioca Sektora za proračun i nabavku električne energije za nadoknadu gubitaka u prenosnom sistemu. Dosadašnjim radom je stekla ekspertizu iz oblasti tržišta električne energije, a naročito u vezi sa nabavkom i prodajom električne energije na bilateralnom i organizovanom tržištu električne energije, prognozom rada prenosnog sistema, procesima planiranja i izveštavanja, energetskim bilansom operatora prenosnog sistema, dodelom prenosnih kapaciteta i spajanjem tržišta električne energije. Član je Organizovanog market komiteta za organizovano tržište električne energije u Srbiji SEEPEX. U području međunarodne saradnje učestvuje u radnim timovima i grupama u okviru evropske asocijacije ENTSO-E, regionalnih grupa u kontekstu WB6 i radnih timova koje predvode USAID/USEA.



Milan Danilović je rođen u Ivanjici. Diplomirao je na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu na smeru Elektroenergetski sistemi i već skoro 20 godina je aktivno prisutan u samom vrhu elektroenergetskog sektora Republike Srbije.

Radni vek započeo je u Dispečerskom centru EPS-a, Direkciji za trgovinu, a zatim preko poslova stručnog saradnika za poslove Upravnog odbora, a zatim i Nadzornog odbora EPS-a, radno iskustvo stiče u EPS Snabdevanju na poslovima komercijalnog snabdevanja.

U svojoj dosadašnjoj karijeri je stekao ekspertsku znanja iz oblasti planiranja i upravljanja proizvodnjom električne energije, tržišta električne energije sa akcentom na snabdevanje električnom energijom, regulatornih pitanja iz oblasti energetike. Trenutno se nalazi na poziciji člana Saveta Agencije za energetiku Republike Srbije. Učesnik je domaćih i regionalnih savetovanja iz oblasti elektrotehnike.



Željko Jovanović je rođen u Čačku. Osnovne i master studije je završio na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu na smeru Elektroenergetski sistemi i 2013. godine stiče zvanje master inženjer elektrotehnike i računarstva.

U EMS AD Beograd započinje rad 2014. godine u Direkciji za tržište električne energije, gde je i danas zaposlen. Nalazi se na poziciji šefa Službe za proračun električne energije za nadoknadu gubitaka u prenosnom sistemu. Posедуje znanje iz oblasti bilateralnog i organizovanog tržišta električne energije, sa posebnim akcentom na prognozu tehničkih gubitaka u prenosnoj mreži i kupovinu i prodaju električne energije za njihovu nadoknadu.

Učesnik je domaćih i regionalnih savetovanja iz oblasti elektrotehnike.

Jadranka M. Janjanin¹, Milan M. Danilovic², Zeljko R. Jovanovic¹

Analysis of Required Monthly Amounts of Electrical Energy Produced from Renewable Energy Sources for Covering Transmission System Losses

¹ EMS JSC Belgrade, Belgrade, Serbia*² Energy Agency of the Republic of Serbia

Professional paper

Highlights

- Variability of average hourly values of technical transmission system losses
- Approximation of power plant production from RES
- Possibility to cover technical transmission system losses from RES

Abstract

The transition to climate neutrality by 2050, the so-called "green" transition is underway and therefore it is important to plan and ensure the sustainability of existing processes. Identification of opportunities and selection of actions are indispensable in planning future work. It often happens that the chosen action does not achieve the desired results, so we have to undergo iterative processes. In order to avoid the application of quick actions and the impossibility of conducting the necessary analyses, it is crucial to observe and design processes in time, especially if they arise from legally defined obligations.

When we talk about the transmission system operator, we recognize the procurement of electrical energy for covering of technical transmission system losses as one of the obligations from the Energy Law. In this paper, we will devote ourselves to a more detailed analysis of the chosen method of procurement of technical transmission system losses from renewable energy sources. The authors of the paper chose wind, sun and waste as sources of electrical energy that they will use in planning the procurement of electrical energy for covering transmission system losses. This paper is a continuation of the analysis that was started in the paper "Renewable Energy Sources as a Resource for the Procurement of Electrical Energy for Covering Transmission System Losses". From the level of looking at the annual needs of electrical energy for covering of transmission system losses produced from renewable energy sources, we go down to the monthly level.

This paper can serve as a guideline for mitigating the overall risks and uncertainties of transmission system operators during procurement of electrical energy for covering technical transmission system losses on the way towards clean energy by 2050. In the paper, we will analyze whether one of the basic principles of the transition, i.e. that the transition to clean energy is objective and inclusive, is justified in the case of transmission system operator.

Keywords

Approximation of production of electrical energy from renewable energy sources,
Climate neutrality, Losses

Note:

This article thematically follows on from the text *Renewable Energy Sources as a Resource for the Procurement of Electrical Energy for Covering Transmission System Losses*, which was published on November 1, 2024 in the second, Special Edition of "Electric Power Industry Journal", dedicated to selected award-winning papers at the 36th CIGRE Serbia Conference.

Received: December 16th, 2024Reviewed: January 16th, 2025Modified: February 1st, 2025Accepted: February 13th, 2025

*Corresponding author: Jadranka Janjanin, +381 64 8408 661

E - mail: jadranka.janjanin@ems.rs

Slavica Stojiljković¹, Vladimir M. Šiljkut¹

Prikaz upravljačkih sistema vetrogeneratora

¹Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije”, Beograd, Republika Srbija*



Prikaz

Ključne poruke

- Različiti načini regulacije snage vetroturbine
- Obezbeđenje pouzdanog i efikasnog rada vetrogeneratora pri promenljivoj snazi vetra
- Turbina na vetar je inherentno nelinearna i varijabilna sa vremenom

Kratak sadržaj

U ovom radu dat je prikaz najnovije stručne literature u domenu upravljačkih sistema vetrogeneratora. Detaljnije su prikazane i objašnjene neke tehnike korišćene u upravljanju vetroturbinama sa horizontalnom osovinom na pojedinačnom nivou turbine, kod kojih se upravljanje primenjuje na nagib lopatice turbine i snagu generatora. Turbinski sistem je modelovan kao fleksibilna struktura koja radi u prisustvu turbulentnih smetnji vetra. Dat je pregled različitih faza rada turbine i strategije upravljanja koje se koriste za maksimiziranje pretvaranja energije pri brzinama ispod nominalnih, ali je naglasak na upravljanju ublaživanja aerodinamičkih opterećenja kada turbina radi na maksimalnoj snazi. Nakon pregleda osnovnih ciljeva upravljanja turbinom rad pruža pregled uobičajenih osnovnih pristupa linearnog upravljanja, a zatim se opisuju naprednije arhitekture upravljanja i daje odgovor na pitanje zašto one mogu pružiti više prednosti.

Ključne reči

Brzina vetra, linearizovani model vetroturbine, regulacija snage vetroturbine, stepen iskorišćenja vetroturbine, vetrogenerator

Primljeno: 22. oktobar 2024. Recenzirano: 18. januar 2025.

Izmenjeno: 10. februar 2025. Odobreno: 21. februar 2025.

* Korespondirajući autor, +381-64-83-33-277, slavica.stojiljkovic@eps.rs

1. UVOD

Vetar je besplatan i neiscrpan energetski resurs. Koristi se od davnina. Do industrijske revolucije vetar je uz drvo bio najveći izvor energije. Koristio se za pokretanje brodova, mlinova i pumpi za vodu. Proizvodnja električne energije iz vetra počela se razvijati tridesetih godina prošlog veka. Tada je počela izgradnja prvih vetroagregata za konverziju energije vetra u električnu energiju. Razvojem velikih hidro, termo i nuklearnih elektrana vetroagregati, ekonomski i tehnički nekonkurentni ovim kapacitetima, pali su u zaborav. Međutim, iscrpivost rezervi fosilnih goriva i ekološki problemi izazvani njihovom eksploatacijom doveli su početkom devedesetih godina prošlog veka do velike potražnje za vetroagregatima. Energija vetra je tako postala istaknuti izvor alternativne energije. Ovu energiju koriste vetroturbine, tako što lopatice njihovih rotora prikupljaju kinetičku energiju vetra kako bi proizvele rotacionu energiju turbine i električnu energiju iz generatora. Danas su vetroturbine jedan od najpopularnijih uređaja za proizvodnju čiste i obnovljive električne energije i doprinose održivosti elektroenergetskog sistema. Stoga je optimalno upravljanje radom vetrogeneratora od izuzetne važnosti i predstavlja strategiju koja povećava efikasnost, a samim tim smanjuje svedene troškove energije vetroparkova, [1]. Efektivno upravljanje vetroturbinama je ključno za regulisanje proizvodnje energije, a strategije upravljanja vetroparkovima su usmerene na maksimiziranje proizvodnje energije prema potrebama. Ovaj rad ima za cilj da izloži neke osnovne principe upravljanja vetrogeneratorima i da da prikaz aktuelnih tendencija u ovoj oblasti, kroz kratak pregled najnovije stručne i naučne literature.

Vetroenergetika je mlada grana energetike koja se intenzivno razvija u pogledu tehnološkog razvoja vetroagregata, ali i u pogledu njihove izgrađene instalisane snage. Prema podacima istraživačkog centra „Embera”, vetar i solar su u 2023. godini proizveli preko jedne petine električne energije u Evropskoj uniji (22%). Tako su, prvi put u toku jedne godine, prestigli gas (20%) i ostali iznad uglja (16%), [2]. U [3] može da se pročita o najvećem vetrogeneratoru koji je počeo sa radom u Južnom kineskom moru. Što se tiče aktuelnih dešavanja u vetroenergetici u Srbiji, u [4] može da se vidi izgled vetrogeneratora koji su instalirani u vetroparku Kovačica.

Kada je reč o problematici upravljanja vetrogeneratorima, u [5], u Poglavlju 10 – Vetrogeneratori, opisani su različiti načini regulacije snaga vetrogeneratora, kao i njihove prednosti i mane. Upravljanje vetrogeneratorima se postiže podešavanjem parametara vetroturbine, kao što su ugao okretanja (zakretanja, engl. *yaw*) vetroturbine u odnosu na pravac vetra, uglovi nagiba njenih lopatica ili obrtni moment generatora, kako bi se manipuliralo izbrazdanom vazдушnom strujom (vrtlogom) iza turbine. Naime, zbog uticaja rotacije svojih lopatica, vetroturbina blokira deo vetra koji bi inače prošao kroz

prostor njene izgradnje, pa je u području iza turbine brzina vetra smanjena, a turbulencija povećana. Ovo područje sa smanjenom brzinom vetra može značajno uticati na performanse turbine koje se nalaze nizvodno u vetroparku, jer manje vetra znači manju proizvodnju energije. Kontrola ovih vrtloga ili manipulacija njima može pomoći da se smanji njihov negativan uticaj na druge turbine u vetroparku, čime se optimizuje ukupna proizvodnja energije.

U literaturi su identifikovane dve suštinski različite metode upravljanja vetrogeneratorima: upravljanje izbrazdanom strujom (*wake steering*) i mešanje izbrazdane struje (*wake mixing*). Rad [1] se fokusira na upoređivanje veličina od interesa za turbine, a koje se koriste u ovim metodama, na jednostavnom primeru vetroparka sa dve turbine. Prateći članak [6] fokusira se na veličine brazdanja koje su interesantne za sistem sa jednom turbinom. U [1] i u [6] koristi se isti skup simulacija vetroparka zasnovanog na visokopouzdanim simulacijama velikih vrtloga (*Large-eddy Simulations*, LES) u kombinaciji sa OpenFAST modelima turbina (*Fatigue*, *Aerodynamics*, *Structure and Turbulence* / zamor, aerodinamika, struktura i turbulencija). Najpre su izvršene prethodne simulacije kako bi se uskladili uslovi vetra izmereni LiDAR-ima² u of-šor vetroparku uz istočnu obalu SAD. Ova merenja ukazuju na opšte uslove vetra koji pokazuju znatno veći vertikalni gradijent vetra i njegovo skretanje nego bilo koja od LES studija koje su urađene o strategijama upravljanja vetrogeneratorima koje su trenutno dostupne u literaturi. Prethodne simulacije se koriste za procenu efikasnosti metoda upravljanja. U LES simulacijama, skretanje vetra dovodi do vrlo izobličenih brazdanja vazдушnih struja iza turbine, što ima značajan uticaj na strategiju upravljanja povećanjem snage vetrogeneratora. Pored osnovnog kontrolera, implementirane su četiri različite strategije upravljanja, od kojih svaka koristi ili kontrolu nagiba lopatica ili kontrolu ugla zakretanja turbine u odnosu na pravac vetra, na uzvodnoj turbini jednostavnog, dvoturbinskog vetroparka. Pretpostavljajući da je pravac vetra poznat i konstantan tokom vremena, simulacije pokazuju da je upravljanje brazdanjem generalno superiorna strategija upravljanja vetrogeneratorima, uzimajući u obzir kako proizvodnju energije u vetroparku tako i ekvivalentna aerodinamička, mehanička opterećenja turbine, koja uzrokuju oštećenja (*Damage Equivalent Loads*, DEL) kada je prisutno značajno skretanje vetra. Ovaj rezultat je dosledan za različite brzine i pravce vetra. Sa druge strane, za slične uslove vetra sa manjim skretanjem, utvrđeno je da mešanje brazdanja daje najveću proizvodnju energije, iako na račun obično većih mehaničkih opterećenja. Ovo može imati negativne posledice po dugoročni rad vetroturbine. To dalje vodi do zaključka u [1] da efekat skretanja vetra, koji do sada obično nije uziman u obzir, ne može biti zanemaren prilikom određivanja optimalne strategije upravljanja vetroparkom.

² LiDAR (*Light Detection and Ranging*) je tehnologija koja koristi svetlosne zrake (obično laserske) za merenje udaljenosti do objekata i prikupljanje podataka o njihovoj poziciji, obliku i

drugim karakteristikama. U kontekstu vetroparkova, LiDARi se koriste za precizno merenje uslova vetra, poput njegove brzine i pravca, kako bi se optimizovale performanse vetroturbina.

U [7] istražena je strategija upravljanja uglom zakretanja vetroturbine, u vetroelektrani sa dve turbine, snage od po 3,5 MW, sa ciljem optimizacije upravljanja energijom. Vetroelektrana je opremljena višeravanskim sistemom LiDAR, postavljenim na gondoli, za merenje brzine vetra. Koristeći analitički model i integrišući podatke sa sistema LiDAR i SCADA, procenjuju se efekti brazdanja vazdušnih struja i izlazna snaga. Rezultati [7] pokazuju povećanje snage od 2% na nivou jednogodišnjeg posmatranja i procene, postignuto optimalnim upravljanjem uglom zakretanja. Vetar je pretežno bio jugozapadni, upravan na osu turbine. Optimalno zakretanje i dobitak energije zavise od uslova vetra, s tim da veći intenzitet turbulencije i brzina vetra dovode do smanjenih dobitaka. Dobitak energije prati zvonastu krivu u zavisnosti od upadnog ugla vetra, dostižući maksimum od 1,7% pri optimalnom uglu zakretanja od 17 stepeni i pri upadnom uglu vetra od 12 stepeni. U [7] preporučuju se dalja istraživanja kako bi se precizirale procene i poboljšale performanse vetroelektrana kroz optimizovane strategije upravljanja zakretanjem turbina, što na kraju doprinosi unapređenju proizvodnje održive energije.

Vetroturbine sa više rotornih sistema (*Multi-rotor System*, MRS) mogu pružiti konkurentnu alternativu klasičnim velikim vetroturbanama, zbog njihovih značajnih prednosti u smanjenju kapitalnih troškova i troškova transporta i radova, [8]. Glavni izazovi MRS vetroturbina uključuju složenost noseće konstrukcije i matematičko modelovanje aerodinamičke interakcije između rotora i mehanizma upravljanja uglom zakretanja vetroturbin. U [8] korišćen je softver MATLAB 2018b/Simulink® za modelovanje i simulaciju vetroturbin sa dva rotora (*Twin-Rotor Wind Turbine*, TRWT), a za verifikaciju izlaznih podataka modela korišćena je vetroturbina NREL 5 MW. Kao ulaz za svaki rotor korišćeni su različiti nasumični signali brzina i pravca vetra, kako bi se generisala različita potisna opterećenja, izazivajući momente uvijanja na glavnom stubu. Sistem upravljanja uglom zakretanja prilagođen je tako da obezbedi da turbina bude stalno okrenuta prema vetru kako bi se maksimizirala izlazna snaga. Kao pokretač mehanizma korišćen je jednosmerni motor. Cilj je bio postizanje kompromisa između poravnanja rotora sa smerom vetra i smanjenja obrtnog momenta indukovanog na glavnom stubu. U [8] upoređen je odgovor linearnog i nelinearnog regulatora na aktuatorskom sistemu za zakretanje turbine, pri različitim brzinama i pravcima vetra. Izabrano je upravljanje kliznim režimom (*Sliding Mode Control*, SMC), pošto je on bio pogodan za nelinearnost sistema, a njegove performanse su pokazale brži odziv u poređenju sa PID kontrolerom³ (*Proportional-Integral-Derivative Controller*), sa vremenom smirivanja od 0,17 sekundi i veoma malim prekoračenjem u oscilacijama. Ovaj kontroler je koristio funkciju prenosa motora da bi se stvorila klizna površina. Dinamički

odgovori kontrolisanog ugla su prikazani i diskutovani u [8]. Kontroler je pokazao obećavajuće rezultate, sa pogodnim odzivom i niskim signalima šuma.

Upravljanje periodičnim izbrazdanim vazdušnim strujama (vrtlozima) koje nastaju na prednjim (uzvodnim) vetroturbanama ostvaruje se i pomoću strategija podešavanja položaja lopatica, kao što je *Helix* pristup, kako bi se poboljšalo mešanje izbrazdanih strujanja i samim tim povećala proizvodnja energije na vetroturbanama koje se nalaze direktno u njihovom vrtlogu, [9]. Kao rezultat toga, ciklično opterećenje se ne generiše samo na lopaticama turbine na kojoj se vrši podešavanje već i na vetroturbini iz nje, koja je u vrtlogu. Dok je opterećenje na prednjoj turbini rezultat podešavanja položaja lopatica, potrebnog za mešanje izbrazdanih struja, opterećenje na zadnjoj (nizvodnoj) turbini nastaje iz interakcije sa periodičnim vrtlogom i uzrokuje samo oštećenja zbog zamora materijala. Studija [9] predlaže dve nove šeme upravljanja pojedinačnim podešavanjem lopatica kojima se može tretirati jedno ovakvo periodično opterećenje na zadnjoj turbini: smanjenjem ili pojačanjem. Prva metoda poboljšava životni vek zadnje turbine, dok druga dodatno poboljšava mešanje izbrazdanih struja nizvodno, iskorišćavanjem već prisutnog periodičnog sadržaja u vrtlogu. Obe metode su potvrđene u simulacijama visokog nivoa tačnosti na primeru vetroparka sa tri turbine. Rezultati u [9] pokazuju da je smanjenje oštećenja usled zamora materijala od oko 10% zabeleženo u slučaju smanjenja opterećenja, dok je dodatno povećanje snage od 6% postignuto na trećoj turbini primenom strategije pojačanja. Oba cilja se lako mogu promeniti u zavisnosti od zahteva operatora vetroparka i željenog kompromisa između opterećenja i prikupljanja energije vetra.

U radu [10] predložen je regulator za vetroturbine zasnovan na podešavanju nagiba lopatica i procenjen je uticaj primenjenih strategija smanjenja snage na aerodinamičko opterećenje i raspoloživost snage nizvodno, u eksperimentalnom okruženju. Razmatrajući strategiju smanjenja snage zasnovanu na zakonu kontrole obrtnog momenta generatora, istražena su dva pristupa upravljanju vetroparkom: balans potiska i kompenzacija snage. Nalazi iz [10] ukazuju na prednosti balansiranja aerodinamičkih opterećenja u okviru vetrofarmi, sprečavajući zasićenje turbina i poboljšavajući raspoloživost snage za 3%–5% u poređenju s uniformnom isporukom snage. Takođe, uključivanje kompenzacije snage rezultuje višim gornjim ograničenjem u praćenju snage vetroparka, što ukazuje na poboljšanje od 22% u raspoloživosti snage vetroparka. Istraživanje opisano u [10] naglašava potencijalne prednosti inovativnih strategija regulacije turbina u cilju optimizacije performansi vetroparka i unapređenja ukupne energetske fleksibilnosti.

³ Proporcionalno-integralno-diferencijalni kontroler (PID kontroler ili tročlani kontroler) predstavlja mehanizam upravljačke petlje zasnovan na povratnim informacijama koji se najčešće koristi za upravljanje mašinama i procesima koji zahtevaju kontinuirano upravljanje i automatsko prilagođavanje. Obično se koristi u industrijskim upravljačkim sistemima i

raznim drugim aplikacijama gde je neophodno stalno upravljanje bez ljudske intervencije. PID kontroler automatski upoređuje željenu ciljnu vrednost (*setpoint*, SP) sa stvarnom vrednošću sistema (promenljiva procesa – *process variable*, PV). Razlika između ove dve vrednosti naziva se vrednost greške i označava kao $e(t)$.

U [11] koriste se prednosti nelinearnog modela implementiranih u FAST kodu, koji predstavlja sveobuhvatan aeroelastični simulator sposoban da predvidi i ekstremna i zamorna opterećenja vetrogeneratora sa dve i tri lopatice horizontalne ose. U radu [12] proučava se linearizovana dinamika mape nagiba lopatica do otklona vrha tornja u prednjem pravcu vetroturbine sa horizontalnom osom.

Za male vetroturbine postoji nekoliko metoda za upravljanje lopaticama kako bi se postigla željena brzina rotacije i izlazna snaga. Ove metode uključuju pasivni zastoj, aktivni zastoj i kontrolu ugla nagiba lopatica, [13]. Upravljanje nagibom postavlja ugaonu poziciju lopatica tako da budu okrenute ka vetru kako bi se postigao unapred definisan odnos između brzine turbine ili njene snage i brzine vetra. Obično se koriste konvencionalni proporcionalno-integralni (PI) kontroleri za postavljanje ugaone pozicije lopatica rotora ili ugla nagiba. Ipak, kvalitet regulacije brzine ili snage može značajno varirati. Rad [13] uvodi regulator brzine rotora za prototip male vetroturbine sa kontrolom nagiba zasnovan na konceptima fazi-logike (fuzzy). Osnovni principi fazi-sistema potrebni za implementaciju ovog tipa regulatora detaljno su predstavljeni u [13] kako bi se nadoknadio nedostatak takvog materijala u tehničkoj literaturi. Baza znanja fazi-regulatora brzine sastoji se od *Takagi-Sugeno-Kang* (TSK) fazi-pravila zaključivanja koja implementiraju dodeljeni PI regulator za bilo koji željeni interval brzina vetra. Svaki interval brzine vetra definisan je fazi-skupom. Simulacija eksperimenata pokazuje da TSK fazi-PI regulator brzine može da nadmaši konvencionalni PI regulator u brzini i tačnosti odgovora, stabilnosti i robustnosti u celokupnom opsegu rada prototipa vetroturbine.

U radu [14] upoznajemo se sa metodom modeliranja turbine kao sistema krutih tela sa fleksibilnim vezama. U radu [15] analiziran je Kejnov (*Kane*) metod za numeričku simulaciju kinematike modela turbine. U radu [16] data su aerodinamička opterećenja koja su izračunata u programu *AeroDyn*. U radu [17] dat je pregled različitih faza rada turbine i strategija upravljanja koje se koriste za maksimiziranje pretvaranja energije pri brzinama vetra ispod nominalnih, ali naglasak je na upravljanju da bi se ublažila opterećenja kada turbina radi na maksimalnoj snazi. U radu [18] dat je pregled prostornih regiona rada vetrogeneratora, a fokus je na metodama za regulaciju brzine i ublažavanju opterećenja konstrukcije.

Rad [19] predlaže model za upravljanje vetroturbinom koja je povezana sa mrežom pomoću sinhronog generatora sa trajnim magnetima (*Permanent Magnet Synchronous Generator*, PMSG). S obzirom na to da se brzina vetra stalno menja, rotorski sistem mora biti u mogućnosti da se samopodesi u zavisnosti od brzine i pravca vetra kako bi se obezbedio efikasan rad turbine. PMSG je odabran jer je magnetni fluks uvek dostupan zahvaljujući sistemu trajnih magneta koji su pričvršćeni za površinu rotora. Generator proizvodi energiju pri niskoj brzini rotacije, ali sa visokom efikasnošću. Ovo su ključne prednosti korišćenja PMSG za vetroturbinu. Za dizajn regulatora korišćen je MATLAB – Simulink softver, a rezultati istraživanja opisanog u [19] pokazali su da ovaj sistem upravljanja zadovoljava zahteve

kvaliteta energije prilikom povezivanja sa mrežom i optimizuje proces pretvaranja energije turbinskog vetra.

Emulator vetroturbine je vredan alat koji omogućava fizičku simulaciju ponašanja vetroturbine u realnom vremenu koristeći specijalizovanu eksperimentalnu testnu opremu, pružajući kontrolisano okruženje za istraživanje i razvoj, [20]. Jedna od značajnih prednosti korišćenja ovog alata je njegova sposobnost da testira algoritme upravljanja dizajnirane za dobijanje maksimalne snage vetroturbine. Rad [20] zapravo predstavlja nastavak prethodnog rada, [21], na razvoju emulatora male vetroturbine sa promenljivom brzinom, zasnovane na generatoru sa trajnim magnetima za samostalnu primenu. U [20] predstavljena su unapređenja postignuta na ovom emulatoru. Ova poboljšanja omogućavaju procenu strategije upravljanja praćenjem tačke maksimalne snage (*Maximum Power Point Tracking*, MPPT), dizajnirane za optimizaciju snage koja se dobija iz vetroturbine.

Rad [22] predstavlja detaljnu studiju strategija upravljanja vetroturbinama koje kombinuju tehnike MPPT, koristeći upravljanje brzinom obrtanja radi optimizacije proizvodnje energije. Dostizanje maksimalne izlazne snage iz vetroturbina zahteva efikasne metode koje se prilagođavaju promenljivim uslovima vetra. Najpre, [22] daje pregled konvencionalnih MPPT metoda, ističući njihove prednosti, ali i ograničenja u radu sa dinamičnim profilima vetra. Zatim [22] uvodi integrisani pristup, u kom se upravljanje brzinom kombinuje sa MPPT, sa ciljem poboljšanja vremena odziva i efikasnosti prikupljanja energije iz vetra. Rezultati simulacije pokazuju da dodavanje u model upravljanja brzinom značajno poboljšava performanse vetroturbine. To rezultira povećanjem izlazne snage kroz brže vreme odziva, smanjujući ga sa 65 sekundi na samo 2 sekunde. Ovaj integrisani pristup, MPPT – upravljanje brzinom, pokazuje svoj značaj u optimizaciji snage vetroturbina, posebno u promenljivim uslovima vetra.

U [23] dat je pregled ciljeva i dizajna linearnih kontrolera koji koriste determinističke pristupe primenjene na upravljanje nagibom lopatica i obrtnim momentom. Takođe, demonstrirano je kako bilo koja povratna arhitektura može biti unapređena povratnim kompenzatorom smetnji, koristeći merenja vetra koja mogu biti dostupna pomoću novih tehnologija koje se očekuju u budućnosti.

U Poglavlju 2 ovog rada dat je kratak prikaz istorijskog razvoja i različitih vrsta i tipova vetrogeneratora, a u njegovim potpoglavljima i prikaz načina regulacije snage vetroturbina. U Poglavlju 3 nešto detaljnije je dat pregled koncepata upravljanja vetrogeneratorima, sa posebnim osvrtom na upravljanje u pojedinačnim regionima (zonama) rada vetroturbina sa promenljivom brzinom obrtanja. Na kraju rada dati su generalni zaključci.

2. VETROTURBINE

Postoje različite konstrukcije vetrogeneratora. Cilj je da se postigne što veći stepen iskorišćenja i stabilan rad u što širem opsegu brzina vetra. Razvoj vetrogeneratora je još uvek intenzivan.

Postoje vetrogeneratori sa:

- vertikalnom osovinom;
- horizontalnom osovinom.

Kod vetroturbina sa vertikalnom osovinom vetar struji normalno na osu rotacije, pa se one ne moraju usmeravati prema smeru duvanja vetra. Kod njih se generator postavlja u podnožje turbine, te nisu potrebni jaki tornjevi. Vertikalno vratilo ima Darijusova turbina, Slika 1 (a). Ime je dobila po inženjeru Džordžu Darijusu (George Darrius, patent iz 1931. godine). Darijusova turbina se obično gradi sa dva ili tri luka. Vetroturbine sa vertikalnom osovinom generalno imaju nizak stepen iskorišćenja, pa se iz tog razloga danas praktično ne koriste za vetroagregate većih snaga.

Vetroturbine sa horizontalnom osovinom mogu biti postavljene uz i niz vetar. Vetroturbine postavljene niz vetar se same prilagođavaju smeru vetra. Nedostatak im je što lopatice pri rotaciji prolaze kroz zavetrinu stuba, čime se stvaraju mehaničke vibracije i buka. Osim toga stub stvara i turbulencije što smanjuje efikasnost vetroturbine, pa se ovaj koncept ne koristi za veće snage.



(a)



(b)

Slika. 1. (a) Darijusova (Darrius) turbina;
(b) trokraka vetroturbina sa horizontalnom osovinom, [3]

Moderne vetroturbine se grade sa horizontalnom osovinom koja ima sistem za zakretanje osovine u horizontalnoj ravni za traženje promene smeru vetra. Mogu imati različit broj lopatica, ali se za veće snage najčešće koriste tri lopatice jer daju najveći stepen iskorišćenja, Slika 1 (b). Prečnik rotora (radnog kola ili elise) ovih turbina zavisi od snage i kreće se od 30 m za snagu od 300 kW do 180 m za snagu od 7 MW. Kako se ova tehnologija konstantno razvija, danas postoje i vetroturbine većih kapaciteta.

Vetroturbina se postavlja na vertikalni stub koji, u zavisnosti od prečnika rotora turbine, može biti visok i preko 150 m. Stub se najčešće gradi kao čelični konusni, a ređe kao čelično-rešetkasti.

Trenutno najveći vetrogenerator na svetu, MySE 16-260, koju je razvila kompanija Ming Jang, sredinom jula 2023. godine počeo je sa radom u Južnom kineskom moru, [3]. Prema kompanijskom saopštenju, prečnik rotora ovog džinovskog vetrogeneratora iznosi 260 m, dok su lopatice dugačke 123 m. Visok je 152 m, ali pored veličine, impresivna je i snaga vetrogeneratora koja iznosi 16 MW.

Pretvaranje kinetičke energije vetra u obrtno kretanje turbine vrši se zahvaljujući aerodinamičkom profilu lopatica vetroturbine. Kao kod avionskih krila, lopatica turbine ima aerodinamički profil, te vazduh sa zadnje strane lopatice struji brže od vazduha sa prednje strane, gledano u smeru vetra. Usled razlike u brzinama strujanja vazduha javlja se razlika u pritiscima sa zadnje i prednje strane lopatice turbine, što uzrokuje uzgonsku silu, čija projekcija na ravan rotacije generiše obrtni moment. Pored ove sile, deluje i sila direktnog pritiska vetra na lopaticu, ali je njen uticaj na obrtni moment mnogo manji.

Energetski posmatrano, vetroturbina oduzima energiju vetru koja je srazmerna razlici kinetičkih energija vetra pre i nakon prolaska kroz turbinu. Snaga kojom se vrši pretvaranje energije vetra, odnosno mehanička snaga P_{meh} koju razvija vetroturbina na svom vratilu može da se predstavi sledećom jednačinom:

$$P_{meh} = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3, \quad (1)$$

gde su:

v – brzina vetra na ulazu u vetroturbinu;

R – poluprečnik vetroturbine;

ρ – gustina vazduha;

C_p – koeficijent iskorišćenja snage vetroturbine, koji se definiše kao odnos mehaničke snage vetroturbine prema odgovarajućoj snazi vetra P_v na ulazu u vetroturbinu, ($C_p = \frac{P_{meh}}{P_v}$).

Maksimalna teorijska snaga koju vetroturbina može razviti definisana je Becovim (Betz) zakonom. Bec je pokazao da se maksimalna snaga idealizovane vetroturbine postiže ako je odnos brzina vetra pre (v) i nakon (v')

prolaska kroz turbine, $\frac{v'}{v} = \frac{1}{3}$. Pri ovom odnosu brzina

vetra stepen iskorišćenja snage ima maksimalnu vrednost, $C_{pmax} = 0,5926$. Teorijski maksimum stepena iskorišćenja energije vetra u vetroturbini je 59%. Za standardnu gustinu

vazduha $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$, izraz (1) daje:

$$P_0 = 0,369 A v^3$$

gde je $A = R^2 \pi$ površina kruga koji pri obrtanju naprave lopatice, a R je poluprečnik tog kruga.

Pri nekoj brzini vetra, promenom brzine obrtanja vetroturbinе ω_{tur} menja se upadni ugao relativne brzine vetra, te se menja sila uzgona i stepen iskorišćenja snage, C_p . Obično se C_p daje u funkciji parametra TSR (*Tip Speed Ratio*) odnosno λ :

$$\lambda = \frac{\omega_{tur} R}{v}, \quad (3)$$

koji predstavlja odnos brzine vrha lopatice i brzine vetra, v . Dakle, $C_p = f(\lambda, \beta)$, gde je β – nagib lopatica vetrogeneratora, u ($^\circ$), u odnosu na upadni ugao pravca duvanja vetra.

Pri promeni brzine vetra potrebno je menjati brzinu obrtanja rotora vetrogeneratora da bi se postigao režim sa najvećim stepenom iskorišćenja. Zato savremeni vetroagregati velikih snaga rade sa promenljivom brzinom obrtanja. Kada vetrogenerator pokreće turbina kojoj se brzina obrtanja ne može menjati, ta brzina se bira tako da stepen iskorišćenja bude najveći pri dominantnoj brzini vetra na mestu instalisanja vetroagregata.

S obzirom na (3), turbine manjeg prečnika imaće veću optimalnu brzinu obrtanja od turbina većeg prečnika pri istoj brzini vetra. Zato vetroturbinе vetroagregata manje snage imaju veću brzinu obrtanja.

Postoje različiti načini regulacije snage vetroturbinе, kako je opisano u nastavku.

2.1 Regulacija konstrukcijom lopatica

Ovo je pasivni sistem regulacije snage vetroturbinе. Postiže se konstrukcijom lopatica vetroturbinе. Lopatice su konstruisane tako da pri brzinama vetra bliskim nominalnoj brzini v_n napadni ugao vetra, α , na određenom delu lopatica postane relativno veliki ($15^\circ \div 20^\circ$). Pri tom napadnom uglu struje vazduha se odvajaju od profila lopatice i započinje turbulencija, te sila uzgona slabi. Ovo se naziva stol-efekat (*stall*). Sa porastom brzine vetra, stol-efekat postaje izraženiji i zahvata sve veći deo lopatice. Turbulencija smanjuje uzgonsku silu i snagu vetroturbinе. Mana ovog načina regulacije snage je ta što on nije u potpunosti kontrolabilan, a karakteriše ga opadanje snage turbine ispod nominalne vrednosti nakon pojave stol-efekta. Stol-efekat se može pojaviti i pri nižim brzinama vetra od nominalne ukoliko su lopatice vetroturbinе zaprljane ili oštećene. Prednosti ovog načina kontrole su jednostavnost i niska cena. Koristi se uglavnom kod vetroturbinа sa konstantnom brzinom obrtanja, [5].

2.2 Regulacija zakretanjem lopatica

Koristi se za vetroagregate veće snage sa promenljivom brzinom obrtanja. Lopatice vetroturbinе zakreću se

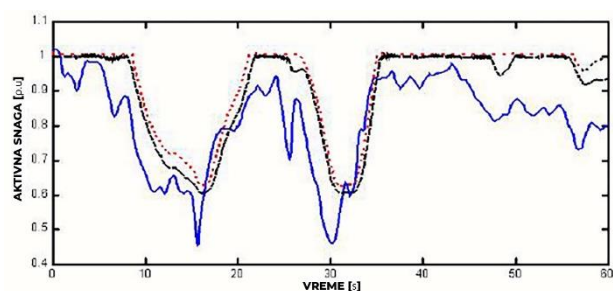
pomoću hidrauličnog servo-motora. Opseg promene ugla lopatice (*pitch angle*, β) je 0° do 35° . Zakretanjem lopatica menja se napadni ugao vetra, te se menja uzgonska sila odnosno snaga vetroturbinе. Zakretanje lopatica vetroturbinе je analogno zakretanju lopatica obrtnog kola kod Kaplanovih hidroturbinа. Zakretanjem lopatica pri pokretanju vetroturbinе podešava se napadni ugao vetra tako da se postigne najveći polazni moment. Prednost ovakve regulacije je kontrolabilnost, a mane su složen mehanizam i visoka cena, [5].

2.3 Regulacija zakretanjem i konstrukcijom lopatica

Ovo je kombinacija prethodna dva načina regulacije, pa se naziva *Combi Stall* regulacija. Kod ovog sistema opseg promene ugla zakretanja je mali. Cilj je da se eliminišu negativni efekti stol-regulacije. Ovaj i prethodni sistem regulacije štite vetroagregat u slučajevima neplaniranog isključenja sa mreže ili kratkog spoja u mreži pri jakom vetru. U takvim slučajevima dolazi do rasterećenja vetrogeneratora i povećanja brzine obrtanja vetroagregata. Usled velikih centrifugalnih sila može doći do havarije. Pri brzinama vetra većim od maksimalne radne brzine vetroagregat se iz sigurnosnih razloga zaustavlja i održava u zakočenom stanju pomoću hidraulične disk kočnice koja je smeštena na visokobrzinskoj (generatorskoj) osovini, [5].

Osnovni problem pri pretvaranju energije vetra u električnu je obezbeđenje pouzdanog i efikasnog rada vetrogeneratora pri promenljivoj snazi vetra. Efikasan rad vetroagregata zahteva prilagođavanje vetroturbinе brzini vetra tako da se ostvari maksimalan stepen iskorišćenja uz zadovoljenje električnih i mehaničkih ograničenja. Pri velikim varijacijama brzine vetra, javlja se problem nestabilnog rada vetroagregata, ali i električnih veličina koje on generiše (naponski flikeri – propadi napona, nivo harmonika i slično). Zato se u vetroagregatima ne mogu koristiti standardni sinhroni generatori i standardni sistemi upravljanja i regulacije kakvi se primenjuju u hidroelektranama i termoelektranama gde je moguće planirati snagu agregata.

Poređenje karakteristika generisanja aktivne snage različitih tipova vetrogeneratora, u uslovima stohastičke promene brzine vetra, ilustrovano je na Slici 2. Na njoj su dati rezultati simulacije rada vetroturbinе koja pogoni različite vetrogeneratore.



Slika 2. Karakteristike generisanja snage vetroagregata sa raznim tipovima vetrogeneratora, [5]

Grafici na Slici 2 odnose se na sledeće slučajeve:

1. vetrogenerator je indukcion generator sa kratkospojenim rotorom direktno priključen na mrežu; turbina je regulisana konstrukcijom lopatica (*stall* regulacija);
2. vetrogenerator je dvostrano napajani indukcion generator sa promenljivom brzinom obrtanja; turbina je regulisana zakretanjem lopatica (*pitch* regulacija);
3. vetrogenerator je sinhroni sporohodni generator sa permanentnim magnetima; turbina je regulisana zakretanjem lopatica.

3. PREGLED KONCEPATA UPRAVLJANJA KOD VETROGENERATORA

U ovom odeljku ćemo razmotriti model strukturalne dinamike turbine i posmatračemo generator kao jednostavni statički (jedinični) pojačavač koji trenutno prevodi komandovani obrtni moment u mehanički obrtni moment. Turbina na vetar je inherentno nelinearna i varijabilna sa vremenom. Aerodinamička torzija i momenti savijanja zavise nelinearno od brzine vetra, ugla nagiba i savijanja tornja i lopatica. Odgovarajući rezultati su postignuti korišćenjem linearnih, vremenski invarijantnih modela turbine. Mnogi od ovih modela su analitički razvijeni linearizujući model turbine u određenoj radnoj tački koristeći teoriju momenta elementa lopatice. Za determinisanje aerodinamičkih opterećenja koristi se metod pretpostavljenih modova savijanja modela turbina, [12]. Drugi metod je modelovanje turbine kao sistema krutih tela sa fleksibilnim vezama, [14] – pristup koji može da koristi teoriju momenta elementa lopatice (*Blade Element Momentum*, BEM) za aerodinamička opterećenja.

U [16] usvojene su prednosti nelinearnih modela implementiranih u FAST kodu, [11], koji koristi Kejnov (Kane) metod, [15], da numerički simulira kinematiku modela turbine zasnovanu na pretpostavljenim modovima i BEM teoriju sa aerodinamičkim opterećenjem izračunatim u programu *AeroDyn*. FAST simulira turbinu u konstantnim (a po mogućstvu – neravnomernim) uslovima vetra u potrazi za rešenjem koje se menja samo kao funkcija pozicije rotora i zatim određuje linearizovani model izračunavanjem koeficijenata koji definišu poremećaje konfiguracije sistema u odnosu na skup određenih ulaznih poremećaja.

Linearizacijom se dobija kinematički model sistema u obliku:

$$M(Q)\ddot{\Delta q} + C(Q)\dot{\Delta q} + K(Q)\Delta q = F(Q)\Delta u + F_d(Q)\Delta v_d \quad (4)$$

gde su koeficijenti M , C , K zavisni od radne tačke i mogu biti parametrizovani pozicijom azimuta rotora, Q . Vektor konfiguracionih promenljivih Δq predstavlja devijaciju turbine od nominalne radne tačke (pri svakoj poziciji rotora). Najsloženiji model turbine koji se ovde koristi uključuje jedinstven stepen slobode generatora (*Degree of Freedom*, DOF), fleksibilni mod pogona i mod lepršanja za

svaku od tri lopatice. FAST podržava do 24 stepena slobode kretanja za trolopatičnu turbinu. Vektor Δu predstavlja devijacije nagiba lopatice i/ili torziju generatora od njihovih nominalnih nivoa, a Δv_d predstavlja devijacije u čvoru brzine vetra (koja se pojavljuje jedinstveno po površini rotora). Sistem se može predstaviti u formi prostora stanja:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= A(Q)x + B(Q)u + B_d(Q)v_d \\ \dot{y} &= C(Q)x + D(Q)u + D_d(Q)v_d \end{aligned} \quad (5)$$

gde $x = [\Delta q^T \Delta \dot{q}^T]^T$ predstavlja devijaciju u poziciji ili brzini konfiguracionih promenljivih. Izlazni vektor y može sadržati svaku vrednost koja se može odrediti iz stanja sistema. Beležimo poremećaje brzine visokobrzinskog vratila i lopatice i momenta zakrivljenja svake lopatice. Budući da sve promenljive predstavljaju poremećaje daleko od njihovih nominalnih vrednosti, odbacujemo Δ radi pojednostavljenja. Koeficijenti matrice u (4) – (5), za bilo koju određenu radnu tačku u konstantnim (ali ne i neophodno uniformnim) uslovima vetra, dobijeni su numeričkom linearizacijom koju sprovodi FAST.

U [23] procenjen je model turbine na primeru turbine od 600 kW, sa tri lopatice, uz vetar, promenljive brzine, horizontalno osne CART3 turbine (*Control Advanced Research Turbine* – istraživačka turbina sa naprednim sistemom upravljanja) koja se nalazi u nacionalnoj laboratoriji za obnovljivu energiju (NREAL). Turbina CART3 ima procenjenu brzinu rotora od 41,7 o/min, dok se frekvencija niskobrzinske osovine (povezane sa rotorom) stepenasto uvećava uz pomoć multiplikatora tako da visokobrzinska osovina i generator rade na nominalnoj brzini od 1800 o/min.

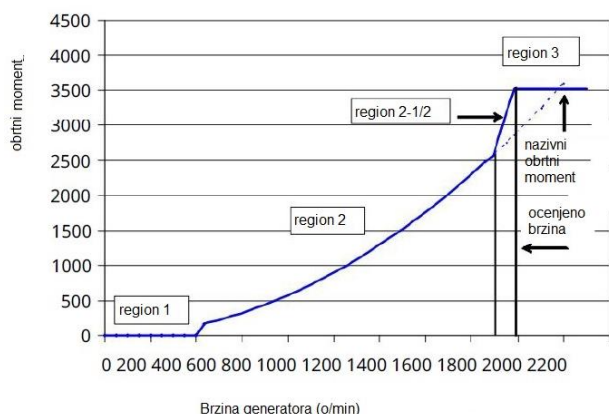
Promene u linearizaciji modela turbine zavise od radne tačke (ukupna brzina vetra, brzina rotora i lopatica, nagiba) s obzirom na to da turbine rade u različitim regionima (delovima pogonskog dijagrama).

Za tipične vetroturbine postoje različiti regioni rada, ilustrovani na Slici 3. U regionu 2, ispod nominalne brzine vetra, cilj je maksimiziranje snage turbine. U regionu 3, iznad nominalne brzine vetra, cilj je da se snaga turbine održi na konstantnom nivou, da se ograniči opterećenje turbine i snaga generatora. Ostali regioni rada uključuju pokretanje (region 1) i gašenje mašine, [17]. Ovi se regioni mogu generalno opisati kako sledi u nastavku, [18].

U regionu 1 brzina vetra je premala da garantuje pokretanje turbine. Lopatice su postavljene tako da imaju pun zahvat (stepen ugla generiše najmanji aerodinamički moment). Kada u jednom trenutku brzina vetra bude dovoljno velika za pokretanje mašine (preko 5 m/s za CART3), lopatice su nagnute pod uglom navedenim za region 2. Pri nominalnom nagibu aerodinamički uzgon je usmeren tako da proizvede obrtni moment i ubrza rotor. Kada generator dostigne brzinu od 430 o/min za CART3, generator obrtnog momenta je uključen i turbina počinje obrtanje generatora, a on proizvodnju električne energije.

U regionu 2 brzina vetra i obrtni moment generatora su ispod nominalnih vrednosti. Nagib lopatica, β , održava se konstantnim na optimalnoj vrednosti, β^* , koja daje maksimalni aerodinamički obrtni moment. Za bilo koju

brzinu vetra postoji odgovarajuća brzina rotora pri kojoj se generiše najveći mogući aerodinamički obrtni moment, τ_a . Pokazuje se da, kada je stepen lopatica održavan optimalnim, postoji konstantna vrednost ili λ (tj. TSR), (3), koji maksimizira aerodinamički obrtni moment τ_a . Obično su funkcija TSR i nagib deo aerodinamičkih sila dobijenih od ukupne snage vetra kada je ona maksimalna, $\lambda = \lambda^*$. Dakle, cilj upravljanja u regionu 2 jeste dostići obrtni moment pri kome brzina vrha lopatice prati brzinu vetra, v , na način da se postigne optimalna vrednost TSR, λ^* .



Slika 3. Radni regioni turbina sa promenljivom brzinom, [17]. Obrtni moment turbine u funkciji brzine generatora

U regionu 2-1/2 brzine vetra se približavaju onima koje obezbeđuju nominalnu snagu. Ovo je prelazni region gde se komandni obrtni moment obično računa kao slična funkcija brzine generatora tako da je nominalni obrtni moment dostignut pre nominalne brzine generatora.

Brzina obrtanja generatora je često jedina mera i za obrtni moment i za upravljanje nagibom lopatica vetrogeneratora. Nadzor nad upravljanjem može imati dodatne mere, uključujući i merenje brzine vetra uz pomoć anemometra. Naprednije turbine mogu takođe uključivati individualna merenja momenta savijanja lopatice, [23].

U regionu 3 brzina vetra je 11,7 m/s ili preko te vrednosti (za CART3), one koja će generisati nominalnu snagu. Obrtni moment generatora se održava konstantnim, na nominalnoj vrednosti, i upravljanje nagibom lopatice se koristi da ograniči aerodinamičku snagu regulisanjem brzine turbine na nominalnoj vrednosti brzine. Napredne kontrole su takođe dizajnirane tako da smanje opterećenje na lopatice i toranj.

Koristeći skup opisa različitih stanja iz FAST, istražujemo kako se linearizovani modeli menjaju u zavisnosti od radne tačke uz procenu frekventnog odziva sistema na različitim tačkama. Prvo, koristimo FAST da

linearizujemo turbinu u svakoj od 36 pozicija rotora, dok turbina radi na prosečnoj brzini od 41,7 o/min i pri konstantnom nagibu lopatice od 12,6°, ali sa različitim profilima vetra. Dva skupa linearizacije su dobijena u vremenski konstantnim uslovima vetra u liniji sa kabinom i imajući prosečnu brzinu od 18 m/s preko ravni rotora. Međutim, za jedan skup linearizacije uslovi vetra su uniformni, a za drugi skup vetar vertikalno struji, tako da se horizontalna brzina vetra na dnu rotora razlikuje od one na vrhu za 40%.

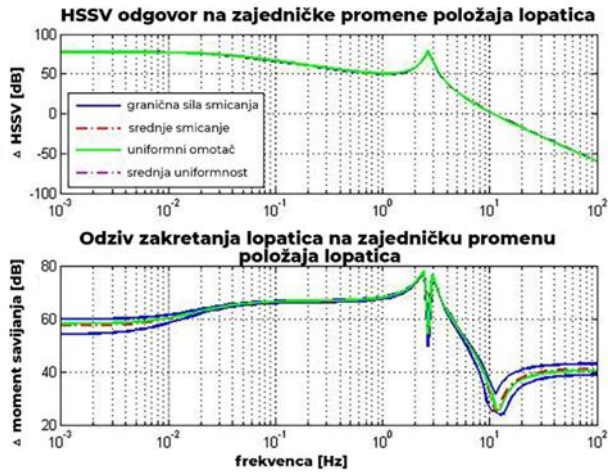
Sve češće moderne turbine imaju individualne aktuatorne sisteme za podešavanje nagiba na svakoj lopatici, čime se povećava broj kontrolnih ulaza dostupnih dizajneru sistema u odnosu na tradicionalno upravljanje obrtnim momentom. Komande za nagib individualnih aktuatora prikazane su šematski na Slici 4. Pored toga, senzori za silu/moment ili akcelometri mogu se instalirati na svakoj lopatici pojedinačno, kao i na gondoli i stubu. Ovi dodatni ulazi i izlazi, u kombinaciji sa činjenicom da strukturalni modovi turbine utiču na pogonski sklop i akciju nagiba putem obrtnog momenta i momenta savijanja (otklona), čine vetroturbinu jednim inherentnim sistemom sa više ulaza i više izlaza (MIMO). Zapravo, kako veličina turbine raste i razmatranja težine/troškova motivu prilagođavanje većoj fleksibilnosti, postaje sve važnije uzeti u obzir međusobno povezivanje različitih strukturalnih modova i koristiti sofisticiranije metode upravljanja kako bi se nosili sa ovim efektima. Dalje, povećana fleksibilnost struktura turbine stavlja akcenat na zadatak smanjenja štetnih opterećenja u korenovima lopatica i na bazi stuba, [23].

Napredne metode upravljanja za rešavanje ovih problema istraživane su već više od decenije, ali očigledno se većina komercijalnih sistema još uvek implementira koristeći više jednostrukih kontrola sa jednim ulazom i jednim izlazom (SISO⁴). Na primer, Slika 4 prikazuje dva različita kontrolera za petlje upravljanja generatorom i upravljanja nagibom; ako su komande za nagib identične i zasnovane samo na brzini visokobrzinske osovine, onda ova konfiguracija sadrži dva SISO kontrolera koji rade nezavisno jedan od drugog, kao što je prikazano na Slici 5(a).

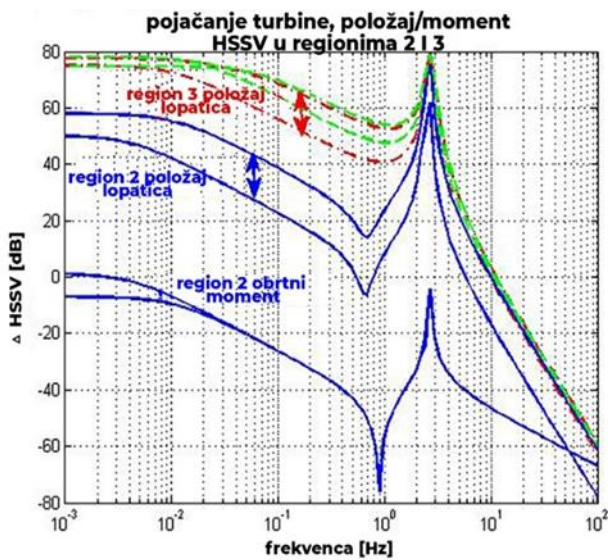
Suprotno tome, napredni pristupi upravljanja odlikuju se time što se nesigurnost sistema eksplicitno uzima u obzir pri njegovom projektovanju, dizajnira se kontroler sa više ulaza i izlaza (MIMO⁵) koji uzima u obzir međusobno povezivanje između petlji, Slika 5(b), ili se koristi robusna MIMO metoda. Takođe, postoje i metode koje koriste adaptivne ili nelinearne tehnike, [23].

⁴ SISO (Single-Input Single-Output) je tradicionalni dizajn sistema upravljanja kod koga svaka upravljačka petlja radi nezavisno. Na primer, može postojati zaseban regulator za nagib lopatica vetroturbine i za generator. Međutim, ovo može biti neefikasno kada petlje međusobno utiču jedna na drugu (promene u jednoj petlji mogu uticati na drugu), što dovodi do suboptimalnog učinka.

⁵ MIMO (Multi-Input Multi-Output) sistemi mogu istovremeno upravljati većim brojem ulaza i izlaza. Ovo je od ključnog značaja za sisteme kao što su vetroturbine, gde su različite promenljive, kao što su nagib lopatica i obrtni moment, međusobno povezane. MIMO regulator je dizajniran da upravlja ovim interakcijama i poboljša ukupni učinak sistema.



Slika 6. Analiza linearnog modela turbine u zavisnosti od pozicije azimuta rotora, [23]



Slika 7. Poremećaji u odgovoru HSSV za različite regione rada i brzine vetra, [23]

Oba dijagrama prikazuju minimum i maksimum (krive) reakcije na zajedničke poremećaje nagiba na svim pozicijama rotora. Odgovor visokobrzinske osovine (HSSV) na nagib (gornji dijagram) veoma je nezavisan od pozicije rotora, dok moment savijanja lopatica (donji dijagram) pokazuje izvesnu zavisnost azimuta u prisustvu smicanja, [23].

Donje dve krive na Slici 7 (pune plave linije) pokazuju promene u odgovoru na obrtni moment i poremećaje nagiba preko opsega brzine vetra (5-13 m/s), regiona 2. Gornje dve krive (isprekidane crvena i zelena) pokazuju promene u odgovoru na poremećaje nagiba preko različitih radnih tačaka regiona 3. Postoje velika neslaganja u odgovoru HSSV na nagib turbine kroz region 2 (5-13 m/s). U regionu 3, gde je nagib prilagođen održavanju brzine rotora od 41,7 o/min, odgovor HSSV manje varira, i sa promenom brzine vetra (zelena kriva, 16-24 m/s) i sa nagibom (crvena, 4-18°, brzina vetra od 18 m/s), [23].

3.1 Standardno upravljanje vetroturbinom

3.1.1 Upravljanje u regionu 2

U regionu 2, obrtni moment koji postiže generator dobija se kao funkcija brzine rotora:

$$\tau_c = K\omega^2 \quad (6)$$

gde je pojačanje:

$$K = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_{p_{max}}}{\lambda_*^3} \quad (7)$$

ρ je gustina vazduha, a $C_{p_{max}}$ je optimalni koeficijent snage, $C_{p_{max}} = f(\lambda^*, \beta^*)$. Po konvenciji, pozitivan τ_c je u pravcu koji usporava rotor, tako je (6) način kako jača obrtni moment i može se pokazati da doprinosi stabilnom sistemu zatvorene petlje, [17]. Kako se menja brzina vetra tako rotor ubrzava zbog aerodinamičke razlike i obrtnog momenta generatora. Podešavanje obrtnog momenta generatora u skladu sa (6) uzrokuje da brzina rotora bude podešena isto tako kao u uslovima konstantnog vetra, tj. λ^* je dostignuto. Ovaj zakon upravljanja (koji je statički i pre je određen apsolutnom brzinom nego brzinom poremećaja) može biti proširen dodatnim dinamičkim kompenzacijama za smanjenje opterećenja, [16].

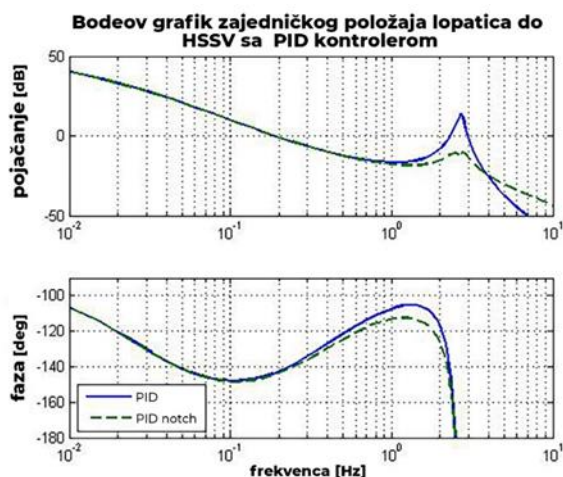
3.1.2 Upravljanje u regionu 3

Pozivajući se na Sliku 4, brzina generatora se meri i odgovara i obrtnom momentu i nagibu. Klasična tehnika PID kontrolera obično se koristi za izradu kontrolera nagiba lopatice u regionu 3, [23], za regulisanje brzine turbine, za različite uslove vetra. U ovom slučaju, poremećaj ΔQ nominalnog nagiba računa se kao:

$$\Delta Q(s) = \left[K_p + \frac{K_I}{s} + \frac{K_D s}{s\tau + 1} \right] \Delta \omega(s) \quad (8)$$

gde je $\Delta \omega$ greška brzine obrtanja generatora ili greška brzine obrtanja rotora. Koristeći samo grešku brzine rotora kao povratnu informaciju, komanda nagiba ΔQ obavezno je zajednička (isti je za sve lopatice). Pojačanja K_p , K_I i K_D biraju se tako da daju željene karakteristike zatvorene petlje. Često su standardni PID kontroleri prošireni (umnoženi) funkcijama nivoa prenosa da dodaju prigušenje poznatih rezonanci.

Primer upotrebe PID kontrolera za filtriranje vrhova je da treba da prigušuje prepoznate rezonance pogonskog sklopa koje su prikazane na slikama 6 i 7, sa prigušenjem od 2,8 Hz. Pojačanje petlje za PID kontrolere zajedno sa regionom 3, linearizovani je model prikazan na Slici 8. Vrh daje prigušenje rezonance tako da se presek petlje može postaviti na 0,2 Hz uz zadržavanje više od 10 dB margine pojačanja na višim frekvencijama.



Slika 8. Upotreba PID kontrolera za filtriranje vrhova, [23]

4. ZAKLJUČAK

Vetroturbine su složeni, nelinearni, dinamički sistemi izloženi gravitaciji, stohastičkim smetnjama vetra i gravitacionim, centrifugalnim i žiroskopskim opterećenjima. Aerodinamika vetroturbina je nelinearna, nestabilna i složena. Rotori turbina su podvrgnuti komplikovanim 3D turbulentnim poljima dotoka vetra.

Ispravna karakterizacija toka vetra do turbine je važna za unapređenje dizajna turbine. Koncentrisani naleti vetra, promene pravca vetra, prolaz strukture atmosferske energije stvaraju kritična opterećenja na individualne vetroturbine i na lopatice. Ovi ekstremni događaji smanjuju životni vek turbina, uzrokuju kvar komponenti, a ponekad i potpuni kvar cele mašine. Krucijalno je razumeti složenost toka vetra do turbine u nameri da dizajniramo upravljanje njome u cilju smanjenja opterećenja, čime turbine adekvatno reaguju na ove složene atmosferske fenomene, stohastičke prirode.

Modelovanje vetrogeneratora je složeno i izazovno. Precizni modeli moraju da sadrže mnogo stepena slobode da bi prikazali najvažnije dinamičke efekte. Dizajn kontrolnih algoritama za vetroturbine mora uzeti u obzir ove složenosti. Ovi algoritmi moraju da obuhvate najvažniju dinamiku turbine a da ne budu previše složeni.

Klasične metode projektovanja upravljanja zasnivaju se na jednom ulazu i jednom izlazu. Njihov nedostatak je što se mora koristiti više regulacionih petlji za istovremeno prigušivanje nekoliko fleksibilnih režima turbina. Ako ove kontrole nisu projektovane sa velikom pažnjom, ove kontrolne petlje ometaju jedna drugu i uzrokuju nestabilnost turbine. Napredne metode multivariabilnog projektovanja sistema upravljanja sa više ulaza i izlaza (MIMO) mogu se koristiti za postizanje ovih višestrukih ciljeva upravljanja.

Zbog svih nabrojanih problema koji se javljaju prilikom merenja vetra, rada kontrolera i grešaka usled naglih promena u jačini i pravcu delovanja vetra, ali i uvećanja i poskupljenja izrade uređaja, cilj budućih istraživanja u ovoj oblasti je projektovanje „pametnih” lopatica rotora sa sopstvenim senzorima, kontrolerima i uređajima za upravljanje nagibom lopatice (tj.

regulisanjem opterećenja lopatice) a da pri tome bude minimalno povećanje gabarita i cene uređaja.

Osim toga, velike varijacije generisane snage stvaraju probleme u planiranju proizvodnje, naponskim varijacijama i stabilnosti rada, kako vetrogeneratora tako i celog elektroenergetskog sistema.

U ovom radu smo dali prikaz novije literature iz ove oblasti i pregled i analizu regiona rada vetorturbina i sa njima povezanih ciljeva upravljanja. Akcenat je stavljen na metode za regulaciju brzine i ublažavanje opterećenja konstrukcije.

LITERATURA

- [1] Frederik J.A., Simley E., Brown K.A., Yalla G.R., Cheung L.C., and Fleming P.A., Comparison of Wind-farm Control Strategies Under Realistic Offshore Wind Conditions: Turbine Quantities of Interest, *EAWC, Wind Energy Science – Discussions*, 2 December 2024, <https://doi.org/10.5194/wes-2024-164>
- [2] <https://klima101.rs/evropska-unija-solar-vetar-maj-2023/>
- [3] <https://klima101.rs/najveca-vetrenjaca-na-svetu/>
- [4] <https://www.vpkovacica.rs/>
- [5] Milenko Đurić, Željko Đurišić, Aleksandar Čukarić, Veselin Ilić, *Elektrane, Građevinska knjiga*, 2008.
- [6] Brown, K., Houck, D., Maniaci, D., Westergaard, C., and Kelley, C.: Accelerated Wind-turbine Wake Recovery through Actuation of the Tip-vortex Instability, *AIAA Journal*, 60, 3298–3310, 2022.
- [7] Mahmoodi, E., Khezri, M., Ebrahimi, A., Ritschel U., Kamandi, M., A LiDAR-Based Yaw Control for Wind Turbines, *Preprints.org (www.preprints.org)*, 07-10-2024, doi:10.20944/preprints202410.0366.v1
- [8] Elkodama, A., Abdellatif, A., Shaaban, S., Rushdi, M. A., Yoshida Sh., Ismaiel A., Investigation into the Yaw Control of a Twin-Rotor 10 MW Wind Turbine, *Appl. Sci.* 2024, 14, 9810, <https://doi.org/10.3390/app14219810>
- [9] Van Vondelen A. A. W., Pamososuryo A. K., Navalkar S. T., and van Wingerden J.W., Control of Periodically Waked Wind Turbines, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2024.
- [10] Gonzalez Silva, J., van der Hoek, D., Ferrari, R., and van Wingerden J. W., Wind Tunnel Testing of Wind Turbine and Wind Farm Control Strategies for Active Power Regulation, *J. Renewable Sustainable Energy* 16, 053302 (2024); DOI: 10.1063/5.0215493
- [11] Jonkman, J. M., and Buhl, M. L., FAST User's Guide, NREL Report No. EL-500-38230, National Renewable Energy Laboratory, 2005.
- [12] Suryanarayanan, S., and Dixit, A., On the Dynamics of the Pitch Control Loop in Horizontal Axis Large Wind Turbines, *Proc. Amer. Ctrl. Conf.*, pp. 686–690, June 2005.
- [13] Borunda M., Garduno R., de la Cruz Soto J., Díaz R.A.F., Intelligent Control of an Experimental Small-

- Scale Wind Turbine, *Energies*, Nov. 2024, DOI: 10.3390/en17225656
- [14] Stol, K. A., and Bir, G. S., SymDyn User's Guide, NREL Report No. EL-500-33845, National Renewable Energy Laboratory, 2003.
- [15] Kane, T. R., and Levinson, D. A., Dynamics: Theory and Applications, McGraw-Hill, 1985.
- [16] Hansen, A. C., User's Guide to the Wind Turbine Dynamics Computer Programs YawDyn and AeroDyn for ADAMS, version 11.0, Mech. Eng. Dept., Univ. of Utah, 1998.
- [17] Wright, A.D., and Fingersh, L.J., Advanced Control Design for Wind Turbines, Part I: Control Design, Implementation, and Initial Tests, National Renewable Energy Laboratory, Colorado, USA, Technical Report NREL/TP-500-42437, March 2008.
- [18] Pao, L. Y., and Johnson, K. E., A Tutorial on the Dynamics and Control of Wind Turbines and Wind Farms, Proc. Amer. Ctrl. Conf., June 2009.
- [19] Van Minh P., Control for Wind Turbine System using PMSG when Wind Speed Changes, *International Journal of Electrical and Electronics Research (IJEER)*, 2024, Volume 12, Issue 2, p.p. 520-528, e-ISSN: 2347-470X, www.ijeer.forexjournal.co.in
- [20] Benhacine T.Y., Mouzai A., Azaz A.A., Boudraf M., MPPT Optimal Torque Control Strategy for a PMSG-based Wind Turbine Emulator, *Journal of Renewable Energies*, IREnDAYS'24 Algiers (2024), p.p. 289 – 295, DOI: <https://doi.org/10.54966/jreen.v1i1.1271>
- [21] Benhacine, T. Z. E., Dali, A., Tata, M., Kherbachi, A., Boudraf, M., & Kaabeche, A., Design of a Test Bench for a Small Wind Turbine Emulator, *Journal of Renewable Energies*, 27(1), 2024.
- [22] Chahb A., Yessef M., Amharech A., A Comprehensive Approach to Wind Turbine Optimization Integrating MPPT and Speed Control, 2024, DOI: 10.1109/ISAECT64333.2024.10799765
- [23] Laks, J. H., Pao, L. Y., and Wright, A. D., Control of Wind Turbines: Past, Present, and Future, Conference Paper in Proceedings of the American Control Conference, July 2009, DOI: 10.1109/ACC.2009.5160590

BIOGRAFIJA



Slavica Stojiljković je rođena 1969. godine u Prokuplju, gde je završila osnovnu školu i gimnaziju. Diplomirala je 1994. godine na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Nišu, na obrazovnom profilu Automatsko upravljanje, na

kom je 2014. odbranila magistarsku tezu „Primena neurofazi-genetskog upravljanja na automatizaciji sistema grejanja i klimatizacije u inteligentnim zgradama” i stekla akademsko zvanje magistra mašinskih nauka – oblast automatsko upravljanje.

Od 1996. do 2015. godine radila je u Direkciji za izgradnju i urbanizam opštine Prokuplje kao projektant termotehničkih sistema.

Godine 2015. prelazi u Elektrodistribuciju Beograd. Od 2021. godine radi u Upravi JP EPS-a (sada: EPS AD), u Službi za energetske efikasnost Sektora za energetske efikasnost i zaštitu životne sredine u proizvodnji energije i uglja, Tehničkih poslova proizvodnje uglja i energije, kao glavni inženjer za energetske efikasnost.

Godine 1999. u SMEITS-u je položila stručni ispit propisan za diplomiranog mašinskog inženjera.

Septembra 2005. postaje član Inženjerske komore Srbije (IKS) sa licencom za diplomiranog mašinskog inženjera – odgovorni projektant termotehnike, termoenergetike, procesne i gasne tehnike.

Godine 2009. stiče sertifikat energetskog menadžera, 2010. polaže stručni ispit iz protivpožarne zaštite, a 2012. dobija i licencu IKS-a za energetske efikasnost u zgradarstvu.

Godine 2021. završava obuku za energetskog menadžera u industriji, na Mašinskom fakultetu u Beogradu, i dobija licencu za obavljanje poslova energetskog menadžera za oblast industrijske energetike.

UDC: 621.311.245

Slavica Stojiljković¹, Vladimir M. Šiljkut¹

An Overview of Wind Turbines Control Systems

¹ Joint Stock Company Elektroprivreda Srbije, Belgrade*

Report

Highlights

- Different methods for regulation of wind turbine power
- Ensuring reliable and efficient operation of wind turbines under variable wind speeds
- Wind turbines are inherently nonlinear and time-varying

Abstract

This paper provides an overview of the latest expert literature on wind turbine control systems. Some techniques used in the control of horizontal-axis wind turbines at the individual turbine level are presented and explained in more detail. These controls apply to the blade pitch and generator power. The turbine system is modeled as a flexible structure operating under the presence of turbulent wind disturbances. A review of various turbine operating phases and control strategies aimed at maximizing energy conversion at sub-nominal wind speeds is provided, with a focus on managing aerodynamic loads when the turbine operates at maximum power. After reviewing the basic objectives of turbine control, the paper gives an overview of common linear control approaches and then describes advanced control architectures, addressing why they may provide greater benefits.

Keywords

Linearized wind turbine model, wind generator, wind speed, wind turbine efficiency, wind turbine power regulation

Received: October 22nd, 2024Reviewed: January 18th, 2025Modified: February 10th, 2025Accepted: February 21st, 2025

*Corresponding author: Slavica Stojiljković, +381-64-83-33-277

E - mail: slavica.stojiljkovic@eps.rs

Tatjana Cincar Vujović^{1*}

Primenjena metrologija u Elektrodistribuciji Srbije

¹ Elektrodistribucija Srbije d. o. o. Beograd, Novi Beograd, Srbija



Stručni rad

Ključne poruke

- Razvijena metrologija u privredi doprinosi poboljšanju kvaliteta proizvoda/usluga i poboljšanju konkurentnih sposobnosti na tržištu
- Međulaboratorijska poređenja su jedan od najznačajnijih kriterijuma za procenu uporedivosti i osiguranja poverenja u rezultate merenja
- Rezultat merenja je kompletan samo ukoliko ga prati kvantitativna izjava o njegovoj mernoj nesigurnosti, koja je važna za dobijanje dobrog kvaliteta merenja

Kratak sadržaj

Ispunjavanjem propisanih zahteva za brojila električne energije trebalo bi da se obezbedi visok nivo zaštite od slučajnog ili namernog uticaja na parametre i performanse brojila, na zakonski relevantan softver u brojilu, te uticaj na rezultat merenja, a ocenjivanjem usaglašenosti brojila električne energije trebalo bi da se obezbedi visok nivo poverenja.

Međulaboratorijska poređenja i ispitivanja osposobljenosti su veoma važan aspekt kontrole kvaliteta rezultata merenja i nedvosmislena potvrda kompetentnosti laboratorija.

U radu su prikazani rezultati međulaboratorijskih poređenja koje je sproveo Kontrolno telo Elektrodistribucije Srbije u periodu od 2020. do 2023. godine, u cilju osiguranja poverenja i pouzdanosti rezultata merenja električne energije u distributivnom sistemu.

Ključne reči

Evaluacija rezultata, međulaboratorijsko poređenje, merna nesigurnost

Primljeno: 27. februar 2024.

Recenzirano: 30. decembar 2024.

Izmenjeno: 12. februar 2025.

Odobreno: 13. februar 2025.

*Korespondirajući autor: +381 11 36 55 524, +381 64 83 54 293

Imejl: Tatjana.Cincar-Vujovic@ods.rs

1. UVOD

Kontrolno telo Elektrodistribucije Srbije je značajan deo metrološkog sistema Republike Srbije sa dugom tradicijom. Pored osnovnog zadatka u kontrolisanju i overavanju brojila električne energije u svojim 17 laboratorija, Kontrolno telo Elektrodistribucije Srbije obezbeđuje sistem sledivosti do krajnjih korisnika i podiže infrastrukturu sistema kvaliteta organizovanjem i sprovođenjem međulaboratorijskih poređenja, u skladu sa ISO/IEC 17043 [1] i ILAC-G13 [2].

Međulaboratorijsko poređenje je organizovanje izvođenja i vrednovanja ispitivanja/etaloniranja istih ili sličnih predmeta ispitivanja/etaloniranja koje su sprovele dve laboratorije ili više laboratorija u skladu sa unapred utvrđenim uslovima [1].

Ispitivanje osposobljenosti je utvrđivanje sposobnosti laboratorije za ispitivanje/etaloniranje, za specifična ispitivanja ili merenja kroz učestvovanje u međulaboratorijskim poređenjima [1].

U poslovima potvrđivanja usaglašenosti merila sa propisanim tehničkim i metrološkim zahtevima, primarno se razmatraju kompetentnost i tehnička osposobljenost tela za ocenjivanje usaglašenosti.

Učešće u međulaboratorijskim poređenjima (MLP) i ispitivanjima osposobljenosti (PT šeme) predstavlja jedan od značajnih preduslova uspostavljanja i održavanja metrološkog sistema u Republici Srbiji. Međulaboratorijska poređenja su veoma važan aspekt kontrole kvaliteta rezultata merenja i nedvosmislena potvrda kompetentnosti laboratorija. Neminovnost i potreba uključivanja u šeme provere stručnosti, kao jednog od najznačajnijih kriterijuma za procenu uporedivosti rezultata merenja, obezbeđuju prepoznavanje i prihvatanje rezultata merenja, a sve u svrhu uklanjanja tehničkih barijera u trgovini.

Učešće u MLP/PT obavezuje svaku laboratoriju da rezultate merenja iskaže u formi tipičnog budžeta merne nesigurnosti [3, 5, 6], čime rezultat merenja dobija značaj dobrog kvaliteta merenja [6]. Rezultat merenja je kompletan samo ukoliko ga prati kvalitativna izjava o njegovoj mernoj nesigurnosti. Uspešno merenje zavisi od razumevanja i izražavanja merne nesigurnosti, te kvantifikacije sumnje u rezultat merenja. Radi dobijanja dobrog kvaliteta merenja i razumevanja samog rezultata merenja, merna nesigurnost je važan podatak, parametar koji se pridružuje rezultatu merenja i koji odražava rasipanje izmerenih vrednosti. Merna nesigurnost se definiše i prikazuje u cilju njenog smanjenja i otkrivanja faktora koji mogu uticati na mernu nesigurnost.

U opštem slučaju, merna nesigurnost sadrži više komponenti [3, 4, 5, 6]. Neke od njih se mogu oceniti iz statističke raspodele rezultata serije merenja i

okarakterisati eksperimentalnom standardnom devijacijom. Druge komponente, koje se takođe mogu okarakterisati standardnom devijacijom, ocenjuju se na osnovu pretpostavljenih raspodela verovatnoće zasnovanih na iskustvu ili drugim informacijama.

Standardna merna nesigurnost se može odrediti metodom ocene tipa A ili ocene tipa B.

Tip A je ocenjivanje merne nesigurnosti statističkom analizom serije rezultata merenja. Statistička sigurnost koja odgovara mernoj nesigurnosti tip A zavisi od statističke raspodele. Može se usvojiti Gausova raspodela.

Tip B je ocenjivanje merne nesigurnosti svim ostalim metodama izuzev statističke analize serija ponovljenih merenja. Merna nesigurnost tip B prouzrokuje sistematski efekti.

Pri izražavanju merne nesigurnosti najčešće se koriste tri funkcije raspodele: ravnomerna (uniformna), trougaona i Gausova.

Metodologija određivanja kombinovane merne nesigurnosti u slučaju nekorelisanih veličina opisana je u Poglavlju 2 ovog rada.

U Poglavlju 3 ovog rada prikazane su šeme poređenja i rezultati MLP/PT koje je Kontrolno telo Elektrodistribucije Srbije sproveo u periodu od 2020. do 2023. godine, u svrhu dokazivanja ekvivalentnosti rezultata merenja električne energije u svim laboratorijama Kontrolnog tela Elektrodistribucije Srbije, sa Nacionalnom metrološkom institucijom i nacionalnim etalom električne energije, sa Elektromrežom Srbije na mestima primopredaje električne energije iz prenosnog u distributivni sistem, sa domaćim proizvođačima brojila električne energije čija su brojila najčešće zastupljena na mreži.

Dokazivanjem ekvivalentnosti metoda i rezultata merenja električne energije u Kontrolnom telu Elektrodistribucije Srbije interno i sa eksternim subjektima metrološkog sistema Republike Srbije utvrđuje se i osigurava poverenje u rezultate merenja električne energije Kontrolnog tela Elektrodistribucije Srbije, naglašeno je u Poglavlju 4 ovog rada.

2. ODREĐIVANJE MERNE NESIGURNOSTI

U proceni merne nesigurnosti, polazilo se od relativne greške merenja iskazane matematičkim modelom merenja

$$e = e_{sr} + \delta_E + \delta_U \quad (1)$$

gde su:

e – relativna greška merenja, u procentima (%);

e_{sr} – srednja vrednost 10 izmerenih relativnih grešaka merenja, u procentima (%);

δ_E – korekcija relativne greške zbog specifikacije referentnog etalona koju je dao proizvođač, u procentima (%);

δ_U – korekcija relativne greške zbog merne nesigurnosti etaloniranja referentnog etalona, u procentima (%).

Izvori nesigurnosti, saglasno modelu merenja (1) su:

- 1) nesigurnost usled ponavljanja merenja, tip A, normalna (Gausova) raspodela, broj stepeni slobode je devet;
- 2) nesigurnost referentnog etalona, tip B, pravougaona (ravnomerna, uniformna) raspodela, broj stepeni slobode je beskonačan;
- 3) nesigurnost usled etaloniranja referentnog etalona, tip B, normalna (Gausova) raspodela, broj stepeni slobode je 50.

Imajući u vidu karakteristike artefakta (brojilo električne energije), zanemarene su nesigurnosti usled dugoročne stabilnosti referentnog etalona, temperature sredine i uticaja kablova, jer se velika važnost pridaje dostupnim podacima iz istorije etaloniranja etalonske opreme. Odabrani rezultati etaloniranja značajnih mernih tačaka se iscrtavaju u odnosu na vreme. Iz ovih grafikona i disperzija rezultata etaloniranja može se izračunati zanošenje ili pomak u jednom intervalu etaloniranja. U slučaju veoma stabilne etalonske opreme, zanošenje ili srednji pomak, može se izračunati iz nekoliko intervala etaloniranja.

Za nekorelisane ulazne veličine kombinovana standardna merna nesigurnost data je formulom [3]

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^N (c_i u(x_i))^2 \quad (2)$$

gde su:

u_c – kombinovana standardna nesigurnost;

c_i – koeficijenti osetljivosti;

$u(x_i)$ – standardna nesigurnost pojedinih veličina iz formule (1).

Efektivni broj stepeni slobode je računat prema Welch–Satterthwaite formuli [3, 5]

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (3)$$

gde su:

ν_{eff} – efektivni broj stepeni slobode;

u_c – kombinovana standardna nesigurnost;

u_i – standardna nesigurnost pojedinih veličina iz formule (1);

ν_i – efektivni broj stepeni slobode za nesigurnost pojedinih veličina.

Za evaluaciju rezultata i proračun ekvivalentnosti korišćen je E_n broj. Za računanje ovog broja primenjena je formula [4]

$$E_n = \frac{\Delta x_{lab} - \Delta x_{ref}}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}} \quad (4)$$

gde su:

Δx_{lab} – rezultat laboratorije učesnice poređenja;

Δx_{ref} – rezultat referentne dogovorene laboratorije;

U_{lab} – merna nesigurnost laboratorije učesnice za određeni

rezultat;

U_{ref} – merna nesigurnost usvojene referentne vrednosti.

Uslov za potvrđivanje ekvivalentnosti rezultata merenja je da apsolutna vrednost E_n broja bude manja ili jednaka 1.

3. OSIGURANJE POVERENJA I POUZDANOST REZULTATA MERENJA

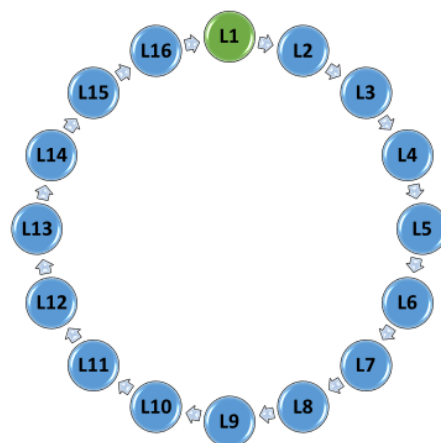
Razvijena metrologija u privredi doprinosi poboljšanju kvaliteta proizvoda i poboljšanju konkurentnih sposobnosti na tržištu. Ispunjavanjem propisanih zahteva za brojila električne energije trebalo bi da se obezbedi visok nivo zaštite od slučajnog ili namernog uticaja na parametre i performanse brojila, na zakonski relevantan softver u brojilu, te uticaj na rezultat merenja. Ocenjivanjem usaglašenosti brojila električne energije trebalo bi da se obezbedi visok nivo poverenja.

Tehnička osposobljenost 17 laboratorija za kontrolisanje/overavanje brojila električne energije u Elektro distribuciji Srbije potvrđuje se održavanjem akreditacije po zahtevima standarda SRPS ISO/IEC 17020 i Zakona o akreditaciji i održavanjem upisa u registar ovlašćenih tela za overavanje merila ministarstva nadležnog za poslove metrologije, u skladu sa Zakonom o metrologiji.

Osiguranje poverenja i pouzdanost rezultata merenja električne energije u laboratorijama Elektro distribucije Srbije na poslovima ocenjivanja usaglašenosti brojila električne energije sa propisanim tehničkim i metrološkim zahtevima obezbeđuje se međulaboratorijskim poređenjem.

3.1 Interna PT šema

Prva interna PT šema laboratorija Kontrolnog tela Elektro distribucije Srbije sprovedena je 2020. godine [8], kao kružno poređenje 16 jednakih laboratorija Kontrolnog tela (KT) Elektro distribucije Srbije, prikazano na Slici 1.



Slika 1. Kružno poređenje

Za dogovorenu referentnu vrednost izabrana je jedna (L1) od 16 jednakih laboratorija Kontrolnog tela

Elektrodistribucije Srbije, koja je imala ulogu pilot-laboratorije. Zbog toga je laboratorija L1 sprovela merenja na početku i na kraju interne PT šeme.

Dobra organizacija međulaboratorijskog poređenja podrazumevala je izradu Protokola u kojem su bili definisani priroda i svrha PT šeme, raspored izvršenja poređenja, izbor artefakta, informacije o transportu i rukovanju artefaktom, planirano, ograničeno vreme izvođenja merenja, informacije o metodi merenja i procedurama, odgovornost za sprovođenje merenja u definisanim mernim tačkama, naznaka sprovođenja statističke analize rezultata merenja koja će biti sprovedena sa predočenim načinom definisanja dogovorene, referentne vrednosti, način evaluacije rezultata merenja, kriterijum za pozitivnu ocenu u skladu sa SRPS ISO/IEC 17043 i odgovornost za izradu nacrtu i konačnog Izveštaja o rezultatima međulaboratorijskog poređenja.

Za artefakt je izabrano elektronsko brojilo električne energije, osnovnih metroloških karakteristika 3x230/400 V, 5/6 A, klase tačnosti merenja aktivne električne energije 0,2 S. Merenja u laboratorijama su sprovedena u referentnim uslovima, a vrednosti temperature sredine i relativne vlažnosti u toku merenja referisane su zajedno sa rezultatima merenja.

Protokolom je bilo definisano merenje na jednom merno-ispitnom sistemu u laboratoriji koja ima više merno-ispitnih sistema. Laboratorije su referisale srednje vrednosti rezultata 10 uzastopnih merenja u zadatim mernim tačkama.

Sva etalonska brojila električne energije koja su laboratorije koristile u merenju slediva su do nacionalnog etalona, imaju deklarisanu tačnost $\pm 0,05\%$ i pridruženu mernu nesigurnost koja je za svako etalon brojilo data u njemu pripadajućem Uverenju o etaloniranju, nakon etaloniranja u Direkciji za mere i dragocene metale, u skladu sa SRPS ISO/IEC 17025.

Očekivani izvori merne nesigurnosti su bili:

- Tip A, statistički rezultati dobijeni merenjem;
- Tip B, nesigurnost metode, odnosno etalonskog brojila električne energije.

Od međusobno nekorelisane merne nesigurnosti tipa A i tipa B određena je standardna kombinovana merna nesigurnost i proširena (kombinovana) merna nesigurnost, što predstavlja krajnji cilj obrade mernih podataka.

Sve laboratorije KT su referisale vrednosti rezultata merenja i pridružene merne nesigurnosti. Proračun budžeta merne nesigurnosti sa detaljima merne nesigurnosti dat je na primeru rezultata merenja pilot-laboratorije (L1), na početku interne PT šeme, u specifičnoj formi budžeta merne nesigurnosti, prikazanoj u Tabeli I.

Rezultati proračuna E_n broja [8] prikazani su na Slici 2.

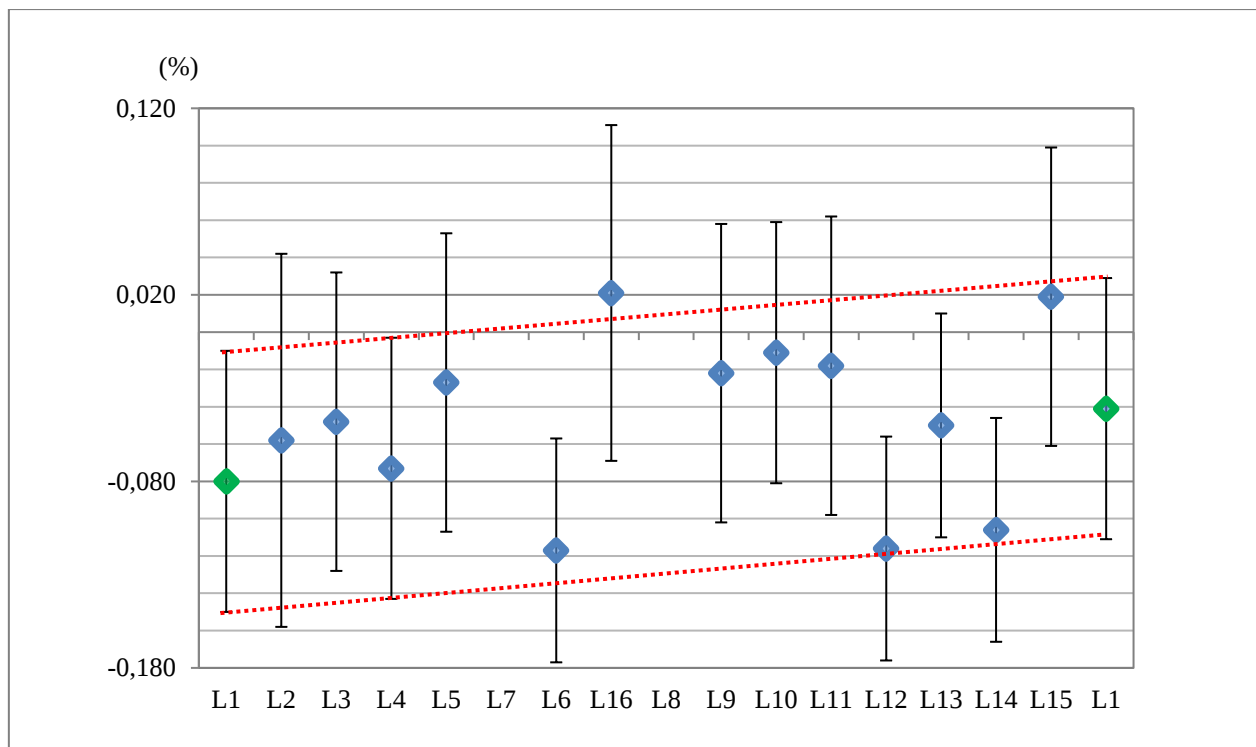
Izračunata apsolutna vrednost E_n broja je manja od 1, čime je dokazana ekvivalentnost rezultata merenja u svim laboratorijama Kontrolnog tela Elektrodistribucije Srbije.

Posebna vrednost ovih rezultata ogleda se u merenju istog uzorka brojila električne energije, istom mernom metodom, ali korišćenjem etalon brojila različitih proizvođača.

Rezultati PT šeme su uvek poziv za preispitivanje. Zbog visoke standardne devijacije ponovljenih rezultata merenja, laboratorija L16 ima veću nesigurnost tipa A, manji efektivni broj stepeni slobode $\nu_{\text{eff}} = 28,39$ i stoga veći faktor prekrivanja $k = 2,05$, te veću proširenu mernu nesigurnost 0,09%. Tumačenje rezultata merenja ukazuje na nedovoljnu posvećenost izvršioca merenja samom merenju. Rezultate merenja treba pratiti u nekoliko planiranih serija merenja, kako bi se izbegla greška operatera ili slučajno narušavanje osetljivosti interfejsa za očitavanje impulsa na artefaktu.

Tabela I Tipična forma budžeta merne nesigurnosti

Veličina X_i	Procena x_i	Standardna merna nesigurnost (x_i) (%)	Raspodela verovatnoće / Metoda vrednovanja (A, B)	Koeficijent osetljivosti c_i	Relativni doprinos merne nesigurnosti $c_i u(x)$ (%)	Broj stepeni slobode ν_i
ε_{sr}	0,087	0,002	Tip A	1	0,002	9
u_{B1}	0	0,029	Tip B	1	0,029	∞
u_{B2}	0	0,006	Tip B	1	0,006	50
$\varepsilon =$	0,087	Efektivan broj stepeni slobode $\nu_{ef} =$				331186,214
Kombinovana standardna merna nesigurnost u_C (%)						0,03
Faktor prekrivanja (obuhvata) $k =$						1,99
Proširena merna nesigurnost $U = k \cdot u_C$ (%)						0,06



Slika 2. Rezultati proračuna E_n broja u KT Elektrodistribucije Srbije

3.2 Bilateralno poređenje sa Direkcijom za mere i dragocene metale

U bilateralnom poređenju Kontrolnog tela Elektrodistribucije Srbije sa Nacionalnom metrološkom institucijom – Direkcijom za mere i dragocene metale (DMDM), pilot-laboratorija iz prethodne Interne PT šeme imala je ulogu referentne laboratorije Elektrodistribucije Srbije.

Rezultati proračuna E_n broja, u poređenju u kojem je pilot-laboratorija bila nacionalna laboratorija u DMDM [9], prikazani su na Slici 3.

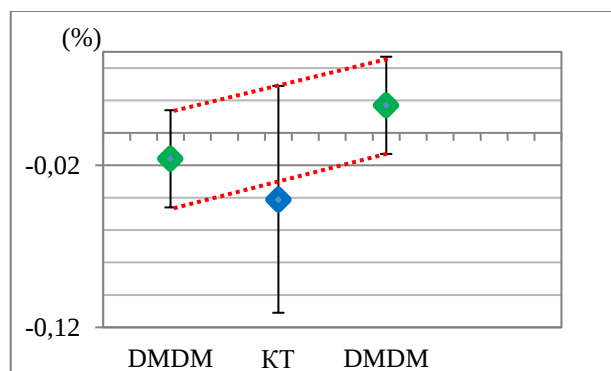
Etalonska brojila KT Elektrodistribucije Srbije etalonirana su u DMDM, te je očekivano širina opsega merne nesigurnosti merenja KT veća od merne nesigurnosti merenja DMDM.

Rezultati bilateralnog poređenja sa DMDM su nedvosmislena potvrda tehničke kompetentnosti laboratorija Elektrodistribucije Srbije.

Posebna vrednost ovog bilateralnog poređenja ogleda se u „vezivanju” svakog merenja električne energije u laboratorijama Elektrodistribucije Srbije sa nacionalnim etalom električne energije Republike Srbije, prikazano na Slici 4.

Prema uspostavljenoj hijerarhijskoj šemi, kroz učešće DMDM u poređenjima Evropske asocijacije NMI (*The European Association of National Metrology Institutes – EURAMET*) i ključnim poređenjima sa Međunarodnim biroom za tegove i mere (*International Bureau of Weights and Measures – BIPM*), prikazano na Slici 4, svako merenje u laboratorijama Kontrolnog tela Elektrodistribucije Srbije vezuje se sa merenjima električne energije u Evropi i dalje sa međunarodnim etalom u BIPM, čime se obezbeđuje verodostojnost

merenja, a samim tim i kvalitet usluga kontrolisanja/overavanja brojila električne energije u Kontrolnom telu Elektrodistribucije Srbije.



Slika 3. Rezultati proračuna E_n broja u odnosu na DMDM

3.3 Interna PT šema – „osmica”

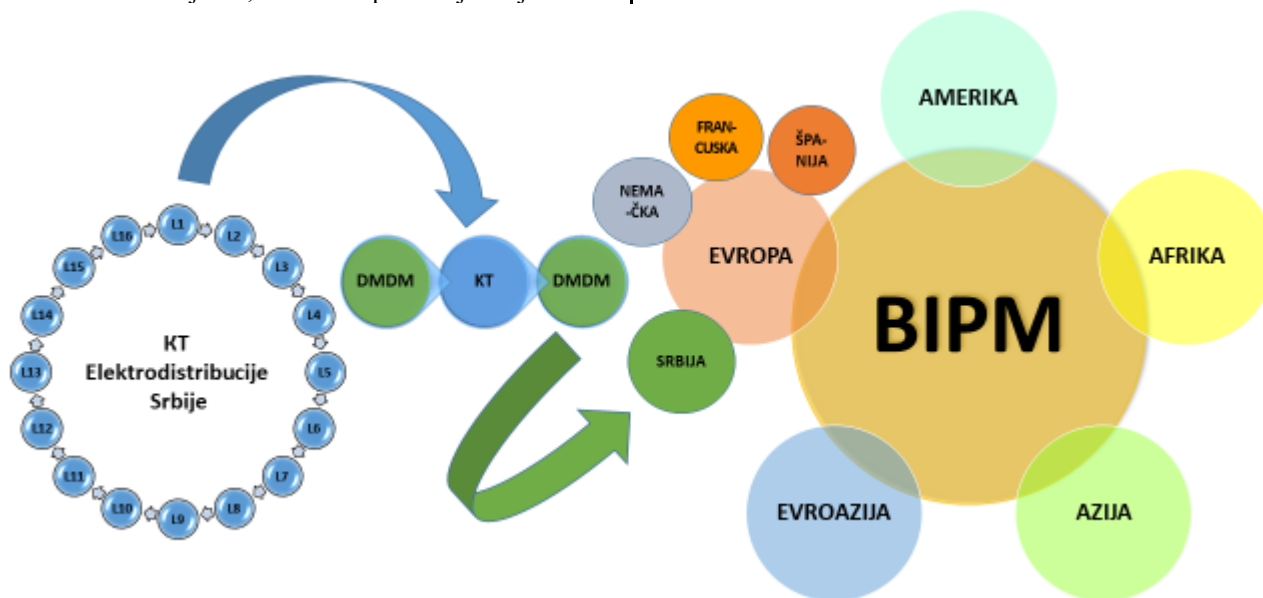
Unapređenje poslovanja Elektrodistribucije Srbije ogledalo se, između ostalog, i u formiranju nove, sedamnaeste laboratorije Kontrolnog tela Elektrodistribucije Srbije 2022. godine. Za potrebe dokazivanja ekvivalentnosti rezultata merenja te novoformirane laboratorije sprovedena je interna PT šema, organizovana kao kružno poređenje „osmica”, prikazano na Slici 5.

Imajući u vidu da laboratorije Elektrodistribucije Srbije imaju merno-ispitnu opremu dva različita

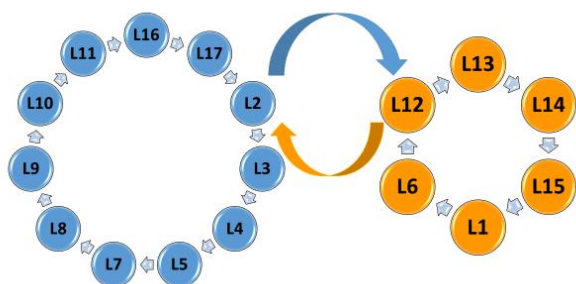
proizvođača, granu „osmice” čine laboratorije koje koriste merno-ispitnu opremu istog proizvođača.

Za plavu granu je izabrana dogovorena referentna vrednost laboratorije L2, za kružno poređenje 11 jednakih

laboratorija, koje sve koriste merno-ispitnu opremu proizvođača A.



Slika 4. Veza rezultata merenja



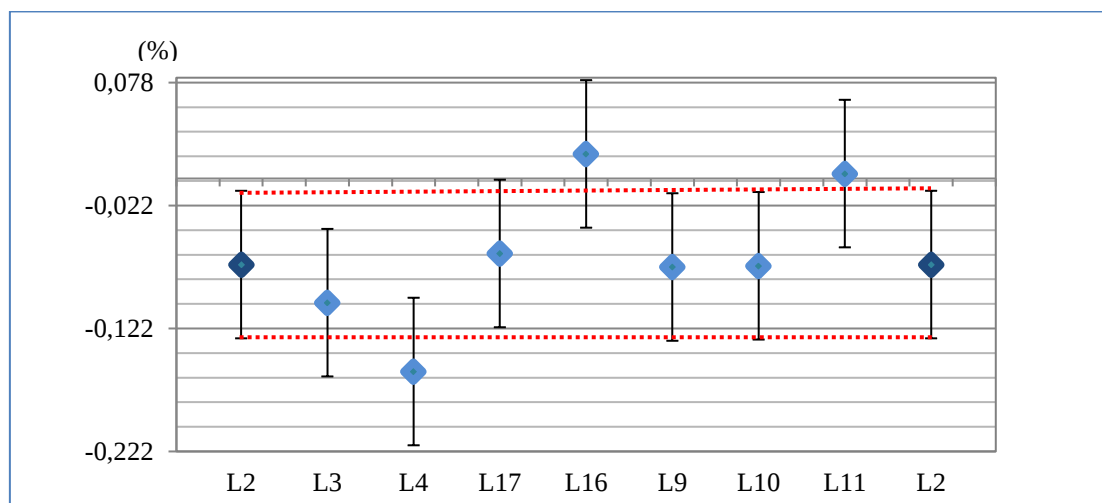
Slika 5. Interna PT šema – kružno poređenje „osmica”

Za narandžastu granu je izabrana dogovorena referentna vrednost laboratorije L12, za kružno poređenje 6 jednakih laboratorija, koje sve koriste merno-ispitnu opremu proizvođača B.

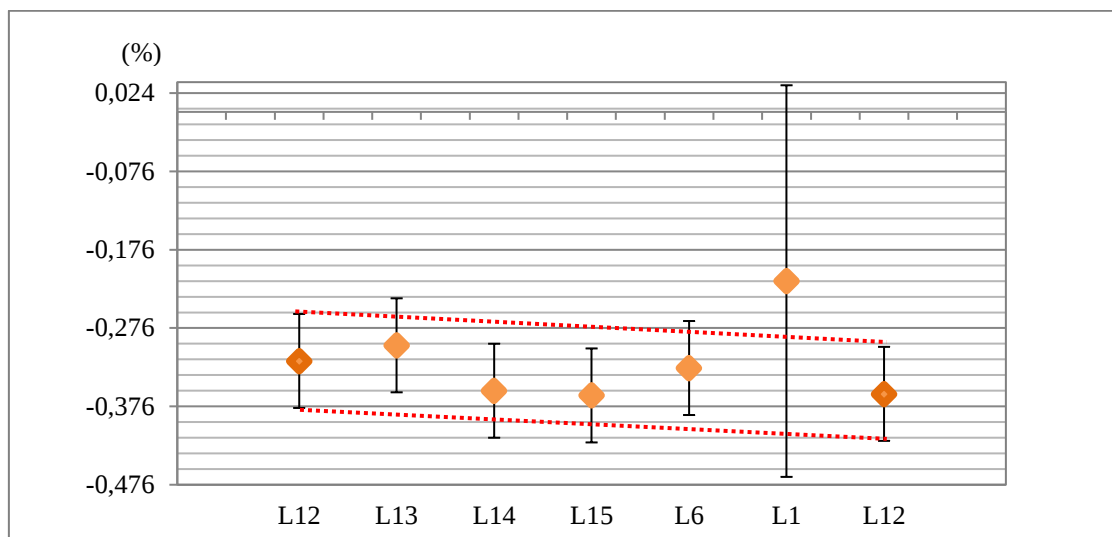
Na slikama 6 i 7 prikazane su izračunate vrednosti za ekvivalentnost za svaku granu „osmice”.

Na Slici 6 vidi se neznatno odstupanje rezultata merenja L4, L16 i L11. Apsolutne vrednosti E_n broja rezultata merenja L4 i L16 veće su od 1 i iznose: 1,025 za L4 i 1,086 za L16.

Apsolutna vrednost E_n broja rezultata merenja L11 je 0,872 i zadovoljen je uslov $|E_n| \leq 1$. Na Slici 6 rezultat L11 očitava se na referentnoj liniji.



Slika 6. Rezultati proračuna E_n broja za plavu granu „osmice”



Slika 7. Rezultati proračuna E_n broja za narandžastu granu „osmice“

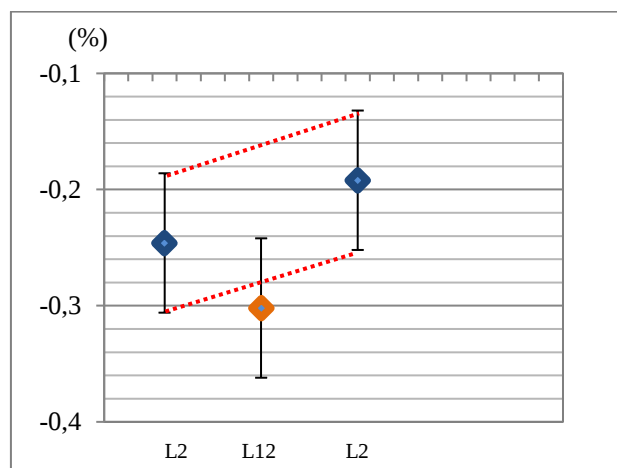
Na Slici 7 rezultat merenja L1 ima veliku mernu nesigurnost zbog visokog faktora prekrivanja $k = 2,23$, što je posledica malog efektivnog broja stepeni slobode $\nu_{\text{eff}} = 10,44$ na koji utiče kombinovana standardna merna nesigurnost, u kojoj je doprinos merne nesigurnosti etaloniranja preuzet iz prethodnog Uverenja/Sertifikata o etaloniranju, a ne iz novog, koji je DMDM dostavila sa zakašnjenjem.

Apsolutna vrednost E_n broja rezultata merenja L1 je 0,872 i zadovoljen je uslov $|E_n| \leq 1$. Na Slici 7 rezultat L1 očitava se izvan referentne linije.

Protokolom poređenja je zadat uslov $|E_n| \leq 1$ koji je uslov u poređenjima rezultata laboratorija za etaloniranje [4] koje su akreditovane po zahtevima standarda SRPS ISO/IEC 17025. Ovde je sprovedeno poređenje rezultata laboratorija akreditovanih za kontrolisanje po zahtevima standarda SRPS ISO/IEC 17020, pa je dogovoren uslov mogao da bude i $|E_n| \leq 2$. U nekim međunarodnim poređenjima laboratorija za etaloniranje, usled karakteristika artefakta, njegove stabilnosti, učešća velikog broja laboratorija ili višegodišnjeg trajanja poređenja, za dogovoren uslov se uzima $|E_n| \leq 2$. Za poređenje rezultata laboratorija za kontrolisanje (SRPS ISO/IEC 17020) uslov $|E_n| \leq 2$ bi bio prihvatljiv, ali KT Elektrodistribucije Srbije se opredelilo za „stroži“ uslov, koji je „osetljiviji“ na indikaciju performansi laboratorija učesnika poređenja.

Nakon završetka kružnog poređenja svake grane „osmice“, pilot-laboratorije svake grane „osmice“, kao dogovorene referentne vrednosti grane „osmice“, laboratorije L2 i L12 izvršile su dvostruko međulaboratorijsko poređenje.

U prvom međulaboratorijskom poređenju, dogovorena referentna vrednost plave grane, laboratorija L2 je imala ulogu pilot-laboratorije. Rezultati proračuna E_n broja za prvo međulaboratorijsko poređenje u formi $L2 - L12 - L2$, prikazano je na Slici 8.



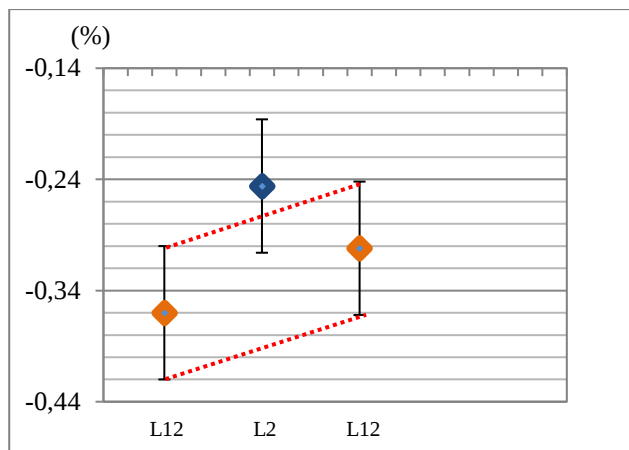
Slika 8. Rezultati proračuna E_n broja za pilot-laboratoriju L2

Apsolutna vrednost E_n broja rezultata merenja L12 u odnosu na dogovorenu referentnu vrednost plave grane „osmice“ je 0,9782 i zadovoljen je uslov $|E_n| \leq 1$.

U drugom međulaboratorijskom poređenju, dogovorena referentna vrednost narandžaste grane, laboratorija L12 imala je ulogu pilot-laboratorije. Rezultati proračuna E_n broja za drugo međulaboratorijsko poređenje u formi $L12 - L2 - L12$, prikazano je na Slici 9.

Apsolutna vrednost E_n broja rezultata merenja L2 u odnosu na dogovorenu referentnu vrednost narandžaste grane „osmice“ je 1,0018 i blisko je uslovu $|E_n| \leq 1$.

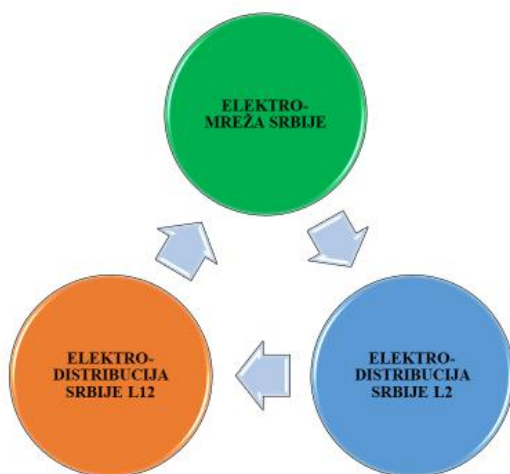
Evaluacije rezultata merenja u ovom kompleksnom poređenju ukazuju na performanse etalonskih brojila kojima se, u poređenjima, dodeljuje uloga dogovorene referentne vrednosti i zaključuje da je za učešće KT u eksternim PT šemama preporuka izabrati dogovorenu referentnu vrednost laboratorije KT koja koristi etalonsko brojilo proizvođača A (plava grana „osmice“).



Slika 9. Rezultati proračuna E_n broja za pilot-laboratoriju L12

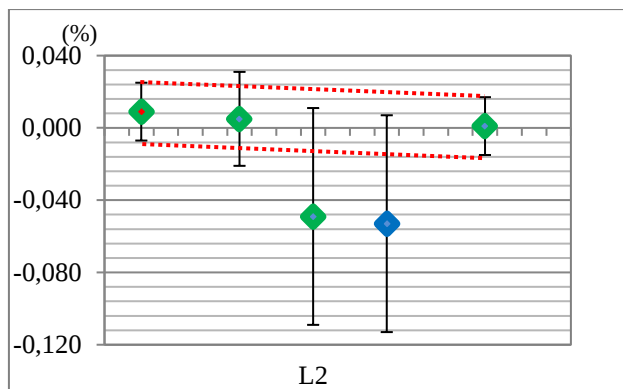
3.4 Eksterna PT šema

U cilju uspostavljanja veze i pokazivanja ekvivalencije rezultata merenja električne energije u laboratorijama Kontrolnog tela Elektrodistribucije Srbije i laboratoriji Kontrolnog tela Elektromreže Srbije, sprovedena je eksterna PT šema između Elektromreže Srbije i Elektrodistribucije Srbije. Uloga pilot-laboratorije u ovoj eksternoj PT šemi poverena je laboratoriji Elektromreže Srbije. Dve laboratorije Kontrolnog tela Elektrodistribucije Srbije L2 i L12 koje su u prethodnoj internoj PT šemi imale ulogu pilot-laboratorija, svaka u svojoj grani „osmice”, predstavljale su Kontrolno telo Elektrodistribucije Srbije. Eksterna PT šema je organizovana kao kružno poređenje prikazano na Slici 10.



Slika 10. Eksterna PT šema – kružno poređenje

Rezultati proračuna E_n broja, u odnosu na dogovorenu referentnu vrednost Elektromreža Srbije (EMS), prikazana je na Slici 11.



Slika 11. Rezultati proračuna E_n broja za pilot-laboratoriju Elektromreže Srbije

Sve laboratorije učesnice eksterne PT šeme su koristile istu mernu metodu i vršile su merenja u približno istim laboratorijskim uslovima sredine. Rasipanje rezultata merenja je očekivana posledica korišćenja etalonskih brojila različite tačnosti. Laboratorija Elektromreže Srbije koristi etalonsko brojilo tačnosti $\pm 0,02\%$, dok laboratorije Elektrodistribucije Srbije koriste etalonska brojila tačnosti $\pm 0,05\%$.

Apsolutna vrednost E_n broja rezultata merenja L2 je 0,757, a apsolutna vrednost E_n broja rezultata merenja L12 je 0,818 što potvrđuje zaključak prethodne interne PT šeme „osmica” u Poglavlju 3.3 ovog rada.

Potvrđivanje ekvivalentnosti rezultata merenja u Elektromreži Srbije i u Elektrodistribuciji Srbije je od naročitog značaja u lancu toka električne energije, na mestima primopredaje energije iz prenosnog u distributivni sistem.

Posebna vrednost ove eksterne PT šeme je u dodatno sprovedenom „kontrolnom” merenju na komparatoru, čija je sledivost 1 : 1 u odnosu na nacionalni etalon električne energije Republike Srbije. Tačnost komparatora je $\pm 0,01\%$, a njegova izlazna frekvencija je reda 60 kHz, što ga čini osetljivijim i stabilnijim.

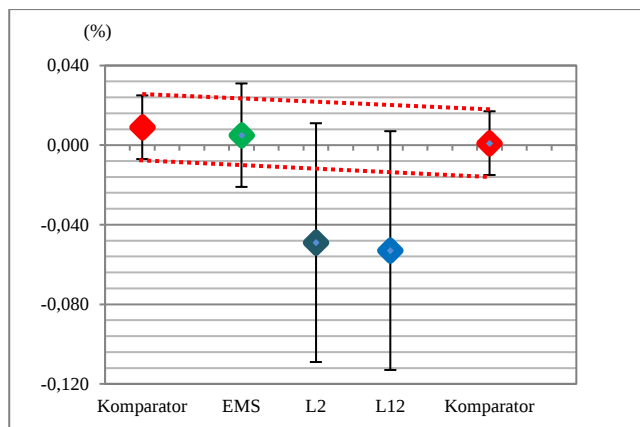
Apsolutna vrednost E_n broja, u odnosu na komparator (kontrolno merenje), rezultata merenja EMS je 0. Apsolutna vrednost E_n broja rezultata merenja L2 je 0,871, a rezultata merenja L12 je 0,935.

Rezultati proračuna E_n broja ukazuju na uticaj tačnosti dogovorenog referentnog etalonskog brojila. Korišćenjem komparatora u svojstvu referentnog etalonskog brojila proračunava se i veća vrednost E_n broja.

Rezultati proračuna E_n broja u odnosu na komparator (kontrolno merenje), prikazani su na Slici 12.

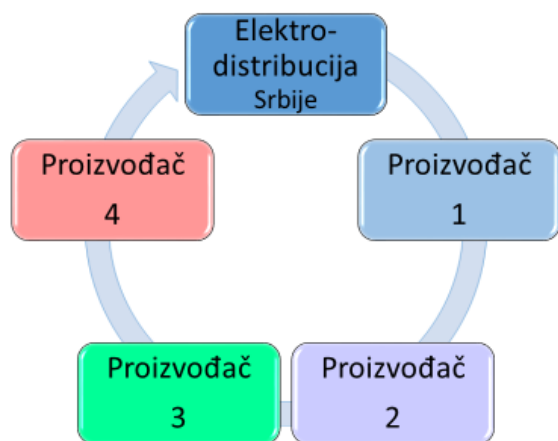
3.5 PT šema sa proizvođačima brojila

Intenzivnim radom Elektrodistribucije Srbije na unapređenju elektrodistributivne mreže i korišćenjem digitalnih tehnologija u sistem se implementiraju brojila električne energije sa integrisanim pristupom očitavanja izmerenih veličina sa svih brojila električne energije.



Slika 12. Rezultati proračuna E_n broja u odnosu na komparator

U cilju uspostavljanja veze između rezultata merenja električne energije brojila različitih domaćih proizvođača, Kontrolno telo Elektrodistribucije Srbije je u toku 2023. godine sproveo PT šemu sa domaćim proizvođačima brojila električne energije, organizovanu kao kružno poređenje, prikazano na Slici 13.



Slika 13. PT šema – kružno poređenje sa domaćim proizvođačima brojila

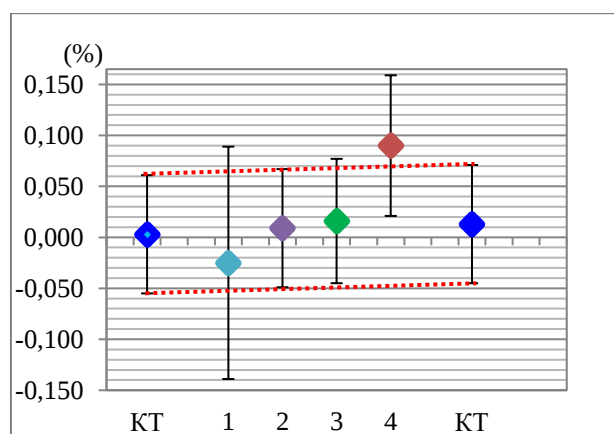
Rezultati proračuna E_n broja u odnosu na dogovorenu referentnu vrednost laboratorije Kontrolnog tela Elektrodistribucije Srbije, prikazana je na Slici 14.

Apsolutna vrednost E_n broja je manja od 1, čime je potvrđena ekvivalentnost rezultata merenja električne energije u različitim, kompetentnim laboratorijama.

Pilot-laboratorija Kontrolnog tela Elektrodistribucije Srbije i učesnik PT šeme, Proizvođač 3, u poređenju koriste etalonska brojila etalonirana u DMDM, sa sledivošću do nacionalnog etalona električne energije Republike Srbije. Ostali učesnici PT šeme, proizvođači 1, 2 i 4 koriste etalonska brojila etalonirana u akreditovanoj laboratoriji za etaloniranje, pri čemu učesnik PT šeme Proizvođač 1 dokazuje lanac sledivosti preko dve akreditovane laboratorije, a učesnici poređenja Proizvođač 2 i Proizvođač 4 dokazuju lanac sledivosti preko akreditovane laboratorije sledive do DMDM.

S druge strane, tačnost merenja električne energije etalonskog brojila Proizvođača 1 je $< \pm 0,1\%$, a tačnost merenja električne energije etalonskih brojila proizvođača 2, 3 i 4 je $< \pm 0,05\%$ i to je razlog šireg opsega merne nesigurnosti merenja električne energije Proizvođača 1.

Proizvođač 4 ima apsolutnu vrednost E_n broja 0,689 i to je najveća vrednost E_n broja u ovom poređenju, u odnosu na apsolutne vrednosti E_n broja ostalih učesnika ove PT šeme. Primarno objašnjenje apsolutne vrednosti E_n broja Proizvođača 4 je u Uverenju/Sertifikatu o etaloniranju etalonskog brojila koje je u poređenju koristio Proizvođač 4, u kojem je, za zadatu mernu tačku, faktor prekrivanja (obuhvata) $k = 2,18$ a proširena merna nesigurnost 0,0375%.



Slika 14. Rezultati proračuna E_n broja PT šeme sa domaćim proizvođačima brojila

Posebna vrednost ove PT šeme je njen međunarodni značaj, imajući u vidu upoređivanje rezultata merenja između laboratorija koje su, u skladu sa zahtevima referentnog standarda SRPS ISO/IEC 17020 akreditovane od strane Akreditacionog tela Srbije (ATS) i Bosanskog akreditacionog tela (BATA), te činjenicu da laboratorije za svoja etalonska brojila dokazuju sledivost preko različitih kompetentnih laboratorija za etaloniranje, Nacionalnih metroloških institucija ili laboratorija akreditovanih u skladu sa zahtevima SRPS ISO/IEC 17025.

4. ZAKLJUČAK

Svakodnevno suočavanje sa zahtevima za pouzdano snabdevanje električnom energijom, energetska efikasnost i kvalitet električne energije, podrazumeva organizovani sistem praćenja svih procesa u lancu tokova električne energije, a njihovo sagledavanje i analiza sa aspekata različitih kvantitativnih i kvalitativnih parametara stvara uslove za preduzimanje odgovarajućih mera i aktivnosti.

Povećanje efikasnosti zahteva razvoj infrastrukture koja podrazumeva odgovarajuću tačnost i pouzdanost merenja. Razvoj postojećih i primena novih tehnologija, kao i široko prihvaćeni alati infrastrukture kvaliteta, treba da omoguće ostvarivanje ovih ciljeva.

Dokazivanje ekvivalentnosti metoda i rezultata merenja obezbeđuje prepoznavanje i prihvatanje rezultata merenja i utvrđuje i osigurava poverenje u rezultat merenja.

Dodatna korist svakog međulaboratorijskog poređenja, interne ili eksterne PT šeme je u procenjivanju performansi laboratorija i utvrđivanju sposobnosti svake laboratorije za specifična merenja električne energije.

Osim dokazivanja tehničke kompetentnosti, to je i dodatna mogućnost za stalno napredovanje i potvrđivanje mogućnosti merenja primenom najboljih mernih tehnika i najtačnije merne opreme.

Kontrolno telo Elektrodistribucije Srbije, odabranim metodama merenja koje odgovaraju vrsti i obimu preduzetog posla za predviđenu namenu i u skladu sa potrebama korisnika, stalno demonstrira kompetentnost i doprinosi korporativnom imidžu i poboljšanju vidljivosti Elektrodistribucije Srbije među operatorima distributivnih sistema u regionu i u Evropi, jer merenje električne energije nema isključivo nacionalni značaj, već predstavlja međunarodnu obavezu kojom se obezbeđuje da nacionalni operatori distributivnih sistema deluju na usaglašen i jedinstven način.

ZAHVALNICA

Tople reči priznanja i zahvalnosti cenjenim kolegama u Sektoru za kontrolisanje merila električne energije Elektrodistribucije Srbije, na nepokolebljivom savladavanju procenjivanja merne nesigurnosti i radu na razvoju mernih tehnika. Svojim nesebičnim zalaganjem odigrali su izuzetno važnu ulogu u sprovođenju konkretnih merenja i postizanju zavidnih rezultata.

U skladu sa principima i pravilima poslovne etike, najviše rukovodstvo Elektrodistribucije Srbije obezbeđuje

nezavisnost Kontrolnog tela od bilo kakvih uticaja i pritisaka koji bi mogli da ugroze samostalnost tehničkog odlučivanja i integritet osoblja Kontrolnog tela.

LITERATURA

- [1] SRPS ISO/IEC 17043:2011 Ocenjivanje usaglašenosti – Opšti zahtevi za ispitivanje osposobljenosti
- [2] ILAC-G13:08/2007 ILAC Guidelines for the Requirements for the Competence of Providers of Proficiency Testing Schemes
- [3] ISO/IEC Guide 98-3:2008 Uncertainty of Measurement – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995)
- [4] ISO 13528:2015 Statistical Methods for Use in Proficiency Testing by Interlaboratory Comparison
- [5] JCGM 100:2008 Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
- [6] EA-4/02 M: 2022 Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration
- [7] Stanković, D., „O mernoj nesigurnosti”, XLVI Konferencija ETRAN, tom III, od 4. 6. do 7. 6. 2002. Banja Vrućica – Teslić
- [8] Cincar Vujović, T., Narančić I., Radosavljević, D., Maksimović, Z., Deak, P., „Poređenje laboratorija za kontrolisanje brojila električne energije u Elektrodistribuciji Srbije”, XII savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije, CIRED, od 30. 8. do 3. 9. 2021. Vrnjačka Banja
- [9] Cincar Vujović, T., Narančić I., Radosavljević, D., Maksimović, Z., Deak, P., „Bilateralno poređenje između Kontrolnog tela Elektrodistribucije Srbije i Nacionalne metrološke institucije”, XIII savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije, CIRED, od 12. 9. do 16. 9. 2022, Kopaonik

BIOGRAFIJA



Tatjana Cincar Vujović je rođena u Beogradu 1964. godine. Metrologija je primarna sfera njenog interesovanja od diplomiranja na Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu.

Iskustvo je stekla dugogodišnjim radom u Nacionalnoj metrološkoj instituciji na metrologiji električnih veličina i aktivnim učešćem u radu tehničkih i sektorskih komiteta, potkomiteta i radnih grupa Evropske komisije za merila (European Commission MI), Evropske asocijacije Nacionalnih metroloških instituta (EURAMET), Evropske saradnje u zakonskoj metrologiji (WELMEC), Međunarodne organizacije za zakonsku metrologiju (OIML), Akreditacionog tela Srbije (ATS) i Instituta za

standardizaciju (IS). Posvetila se razvoju nacionalne laboratorije za električnu energiju i potvrđivanju njene kompetentnosti na međunarodnom nivou, učešćem u brojnim međunarodnim poređenjima. Radila je na razvoju međunarodne preporuke za brojila električne energije (OIML R46), transponovanju EU Direktive o merilima (Measuring Instruments Directive – MID) u zakonodavstvo Srbije, na smernicama za implementaciju, ujednačenu i harmonizovanu primenu MID i uspostavljanju usaglašenog i doslednog pristupa evropskoj zakonskoj metrologiji u oblasti brojila električne energije. Na domaćim i međunarodnim konferencijama, kao autor/koautor objavila je više od 50 stručnih radova. Motivisana željom za nastavkom profesionalnog uspeha, transparentnim dokazivanjem u skladu sa najboljom praksom izvođenja merenja električne energije, od 16. 11. 2019. godine radi na mestu direktora Sektora za kontrolisanje merila električne energije u Elektrodistribuciji Srbije.

UDC: 006.91:621.317(497.11)

Tatjana Cincar Vujovic^{1*}



Applied metrology in Elektrodistribucija Srbije Ltd.

¹ Elektrodistribucija Srbije Ltd. Belgrade, Serbia

Professional paper

Highlights

- Developed metrology in the economy contributes to the improvement of the quality of products/services and improvement of competitive abilities on the market.
- Interlaboratory comparisons are one of the most important criteria for assessing comparability and ensuring confidence in measurement results.
- The measurement result is complete only if it is accompanied by a quantitative statement about its measurement uncertainty, which is important for obtaining a good measurement quality.

Abstract

Meeting the prescribed requirements for electrical energy meters should ensure a high level of protection against accidental or intentional tampering with the parameters and performance of the meter, with the legally relevant software in the meter, and with the measurement result, and assessing the conformity of electrical energy meters should ensure a high level of confidence.

Interlaboratory comparisons and proficiency tests are a very important aspect of quality control of measurement results and unambiguous confirmation of laboratory competence.

The paper presents the results of interlaboratory comparisons conducted by the Control Body of Elektrodistribucija Srbije Ltd. in the period from 2020 to 2023, with the aim of ensuring trust and reliability of the results of electrical energy measurements in the distribution system.

Keywords

Evaluation of results, interlaboratory comparison, uncertainty of measurement

Received: February 27th, 2024

Reviewed: December 30th, 2024

Modified: February 12th, 2025

Accepted: February 13th, 2025

*Corresponding author: +381 11 36 55 524, +381 64 83 54 293

E - mail: Tatjana.Cincar-Vujovic@es.rs



UREĐIVAČKA POLITIKA I TEMATSKE OBLASTI ČASOPISA

Pri ponovnom pokretanju izdavanja časopisa „Elektroprivreda” odlučeno je da on ima naučno-stručni karakter i da bude pripreman i publikovan po novoj, široj koncepciji i dvojezično, na srpskom i engleskom. Pri tome će na engleskom jeziku biti objavljivani samo oni rukopisi za koje autori iz Srbije i regiona iskažu takvu želju, a recenzenti i Uredništvo procene da imaju odgovarajući doprinos i da bi mogli biti od interesa i za čitalačku publiku van srpskog govornog područja. Časopis je, naravno, otvoren i za rukopise stranih autora čiji su originali na engleskom jeziku. Uz saglasnost ovih autora, odobreni rukopisi će biti prevedeni i objavljivani i na srpskom jeziku. Na srpskom jeziku dostupne su ćirilčna i latinična verzija objavljenih članaka.

Časopis se, po pravilu, izdaje dva puta godišnje, isključivo elektronski (*on line*). Časopis je otvorenog pristupa (*Open Access*), pri čemu je objavljivanje prihvaćenih rukopisa besplatno, bez bilo kakvih finansijskih obaveza autora. Sa druge strane, takođe nema ni finansijskih obaveza izdavača prema autorima, kako prijavljenih rukopisa tako i objavljenih članaka.

Sadržaj rukopisa prijavljenog za objavljivanje u Časopisu mora biti originalno delo autorâ i ne sme biti već objavljen ili javno predstavljen (niti objavljen ili predstavljen u međuvremenu, pre prvog objavljivanja u „Elektroprivredi”), bilo gde u svetu, u bilo kom obliku. Ovo pravilo se neće primenjivati na rukopise prijavljene za posebna, specijalna izdanja Časopisa, koja budu posvećena već prezentovanim, izabranim radovima sa partnerskih konferencija, pri čemu takav rukopis mora biti proširen najmanje 30% u odnosu na prezentovani konferencijski rad, unapređen i dodatno recenziran po istoj proceduri kao i rukopisi prijavljeni za redovna izdanja Časopisa.

U Časopisu se objavljuju samo oni rukopisi koji dobiju najmanje dve pozitivne recenzije od strane renomiranih eksperata u oblasti na koju se rukopis odnosi, odnosno većinu pozitivnih recenzija, u slučaju angažovanja većeg broja recenzenata.

Časopis prihvata na razmatranje rukopise i objavljuje radove naučno-istraživačkog i stručnog karaktera, a posebno rukopise/radove u oblastima:

- novih tehnologija za obezbeđivanje, obradu i korišćenje primarnih energenata;
- proizvodnje, prenosa i distribucije električne energije;
- skladištenja i konverzije električne i toplotne energije;
- racionalne potrošnje električne i toplotne energije;
- razvoja obnovljivih izvora energije;
- informacionih i telekomunikacionih sistema;
- organizacije rada elektroenergetskog sistema;
- zaštite životne sredine;
- revitalizacije elektroenergetskih objekata;
- pronalazaštva i inovacija;
- restrukturiranja i privatizacije u energetsom sektoru;
- tržišta električne energije;
- primene pravne regulative Evropske unije u oblasti energetike;
- druge srodne oblasti.

Časopis je zamišljen kao platforma i alat za prikazivanje iskustava, konstruktivno iskazivanje i sučeljavanje stavova, stručne diskusije eksperata iz struke i prakse i iz naučno-istraživačkih institucija i inovativnih centara. Naime, otvorena razmena njihovih mišljenja i iskustava, po pitanjima strateškog razvoja i opredeljivanja za nove tehnologije može doprineti iznalaženju adekvatnih i optimalnih tehničko-tehnoloških, pravno-ekonomskih i organizaciono-poslovnih odgovora na sve izazove dekarbonizacije, digitalizacije i tranzicije elektroenergetike ka održivom razvoju.

U ime Uredništva,

Dr Vladimir Šiljkut
Glavni i odgovorni urednik

KATEGORIZACIJA (RANGIRANJE) RUKOPISA

Prilikom pregleda rukopisa i popunjavanja izveštaja o tome, recenzenti predlažu, a Uredništvo – u slučaju prihvatanja rukopisa za objavljivanje – utvrđuje njegovu kategoriju (rang). Kategorizacija (rangiranje) rukopisa vrši se prema *Pravilniku o kategorizaciji i rangiranju naučnih časopisa* („Službeni glasnik RS”, br. 159 od 30. 12. 2020) i ovde priloženoj tabeli:

Naučni članci:	
Originalni/izvorni naučno-istraživački rad	Rad u kome se iznose prethodno neobjavljivani rezultati sopstvenih istraživanja naučnim metodom
Pregledni rad	Rad koji sadrži originalan, detaljan i kritički prikaz istraživačkog problema ili područja u kome je autor ostvario određeni doprinos
Kratko ili prethodno saopštenje	Originalni naučni rad punog formata, ali manjeg obima ili preliminarog karaktera
Naučna kritika, odnosno polemika i osvrti	Rasprava na određenu naučnu temu zasnovana isključivo na naučnoj argumentaciji i korišćenjem naučne metodologije
Stručni članci:	
Stručni rad	Prilog u kome se nude iskustva korisna za unapređenje profesionalne prakse, ali koja nisu nužno zasnovana na naučnom metodu
Informativni prilog	Uvodnik, komentar i sl.
Prikaz	Prikaz knjige, računarskog programa, slučaja, naučnog događaja i sl.
Stručna kritika, odnosno polemika i osvrti	Rasprava/diskusija na određenu stručnu temu

Prvi A. Autor¹, Drugi B. Autor², Treći V. Autor³, ...



Uputstvo za pripremu radova - naslov rada

(NE VIŠE OD ČETIRI REDA)

¹ Afiliacija prvog autora - institucija, grad, zemlja*

² Afiliacija drugog autora - institucija, grad, zemlja (ako se razlikuje od 1)

³ Afiliacija trećeg autora - institucija, grad, zemlja (ako se razlikuje od 1,2)

...

Kategorija rada: (unosi Redakcija)

UDK: (unosi Redakcija)

Ključne poruke

- U najviše četiri kratke stavke/*bullets* treba izložiti ključne aspekte i poruke rada
- Rečenice ovih stavki moraju biti kratke, jezgrovite, pomoćni glagoli mogu biti izostavljeni
- Npr: Uputstvom sagledani struktura i oblikovanje rada za publikovanje

Kratak sadržaj

Kratak sadržaj rada treba da sadrži sažet opis problema, primenjene metode i zaključke. On je esencijalni deo rada i treba da bude jasan i koncizan. Kratak sadržaj treba da bude informativan, dajući pregled problematike, postupka i glavnih zaključaka, rezultata i njihovog značaja. Ne treba pisati u prvom licu, ne navoditi reference i jednačine i izbegavati skraćenice. Ne treba da sadrži više od 300 reči (na srpskom) do 350 (na engleskom, uključujući i određene i neodređene članove ispred imenica).

Ključne reči

Navesti do maksimalno šest ključnih reči, odvojenih međusobno zapetama

Primljeno: (unosi Redakcija) Recenzirano: (unosi Redakcija)

Izmenjeno: (unosi Redakcija) Odobreno: (unosi Redakcija)

* Korespondirajući autor: (ime i prezime, telefon)

E - mail:

1. UVOD

U časopisu „Elektroprivreda” se objavljuju kategorisani članci: originalni naučni radovi, prethodna saopštenja, pregledni i stručni radovi iz oblasti elektroprivrede i energetike.

Svi radovi podležu recenziji. Za originalnost rada, kvalitet i verodostojnost rezultata odgovorni su isključivo autori. Predajom rada autori prihvataju sva pravila navedena u ovom uputstvu.

Ovaj dokument sadrži uputstva za pripremu radova. Mole se autori da se u pripremi radova u potpunosti pridržavaju ovog uputstva kako bi se izbegli problemi pri štampanju rada.

Dokument je uzorak za *Microsoft Word* (verzija 7 i viša) i ujedno je i primer željenog izgleda rada. U njemu su sadržane sve potrebne informacije o formatu rada, tipu i veličini fontova, kao i pravila koja objašnjavaju postupke u vezi sa jednačinama, mernim jedinicama, slikama, tabelama i ostalim delovima rada.

Kompletan rad koji sadrži rukopis, tabele, grafikone, crteže, fotografije i puna imena i prezimena autora sa afilijacijama treba dostaviti postavljanjem onlajn na aplikaciju za rukovanje rukopisima, dostupnu na veb-sajtu Časopisa, <https://epijournal.eps.rs/prijava> ili, alternativno, slanjem na imejl adresu: epijournal.editor@eps.rs.

Obim rada je najviše deset strana (ne računajući spisak literature i naslov, ključne poruke, kratak sadržaj i ključne reči na engleskom jeziku), osim u slučajevima preglednih radova i specijalnih izdanja Časopisa sa proširenim nagrađenim radovima sa konferencija, u kom slučaju broj stranica nije ograničen, ali se preporučuje da bude do 16.

Original rada treba da bude prezentovan u formatu A4 (210x297) mm. Tekst rada treba da bude poravnat po obe margine. Sve margine treba da budu podešene na 2 cm. Tekst rada treba da bude urađen sa *single* proredom. Rad može biti napisan na srpskom ili engleskom jeziku. (Uredništvo odlučuje koji radovi će biti prevedeni i na drugi jezik, kako bi bili dostupni što većem skupu čitalaca.) Veličina fonta za pojedine delove teksta je kao u ovom Uputstvu. U radu treba izbegavati celovita matematička izvođenja. Neophodna izvođenja mogu se dati, po potrebi, kao celine, u vidu jednog ili više priloga.

Ovaj dokument može se direktno preuzeti sa web adrese <https://epijournal.eps.rs> i koristiti kao podloga za pripremu rukopisa, jednostavnim unošenjem delova teksta rada na određena mesta u ovom dokumentu.

Preporuka je da tekst rada počne uvodom u kome se formulišu problem i zadatak rada. Daje se pregled i komentar korišćene literature iz navedene oblasti i ukazuje na poziciju i doprinos rada u odnosu na navedenu literaturu.

2. NASLOV POGLAVLJA (na primer: PRIPREMA TEKSTA)

Radi veće jasnoće tekst rada treba podeliti na poglavlja i potpoglavlja. Poglavlja i potpoglavlja treba numerisati arapskim brojevima, potpoglavlja brojevima razdvojenim tačkom. Naslove poglavlja i potpoglavlja od teksta pre i

posle naslova odvojiti jednim praznim redom. Treba izbegavati prelom teksta na naslovu ili podnaslovu u tekstu.

2.1 Nivoi potpoglavlja

Sa potpoglavljima nije poželjno ići niže od drugog nivoa, na primer 2.1, 3.3 i sl.

2.1.1 Treći nivo potpoglavlja. Dozvoljen je samo izuzetno, ukoliko doprinosi metodološkoj i generalnoj jasnoći teksta rada i piše se, kao i naslovi potpoglavlja, boldiranim malim slovima, ali se završavaju tačkom, nakon koje, u nastavku tog reda i pisana normalnim fontom, počinje prva rečenica tog potpoglavlja.

2.2 Pozicioniranje tabela i grafičkih priloga

Tabele, slike i grafici mogu, po potrebi, da budu u jednoj koloni ili preko obe kolone. Sve slike i tabele treba da budu postavljene u tekst blizu, ali nikako ispred, mesta u tekstu na kome se prvi put pominju. Slike i tabele u prilogima treba da budu označene na isti način kao u tekstu rada.

2.3 Prva strana

Na sredini prve strane navodi se naslov rada *bold* slovima veličine 16, tipa *Times New Roman*. Ispod naslova navode se puna imena i prezimena autora slovima veličine 11. Ispod imena i prezimena navode se afilijacije autora, slovima veličine 10. Posle navođenja podataka o autorima, na prvoj strani se navode ključne poruke rada, rezime rada i ključne reči, slovima veličine 11.

Ukoliko je rad pisan i za objavljivanje odobren samo na srpskom jeziku, posle sadržaja opisanog u prethodnom pasusu, u konačnoj verziji rada za publikovanje navode se i naslov rada, ključne poruke, rezime rada i ključne reči na engleskom jeziku.

Ukoliko je rad pisan na engleskom jeziku i odobren za objavljivanje, u celosti se prevodi i objavljuje i na srpskom jeziku, u identičnom formatiranju.

Ukoliko je rad pisan na srpskom jeziku i odobren za objavljivanje na oba jezika, u celosti se prevodi i objavljuje i na engleskom, u identičnom formatiranju.

U donjem levom uglu prve strane treba dati pune podatke potrebne za ostvarenje kontakta sa prvim autorom rada.

Sve ovo se jednostavno realizuje korišćenjem datog modela prve strane jednostavnim unošenjem predviđenog teksta na za to predviđena mesta u Uputstvu.

2.4 Podnaslov (na primer: Tekst rada)

Tekst rada se jednostavno unosi umesto teksta uputstva u ovaj format unošenjem ili kopiranjem delova teksta koji su urađeni u skladu sa ovim uputstvom na za to predviđena mesta u uputstvu.

2.5 Jednačine

Jednačine treba postaviti na sredinu teksta i numerisati ih arapskim brojevima u malim (okruglim) zagradama uz

desnu marginu teksta. Za jednačine treba koristiti matematički softver (*Microsoft Equation Editor for MS Word* ili *MathType*). Na primer:

$$I_F = I_B = -I_C = \frac{-J\sqrt{3}E_A}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

Jednačine treba odvojiti od teksta pre i teksta posle razmakom od 6 pointa. Simboli koji se koriste u jednačini moraju biti definisani pre nego što se pojave u jednačini ili neposredno posle jednačine. Pozivanje na neku jednačinu u tekstu vrši se navođenjem broja jednačine u maloj zagradi (1). Ako se rečenica počinje pozivom na jednačinu tada koristiti „Jednačina (1) je ...”.

2.6 Tabele

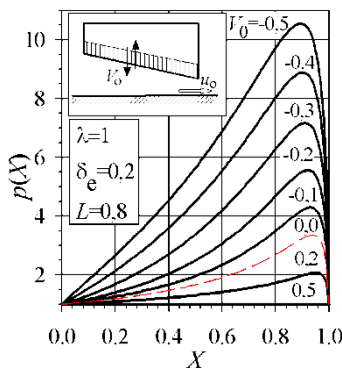
Tabele treba da budu ubačene u tekst na mestima gde se prvi put pominju ili neposredno posle. Treba da budu označene rimskim brojevima, a broj i naziv tabele treba da budu iznad tabele. Na primer:

Tabela I Trajanje simulacija i zauzeće memorije

ISCAS kolo	CPU vreme [s]	zauzeće memorije [MB]
c17	2	3.9
c432	62	68.7
c880	160	152.6
c1355	283	178.8

2.7 Slike

Slike treba da budu brižljivo pripremljene i unesene u tekst na predviđeno mesto. Broj i naziv slike moraju biti ispod slike. Brojeve slika označavati arapskim brojevima. Radi boljeg razumevanja izbegavati prekomerne informacije na slikama. Svi komentari koji se odnose na slike treba da se nalaze u zaglavlju. Kucane oznake treba da budu izabrane pažljivo da bi se obezbedila jasnoća. Pokušati da se ose na slikama opišu i rečima, ne samo simbolima. Na primer, bolje je napisati **vreme t**, nego samo **t**. Oznake za merne jedinice treba staviti u zagrade.



Slika 1. Opis slike

3. ZAKLJUČAK

Iako zaključak treba da sadrži pregled ključnih rezultata rada, u njemu ne treba ponavljati deo naveden u kratkom sadržaju. Zaključak može da objasni značaj rada ili predloži moguće primene ostvarenih rezultata i da smernice za dalja istraživanja problematike tretirane u radu.

ZAHVALNICA

Zahvalnice za sponzorstvo, finansiranje ili pomoć u radu, ako ih ima, treba da budu kao poseban, nenumerisan deo pre spiska literature. U naslovu koristiti jedninu i kada ima više zahvalnica.

LITERATURA

Spisak korišćene literature treba da bude na kraju rada u posebnom, nenumerisanom delu. Reference se numerišu arapskim brojevima u srednjim (uglastim) zagradama, po redosledu citiranja u tekstu rada. Pri navođenju obratiti pažnju na to da reference budu tačne i kompletne, tj. da potpuno opisuju izvore podataka.

Sve navedene reference moraju biti direktno citirane u samom tekstu rada navođenjem broja reference u srednjoj (uglastoj) zagradi. Ne ograničavati se samo na navođenje svojih referenci, već navesti i relevantne reference iz posmatrane oblasti.

U nastavku se daju primeri načina navođenja literature: rad objavljen u časopisu [1], knjiga [2], poglavlje u knjizi više autora [3], rad objavljen u zborniku radova sa konferencije [4] i članak preuzet sa veb sajta [5].

- [1] Šiljak D. D, Stipanović D. M, “Robust Stabilization of Nonlinear Systems – the LMI Approach”, *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 6, No. 5, pp. 461-493, 2000.
- [2] Marković Z., „Granična stanja čeličnih konstrukcija prema evrokodu”, Akademska misao, Beograd, 2014.
- [3] Deavours D., “UHF RFID Antennas”, in: Bolić M. (Ed.), *RFID Systems – Research Trends and Challenges*, Ch. 3, Wiley, New York, 2010.
- [4] Ocokoljić G., Živković S., Subotić S., “Aerodynamic Coefficients Determinations for the ATM Model with Lateral Jets Simulation – Experimental and Numerical Methods”, *Proc. 4th International scientific conference on defensive technologies OTEH 2011*, Belgrade, Serbia, pp. 17-22, 6-7 October 2011.
- [5] Vukić B., „Društvene igre za visokopozicionirane poslovne ljude” [Internet]. Beograd; Novi Sad: Adizes Southeast Europe; 2010 [citirano 19.03.2012]. Dostupno na: <http://www.asee.rs/?page=142&oi=69>

DODATAK (PRILOG) 1

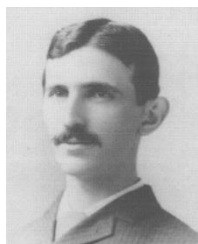
Dodaci, ukoliko su neophodni, treba da budu navedeni posle Literature. Ako ih ima više, treba da budu numerisani arapskim brojevima. U slučaju da prilozi sadrže tabele ili slike, oni se numerišu slovom „A” iza koga sledi tačka i redni broj (i to: za tabele rimski, od „I” nadalje, redom jedinstveno za sve priloge; a za slike arapski, od „1” nadalje, jedinstveno za sve priloge).

Tabela A.I Naziv prve tabele u Prilogu

Zaglavlje	Kolona 1	Kolona 2	Kolona 3	Kolona 4	Kolona 5	Kolona 6	Kolona 7
Red 1							
Red 2							
Red 3							
Red 4							
Red 5							
Red 6							

BIOGRAFIJE

Treba dati kratku biografiju za svakog autora. Početi imenom i prezimenom autora i dati njegovu kratku, pretežno stručnu biografiju. Treba uključiti i fotografiju autora. Primer biografije je dat u nastavku.



Nikola Tesla je rođen u Smiljanu u Austrijskom carstvu, 9. jula 1856. Završio je Austrijsku politehničku školu u Gracu i studirao na Univerzitetu u Pragu. Njegovo radno iskustvo uključivalo je *American Telephone Company*, Budimpešta, *Edison Machine Works*,

Westinghouse Electric Company i *Nikola Tesla Laboratories*. Njegova posebna polja interesovanja su bile oblasti visokih frekvencija. Tesla je dobio počasne diplome od institucija visokog obrazovanja uključujući Univerzitet

DODATAK (PRILOG) 2

U zavisnosti od njihovog sadržaja, prilozi mogu biti formatirani dvostubačno ili jednostubačno. U slučaju kada to čitaocu omogućava bolju preglednost, slike i tabele u priložima mogu biti zarotirane ulevo za 90°.

Kolumbija, Univerzitet Jejl, Univerzitet u Beogradu i Univerzitet u Zagrebu. Dobio je medalju *Elliott Cresson* Instituta Frenklin i Edisonovu medalju IEEE. Godine 1956. termin *tesla* (T) je usvojen kao jedinica za gustinu magnetnog fluksa u sistemu MKSA. Godine 1975. Elektroenergetsko društvo (*Power Engineering Society*) je ustanovilo nagradu Nikola Tesla u njegovu čast. Tesla je preminuo 7. januara 1943. godine.

Autori su obavezni da Redakciji časopisa prilikom dostave rada dostave i potpisanu izjavu o autorstvu i originalnosti rukopisa, čiji se obrazac može preuzeti sa sajta Časopisa, <https://epijournal.eps.rs>.

First A. Author¹, Second B. Author², Third C. Author³, ...



Instructions for the preparation of article - the title of the article

(NOT MORE THAN FOUR LINES)

¹ Affiliation of the first author - institution, city, country*

² Affiliation of the second author - institution, city, country (if differs from 1)

³ Affiliation of the third author - institution, city, country (if differs from 1, 2)

...

Category of article: (Editor's input)

UDK: (Editor's input)

Highlights

- Key aspects and messages of the work should be presented in a maximum of four short items/bullets
- The sentences of these items must be short, concise, auxiliary verbs can be omitted
- E.g.: The structure and design of work for publication are considered by the instruction

Abstract

The Abstract of the article should contain a concise description of the problem, applied methods and conclusions. It is an essential part of the article and should be clear and concise. The Abstract should be informative, giving an overview of the issues, the procedure and the main conclusions, results and their significance. Do not write in the first person, do not list references and equations, and avoid abbreviations. It should not contain more than 300 words (in Serbian) to 350 (in English, including definite and indefinite articles before nouns).

Keywords

Specify up to six keywords, separated by commas

Received: (Editor's input) Reviewed: (Editor's input)

Modified: (Editor's input) Accepted: (Editor's input)

*Corresponding author: (name, phone)

E - mail:



