

ISSN 0354-8651

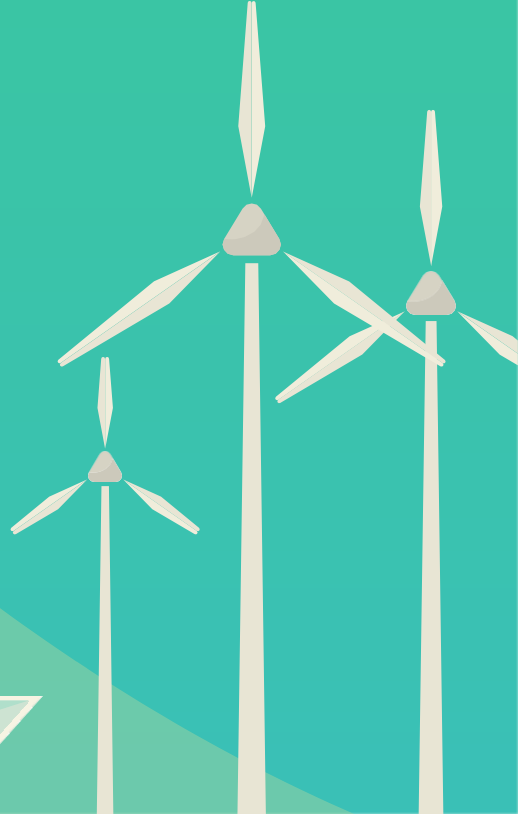


List Saveza energetičara

Broj 4 / Godina XXVI / Decembar 2024.

energija

| ekonomija | ekologija



e3e3

Energija / Ekonomija / Ekologija

Broj 4, Decembar 2024

Izdavač:

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

Suizdavači:

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

Predsednik Saveza energetičara:

prof. dr Nikola Rajaković

Predsednik Skupštine Saveza energetičara:

prof. dr Milun Babić

Glavni i odgovorni urednik:

prof. dr Dušan Gordić, Fakultet inženjerskih nauka, Kragujevac

Uređivački odbor i izdavački savet:

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

Priprema, tehnička i jezička obrada:

Savez energetičara

Štamparija:

Mašinac, Kragujevac

Tiraž:

100

UDK

620.9
338:620.9
502:620.9

COBISS.SR-ID 108696839

Časopis izlazi četiri puta godišnje

*Radovi su recenzirani uz tehničku obradu.
Nijedan deo ove publikacije ne može biti
reprodukovano, presnimavano ili prenošeno bez
prethodne saglasnosti Izdavača.*

Sadržaj

- [01] Mladen APOSTOLOVIĆ, Miroslav DIVČIĆ, Marijan RANČIĆ, Risto VASILJEVIĆ
Izbor odgovarajućih vrsti greške prognoze za adekvatnu procenu uspešnosti operativnog planiranja proizvodnje iz različitih tipova obnovljivih izvora energije / Selection of Appropriate Types of Forecast Errors for Adequate Assessment of Operational Planning Accuracy of the Production from Different Types of Renewable Energy Sources
- [11] Dunja GRUJIĆ, Miloš KUZMAN, Željko ĐURIŠIĆ
Upotreba cenovnih signala u cilju ubrzanja energetske tranzicije / The Use of Price Signals to Accelerate the Energy Transition
- [19] Mladen JOSIJEVIĆ, Vanja ŠUŠTERŠIĆ, Vladimir VUKAŠINOVIĆ, Dušan GORDIĆ, Dubravka ŽIVKOVIĆ, Jelena NIKOLIĆ
Korišćenje otpadne toplote u prehrambenoj industriji primenom kompresorske toplotne pumpe / Utilisation of Waste Heat in the Food Industry with a Compressor Heat Pump
- [26] NIKOLA Stanković
Analiza emisije zagađujućih materija u vazduh iz termoelektrana „Nikola Tesla A“ i „Nikola Tesla B“ / Analysis of the Emission of Pollutants into the Air from "Nikola Tesla A" and "Nikola Tesla B" Thermal Power Plants
- [36] Miroslav ŽERAJIĆ, Todor ŠILJEGOVIĆ, Pavle GORAŠEVIĆ, Đorđe LAZOVIĆ, Bojana ŠKRBIĆ, Željko ĐURIŠIĆ
Mogućnosti učešća OIE u regulaciji napona u prenosnoj mreži Srbije / Possibilities of RES Participation in Voltage Control in the Transmission Grid of Serbia

- [43] Neša RAŠIĆ, Aleksandra GRUJIĆ, Ivana VLAJIĆ NAUMOVSKA, Milan IVEZIĆ, Milan BEBIĆ
Regulisani pogon radnog elementa bagera vedričara ERs710 /
Regulated Drive of Working Element of Bucket-Chain Excavator ERs710

- [50] Mina STEFANOVIĆ, Iva BATIĆ, Tomislav RAJIĆ
Metode odabira kablova u okviru vetroparka uz pomoć softvera / The
Cable Selection Methods in Wind Farms Using Software

- [56] Miloš JEČMENICA, Nikola GRBIĆ
Od ideje do realizacije vetroparka – Pregled administrativne
procedure i zakonske regulative u Republici Srbiji / From the Idea to
the Realization of the Wind Farm – Overview of the Administrative
Procedure and Legal Regulations in the Republic of Serbia

- [68] Željko V. DESPOTOVIĆ, Vladimir KVRGIĆ
Realizacija sistema za ispitivanje kompresorskih motora specijalne
namene baziranog na primeni frekventno regulisanog
elektromotornog pogona / Realization of a System for Testing Special-
Purpose Compressor Motors Based on the Application of a Frequency
Controlled AC Drive

- [74] Petar NIKOLIĆ, Dragan MARINOVIĆ, Bojan RAKIĆ, Goran I. JOVANOVIĆ,
Žarko NESTOROVIC
Određivanje lančaniće nadzemnih strujnih vodova primenom
geodetskih metoda merenja / Determining the Catenary of Overhead
Power Lines Using Geodetic Measurement Methods

Izbor odgovarajućih vrsti greške prognoze za adekvatnu procenu uspešnosti operativnog planiranja proizvodnje iz različitih tipova obnovljivih izvora energije

Mladen Apostolović*, Miroslav Divčić**, Marijan Rančić***, Risto Vasiljević*

* EFT Trade d.o.o., Beograd, Srbija

** ERS male hidroelektrane d.o.o., Foča, Bosna i Hercegovina / Republika Srpska

*** New Energy Solutions d.o.o., Beograd, Srbija

Rezime - Prognoziranje proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora predstavlja veliki izazov proizvođačima, Operatorima sistema za distribuciju i prenos električne energije i trgovcima odnosno otkupljivačima te energije. Operatori sistema se u cilju održavanja sigurnog rada elektroenergetskog sistema u velikoj meri oslanjaju na operativne prognoze proizvodnje samih proizvođača. Većim učešćem obnovljivih izvora energije u ukupnoj proizvodnji, raste interes i važnost što tačnije prognoze proizvodnje iz ovih izvora i sve većeg oslanjanja Operatora sistema na prognoze koje im dostavljaju proizvođači. Poseban izazov u prognozi proizvodnje iz obnovljivih izvora energije čini energija dobijena iz solarnih, vetro i malih protočnih hidroelektrana. Obzirom da izlaskom proizvođača na slobodno tržište ova tema postaje sve aktuelnija, preispituju se, unapređuju i razvijaju različite metode za prognozu proizvodnje i razna sledstvena softverska rešenja. Usporedna analiza i izbor za primenu odgovarajuće metode za (pr)ocenu greške uspešnosti prognoze, upravo je tema ovog rada. Nakon uvodnih razmatranja o značaju adekvatne prognoze proizvodnje iz obnovljivih izvora električne energije, prikazan je način određivanja preciznosti različitih rešenja i dat predlog načina izbora odgovarajućeg merila odnosno vrste grešaka za različite tipove obnovljivih izvora energije. Uz njihove matematičke formulacije, dati su praktični primeri izračunatih različitih merila greške kao što su: standardna devijacija, pristrasnost, srednja apsolutna greška, srednja kvadratna greška, itd., kao i njihove normalizovane procentualne vrednosti. Opisani su uzorci, tok i rezultati obračuna za merenje uspešnosti prognoziranja proizvodnje iz solarnih, vetroelektrana i malih hidroelektrana. Na samom kraju rada su ukratko date napomene o mogućim i potrebnim unapređenjima u cilju bolje što bolje prognoze proizvodnje a i sveobuhvatnije analize različitih vrsti grešaka prognoze.

Ključne reči - obnovljivi izvori, proizvodnja, prognoza, greška, tačnost, odstupanje

I UVOD

Znatno izmenjene tržišne okolnosti u poslednjih nekoliko godina, a koje su se pre svega ogledale u značajnom povećanju cena električne energije, uslovalo je da veliki broj elektrana, pre svega malih priključenih na distributivnu mrežu, napusti razne vrste podsticaja i da izađe na tržište. U tom procesu je jedna stvar presudno uticala na povećanje značaja planiranja i prognoze proizvedene električne energije, a to je činjenica da se,

u generalizovanom slučaju, kada bi proizvođač bio samostalni učesnik na tržištu i (finansijski) balansno odgovoran za svoja odstupanja, u „jednačini“ njegove cene se pojavljuje i trošak debalansa. Debalans predstavlja odstupanje ostvarene proizvodnje u satnoj (perspektivno u 15-ominutnoj rezoluciji) od njene planirane ili tačnije rečeno za predmet ovog rada - prognozirane vrednosti. Ovo odstupanje će se za potrebe ovog rada nazivati još i greška (eng. *error*) prognoze. Ako je ostvarena proizvodnja veća od prognozirane, debalans je pozitivan i za taj višak će proizvođač dobiti neki novac od Operatora balansnog tržišta, ali po pravilu po ceni manjoj od berzanske cene (pa se javlja oportunitetni trošak). Ukoliko je ostvarena proizvodnja manja od prognozirane, debalans je negativan i za taj manjak će proizvođač morati da plati Operatoru balansnog tržišta neki novac, ali po pravilu po ceni većoj od berzanske. Postoji nekoliko načina za fer i transparentno određivanje, obračunavanje i raspodelu ovih troškova debalansa koji su prikazani u [1]. Upravo su ovi najdirektniji mogući cenovni signali uslovlili da se prognozi proizvodnje pristupi na jedan mnogo ozbiljniji i detaljniji način, a sve zarad smanjenja troškova po osnovu debalansa - a samim tim ostvarivanja većeg prihoda (proizvođača). Ovaj rad se neće baviti mnogobrojnim i različitim modelima prognoze [2] koji su specifični za svaku vrstu izvora, već samo izračunavanjem, ocenom i procenom različitih vrsta grešaka prognoze [3,4], a na samom početku se pojavilo nekoliko izazova koji će ovde biti navedeni.

Dobro razrađene metode za procenu prognoze potrošnje se ovde nisu mogle primeniti zbog specifičnosti elektrana i podataka koji će se analizirati. Potrošnja/konzum ima veliku apsolutnu vrednost, decenije istorijskih podataka i dobro raspoređene i proverene u praksi metode za prognozu. Nasuprot teme, u ovom radu će se razmatrati prognoze proizvodnje iz proizvodnih pogona koji koriste obnovljive izvore energije, konkretno solarne i vetroelektrane i male protočne hidroelektrane. Dimenzije instaliranih kapaciteta su čak više stotina puta manje od snage potrošnje konzumnog područja i samim tim svi relativni odnosi će ovde biti mnogo izraženiji.

Sledeći izazov je intermitentnost analiziranih izvora koja utiče na nepostojanje neke bazne i relativno konstantne vrednosti u odnosu na koje se promene tj. odstupanja dešavaju. Intermitentni (povremeni i varijabilni) izvor energije je svaki onaj izvor koji nije neprekidno dostupan zbog nekog činioca na koji se ne može direktno uticati. Ovi izvori mogu samo donekle biti predvidljivi,

a uglavnom zavise od hidro-meteoroloških prilika pa se prognoza njihove odate snage (i proizvedene električne energije) u stvari zasniva na prognozi vremenskih uslova odnosno većem broju parametara koji tu prognozu čine kao što su padavine (kiša i sneg), oblačnost, intenzitet solarne iradijacije, ambijentalna temperatura, brzina i smer vetra, itd., kao i određenom broju tehničkih parametara koji definišu rad same elektrane (tehnička dostupnost, kriva snage, itd.).

Pored intermitentnosti, tokom perioda dostupnosti primarnog izvora energije (sunce, vetar, voda) ovi izvori su i uglavnom neupravljivi (eng. *non-dispatchable*), odnosno nedovoljno upravljivi jer im se dominantno može samo prigušivati tj. smanjivati izlazna snaga, dok su mogućnosti povećanja snage svedene na mogućnosti samo kratkotrajnog povećanja u svrhu stabilizacije frekvencije (vetrogeneratori sa modulima za kontrolu inercije (eng. *synthetic inertia*)). Upravljivost ne treba mešati sa mogućnošću povećanja faktora iskorišćenja primarnog izvora, npr. kod solarnih elektrana zakretanjem panela tokom dana – ali samo kod onih koje su već konstruisane sa treker sistemima a kod vetroelektrana zakretanjem celih turbina nasuprot smeru vetra, kao i lopatica turbine. Zbog prethodno navedenih osobina, ovde se radi o prognozi (eng. *forecast*) a ne o planiranju proizvodnje jer ovi izvori po svojoj prirodi ne mogu da prate i ostvaruju ranije utvrđen zadati plan.

Poslednji izazov koji je uspešno savladan je bila nedovoljna raspoloživost parova podataka potrebnih za analize, pre svega prognoza, ali ponegde i ostvarene proizvodnje u odgovarajućoj (satnoj) rezoluciji ali su autori uspeali da prikupe reprezentativan broj uzoraka sa odgovarajućim podacima potrebnim za predmetne analize. Ulazni podaci o satnim ostvarenim proizvodnjama i njihovim prognozama za tri tipa obnovljivih izvora: solarne i vetroelektrane i male protočne hidroelektrane su pribavljeni za više desetina realnih elektrana iz nekoliko zemalja u regionu. Ovi podaci su prikupljeni, obrađeni i verifikovani (uz korigovanje uočenih grešaka merenja), zatim je obavljeno njihovo svodenje na istu instalisanu snagu od po 50MW za svaki tip izvora posebno, a što je učinjeno radi omogućavanja međusobnog poređenja različitih izvora ali i zbog zaštite poverljivosti podataka koju su prikupljeni sa realnih elektrana iz regiona za prethodne dve godine (2022. i 2023.).

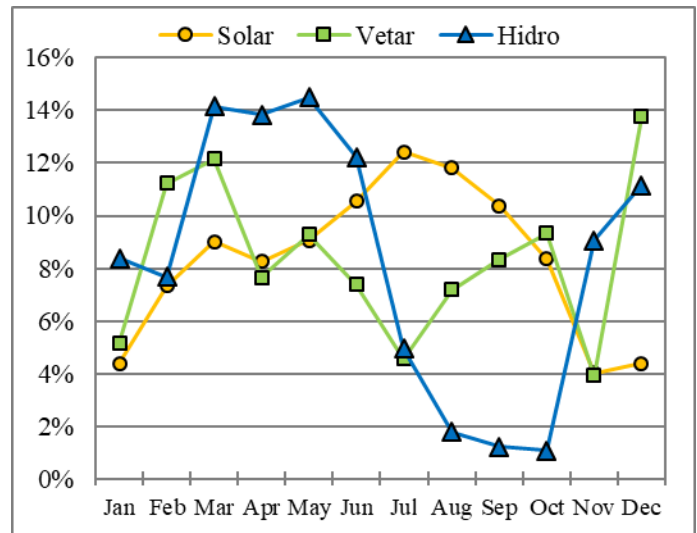
U radu će u narednim poglavljima biti obrađene sledeće teme:

- definisanje osnovnih vrsta grešaka koje će biti korišćene:
 - o proširenje i modifikacija pojedinih formula radi njihovog prilagođavanja specifičnostima, pre svega solara i vetra,
 - o filtriranje prikupljenih podataka odnosno izbor podskupa na kojem se rade analize,
- računanje i uporedni tabelarni i grafički prikaz izabranih vrsta grešaka,
- izbor najpogodnije vrste greške za poređenje prognoze različitih izvora,
- naglašavanje specifičnosti prognoze i računanja grešaka za pojedine izvore,
- zaključak i otvorene stavke za moguće dalje i/ili dublje analize.

II ENERGETSKO-PROIZVODNE KARAKTERISTIKE RAZMATRANIH SKUPOVA ELEKTRANA

Radi boljeg uvida u sezonalnost proizvodnje različitih tipova elektrana, na Slici 1 je prikazana mesečna raspodela proizvodnje elektrana po tipovima. Pored ovoga, u Tabeli 1 su prikazani dodatni podaci koji i nisu od nekog prevelikog značaja za predmetne analize u ovom radu, ali su autori smatrali da je korisno da se uporedo navedu radi boljeg uporednog sagledavanja osobina razmatranih primarnih izvora energije i to:

- koeficijent iskorišćenja instalisane snage, *Kiis* [%] (eng. *capacity utilization factor* - CUF), koji predstavlja odnos stvarno proizvedene električne energije i one koja bi se u tom posmatranom vremenskom periodu mogla proizvesti da je elektrana sve vreme radila punom tj. instalisanom snagom;
- broj sati (ekvivalentnog) punog opterećenja [h] (eng. *full load hours* - FLH), koji se dobija kada se prethodno definisani koeficijent iskorišćenja pomnoži sa ukupnim brojem sati u posmatranom vremenskom periodu i sasvim je analogan prethodnom osim što se izražava u drugim mernim jedinicama.



Slika 1. Raspodela godišnje proizvodnje po mesecima u 2023.

Koeficijent iskorišćenja se u praksi svodi na određeni procenat (manji od 100%) koji zavisi od primenjene tehnologije i vrste primarnog izvora energije koji se transformiše u električnu. Posmatrano na godišnjem nivou, za termoelektrane ovaj koeficijent iznosi preko 80%, a u našem regionu za male protočne hidroelektrane 45–60%, vetroelektrane 25–30% i solarne elektrane 14–20%.

Za vetroelektrane je specifično da oko 25% vremena godišnje ne mogu da rade jer je brzina vetra manja od minimalno potrebne, a oko 5% vremena jer je veća od maksimalno dozvoljene.

Za solarne elektrane je specifično da primarnog izvora energije (sunčevog zračenja tj. iradijacije) sigurno nema bar 40% vremena godišnje, a prvih 5-6 i poslednja 3-4 sata nema tokom cele godine.

I za vetru i za solarne elektrane je zajedničko da tokom godine obavezno i redovno postoji određeni deo vremena kada primarni

izvor energije nije uopšte dostupan (istini za volju ovo važi i za hidro, ali mnogo ređe i to u ekstremno sušnim letnjim mesecima). Zato je i zanimljivo i korisno izračunati ovaj koeficijent samo za onaj period kada elektrane proizvode i on će biti označen sa $Kiis(m)$.

Sa M je označen ukupan broj vremenskih intervala tj. sati u posmatranom periodu za koji se radi analiza greške ($M = 8760$ h godišnje), dok je m broj vremenskih intervala tj. broj "radnih sati" elektrane. Za potrebe ovog rada računaju se sati u kojima su ostvarena ili prognozirana proizvodnja različite od nule. Ovakva definicija proizilazi iz činjenice da se može desiti da je u nekom satu ostvarena proizvodnja jednaka nuli, ali da za taj sat postoji prognoza - pa samim tim i greška koja treba da se uvaži u analizi.

Tabela 1. Koeficijenti iskorišćenja i broj radnih sati u 2023.

Mesec	Solar			Vetar			Hidro		
	$Kiis$ [%]	m [h]	$Kiis(m)$ [%]	$Kiis$ [%]	m [h]	$Kiis(m)$ [%]	$Kiis$ [%]	m [h]	$Kiis(m)$ [%]
Jan	9	330	20	17	570	23	46	744	46
Feb	16	335	32	42	643	44	27	672	27
Mar	18	398	33	41	711	43	25	743	25
Apr	17	432	28	27	690	28	78	720	78
May	18	481	28	31	732	32	43	744	43
Jun	21	481	32	26	674	27	18	720	18
Jul	25	496	37	15	618	18	4	615	4
Aug	23	472	37	24	687	26	9	622	11
Sep	21	401	38	29	682	31	14	720	14
Oct	16	373	33	31	739	32	6	745	6
Nov	8	323	18	14	576	17	28	720	28
Dec	9	315	20	46	683	50	58	744	58
Godina	17	4837	30	29	8005	31	30	8509	30

III DEFINICIJE, OSOBINE I KOMPARATIVNA ANALIZA RAZLIČITIH VRSTI GREŠAKA, ODNOSNO PROMAŠAJA PROGNOZE

Skoro svi novi prognostičarski modeli, odnosno komercijalni softveri koji ih koriste, u većini slučajeva imaju implementirane proverene metode (algoritme) mašinskog učenja, dok su modeli koji su bazirani na veštačkoj inteligenciji u manjini. Ovi algoritmi koriste istorijske podatke o ostvarenoj proizvodnji kako bi našli što tačnije formule koje povezuju hidrometrološke prognoze sa iznosom očekivane proizvodnje. Ovom prilikom, ti algoritmi rade optimizaciju odnosno minimizaciju neke od grešaka prognoze i to samo jedne. Upravo zbog ovog razloga je veoma bitna osnovna tema ovog rada, a to je izbor adekvatne greške prognoze za pojedini vrstu izvora, a koja će se pomenutim algoritmima minimizirati. Što se tiče komercijalnih softvera, moguće je da korisnik izabere samo jednu vrstu greške za minimizaciju. Međutim, što se tiče samih analiza (pa i uporednih) grešaka, može se desiti, a i dešava se, da neka kombinacija grešaka daje bolju sliku o, i uvid u, tačnost neke

prognoze. Novi trendovi koji su se proširili među pružiocima usluga prognoze tokom prethodne godine su upravo usmereni ka ovome. Radi se na kombinovanju više prognostičarskih modela (ili više različitih prognoza različitih pružalaca usluga) uz vrednovanje svakog od njih odgovarajućim težinskim faktorom. Primera radi, dobra metoda sa malom greškom koja po malo ali konstantno "podbacuje" u prognozi, može se dodatno poboljšati kombinovanjem sa nešto lošijom metodom ali koja konstantno po malo "prebacuje" u prognozi, naravno uz uvažavanje odgovarajućih težinskih faktora za svaku od njih u konačnoj prognozi.

Vrste grešaka prognoze koje će biti razmatrane u ovom radu su široko rasprostranjene u praktičnoj upotrebi, pre svega prognostičarskih softvera, a ovde će biti navedene kako njihove matematičke definicije, tako i pojedine osobenosti, a sve kako bi se napravila jasna razlika između sličnih ali i kvalifikovale i diskvalifikovale za potrebe analiza u ovom radu. Obradene osnovne greške se koriste u sličnoj problematici u statističkoj analizi kada treba utvrditi nivo odstupanja jedne pojave od druge tokom nekog vremenskog period (vremenske serije) ili konkretno za problematiku ovog rada, odstupanje prognozirane proizvodnje (koju izrađuje prognostičarski softver) od ostvarene proizvodnje.

Za sve formule u ovom radu će se koristiti sledeće oznake:

- F_t – prognozirana proizvodnja za vremenski interval t , u ovom radu jedan sat (preciznije bi bilo napisati Δt jer se radi o vremenskom intervalu, a ne o jednom trenutku u vremenu, ali je usvojena oznaka t i radi preglednosti, a i jer se ova skraćena varijanta češće koristi u literaturi).
- A_t – ostvarena proizvodnja u satu "t".
- $\bar{A}_t = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M (A_t)$ – aritmetička sredina (prosek) svih ostvarenih proizvodnji u svim (razmatranim) satima.
- $\bar{F}_t = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M (F_t)$ – aritmetička sredina (prosek) svih prognoziranih proizvodnji u svim (razmatranim) satima.
- $E_t = (A_t - F_t)$ – odstupanje ostvarene od prognozirane proizvodnje, greška prognoze - promašaj.
- $\bar{E}_t = \frac{1}{M} \sum_{t=1}^M (E_t)$ – aritmetička sredina (prosek) svih grešaka prognoze u razmatranim satima.

Slede definicije i komentarisanje različitih vrsta grešaka prognoze.

III-1. Standardna devijacija greške prognoze, $Sdev$

$$Sdev = \sigma = \sqrt{\frac{1}{M} \cdot \sum_{t=1}^M (E_t - \bar{E}_t)^2} \quad (1)$$

Kao što se može primetiti iz same formule, standardna devijacija prikazuje prosečno odstupanje svakog pojedinačnog podatka u vremenskom nizu (seriji) od aritmetičke sredine svih podataka. Da bi se osnovna formula standardne devijacije primenila na predmetnu problematiku, posmatraće se numerička (vremenska) serija grupisanih grešaka tj. distribucija frekvencije grešaka, odnosno razlika između ostvarenja i prognoze. Distribucija frekvencije grešaka predstavlja način uređenja serije podataka gde se podaci prikazuju rastući, a frekvencija predstavlja njihov broj pojavljivanja u seriji. Stoga u ovom slučaju standardna devijacija je mera varijabiliteta greške. U ovom slučaju standardna devijacija greške predstavlja prosečno odstupanje

svake individualne greške u svakom satu od prosečne vrednosti greške u celom posmatranom periodu. Standardna devijacija se izražava u istoj jedinici mere kao i posmatrana vremenska serija podataka.

III-2. Pristrasnost, B

Statistički, pristrasnost (eng. *bias*) se definiše kao razlika između pojave koja se procenjuje i matematičkog očekivanja prognozero. Najjednostavnije rečeno, B predstavlja tendenciju kretanja grešaka između prognozirane i ostvarene proizvodnje. Ako je negativna, to znači da prognoza “prebacuje” a ako je pozitivna onda “podbacuje”. Ovo je jedino merilo greške koje daje ovu informaciju, pa ga je poželjno koristiti paralelno sa drugim vrstama grešaka. Prosečna pristrasnost, MB (eng. *mean bias*) se računa po sledećoj formuli:

$$MB = \frac{1}{M} \cdot \sum_{t=1}^M (A_t - F_t) \quad (2)$$

pokazuje tendenciju kretanja promašaja prognoza, tj. da li smo u proseku više grešili u plus (pozitivni debalans) ili u minus (negativni debalans).

Prosečna pristrasnost se obično koristi kao dodatni pokazatelj tendencije (pristrasnosti) grešaka softvera tj. kao dopuna uz druge vrste grešaka za njihovo adekvatnije tumačenje. Ostale metode računanja grešaka nam ne daju ovaj podatak, da li softver i koliko u proseku (u nominalnim vrednostima) greši „nagore“ ili „nadole“ od realizovane proizvodnje.

Nedostatak prosečne pristrasnosti je što sam rezultat ne daje smernice ni indikacije koliko su velike greške koje softver pravi prilikom planiranja pojedinačnih sati. Naime u jednom satu / danu greška softvera može biti nominalno velika u pozitivnom smeru, dok u drugom danu može biti nominalno velika u negativnom smeru, a to će se u kalkulaciji prosečne pristrasnosti kompenzovati.

III-3. Srednja apsolutna greška, MAE

Srednja apsolutna greška (srednji apsolutni promašaj), MAE (eng. *mean absolute error*) se računa po sledećoj formuli:

$$MAE = \frac{1}{M} \cdot \sum_{t=1}^M |A_t - F_t| \quad (3)$$

Prednosti korišćenja ove greške su:

- jednostavna je za izračunavanje,
- lako razumljiva – laka interpretacija,
- nema kompenzovanja pozitivnih i negativnih vrednosti jer se koriste apsolutne vrednosti,
- nema “favorizovanja” negativnih (ni pozitivnih) odstupanja,
- manji uticaj ekstremnih vrednosti na rezultat.

Nedostaci korišćenja ove greške su:

- izražena je u jedinici u kojoj se nalazi vremenska serija podataka,
- nema relativnu vrednost tj. nije u izvornom obliku uporediva sa rezultatima na drugim vremenskim serijama (greškama drugih elektrana),
- tretira sa jednakom važnošću i velike i male promašaje.

Problem uporedivosti ove metode računanja greške se može

otклонiti „relativizacijom“ ili “normalizacijom”, a to se može postići primenom:

- srednje apsolutne procentualne greške, $MAPE$ (eng. *mean absolute percentage error*) ili
- srednje normalizovane apsolutne greške, $nMAE$ (eng. *normalized mean absolute error*).

$MAPE$ se računa po sledećoj formuli:

$$MAPE = \frac{1}{M} \cdot \sum_{t=1}^M \frac{|A_t - F_t|}{A_t} \quad (4)$$

Prednosti korišćenja $MAPE$ su:

- relativna greška koja omogućava poređenje rezultata sa drugim serijama (elektranama),
- pošto je svako pojedinačno odstupanje normalizovano sa vrednošću ostvarene proizvodnje, ova greška obuhvata više grešaka u sebi jer se agregacija dešava posle relativizacije.

Nedostaci su:

- podaci u vremenskoj seriji kada je ostvarena proizvodnja nula moraju biti izuzeti iz kalkulacije da bi se izbeglo deljenje sa nulom,
- usled normalizacije svakog podatka sa ostvarenom proizvodnjom u tom satu javljaju se još dva problema:
 - o kada je vrednost ostvarene proizvodnje izuzetno mala, vrednost greške može biti ogromna, i
 - o ova greška pridaje veći značaj negativnim odstupanjima nego pozitivnim, odnosno “favorizuje” negativna odstupanja prilikom proračuna greške.

Usled činjenice da se svako pojedinačno odstupanje ostvarene proizvodnje od njene prognoze relativizuje sa samim ostvarenjem u datom satu, negativna odstupanja (iako sa istim iznosom u apsolutnom iznosu) imaju veći uticaj na ukupnu grešku od pozitivnih odstupanja. Primena ovog modela u praksi prilikom računanja greške softvera za prognozu proizvodnje elektrana pri tržišnom plasmanu tj. ukoliko postoji penalizacija debalansa (balansna odgovornost) može imati osnova. Kada uzmemo u obzir da se obično cene pozitivnog i negativnog debalansa razlikuju, odnosno da su cene negativnog debalansa veće nego cene pozitivnog debalansa, odnosno negativni debalans predstavlja direktan trošak dok pozitivni debalans obično predstavlja direktan prihod (ali oportunitetni trošak!), pa sa tog aspekta primena ovog modela može imati komercijalnu opravdanost u analizi greške koju dati određeni softver pravi.

Ipak, naglašavanje negativnog odstupanja i njegovo favorizovanje može dovesti do pogrešnog zaključka o samoj efikasnosti softvera za prognozu. Naime, ukoliko postoji tendencija većeg apsolutnog odstupanja u pozitivnom smeru, to će biti kvantifikovano manje nego manja odstupanja u negativnom smeru, pa se može desiti da jedan softver, iako ima veću nepreciznost, biti kvantifikovan kao “superiorniji” u odnosu na neki drugi (isti slučaj se može desiti prilikom primene istog softvera na više proizvodnih objekata).

U statistici se normalizacija, odnosno postizanje relativnosti neke mere u odnosu na njenu prethodnu apsolutnost, obično postiže deljenjem vrednosti svake pojedinačne greške sa aritmetičkom sredinom čitave serije podataka. Međutim umesto toga, greška se

može podeliti i nekim drugim normalizacijskim faktorima, NF , a što će veoma detaljno biti objašnjeno u sledećem poglavlju. Za sada ćemo se zadržati samo na osnovnoj definiciji normalizacije iz statistike, pa se dobija sledeća formulu za $nMAE$:

$$nMAE = \frac{MAE}{NF} = \frac{\frac{1}{M} \sum_{t=1}^M |A_t - F_t|}{\frac{1}{M} \sum_{t=1}^M (A_t)} = \frac{\sum_{t=1}^M |A_t - F_t|}{\sum_{t=1}^M (A_t)} \quad (5)$$

Prednosti korišćenja $nMAE$ su:

- $nMAE$ ne zavisi od broja podataka kada je ostvarena proizvodnja ili prognoza jednaka nuli,
- prikazuje prosečno relativno odstupanje prognoze od ostvarenja i može se predstaviti i procentualno.

Nedostaci korišćenja $nMAE$ su:

- pridaje istu važnost i velikim i malim odstupanjima,
- favorizuje negativna odstupanja u odnosu na pozitivna usled deljenja sa sumom ostvarenja.

III-4. Srednja kvadratna greška, $RMSE$

Standardna kvadratna greška ili standardna greška trenda (tj. standardna greška prognoze), $RMSE$ (eng. *root mean square error*), primenjuje se kada je potrebno proceniti koliko je određeni matematički model (funkcija) tačan u procenjivanju kretanja određene pojave kroz vreme (funkcija trenda), a računa se prema formuli:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \cdot \sum_{t=1}^M (A_t - F_t)^2} \quad (6)$$

Standardna greška trenda ima veliku primenu u analizi vremenskih serija, a pošto se kretanje proizvodnje elektrana posmatra u vremenu nalazimo da je njena primenljivost na ovu temu opravdana. Ova greška je linearni izraz (kvadratni koren) prosečne kvadratne greške, slično kao i formula za izračunavanje standardne devijacije. U slučaju standardne devijacije koristi se aritmetička sredina posmatrane serije, dok se primenom $RMSE$ posmatra linearni izraz prosečnog kvadratnog odstupanja svakog podatka prognoziranog proizvodnje za dati sat t sa odgovarajućim podatkom ostvarene proizvodnje za isti taj sat t .

Prednosti korišćenja ove greške:

- lako razumljiva – laka interpretacija,
- nema kompenzovanja pozitivnih i negativnih vrednosti, jer se koriste kvadrati odstupanja,
- favorizuje tj. naglašava veća odstupanja (zbog kvadriranja).

Nedostaci korišćenja ove greške:

- izražena je u jedinici u kojoj se nalazi vremenska serija,
- nema relativnu vrednost, tj. nije uporediva sa rezultatima na drugim serijama, odnosno sa greškama drugih elektrana.

Pomenuti nedostaci primene ove metode računanja greške se mogu otkloniti / ublažiti primenom „normalizacije“, tj. normalizovanjem rezultata ove greške.

Normalizovanjem $RMSE$ postiže se njena uporedivost sa različitim vrstama serija (tj. elektranama različitih instalisanih snaga, različite geografske lokacije, različite vrste proizvodnje električne energije, itd.). Normalizovana standardna greška

trenda, $nRMSE$ (eng. *normalized root mean square error*) računa se kao:

$$nRMSE = \frac{RMSE}{NF} = \frac{\sqrt{\frac{1}{M} \sum_{t=1}^M (A_t - F_t)^2}}{NF} \quad (7)$$

Ako se uzme u obzir da je $RMSE$ greška neobjašnjene varijacije (prognoze sa ostvarenjem), a standardna devijacija greška objašnjene varijacije (varijacija podataka o ostvarenoj proizvodnji u odnosu na aritmetičku sredinu ostvarene proizvodnje), normalizovanje sa standardnom devijacijom ostvarene proizvodnje može da ima smisla. U tom slučaju stavili bismo u odnos neobjašnjene greške sa objašnjenim greškama, te bi taj odnos davao indikaciju koliko je ostvarena proizvodnja predviđena (objašnjena) prognoziranom proizvodnjom.

Koeficijent determinacije govori koliko jedan model za prognoziranje proizvodnje determiniše (objašnjava / predviđa) ostvarenu proizvodnju. On može imati vrednosti od 0 do 1, gde 0 predstavlja potpuno slučajne pogotke, a rezultat 1 pokazuje savršen model. Kombinacijom $RMSE$ i koeficijenta determinacije, dobija se jasnija indikaciju koliko je neki model prognoziranja dobar ili loš.

Obzirom da rezultat sam po sebi bilo u nominalnom ili procentualnom iznosu može voditi ka pogrešnoj interpretaciji, posebna pažnja se posvećuje tumačenju rezultata normalizovane greške prognoze, imajući u vidu primenu centralne granične teoreme koja kaže da sve neprekidne serije podataka sa velikim brojem posmatranja (u praksi se koristi i broj 30 kao granica za primenu) imaju tendenciju rasporeda serije distribucije frekvencija (numeričke serije grupisanih podataka) po Gausovoj (normalnoj) distribuciji (raspodeli).

Sama greška $RMSE$ govori koliko model prognoze u proseku odstupa od ostvarenja u istoj jedinici mere. Interpretacija $RMSE$, kao i svake standardne greške procene nekog posmatranja modela, mora biti u okvirima intervala poverenja. Npr. $RMSE$ koji je jednak 150, govori da model prognoze u proseku greši 150 kWh/h u odnosu na realizaciju. Ali opet i ovo tumačenje treba uzeti sa rezervom. Naime, sam rezultat ne daje nikakvu indikaciju da li je greška velika ili mala, niti koji je smer odstupanja. Tek upoređivanjem ovog rezultata sa podacima, kao što su prosečna snaga po satu ili instalisana snaga posmatrane elektrane, može se dobiti indikacija da li je veličina greške prihvatljiva ili ne. Zbog toga se u praksi sve više koristi normalizovana greška koja se izražava procentualno i koja daje indikaciju koliko prognoza procentualno greši u odnosu na neki pogodno odabrani faktor normalizacije.

III-5 Opšta razmatranja o vrstama grešaka

U ovom radu dat je akcenat na uticaj različitih vrsta normalizacije na rezultate greške kao i potencijalno modifikovanje (prilagođavanje) određenih kriterijuma u svrhu što preciznijeg tumačenja dobijenih rezultata. Pored prethodno navedenih, postoji još veliki broj različitih vrsta grešaka prognoze koje se javljaju u literaturi, ali njihovo razmatranje prevazilazi obim ovog rada. Na osnovu svega prethodno navedenog se može zaključiti da su „klasične“ vrste grešaka i njihove nesvedene i nerelativizovane vrednosti dobre samo za međusobno poređenje različitih prognostičkih modela

primenjenih na istu elektranu - ili u krajnjem slučaju dve i više ali istog tipa, sličnih dimenzija i energetskih karakteristika.

Za poređenje prognoze za elektrane istog tipa ali značajno različitih snaga ili pak različitog tipa, neophodno je njihovo svođenje i pretvaranje u procenete. *MAE* se koncentriše na medijalnu vrednost. *RMSE* se koncentriše na srednju vrednost greške i zbog kvadriranja u formuli daje značajno veću "težinu" većim greškama – što je i cilj prilikom prognoze proizvodnje, jer veće greške impliciraju i veće troškove (bilo direktne ili oportunitetne).

Iz daljeg razmatranja eliminisaće se sve vrste grešaka koje u svojoj definiciji imaju deljenje sa srednjom vrednošću (relativizacija) proizvodnje (kao što je prikazano za standardnu devijaciju ali se npr. odnosi i na *MAD* (eng. *mean absolute deviation*) koji nije razmatran u ovom radu. Drugo, iz analize *MAPE* se može zaključiti da bez dodatnih izmena na izvornoj formuli, nije pogodna za korišćenje za potrebe (uporedne) analize grešaka.

Zaključak svega prethodnog je da je poželjno koristiti *RMSE* ali uz njeno odgovarajuće svođenje na procenete pogodno izabranim parametrom. Izbor odgovarajućeg parametra za svođenje, koji treba da bude u vezi sa tehničkim i eksploatacionim karakteristikama posmatrane elektrane i njenog tipa, predmet je razmatranja u sledećem poglavlju.

IV SVOĐENJE GREŠAKA PROGNOZE NA UPOREDIVE PROCENTUALNE VREDNOSTI

Instalisana snaga elektrane je projektovana vrednost koja predstavlja kapacitet postrojenja u idealnim uslovima i skoro nikada je nije moguće dostići u potpunosti. Za solarne elektrane se razlikuje instalisana snaga panela (DC snaga) i instalisana snaga invertora (AC snaga). U poslednje vreme su investitori shvatili, a relevantni regulatori odobrili, da DC snaga bude veća od AC snage, što je i potrebno i poželjno, prvo za pokrivanje (pre svega termičkih) gubitaka od samih panela do izlaza iz elektrane (tj. do obračunskog mernog mesta), a zatim je ekonomski i opravdano do određenog iznosa, zbog ostvarivanja veće godišnje proizvodnje sa istom AC snagom (koja u velikoj većini slučajeva koincidira sa odobrenom snagom priključka elektrane na mrežu).

Prilagođeni maksimum snage elektrane predstavlja privremeno raspoloživu snagu elektrane, odnosno maksimalnu snagu koja je dostupna u određenom trenutku ili vremenskom periodu. Pored toga što prvenstveno zavisi od pogonske spremnosti elektrane (raspoloživost agregata, invertora, panela, vodova, transformatora, rasklopne opreme, mreže, itd.), prevashodno zavisi prvo od dostupnosti, a zatim i od intenziteta primarnog izvora energije – što naročito dolazi do izražaja kod obnovljivih izvora energije, a kod hidroelektrana zavisi od pada i dotoka.

U ovom radu je pretpostavljeno da je pogonska spremnost svih elektrana i raspoloživost mreža na koje su one priključene jednaka 100% (zbog nedostupnosti relevantnih podataka), što naravno nije u potpunosti tačno ali su autori smatrali da je ovo dovoljno dobra pretpostavka za predmetne analize.

Postoje veoma velike razlike u dostupnosti primarnog izvora energije, kako na dnevnom odnosno satnom, tako i na mesečnom

i sezonskom nivou. Na primer, sunca nema bar devet sati dnevno tokom cele godine, naleti vetra koji se posebno tokom letnjih meseci manifestuju naglim promenama brzine vetra, a svi ovi izvori su sezonski osetljivi po količini raspoloživog resursa, a sunce i voda i po intenzitetu odnosno maksimalnoj raspoloživosti resursa. Ovo je više nego očigledno na primeru solarnih elektrana koje tokom zimske sezone dostižu tek između 50-70% instalisane snage. Stoga je u ovom radu uveden jedan novi način izračunavanja raspoložive snage iz dostupnih podataka o proizvodnji, a koji će detaljno biti opisan kada se budu računale greške prognoze.

Više je nego očigledno da zbog velikog opsega instalisanih snaga pojedinačnih elektrana, bilo koja vrsta apsolutne greške nije pogodna za korišćenje, jer ne mogu da se porede međusobno zbog mogućeg različitog reda veličina instalisanih snaga, od stotina kW malih solara, do stotina MW vetroparkova. Zato je od veoma velike važnosti izbor snage za „normalizaciju“ (svođenje, „relativizaciju“) grešaka.

Kao što je ranije već rečeno, aritmetička sredina nije jedini kriterijum koji se može primeniti za „normalizaciju“. Da bi se rasvetlila prethodno opisana problematika, poređiće se svedene (normalizovane) vrednosti izabranih grešaka sa više vrednosti svođenja (tj. normalizacijskih faktora - *NF*) i to deljenjem osnovnih vrsti grešaka (*MAE* i *RMSE*) sa:

- instalisanom snagom elektrane, što je DC snaga kod solarnih elektrana,
- odobrenom snagom priključka, što je AC snaga kod solarnih elektrana, a za ostale ćemo smatrati da je jednaka instalisanoj snazi,
- jednokratno maksimalnom ostvarenom snagom u "periodu posmatranja" tj. periodu u kome računamo grešku,
- relativnim maksimumom snage, koji se izračunava množenjem jednokratno maksimalne snage, ali ne pod c) već one koja je zabeležena tokom cele godine *M*, i odnosom mesečne i celogodišnje ostvarene proizvodnje,
- prilagođenim maksimumom snage, odnosno realno raspoloživom snagom u "periodu posmatranja", tj. periodu u kome se računa greška,
- aritmetičkom sredinom ostvarene proizvodnje (srednja tj. prosečna vrednost snage) u "periodu posmatranja" tj. periodu u kome se računa greška, po izvornoj definiciji.

Za varijantu normalizacije pod f), mogu se sprovesti i sledeće podvrste proračuna vrednosti normalizacije:

- samo za sate *m* kada je elektrana proizvodila (ovo je uticajno za solar i za vetar, a za hidro samo u letnjim tj. ekstremno sušnim mesecima) i
- za sve sate *M* tokom "perioda posmatranja" odnosno perioda u kome se računa greška.

Prilagođeni maksimum snage, naveden u prethodnom nabrojanju pod e), predstavlja posebnu vrstu kriterijuma za normalizovanje greške prognoze, a odnosi se na određivanje realnog maksimuma za određeni period posmatranja date elektrane, uprosečavanjem vrednosti ostvarene proizvodnje po pojedinim satima, a zatim utvrđivanjem njihovog maksimuma. Naime, kao što je poznato i više puta pomenuto, pre svega solarne i hidro, a donekle i vetrolektrane, ne mogu da rade svojim punim kapacitetom u

svim periodima tokom godine, pa stoga nije primenljivo uzimati u obzir prilikom normalizovanja maksimalnu vrednost snage po satu (proizvodnje) koju elektrana može realizovati (instalirana/odobrena snaga) tokom cele godine, nego je potrebno odrediti realn(i)je maksimume po svakom posmatranom periodu (najmanje mesečnom, kao što je učinjeno u ovom radu).

Uobičajeno je, naročito u prognostičarskim softverima, korišćenje instalirane ili klasične raspoložive snage za ovu normalizaciju, a koje se ne preporučuje upravo zbog prethodno navedenih razloga različite sezone, dnevne i satne dostupnosti i maksimalne raspoloživosti primarnih izvora energije, jer dovodi do pogrešnih vrednosti grešaka, a samim tim i pogrešnih zaključaka u pojedinim mesecima / sezonama. Nakon uvida u rezultate sprovedenih analiza sa različitim vrednostima normalizacijskih faktora (snaga), autori će probati da dođu do odgovora na pitanje da li je opravdano raditi normalizaciju istom vrednošću tokom cele godine. U svakom slučaju ovakvo računanje je (iz programerskog ugla) lakše i uniformnije. Ali na osnovu sagledavanja fizike problema čini se da nije dovoljno ni dobro ni korisno, a ni sasvim tačno.

Prednosti korišćenja $nRMSE$ sa posebnim normalizacijskim faktorima, u odnosu na $nMAE$ i $MAPE$ su sledeći:

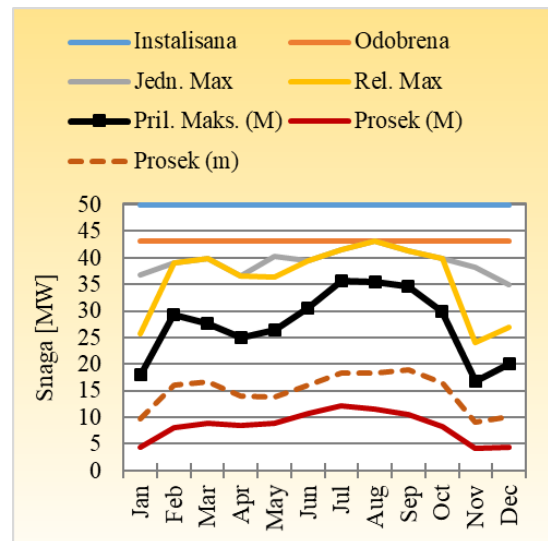
- primena u statistici: $nRMSE$ ima veću primenu u statističkim istraživanjima – dalje analize i kalkulacije intervala poverenja, korelacija i koeficijenta determinacije,
- naglašavanje većih odstupanja: $nRMSE$ daje veću težinu većim odstupanjima što i jeste ultimativni cilj kod izbora prognoze: smanjivanje magnitude pojedinačnih grešaka,
- tretiranje negativnih i pozitivnih odstupanja: $nRMSE$ podjednako tretira pozitivna i negativna odstupanja,
- zastupljenost u praksi: $nRMSE$ je zastupljeniji kao mera greške u prognozama proizvodnje i konzuma,
- uporedivost rezultata: primena različitih NF omogućava ali i ograničava primenu $nRMSE$ samo unutar jednog izvora obnovljive energije. NF omogućava da se za isti izvor energije (sunce, vetar ili hidro) vrši poređenje iznosa greške bez obzira na lokaciju ili instalirani kapacitet. Usled različitih varijabiliteta specifičnih za svaku vrstu obnovljivog izvora energije, unakrsno poređenje nije preporučljivo, jer će voditi ka velikoj diferenciranosti rezultata i pogrešnim tumačenjima usled različitih NF .

V KOMPARATIVNA ANALIZA IZRAČUNATIH GREŠAKA PROGNOZE

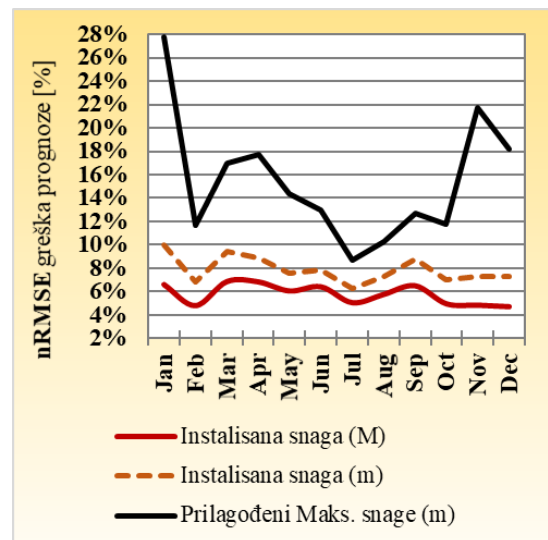
Na slikama 2.-10. su za svaki od tipova izvora prikazane mesečne vrednosti normalizacijskih faktora kao i izračunatih grešaka prognoze $nRMSE$ i $nMAE$ za 2023. godinu. U Tabeli 2 su uporedno dati ovi podaci za obe razmatrane godine, 2023. i 2022.

Na osnovu energetske osobine izvora opisanih u poglavlju II i komparativne analize svih vrsta grešaka, izračunatih sa svim definisanim normalizacijskim faktorima NF (od a) do f) iz poglavlja III-1), odabrano je da se kao NF snage za:

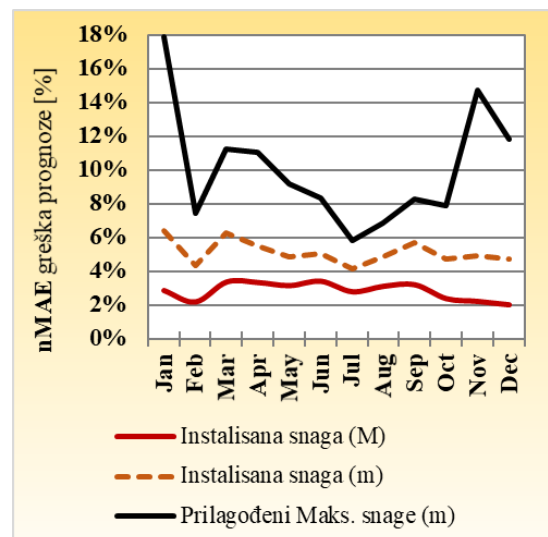
- solarne elektrane koristi: e) Prilagođeni maksimum (M),
- vetroelektrane koristi: d) Relativni maksimum, i za
- hidroelektrane koristi: c) Jednokratni maksimum.



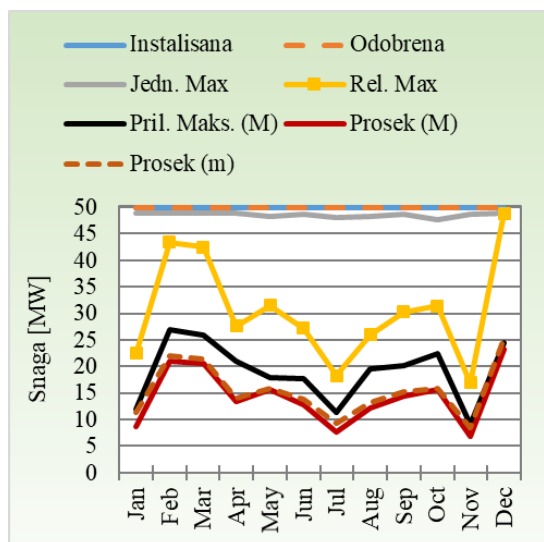
Slika 2. Mesečni normalizacijski faktori (NF) u 2023. za solare



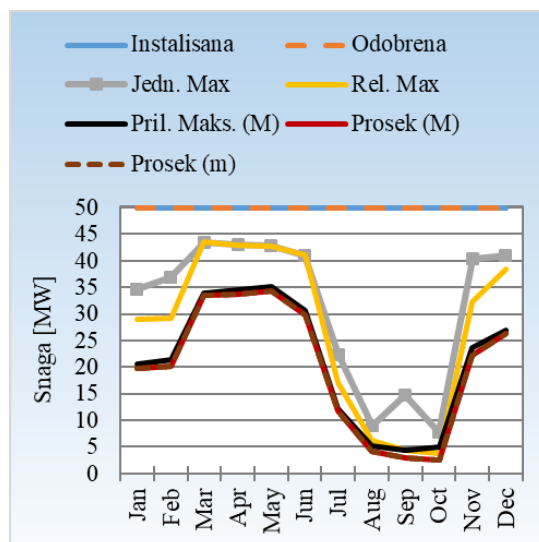
Slika 3. Mesečne greške prognoze $nRMSE$ u 2023. za solare



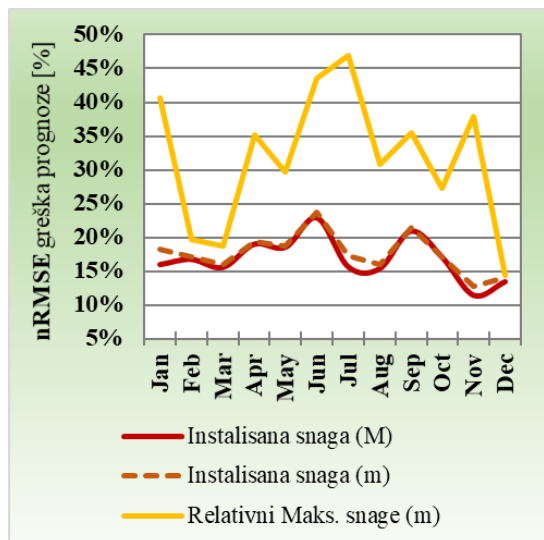
Slika 4. Mesečne greške prognoze $nMAE$ u 2023. za solare



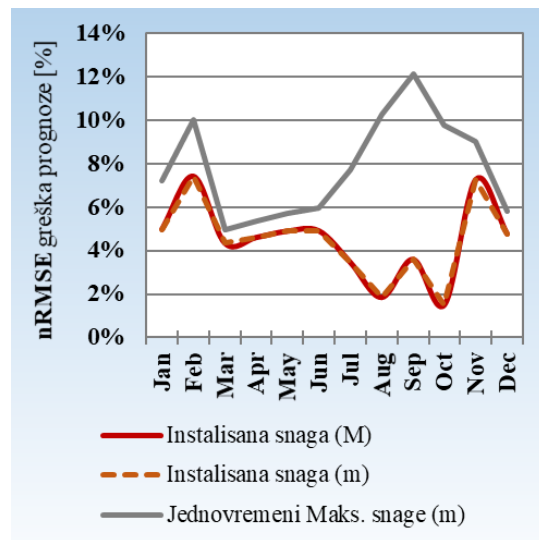
Slika 5. Mesečni normalizacijski faktori (NF) u 2023. za vetro



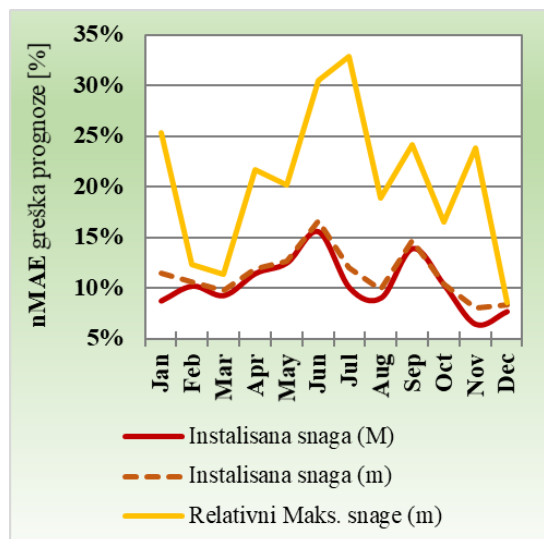
Slika 8. Mesečni normalizacijski faktori (NF) u 2023. za hidro



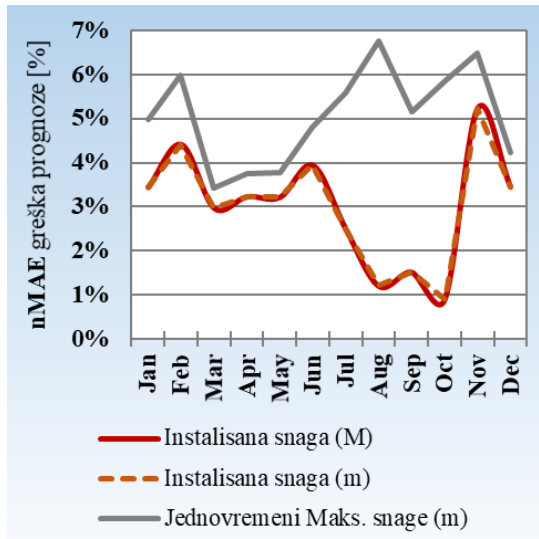
Slika 6. Mesečne greške prognoze nRMSE u 2023. za vetro



Slika 9. Mesečne greške prognoze nRMSE u 2023. za hidro



Slika 7. Mesečne greške prognoze nMAE u 2023. za vetro



Slika 10. Mesečne greške prognoze nMAE u 2023. za hidro

Tabela 2. Mesečne i godišnje vrednosti normalizacijskih faktora i grešaka prognoze $nRMSE$ i $nMAE$ po tipovima izvora u 2022./23.

Tip	SOLAR								VETAR								HIDRO							
	$nRMSE$ [%]				$nMAE$ [%]				$nRMSE$ [%]				$nMAE$ [%]				$nRMSE$ [%]				$nMAE$ [%]			
	2023.		2022.		2023.		2022.		2023.		2022.		2023.		2022.		2023.		2022.		2023.		2022.	
Mesec	Instalisano (M)	Prilagođeni maks.	Instalisano (M)	Prilagođeni maks.	Instalisano (M)	Prilagođeni maks.	Instalisano (M)	Prilagođeni maks.	Instalisano (M)	Relativni maks.	Instalisano (M)	Relativni maks.	Instalisano (M)	Relativni maks.	Instalisano (M)	Relativni maks.	Instalisano (M)	Jednokratni maks.	Instalisano (M)	Jednokratni maks.	Instalisano (M)	Jednokratni maks.	Instalisano (M)	Jednokratni maks.
Jan	6,6	28	3,4	11	2,8	18	1,5	6,8	16	41	21	30	8,7	25	11	16	5,0	7,2	1,1	1,3	3,4	5,0	0,6	0,7
Feb	4,8	12	5,0	21	2,2	7,4	2,2	13	17	20	15	15	10	12	9,2	9,4	7,4	10	1,0	1,5	4,4	6,0	0,4	0,7
Mar	6,9	17	4,8	12	3,3	11	2,4	8,4	16	19	13	21	9,3	11	7,6	12	4,3	5,0	2,0	3,1	3,0	3,4	1,0	1,6
Apr	6,9	18	5,3	12	3,3	11	2,6	7,6	19	35	16	24	11	22	8,7	13	4,6	5,3	4,1	4,5	3,2	3,8	2,7	2,9
Maj	6,1	14	4,7	8,7	3,1	9,2	2,5	5,8	19	30	13	23	12	20	7,9	14	4,9	5,7	4,4	6,0	3,2	3,8	2,7	3,7
Jun	6,4	13	4,5	8,5	3,4	8,3	2,4	5,6	23	43	11	23	16	30	6,7	14	4,9	6,0	5,4	10	3,9	4,8	3,4	6,4
Jul	5,1	8,7	3,5	6,1	2,8	5,8	1,9	4,0	16	47	18	40	10	33	11	23	3,5	7,7	1,9	11	2,5	5,6	1,2	7,1
Avg	5,8	10	3,9	7,8	3,1	6,9	2,1	5,1	15	31	13	57	9,1	19	7,7	33	1,8	10	8,0	19	1,2	6,8	4,4	11
Sep	6,5	13	4,9	10	3,2	8,2	2,5	6,6	21	35	16	32	14	24	10	20	3,6	12	7,5	13	1,5	5,1	5,8	10
Okt	5,0	12	3,6	7,6	2,4	7,9	1,8	5,2	17	27	11	20	10	17	7,5	13	1,5	9,8	2,6	11	0,9	5,9	1,7	7,3
Nov	4,9	22	4,3	16	2,2	15	2,1	11	11	38	19	30	6,5	24	9,7	15	7,3	9,0	7,4	8,8	5,2	6,5	5,4	6,5
Dec	4,7	18	4,8	24	2,0	12	2,0	16	13	14	12	12	7,7	8,6	7,2	7,3	4,8	5,8	7,8	7,9	3,5	4,2	5,6	5,6
Godina	5,9	15	4,4	11	2,8	9,4	2,2	7,0	17	29	15	25	10	18	8,7	14	4,7	5,4	5,2	5,3	3,0	3,4	2,9	3,0

Sa slika prikazanih u ovom poglavlju, očigledno je da se za obe vrste greške, najmanje vrednosti dobijaju kada se za NF koristi instalisana snaga, pa je onda i jasno zašto se upravo one kao merilo grešaka koriste u prognostičarskim softverima. Međutim, može se uočiti još jedna mana ovakvog pristupa, a to je mala (standardna) devijacija mesečnih grešaka tokom godine, odnosno “ublažavanje” vrednosti grešaka u mesecima gde je ona objektivno i po prirodi velika - u mesecima sa malom i/ili volatilnom ostvarenom proizvodnjom (npr. tokom “grejne” sezone, smene godišnjih doba, letnjih suša, itd.).

Sa slika (a posebno iz Tabele 2) se takođe može uočiti da su greške tipa $nRMSE$ većih iznosa (za nekih ~60%) od ekvivalentnih grešaka tipa $nMAE$, što je bilo i očekivano zbog kvadriranja grešaka prilikom izračunavanja $RMSE$. Na slikama 3. i 4. se za obe greške prognoze solara može uočiti da se greška (neopravdano!) smanjuje ako se računa na celom periodu M , a ne kako bi bilo trebalo - samo u periodima m fizičke raspoloživosti primarnog izvora energije. Ova razlika je za vetroelektrane (slike 6 i 7) mala, a za hidro za posmatranu godinu skoro i nepostojeća (slike 9 i 10), a što je direktna posledica međusobnog odnosa M i m koji su navedeni u Tabeli 1.

VI ZAKLJUČAK

Treba napomenuti da ovdašnje elektrane do sada nisu imale ni potrebu ni (ekonomski) podsticaj da poboljša(va)ju svoje modele prognoze zbog toga što neke od njih čak nisu imale ni obavezu prognoze, pa svakako postoji prostor za unapređenje koje je u tržišnim okolnostima plasmana električne energije proizvođača iz obnovljivih izvora energije i neophodno u cilju smanjivanja troškova, prevashodno debalansa.

Upoređivanjem rezultata različitih vrsti grešaka na različite vrste

obnovljivih izvora energije utvrđeno je da ne postoji ultimativno i jedinstveno „najbolji“ metod za izračunavanje greške, te i da izračunata greška ne može samostalno doprineti donošenju zaključka. Npr. korišćenje $(n)MAE$ ili $(n)RMSE$ bez P nema smisla. Autori prilikom odabira vrste greške u ovom radu prednost su dali primeni normalizovane standardne greške prognoze $nRMSE$ u kombinaciji sa srednjom merom tendencije MB , uz posebno i pogodno izbran normalizacijski faktor za svaki od razmatranih obnovljivih izvora energije.

Komparativna prednost primene standardne greške prognoze nad ostalim greškama je prvenstveno u njenoj širokoj statističkoj i teorijskoj primeni za detaljnije analize te sve većoj praktičnoj primeni u elektro-energetskom sektoru prilikom prognoziranja proizvodnje i potrošnje električne energije. Standardna greška prognoze sa adekvatnim normalizacijskim faktorom je upotrebljiva prilikom komparacije kako prognoza različitih proizvodnih objekata unutar istog tipa obnovljive energije, tako i prilikom poređenja preciznosti različitih softvera za prognozu. Stoga autori prednost daju primeni ove metode kao široko primenjivoj i lako razumljivoj metodi za interperataciju i analizu grešaka prognoze proizvodnje obnovljivih izvora energije.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Apostolović, M., Divčić, M., Radojević, P. Komparativna analiza različitih metoda za obračun debalansa, in Proc. *Fleksibilnost elektroenergetskog sistema: zbornik radova 36. Savetovanja CIGRE Srbija 2023.*, Zlatibor, Srbija, R C5 06, pp. 1696-1713, 22-26. maj 2023. <https://doi.org/10.46793/CIGRE36.1696A>
- [2] Hyndman, R.J., Athanasopoulos, G. *Forecasting: principles and practice*, 3rd edition, OTexts: Melbourne, Australia, 2021. <https://otexts.com/fpp3/> [pristupljeno 10.03.2024]
- [3] Dragović, V. *Statistika*, Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, Istočno Sarajevo, 2008.

- [4] Đurišić, Ž., Lazović, Đ., Džodić, K., Škrbić, B., Batić, I., Radovanović, M., Popović Zdravković, B., Kovačević, B., Đorđević, M. Analiza potrebnih kapaciteta za balansiranje obnovljivih izvora energije u EES-u Srbije za postojeće i perspektivno stanje 2030. godine – I deo: Metodologija, in Proc. *Fleksibilnost elektroenergetskog sistema: zbornik radova 36. Savetovanja CIGRE Srbija 2023.*, Zlatibor, Srbija, R C2 01, pp. 1091-1108, 22-26. maj 2023. <https://doi.org/10.46793/CIGRE36.1109DJ>

AUTORI/AUTHORS

Mladen Apostolović - Senior Menadžer za Portfolio i Obnovljive izvore

energije, EFT Trade d.o.o., mladen.apostolovic@eft-group.net, ORCID [0000-0002-1226-3495](https://orcid.org/0000-0002-1226-3495)

Miroslav Divčić - direktor, ERS male hidroelektrane d.o.o., miroslav.divcic@energy-eastern.eu, ORCID [0009-0004-2261-9063](https://orcid.org/0009-0004-2261-9063)

Marijan Rančić - Business Development Director, New Energy Solutions d.o.o., marijan.rancic@newenergy.rs, ORCID [0009-0001-7326-7027](https://orcid.org/0009-0001-7326-7027)

Risto Vasiljević - Scheduling Manager, EFT Trade d.o.o., risto.vasiljevic@eft-group.net, ORCID [0009-0005-7426-9963](https://orcid.org/0009-0005-7426-9963)

Selection of Appropriate Types of Forecast Errors for Adequate Assessment of Operational Planning Accuracy of the Production from Different Types of Renewable Energy Sources

Abstract – Forecasting electricity production from renewable sources is challenging for producers, distribution and transmission System Operators, electricity traders, and other market participants. To a large extent, to maintain the power system's operational security, System Operators rely on the operational production forecasts of electricity producers. With the greater participation of renewable energy sources in total electricity production, the interest and importance of production forecast from these sources as accurately as possible, and the increasing reliance of the Operator system on the forecasts sent by the producers is growing. A particular challenge in the production forecast from renewable energy sources is the energy obtained from solar, wind, and small run-of-river hydropower plants. Given that with the growing participation of producers in the free market, this topic is becoming more and more relevant, different methods for production forecast and various accompanying software solutions are being reviewed, improved, and developed. Comparative analysis and selection and application of the appropriate method for evaluating forecast accuracy is the topic of this work. After introductory considerations on the importance of the adequate forecast for renewables production, ways for determining the precision of these solutions and the way to choose the appropriate criterion, i.e., the type of forecast errors for different types of renewable energy sources, is presented. Along with the mathematical formulation, a practical example of calculated different kinds of errors (standard deviation, bias, mean absolute error, mean square error, etc.) is given, together with their normalised percentage values. A description of the samples, flow, and results of calculations for measuring the success of production forecasts for solar, wind, and small hydropower plants is given. At the end of the paper, notes on possible and necessary improvements are briefly given, aimed at better production forecast and more comprehensive analysis of different types of forecast errors.

Index Terms – Renewable sources, Production, Forecast, Error, Accuracy, Deviation

Upotreba cenovnih signala u cilju ubrzanja energetske tranzicije

Dunja Grujić*, Miloš Kuzman**, Željko Đurišić***

* Elektro distribucija Srbije, Republika Srbija

** Udruženje za pravo energetike Srbije, Republika Srbija

*** Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, Republika Srbija

Rezime - Energetska tranzicija sa fosilnih na obnovljive izvore energije se značajno ubrzala u prethodnih nekoliko godina usled dramatičnih posledica zagađenja životne sredine, klimatskih promena i sve nižeg nivoa rezervi fosilnih goriva. U okviru ovog rada izneti su neki od izazova energetske tranzicije sa kojima se suočava operator distributivnog sistema, među kojima su i: otežano upravljanje distributivnim elektroenergetskim sistemom, povećanje gubitaka električne energije, kao i potreba za dodatnim investicijama u mrežu kako bi se omogućilo priključenje novih korisnika sistema. Jedna od mogućnosti za olakšanje poslovanja operatora distributivnog sistema u uslovima energetske tranzicije je upravljanje potrošnjom i proizvodnjom električne energije. Analizirana je mogućnost upotrebe dinamičkih cena električne energije i promene načina određivanja cena pristupa distributivnom elektroenergetskom sistemu s ciljem upravljanja potrošnjom i proizvodnjom cenovnim signalima. Pre svega prikazani su trenutni cenovni modeli snabdevača i operatora distributivnog sistema u Crnoj Gori i Republici Srbiji, a potom su izneti predlozi novih cenovnih modela i njihov uticaj kako na operatora distributivnog sistema i snabdevače, tako i na korisnike sistema.

Ključne reči - energetska tranzicija, operator distributivnog sistema, cenovni signali, upravljanje potrošnjom i proizvodnjom električne energije

I UVOD

U sled sve izraženijih posledica zagađenja životne sredine i globalnog zagrevanja očigledna je neophodnost energetske tranzicije sa fosilnih goriva na obnovljive izvore energije. Kako bi se energetska tranzicija uspešno sprovedla potrebno je promeniti tradicionalne uloge operatora prenosnog i distributivnog elektroenergetskog sistema, modernizovati i automatizovati sistem i podsticati rad učesnika na tržištu električne energije koji doprinose tranziciji.

Prethodnih godina u centru pažnje su u kontekstu energetske tranzicije bili operatori prenosnih sistema, i fokus je bio na razvoju prenosne mreže i njenih kapaciteta. Dodatno je zaključeno da se tek uz učešće svakog pojedinca energetska tranzicija može brzo i održivije sprovesti npr. kroz koncepte kupca-proizvođača, unapređenje energetske efikasnosti ili štednju električne energije. S obzirom na navedeno, distributivni elektroenergetski sistem se našao u žiži interesovanja evropske naučne i stručne javnosti, kao i nosilaca regulatornih aktivnosti.

Definisani su novi korisnici sistema među kojima su proizvođači električne energije, kupci-proizvođači, skladištari, agregatori,

kao i različiti vidovi udruživanja kao što su npr. zajednice obnovljivih izvora energije. Sve navedeno dovelo je do toga da distributivni elektroenergetski sistem od jednog pasivnog postane veoma aktivan sistem sa sve teže predvidivim tokovima snaga, što između ostalog otežava upravljanje sistemom, zaštitu sistema, ugrožava sigurnost snabdevanja, povećava opterećenje elemenata sistema, kao i gubitke, i iziskuje nove značajne investicije u sistem kako bi se omogućilo priključenje novih korisnika sistema. Naročito štetne posledice se javljaju u uslovima značajnog povećanja inflacije i cena električne energije na tržištu što bitno povećava troškove operatora distributivnog sistema pri čemu treba imati u vidu da je distribucija električne energije regulisana delatnost.

U okviru ovog rada dati su predlozi za smanjenje pomenutih negativnih posledica a na korist svih korisnika sistema i ubrzanje energetske tranzicije. U naučnim krugovima analizira se mogućnost upotrebe dinamičkih tarifa za pristup distributivnom sistemu i dinamičkih cena električne energije, a u okviru ovog rada biće dati predlozi rešenja za upotrebu dinamičkih tarifa u Republici Srbiji i Crnoj Gori.

II PRISTUP DISTRIBUTIVNOM SISTEMU ELEKTRIČNE ENERGIJE

U Republici Srbiji Izmenama i dopunama Zakona o energetici [1] i Zakonom o korišćenju obnovljivih izvora [2] krajnji kupci, proizvođači električne energije, kupci-proizvođači, skladištari, snabdevači, agregatori i drugi operatori sistema definisani su kao korisnici sistema i učesnici na tržištu. Svaki korisnik sistema ima obavezu uređenja pristupa sistemu, a operator sistema je dužan da korisnicima omogući pristup sistemu po regulisanim cenama po principima javnosti i nediskriminacije, [1]. Cene pristupa distributivnom sistemu [3] su regulisane [1] i određuju se na osnovu Metodologije za određivanje cena pristupa sistemu za distribuciju električne energije [4] koju donosi Agencija za energetiku Republike Srbije.

U Crnoj Gori korisnici sistema su definisani Zakonom o energetici [5] kao fizička ili pravna lica koja isporučuju u sistem ili iz njega preuzimaju električnu energiju. Cene za pristup sistemu [6] su takođe regulisane a donose se u skladu sa Metodologijom za utvrđivanje regulatorno dozvoljenog prihoda i cijena za korišćenje distributivnog sistema električne energije [7] koju donosi Regulatorna agencija za energetiku i regulisane komunalne delatnosti.

II-1 Maksimalno odobreni prihod operatora distributivnog sistema

Maksimalno odobreni prihod operatora sistema po osnovu

obavljanja delatnosti distribucije električne energije i upravljanja distributivnim sistemom, u Republici Srbiji, određuje se, između ostalog, na osnovu operativnih troškova (npr. troškova materijala, zarada, usluga korišćenja sistema za prenos električne energije, nabavke električne energije za sopstvenu potrošnju), troškova amortizacije i troškova za naknadu gubitaka [4].

Maksimalno odobreni prihod operatora distributivnog sistema u Crnoj Gori određuje na sličan način kao u Republici Srbiji, a u cilju ograničenja dozvoljenog prihoda operatora, stvaranja preduslova za poboljšanje kvaliteta rada operatora sistema i njegove efikasnosti [7].

II-2 Kategorije korisnika sistema

U Republici Srbiji definisane su sledeće kategorije korisnika sistema: "Potrošnja na srednjem naponu", "Potrošnja na niskom naponu", "Široka potrošnja" sa grupama "domaćinstva", "ostala komercijalna potrošnja" i "javna i zajednička potrošnja", "Javno osvetljenje" sa grupama "javno osvetljenje" i "svetleće reklame" [4]. Svaki korisnik sistema za svako mesto primopredaje ima odobrenu snagu koja je zapravo maksimalna aktivna snaga na mestu priključenja koja je određena u odobrenju za priključenje, elektroenergetskoj saglasnosti, uslovima za projektovanje i priključenje ili drugim aktom kojim je odobreno priključenje objekta korisnika sistema [8].

U Crnoj Gori prema naponu na mestu predaje električne energije i priključnoj snazi, kupci se dele na kupce kod kojih se snaga meri (kupci priključeni na 35 kV, 10 kV i 0,4 kV naponskom nivou sa odobrenom priključnom snagom većom od 34,5 kW) i kupce kod kojih se snaga ne meri (kupci na 0,4 kV naponskom nivou sa odobrenom priključnom snagom 34,5 kW i manjom) [7].

II-3 Alokacija maksimalno odobrenog prihoda

Maksimalno odobren prihod operatora distributivnog sistema u Republici Srbiji i u Crnoj Gori alocira se na tarife za pristup sistemu korisnicima sistema [4, 7]. Cene pristupa sistemu za distribuciju električne energije, između ostalog, obezbeđuju pokrivanje opravdanih troškova poslovanja i investicija u obavljanju delatnosti distribucije električne energije i upravljanja distributivnim sistemom kojima se obezbeđuje kratkoročna i dugoročna sigurnost snabdevanja, odnosno održivi razvoj sistema, podsticanje ekonomske i energetske efikasnosti i nediskriminacija [4].

Obračun naknade za pristup distributivnom sistemu u Republici Srbiji vrši se za krajnje kupce, kupce-proizvođače i operatore susednih distributivnih sistema za celokupnu električnu energiju koju preuzmu iz distributivnog sistema. Proizvođači, skladištari i ostali korisnici sistema nemaju obavezu plaćanja pristupa distributivnom sistemu [4].

Obračun naknade za pristup distributivnom sistemu u Crnoj Gori vrši se za sve korisnike sistema za električnu energiju preuzetu iz distributivnog sistema (npr. krajnji kupci), odnosno isporučenu u distributivni sistem (npr. proizvođači), odnosno neto električnu energiju (za kupce-proizvođače) [7].

U Republici Srbiji za kategorije korisnika "potrošnja na srednjem naponu" i "Potrošnja na niskom naponu" meri se maksimalna snaga, aktivna i reaktivna električna energija, a obračunava

odobrena snaga, prekomerna snaga (ukoliko je angažovana snaga viša od odobrene), preuzeta aktivna električna energija, preuzeta reaktivna električna energija i to dozvoljena i prekomerna (ukoliko je faktor snage manji od 0,95). Za kategoriju "Široka potrošnja" obračunava se odobrena snaga i aktivna električna energija, a kategoriji "javno osvetljenje" samo aktivna električna energija. S obzirom na navedeno u Republici Srbiji maksimalno odobren prihod alocira se na tarife za snagu (odobrenu i prekomernu), aktivnu električnu energiju (viša i niža tarifa), reaktivnu električnu energiju (dozvoljena i prekomerna) [4]-

Regulatorno dozvoljeni prihod operatora u Crnoj Gori obezbeđuje se naplaćivanjem usluge korišćenja sistema od kupaca po cenama kojima se nadoknađuju troškovi za angažovanje kapaciteta i cenama kojima se nadoknađuju troškovi opravdanih gubitaka pri čemu su obe naknade vezane za utrošak električne energije uz obračun fiksnog troška za angažovanje kapaciteta po mernom mestu, kao i od proizvođača za angažovani distributivni kapacitet i trošak opravdanih gubitaka [7].

I u Republici Srbiji i u Crnoj Gori bez obzira na dužinu distributivnog puta, korisnici sistema koji pripadaju istoj kategoriji, plaćaju korišćenje sistema po istim cenama po kilovatu (kW), kilovatčasu (kWh), kilovarčas (kvarh) [4, 7].

III CENOVNI SISTEM ZA ELEKTRIČNU ENERGIJU

III-1 Tarifni sistem

Trenutni koncept tarifnog sistema za pristup distributivnom sistemu i cena snabdevača zasniva se uglavnom na količini preuzete, odnosno isporučene električne energije. Pored navedenog, postoje i fiksni troškovi pristupa sistemu za angažovanje kapaciteta po mernom mestu u Crnoj Gori [7] i trošak za odobrenu i prekomernu snagu po kW snage u Republici Srbiji [4], ali je njihovo učešće značajno manje od troškova koji zavise od električne energije.

Korisnici sistema i u Republici Srbiji i u Crnoj Gori mogu imati dvotarifni obračun (viša i niža tarifa) ili jednotarifni obračun [4, 7]. Često se kod komercijalnih snabdevača mogu i u slučaju dvotarifnog obračuna uočiti cene koje su identične za višu i nižu tarifu. U Republici Srbiji doba primene niže tarife za aktivnu energiju u distributivnom sistemu, ili pojedinim delovima sistema, se određuje radi obezbeđivanja uravnoteženog rada sistema i sprečavanja preopterećenja uređaja i opreme, a počinje između 22h i 24h i traje neprekidno osam časova svakog dana [4]. U Crnoj Gori doba primene niže tarife za aktivnu energiju u distributivnom sistemu traje od 23h do 07h narednog dana u periodu kada se koristi zimsko računanje vremena, a od 00h do 08h u periodu kada se koristi letnje računanje vremena. Za korisnike koji imaju nova multifunkcionalna brojala niža tarifa je uvek od 23h do 7h narednog dana. Takođe, korisnici, kod kojih je tako podešen merni uređaj, nižu tarifu koriste i nedeljom [7].

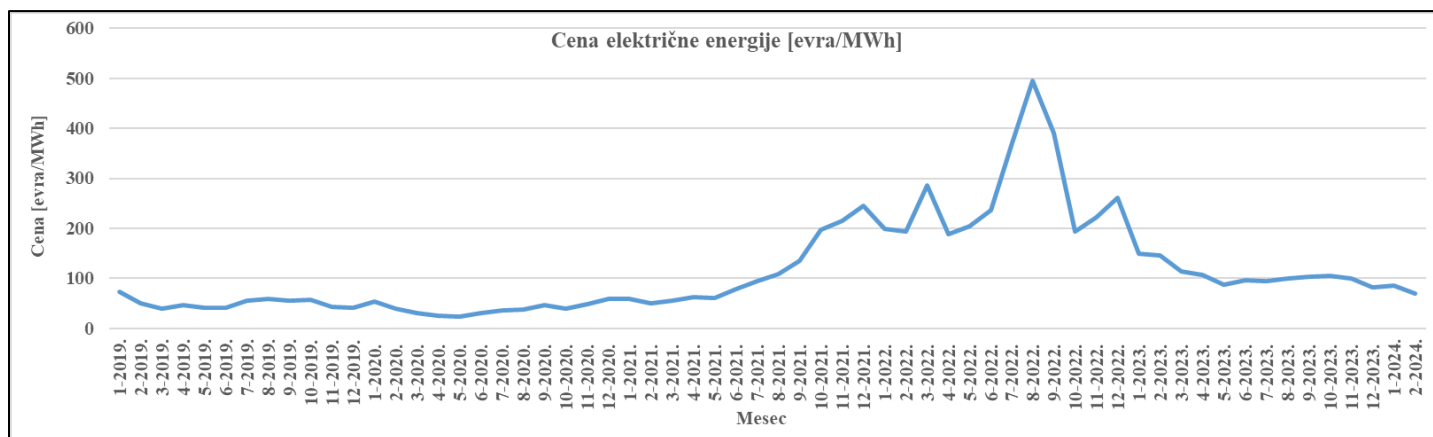
III-2 Cene snabdevača za električnu energiju

U Republici Srbiji i Crnoj Gori snabdevači samostalno određuju cene električne energije, izuzev garantovanog snabdevača kome se [1] u skladu sa Metodologijom za određivanje cena javnog snabdevanja [9] određuju cene [10] na koje saglasnost daje Agencija za energetiku. Pravo na garantovano snabdevanje imaju

domaćinstva i mali kupci (oni koji imaju manje od 50 zaposlenih, ukupan godišnji prihod u iznosu do 10 miliona evra u dinarskoj protivvrednosti, čiji su svi objekti priključeni na distributivni sistem električne energije napona nižeg od 1 kV i čija je potrošnja električne energije u prethodnoj kalendarskoj godini do 30.000 kWh) [1]. U Crnoj Gori definisani su tarifni modeli (osnovni, zeleni, plavi i crveni) za kupce u slučaju CEDIS [11]. Oba modela, i u Crnoj Gori i u Republici Srbiji, podstiču štednju električne energije, tj. za nižu potrošnju imaju niže cene i popuste. U Republici Srbiji postoji i rezervni snabdevač za kog uslove i način obrazovanja i promene cene propisuje Vlada Republike Srbije [1],

dok u Crnoj Gori postoji i snabdevač poslednjeg izbora [5].

Svi snabdevači, izuzev prethodno navedenih, samostalno određuju cenu električne energije, uglavnom na bazi prilika na tržištu. Na slici 1 prikazan je trend kretanja cena električne energije na berzi HUPX [12] u periodu od januara 2019. do februara 2024. godine. Može se primetiti da je u 2020. godini, kada je usled pandemije korona virusa privreda privremeno funkcionisala u smanjenom kapacitetu, cena električne energije bila niska. Nakon toga, usled ukrajinske krize, cena električne energije je naglo skočila i stabilizovala se tek pred kraj 2023. godine ali na značajno višim vrednostima u odnosu na 2019. i 2020. godinu.



Slika 1. Prosečne cene električne energije na berzi HUPX od januara 2019. do februar 2024. godine [12]

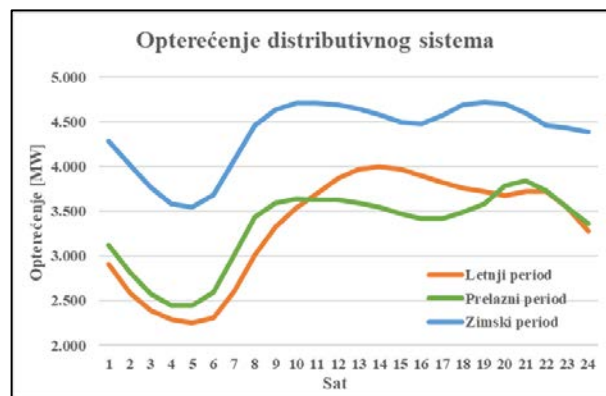
IV IZAZOVI PRED DISTRIBUTIVNIM SISTEMOM U SVETLU ENERGETSKE TRANZICIJE

Zbog ograničenog kapaciteta prenosnog sistema, nedovoljno balansne rezervne i visine investicija za velike proizvodne kapacitete, kako je već navedeno, distributivni sistem je postao značajan nosilac energetske tranzicije. Sve veći broj proizvođača i kupaca-proizvođača sa proizvodnim objektima iz obnovljivih izvora energije, čija je proizvodnja uglavnom varijabilna (sunce, vetar), priključuje se na distributivni sistem. Takođe, očekuje se priključenje prvih skladišta, početak rada prvih agregatora, kao i drugih korisnika sistema. Navedeno donosi brojne izazove operatorima distributivnih sistema pre svega u upravljanju sistemom, održavanju napona, sigurnosti snabdevanja, potrebama za dodatnim balansnom rezervom i investicijama kako bi se omogućila sigurnost snabdevanja i integracija novih korisnika sistema u elektroenergetski sistem.

Kako bi se video uticaj do sada priključenih korisnika sistema i mogućnosti za integraciju novih u elektroenergetski sistem, izvršena je analiza opterećenja distributivnog sistema i cena električne energije po periodima za 2022. godinu. Na slici 2 prikazano je srednje satno opterećenje distributivnog sistema Republike Srbije [13]. Na slici 3 prikazane su prosečne satne cene električne energije u 2022. godini sa berze HUPX [12]. Meseci su grupisani po periodima godine i to prelazni (april, maj, septembar, oktobar), zimski (novembar, decembar, januar, februar, mart) i letnji (jun, jul, avgust) [14].

Sa slike 2 može se zaključiti da je u zimskom periodu opterećenje elektrodistributivnog sistema Republike Srbije veće nego u prelaznom i letnjem periodu što je dominantno posledica

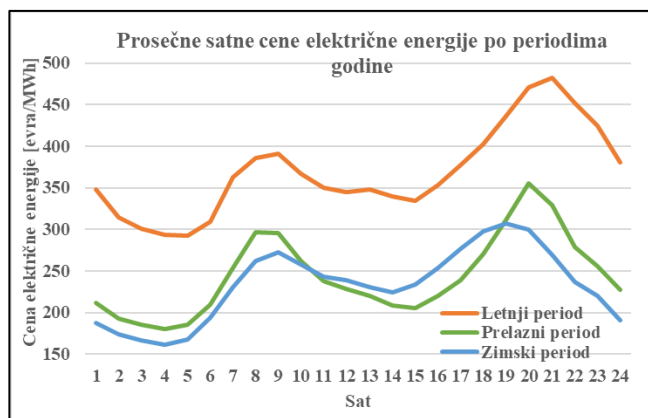
većih potreba za električnom energijom za zagrevanje prostora. U letnjem i prelaznom periodu opterećenje je značajno niže, s tim što je u letnjem periodu izraženo značajno veće opterećenje u popodnevним satima što je uglavnom posledica korišćenja električne energije za hlađenje prostora. U svim periodima godine opterećenje u nižoj tarifi (noćnom periodu) je značajno niže od opterećenja u višoj tarifi.



Slika 2. Srednje satno opterećenje distributivnog sistema Republike Srbije [13]

Poređenjem slika 2 i 3 može se primetiti da u prelaznom i zimskom periodu cena električne energije prati opterećenje sistema – što je više opterećenje sistema, tj. veća potražnja, cena električne energije je viša i obrnuto. Međutim u letnjem periodu, u popodnevним satima, cena električne energije je gotovo jednaka cenama u toku noći, iako je sistem značajno više opterećen u odnosu na noćni period, kako je ranije objašnjeno analizom slike 2.

Navedeno je posledica integracije značajnih kapaciteta solarnih elektrana što dovodi do velike ponude električne energije iz solarnih elektrana u predmetnim satima, te iako je i potražnja značajna, cena električne energije ostaje na relativno niskom nivou. Daljom integracijom solarnih elektrana opisani efekat će samo biti izraženiji. Ista pojava dešava se u toku noći u sistemima sa značajnim integrisanim kapacitetima iz vetroelektrana, tj. u periodima kada je sistem slabo opterećen, a vetroelektrane imaju odličan potencijal za proizvodnju. Čak su u dosadašnjoj evropskoj praksi na berzama zabeležene i negativne cene električne energije, kao i injektiranje električne energije iz distributivnog u prenosni sistem, u periodima nižeg opterećenja sistema i velike penetracije električne energije proizvedene iz solarnih elektrana u toku dana, odnosno vetroelektrana u toku noći.



Slika 3. Prosečne satne cene električne energije u 2022. godini sa berze HUPX [12]

U Republici Srbiji injektiranje u prenosni sistem prvi put je zabeleženo 2017. godine u iznosu od 3 GWh, a već 2022. godine dostiglo je 21 GWh [15]. Važno je napomenuti da operator distributivnog sistema nema tarifu za pristup sistemu za injektiranu električnu energiju. Takođe, ona često pravi i dodatne tehničke gubitke u mreži. Do iste pojave dolazi i ukoliko proizvodni objekat nije priključen u blizini odgovarajuće potrošnje, te je neophodno birati optimalne tačke za priključenje proizvodnih objekata i posvećeno se baviti planiranjem mreže.

Pored navedenog, koncept obračuna za kupce-proizvođače i u Republici Srbiji i u Crnoj Gori doprinosi ranije pomenutim problemima jer podstiče proizvodnju solarnih elektrana kupaca-proizvođača u letnjem periodu. Kupci-proizvođači imaju mogućnost akumuliranja viška u toku letnjeg perioda, uglavnom u višoj tarifi. Obračunski višak električne energije uglavnom koriste u zimskom periodu kada njihova solarna elektrana proizvodi značajno manje električne energije. Naravno, električna energija u zimskom periodu će se fizički preuzimati iz distributivnog sistema i to u višoj tarifi, pri čemu se dodatno opterećuje sistem u višoj tarifi, kada je inače već jako opterećen [2, 5, 16, 17].

Daljom integracijom proizvodnih objekata iz obnovljivih izvora energije bez izmena u radu korisnika sistema i načina priključenja samo će dovesti do pojačavanja opisanih problema, zagušenja u sistemu i smanjenja kapaciteta za priključenje novih korisnika sistema. Naročito negativno može uticati na lokalizovane tačke u sistemu, te se problem preopterećenja,

zagušenja i regulacije napona mora posmatrati lokalno. S obzirom na sve navedeno stručna javnost se već duže vreme bavi istraživanjima u ovoj oblasti. U ovom rada biće razmotrena upotreba dinamičkih tarifa kao sredstva za ubrzanje energetske tranzicije i prevazilaženje opisanih problema.

V KONCEPT DINAMIČKIH TARIFA

Prema trenutno važećem tarifnom sistemu koji je opisan u poglavlju 3 postoje samo dve tarife – viša i niža, pri čemu pojedini korisnici sistema imaju i samo jednu tarifu. U Republici Srbiji niža tarifa je četiri puta jeftinija od više tarife, a u Crnoj Gori dva puta. [4, 7] Naravno, korisnici sistema su motivisani da koriste električnu energiju u nižoj tarifi, ali je ona na snazi u toku noći te je stoga teško značajnu potrošnju pomeriti iz više u nižu tarifu.

U konceptu dinamičkih tarifa, cene pristupa sistemu i cene električne energije bi se menjale u skladu sa prilikama u mreži, tj. ukoliko bi sistem bio preopterećen cene bi bile veoma visoke, dok bi ukoliko je sistem slabo opterećen, ili ima viška električne energije u mreži, bile niske. Korisnici sistema bi prirodno, na osnovu cenovnih signala, pomerili svoju potrošnju iz perioda viših cena u periode nižih cena. Dakle, dinamičkom promenom tarifa opterećenje se može pomeriti iz perioda maksimalnog opterećenja u periode manjeg opterećenja mreže ili u periode kada postoji višak električne energije u mreži npr. kada obnovljivi izvori proizvode električnu energiju. Suštinski efekat koji treba da podstakne dinamičko tarifiranje je usklađivanje vremenskih dijagrama potrošnje i lokalne proizvodnje u distributivnim sistemima sa visokim stepenom integracije varijabilnih OIE. Pomeranje opterećenja može doprineti većoj predvidljivosti rada sistema i tokova snaga u smislu da će npr. u periodima proizvodnje elektrana biti potrošnje koja će biti pomerena iz perioda vršnog opterećenja u period proizvodnje iz elektrane. Na taj način sistem bi biti rasterećen a proizvodnja iz varijabilnih izvora bi bila potrošena, uskladištena ili evakuisana na drugi način.

U okviru ovog rada razmatraće se mogućnosti za uvođenje dinamičkih tarifa za pristup sistemu koje bi pozitivno uticale na rad operatora distributivnog sistema u smislu rasterećenja sistema, lakšeg upravljanja sistemom, regulacije napona i frekvencije, povećanja balansne rezerve i omogućavanje integracije u sistem novih korisnika sistema bez dodatnih značajnih investicija i tako promenile njegovu ulogu od kočnice energetske tranzicije do njenog pokretača. Takođe, biće razmotrene i mogućnosti dinamičkih cena električne energije koju snabdevači prodaju korisnicima sistema kako bi se pozitivni efekti na operatora sistema pojačali, ali i kako bi snabdevači imali niže troškove nabavke električne energije koju bi prodavali i doprineli smanjenju troškova debalansa balansno odgovornim stranama. Takođe, biće razmotreno i korišćenje dinamičkih tarifa u različitim formama udruživanja kao što su npr. agregatorske grupe i zajednice obnovljivih izvora energije.

V-1 Preduslovi za uvođenje dinamičkih tarifa

Kako bi koncept dinamičkih tarifa mogao biti uveden neophodno je da korisnici sistema tehnički budu u mogućnosti da prate promenu tarifa i njihovo trajanje, kao i da operator sistema ima uvid u preuzetu i isporučenu električnu energiju dinamički, u različitim delovima dana. Navedeno se može postići isključivo

ugradnjom naprednih mernih uređaja [18, 19] sa mogućnošću daljinskog očitavanja i merenja petnaestominutnih intervala korisnicima sistema koji imaju dinamički obračun. U Republici Srbiji manje od 5% ukupnog broja mernih uređaja ispunjava ove kriterijume [15]. U 2023. i 2024. godini operator distributivnog sistema pokrenuo je opsežnu zamenu klasičnih mernih uređaja naprednim, a njihova ugradnja se mora nastaviti i u narednim godinama. U Crnoj Gori kod gotovo svih korisnika sistema ugrađeni su napredni merni uređaji.

Pored navedenog, potrebni su i napredni sistemi za obradu prikupljenih podataka. Ukoliko se zadrži trenutni model obračunskog perioda, koji je po pravilu kalendarski mesec [4, 7], operator distributivnog sistema bi snabdevačima na mesečnom nivou dostavljao petnaestominutne, ili satne podatke na osnovu kojih bi snabdevači izdavali račune krajnjim kupcima. Iste podatke bi dostavljao i operatoru prenosnog sistema za potrebe balansnog tržišta i proračuna debalansa balansno odgovornih strana. Takođe, na osnovu datih podataka obračunavao bi i pristup distributivnom sistemu [1, 5].

Za primenu dinamičkih tarifa potreban je i razvoj sistema komunikacije između građana, privrede, snabdevača i drugih korisnika sistema i operatora sistema u smislu protoka informacija o promeni i vremenu trajanja tarifa jer se informacije moraju prenositi ispravno i blagovremeno. Takođe, neophodno je i razvijati i sistem za daljinsko upravljanje potrošnjom i proizvodnjom.

Kako bi se dinamičke tarife primenile potrebno je izmeniti regulativu u smislu obračuna pristupa distributivnom sistemu, razmene informacija operatora sistema i drugih učesnika na tržištu, kao i omogućavanja svim korisnicima sistema da učestvuju u različitim šemama dinamičkih tarifa. Pored navedenog, potrebno je edukovati korisnike sistema šta im mogu doneti dinamičke tarife i upravljanje potrošnjom i proizvodnjom, kao i kako prihvatanje pomenutih koncepata doprinosi radu sistema i energetske tranziciji.

V-2 Izazovi u primeni dinamičkih tarifa

Pored prethodno opisanih tehničkih preduslova, očekivani su i brojni izazovi u prihvatanju dinamičkih tarifa, pre svega jer delimično utiču na komfor života i poslovanje preduzeća. Korisnici sistema uglavnom koriste električnu energiju u periodima kada im je potrebna, bez obzira na njenu cenu. Ukoliko korišćenje uređaja treba prilagoditi ceni električne energije, a ne sopstvenim potrebama, može se očekivati da će korisnici sistema imati otpor prema promeni. Jednostavno, korisnici će se često odlučiti da imaju i više troškove u cilju zadržavanja sopstvenog komfora. Međutim, neminovnost energetske tranzicije to ne dozvoljava.

Očekuje se da na dinamičke tarife reaguju uglavnom industrijski potrošači koji imaju značajne troškove za električnu energiju tako što će reorganizovati svoje poslovanje. Može se očekivati i odgovarajuća reakcija domaćinstava sa naprednim uređajima visoke energetske efikasnosti koji se mogu programirati i kojima se može eventualno i daljinski upravljati, kao i finansijski najugroženijih korisnika sistema koji će štedeti i koristiti električnu energiju u periodima kada je ona povoljnija kako bi imali dodatne finansijske uštede.

Dinamičke tarife će imati svoj pun smisao u slučaju viših cena

električne energije koje smo imali priliku da vidimo u prethodnom periodu (videti sliku 1), kao i u situaciji povećanog učešća varijabilnih izvora gde je jako teško upravljati sistemom i vršiti balansiranje te će i cene pristupa biti značajno više.

Pored navedenog, istraživanja su pokazala da su podsticaji za korišćenje dinamičkih tarifa obično nedovoljni da bi se korisnici sistema stimulisali jer građani obično ne postižu uštede koje su očekivali i nakon toga dolazi do demotivacije. Takođe, često korisnici sistema nemaju dovoljno velike resurse upravljive potrošnje da bi mogli da ostvare značajnije uštede, a takođe neretko svesno ne žele da se odreknu svog komfora [20]. Sve navedeno se može prevazići drastično višim cenama u periodima značajnog opterećenja sistema.

VI MOGUĆNOSTI UPOTREBE DINAMIČKIH TARIFA

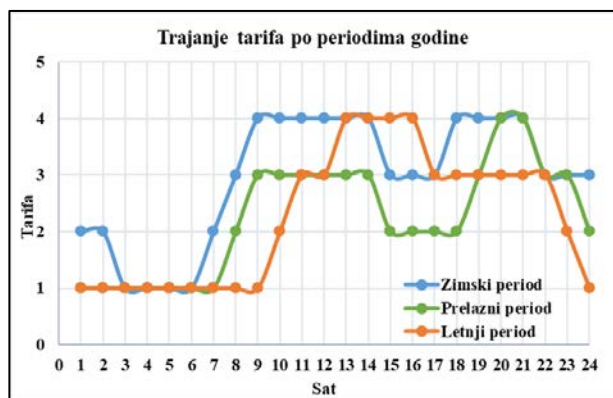
VI-1 Predlog postepenog uvođenja dinamičkih tarifa

U različitim konceptima dinamičkih tarifa cena pristupa sistemu i cena električne energije može biti unapred ugovorena, menjati se u određenim periodima (npr. sezonski, mesečno), ili se menjati na satnom nivou u skladu sa trenutnim stanjem u mreži. Kako bi industrija i građani imali vremena da se prilagode novom konceptu, promene svoje navike ili reorganizuju potrošnju, potrebno je izvesno vreme i pristup informacijama. U tom smislu najbolje je početi sa postepenim promenama. S obzirom na to da napredni merni uređaji imaju registre za četiri različite tarife [17], može se za početak analizirati rad sistema sa četiri fiksne tarife umesto dosadašnje dve, čija bi suština bila smanjenje vršnog opterećenja sistema.

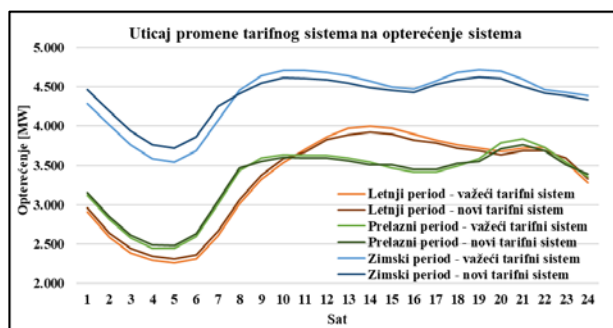
Na osnovu analize podataka prikazanih na slikama 2 i 3 [12, 13] mogu se prepoznati periodi različitog opterećenja. Za svaki period godine određen je sat sa najvećim opterećenjem, a potom i svi sati sa opterećenjem većim od 97% maksimalnog (u kojima bi se primenjivala najskuplja četvrta tarifa), između 91% i 97% (treća tarifa), između 85% i 91% (druga tarifa) i manjim od 85% (najjeftinija prva tarifa). Na slici 4 prikazan je raspored tarifa u danu po periodima godine.

Na slici 5 prikazan je uticaj promene tarifnog sistema na opterećenje sistema u Republici Srbiji po periodima godine. Pretpostavljeno je da će 2% opterećenja iz najskuplje, četvrte tarife, i 1% opterećenja iz treće tarife biti pomereno u prvu, odnosno drugu tarifu, ravnomerno po vremenima trajanja tarifa. Može se primetiti da će opterećenje sistema biti značajno niže u periodima vršnog opterećenja što je povoljno za elemente sistema, predikciju opterećenja i tokova snaga, smanjenje gubitaka, kao i poslovanja operatora, a takođe pruža mogućnost za integraciju novih korisnika sistema uz manje investicije od ranije planiranih. Takođe, opterećenje se povećava u periodima koji su najmanje opterećeni (npr. noćni period) što je takođe povoljno za sistem i lakšu integraciju novih korisnika sistema (npr. vetroelektrana čija proizvedena električna energija u toku noći može biti potrošena bliže tački proizvodnje). Navedeni efekti su najizraženiji u zimskom periodu, jer je tada opterećenje najveće, dok u prelaznom periodu gotovo da nema efekata jer su periodi u kojima važi treća i četvrta tarifa jako kratki, i dijagram opterećenja je prilično ujednačen što je posledica optimalnih temperatura te obično nema ni grejanja ni hlađenja prostora. Što je veća razlika u ceni najskuplje i najjeftinije tarife

pretpostavljeni procenti na osnovu kojih je formirana slika 5 će biti viši, odnosno efekti dinamičkih tarifa će biti značajniji.



Slika 4. Raspored tarifa u danu, po periodima godine [13]



Slika 5. Uticaj promene tarifnog sistema na opterećenje sistema

Kako bi se postigli pomenuti optimalni rezultati, potrebno je da četvrti tarifa bude značajno skuplja od trenutno važeće cene za višu tarifu (npr. dvostruko), da treća tarifa bude jednaka cenama trenutno važeće više tarife, druga da bude jednaka cenama trenutno važeće niže tarife, a cena prve, najjeftinije tarife, da bude jednaka polovini trenutno važeće cene za nižu tarifu. Opisanim bi se korisnici sistema podstakli da se potrudu i reorganizuju svoju potrošnju.

Ukoliko primena opisane četiri tarife da očekivane rezultate, vreme primena tarifa je potrebno periodično menjati u skladu sa prilikama u sistemu npr. ukoliko značajan broj korisnika pomeri svoju potrošnju iz tarife četiri u tarifu tri, postoji mogućnost da sistem u tarifi tri bude više opterećen nego u tarifi četiri i tada je neophodno promeniti period trajanja posebnih tarifa kako bi se zadržao njihov smisao. Takođe, to je jasan znak da bi bilo celishodno, nakon ovog prvog koraka, razmišljati o uvođenju pravih dinamičkih tarifa koje bi se menjale npr. na satnom nivou i odražavale pravo stanje u sistemu. Takođe, i snabdevači ukoliko cene električne energije određuju po principu ponude i potražnje, mogu davati nešto povoljnije, odnosno više cene krajnjim kupcima u različitim periodima.

VI-2 Upotreba dinamičkih tarifa

Problem zagušenja, preopterećenja distributivnog sistema, nedostatka električne energije, evakuacije viška električne energije i upravljanja naponom su izazovi lokalnog karaktera. Dobar primer je isporuka električne energije iz distributivnog u prenosni sistem koja je opisana u poglavlju 4. Potrebno je razviti mehanizme po kojima će se dati problemi rešavati lokalno.

Prenos problema na globalno rešavanje može biti kontraproduktivno i stvoriti slične ili drugačije probleme na nekom drugom (udaljenom) delu mreže.

U opisanom slučaju mogu se uvesti različite dinamičke tarife u ograničenoj regiji kojima bi se rešavao lokalni problem u mreži. Neophodno je pratiti stepen integracije obnovljivih izvora energije i u tačkama velike lokalne proizvodnje nuditi niže tarife za korišćenje sistema u periodima proizvodnje električne energije. Navedeno će dovesti lokalno i do smanjenja gubitaka jer će se proizvedena električna energija trošiti blizu mesta proizvodnje u periodu proizvodnje, tj. električna energija će preći kraći put od proizvođača do potrošača i samim tim napraviti manje gubitke.

Pored navedenog, uvođenjem tarife za pristup distributivnom sistemu proizvođačima i skladištima za električnu energiju isporučenu u distributivni sistem (G komponenta) značajan deo izazova će biti prevaziđen. Tako će, u periodima velikog opterećenja mreže, za potrošače važiti visoka tarifa, a niska za proizvođače i skladišta za isporuku električne energije u mrežu (što će motivisati veću isporuku električne energije u mrežu, i manje preuzimanje), i obrnuto u periodima malog opterećenja. Takođe, tarife za pristup sistemu je potrebno rekonstruisati kako bi dominantno bile vezane za električnu energiju jer se će samo na taj način dinamičke tarife dobiti svoj pun smisao.

U kombinaciji sa upotrebom dinamičkih tarifa, korisnici sistema mogu davati i pomoćne usluge pri čemu će za određenu nadoknadu menjati svoj unapred dati plan rada. Na ovaj način eksplicitno, zaključenjem ugovora o pružanju pomoćnih usluga, mogu učestvovati u povećanju fleksibilnosti sistema. Kombinovanjem implicitnih metoda (reakcije na cenovne signale dinamičkih tarifa) i eksplicitnih (pružanjem pomoćnih usluga) distributivni sistem će biti fleksibilniji, a korisnici sistema imati dodatne finansijske uštede, odnosno prihode, na mali uštrb svoje dodatne organizacije i komfora.

Dinamičke tarife svoj puni smisao mogu dobiti razvojem skladišta električne energije jer povećanjem balansne rezerve i kapacitetima za čuvanje električne energije u periodima kada postoji višak (niska cena) i njenom upotrebom u periodima kada u sistemu nema dovoljno električne energije (viša cena) mogu značajno doprineti ubrzanju energetske tranzicije i rešiti delom probleme sa kojima se susreće operator distributivnog sistema.

Pored toga, potrebno je motivisati kupce-proizvođače da postanu što nezavisniji od elektroenergetskog sistema kroz modele podsticaja potrošnje električne energije u periodima kada njihova solarna elektrana proizvodi električnu energiju [22]. Takođe, potrebno je podsticati rad agregatora [21] i različite vidove udruživanja kao što su zajednice obnovljivih izvora energije [23] jer se na taj način efekti svega prethodno iznetog mogu dodatno pojačati. Npr. agregatori pružanjem pomoćnih usluga mogu vršiti upravljanje potrošnjom i proizvodnjom za potrebe upravljanja sistemom. Takođe, ukoliko ne postoje eksplicitni zahtevi operatora, oni mogu delovati npr. i u cilju smanjenja debalansa kako bi sebi i članovima grupe doneli smanjenje troškova, odnosno povećanje prihoda. Agregatori će reakciju korisnika sistema, članova agregatorske grupe, uglavnom finansijski nagraditi kroz odloženo plaćanje računa i smanjenjem visine računa, što dodatno može podstaći uvođenje dinamičkih tarifa

[21]. Upravo zbog navedenog neophodno je dalje razvijati tržište pomoćnih usluga i rad novih korisnika sistema [24].

VI-3 Postojeći modeli upravljanja potrošnjom

Koncept dinamičkih tarifa može se zasnivati na savesnosti korisnika tj. oslanjati se na njihovu reakciju na cenovne signale kako je ranije opisano. Međutim, mogu se uvesti i sistemi za daljinsko upravljanje potrošnjom npr. sistemima za hlađenje, odnosno grejanje prostorija i vode, punjačima za baterije električnih vozila i skladištima električne energije. Predmetni potrošači bi imali napajanje u periodima kada to prilike u sistemu dozvoljavaju, a ne bi imali napajanje kada je sistem preopterećen ili kada ima nedostatak električne energije. Za ovakav režim napajanja imali bi povlašćenu cenu pristupa sistemu.

U Republici Srbiji već postoji izdvojena tarifa za daljinski upravljano potrošnju sa zasebnim merenjem. [4] Trenutni model obuhvata sistem za daljinsko upravljanje kotlovima za grejanje prostorija, TA peći i protočnih bojlera. Isporučena aktivna energija se meri preko posebnog mernog uređaja. Električna energija se isporučuje u trajanju od deset časova dnevno, od čega osam časova neprekidno, u vremenu koje određuje operator sistema, u skladu sa mogućnostima sistema za distribuciju električne energije. [4]

Opisani sistem je razvijen kao pilot projekat, a koji je potrebno ponovo oživeti kako bi se njegove mane i prednosti testirale. Naravno poželjno je proširiti njegove mogućnosti i funkcionalnosti. Ovaj već razvijeni sistem može se koristiti za upravljanje ne samo za sisteme za grejanje prostora i vode, već npr. i za hlađenje, punjenje skladišta i punjenje baterija električnih vozila. Takođe, mogu se umesto trenutno jedne tarife koristiti bar dve koje bi oslikavale približnije opterećenje sistema i eventualno druge lokalne probleme.

Opisano predstavlja idealnu platformu za testiranje dinamičkih tarifa na manjem broju korisnika koji se odluče da učestvuju u programu. Ovo naročito može biti korisno u rešavanju npr. lokalnog zagušenja - daljinski se može pustiti napajanje npr. sistemima za hlađenje prostora kako bi se energija proizvedena u solarnim elektranama iskoristila, ili uključivati programabilne mašine, puniti baterije električnih vozila ili grejati voda u akumulacionim bojlerima po povoljnim cenama (koje teže nuli) jer to doprinosi stabilnom radu sistema i smanjuje gubitke.

VII ZAKLJUČAK

Dvadeset i prvi vek doneo je neminovnost energetske tranzicije. S obzirom na savremeni, potrošački način života potrebno je uložiti velike napore kako bi se ona uspešno sproveda. U skladu sa navedenim, bez svesti svakog pojedinca o neophodnosti energetske tranzicije, i njegovim aktivnim učešćem, spram finansijskih i tehnoloških mogućnosti, taj cilj nije moguće ostvariti.

Priključenje proizvodnih objekata za proizvodnju električne energije (kroz koncepte proizvođača i kupaca-proizvođača) doprinosi energetskej tranziciji ali donosi brojne, ranije opisane, izazove operatorima distributivnog sistema. U prevazilaženju tih izazova značajnu ulogu mogu imati dinamičke tarife, razvoj tržišta pomoćnih usluga, motivisanje novih korisnika sistema, npr. agregatora i skladišta, na aktivno učešće na tržištu električne energije, povećanje energetske efikasnosti, kao i štednja električne energije.

Kako bi došlo do uvođenja koncepta dinamičkih tarifa u Crnoj Gori i Republici Srbiji, pre svega je neophodno unaprediti regulatorno-pravni okvir, razviti sisteme informisanja, merenja, prikupljanja i razmene podataka i modernizovati mrežu i mernu infrastrukturu. Takođe, potrebno je unaprediti tarifne sisteme za obračun pristupa distributivnom sistemu uvođenjem višetarifnog sistema i G komponente, kao i staviti težište na tarife za aktivnu električnu energiju.

Potrebno je u svakom trenutku analizirati mrežu, vršiti studiozno planiranje rada sistema i priključenja novih korisnika sistema kako bi oni doprinosili radu operatora distributivnog sistema, a ne podsticati nastanak novih izazova.

Takođe, potrebno je pokretati pilot projekte gde bi se testirali programi dinamičkih tarifa i pomoćnih usluga u cilju sagledavanja pozitivnih i negativnih aspekata po operatora sistema i korisnike sistema. Modele je potrebno prilagoditi tako da korisnici sistema ostvaruju značajne uštede, odnosno prihode kako bi bili motivisani da učestvuju u programima, uz optimalne efekte na distributivni sistem u smislu smanjenja gubitaka, olakšanja upravljanja, sprečavanja zagušenja i mogućnosti za integraciju novih korisnika sistema bez velikih investicija u sistem.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Zakon o energetici ("Sl. glasnik RS", br. 145/2014, 95/2018 - dr. zakon i 40/2021) https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_energetici.html [pristupljeno 26.03.2024]
- [2] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije ("Službeni glasnik RS", br. 40/21 i 35/2023) <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-koriscenju-obnovljivih-izvora-energije.html> [pristupljeno 26.03.2024]
- [3] Cena pristupa sistemu za distribuciju električne energije, https://www.aers.rs/FILES/Odluke/OCenama/2021-10-01_ED%20Cenovnik%20-%20distribucija.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [4] Metodologija za određivanje cena pristupa sistemu za distribuciju električne energije („Službeni glasnik RS“, broj 105/12), <http://aers.rs/FILES/Metodologije/2012-10-31%20Metodologija%20distribucija%20EE%20SG%20105-12.pdf> [pristupljeno 13.03.2024]
- [5] Zakon o energetici ("Službeni list Crne Gore", br. 005/16 od 20.01.2016, 051/17 od 03.08.2017, 082/20 od 06.08.2020) <https://www.katalogpropisa.me/propisi-crne-gore/zakon-o-energetici-3/> [pristupljeno 13.03.2024]
- [6] Odluka o utvrđivanju regulatorno dozvoljenog prihoda i cijena za korišćenje distributivnog sistema električne energije za 2024. i 2025. godinu, https://regagen.co.me/wp-content/uploads/2023/11/2023.11.28_CEDIS_Odluka-RDP-i-cijene-za-2024.-i-2025-1.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [7] Metodologija za utvrđivanje regulatorno dozvoljenog prihoda i cijena za korišćenje distributivnog sistema električne energije ("Službeni list Crne Gore", broj 71/2022 od 08.07.2022. godine), https://regagen.co.me/wp-content/uploads/2021/12/20220705_Metodologija-CEDIS.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [8] Uredba o uslovima isporuke i snabdevanja električnom energijom ("Sl. glasnik RS", br. 84/2023) https://www.paragraf.rs/propisi/uredba_o_uslovima_iskoruke_i_snabdevanja_elektricnom_energijom.html [pristupljeno 13.03.2024]
- [9] Metodologija za određivanje cene električne energije za javno snabdevanje. http://aers.rs/FILES/Metodologije/2014-08-08_Metodologija%20javno%20snabdevanje%20EE%20SG%2084-14.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [10] Cena električne energije za garantovano snabdevanje, https://www.aers.rs/FILES/Odluke/OCenama/20230926_Odluka%20o%20regulisanju%20ceni.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [11] Cene snabdevanja za domaćinstva u Crnoj Gori, https://www.epcg.com/sites/admin.epcg.com/files/multimedia/main_pages/f

- [iles/2021/10/cijene_za_snabdijevanje_krajnjih_kupaca_elektricne_energije_priključenih_na_distributivni_sistem_2.pdf](#) [pristupljeno 13.03.2024]
- [12] Historical data HUPX, <https://hupx.hu/en/market-data/dam/historical-data> [pristupljeno 13.03.2024]
- [13] Godišnji izveštaj Elektro distribucije Srbije za 2022. godinu, https://elektrodistribucija.rs/o-nama/informacije/dokumenta/GI_2022.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [14] Pravila o radu distributivnog sistema, https://www.aers.rs/FILES/AktiAERS/AERSDajeSaglasnost/2017-07-19_Pravila%20o%20radu%20ED-ODS%20EPS%20distr.pdf [pristupljeno 13.03.2024]
- [15] Godišnji izveštaj Agenciju za energetiku Republike Srbije za 2022. godinu, <https://www.aers.rs/Files/Izvestaji/Godisnji/Izvestaj%20Agencije%202022.pdf> [pristupljeno 13.03.2024]
- [16] Grujić, D., Kuzman, M. Modeli korišćenja električne energije kupaca-proizvođača, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 1, pp 8-16, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-1.08G>
- [17] Uredba o kriterijumima, uslovima i načinu obračuna potraživanja i obaveza između kupca – proizvođača i snabdevača ("Službeni glasnik RS", br. 83/2021 od 27.8.2021. godine) <https://www.propisi.net/uredbu-o-kriterijumima-uslovima-i-nacinu-obracuna-potrazivanja-i-obaveza-izmedju-kupca-proizvodjaca-i-snabdevaca/> [pristupljeno 15.03.2024]
- [18] Funkcionalni zahtevi i tehničke specifikacije AMI/MDM sistema, sveska 1, Tehničke specifikacije brojila električne energije i komunikacionih uređaja, verzija 4.0, https://elektrodistribucija.rs/interni_standardi/pravila/Specifikacija_verzija%204.0_Sveska_1_Usvojeno_na_TSS_EPSD_07022019_objaviti.pdf [pristupljeno 15.03.2024]
- [19] Nova multifunkcionalna brojila, <https://cedis.me/nova-multifunkcionalna-brojila/> [pristupljeno 15.03.2024]
- [20] Dynamic network tariffs - an opportunity for the energy transition, November, 2023, CIREN, <http://www.cired.net/cired-working-groups/dynamic-network-tariffs-wg-2020-2> [pristupljeno 13.03.2024]
- [21] Grujić, D., Kuzman, M. Uloga agregatora u razvoju tržišta električne energije, Electric Power Industry Journal, Vol. 1, No. 1, Article 2, pp. 15-29, 2023. <https://doi.org/10.18485/epij.2023.1.1.2>
- [22] Grujić, D., Kuzman, M., Đurišić, Ž. Novi model obračuna električne energije kupaca-proizvođača, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 25, No. 2, pp. 57-67, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-2.57G>
- [23] Kuzman, M., Grujić, D. Uloga zajednica obnovljivih izvora energije u energetske tranziciji, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 25, No. 1, pp 64-69, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE21-4.64R>
- [24] Directive (EU) 2019/944 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 on common rules for the internal market for electricity and amending Directive 2012/27/EU, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32019L0944> [pristupljeno 15.03.2024]

AUTORI/AUTHORS

Dunja Grujić – Elektro distribucija Srbije d.o.o. Beograd, dunja.grujic@ods.rs, ORCID [0000-0001-9298-6249](https://orcid.org/0000-0001-9298-6249)
Miloš Kuzman – Udruženje za pravo energetike Srbije, milos.kuzman@upes.rs, ORCID [0000-0002-9769-9713](https://orcid.org/0000-0002-9769-9713)
dr Željko Đurišić - vanredni profesor, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, djurisic@etf.rs, ORCID [0000-0003-2048-0606](https://orcid.org/0000-0003-2048-0606)

The Use of Price Signals to Accelerate the Energy Transition

Abstract – Energy transition from fossil to renewable energy sources has accelerated significantly in the past few years due to the dramatic consequences of environmental pollution, climate change and the decreasing level of fossil fuel reserves. This paper presents certain energy transition challenges faced by the distribution system operator, some of which are: difficult management of the distribution power system, increase in energy losses, as well as the need for additional investments in the distribution network in order to enable the connection of new system users. One of the possibilities for facilitating the operation of the distribution system operator in the conditions of energy transition is management of electricity consumption and production. The possibility of using dynamic electricity prices and changing the way of determining prices of access to the distribution power system with the aim of managing consumption and production with price signals was analysed in this paper. The current price models of suppliers and operators of the distribution system in Montenegro and the Republic of Serbia are shown here. In addition to this, the paper also presents proposals of new price models and their impact on operators of the distribution system, suppliers, and system users.

Index Terms – Energy transition, Distribution system operator, Price signals, Management of electricity consumption and production

Korišćenje otpadne toplote u prehrambenoj industriji primenom kompresorske toplotne pumpe

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

Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Univerzitet u Kragujevcu

Rezime - Industrija hrane i pića je značajna industrijska grana u pogledu potrošnje energije. Ona učestvuje sa oko 30% u ukupnoj potrošnji finalne energije u sektoru industrije. Od ukupne količine energije koja se potroši u ovoj industrijskoj grani najviše se troši na konverziju u toplotnu energiju i na procese hlađenja. Prema istraživanjima čak 30% toplotnih tokova u prehrambenoj industriji gubi se na kraju procesa u vidu otpadne toplote, koja je najčešće relativno niske temperature. Utvrđivanjem postojanja izvora otpadne toplote adekvatnog energetskog potencijala i primenom toplotnih pumpi moguće je podići temperaturni nivo na vrednost koja zadovoljava zahteve procesa. Mapiranje izvora otpadne toplote, utvrđivanje energetskog potencijala tih izvora i izbor optimalne snage toplotne pumpe moguće je izvršiti samo sistematskim pristupom i detaljnom analizom postrojenja.

U radu je predložena metodologija za mapiranje izvora otpadne toplote u prehrambenoj industriji i utvrđivanje mogućnosti za implementaciju kompresorske mehaničke toplotne pumpe za iskorišćenje otpadne toplote. Predložena metodologija je testirana na studiji slučaja, mlekari, u kojoj se prosečno prerađuje 100 tona/dan mleka, na 7 proizvodnih linija. Primenom razvijene metodologije mapirano je ukupno šest lokacija (izvora) otpadne toplote od kojih su dve pogodne za primenu toplotne pumpe. Nakon izvršene tehno-ekonomske analize utvrđeno je da se ukupna investicija u sistem za prikupljanje i akumuliranje otpadne toplote i nabavku toplotne pumpe isplati za oko 17 meseci. Ukupno smanjenje emisije CO₂ je 680 tona godišnje.

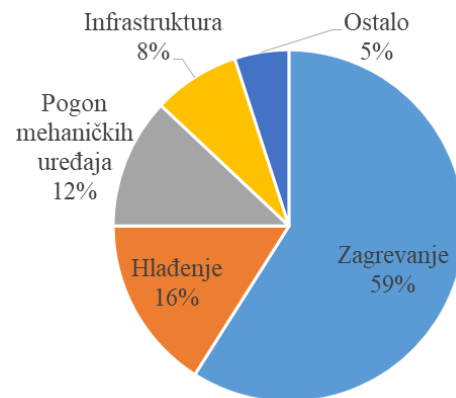
Ključne reči - prehrambena industrija, otpadna toplota, toplotna pumpa, mlekara

I UVOD

Potrošnja finalne energije u industrijskom sektoru u zemljama Evropske unije ima prosečan udeo od 27% u ukupnoj potrošnji energije i 20% učešća u ukupnom BDP-u, od čega se čak 26% troši u sektoru prerade hrane [1]. Ako se uzme u obzir celokupan lanac snabdevanja hranom koji obuhvata proizvodnju hrane na farmama do dopremanja gotovih prehrambenih proizvoda do krajnjih kupaca i potrošača, na globalnom nivou potrošnja energije ovog sektora ima udeo od 30% u ukupnoj potrošnji finalne energije [2]. U Americi, prehrambena industrija je peti po veličini potrošač energije [3], sa udelom od 19% u ukupnoj potrošnji primarne energije [4, 5] i udelom od 10% u BDP-u [6]. U Francuskoj, učešće prehrambenog sektora u ukupnoj potrošnji energije je 14% [4], u Švedskoj 13% [7], a u Engleskoj 18% [8]. U Srbiji, energija koja se potroši u prehrambenom sektoru učestvuje sa preko 35% u ukupnoj potrošnji energije proizvodnog sektora [9]. Zajedno sa sektorom

proizvodnje nemetalnih mineralnih materijala, prehrambena industrija čini više od polovine ukupne potrošnje energije u industriji u Srbiji [10].

U ukupnoj potrošnji energije dominantno se koriste prirodni gas 46% i električna energija 29%, a zatim ugalj 9% i nafta i njeni derivati 8%. Najveći deo energije se troši za konverziju u toplotu neophodnu za različite termičke procese i procese sušenja, čak 59%, dok se za procese hlađenja i za različite motorne pogone troši 16% i 12% električne energije, respektivno (Slika 1) [3, 11].



Slika 1. Tipična potrošnja energije u prehrambenom sektoru industrije

Najviše toplotne energije se koristi za procese pečenja, sušenja, pasterizacije, ukuvavanja i za zagrevanje prostora, dok se električna energija najviše koristi za procese hlađenja 31% i za pogon elektromotora 25%. Procesno grejanje i hlađenje, u sektoru prerade hrane često imaju udeo od preko 70% u potrošnji energije [12]. U mlekarama na primer, često se za procese hlađenja i zamrzavanja potroši i preko 80% električne energije [13]. Sa druge strane, procene su da se čak 30% toplotnih tokova energije u prehrambenoj procesnoj industriji gubi na kraju procesa u vidu otpadne toplote (OT), najčešće srednje ili niske temperature. Otpadna toplota srednje temperature (230°C do 650 °C) obično se javlja na kraju procesa sušenja ili pečenja i u praksi se najčešće koristi za predgrevanje ili isparavanje. Otpadna toplota niske temperature najčešće se manifestuje pri procesima kuvanja, pečenja, sušenja, isparavanja, pasterizacije, sterilizacije, pranja, destilacije i hlađenja. Uglavnom je preko 90% raspoloživog tehničkog potencijala otpadne toplote u sektoru prerade hrane niskog temperaturnog nivoa (100-200°C) [16]. Nedovoljno visok temperaturni nivo OT i vremensko neslaganje dostupnosti izvora OT sa zahtevima za toplotom procesa

onemogućavaju da se OT koristi direktno. Akumuliranje otpadne toplote i primena toplotne pumpe za podizanje nivoa temperature predstavljaju jedno od mogućih rešenja za iskorišćenje ovog potencijala [17].

Poslednjih godina u ekspanziji je upotreba toplotnih pumpi u industriji, naročito kada je u pitanju njihova primena u različitim tehnološkim procesima poput sušenja, destilacije, proizvodnje pare, ukuvavanja, isparavanja, zagrevanja različitih fluida ili istovremenog zagrevanja jednog i hlađenja drugog fluida. Obzirom na to da se koriste za rekuperaciju otpadne toplote iz različitih procesa, toplotne pumpe predstavljaju efikasnu i ekonomičnu alternativu za poboljšanje ukupne energetske efikasnosti proizvodnog procesa [18]. Efikasnost industrijskih toplotnih pumpi je obično veća od onih koje se koriste za zagrevanje objekata jer one uglavnom rade pri relativno ustaljenim režimima, a i prilikom podizanja nivoa toplotne energije obično treba da savladaju manju temperaturnu razliku između toplotnog izvora i toplotnog ponora. Prema [19], toplotnom pumpom je sa izvora otpadne toplote temperaturnog nivoa 45-60°C, isporučeno od 2,5 pa čak do 11 puta više korisne energije u poređenju sa drugim (komercijalnim) tehnologijama za rekuperaciju otpadne toplote. Raznolikosti izvora otpadne toplote i opsega temperatura uslovlili su razvoj različitih tipova industrijskih toplotnih pumpi koje mogu biti klasifikovane na različite načine. Na primer, prema vrsti pogonske energije dele se na pumpe pogonjene mehaničkom pogonskom energijom i one pogonjene toplotom, prema vrsti procesa na kompresione, ejektorske i apsorpcione, prema vrsti ciklusa na one koje rade po otvorenom ili one koje rade po zatvorenom ciklusu, u odnosu na vrstu fluida, prema izvoru toplote itd. [19]. Toplotne pumpe čiji se princip funkcionisanja zasniva na kompresiji pare su najzastupljenije, čak 95% od ukupnog broja instaliranih toplotnih pumpi u industriji [20]. Koeficijent performansi (COP) kompresorskih toplotnih pumpi se kreće u granicama od 3-8.

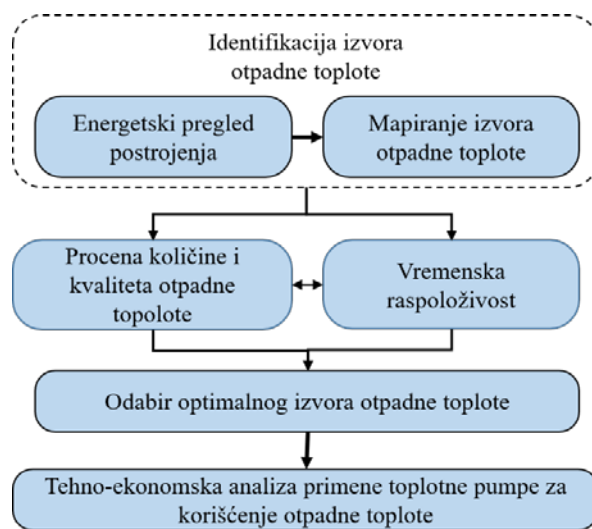
Iako su razlozi za primenu toplotnih pumpi u industriji očigledni, trenutno je u svetu i dalje mali broj postrojenja koja koriste toplotne pumpe. Razlog su najčešće visoka početna investicija, nedostatak stručnosti i nezainteresovanost donosioca odluka u preduzeću za investiranje u mere energetske efikasnosti.

U radu će biti prikazana metodologija za mapiranje lokacija potencijalnih izvora otpadne toplote i korišćenje raspoloživog potencijala primenom kompresorske toplotne pumpe.

II METODOLOGIJA ZA MAPIRANJE I KORIŠĆENJE OTPADNE TOPLOTE PRIMENOM KOMPRESORSKE TOPLOTNE PUMPE

Identifikacija (mapiranje) potencijalnih izvora otpadne toplote i utvrđivanje mogućnosti za njeno iskorišćenje može da bude relativno složen zadatak. Često su procesna postrojenja koja su predmet analize vrlo složena. U njima se obavlja mnoštvo različitih procesa i koriste se različiti oblici finalne energije, pa je zato vrlo teško prepoznati potencijalne lokacije na kojima se javlja otpadna toplota. Pored toga potrebno je i proceniti kompatibilnost izvora otpadne toplote i krajnje upotrebe. S tim u vezi, prvi korak predložene metodologije predstavlja identifikaciju izvora otpadne toplote u okviru koje je predviđeno sprovođenje energetskog pregleda prema standardu ISO 50002 (Slika 2).

Prvo se obavlja se intervju sa rukovodstvom preduzeća i donosiocima odluka. Zatim se utvrđuju kriterijumi i prioriteti na osnovu kojih se pristupa izradi detaljnog plana sprovođenja aktivnosti (merenja). Obzirom na to da se potrošnja energije svakog pojedinačnog procesnog aparata ili mašine često značajno razlikuje od projektovane ili od one koju propisuje proizvođač, merenje predstavlja neizbežnu fazu pri obavljanju svakog energetskog pregleda. Merenjem potrošnje energije svakog pojedinačnog uređaja na proizvodnoj liniji povećava se baza podataka koja u narednoj fazi omogućava lakše razumevanje energetskih tokova i proračun specifičnih indikatora potrošnje energije. U narednoj fazi, na osnovu dobijenih pokazatelja, mapiraju se lokacije koje predstavljaju potencijalne izvore otpadne toplote. Utvrđuje se vremenska raspoloživost izvora i procenjuje se dostupna količina toplote ili toplotna snaga. Obzirom na to da je ekonomski neisplativo korišćenje OT primenom toplotne pumpe ako izvor OT nije konstantno dostupan [21], razmatra se pomeranje procesa, integracija više izvora i akumulacija toplotne energije. Pored vremenske raspoloživosti, neophodno je definisati temperature i toplotnu snagu. Vrednost raspoložive snage izvora OT najčešće je moguće utvrditi samo teorijskim proračunima. Kako se proces razmene toplote najčešće obavlja pri konstantnom pritisku konačan izraz za toplotnu snagu P [W] ima oblik prikazan jednačinom 1.



Slika 2. Šematski prikaz predložene metodologije

$$P = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

gde su:

$\dot{m}$ [kg/s]- maseni protok izvora OT,

c_p [J/kgK] - specifična toplota medijuma sa koga se vrši prenos toplote,

ΔT [K] - razlika početne i krajnje temperature OT.

U slučaju kada fluid menja fazu, neophodno je pri proračunu uzeti u obzir energiju koja se troši na isparavanje fluida ili koja se dobija kondenzacijom (jednačina 2).

$$P = \dot{m} \cdot (h_p - c_p \cdot T_v) \quad (2)$$

gde su:

c_p [J/kgK] – specifična toplota medijuma u tečnom agregatnom stanju,

T_v [K] – krajnja temperatura medijuma u tečnom agregatnom stanju,

h_p [J/kg] – entalpija u gasovitom agregatnom stanju.

Vrednost entalpije se određuje na osnovu poznatih vrednosti pritiska i temperature. U praksi je nemoguće sav raspoloživ potencijal otpadne toplote iskoristiti, pa je neophodno uzeti u obzir i gubitke energije koji nastaju u procesu razmene toplote i transporta toplote do mesta krajnjeg korišćenja.

Nakon mapiranja adekvatnog izvora OT i procene dostupnog potencijala i kvaliteta OT bira se odgovarajuća toplotna pumpa nakon čega se vrši tehno-ekonomska analiza. Pri analizi, razmatraju se toplotne pumpe čije radne karakteristike odgovaraju parametrima izvora OT i zahtevima za toplotom. Obično se usvaja toplotna pumpa sa snagom isparivača za 20% manjom od snage izvora OT. Temperatura kondenzatora je za najviše 15 °C viša od temperature medijuma koji se greje (toplotnog ponora). Jednačinom 3 opisana je količina energije koja je dostupna na kondenzatoru.

$$Q_{Ponor} = Q_{izvor} \cdot \left(\frac{(\alpha \cdot COP) + \beta}{(\alpha \cdot COP) + \beta - 1} \right) \quad (3)$$

gde su:

Q_{Ponor} [kW] – snaga kondenzatora,

α, β [–] – regresioni koeficijenti,

COP [–] – idealni koeficijent performansi mehaničke kompresorske toplotne pumpe.

Obzirom na to da vrednost koeficijenta performansi, zavisi od temperature izvora otpadne toplote i od izbora radnog fluida, za korelaciju između stvarne i idealne vrednosti koriste se regresioni koeficijenti [22]. Idealni koeficijent performansi mehaničke toplotne pumpe je funkcija temperatura kondenzatora i isparivača (jednačina 4):

$$COP = \frac{T_{con}}{T_{con} - T_{evap}} \quad (4)$$

gde su:

T_{con} [K] – temperatura kondenzatora,

T_{evap} [K] – temperatura isparivača.

Poslednji korak predložene metodologije je tehno-ekonomska analiza primene izabrane toplotne pumpe za korišćenje otpadne toplote sa prethodno mapiranih izvora. Obzirom na to da je prema istraživanju za donosiocel odluka u preduzećima iz sektora prehrambene industrije u Srbiji, najvažniji ekonomski pokazatelj opravdanosti investicije prost period povraćaja investicije [21] u radu će biti analiziran samo za ovaj ekonomski pokazatelj.

Prost period povraćaja investicije (PB) predstavlja odnos uložene investicije i ostvarene godišnje dobiti:

$$PB = \frac{Inv}{NGD} \quad (5)$$

gde su:

Inv [€] – vrednost investicije,

NGD [€/god] – neto godišnja dobit.

Neto godišnja dobit je definisana kao razlika operativnih troškova pre implementacije tehnologija za iskorišćenje otpadne toplote i operativnih troškova posle, uvećanih za troškove investicije, rada i održavanja tehnologije za iskorišćenje otpadne toplote koja je implementirana. Kako su operativni troškovi nakon primene tehnologija za iskorišćenje otpadne toplote manji za vrednost ostvarene dobiti, konačan izraz za neto godišnju dobit prikazan je jednačinom 6.

$$NGD = UP - (TO + OT) \quad (6)$$

gde su:

UP [€/god] – ukupni godišnji prihodi,

TO [€/god] – troškovi održavanja TP,

OT [€/god] – operativni troškovi TP.

Ukupna vrednost investicije predstavlja zbir investicionih troškova: projektovanja sistema, nabavka i ugradnja sistema za prikupljanje i distribuciju OT i nabavka i puštanje u rad toplotne pumpe. U zavisnosti od složenosti sistema ovi troškovi mogu značajno varirati pa se predlaže detaljna analiza tržišta i donošenje odluke u dogovoru sa rukovodstvom preduzeća.

Ukupni godišnji prihodi su:

$$UP = Q_{ponor} \cdot cte \cdot t \quad (7)$$

gde su:

cte [€/kWh] – cena toplotne energije,

t [h/god] – godišnje časovno angažovanje postrojenja.

III STUDIJA SLUČAJA ISKORIŠĆENJA OTPADNE TOPLOTE

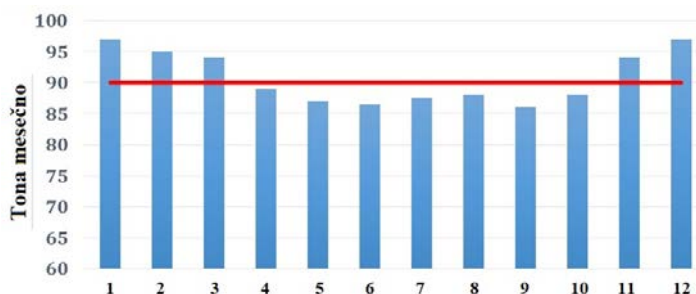
Predložena metodologija je testirana na studiji slučaja, mlekari čiji je dnevni kapacitet prerade sirovog mleka oko 100 tona. U mlekari koja je predmet analize obavljaju se energetske zahtevni mehanički i termički procesi (pasterizacija, kuvanje, separacija, ultrafiltracija, homogenizacija, hlađenje i sl.). Proizvodi se osam različitih mlečnih proizvoda na sedam proizvodnih linija. Proizvodni asortiman čine: sirevi, pavlake, jogurt, kiselo mleko, pasterizovano mleko i paprika u pavlaci.

Celokupna količina mleka koja se kamionima doprema do mlekare se na mestu prijema, a pre skladištenja hladi na temperaturu 4-8°C. Zatim se, u zavisnosti od plana proizvodnje, mleko pasterizuje i standardizuje na željeni procenat masnoće. Zbog raznolikosti tehnologija proizvodnje, svaki od proizvoda ima sopstvenu proizvodnu liniju. Na kraju proizvodnog procesa svi gotovi proizvodi se odlažu u hladnjaču gde se hlade na temperaturu od 4 °C.

Kada je u pitanju potrošnja energije analizirane mlekare, od energenata se koriste biomasa i el. energija. Celokupni zahtevi za toplotom podmiruju se sagorevanjem drvnih briketa u dva toplovodna kotla nominalne snage 2x500 kW. Dnevna potrošnja briketa je u proseku oko 3 tone. Na slici 3 je prikazana tipična mesečna potrošnja briketa. Izlazna temperatura vode iz kotla je najčešće oko 100 °C.

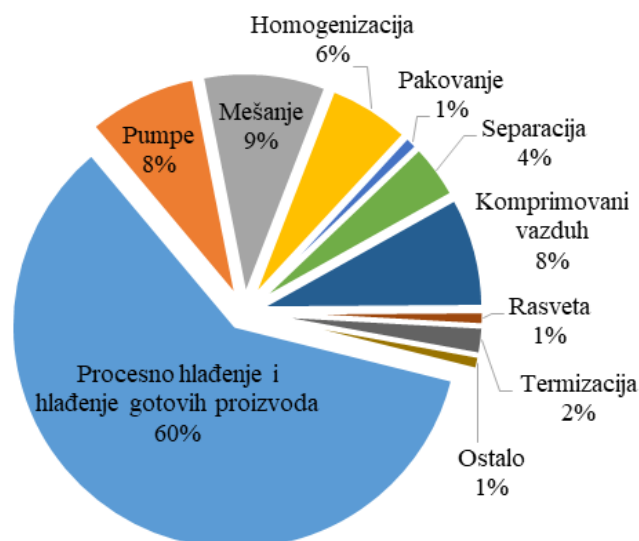
Obzirom na to da je obim proizvodnje konstantan tokom cele godine, povećanje potrošnje briketa u zimskim mesecima je zbog potreba zagrevanja zgrade. Utvrđeno je da se za potrebe grejanja objekta godišnje potroši 38 t briketa, što je uzimajući u obzir usvojenu efikasnost kotla od 75% i donju toplotnu moć

korišćenog briketa od 18 MJ/kg koje deklarišu proizvođači, oko 140 MWh toplotne energije godišnje ili 3% od ukupne potrošnje.

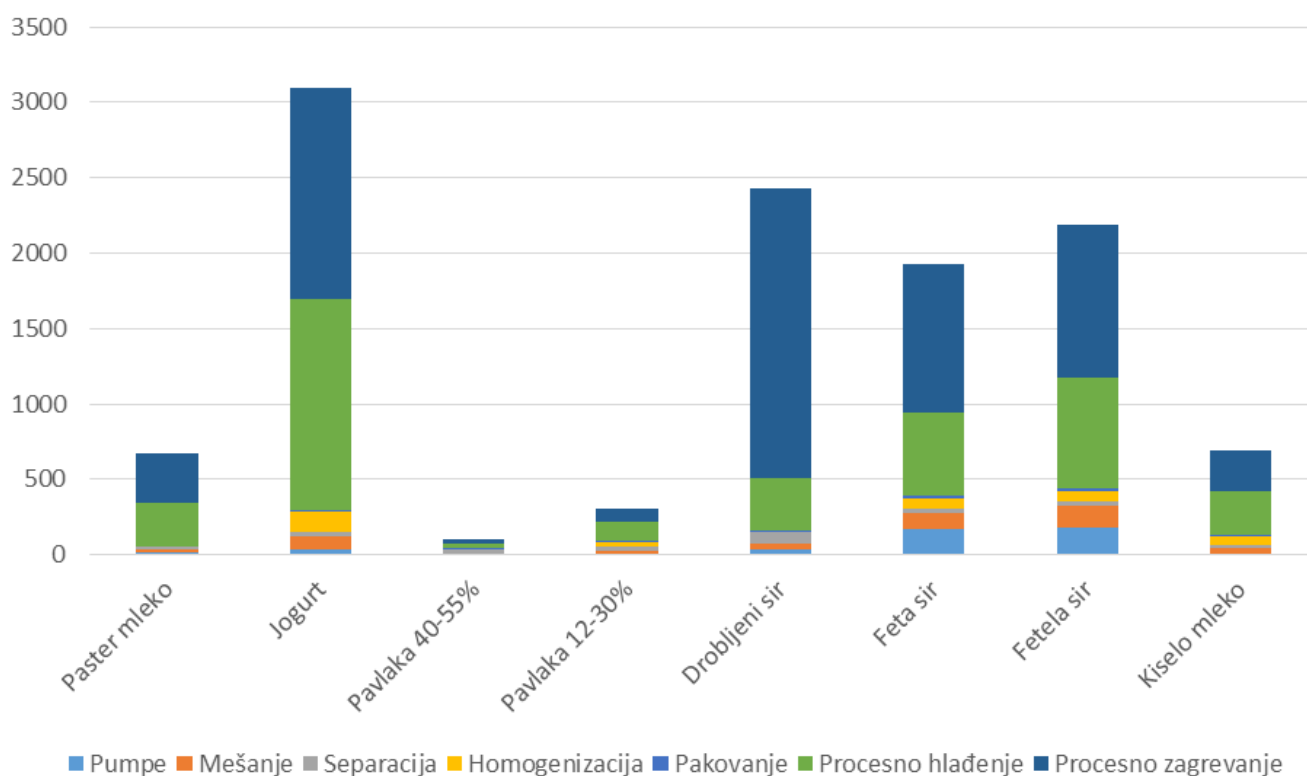


Slika 3. Mesečna potrošnja briketa analizirane mlekare

Prosečna mesečna potrošnja električne energije je oko 200.000 kWh. Najveći udeo u potrošnji električne energije je za procesno hlađenje i hlađenje gotovih proizvoda. Merenjem potrošnje svakog pojedinačnog potrošača u realnim eksploatacionim uslovima utvrđene su vrednosti potrošnje električne energije za svaku od faza proizvodnje, kao i udeli potrošnje pojedinih električnih aparata i uređaja u ukupnoj potrošnji (Slika 4).



Slika 4. Raspodela potrošnje električne energije



Slika 5. Raspodela potrošnje energije za svaki od proizvoda analizirane mlekare na dnevnom nivou

Za svaki od proizvoda izračunata je vrednost specifične potrošnje energije po jediničnoj meri gotovog proizvoda. Potrošnja finalne energije po kilogramu obrađenog mleka prosečno iznosi 0,12 kWh, dok se po toni dobijenog proizvoda u proseku potroši oko 0,3 kWh. Raspodela potrošnje energije za svaki od proizvoda analizirane mlekare na dnevnom nivou prikazana je na slici 5. Detaljnim pregledom postrojenja utvrđene su lokacije koje predstavljaju potencijalne izvore otpadne toplote: rashladna voda

kompresora, kondenzatori rashladnih mašina i čileri, dimni gasovi kotla, kao i procesna toplota na linijama za proizvodnju „Feta“ i „Drobljenog“ sira. Svi mapirani izvori OT sa osnovnim parametrima prikazani su u tabeli 1. Uzimajući u obzir to da je procenjeni tehnički potencijal OT kondenzatora rashladnih mašina najveći i da po svim parametrima (vremenska dostupnost, temperaturni nivo i dr.) odgovara primeni tehnologije toplotne pumpe, predmet analize biće samo korišćenje OT sa ovih izvora.

Tabela 1 – Osnovni parametri mapiranih izvora otpadne toplote

	Izvori otpadne toplote	Temperatur a izvora OT [°C]	Toplotna snaga [kW]	Vremenska raspoloživos t [h/dan.]	Količina toplote [kWh/dan.]	Vreme dostupnosti
I1	Procesna otpadna toplota (I linija)	65	200	4	820	11-15h
I2	Kondenzator (hladnjača)	55	221	24	5.300	00-24h
I3	Rashladna voda kompresora	60	15,8	24	378	00-24h
I4	Izduvni gasovi kotlova	130	20,6	24	490	00-24h
I5	Kondenzator (procesno hlađenje)	55	363	24	5.400	00-24h
I6	Procesna otpadna toplota (II linija)	54	65	6	390	7-13h

Potencijal otpadne toplote sa kondenzatora hladnjače

Svi proizvodi se nakon pakovanja na proizvodnim linijama, privremeno (do isporuke) smeštaju u hladnjaču gde se u roku od najviše 5 sati hlade na temperaturu od 5-8°C. Vreme potrebno za hlađenje proizvoda uslovljeno je tehnologijom, a projektovana snaga isparivača je oko 200 kW. Dnevne količine gotovih proizvoda koje se smeštaju u hladnjaču sa temperaturama i količinom rashladne energije neophodne za hlađenje na zadatu temperaturu (8 °C) prikazane su u tabeli 2. Iz tabele se može videti da je dnevna proizvodnja mlečnih proizvoda oko 50 t. U tabeli nisu prikazani podaci o dnevnim količinama pasterizovanog mleka jer se ono ne smešta u hladnjaču.

Tabela 2 – Dnevne količine gotovih proizvoda i energija potrebna za hlađenje istih na temperaturu od 8 °C

Proizvod	Masa proizvoda [kg/dnevno]	Temperatura proizvoda [°C]	Specifična toplota [kJ/kg °C]	Energija koja je potrebna za hlađenje [kWh]
Sir (Fetela)	6.800	35	3,27	166,8
Sir (Feta)	3.200	30	3,27	64
Drobljeni sir	4.700	68	3,5	274,2
Jogurt	20.000	26	3,65	365
Kiselo mleko	7.000	41	3,5	224,6
Pavlaka 40 -50%mm	1.500	15	3,51	10,2
Pavlaka 12 - 20%mm	3.800	45	3,55	138,7
Namazi	2.500	70	3,52	151,6

Za svaki od proizvoda (korišćenjem jednačine 1) izračunata je količina energije koja je potrebna za hlađenje, a koja za sve proizvode koji se na dnevnom nivou unesu u hladnjaču iznosi 1.395 kWh/dan.

Rashladni sistem hladnjače čine tri centrale sa po tri kompresora, ukupne nominalne snage 117 kW. Korišćenjem jednačine 8:

$$COP_{RU} = P_{RU}^{EVAP} / P^{COMP} \quad (8)$$

gde su:

COP_{RU} [-] – koeficijent performansi rashladnog uređaja,

P_{RU}^{EVAP} [kW] – rashladna snaga isparivača,

P^{COMP} [kW] – snaga kompresora,.

izračunata je vrednost koeficijenta performansi rashladnog uređaja ($COP=1,7$) koji figuriše u jednačini 9, za proračun raspoložive toplotne snage na kondenzatoru [23].

$$P_{Out}^{COND} = 0.7 \cdot (1 + COP_{RU}) \cdot P^{COMP} \quad (9)$$

gde je:

P_{Out}^{COND} [kW] – raspoloživa toplotna snaga na kondenzatoru.

Obzirom na to da je nemoguće celokupnu teorijski dobijenu količinu energije na kondenzatoru iskoristiti, usvojen je stepen iskorišćenja od 70%. Na ovaj način izračunata je toplotna snaga na kondenzatoru rashladnog uređaja hladnjače u analiziranoj mlekari (221 kW). Procenjena količina otpadne toplote koja je na dnevnom nivou dostupna na kondenzatoru je oko 5.300 kWh pri temperaturi od 55 °C. Temperatura je usvojena na osnovu merenja, preporuka i iskustveno.

Potencijal otpadne toplote sa kondenzatora rashladnog uređaja za procesno hlađenje

Procesno hlađenje se u analiziranoj mlekari obavlja gotovo na svim proizvodnim linijama. Radni fluid kojim se preko pločastog razmenjivača toplote odvodi toplota iz sirovine koja se hladi je voda temperature 0-4°C. Svi procesi koji imaju potrebu za hlađenjem snabdevaju se ledenom vodom iz dva bazena ukupne zapremine 50 m³. Ukupna instalisana snaga kompresora rashladnih uređaja kojima se hlade bazeni sa vodom je 120 kW. Dnevne potrebe za procesnim hlađenjem su oko 4.700 kWh rashladne energije, a snage isparivača su 2x200 kW. Na osnovu svih navedenih veličina izračunata je vrednost koeficijenta performansi rashladnih uređaja $COP=3,3$ i toplotne snage koja je dostupna na kondenzatorima, i koja iznosi 363 kW, ukupno. Usvojena vrednost temperature otpadne toplote je 55°C. Procenjena količina toplote koja je na dnevnom nivou dostupna na kondenzatorima rashladnih mašina za procesno hlađenje je 5.400 kWh.

IV TEHNO-EKONOMSKA ANALIZA UGRADNJE TOPLLOTNE PUMPE

Nakon detaljne energetske revizije postrojenja i procene potencijala otpadne toplote, u dogovoru sa donosiocima odluka u preduzeću, izvršena je tehnno-ekonomska analiza ugradnje toplotne pumpe za iskorišćenje otpadne toplote sa kondenzatora hladnjače. Uzimajući u obzir raspoloživi potencijal toplotne energije (5.400 kWh/dan) usvojena je visokotemperaturna toplotna pumpa "GEA open type heat pumps 35HP" nominalne električne snage 26kW i toplotne snage od 250 do 320kW [24]. Koeficijent performansi toplotne pumpe za režim 45/110 °C se prema katalogu proizvođača kreće u granicama od 3,3 do 3,6. Izračunata je dnevna količina isporučene toplotne energije od oko 7.600 kWh, tj. 50% od ukupne potrošnje toplotne energije analizirane mlekare. U tom slučaju godišnja ušteda u potrošnji toplotne energije je oko 126.000 €, računato za srednju cenu briketa od 230 € po toni. Procenjeni godišnji troškovi rada toplotne pumpe za srednju cenu električne energije od 0,089 €/kWh su oko 18.000 €. Ukupna investicija u sistem za prikupljanje, akumuliranje toplotne energije i toplotnu pumpu je

oko 150.000 € od čega je 120.000 €. cena toplotne pumpe. Usvajena vrednost godišnjih troškova održavanja je 2% od cene investicije. Na osnovu svega navedenog vrednost neto godišnje dobiti je 105.000 €, pa je prost period povraćaja investicije oko 17 meseci. Kada su emisije ugljen-dioksida u pitanju, računato za koeficijente emisija od 0,3 kg/kWh za brikete (prema deklaraciji proizvođača) i 0,8 kg/kWh za električnu energiju, dobijeno je smanjenje emisija za 680 tCO₂ godišnje.

V ZAKLJUČAK

Potrošnja energije u sektoru prerade hrane ima značajan udeo u ukupnoj potrošnji energije u industrijskom sektoru, posebno u zemljama u razvoju. Sa druge strane procenjuje se da se oko 20-25% energije u ovom sektoru gubi na kraju procesa u vidu otpadne toplote, često relativno niske temperature ispod 200 °C, a najčešće i ispod 100 °C. Otpadnu toplotu niskog temperaturnog nivoa obično je najpraktičnije i najisplativije iskoristiti direktno, kada za to postoje uslovi (vremensko podudaranje sa zahtevima za toplotom, adekvatna temperatura i količina raspoložive energije i dr.). U slučaju kada mapirani izvor otpadne toplote ima visok energetski i korisni potencijal (količina raspoložive energije i neprekidna vremenska dostupnost), a nižu temperaturu od zahteva u postrojenju, treba razmotriti mogućnosti za implementaciju toplotne pumpe u cilju iskorišćenja raspoloživog potencijala. Mapiranje izvora otpadne toplote i utvrđivanje raspoloživog potencijala predstavlja relativno složen zadatak. Metodologija prikazana u radu koja se bazira na sprovođenju detaljnog energetskog pregleda postrojenja i osnovnih termodinamičkih proračuna može znatno pomoći energetskim menadžerima i donosiocima odluka u preduzećima koja se bave preradom hrane.

Testiranje razvijene metodologije na studiji slučaja (mlekarska industrija, kod koje je najviše otpadne toplote bilodo stupno u rasponu od 55-60 °C) pokazalo je da se investicija u toplotnu pumpu za iskorišćenje otpadne toplote sa kondenzatora rashladne mašine isplati za manje od dve godine, što predstavlja prihvatljiv period otplate.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] European commission, Eurostat, <https://ec.europa.eu/eurostat> [pristupljeno 01.12.2024]
- [2] Jagtap, S., Rahimifard, S., Duong, L.N.K. Real-time data collection to improve energy efficiency: a case study of food manufacturer. *Journal of Food Processing and Preservation*, Vol. 46, e14338, 2022. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14338>
- [3] Wang, L., *Energy Efficiency and Management in Food Processing Facilities*, CRC Press Taylor&Francis Group, LLC, 2009.
- [4] OECD, *Improving Energy Efficiency in the Agro-food Chain*, OECD Green Growth Studies, OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/9789264278530-en>
- [5] Canning, P., Charles, A., Huang, S., Polenske, K.R., Waterset, A. *Energy Use in the U.S. Food System*, Economic Research Report No. 94, United States Department of Agriculture, 2010.
- [6] Egilmez, G.M., Kucukvar, M., Tatari, O., Khurum, M., Bhutta, S. Supply chain sustainability assessment of the U.S. food manufacturing sectors: A life cycle-based frontier approach, *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 82, pp. 8-20, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.10.008>
- [7] Wallgren, C., Hojer, M. Eating energy- identifying possibilities for reduced energy use in the future food supply system, *Energy Policy*, Vol. 37, pp. 5803-5813, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.046>
- [8] Tassou, S., Kolokotroni, M., Gowreesunker, B., Stojceska, V., Azapagic, A., Fryer, P., Bakalis, S. Energy Demand and Reduction Opportunities in the UK Food Chain, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Energy*, Vol. 167, No. 3, pp. 162-170, 2014. <https://doi.org/10.1680/ener.14.00014>
- [9] Jovanović, B., Filipović, J., Bakić, V. Prioritization of manufacturing sectors in Serbia for energy management improvement – AHP method, *Energy Conversion and Management*, Vol. 98, pp. 225-235, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.03.107>
- [10] Jovanović, B., Filipović, J., Bakić, V. Energy management system implementation in Serbian manufacturing - Plan-Do-Check-Act cycle approach, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 162, pp. 1144-1156, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.140>
- [11] Compton, M., Willis, S., Rezale, B., Humes, K. Food processing industry energy and water consumption in the Pacific, *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, Vol. 47, pp. 371-383, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2018.04.001>
- [12] Tiwari, K.B., Norton, T., Holden, N.M. *Sustainable Food Processing*, John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [13] Nunes, J., Da Silva, P., Andrade, L.P., Gaspar, P.D. Key points on the energy sustainable development of the food industry – Case study of the Portuguese sausages industry, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, pp. 393-411, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.019>
- [14] International Energy Agency (IEA), *Industrial Energy-Related Technologies and Systems A Technology Collaboration Programme established under the auspices of the International Energy Agency* <https://iea.blob.core.windows.net/assets/imports/events/183/1.ThoreBerntsson1703202.pdf> [pristupljeno 12.01.2024]
- [15] Al-Rabghi, O.M., Beiruty, M., Akyurt, M., Najjar, Y., Alp, T. Recovery and utilization of waste heat, *Heat Recovery Systems and CHP*, Vol. 13, No. 5, pp. 463-470, 1993. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(93\)90047-Y](https://doi.org/10.1016/0890-4332(93)90047-Y)
- [16] Papapetrou, M., Kosmadakis, G., Cipollina, A., La Commare, U., Micale, G. Industrial waste heat: Estimation of the technically available resource in the EU per industrial sector, temperature level and country, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 138, pp. 207-216, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.043>
- [17] Baradei, Y., Hawlader, M.N.A., Ismail, A.F., Hrairi, M. Waste heat recovery in heat pump systems: solution to reduce global warming, *IJUM Engineering Journal*, Vol. 16, No. 2, 2015. <https://doi.org/10.31436/ijumej.v16i2.602>
- [18] Chua, K.J., Chou, S.K., Yang, W.M. Advances in heat pump systems: a review, *Applied Energy*, Vol. 87, No. 12, pp. 3611-3624, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.06.014>
- [19] Banjac, M., Stamenić, M. *Primena toplotnih pumpi u industriji*, Mreža za energetsku efikasnost u industriji Srbije (MEEIS)
- [20] Goyal, A., Staedter, M.A., Garimella, S. A review of control methodologies for vapor compression and absorption heat pumps, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 97, pp. 1-20, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.08.026>
- [21] Josijević, M. *Mapiranje i iskorišćenje otpadne toplote u prehrambenoj industriji*, Kragujevac, Fakultet inženjerskih nauka, 2020.
- [22] Oluleye, G., Jobson, M., Smith, R. Optimisation-based design of site waste heat recovery systems, in *Proc. Ecos2015: 28th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, Pau, France, 29th June - 3rd July 2015.
- [23] Seck, G.S., Guerassimoff, G., Maizi, N. Heat recovery using heat pumps in non-energy intensive industry: are energy saving certificates a solution for the food and drink industry in France?, *Applied Energy*, Vol. 156, pp. 374-389, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.07.048>
- [24] GEA Engineering for a better world, <https://www.gea.com/en/products/heat-pumps/open-type-heat-pump/>, [pristupljeno 22.03.2024]

AUTORI/AUTHORS

Mladen Josijević - docent, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, mladenjosijevic@gmail.com, ORCID [0000-0001-9619-0897](https://orcid.org/0000-0001-9619-0897)
Vanja Šušteršić - redovni profesor, Univerzitet u Kragujevcu, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, vanjas@kg.ac.rs, ORCID

[0000-0001-7773-4991](#)

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

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

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

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

Utilisation of Waste Heat in the Food Industry with a Compressor Heat Pump

Abstract – The food and beverage industry is a significant global industry in terms of energy consumption. It participates with about 30% in the total energy consumption of the industrial sector. Most of that energy is spent on the conversion into thermal energy and for cooling processes. According to the current findings, 30% of the heat flow in the food industry is lost by the end of a production process. The waste heat obtained hereby has relatively low temperatures. However, it is possible to raise such temperatures to a useful degree, i.e. the one that meets the requirements of a production process, by locating the sources of waste heat with adequate energy potentials and by employing a heat pump. Only systematic approaches and detailed analyses of the plants' features can result in successful mapping of the sources of waste heat, precise evaluations of their energy potentials, and adequate selection of the optimal power of a heat pump needed for such purposes. This paper proposes a methodology for mapping the sources of waste heat in the food industry and determining the possibility of implementing a compressor mechanical heat pump. The methodology developed here was tested on a dairy that processes 100 tons of milk per day on seven production lines. Six sources of waste heat were identified. Only two are suitable for the implementation of a heat pump. Techno-economic analysis indicates that the total investment into the systems for collecting and accumulating waste heat and the purchase of heat pumps should pay off in about 17 months. The total reduction of CO₂ emission is estimated at 680 tons per year.

Index Terms – Food processing industry, Waste heat, Heat pump, Dairy

Analiza emisije zagađujućih materija u vazduh iz termoelektrana „Nikola Tesla A“ i „Nikola Tesla B“

Nikola Stanković

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

Rezime - U radu je prikazana vremenska analiza emisije zagađujućih materija u vazduh na primeru dve najveće termoelektrane „Nikola Tesla A“ i „Nikola Tesla B“. Ogranak „Termoelektrane Nikola Tesla“ je najveći proizvođač električne energije u Jugoistočnoj Evropi. Ima 14 blokova čija je ukupna instalisana snaga 3.430 MW. U sastavu Ogranak „Termoelektrane Nikola Tesla“ su TE Nikola Tesla A (sa 6 blokova) 1650 MW projektovane snage i TE Nikola Tesla B (sa 2 bloka) 1.340 MW električne snage. U okviru „Termoelektrane Nikola Tesla A“ se nalaze blokovi A1 sa 660 MW, A2 sa 660 MW, A3 sa 932 MW, A4 sa 943 MW, A5 sa 934 MW i blok A6 sa 934 MW toplotne snage, dok u okviru „Termoelektrane Nikola Tesla B“ se nalaze dva bloka B1 i B2 sa po 1809 MW i 1826 MW toplotne snage. Trend emisije je prikazan za tri zagađujuće materije, sumpor-dioksid, azotove okside i praškaste materije za 2022., 2021. i 2020. godinu. Dimni gasovi koji sadrže zagađujuće materije se ispuštaju u vazduh preko dimnjaka visine 150 metara (blokovi A1, A2 i A3) i 220 metara (blokovi A4, A5 i A6) na „Termoelektrani Nikola Tesla A“ i 280 metara (blokovi B1 i B2) na „Termoelektrani Nikola Tesla B“. U skladu sa zakonskim zahtevima redovno vrše se kontinualna merenja, dok se periodična merenja vrše za proveru ispravnosti kontinualnih merenja.

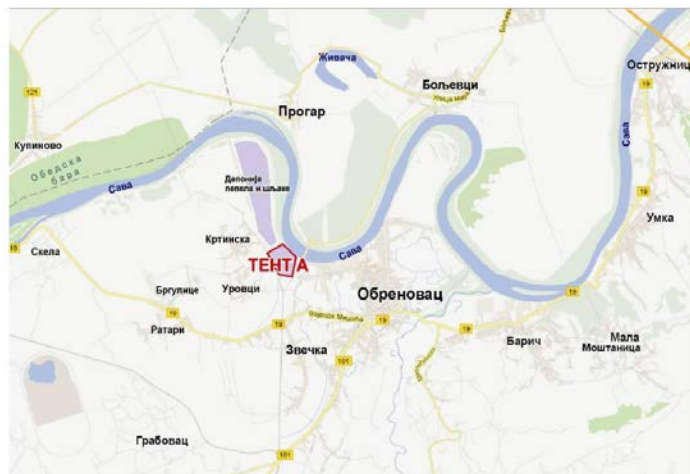
Ključne reči - emisija zagađujućih materija u vazduh, vremenska analiza, sumpor-dioksid, azotovi oksidi, praškaste materije, termoelektrane

I UVOD

Termoelektrana Nikola Tesla A (TENT A) se nalazi na desnoj obali reke Save, udaljena približno 40 kilometara uzvodno od Beograda, oko 3 kilometra zapadno od Obrenovca i 18 kilometara nizvodno od Termoelektrane Nikola Tesla B (TENT B). Geografska lokacija TENT A je unutar administrativnih granica opštine Obrenovac, na katastarskoj parceli 1934 u katastarskoj opštini Urovci. Najveće naseljeno područje u blizini termoelektrane je Obrenovac, sa populacijom od otprilike 72.000 stanovnika. Neposredno okruženje lokacije TENT A obuhvata sledeća seoska naselja: Krtinska, Urovci, Brgulice i Ratari (unutar opštine Obrenovac), kao i Progar, Jakovo i Bečmen na levoj obali Save (unutar opštine Surčin).

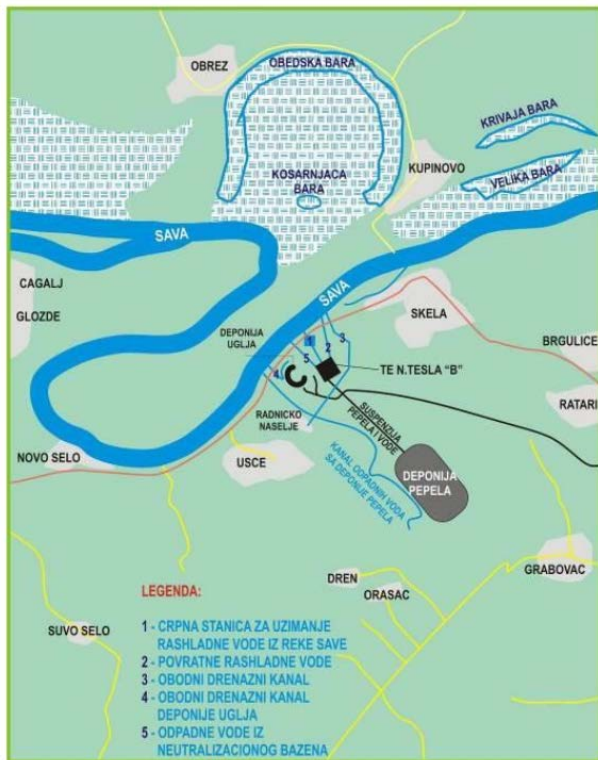
Termoelektrana „Nikola Tesla A“ (TENT A) predstavlja najveći termoelektranu u Srbiji, koja se sastoji od šest blokova označenih kao A1-A6, čija je ukupna projektovana snaga 1650,5 MW. Proces izgradnje elektrane bio je fazan, pri čemu su prva dva bloka (A1 i A2) snage 210 MW svaki, pušteni u pogon 1970. godine. Blok A3 snage 305 MW ušao je u pogon 1976. godine,

dok je blok A4 snage 308,5 MW počeo s radom 1978. godine. Blokovi A5 i A6, svaki snage 308,5 MW, stavljeni su u pogon tokom 1979. godine. Dimni gasovi koji nastaju u procesu rada blokova A1-A6 termoelektrane „Nikola Tesla A“ emituju se u atmosferu kroz dva dimnjaka. Prvi dimnjak, visine 150 m i prečnika na izlazu 10,4 m, povezan je sa blokovima A1-A3. Drugi dimnjak, visine 220 m, sadrži tri posebne dimne cevi prečnika na izlazu 6,3 m, pri čemu svaka od ovih cevi služi za ispuštanje dimnih gasova iz blokova A4-A6. Klimatske karakteristike posmatranog područja odgovaraju kontinentalnom tipu klime, što podrazumeva prisustvo hladnih zima i toplih leta. Osim toga, primećen je izražen uticaj visinske klime planinskog zaleđa Šumadije. Preovlađujući vetrovi na ovom području su jugoistočni i severozapadni vetar.



Slika 1. Makrolokacija termoelektrane „Nikola Tesla A“ [1]

Termoelektrana „Nikola Tesla B“ (TENT B) locirana je u relativno gusto naseljenom području, smeštenom na desnoj obali reke Save, udaljenom 59 km uzvodno od Beograda, duž saobraćajnice Beograd-Šabac. Elektrana se nalazi između naselja Skela i Ušće, unutar područja Vorbis, približno 18 km uzvodno od termoelektrane „Nikola Tesla A“ (TENT A). U okolini lokacije sa desne strane, na području između termoelektrane i naselja Obrenovac, koje je najveće naselje udaljeno od termoelektrane oko 20 km u pravcu istoka, nalazi se niz manjih naselja. Ova naselja obuhvataju Ratari, Urovci, Krtinska, Brgulice, Zvečka i Zatrežje. U pravcu juga, u blizini termoelektrane, nalaze se naselja Ušće, Dren, Grabovac i Orašac, dok se u pravcu severa, preko reke Save, nalazi selo Kupinovo i Obedska bara [2].



Slika 2. Šematski prikaz šire lokacije termoelektrane „Nikola Tesla B“ [2]

Na lokaciji termoelektrane "Nikola Tesla B", u okviru prve faze izgradnje, izgrađeni su blokovi B1 i B2 zajedno sa pomoćnim postrojenjima i infrastrukturom. Prvi blok je pušten u rad 1983. godine, dok je drugi blok bio operativan od 1985. godine. Početna snaga svakog bloka iznosila je 620 MW, što je ukupno činilo 1240 MW električne snage. Međutim, nakon rekonstrukcije, snaga blokova je povećana na 670 MW [2]. Dimni gasovi koji sadrže sumpor dioksid, azotne okside i čvrste čestice emituju se preko dimnjaka visine 280 m, pri čemu svaki blok ima zasebnu dimnu cev. Područje "TENT B" se nalazi u zoni dva preovlađujuća vetra tokom cele godine: zapadnog i jugoistočnog - košave. Prema obrađenim podacima za period od 1979. do 2008. godine, najučestaliji su vetrovi koji duvaju iz pravca zapada (W), sa učestalošću od 12,3%, zatim jugoistoka (SE) sa 8,6%, juga sa 7,9%, i istok-jugoistoka (ESE) sa 7,8%. Vetrovi koji dolaze iz pravca jugoistoka (SE) i istok-jugoistoka (ESE) su najjači, često prelazeći brzine od 10 m/s. Učestalost dana bez vetra (tišina) na ovoj lokaciji iznosi 6,8% [2].

Sadržaj ukupnog sumpora u kolubarskom lignitu koji se koristi za sagorevanje u termoelektrani „Nikola Tesla A“ (TENT A) iznosi približno 0,5%. Merenja obavljena na bloku A1 pokazala su da je ukupni sadržaj sumpora u uglju varirao od 0,39% do 0,41%, dok je sadržaj sagorljivog sumpora iznosio od 0,23% do 0,27% [3].

Ukupan sadržaj sumpora u kolubarskom lignitu koji se koristi za sagorevanje u termoelektrani „Nikola Tesla B“ iznosi oko 0,5%. Iz pojedinačnih merenja dobijen je ukupan sadržaj sumpora u uglju od 0,44 do 0,62%, dok je sagorljivi sumpor iznosio od 0,21 do 0,42% [4]. U periodu od 2004. do kraja 2014. godine, na

blokovima Ogranaka Termoelektrane Nikola Tesla (TENT) ugrađeni su uređaji za kontinualno merenje emisije materija koje utiču na kvalitet vazduha. Osim osnovnih uređaja za merenje masenih koncentracija praškastih materija i gasova, dodatno su instalirani uređaji za merenje sadržaja kiseonika (O_2), ugljen-dioksida (CO_2) i vlage, kao i temperature (t), pritiska (p) i zapreminskog protoka dimnih gasova. Takođe, ugrađena je oprema za akviziciju i obradu podataka. Unutar projekta finansiranog iz IPA fonda, obuhvaćeno je projektovanje, nabavka, isporuka, ugradnja, puštanje u rad uređaja, kao i sprovođenje baždarenja (QAL2) i sertifikacije uređaja za kontinualno merenje emisije sumpor-dioksida (SO_2), azotnih oksida (NO_x/NO_2), ugljen-monoksida (CO), ugljen-dioksida (CO_2) i praškastih materija. Usaglašeni su izveštaji Continuous Emissions Monitoring Systems (CEMS) u skladu sa EU Direktivom o velikim ložištima 2001/80/EC ("Large Combustion Plant Directive 2001/80/EC") i u saglasnosti sa važećom zakonskom regulativom Republike Srbije. Kompletan sistem je usaglašen sa standardom EN 14181 (QAL1, QAL2 i QAL3) i nacionalnom zakonskom regulativom. Prema Zakonu o zaštiti vazduha ("Službeni glasnik RS", br. 36/09, 10/13, 26/21 - dr. zakon) i Pravilniku o uslovima za izdavanje saglasnosti operatorima za merenje kvaliteta vazduha i/ili emisije iz stacionarnih izvora zagađivanja ("Službeni glasnik RS", br. 16/12), termoelektrane „Nikola Tesla A“ (TENT A) i „Nikola Tesla B“ (TENT B), su dobili saglasnosti za kontinualno merenje emisije iz stacionarnih izvora zagađivanja [5].

Cilj ovog istraživanja je uporediti emisije zagađujućih materija, uključujući okside azota, sumpor-dioksid i praškaste materije, na osnovu srednjih mesečnih vrednosti tokom tri godine: 2020., 2021. i 2022. godine, za termoelektrane "Nikola Tesla A" koje koriste dva dimnjaka (dimnjak 1 za blokove A1A2A3 i dimnjak 2 za blokove A4A5A6), kao i za termoelektrane "Nikola Tesla B" sa blokovima B1 i B2. Korišćenjem Kruskal-Wallis testa, ovo istraživanje ima za cilj da pokaže statistički značajne razlike u emisiji zagađujućih materija između tri emitera: dimnjaka 1 TENT A (blokovi A1A2A3), dimnjaka 2 TENT A (blokovi A4A5A6) i jednog dimnjaka TENT B (blokovi B1 i B2).

Nulta hipoteza: Raspodela zagađujućih materija za tri emitera za sve tri godine 2020., 2021., i 2022. godinu je ista u svim grupama.

Hipoteza 1: Postoji bar jedna grupa zagađujućih materija sa distribucijom različitom od ostalih.

Prag značajnosti je izabran i on iznosi $\alpha=0.05$.

II PODACI I METOD

U radu su korišćeni podaci sa sistema za kontinualno praćenje emisija zagađujućih materija (CEMS) kao što su sumpor-dioksid (SO_2), azotovi oksidi (NO_x) i praškaste materije. Srednje mesečne vrednosti za tri spomenute zagađujuće materije su korišćene za tri godine 2020., 2021. i 2022. godinu. CEMS je neophodan za poštovanje propisa i praćenje životne sredine, pružajući podatke u realnom vremenu o nivou emisija kako bi se osiguralo da industrijski postrojenja rade u okviru dozvoljenih granica koje su postavljene propisima o zaštiti životne sredine. CEMS obuhvata uzorkovanje, kondicioniranje i analitičke

elemente zajedno sa softverom specijalno dizajniranim da pruži neposredna, kontinuirana merenja koncentracije zagađivača. Ova merenja se dobijaju analizom reprezentativnih uzoraka dimnih gasova [6]. Kruskal-Wallis test je neparametarski test koji se koristi za proveru da li postoje statistički značajne razlike između tri ili više nezavisnih grupa. Ovaj test se primenjuje kada podaci ne ispunjavaju pretpostavke parametarskih testova, poput normalne distribucije ili homogene varijanse [7]. Kruskal-Wallis test rangira podatke iz svake grupe zajedno, a zatim upoređuje srednje rangove između grupa kako bi se utvrdilo da li postoji statistički značajna razlika u njihovim distribucijama [8]. Da bi se odredila normalna distribucija podataka urađen je Kolmogorov-Smirnov test. Ako je vrednost p-vrednosti dobijena testom veća od odabrane signifikantne razlike, možemo zaključiti da nema dovoljno dokaza da se odbaci nulta hipoteza o normalnosti distribucije. U mnogim disciplinama poput statistike, ekonomije i biologije, Kolmogorov-Smirnov test često se koristi za ispitivanje normalnosti distribucije podataka ili procenu podudarnosti između dveju distribucija, a temelji se na originalnom radu autora A. Kolmogorova i N. Smirnova [9, 10]. Rezultati su prikazani u obliku boks plotova. Horizontalna linija u svakom boks plot je medijalna vrednost ili sredina skupa podataka. Medijalna vrednost je primenjena umesto srednje vrednosti jer je imuna na visoke vrednosti i ima prednost što je robusnija varijabla [11]. Boks plot predstavlja 50% podataka, a vrh boks plota označava 75. percentil podataka, pri čemu dno boks plota izražava 25. percentil podataka. Vertikalne linije predstavljaju 90. i 10. percentil podataka. Tačke van ovog intervala predstavljaju moguća odstupanja. Širina kutija je proporcionalna broju zapažanja po grupi. Analiza je urađena u programskom jeziku R Studio verzija 2022.07.0.

III REZULTATI

Rezultati sumarne statistike za okside azota za emiter dimnjak 1 na TENT A su prikazani u tabeli 1. Najveću godišnju srednju vrednost od 414 mg/m³ odnosno najveća koncentracija emitovanih azotovih oksida je bila u 2020. godini, što je isto slučaj i sa godišnjom medijalnom vrednosti od 389.5 mg/m³. Minimalna srednja mesečna vrednost je zabeležena u 2021. godini od 247 mg/m³ za mesec septembar, dok je maksimalna srednja mesečna vrednost od 618 mg/m³ zabeležena u oktobru 2020. godine.

Tabela 1. Sumarna statistika za okside azota za emiter dimnjak 1 TENT A

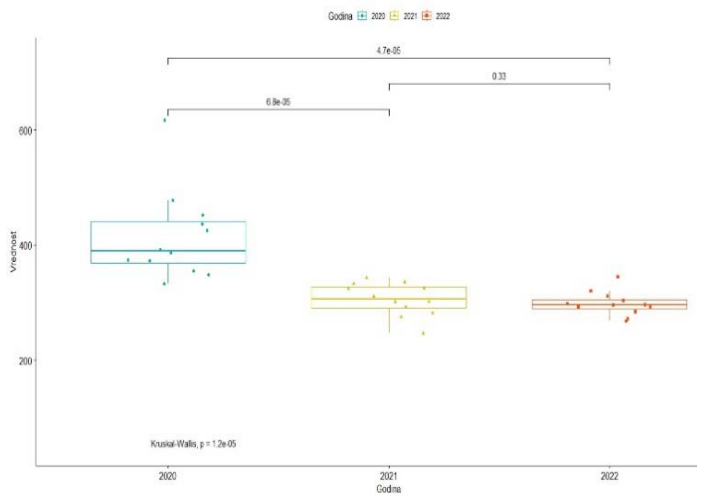
Godina	Minimalna srednja mesečna vrednost mg/m ³	Maksimalna srednja mesečna vrednost mg/m ³	Godišnja srednja vrednost mg/m ³	Godišnja medijalna vrednost mg/m ³
2020.	333	618	414	389,5
2021.	247	343	306	306,5
2022.	268	345	298	296

U tabeli broj 2. su prikazane p-vrednosti između različitih godina i ukupna p vrednost. Ukupna p vrednost od 1.2e-05 pokazuje da postoji makar jedan par prosečnih rangova koji su statistički značajno različiti. Statistički značajno različite, su godine 2020. i

2021., kao i godine 2020. i 2022., što je prikazano p vrednostima dati u tabeli broj 2, dok između 2021. i 2022. godine ne postoji statistički značajna razlika. Ovim se nulta hipoteza ne prihvata (p<0,05) odnosno može se prihvatiti prva hipoteza. Razlika između godina je prikazana i na slici broj 1. preko boks plotova, gde je prikazana vremenska distribucija podataka u kojoj dominira 2020. godina i gde je prikazan trend opadanja emisije azotovih oksida u 2021. i 2022. godini za emiter dimnjak 1 na TENT A. Što se tiče raspodele podataka srednjih mesečnih vrednosti za 2020. godinu, 50 % emitovane koncentracije su grupisane u vrednosti oko 400 mg/m³, dok je za 2021. godinu emitovane srednje mesečne vrednosti su ispod 400 mg/m³, što je isto slučaj i za 2022. godinu (Slika 1.).

Tabela 2. Kruskal-Wallis test, p vrednost za okside azota za različite godine emiter dimnjak 1 TENT A

p vrednost 2020-2021	p vrednost 2021-2022	p vrednost 2020-2022	Ukupna p vrednost
6,8e-05	0,33	4,7e-05	1,2e-05



Slika 1. Raspodela srednjih mesečnih vrednosti oksida azota za 2020., 2021. i 2022. godinu, dimnjak 1 TENT A

Tabela 3. Sumarna statistika za sumpor-dioksid za emiter dimnjak 1 TENT A

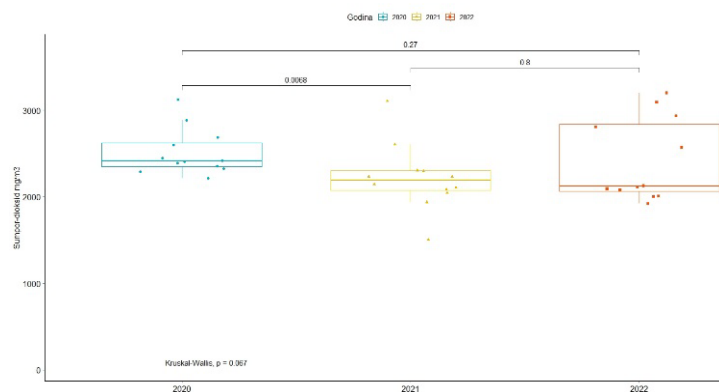
Godina	Minimalna srednja mesečna vrednost mg/m ³	Maksimalna srednja mesečna vrednost mg/m ³	Godišnja srednja vrednost mg/m ³	Godišnja medijalna vrednost mg/m ³
2020.	2212	3122	2511	2413
2021.	1505	3104	2216	2188
2022.	1922	3200	2412	2119

Što se tiče emisije sumpor-dioksida iz dimnjaka 1 TENT A, sumarna statistika je prikazana u tabeli broj 3. Minimalna srednja mesečna vrednost zabeležena je u 2021. godini u mesecu oktobru, iznosila je 1505 mg/m³. Maksimalna srednja mesečna vrednost prikazana je u 2022. godini, takođe u mesecu oktobru, dostižući 3200 mg/m³. Najveća godišnja srednja vrednost zabeležena je u 2020. godini, iznosila je 2511 mg/m³. Ovi rezultati ukazuju na promenljivu prirodu emisije sumpor-

dioksida tokom perioda posmatranja, sa značajnim varijacijama u srednjim mesečnim i godišnjim vrednostima.

Tabela 4. Kruskal-Wallis test, p vrednost za sumpor-dioksid za različite godine emiter dimnjak 1 TENT A

p vrednost 2020-2021	p vrednost 2021-2022	p vrednost 2020-2022	Ukupna p vrednost
0,0068	0,8	0,27	0,067



Slika 2. Raspodela srednjih mesečnih vrednosti sumpor-dioksida za 2020., 2021. i 2022. godinu, dimnjak 1 TENT A

Analiza Kruskal-Wallis test je prikazana u tabeli broj 4 odnosno ukupna i pojedinačna p vrednost između različitih godina za emisiju sumpor-dioksida. Na osnovu navedene ukupne p vrednosti, gde je $p > 0,05$, nulta hipoteza se ne odbacuje odnosno ne postoji statistički značajna razlika između 2020., 2021. i 2022. godine u slučaju emisije sumpor-dioksida za emiter dimnjak 1 TENT A odnosno emitovanih srednjih mesečnih vrednosti za navedene godine. Vremenski trend distribucije podataka pokazuje relativnu konstantnost između navedenih godina. Blagi pad se može zapaziti između 2020. i 2021. godine, odnosno relativni porast u 2022. godini u odnosu na 2021. godinu, upoređujući srednje godišnje vrednosti (Slika 2). Prikazani boks plotovi na slici broj 2., pokazuju da 50 % srednjih mesečnih vrednosti za navedene godine se nalaze u opsegu između 2000 mg/m^3 i 3000 mg/m^3 . Distribucija emitovanih srednjih mesečnih vrednosti je najniži u 2021. godini, dok je ipak najniža medijalna vrednost u 2022. godini.

Tabela 5. Sumarna statistika za praškaste materije za emiter dimnjak 1 TENT A

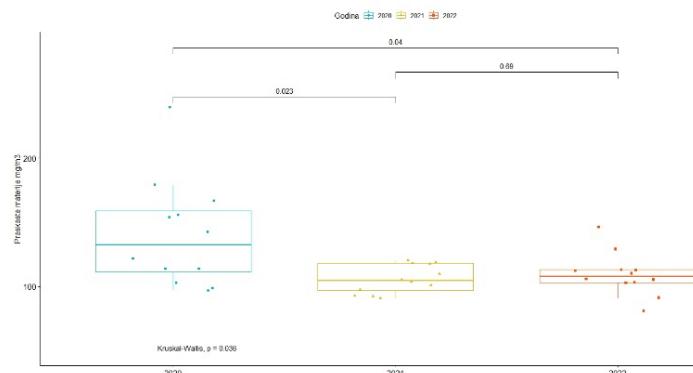
Godina	Minimalna srednja mesečna vrednost mg/m^3	Maksimalna srednja mesečna vrednost mg/m^3	Godišnja srednja vrednost mg/m^3	Godišnja medijana vrednost mg/m^3
2020.	97	240	140,7	132,5
2021.	91	120	105,7	104,5
2022.	81	146	109,3	108,0

Sumarna statistika za emitovane srednje mesečne vrednosti praškastih materija za 2020., 2021. i 2022. godinu je prikazana u tabeli broj 5. Minimalna srednja mesečna vrednost je zabeležena 2022. godine u oktobru mesecu, dok je najveća srednja mesečna

vrednost zabeležena 2020. godine takođe u oktobru mesecu i 2020. godina ima najveću godišnju srednju vrednost od 140,7 mg/m^3 .

Tabela 6. Kruskal-Wallis test, p vrednost za praškaste materije za različite godine emiter dimnjak 1 TENT A

p vrednost 2020-2021	p vrednost 2021-2022	p vrednost 2020-2022	Ukupna p vrednost
0,023	0,69	0,04	0,036



Slika 3. Raspodela srednjih mesečnih vrednosti praškastih materija za 2020., 2021. i 2022. godinu, dimnjak 1 TENT A

Na osnovu prikazane analiza Kruskal-Wallis testa u tabeli broj 6. za praškaste materije iz emitera dimnjak 1 TENT A, može se zapaziti da je ukupna $p < 0,05$ što odbacuje nultu hipotezu da raspodela praškastih materija između navedene tri godine nije ista (Slika 3.). Statistički značajna razlika distribucije podataka postoji između 2020. i 2021. godine i 2020. -2022. godine, dok između 2021.-2022. godine ova razlika ne postoji (Tabela 6.). Boks plot, za emitovane srednje mesečne vrednosti praškastih materija za 2020. godinu, pokazuje da je 50% emitovane koncentracije u opsegu između 100 mg/m^3 i 170 mg/m^3 . Dok je 50% emitovane koncentracije za 2021. godinu u opsegu između 90 mg/m^3 i 120 mg/m^3 , dok je distribucija srednjih mesečnih vrednost najniža u 2022. godine. Ipak najniža srednja godišnja vrednost je zabeležena 2021. godine sa 105,7 mg/m^3 kao i medijalna vrednost od 104,5 mg/m^3 emitovanih praškastih materija za emiter dimnjak 1 TENT A. Zabeležen je trend pada emitovane koncentracije (Slika 3.).

Tabela 7. Sumarna statistika za okside azota za emiter dimnjak 2 TENT A

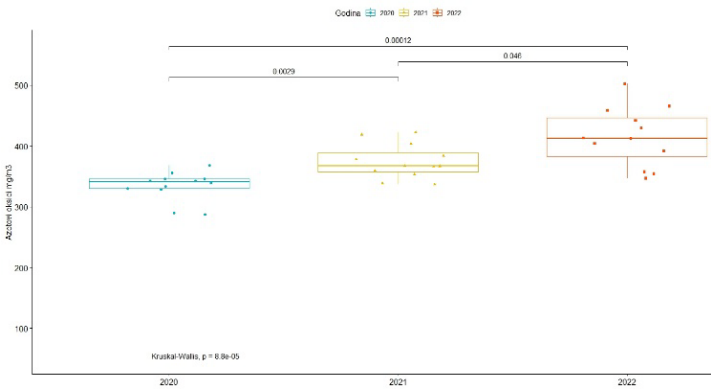
Godina	Minimalna srednja mesečna vrednost mg/m^3	Maksimalna srednja mesečna vrednost mg/m^3	Godišnja srednja vrednost mg/m^3	Godišnja medijana vrednost mg/m^3
2020.	287	368	334,2	340,5
2021.	337	422	374,5	367,0
2022.	347	502	414,5	412,5

Sumarna statistika za 12 srednjih mesečnih vrednosti koncentracije oksida azota dimnjak 2 TENT A za 2020., 2021. i 2022. godinu je prikazana u tabeli broj 7. Minimalna srednja mesečna vrednost je zabeležena u mesecu avgustu 2020. godine

od 287 mg/m³ koncentracije oksida azota. Dok je maksimalna srednja mesečna vrednost postignuta u decembru mesecu 2022. godine od 502 mg/m³ (Tabela 7.). Što se tiče srednjih godišnjih vrednosti najniža vrednost je prikazana 2020. godine od 334,2 mg/m³.

Tabela 8. Kruskal-Wallis test, p vrednost za okside azota za različite godine emiter dimnjak 2 TENT A

p vrednost 2020-2021	p vrednost 2021-2022	p vrednost 2020-2022	Ukupna p vrednost
0,0029	0,046	0,00012	8,8e-05



Slika 4. Raspodela srednjih mesečnih vrednosti azotovi oksidi za 2020., 2021. i 2022. godinu, dimnjak 2 TENT A

Na osnovu analize Kruskal-Wallis testa, ukupna p vrednost je <0,05 što odbacuje nultu hipotezu odnosno da postoji statistički značajna razlika između raspodele srednjih mesečnih vrednosti za navedene tri godine kao i između svake grupe navedenih godina (Tabela 8.). Prisutan je trend porasta emitovane koncentracije oksida azota (Slika 4.). U 2020. godini 50% raspodele emitovane koncentracije je bilo u opsegu između 300 mg/m³ i 350 mg/m³, sa godišnjom medijana vrednosti od 340.5 mg/m³ odnosno najnižom vrednosti u poređenju sa medijana vrednosti za 2021. i 2022. godinu.

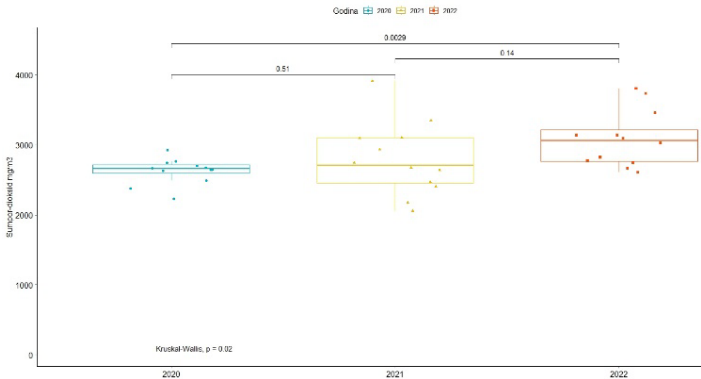
Tabela 9. Sumarna statistika za sumpor-dioksid emiter dimnjak 2 TENT A

Godina	Minimalna srednja mesečna vrednost mg/m ³	Maksimalna srednja mesečna vrednost mg/m ³	Godišnja srednja vrednost mg/m ³	Godišnja medijana vrednost mg/m ³
2020.	2232	2930	2627	2658
2021.	2057	3915	2797	2710
2022.	2608	3803	3084	3060

Što se tiče emisije sumpor-dioksida iz dimnjaka 2 TENT A, sumarna statistika prikazana je u tabeli broj 9. Minimalna srednja mesečna vrednost zabeležena je u 2021. godini u mesecu oktobru od 2057 mg/m³, dok je maksimalna srednja mesečna vrednost zabeležena 2021. godine u maju, iznoseći 3915 mg/m³. Najveća godišnja srednja vrednost zabeležena je 2022. godine i iznosi 3084 mg/m³. Ovi podaci ukazuju na varijaciju u emisiji sumpor-dioksida tokom različitih perioda u posmatranom vremenskom periodu.

Tabela 10. Kruskal-Wallis test, p vrednost za sumpor-dioksid za različite godine emiter dimnjak 2 za TENT A

p vrednost 2020-2021	p vrednost 2021-2022	p vrednost 2020-2022	Ukupna p vrednost
0,51	0,14	0,0029	0,02



Slika 5. Raspodela srednjih mesečnih vrednosti sumpor-dioksid za 2020., 2021. i 2022. godinu, dimnjak 2 TENT A

Analiza Kruskal-Wallis testa prikazana je u tabeli broj 10, koja obuhvata ukupne i pojedinačne p-vrednosti između različitih godina za emisiju sumpor-dioksida. Na osnovu navedene ukupne p-vrednosti, gde je p < 0,05, nulta hipoteza se odbacuje, što ukazuje na postojanje statistički značajne razlike između 2020., 2021. i 2022. godine u slučaju emisije sumpor-dioksida za emiter dimnjak 2 TENT A, odnosno emitovanih srednjih mesečnih vrednosti za navedene godine (Tabela 10). Međutim, statistički značajna razlika ne postoji između 2020.-2021. odnosno između 2021.-2022. godine, već samo između 2020.-2022. godine (Tabela 10). Vremenski trend distribucije podataka pokazuje relativni rast između navedenih godina. Prikazani boks plotovi na slici broj 5, pokazuju da 50% srednjih mesečnih vrednosti za 2020. godinu se nalazi u opsegu između 2600 mg/m³ i 2900 mg/m³, dok distribucija emitovanih srednjih mesečnih vrednosti raste u 2021. i 2022. godini u odnosu na 2020. godinu. Ovo je dodatno ilustrovano na osnovu medijana vrednosti, koja je najniža u 2020. godini (2658 mg/m³) i najviša u 2022. godini (3060 mg/m³).

Tabela 11. Sumarna statistika za praškaste materije emiter dimnjak 2 TENT A

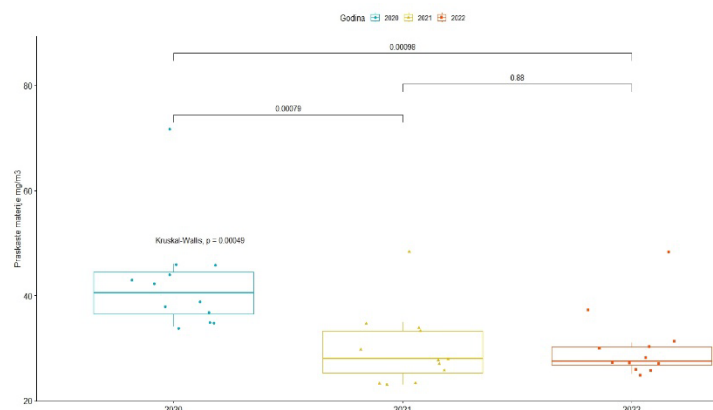
Godina	Minimalna srednja mesečna vrednost mg/m ³	Maksimalna srednja mesečna vrednost mg/m ³	Godišnja srednja vrednost mg/m ³	Godišnja medijana vrednost mg/m ³
2020.	34	72	42,6	40,5
2021.	23	48	29,8	28,0
2022.	25	48	30,2	27,5

Sumarna statistika za emitovane srednje mesečne vrednosti praškastih materija za 2020., 2021. i 2022. godinu analizirana je u tabeli broj 11. Uočena je minimalna srednja mesečna vrednost u 2021. godini, zabeležena u maju i julu mesecu od 23 mg/m³. Suprotno tome, najveća srednja mesečna vrednost zabeležena je

u 2020. godini, u oktobru mesecu od 72 mg/m^3 . Godina 2020. ističe se kao godina sa najvećom godišnjom srednjom vrednošću emitovanih praškastih materija, iznoseći $42,6 \text{ mg/m}^3$.

Tabela 12. Kruskal-Wallis test, p vrednost za praškaste materije za različite godine emiter dimnjak 2 TENT A

p vrednost 2020-2021	p vrednost 2021-2022	p vrednost 2020-2022	Ukupna p vrednost
0,00079	0,88	0,00098	0,00049



Slika 6. Raspodela srednjih mesečnih vrednosti praškaste materije za 2020., 2021. i 2022. godinu, dimnjak 2 TENT A

Na osnovu prikazane analize Kruskal-Wallis testa u tabeli broj 12. za praškaste materije iz emitera dimnjak 2 TENT A, uočava se da je ukupna p-vrednost manja od 0,05, što odbacuje nultu hipotezu da raspodela praškastih materija između navedene tri godine nije ista (Slika 6). Statistički značajna razlika distribucije podataka postoji između 2020.-2021. godine i 2020.-2022. godine, dok između 2021.-2022. godine ova razlika ne postoji (Tabela 12). Boks plot za emitovane srednje mesečne vrednosti praškastih materija za 2020. godinu pokazuje da je 50% emitovane koncentracije u opsegu između 30 mg/m^3 i 50 mg/m^3 . Slično tome, 50% emitovane koncentracije za 2021. godinu nalazi se u opsegu nižem od 40 mg/m^3 , što je takođe slučaj i sa 2022. godinom. Najniža godišnja medijana vrednost zabeležena je 2022. godine sa $27,5 \text{ mg/m}^3$ za praškaste materije iz emitera dimnjak 2 TENT A. Prisutan je trend pada emisije praškastih materija (Slika 6).

Tabela 13. Sumarna statistika za okside azota emiter dimnjak TENT B

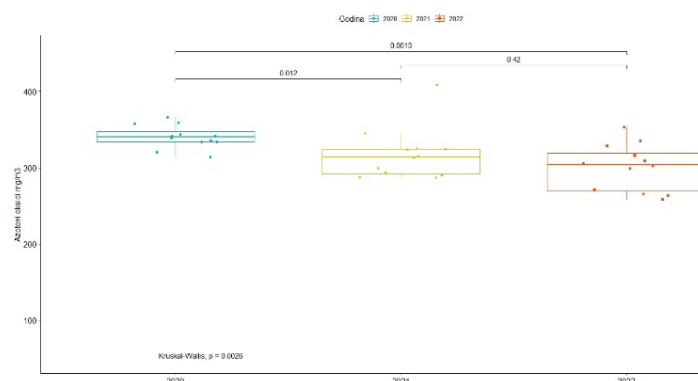
Godina	Minimalna srednja mesečna vrednost mg/m^3	Maksimalna srednja mesečna vrednost mg/m^3	Godišnja srednja vrednost mg/m^3	Godišnja medijalna vrednost mg/m^3
2020.	314	366	340,7	340,5
2021.	287	409	317,6	314
2022.	258	353	300,3	303,5

Sumarna statistika za 12 srednjih mesečnih vrednosti koncentracije oksida azota TENT B za 2020., 2021. i 2022. godinu prikazana je u tabeli broj 13. Uočeno je da je minimalna srednja mesečna vrednost zabeležena u mesecu avgustu 2022.

godine, iznoseći 258 mg/m^3 koncentracije oksida azota. S druge strane, maksimalna srednja mesečna vrednost postignuta je u aprilu mesecu 2021. godine, dostižući 409 mg/m^3 (Tabela 7). Što se tiče srednjih godišnjih vrednosti, najniža vrednost je prikazana za 2022. godinu, iznoseći $300,3 \text{ mg/m}^3$. Ovi podaci ukazuju na varijaciju u koncentraciji oksida azota tokom posmatranih godina.

Tabela 14. Kruskal-Wallis test, p vrednost za okside azota za različite godine emiter dimnjak TENT B

p vrednost 2020-2021	p vrednost 2021-2022	p vrednost 2020-2022	Ukupna p vrednost
0.012	0.42	0.0013	0.0026



Slika 7. Raspodela srednjih mesečnih vrednosti oksida azota za 2020., 2021. i 2022. godinu

Na osnovu analize Kruskal-Wallis testa, ukupna p-vrednost je manja od 0,05, što odbacuje nultu hipotezu, odnosno ukazuje na postojanje statistički značajne razlike između raspodele srednjih mesečnih vrednosti za navedene tri godine (Tabela 14). Statistički značajna razlika postoji između 2020.-2021. i 2022.-2022. godine, dok nije slučaj između 2021.-2022. godina. Prisutan je trend pada emitovane koncentracije oksida azota (Slika 7). U 2020. godini, 50% raspodele emitovane koncentracije bilo je u opsegu između 320 mg/m^3 i 350 mg/m^3 , sa godišnjom medijanom vrednošću od $340,5 \text{ mg/m}^3$, što predstavlja najvišu vrednost u poređenju sa medijanama za 2021. i 2022. godinu. Ovi rezultati ukazuju na promene u koncentraciji oksida azota tokom posmatranih godina.

Tabela 15. Sumarna statistika za sumpor-dioksid emiter dimnjak TENT B

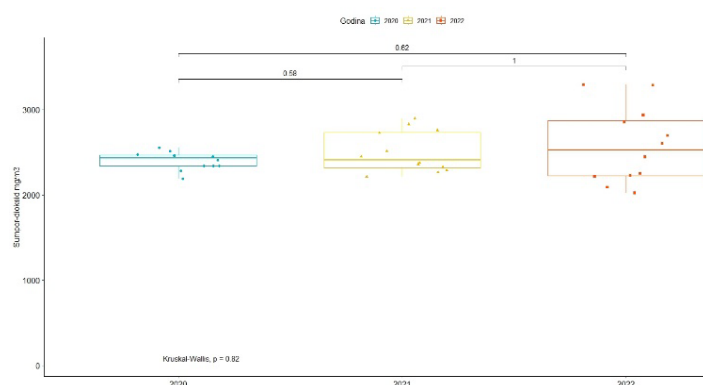
Godina	Minimalna srednja mesečna vrednost mg/m^3	Maksimalna srednja mesečna vrednost mg/m^3	Godišnja srednja vrednost mg/m^3	Godišnja medijana vrednost mg/m^3
2020.	2189	2557	2402	2431
2021.	2215	2897	2501	2412
2022.	2023	3293	2577	2525

Što se tiče emisije sumpor-dioksida iz dimnjaka TENT B, sumarna statistika je prikazana u tabeli broj 15. Minimalna srednja mesečna vrednost zabeležena je u 2022. godini, u mesecu aprilu, iznosila je 2023 mg/m^3 , dok je maksimalna srednja

mesečna vrednost zabeležena takođe u 2022. godini, u novembru, iznosila je 3293 mg/m³. Najveća godišnja srednja vrednost zabeležena je takođe u 2022. godini, iznoseći 2577 mg/m³. Ovi podaci ukazuju na varijaciju u emisiji sumpor-dioksida tokom različitih perioda u posmatranom vremenskom periodu.

Tabela 16. Kruskal-Wallis test, p vrednost za sumpor-dioksid za različite godine emiter dimnjak 2 za TENT A

p vrednost 2020-2021	p vrednost 2021-2022	p vrednost 2020-2022	Ukupna p vrednost
0,58	1	0,62	0,82



Slika 8. Raspodela srednjih mesečnih vrednosti sumpor-dioksid za 2020., 2021. i 2022. godinu

U tabeli broj 16. su prikazane p-vrednosti između različitih godina i ukupna p vrednost. Ukupna p vrednost $p > 0,05$ pokazuje da ne postoji makar jedan par prosečnih rangova koji su statistički značajno različiti. Ovim se nulta hipoteza prihvata. Razlika između godina je prikazana i na slici broj 8., preko boks plotova, gde je prikazana vremenska distribucija podataka u kojoj dominira 2022. godina za dimnjak na TENT B. Što se tiče raspodele podataka srednjih mesečnih vrednosti za 2020. godinu, 50 % emitovane koncentracije su grupisane u vrednostima između 2200 mg/m³ i 2600 mg/m³, što je slučaj i za 2021. godinu (Slika 8.). Najveća medijana vrednost je zabeležena u 2022. godini od 2525 mg/m³.

Tabela 17. Sumarna statistika za praškaste materije emiter dimnjak TENT B

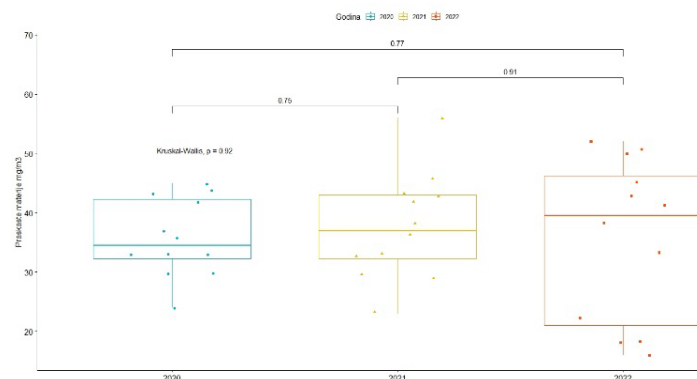
Godina	Minimalna srednja mesečna vrednost mg/m ³	Maksimalna srednja mesečna vrednost mg/m ³	Godišnja srednja vrednost mg/m ³	Godišnja medijana vrednost mg/m ³
2020.	24	45	35,8	34,5
2021.	23	56	37,7	37,0
2022.	16	52	35,6	39,5

Sumarna statistika za emitovane srednje mesečne vrednosti prašastih materija za 2020., 2021. i 2022. godinu analizirana je u tabeli broj 17. Uočena je minimalna srednja mesečna vrednost u 2022. godini, zabeležena u oktobru mesecu od 16 mg/m³. Suprotno tome, najveća srednja mesečna vrednost zabeležena je

u 2021. godini, u decembru mesecu od 56 mg/m³. Godina 2021. ističe se kao godina sa najvećom godišnjom srednjom vrednošću emitovanih prašastih materija, iznoseći 37,7 mg/m³. Ovi podaci pružaju uvid u varijaciju u emisiji prašastih materija tokom posmatranih godina.

Tabela 18. Kruskal-Wallis test, p vrednost za praškaste materije za različite godine emiter dimnjak TENT B

p vrednost 2020-2021	p vrednost 2021-2022	p vrednost 2020-2022	Ukupna p vrednost
0,75	0,91	0,77	0,92



Slika 9. Poređenje srednjih mesečnih vrednosti za 2020., 2021. i 2022. godinu, praškaste materije

Na osnovu prikazane analize Kruskal-Wallis testa u tabeli broj 18 za praškaste materije za dimnjak na TENT B, uočeno je da je ukupna p-vrednost $p > 0,05$, što ukazuje da ne postoji makar jedan par prosečnih rangova koji su statistički značajno različiti. Ovo implicira prihvatanje nulte hipoteze. Boks plot za emitovane srednje mesečne vrednosti prašastih materija za 2020. godinu pokazuje da je 50% emitovane koncentracije u opsegu između 30 mg/m³ i 45 mg/m³. Slično je i sa 2021. godinom, dok je 50% distribucije srednjih mesečnih vrednosti u 2022. godini u opsegu između 20 mg/m³ i 45 mg/m³. Ipak, najviša godišnja medijana vrednost je zabeležena u 2022. godini sa 39,5 mg/m³, dok je najniža godišnja medijana vrednost u 2021. godini iznosila 34,5 mg/m³. Ovi rezultati pružaju uvid u varijaciju emisije prašastih materija tokom posmatranih godina.

IV DISKUSIJA

IV-1 Emisija oksida azota

Analiza emisije oksida azota iz dimnjaka 1 na TENT A pružila je dublji uvid u dinamiku emisije tokom posmatranog perioda. Najveća godišnja srednja vrednost zabeležena je u 2020. godini, sa istaknutim trendom opadanja u narednim godinama. Statistička analiza ukazuje na značajne razlike između 2020. i 2021. godine, kao i između 2020. i 2022. godine, dok su razlike između 2021. i 2022. godine manje značajne.

Srednje mesečne vrednosti koncentracije oksida azota za dimnjak 2 TENT A za 2020., 2021. i 2022. godinu ukazuje na varijacije u emisiji tokom ovog trogodišnjeg perioda, pri čemu su zabeležene minimalne vrednosti u avgustu 2020. godine, dok su maksimalne vrednosti zabeležene u decembru 2022. godine. Odbacivanje nulte hipoteze na osnovu analize Kruskal-Wallis testa ukazuje na

statistički značajne razlike između godina, kao i trend porasta emitovane koncentracije oksida azota tokom perioda posmatranja, pri čemu je 2020. godina imala najnižu godišnju medijalnu vrednost.

Prikazani rezultati oksida azota na TENT B otkrivaju varijacije u emitovanim vrednostima, pri čemu su zabeležene najniže vrednosti u 2022. godini. Rezultati Kruskal-Wallis testa ukazuju na statistički značajne razlike između godina, sa приметnim trendom opadanja tokom vremena.

Emisije oksida azota (NO_x) variraju u skladu s kapacitetom termoelektrane (TE) i količinom azota prisutnom u uglju. One se povećavaju kako kapacitet TE raste, kao i količina azota u uglju [12]. Azotni oksidi nastaju tokom procesa sagorevanja svih fosilnih goriva, ali su najizraženiji prilikom sagorevanja čvrstih goriva. Nastanak azotnih oksida može poticati kako od azota prisutnog u vazduhu koji se koristi za sagorevanje, tako i od azota koji se nalazi u samom gorivu. Ove hemijske reakcije obično se odvijaju kao homogene ili heterogene. Glavni oblik azotnih oksida je azot-monoksid, koji čini oko 95% ukupnih emitovanih azotnih oksida, dok se azot-dioksid pojavljuje kao drugi najčešći oblik, dok je azot-suboksid prisutan u tragovima. Otprilike 10-30% svih azotnih oksida potiče od azota u vazduhu, dok je ostatak, koji je značajniji deo, posledica prisustva azota u gorivu [13].

IV-2 Emisija sumpor-dioksida

Prikazani rezultati za sumpor-dioksida iz dimnjaka 1 TENT A pružaju uvid u varijabilnost emisije tokom perioda posmatranja, sa značajnim fluktuacijama u srednjim mesečnim i godišnjim vrednostima. Iako su zabeležene razlike u maksimalnim i minimalnim vrednostima emisije između različitih godina, statistička analiza Kruskal-Wallis testa nije pokazala statistički značajne razlike između 2020., 2021. i 2022. godine. Ovo ukazuje na relativnu konstantnost emisije sumpor-dioksida u posmatranom periodu, iako se može primetiti blagi pad između 2020. i 2021. godine, te relativni porast u 2022. godini. Boks plotovi dodatno ilustruju raspodelu podataka, prikazujući da su srednje mesečne vrednosti najniže zabeležene u 2021. godini, dok je najniža medijalna vrednost zabeležena u 2022. godini.

Što se tiče uvida u rezultate za sumpor-dioksid iz dimnjaka 2 TENT A za 2020., 2021. i 2022. godinu otkrivaju značajne varijacije tokom ovog perioda, s minimalnim vrednostima zabeleženim u 2021. godini i maksimalnim vrednostima u maju 2021. godine. Odbacivanje nulte hipoteze na osnovu Kruskal-Wallis testa ukazuje na statistički značajne razlike u emisiji sumpor-dioksida između 2020., 2021. i 2022. godine, s relativnim rastom u kasnijim godinama. Emisije praškastih materija iz dimnjaka 2 TENT A za 2020., 2021. i 2022. godinu pokazuju značajne varijacije, sa najnižim vrednostima zabeleženim u 2021. godini i najvišim u 2020. godini. Ove varijacije su potvrđene odbacivanjem nulte hipoteze, na osnovu Kruskal-Wallis testa, što ukazuje na statistički značajne razlike u raspodeli praškastih materija između navedenih godina.

Emisija sumpor-dioksida iz dimnjaka TENT B za navedeni period, pokazuje na nedostatak statistički značajnih razlika među godinama, što sugerise da se nulta hipoteza prihvata. Prisutni boks plotovi takođe naglašavaju dominaciju 2022. godine u

distribuciji podataka. Nulta hipoteza, potvrđena kroz Kruskal-Wallis test, sugerira da nema statistički značajnih razlika među godinama. Najviša godišnja medijalna vrednost zabeležena je u 2022. godini, dok su ostale godine pokazale niže vrednosti.

Sumpor prisutan u uglju predstavlja zagađivač koji zahteva posebne mere izdvajanja i neutralizacije. Ugalj sadrži sumpor kako u organskim, tako i u neorganskim jedinjenjima. Organski sumpor potiče uglavnom iz biljne materije. Među neorganskim jedinjenjima koja sadrže sumpor, najčešći su FeS, PbS i ZnS. Sumporna jedinjenja u uglju učestvuju u različitim reakcijama, čiji hemijski proces nije potpuno precizno definisan, ali se mogu izneti osnovni principi: sulfidni i organski sumpor čine gorivi deo sumpora koji se tokom sagorevanja delimično oslobađa kao SO₂ i odlazi u atmosferu. Drugi deo SO₂, koji nastaje sagorevanjem sulfida i organskih jedinjenja, reaguje s oksidima prisutnim u pepelu (uglavnom sa CaO, koji nastaje razgradnjom karbonata), pri čemu deo sumpora ostaje vezan u pepelu u obliku sulfata. Sulfatni sumpor se smatra nepogodnim za sagorevanje, iako se sulfati iz uglja i sulfati formirani tokom reakcije mogu razložiti pri visokim temperaturama, omogućavajući delimično isparavanje sulfatnog sumpora u atmosferu [13]. TENT A kao osnovno gorivo koristi ugalj lignit čiji ukupan sadržaj sumpora je 0,38-1,32% dok je sadržaj sagorivog sumpora u opsegu 0,15-1,23% [14].

IV-3 Emisija praškastih materija

Na osnovu analize emitovanih srednjih mesečnih vrednosti praškastih materija za dimnjak 1 TENT A za 2020., 2021. i 2022. godinu pokazuje značajne varijacije u emisiji tokom ovog trogodišnjeg perioda. Iako je minimalna srednja mesečna vrednost zabeležena u 2022. godini, dok je najviša srednja mesečna vrednost zabeležena u 2020. godini, najveća godišnja srednja vrednost u ovom periodu pripada 2020. godini. Prikazana analiza Kruskal-Wallis testa ukazuje na statistički značajne razlike u raspodeli praškastih materija između različitih godina. Odbacivanje nulte hipoteze sugerise da je distribucija mesečnih vrednosti emisije praškastih materija različita između 2020. i 2021. godine, kao i između 2020. i 2022. godine. Međutim, između 2021. i 2022. godine nije uočena statistički značajna razlika. Prikazani boks plotovi dodatno ilustruju raspodelu podataka, prikazujući da je srednja mesečna emisija praškastih materija i medijalna vrednost najniža u 2021. godini.

Emisije praškastih materija iz dimnjaka 2 TENT A za 2020., 2021. i 2022. godinu pokazuju značajne varijacije, sa najnižim vrednostima zabeleženim u 2021. godini i najvišim u 2020. godini. Ove varijacije su potvrđene odbacivanjem nulte hipoteze, na osnovu Kruskal-Wallis testa, što ukazuje na statistički značajne razlike u raspodeli praškastih materija između navedenih godina.

Analiza sumarne statistike za emitovane srednje mesečne vrednosti praškastih materija za TENT B tokom 2020., 2021. i 2022. godine pruža značajne uvide u varijaciju u emisiji ovih materija tokom posmatranih perioda. Minimalna srednja mesečna vrednost zabeležena je u oktobru 2022. godine, dok je najveća srednja mesečna vrednost zabeležena u decembru 2021. godine. Ovi podaci sugerisu na fluktuacije u emisiji praškastih materija tokom godina. Dalje, godina 2021. se izdvaja kao godina sa

najvećom godišnjom srednjom vrednošću emitovanih praškastih materija. Ova godina je karakterisana visokim nivoom emisije, što ukazuje na potencijalne faktore koji su doprineli povećanoj emisiji tokom tog perioda. Kada je u pitanju statistička analiza Kruskal-Wallis testa, rezultati ukazuju na to da ne postoji statistički značajna razlika između prosečnih rangova srednjih mesečnih vrednosti praškastih materija. Ovo sugerira da emisija praškastih materija na dimnjaku TENT B nije značajno varirala tokom posmatranih godina, bar kada se uzme u obzir ovaj test. Boks plotovi pružaju dodatne uvide u distribuciju srednjih mesečnih vrednosti praškastih materija tokom tri godine. Ipak, najviša godišnja medijalna vrednost je zabeležena u 2022. godini, što sugerise na potencijalno povećanje emisije u toj godini u poređenju sa prethodnim godinama.

IV ZAKLJUČAK

Analiza emisije oksida azota (NO_x) iz dimnjaka 1 i 2 na TENT A otkriva značajne razlike u godišnjim srednjim vrednostima tokom posmatranog perioda od 2020. do 2022. godine. Najveća emisija NO_x zabeležena je 2020. godine, sa uočenim trendom opadanja u narednim godinama. Statistička analiza Kruskal-Wallis testa potvrđuje ove razlike, ukazujući na statistički značajne razlike između 2020. i narednih godina. U dimnjaku 2, maksimalne mesečne vrednosti emisije NO_x su zabeležene u decembru 2022. godine, dok su minimalne vrednosti zabeležene u avgustu 2020. godine, što ukazuje na trend porasta emisija u posmatranom periodu.

Emisije sumpor-dioksida (SO₂) iz dimnjaka 1 na TENT A pokazuju varijabilnost tokom posmatranog perioda, ali Kruskal-Wallis test nije otkrio statistički značajne razlike između godina. Međutim, dimnjak 2 pokazuje statistički značajne razlike, s maksimalnim srednjom mesečnom vrednošću u 2021. Emisije sumpor-dioksida iz TENT B pokazuju relativnu konstantnost, bez značajnih razlika među godinama prema Kruskal-Wallis testu, iako je 2022. godina pokazala najvišu godišnju medijalnu vrednost. Emisije praškastih materija iz dimnjaka 1 TENT A takođe pokazuju značajne varijacije tokom posmatranog perioda, s najvišim godišnjim srednjim vrednostima zabeleženim 2020. godine. Kruskal-Wallis test ukazuje na statistički značajne razlike između 2020. i 2021. godine, kao i između 2020. i 2022. godine. Sličan trend varijacija u emisijama praškastih materija primećen je i za dimnjak 2, sa najvišim vrednostima u 2020. godini. Za TENT B, statistička analiza nije otkrila značajne razlike između posmatranih godina, s najvišom godišnjom medijalnom vrednošću zabeleženom 2022. godine.

Opšti trendovi ukazuju na značajne varijacije u emisijama NO_x, SO₂ i praškastih materija između različitih godina, s tendencijama opadanja emisija oksida azota za dimnjak 1 TENT

A i TENT B, relativnom konstantnošću emisija sumpor-dioksida i varijacijama u emisijama praškastih materija. Ovi rezultati sugerisu potrebu za kontinuiranim praćenjem i optimizacijom procesa sagorevanja kako bi se smanjile emisije zagađujućih materija i uskladile sa ekološkim standardima.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Energoprojekt Entel a.d., *Studija o proceni uticaja na životnu sredinu, TE „Nikola Tesla A“ Postrojenje za odsumporavanje dimnih gasova za blokove A3-A6*, januar 2019.
- [2] Mašinski fakultet, Univerzitet u Beograd., *Studija o proceni uticaja na životnu sredinu za projekat izgradnja postrojenja za odsumporavanje dimnih gasova blokova B1 i B2, na lokaciji TE „Nikola Tesla B“, KO Ušće*, 2022.
- [3] Ogranak TENT, *Izveštaj stanje životne sredine u TE Nikola Tesla A za 2019. godinu*, 2020.
- [4] Ehting, *Studija o proceni uticaja na životnu sredinu na projektu izgradnje teretno pristaništa za sopstvene potrebe na lokaciji termoelektrane „Nikola Tesla B“ u Obrenovcu*, septembar 2020.
- [5] Javno preduzeće „Elektroprivreda Srbije“, *Izveštaj o stanju životne sredine u JP „Elektroprivreda Srbije“ za 2021. godinu*, februar 2022.
- [6] Zhang, X., Schreifels, J. Continuous emission monitoring systems at power plants in China: improving SO₂ emission measurement, *Energy Policy*, Vol. 39, 7432-7438, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.09.011>
- [7] Kruskal, W.H., Wallis, W.A. Use of ranks in one-criterion variance analysis, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 47, No. 260, pp. 583-621, 1952. <https://doi.org/10.2307/2280779>
- [8] Crook, J., Kocak, E. *Nonparametric Statistics: A Step-by-Step Approach*, Wiley, 2015.
- [9] Kolmogorov, A. Sulla Determinazione Empirica di Una Legge di Distribuzione, *Giornale dell'Istituto Italiano degli Attuari*, Vol. 4, pp. 83-91, 1933.
- [10] Smirnov, N. Table for estimating the goodness of fit of empirical distributions, *Annals of Mathematical Statistics*, Vol. 19, No. 2, pp. 279-281, 1948.
- [11] Nicolau, G., Pietra, R., Sabbioni, E. Trace element analysis in environmental and occupational health: Box plot representation of elemental composition results, *The Science of the Total Environment*, Vol. 80, No. 2-3, pp. 167-174, 1989. [https://doi.org/10.1016/0048-9697\(89\)90072-7](https://doi.org/10.1016/0048-9697(89)90072-7)
- [12] Petrović, B.M., Bogradnović, B.B. Mogućnost smanjena emisije zagađujućih materija iz termoelektrana u Srbiji, *Klimatizacija, grejanje, hlađenje*, Vol. 37, No. 1, pp. 345-352, 2019.
- [13] Repić, B., Mladenović, R., Crnomarković, N. Predlog primarnih mera za kontrolu emisije azotnih oksida na energetskim postrojenjima koja sagorevaju ugalj, *Procesna tehnika*, Vol. 14, No. 2-3, pp. 203-207, 1998.
- [14] Energoprojekt Entel a.d., *Studija o proceni uticaja na životnu sredinu, Postrojenje za odsumporavanje dimnih gasova za blokove A3-A6, TE „Nikola Tesla A“, januar 2019.*

AUTORI/AUTHORS

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

Analysis of the Emission of Pollutants into the Air from "Nikola Tesla A" and "Nikola Tesla B" Thermal Power Plants

Abstract – The paper presents a temporal analysis of the emission of pollutants into the air on the example of the two largest thermal power plants "Nikola Tesla A" and "Nikola Tesla B". The "Thermoelectric Power Plant Nikola Tesla"

branch is the largest producer of electricity in Southeast Europe. There are 14 units with a total installed capacity of 3,430 MW. Within the branch of the "Nikola Tesla Thermal Power Plants", there are two constituent entities: the „Nikola Tesla A“ Thermal Power Plant, comprising six blocks with a total projected capacity of 1650 MW, and the „Nikola Tesla B“ Thermal Power Plant, featuring two blocks with a combined electrical capacity of 1,340 MW. Within the "Thermoelectric Power Plant Nikola Tesla A" there are blocks A1 with 660 MW, A2 with 660 MW, A3 with 932 MW, A4 with 943 MW, A5 with 934 MW and block A6 with 934 MW of thermal power, while within the "Thermoelectric Power Plant Nikola Tesla B" has two blocks B1 and B2 with 1809 MW and 1826 MW of thermal power each. The emission trend is shown for three pollutants, sulphur dioxide, nitrogen oxides and particulate matter for 2022, 2021 and 2020. Flue gases containing pollutants are released into the air through chimneys 150 meters high (blocks A1, A2 and A3) and 220 meters (blocks A4, A5 and A6) at "Thermoelectric Power Plant Nikola Tesla A" and 280 meters high (blocks B1 and B2) at "Nikola Tesla B Thermal Power Plant". In accordance with legal requirements, continuous measurements are performed regularly, while periodic measurements are performed to check the correctness of continuous measurements.

Index Terms – Emission of pollutants into the air, Time series analysis, Sulphur dioxide, Nitrogen oxides, Powdery substances, Thermal power plants

Mogućnosti učešća OIE u regulaciji napona u prenosnoj mreži Srbije

Miroslav Žerajić*, Todor Šiljegović**, Pavle Gorašević***, Đorđe Lazović*, Bojana Škrbić*, Željko Đurišić*

*Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet u Beogradu

**Go2Power Consulting

***Elektroenergetski koordinacioni centar

Rezime - Integracija obnovljivih izvora energije (OIE) menja dosadašnji koncept upravljanja i planiranja elektroenergetskog sistema. Pored značajnih topoloških promena i nastanka novih velikih centara proizvodnje električne energije koje utiču na promenu dominantnih smerova tokova snaga, menja se i uticaj na naponske prilike u elektroenergetskom sistemu u pogledu mogućnosti učešća OIE u regulaciji napona. Današnje tehnologije invertora i energetska elektronika u sistemima OIE omogućavaju im da učestvuju u regulaciji napona kako bi pomogli u održavanju napona mreže u prihvatljivim granicama i dizajnirani su da obezbede podršku napona i regulaciju reaktivne snage. Savremeni vetroagregati su sposobni da rade u širokom opsegu generisanja/apsorbovanja reaktivne snage pri različitim generisanjima aktivne snage, kao i u režimima bez vetra, dok su savremeni PV sistemi sposobni da pruže podršku regulacije napona i regulaciju reaktivne snage, kako u uslovima obdanice, kada generišu aktivnu snagu, tako i u noćnim satima i uslovima oblačnosti. Upravljaajući reaktivnom snagom, ovakvi sistemi mogu pomoći u održavanju odgovarajućih vrednosti napona u mreži. U ovom radu biće predstavljeni rezultati analize uticaja OIE na naponske profile u karakterističnim čvorištima prenosnog sistema Srbije, za period jedne godine, sa satnom rezolucijom. Analiza će biti sprovedena za dva scenarija: postojeće stanje prenosnog sistema sa već priključenim OIE i perspektivno stanje prenosnog sistema koje obuhvata planirane projekte priključenja OIE na prenosni sistem. Poređenjem rezultata za ova dva scenarija, moguće je utvrditi uticaj OIE na naponski profil u svim radnim stanjima prenosnog sistema i mogućnosti učešća OIE u regulaciji napona u prenosnoj mreži Srbije.

Ključne reči - vetroelektrane, fotonaponske elektrane, reaktivna snaga, regulacija napona, DigSILENT PowerFactory,

I UVOD

Prema [1], analize kvaliteta napona u prenosnoj mreži Srbije ukazuju da postoje mesta u mreži gde željeni kvalitet nije postignut u određenim radnim režimima, kao i da postoji tendencija ka njegovom pogoršanju, naročito na naponskim nivoima 400 kV i 220 kV. Takođe prema [1], primetno je da prenosni sistem u Republici Srbiji na godišnjem nivou prima reaktivnu energiju od svih suseda, ili usled znatno višeg profila napona kod suseda, ili usled nepostojanja lokalnih kapaciteta za regulaciju napona u tom delu prenosnog sistema, pri čemu ovakav profil tokova reaktivnih snaga u velikoj meri doprinosi javljanju previsokih vrednosti napona u nekim od najvažnijih čvorišta u prenosnom sistemu Srbije. Da bi se utvrdio optimalan način smanjenja previsokih napona, izrađena je Regionalna

studija regulacije napona, kojom je predložena ugradnja uređaja za kompenzaciju reaktivne snage u regionu WB6 (*Western Balkan Six*) [2]. Navedena regionalna studija izvodljivosti poboljšanja naponskih prilika je trebalo da kao rezultat predloži optimalni kapacitet i lokacije za ugradnju prigušnica, tako da se na ekonomski najefikasniji način reše uočeni problemi na regionalnom nivou. Za prenosni sistem Republike Srbije analizom je pokazano da je optimalno ugraditi varijabilni šant reaktor u RP 400 kV u transformatorskoj stanici 400/110 kV Vranje 4. Problem previsokih napona je posledica rasterećenih prenosnih vodova najviših napona, koji često rade ispod granice prirodne snage. Slična problematika je analizirana u [3], gde je pojava vrednosti napona iznad maksimalno dozvoljene posmatrana lokalno, na jednom manjem delu prenosne mreže, sa mogućnošću učešća vtroelektrana u regulaciji napona, sa akcentom na opciju „*Wind free*“, kada vetroagregati imaju mogućnost proizvodnje/preuzimanja reaktivne snage i u režimima bez vetra. Tehnologija invertora koji se koriste u realizaciji projekata solarnih elektrana imaju sličnu opciju, tzv. „*noćni režim*“, koja omogućava proizvodnju/preuzimanje reaktivne snage i u uslovima kada je insolacija jednaka nuli. U ovom radu će pojava previsokih napona u prenosnoj mreži biti posmatrana na sistemskom nivou, koristeći i vtroelektrane i solarne elektrane za učešće u regulaciji napona.

II METODOLOGIJA PRORAČUNA

Sagledavanje uticaja učešća vtroelektrana i solarnih elektrana u regulaciji napona na nivou celog prenosnog sistema Srbije je za potrebe ovog rada sprovedeno prema sledećoj metodologiji:

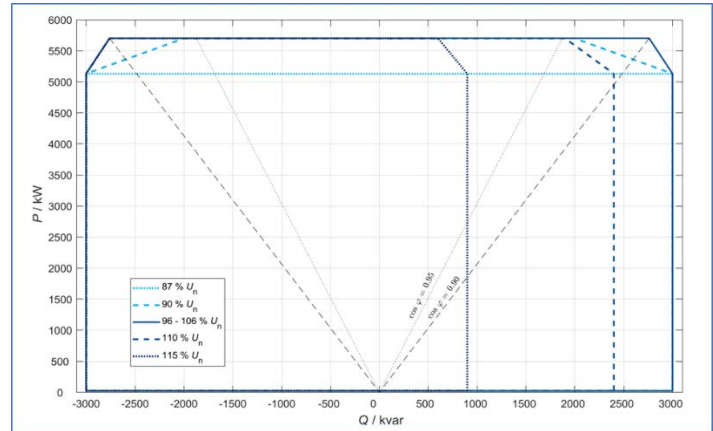
1. priprema simulacionog modela prenosne mreže u programskom paketu *DigSILENT PowerFactory* [4] tako da topologija i uklopna stanja odgovaraju trenutnom stanju prenosnog sistema;
2. unos izmerenih vrednosti potrošnje sa satnom rezolucijom za period od jedne godine (korišćeni podaci za 2023. godinu);
3. unos izmerenih vrednosti proizvodnje elektrana koje su već priključene na prenosni sistem sa satnom rezolucijom za period od jedne godine (korišćeni podaci za 2023. godinu);
4. unos izmerenih vrednosti razmena sa susednim prenosnim sistemima po interkonektivnim dalekovodima sa satnom rezolucijom za period od jedne godine (korišćeni podaci za 2023. godinu);
5. unos izmerenih vrednosti napona na interkonektivne „X“ čvorove korišćenjem elementa „*External Grid*“ sa satnom rezolucijom za period od jedne godine (korišćeni podaci

- za 2023. godinu);
6. simulacija tokova snaga za 8760 sati za 2023. godinu;
 7. poređenje izmerenih i proračunatih vrednosti napona na sabirnicama 400 kV i 220 kV postrojenja na kojima su merenjima zabeležene najviše vrednosti napona u većem broju sati u toku analizirane 2023. godine;
 8. proračun koeficijenta linearne korelacije između izmerenih i proračunatih vrednosti napona i upoređivanje broja sati u toku godine u kojima je vrednost napona bila veća od maksimalno dozvoljene;
 9. eventualna korekcija simulacionog modela i ponavljanje tačaka 6, 7 i 8, kako bi se dobio što veći koeficijent korelacije;
 10. dodavanje novih vetroelektrana i solarnih elektrana u različita čvorišta prenosne mreže, vodeći računa o regionalnim potencijalima projekata vjetroelektrana i solarnih elektrana koji su u razvoju;
 11. generisanje satnih snaga proizvodnje vetroelektrana i fotonaponskih elektrana za sve regione u kojima se razvijaju projekti planirani u tački 10. Aktivne snage proizvodnje su procenjene korišćenjem metodologije opisane u [8,9] na osnovu raspoloživih mjernih podataka o regionalnim potencijalima vjeta i insolacije;
 12. unos pogonske karte za nove vetro- i solarne elektrane;
 13. simulacija tokova snaga za 8760 vremenskih trenutaka za slučajeve kada vetroelektrane i solarne elektrane rade sa $\cos\varphi=1$ i kada rade u kapacitivnom režimu, u skladu sa modelovanom pogonskom kartom;
 14. poređenje rezultata simulacija iz tačaka 6 i 13.

III POGONSKA KARTA VETROAGREGATA

Mogućnosti vetroagregata za pružanje reaktivne podrške zavise od različitih faktora, najviše od tipa vetrogeneratora, napona na priključcima generatora i vrednosti izlazne aktivne snage agregata. Vetrogeneratori koji su delimično/potpuno priključeni na mrežu preko pretvarača, najčešće su projektovani za rad u naponskom opsegu od 85% do 115% u odnosu na nazivni napon sabirnica vetroagregata. Sposobnost injektiranja reaktivne snage se smanjuje kako se napon na sabirnicama vetroagregata povećava (usled unutrašnjih ograničenja pretvarača), kao i u situacijama kada je napon na sabirnicama vetroagregata nizak (zbog strujnih ograničenja pretvarača). Vetrogeneratori koji imaju pogonsku kartu „pravougaonog“ ili „D oblika“ mogu biti upotrebljeni u svrhe regulacije napona čak i kada generatori ne proizvode aktivnu snagu (u periodima kada je turbina zaustavljena zbog slabog vetra), tzv „Wind free“ mod. Obično, ova opcija nije automatski aktivirana, nego je potrebno da proizvođač to omogući. U ovom radu, za potrebe analiza, korišćena je pogonska karta vetroagregata *Nordex Delta4000 N149/5.7 MW* [5]. Na Slici 1 je pogonska karta prikazana grafički, dok je na Slici 2 prikazana tabelarno, sa vrednostima reaktivne snage u induktivnom i kapacitivnom režimu, pri različitim vrednostima napona na izlazu iz invertora.

Prema [6], vetroagregat *Nordex Delta4000 N149/5.7 MW* poseduje funkcionalnost „STATCOM“, koja omogućava proizvodnju/preuzimanje reaktivne snage u uslovima bez vetra. Za konkretan vetroagregat, vrednosti reaktivnog opsega su date na Slici 3.



Slika 1. Pogonska karta vetroagregata *Nordex Delta4000 N149/5.7 MW*

Active power P / kW		25	5130	5700
Maximum reactive power range	87 % U_n	-3000	-3000	-
	-Q...+Q / kvar	3000	3000	-
	90 % U_n	-3000	-3000	-2000
	-Q...+Q / kvar	3000	3000	2000
	96...106 % U_n	-3000	-3000	-2761
	-Q...+Q / kvar	3000	3000	2761
	110 % U_n	-3000	-3000	-2761
	-Q...+Q / kvar	2400	2400	1900
	115 % U_n	-3000	-3000	-2761
	-Q...+Q / kvar	900	900	600

Slika 2. Tabelarni prikaz pogonske karte vetroagregata *Nordex Delta4000 N149/5.7 MW*

		Without STATCOM	With STATCOM
Maximum reactive power range (10-min-average)	90 % U_n	0	-1700
	-Q...+Q / kvar	0	1700
	100 % U_n	0	-1900
	-Q...+Q / kvar	0	1700
	110 % U_n	0	-1900
	-Q...+Q / kvar	0	0

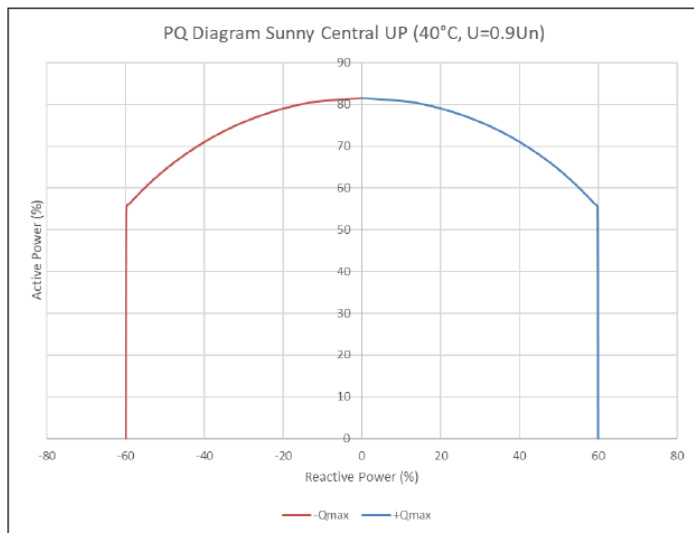
Slika 3. Tabelarni prikaz reaktivnih mogućnosti vetroagregata *Nordex Delta4000 N149/5.7 MW* u uslovima bez vetra

IV POGONSKA KARTA INVERTORA SOLARNIH ELEKTRANA VELIKE SNAGE

Invertori solarnih elektrana velike snage imaju značajnu fleksibilnost u pogledu generisanja aktivne i reaktivne snage, te mogu bitno doprineti unapređenju fleksibilnosti elektroenergetskog sistema. Glavna razlika u odnosu na konvencionalne elektrane je u tome što je raspoloživa aktivna snaga diktirana solarnom iradijacijom kao primarnim izvorom energije koji se ne može planirati. Pored toga, ukoliko solarna elektrana u normalnim pogonskim uslovima radi sa maksimalnom raspoloživom aktivnom snagom, proširenje reaktivnih mogućnosti je moguće jedino vršiti na račun smanjenja proizvodnje aktivne snage, što se ostvaruje redukcijom efikasnosti konverzije solarne energije u električnu pomoću

MPPT uređaja. Pogonska karta invertora se dinamički menja i generalno, zavisi od ambijentalnih uslova, modula mrežnog napona i karakteristika samog invertora. Tokom noći, fotonaponski paneli su električno odvojeni od invertora, pa se čitava raspoloživa prividna snaga invertora može iskoristiti za reaktivnu podršku sistemu (funkcionalnost STATCOM-PV). Ovo je značajno veći kapacitet reaktivne snage u odnosu na period tokom obdanice, kada se kapacitet invertora dominantno koristi za generisanje aktivne snage.

Prema [7], invertori mogu pružiti reaktivnu podršku (apsorbovanje ili generisanje reaktivne snage) i do 60% u odnosu na instalisanu snagu invertora u većem delu mogućih režima rada kada je $P < 50\% P_{max}$. Za opterećenja u opsegu 50–100%, raspoloživa reaktivna snaga invertora se redukuje. U slučaju da su naponi u priključnoj mreži ispod nominalne vrednosti i ambijentalne temperature visoke, opseg aktivne snaga za koji je moguća puna reaktivna podrška se smanjuje. Na Slici 4 je prikazana pogonska karta invertora *Sunny Central 4600 UP*, koja je i korišćena za potrebe ovog rada.



Slika 4. Pogonska karta invertora *Sunny Central 4600 UP*

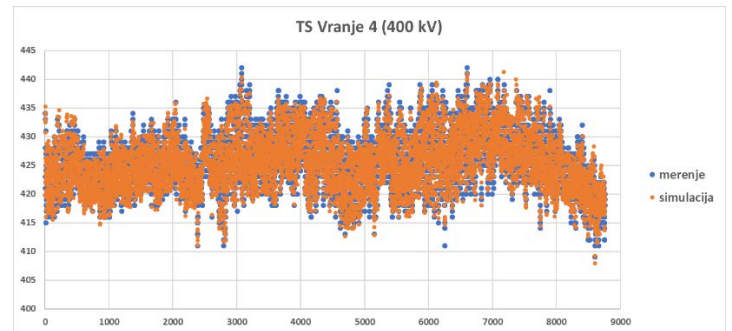
V VALIDACIJA BAZNOG SIMULACIONOG MODELA

Validacija baznog simulacionog modela prenosne mreže je sprovedena poređenjem proračunatih vrednosti napona na sabirnicama 400 kV i 220 kV postrojenja za koja su bila dostupna merenja za period od godinu dana. Uporedni prikaz rezultata simulacije na baznom modelu i izmerenih vrednosti napona za TS Vranje 4 (400 kV) i TS Novi Sad 3 (220 kV) je prikazan na Slici 5 i Slici 6, respektivno.

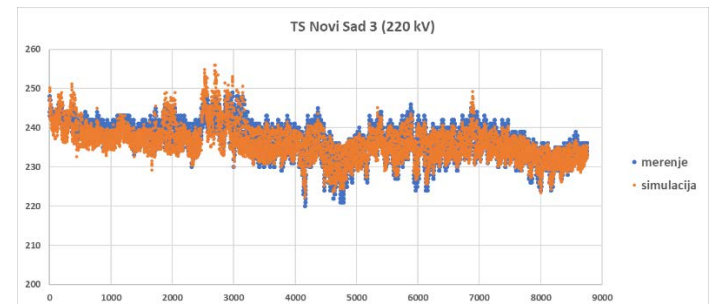
Nakon sprovedene simulacije, rezultati su izvezeni u Excel fajl, grafički su prikazani rezultati simulacije u funkciji izmerenih vrednosti i određen koeficijent linearne korelacije vrednosti dobijenih simulacijom i izmerenih vrednosti. Korelacija sa koeficijentom većim od 0.85 se smatra vrlo dobrom, ili odličnom. Na Slici 7 i Slici 8 su prikazani rezultati za TS Vranje 4 i TS Novi Sad 3, respektivno.

U Tabeli 1 su prikazani proračunati koeficijenti linearne korelacije vrednosti dobijenih simulacijom i izmerenih vrednosti

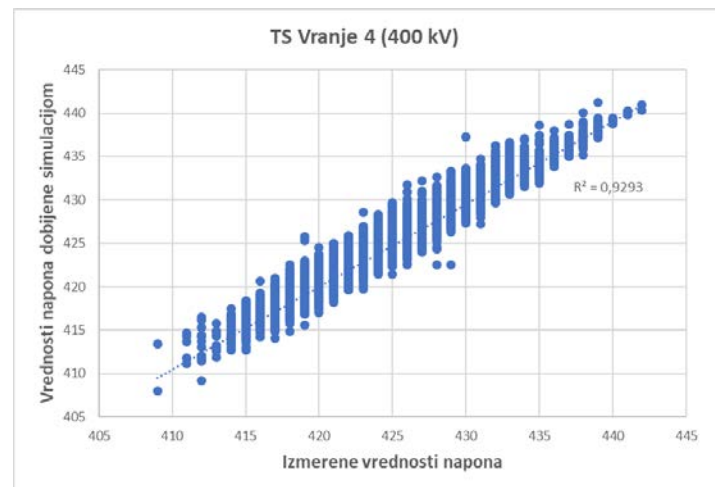
i za ostale posmatrane sabirnice u baznom modelu, dok je u Tabeli 2 prikazan broj sati u kojima je vrednost napona bila iznad maksimalno dozvoljene vrednosti radnog napona za odabrana 400 kV i 220 kV čvorišta u prenosnoj mreži. Na osnovu prikazanih rezultata, može se zaključiti da simulacioni model dovoljno verno odslikava radne režime prenosnog sistema tokom godine i da je u takav simulacioni model moguće dodati nove elektrane i analizirati njihov uticaj na naponski profil u prenosnom sistemu.



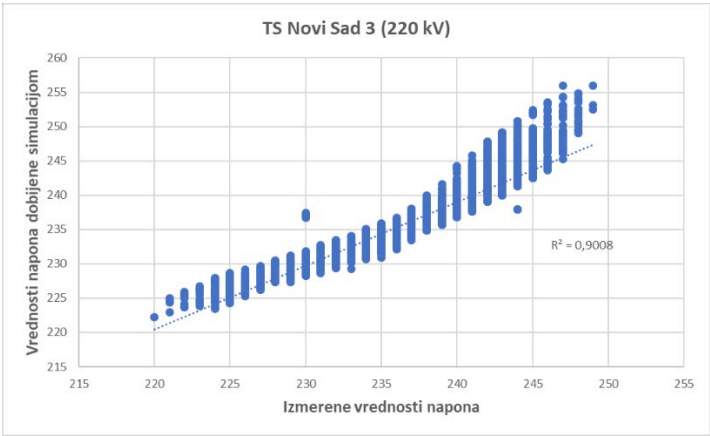
Slika 5. Prikaz rezultata simulacije i izmerenih vrednosti napona za 400 kV sabirnice u TS Vranje 4



Slika 6. Prikaz rezultata simulacije i izmerenih vrednosti napona za 220 kV sabirnice u TS Novi Sad 3



Slika 7. Prikaz rezultata simulacije u funkciji izmerenih vrednosti i proračunatog koeficijenta linearne korelacije za 400 kV sabirnice u TS Vranje 4



Slika 8. Prikaz rezultata simulacije u funkciji izmerenih vrednosti i proračunatog koeficijenta linearne korelacije za 220 kV sabirnice u TS Novi Sad 3

Tabela 1. Proračunati koeficijent linearne korelacije za odabrana 400 kV i 220 kV čvorišta u prenosnoj mreži

Postrojenje u TS	R^2
Vranje 4 (400 kV)	0,9393
Sremska Mitrovica 2 (400 kV)	0,9956
Subotica 3 (400 kV)	0,9695
TS Niš 2 (400 kV)	0,8888
TS Požega (220 kV)	0,8704
TS Novi Sad 3 (220 kV)	0,9008

Tabela 2. Broj sati u kojima je vrednost napona bila iznad maksimalno dozvoljene za odabrana 400 kV i 220 kV čvorišta u prenosnoj mreži

Postrojenje u TS	Broj sati iznad maksimalnog limita	
	Merenje	Rezultat simulacije
Vranje 4 (400 kV)	7501	7599
Sremska Mitrovica 2 (400 kV)	4628	4519
Subotica 3 (400 kV)	1212	1240
TS Niš 2 (400 kV)	4043	3948
TS Požega (220 kV)	3289	3428
TS Novi Sad 3 (220 kV)	683	698

VI MODELOVANJE NOVIH VETROELEKTRANA I SOLARNIH ELEKTRANA

Nakon validacije, u simulacioni model su dodate nove vetroelektrane i nove solarne elektrane. Svaka nova elektrana je modelovana kao ekvivalentni generator koji je preko mrežnih energetskih transformatora 400/X ($u_k = 12\%$) ili 110/X ($u_k = 12\%$) priključen na prenosni sistem. Ovakvim pristupom se zanemaruje srednjenaponska kablovska mreža elektrane, kao i transformatori SN/NN. Postojanje ovih elemenata u modelu bi dalo još bolje rezultate, s obzirom na činjenicu da i ovi elementi utiču na nivo reaktivne snage u tački priključenja. Naročito je ovo bitno za režime rada elektrana sa značajnim generisanjem aktivnih snaga. U takvim režimima, redne reaktanse transformatora i pogonske reaktanse internih kablovskih vodova mogu povlačiti značajnu reaktivnu snagu iz mreže čime povećavaju maksimalni raspoloživi kapacitet vetroelektrana i solarnih elektrana za apsorbovanje reaktivne snage u tački priključenja elektrane na prenosnu mrežu, a time daju i dodatne regulacione kapacitete za sniženje napona u prenosnoj mreži. Ekvivalentni generatori su modelovani po regionima (geografski gledano), i ukupna snaga u MW za vetroelektrane i solarne elektrane po svakom regionu je prikazana u Tabeli 3.

Tabela 3. Modelovane vetroelektrane i solarne elektrane po regionima za perspektivno stanje 2030. godine

Region	Vetroelektrane (MW)	Solarne elektrane (MW)
Južni Banat	1400	100
Sredni i severni Banat	200	250
Bačka i Srem	800	300
Istočna Srbija	400	500
Južna i centralna Srbija	400	800
Zapadna Srbija	0	50
Ukupno	3200	2000

Svakom ekvivalentnom generatoru koji predstavlja vetroelektranu je pridružena pogonska karta *Nordex Delta4000 N149/5.7 MW*, dok je svakom ekvivalentnom generatoru koji predstavlja solarnu elektranu pridružena pogonska karta *Sunny Central 4600 UP*. Treba istaći da i drugi komercijalni modeli savremenih vetroagregata i fotonaponskih invertora imaju slične pogonske karte, tako da se rezultati koji su dobijeni u ovom radu mogu i u kvalitativnom i u kvantitativnom smislu posmatrati kao generalni. Profil satne proizvodnje je pridružen svakom ekvivalentnom generatoru u zavisnosti od regiona u kome se nalazi, u relativnim jedinicama, tako da se na apsolutne vrijednosti prelazi množenjem sa instalisanom snagom u pojedinim čvorištima.

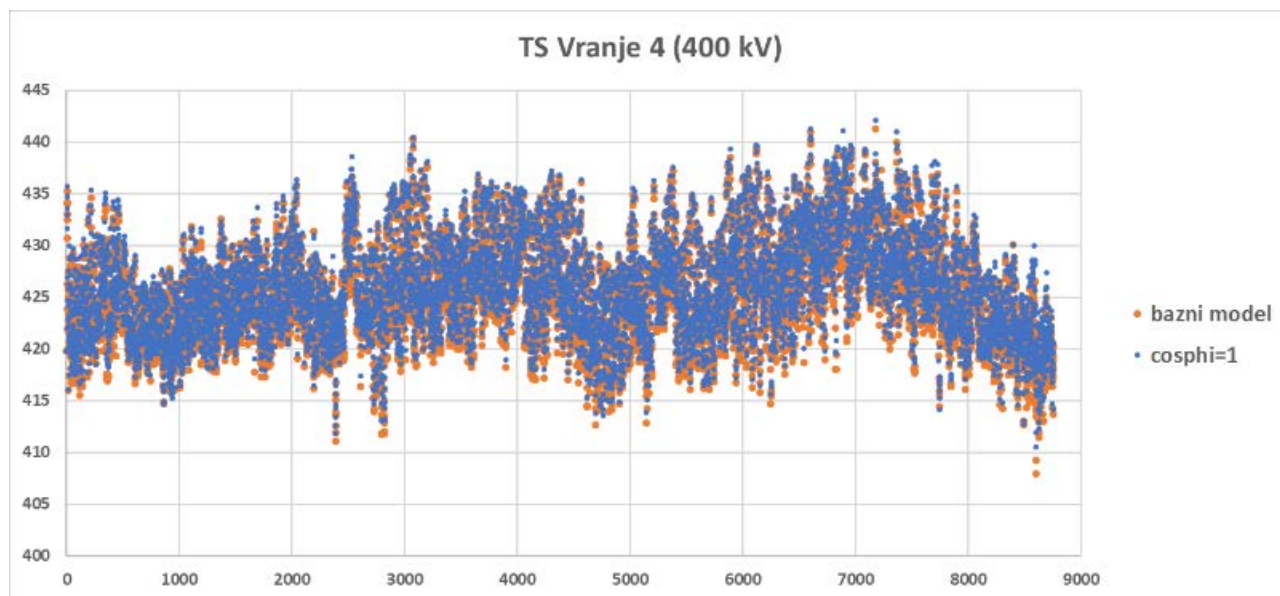
VII REZULTATI PRORAČUNA

Nakon dodavanja novih 5200 MW proizvodnje iz OIE, prema podacima datim u Tabeli 3, sprovedene su simulacije za dva slučaja:

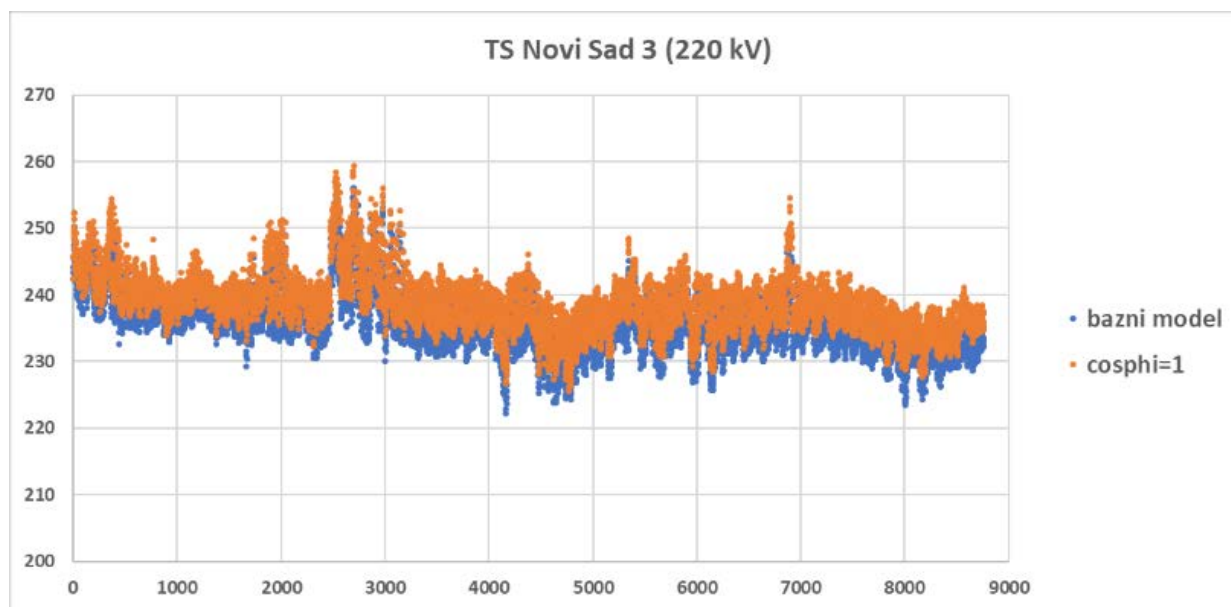
1. kada nove elektrane rade u režimu $\cos\varphi=1$,
2. kada nove elektrane rade u kapacitivnom režimu, što je postignuto zadavanjem postavne vrednosti napona koja je

manja od vrednosti napona mreže.

U slučaju kada nove elektrane rade u režimu $\cos\phi=1$, ne dolazi do smanjenja napona u prenosnoj mreži. Naprotiv, broj sati u kojima je vrednost napona veća od maksimalno dozvoljene se povećava usled povećanja generisanja aktivne snage. Grafički prikaz rezultata za ovaj slučaj za TS Vranje 4 (400 kV) i TS Novi Sad 3 (220 kV) je prikazan na Slici 9 i Slici 10, respektivno.



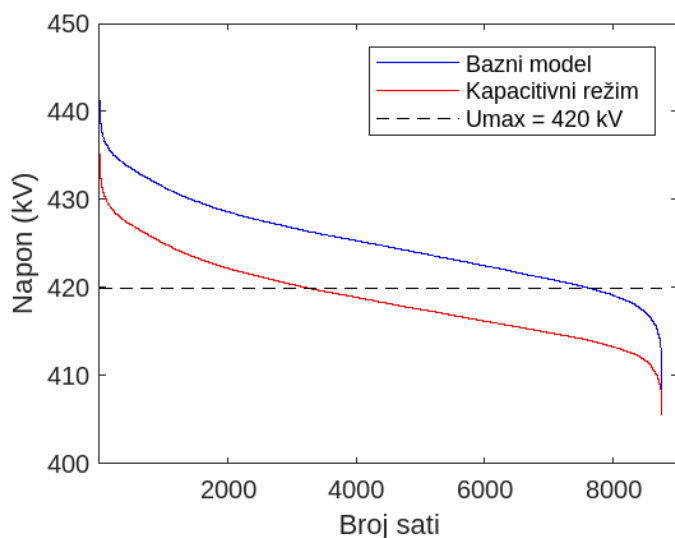
Slika 9. Prikaz vrednosti napona na 400 kV sabirnicama u TS Vranje 4 u baznom modelu i kada su priključene nove elektrane koje rade sa $\cos\varphi=1$



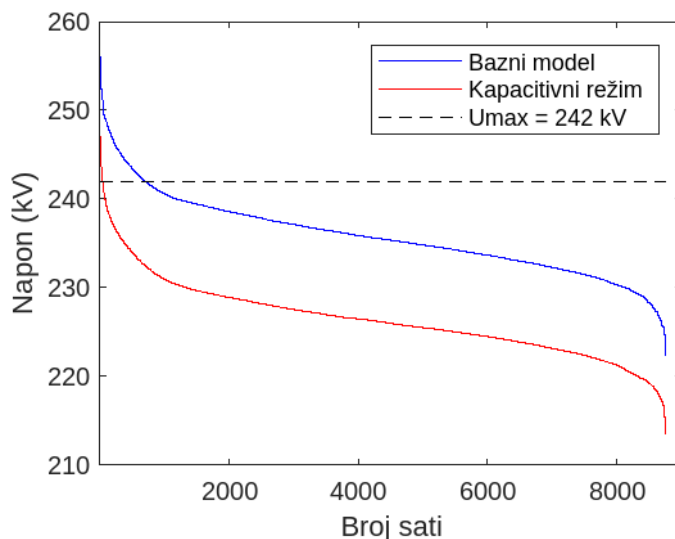
Slika 10. Prikaz vrednosti napona na 220 kV sabirnicama u TS Novi Sad 3 u baznom modelu i kada su priključene nove elektrane koje rade sa $\cos\varphi=1$

U slučaju kada nove elektrane rade u kapacitivnom režimu, u skladu sa dodeljenom pogonskom kartom, primetno je značajno smanjenje napona u prenosnoj mreži. Grafički prikaz rezultata za ovaj slučaj je prikazan na slikama 11 i 12.

Rezultati za ostala posmatrana čvorišta su data u Tabeli 4. Procentualno smanjenje broja sati u kojima je vrednost napona iznad maksimalno dozvoljene vrednosti na posmatranim čvorištima je prikazana u Tabeli 5.



Slika 11. Prikaz vrednosti napona na 400 kV sabirnicama u TS Vranje 4 u baznom modelu i kada nove elektrane rade u kapacitivnom režimu



Slika 12. Prikaz vrednosti napona na 220 kV sabirnicama u TS Novi Sad 3 u baznom modelu i kada nove elektrane rade u kapacitivnom režimu

Tabela 4. Proračunati koeficijent korelacije za odabrana 400 kV i 220 kV čvorišta u prenosnoj mreži

Postrojenje u TS	Broj sati na godišnjem nivou sa naponima iznad maksimalne dozvoljene vrednosti		
	Bazni model	Rezultat simulacije nakon priključenja novih elektrana koje rade u kapacitivnom režimu	Rezultat simulacije nakon priključenja novih elektrana koje rade sa $\cos\varphi=1$
Vranje 4 (400 kV)	7599	3219	7893
Sremska Mitrovica 2 (400 kV)	4519	1611	5704
Subotica 3 (400 kV)	1240	102	2263

TS Niš 2 (400 kV)	3948	26	5180
TS Požega (220 kV)	3428	1438	3859
TS Novi Sad 3 (220 kV)	698	37	1487

Tabela 5. Procentualno smanjenje broja sati u kojima je vrednost napona iznad maksimalno dozvoljene vrednosti za odabrana 400 kV i 220 kV čvorišta u prenosnoj mreži

Postrojenje u TS	Procentualno smanjenje broja sati narušenja limita (%)
Vranje 4 (400 kV)	-57,64
Sremska Mitrovica 2 (400 kV)	-64,35
Subotica 3 (400 kV)	-91,77
TS Niš 2 (400 kV)	-99,34
TS Požega (220 kV)	-58,05
TS Novi Sad 3 (220 kV)	-94,70

VIII ZAKLJUČAK

Na osnovu prikazanih rezultata, zaključuje se da vetroelektrane i solarne elektrane koje se priključuju na prenosni sistem mogu da budu značajan resurs u pružanju usluge regulacije napona, naročito u slučajevima kada su vrednosti napona u prenosnoj mreži iznad maksimalno dozvoljenih vrednosti. Da bi se ovo postiglo, elektrane moraju da budu opremljene invertorima koji omogućavaju proizvodnju/preuzimanje reaktivne snage i u režimima kada nema primarnog energenta, odnosno kada ne generišu reaktivnu snagu. Ovaj zahtev može biti integrisan u buduća pravila o radu prenosnog sistema, čime bi se obezbedilo da budući OIE koji budu priključeni na prenosnu mrežu mogu biti pouzdan resurs za rešavanje problema previsokih napona.

Nakon sprovedenih analiza, pokazuje se da pravilnim rasporedom OIE u sistemu, kumulativni uticaj svih elektrana kada rade u kapacitivnom režimu dovodi do smanjenja broja sati u kojima je maksimalna dozvoljena vrednost napona narušena za preko 90% u odnosu na stanje kada ovih elektrana nema. Najmanje procentualno smanjenje broja sati se uočava na interkonektivnim transformatorskim stanicama, što je, opet, posledica uticaja visokih vrednosti napona u susednim sistemima. Međutim, uzevši u obzir da je i u ovim transformatorskim stanicama uočeno procentualno smanjenje broja sati veće od 50% u odnosu na stanje kada ovih elektrana nema, zaključuje se da je reaktivna mogućnost OIE, naročito u kapacitivnom režimu, resurs koji može da smanji potrebu za ugradnjom dodatne opreme za rešavanje problema visokih napona, a ujedno predstavlja resurs koji je dostupan, ili može da postane dostupan ukoliko se stvore konkurentni uslovi na tržištu ili izmene tehnički zahtevi za kapacitivni režim u pogledu maksimalne reaktivne snage koju elektrana mora da preuzme u tački priključenja.

Ukoliko bi vlasnik elektrane za pružanje usluge regulacije napona dobijao odgovarajuću finansijsku nadoknadu, to bi delom ili u potpunosti kompenzovalo troškove usled ograničenja proizvodnje u toku eksploatacionog veka. Ukoliko je ovakva usluga dovoljno tržišno konkurentna, u režimima kada je proizvodnja OIE visoka, postojala bi mogućnost da smanjenje

trenutne aktivne snage zarad proširenja opsega reaktivnih mogućnosti (naročito kod solarnih elektrana) bude isplativija od zarade ostvarene plasmanom aktivne energije, što je, svakako, jedna od tema za dalje istraživanje.

Dodatno, usled loše korelisanosti proizvodnje vetroelektrana i solarnih elektrana, pružanje značajne reaktivne podrške sistemu je gotovo uvek omogućeno iz jednog tipa elektrane, pa je iz tog razloga bitno približno jednako rasporediti procenat učešća instalisanog kapaciteta oba tipa elektrana u ukupnom instalisanom kapacitetu sistema.

Prema trenutno javno dostupnim podacima, postoji preko 11 GW zahteva za priključenje OIE na prenosni sistem. Iz rezultata ovog rada se može naslutiti da bi, ukoliko zaista svi OIE budu priključeni na prenosni sistem, korišćenjem njihovih reaktivnih mogućnosti uz odgovarajuću tehnologiju (STATCOM, STATCOM-PV), problem previsokih napona bi se sveo na minimum ili potpuno rešio. U tom pogledu bitno je voditi računa o prostornoj disperzivnosti elektrana, čime se, pored pozitivnih efekata na tokove snaga, omogućava i efikasno rešavanje problema previsokih napona u celoj prenosnoj mreži Srbije.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Plan razvoja prenosnog sistema, za period 2023-2032. <https://www.aers.rs/FILES/JavnaKonsultacija/Nacrt%20Plana%20razvoja%20pren.%20sistema%202023-2032.pdf> [pristupljeno 15.01.2024]
- [2] Regional Study for Voltage Profile Improvement: Feasibility Study, <https://wbif.eu/technicalassistancegrants/WB17-REG-ENE-01> [pristupljeno 15.01.2024]
- [3] Šiljegović, T., Žerajić, M., Džodić, K., Đurišić, Ž. Analiza potencijala vetroelektrana za regulaciju napona u delovima prenosne mreže Srbije sa kritičnim naponskim prilikama, in Proc. 36. savetovanje CIGRE Srbija: Fleksibilnost elektroenergetskog sistema, Zlatibor, Srbija, pp. 1163-1176, 22-26. maj 2023. <https://doi.org/10.46793/CIGRE36.1163S>
- [4] DiGSILENT PowerFactory, <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>, [pristupljeno 15.01.2024]
- [5] Reactive power capability, Wind turbine class Nordex Delta4000, Rev. 2 / 2021-06-25, 2000991EN, Datasheet, 2021. <https://www.nordex-online.com/en/product/n149-5-x/> [pristupljeno 15.01.2024]
- [6] STATCOM option for extending the reactive power capability, Wind turbine class Nordex Delta4000, Rev. 0 / 2019-05-29, 2000992EN, Datasheet, 2019. https://www.uvp-verbund.de/documents-ige-ng/igc_mv/B6EFBE01-40A8-4332-B43D-6896262EEB11/1%20Product%20Preview%20Documentation%20Package%20N149%205,7%20MW.pdf [pristupljeno 15.01.2024]
- [7] Technical Information Document, Sunny Central UP (-US), SMA Solar Technology AG, Niestetal, 2020. <https://files.sma.de/downloads/SC4xxxUP-DS-en-30.pdf> [pristupljeno 15.01.2024]
- [8] Đurišić, Ž., Škrbić, B. Potencijal energije sunca i vetra za strateško planiranje dekarbonizacije proizvodnje električne energije u Srbiji, Energija, ekonomija, ekologija, Vol. 24, No. 4, pp. 1-11, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-4.01D>
- [9] Škrbić, B., Đurišić, Ž. Novel planning methodology for spatially optimized res development which minimizes flexibility requirements for their integration into the power system, Energies, Vol. 16, No. 7, pp. 3251, 2023. <https://doi.org/10.3390/en16073251>

AUTORI/AUTHORS

msr Miroslav Žerajić – master inženjer elektrotehnike i računarstva, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, mikozerajic@gmail.com, ORCID [0000-0001-9601-9045](https://orcid.org/0000-0001-9601-9045)
msr Todor Šiljegović – master inženjer elektrotehnike i računarstva, Go2Power, todom.siljegovic@go2power.eu
msr Pavle Gorašević – master inženjer elektrotehnike i računarstva, Elektroenergetski koordinacioni centar
msr Đorđe Lazović – master inženjer elektrotehnike i računarstva, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, lazovic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-9736-9810](https://orcid.org/0000-0002-9736-9810)
dr Bojana Škrbić – docent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, bskrbic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0002-0948-8351](https://orcid.org/0000-0002-0948-8351)
dr Željko Đurišić – redovni profesor, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, djurisic@etf.rs, ORCID [0000-0003-2048-0606](https://orcid.org/0000-0003-2048-0606)

Possibilities of RES Participation in Voltage Control in the Transmission Grid of Serbia

Abstract – The integration of renewable energy sources (RES) changes the current concept of power system operation and planning. In addition to significant changes in topology and the emergence of new large centres of electricity production, which affect the change in the dominant directions of power flows, the impact on voltage profile in the power system is also changing in terms of the possibility of RES participation in voltage control. Today's inverter technologies and power electronics in RES systems allow them to participate in voltage control to help maintain grid voltage within acceptable limits and are designed to provide voltage support and reactive power control. Modern wind turbines are capable of operating in a wide range of reactive power generation/absorption at different active power setpoints, as well as in no-wind regimes, while modern PV systems are capable of providing voltage control support and reactive power control even in conditions of absence of the primary energy source. By controlling output voltage and reactive power, such systems can help maintain proper voltage values in the grid. This paper will present the results of the analysis of the impact of RES on the voltage profile of the Serbian transmission system, for a period of one year, with an hourly resolution. The analysis will be carried out for two scenarios: the existing state of the transmission system with already connected RES and the future/prospective state of the transmission system that includes future/planned projects of connection of RES to the transmission system. By comparing the results for these two scenarios, it is possible to determine the impact of RES on the voltage profile in all operating conditions of the transmission system and the possibility of RES participation in voltage control in the transmission system of Serbia.

Index Terms – Wind power plants, PV power plants, Reactive power, Voltage regulation, DiGSILENT PowerFactory

Regulisani pogon radnog elementa bagera vedričara ERs710

Neša Rašić*, Aleksandra Grujić*, Ivana Vlajić Naumovska*, Milan Ivezić*, Milan Bebić**

* Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd Odsek Visoka škola elektrotehnike i računarstva

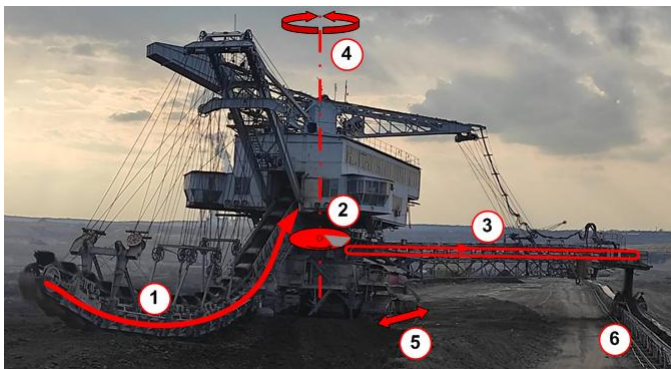
** Elektrotehnički fakultet Beograd

Rezime - Do postizanja zacrtanog cilja o potpunom prelasku na obnovljive izvore energije mora se voditi računa o zadovoljenju trenutnih potreba za energijom. Od ukupno proizvedene električne energije u Republici Srbiji u 2022. godini više od 68% čini energija dobijena u termoelektranama. Ovaj podatak jasno ukazuje na neophodnost očuvanja i produženja životnog veka postojećih energetskih postrojenja, u okviru kojih spadaju i rudarske mašine - bageri, za otkopavanje otkrivke i uglja, koje rade na površinskim kopovima. U radu je prikazana modernizacija pogona radnog elementa bagera vedričara

Ključne reči - bager vedričar, asinhroni motor, frekventni pretvarač, modernizacija

I UVOD

Bager ERs710 spada u kategoriju bagera vedričara, prvenstveno namenjena za kopanje ispod planuma, ali i iznad. Prva velika primena ovog tipa bagera je bila na otkopavanju Suetskog kanala. Materijal se otkopava vedricama koje su okačene o dva beskonačna lanca koja se kreću po nosaču lanca. Vedrice se pune prilikom njihovog pokretanja od donje do gornje ivice kosine - etaže. Napunjene vedrice prosleđuju materijal preko "obrotnog tanjira" do predajnog transportera sa koga se materijal dalje transportuje do ostalih mašina BTO (ili BTD) sistema [1].



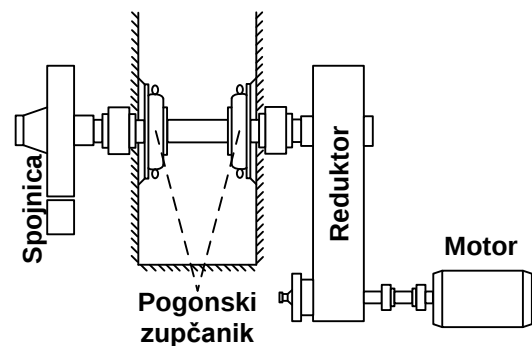
Slika 1. Bager vedričar sa prikazom osnovnih radnih elemenata, 1 - radni element (lanac vedrica), 2 - obrtni tanjir, 3 - istovarna traka, 4 - okret bagera, 5 - transport bagera, 6 - BTO(D) sistem

Osnovna prednost bagera vedričara, u odnosu na druge vrste bagera, je mogućnost kopanja pod bilo kojim uglom kosine - etaže i mogućnost tzv. selektivnog kopanja [2]. Ove osobine su važne kod kopanja kada postoje ugljeni proslojci i zaleganje (promena visine) ležišta što je karakteristika površinskih kopova u Srbiji.

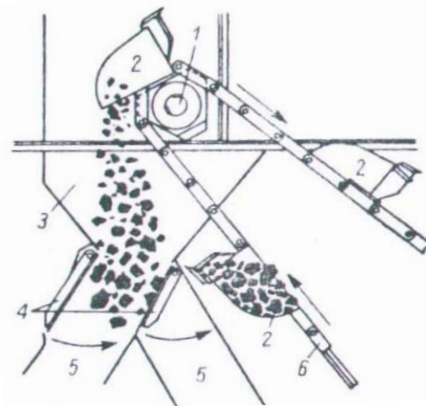
Na slici 1. prikazan je izgled bagera vedričara ERs710 na PK Drmno (710 - zapremina jedne vedrice u litrima) sa osvrtom na osnovne radne ose i pogone transportnog puta materijala. Bager se sastoji od donjeg i gornjeg dela bagera. Donji deo bagera oslonjen je na gusenični transportni uređaj, a gornji deo bagera odvojen je od donjeg dela posredstvom obrtnog postolja koje se može okretati sa gornjim delom bagera za 270 stepeni.

II OSNOVE MEHANIZMA RADNOG ELEMENTA BAGERA VEDRIČARA

Radni element bagera čini lančanik sa vedricama. Elektromotor smešten sa jedne strane pogonske osovine preko reduktora i pneumatske spojnice pokreće šestougaoni pogonski zupčanik (turas). Brzina lanca sa vedricama je između 1 i 1,6 m/s. Na slici 2. prikazane su osnove mehanizma radnog elementa. Slika 3. prikazuje način funkcionisanja mehanizma radnog elementa (lanca vedrica) [1].



Slika 2. Osnove mehanizma radnog elementa na bageru ERs710



Slika 3. Funkcionisanje mehanizma radnog elementa [1]
1 - pogonski zupčanik, 2 - vedrice, 3 - pretovarni bunker, 4, 5 - usmeravanje materijala, 6 - lanac

Osnovna komponenta mehanizma koja ima dominantan uticaj na karakter opterećenja je šestougaoni pogonski zupčanik. Pri prelasku vedrice preko najviše tačke zupčanika njena težina menja znak momenta opterećenja u Njutnovoj jednačini, iz plusa u minus. Taj uticaj će biti jasno vidljiv kod prikaza pogonskih veličina (struje rotora i moment motora) pre i posle modernizacije, i to od svake vedrice pojedinačno [3].

III ELEKTROMOTorni POGON RADNOG ELEMENTA BAGERA VEDRIČARA, PRE MODERNIZACIJE

U periodu pre modernizacije za pokretanje radnog elementa bagera korišten je asinhroni motor sa namotanim rotorom, sledećih nominalnih podataka:

- nominalna snaga: 450 kW,
- nominalni napon statora: 6 kV,
- nominalna struja statora: 63 A,
- nominalni faktor snage: 0.74,
- nominalna brzina motora: 739 o/min,
- napon rotora: 680 V,
- struja rotora: 410 A

Na slici 3. prikazana je konfiguracija elektro dela pogona radnog elementa na bageru.

Motor se napajao iz sredjenaponskog (6kV) postrojenja bagera preko prekidača kojim se upravljalo digitalnim signalima generisanim u upravljačkom sistemu bagera koji je realizovan uz upotrebu PLC i odgovarajućih I/O modula.

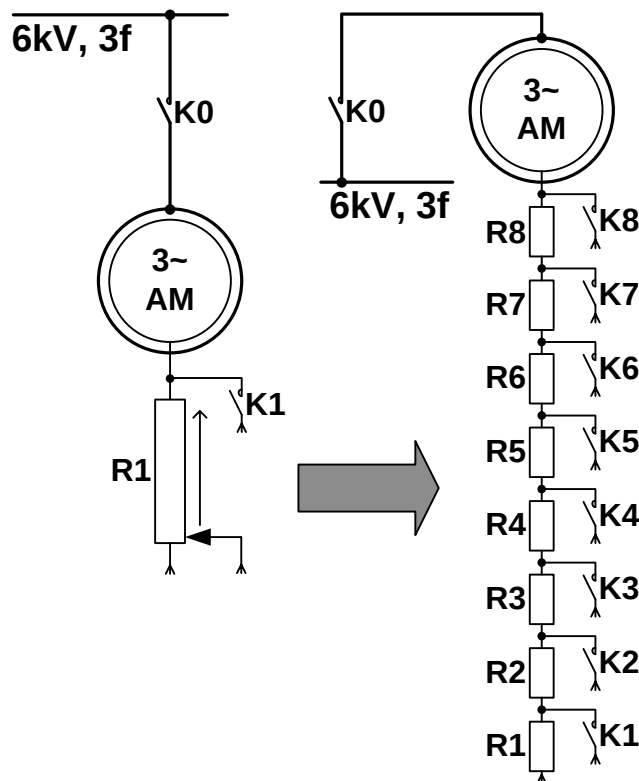
Rotorski namotaj elektromotora nakon puštanja bagera u rad bio je povezan sa tzv. tečnim upuštačem kao dodatnim otporom u kolu rotora motora. Ovo rešenje omogućilo je lagano pokretanje mehanizma lanca vedrica odmah nakon uključenja motora, uz uslov da je koncentracija rastvora tečnog upuštača odgovarajuća. Drugi uslov za ovakvo pokretanje je ispravnost kretnog mehanizma tečnog upuštača. Ispravnost je značila da su elektrode upuštača u trenutku pokretanja u svojim početnim položajima, a dalje njihovo kretanje je ravnomerno do dostizanja krajnjeg položaja. Ravnomernim kretanjem elektroda se obezbeđuje ravnomerno smanjenje dodatog otpora u kolu rotora motora, od maksimalnog do nultog. Dostizanjem krajnjih položaja elektroda završava se proces starta pogona, i tada preko kontaktora K1 na slici 4. - levo, motor nastavlja da radi bez dodatog otpora u kolu rotora, odnosno prelazi na svoju prirodnu mehaničku karakteristiku.

Zbog nemogućnosti održavanja tečnog upuštača u ispravnom stanju, izvršena je njegova zamena "suvim" rotorskim upuštačem sa kontaktorima [4].

Suvi rotorski upuštač je projektovan tako da struja motora u procesu zaletanja ne pređe vrednost nominalne struje motora [5]. U svakoj fazi namotaja rotora dodat je otpor ukupne vrednosti 0,958 (Ω) koji se diskontinualno - skokovito smanjuje na nultu vrednost, uključenjem kontaktora K1 do K8, kako je prikazano na slici 4. - desno. Uključenjem kontaktora K8 završava se proces starta pogona, i motor nastavlja da radi bez dodatog otpora u kolu rotora, odnosno prelazi na svoju prirodnu mehaničku karakteristiku.

Prema preporukama projektanta rotorskog upuštača sekvence

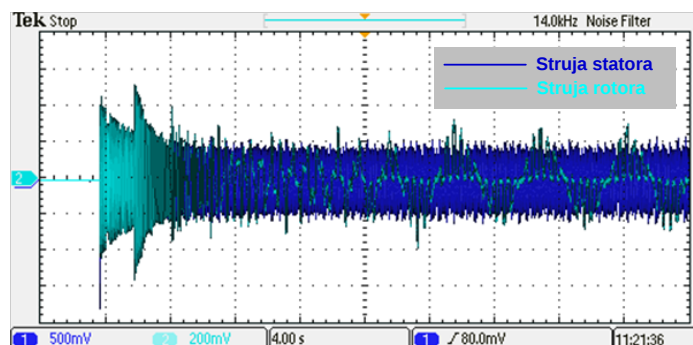
isključenja delova dodatog rotorskog otpora ponavljaju se na svakih 2,25 (s) od trenutka uključenja motora. Kako upuštač ima ukupno osam segmenata dodatog otpora, ukupno vreme starta motora je $8 \times 2,25 = 18$ (s).



Slika 4. Konfiguracija elektro dela pogona pre modernizacije, levo - kod puštanja bagera u rad, desno - sa suvim rotorskim upuštačem

IV PRIKAZ I ANALIZA MERENIH ELEKTRIČNIH VELIČINA SA SUVIM ROTORSKIM UPUŠTAČEM, PRE MODERNIZACIJE

Merenje je izvršeno uz upotrebu odgovarajućih strujnih sondi i četvero-kanalnog digitalnog memorijskog osciloskopa.



Slika 5. Start i rad pogona radnog elementa sa iskapanim materijalom

Za merenje struje statora korišćena je merna sonda na bazi Hall-ovog efekta postavljena na sekundarnoj strani strujnog mernog transformatora prenosnog odnosa 50/5 (A). Izabrani prenosni

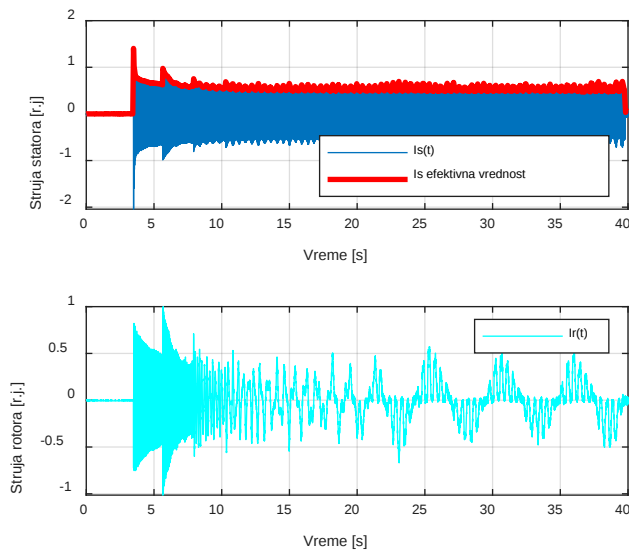
odnos sonde za merenje struje statora je 1 (A)/100 (mV).

Fazne struje rotora su merene drugom strujnom sondom na bazi Hall-ovog efekta za merenje naizmenične i jednosmerne struje. Prenosni odnos sonde za merenje struje rotora je 1 (A)/1 (mV). Sonda je postavljena tako da obuhvati provodnik kojim je namotaj rotora motora povezan sa rotorskim upuštačem.

Na slici 5. prikazane su trenutne vrednosti struja faza L1 statorskog i rotorskog namotaja, pri startu i radu pogona sa materijalom. Korišćene su gore navedene skale za merne sonde i strujne merne transformatore.

Podaci o statorskoj i rotorskoj struji su preuzeti u digitalnoj formi zapisa sa osciloskopa za dalju obradu. Dobijeni rezultati predstavljaju trenutne vrednosti statorske i rotorske struje. Statorska struja je konstantne učestanosti i računskim putem određene su njena efektivna vrednost i relativna vrednost u odnosu na nominalnu struju u toku procesa zaletanja. Rotorska struja je promenljive učestanosti u toku starta pogona, pa se definicija za efektivnu vrednost ne može primeniti.

Za potrebe određivanja trenutne brzine pogona iskorišćena je promenljiva učestanost signala rotorske struje. U tom cilju urađena je analiza spektra (brza Fourier-ova transformacija) signala po segmentima u vremenu. Ovakva analiza je poznata i kao „Time-frequency analysis“ [7, 8]. Korišćen je vremenski segment signala trajanja 0,5 (s), što odgovara učestanosti od 2 (Hz). Tokom zaleta motora, početna učestanost rotorske struje je 50 (Hz) (rotor stoji) i kako se brzina povećava, rotorska učestanost se smanjuje. Učestanost statorske struje je 50 (Hz).

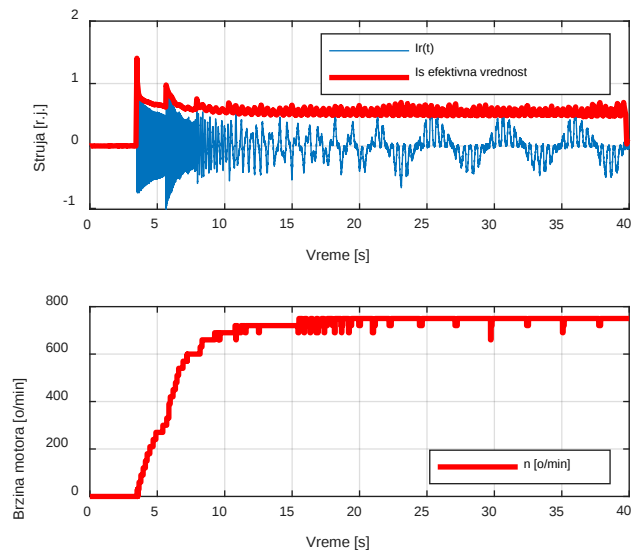


Slika 6. Gornji grafikon - računate relativne vrednosti statorske struje, donji grafikon - računata relativna vrednost rotorske struje

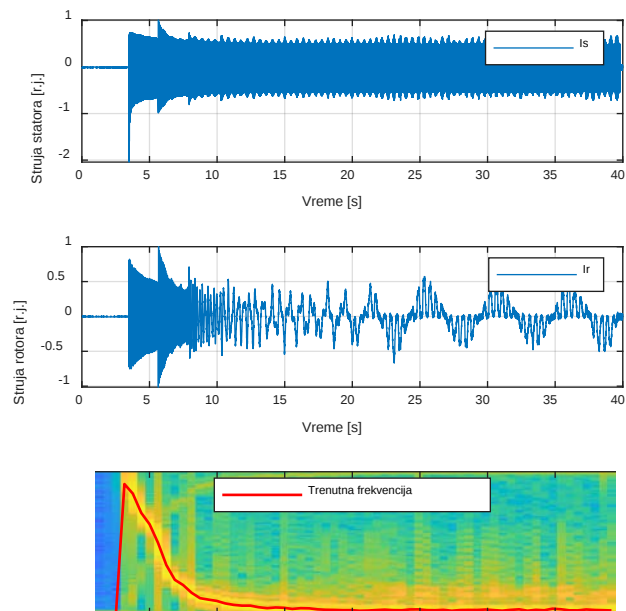
Na slici 6. prikazane su računate vrednosti u režimu starta sa materijalom. Relativne vrednosti statorskih i rotorskih struja su računate u odnosu na njihove nominalne vrednosti. Trenutne vrednosti struje statora i rotora su skalirane u odnosu na vršnu vrednost struje $I_n \cdot \sqrt{2}$, a izračunata efektivna vrednost je skalirana prema nominalnoj (efektivnoj) vrednosti struje – sa pločice motora. Nominalnoj vrednosti struje u relativnim

jedinicama (r.j.) tako odgovara vrednost 1 (jedan), bez obzira da li je prikazana trenutna ili efektivna vrednost.

Na slici 7. prikazane su struje statora (efektivna vrednost) i rotora (trenutna vrednost) zajedno sa računatom vrednošću brzine motora urađena primenom gore opisane metode u režimu starta i rada sa materijalom.



Slika 7. Gornji grafikon - Računate relativne vrednosti statorske i rotorske struje, donji grafikon - računata brzina obrtanja motora



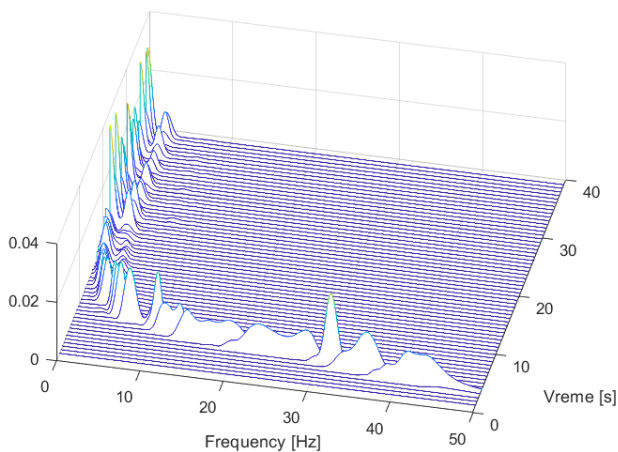
Slika 8. Rezultati frekventne analize sa naznačenom trenutnom frekvencijom rotorske struje

Analizom prikazanih merenih i računatih rezultata može se videti da struje statora i rotora u toku starta pogona ne prelaze njihove nominalne vrednosti što dokazuje da je suvi rotorski upuštač ispravno projektovan sa stanovišta optimalnog strujnog

opterećenja pogonskog motora. Takođe, iz dobijenih rezultata vidi se da proces zaletanja motora traje oko 5 (s). Zbog nepostojanja odgovarajuće tehničke dokumentacije nije bilo moguće porediti vreme trajanja procesa zaletanja sa tečnim upuštačem prema preporukama proizvođača bagera.

Na slici 8. prikazan je rezultat frekventne analize signala rotorske struje uporedo sa snimljenim trenutnim vrednostima struja. Na vremenskom dijagramu rotorske struje može se uočiti promena učestanosti tokom zaletanja. U ustaljenom stanju na kraju snimka vide se dve dominantne učestanosti. Manja učestanost odgovara učestanosti rotorske struje, dok veća učestanost potiče od promene opterećenja čiji je uzrok rad mehanizma radnog elementa opisanog u poglavlju II.

Drugačiji prikaz rezultata frekventne analize (waterfall diagram) prikazan je na slici 9. Svaka linija na dijagramu predstavlja spektar signala rotorske struje u odgovarajućem trenutku u vremenu. Ovakav prikaz jasno pokazuje pomeranje dominantnog harmonika u signalu rotorske struje u toku ubrzanja. Na kraju perioda ubrzanja (posle 15 s) izražena su dva harmonika u signalu, jedan na učestanosti struje rotora a drugi na učestanosti oscilacija opterećenja koje potiče od radnog mehanizma.



Slika 9. Rezultati frekventne analize signala rotorske struje - waterfall diagram

U periodu nakon ugradnje suvog rotorskog upuštača od strane službe mašinskog održavanja bilo je više dopisa o štetnom uticaju zaletanja pogona sa naglim promenama struje, odnosno momenta motora na mehaničke komponente pogonskog mehanizma.

Zaletanje radnog elementa, odnosno vrednost ugaonog ubrzanja (α), prema Njutnovoј jednačini rezultat je uzajamnog delovanja tri komponente: m_e - pogonskog momenta elektromotora, m_m - ukupnog momenta opterećenja pogonskog mehanizma (trenja i mehanički gubici, koji zavise od težina vedrica, količine materijala koji se otkopava i dr.) i ΣJ - ukupne inercije pogona, motora, reduktora i pogonskog mehanizma [5].

Kako se na inerciju pogonskog mehanizma i moment opterećenja ne može uticati, jedina mogućnost koja postoji jeste uticaj na moment pogonskog motora. Zbog promenljivih uslova mehaničkog opterećenja, praktično je nemoguće analitički

odrediti koliki bi trebao da bude taj momenat da bi se ostvarilo potrebno/željeno ubrzanje, odnosno trajanje zaletanja.

Sa druge strane, poznato je da se najbolje performanse pogona ostvaruju primenom elektromotornih pogona sa asinhronim motorima napajanim i upravljanim iz frekventnih pretvarača. Kontrola momenta ostvarena primenom naprednih algoritama upravljanja motorom (Direktna kontrola momenta – DTC ili vektorsko upravljanje) uz ispravno podešene parametre pretvarača, garantuju smanjeno naprezanje mehaničkih komponenti u pogonu, ograničenje momenta i u toku zaletanja i u toku rada, i zaštitu motora od preopterećenja, kratkog spoja, prenapona i drugog.

Rešenje sa niskonaponskim asinhronim motorom i odgovarajućim frekventnim pretvaračem pažljivo je isplanirano, sagledani su svi troškovi i pristupilo se realizaciji čiji su detalji dati u nastavku ovog rada.

V OPIS REALIZOVANOG POGONA RADNOG ELEMENTA BAGERA VEDRIČARA SA FREKVENTNIM PRETVARAČEM

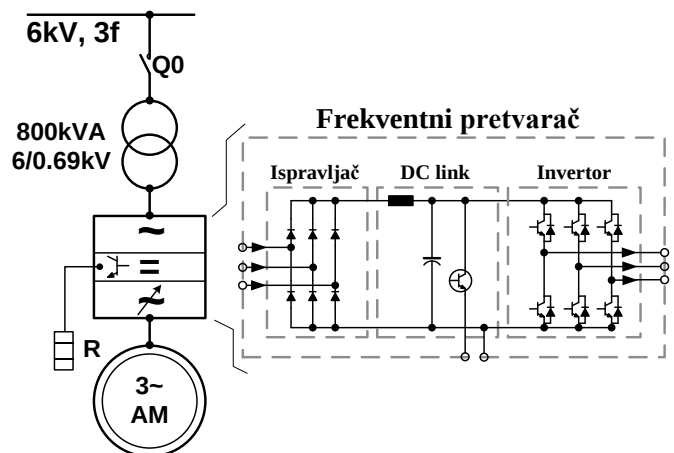
Na pogonu radnog elementa bagera vedričara ERS710 na površinskom kopu Drmno postojeći pogon zamenjen je 2023. godine novim sa kaveznim asinhronim motorom napajanim iz frekventnog pretvarača [8]. Osnovni podaci ovog pogona su:

Motor

- nominalna snaga: 630 (kW),
- nominalni napon: 690 (V),
- nominalna struja: 670 (A),
- nominalna brzina: 745 (o/min),
- nominalni moment: 8075 (Nm),
- kontrola temperature namotaja: DA, Pt100 sonda,
- kontrola temperature ležajeva: DA, Pt100 sonda.

Frekventni pretvarač

- nominalna snaga: 710 (kW),
- nominalni napon: 690 (V),
- nominalna struja: 721 (A),
- čoper: DA integrisani u modul frekventnog pretvarača,
- kočioni otpornik: DA eksterni, 2 (Ω), 7200 (kJ).



Slika 10. Konfiguracija pogona radnog elementa sa kaveznim asinhronim motorom napajanim iz frekventnog pretvarača

Za obezbeđenje potrebnog napona 690 (V) za rad pogona postavljen je transformator nominalne snage 800 (kVA), prenosnog odnosa 6/0,69 (kV), sprege Dyn5. Ranije korišćeni izvod srednjenaponskog (6kV) postrojenja bagera za napajanje motora, iskorišćen je za napajanje transformatora.

Na slici 10. prikazana je konfiguracija realizovanog pogona radnog elementa bagera.

Modernizovani pogon radnog elementa mora da obezbedi sve tehnološke zahteve rudarske službe i službe održavanja, uključujući i servisni režim rada (provlačenja lanca, zamena vedrica i dr.) Originalno tehničko rešenje je za servisni režim podrazumevalo upotrebu pomoćnog pogona radnog elementa.

Pošto modernizovani pogon može da obezbedi rad na manjoj brzini od nominalne, odlučeno je da se pomoćni pogon izbací. Rad motora sa sopstvenim hlađenjem na manjim brzinama, između ostalog, karakteriše se i pogoršanim uslovima hlađenja, zbog čega je izabran motor veće nominalne snage od originalnog pogona. Upotreba motora sa prinudnim hlađenjem u aplikacijama na rudarskim mašinama (bagerima) je nepopularna zbog uslova u kojima motori rade, nešto složenije konstrukcije motora i otežanim uslovima održavanja.

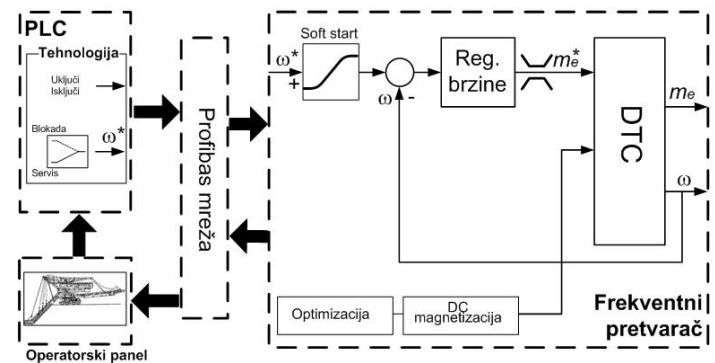
Frekventni pretvarač je kompaktne izvedbe što znači da su sve osnovne komponente, ispravljač, jednosmerno međukolo i inverter smešteni u jedno kućište. Kako se radi o pogonu kod koga se ne očekuje potreba za rekuperacijom energije ispravljač je trofazni diodni most. U jednosmernom međukolu dodata je opcionalna čoperska jedinica na čijim se priključcima povezuje spoljni otpornik za kočenje. Korišćenjem čopera i otpornika za kočenje frekventnom pretvaraču se omogućuje da razvije negativan moment dovoljan za usporenje sa potrebnim koeficijentom usporenja.

Primenjena kontrola motora kod izabranog frekventnog pretvarača je DTC (Direct Torque Control), direktna kontrola momenta [9]. Poluprovodničkim prekidačima u invertorskom delu upravlja se sa ciljem ostvarenja potrebnog statorskog fluksa i momenta motora. Referentna vrednost potrebnog momenta dobija se iz regulatora brzine ili direktno iz spoljašnjeg izvora referentnog momenta. Statorski fluks u najvećem broju aplikacija održava se na nominalnoj vrednosti, osim u aplikacijama kada se želi optimizacija utrošene energije i kada opterećenje pogona to dozvoljava.

U algoritmu upravljanja frekventnog pretvarača integrisane su sve upravljačke i zaštitne funkcije neophodne za pogon radnog elementa bagera, a one su:

- potrebna tačnost održavanja brzine, bez senzora na vratilu motora
- mogućnost definisanja vrednosti i karaktera koeficijenata ubrzanja/usporenja (trajanje i oblik rampe),
- efikasan sistem ograničenja (limitiranja) momenta,
- zaštite od svih vrsta električnih kvarova (kratak spoj, prekid faze i sl.),
- adekvatan softverski alat za konfigurisanje i održavanje frekventnih pretvarača (Drive composer pro, pomoću koga su snimljene veličine prikazane u nastavku ovog rada).

Za potrebe integracije izabranog frekventnog pretvarača u upravljački sistem bagera korišćen je opcioni adapter. Rad adaptera se zasniva na komunikacijskom interfejsu PROFIBUS DP koji koristi i PLC, kao osnovna komponenta upravljačkog sistema bagera. Komande uključivanja/isključivanja kao i referentna brzina frekventnom pretvaraču prosleđuju se putem PROFIBUS DP mreže. Referentna brzina pogona koja se prosleđuje frekventnom pretvaraču generiše se u sistemu upravljanja bagerom u zavisnosti od režima rada pogona radnog elementa. U servisnom režimu rada pogona rukovaoc bagerom preko operatorskog panela može zadati željenu brzinu, dok u tzv. blokadnom režimu rada referentna brzina pogona određena je tehnološkim zahtevima rada bagera. Na slici 11. prikazan je uprošćeni funkcionalni blok dijagram upravljanja frekventnim pretvaračem pogona radnog elementa bagera vedričara.



Slika 11. Uprošćeni blok dijagram upravljanja frekventnim pretvaračem pogona radnog elementa na bageru

VI PRIKAZ I ANALIZA MERENIH ELEKTRIČNIH VELIČINA POGONA RADNOG ELEMENTA SA FREKVENTNIM PRETVARAČEM

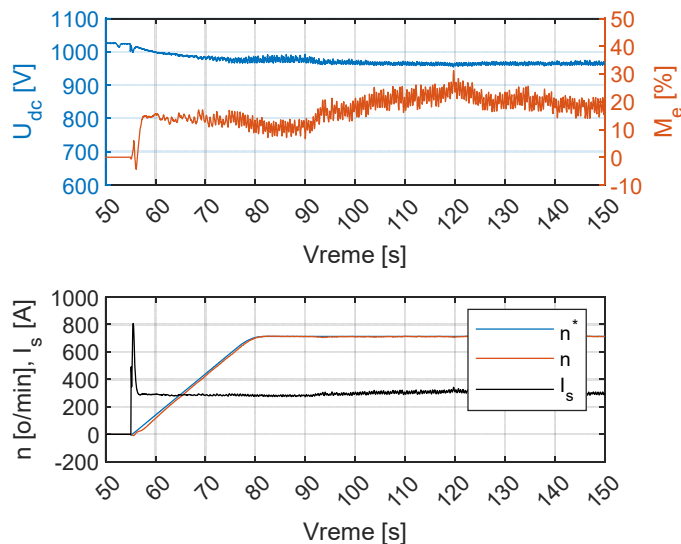
U izabranom frekventnom pretvaraču standardno su integrisani sistemi za merenje napona jednosmernog kola i struje motora. Na osnovu ovih izmerenih veličina računaju se vrednosti napona mreže i motora. Takođe, na osnovu dinamičkog modela motora može se izračunati moment motora u procentima od nominalne vrednosti. Neophodni podaci za dinamički model motora jednim delom se unose preko skupa parametara u frekventnom pretvaraču, a većim delom se određuju u toku rutine identifikacije motora (ID run). Dinamički model omogućava i izračunavanje estimirane brzine na osnovu merenih električnih veličina (speed sensor-less) kada se ne koristi davač na vratilu motora (enkoder), što je slučaj u modernizovanom pogonu. Pretvarač omogućuje akviziciju direktnog merenja njegove interne temperature, kao i temperature namotaja i ležajeva motora pomoću termo-sondi.

Mernu opremu korišćenu za verifikaciju performansi modernizovanog pogona čine:

- PC računar sa instaliranim softverom Drive composer pro, koji se koristi za konfigurisanje i praćenje rada frekventnog pretvarača,
- hardver, kabl za komunikaciju PC računara i frekventnog pretvarača.

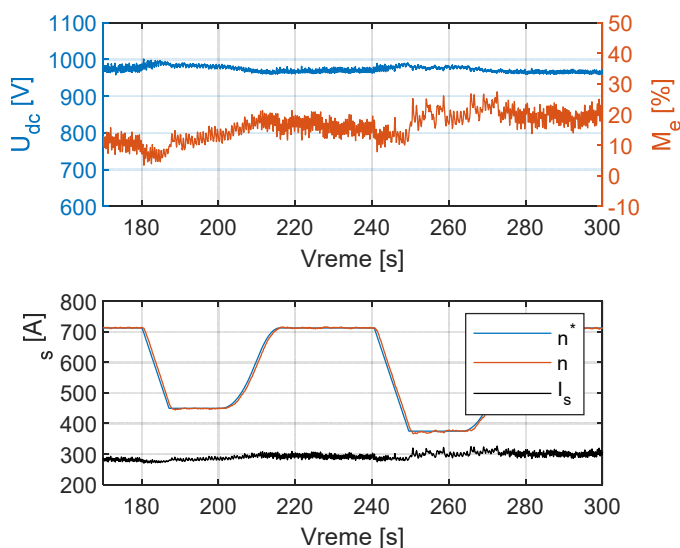
Na slici 12. prikazane su karakteristične veličine u toku pokretanja radnog elementa bagera vedričara. U periodu od trenutka porasta struje do početka porasta momenta motora, koji

ovde traje oko 2 (s) vrši se magnetizacija motora, odnosno uspostavljanje nominalnog fluksa motora. Tek posle magnetizacije motora, odnosno po uspostavljenom magnetnom polju u motoru, uspostavlja se moment i pogon kreće. Ubrzanje pogona je sa stalnim ubrzanjem definisanim parametrima koji određuju dužinu i oblik rampe.

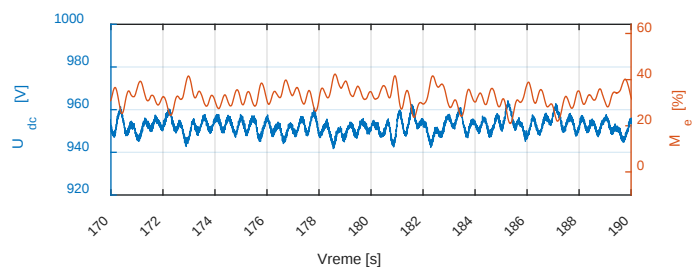


Slika 12. Vremenski dijagrami karakterističnih veličina pogona u toku pokretanja radnog elementa bagera verđičara

Na slici 13. posle dostizanja nominalne brzine od 745 (o/min) izvršeno je nekoliko smanjenja i povećanja zadate brzine pogona. Za podešenu vrednost ubrzanja i usporenja dinamička komponenta momenta ima malu vrednost. Podešene vrednosti trajanja ubrzanja i usporenja ne utiču na tehnološke karakteristike bagera ali značajno smanjuju naprezanja mehanizma radnog elementa.



Slika 13. Promena brzine radnog elementa bagera verđičara



Slika 14. Prikaz uticaja načina rada mehanizma na moment motora i napon jednosmernog međukola u pogonu sa frekventnim pretvaračem

Uticaj načina rada mehanizma na moment motora i napon jednosmernog međukola u pogonu sa frekventnim pretvaračem prikazan je na slici 14. Periodična varijacija napona jednosmernog međukola služi za privremeno skladištenje energije zbog promenljivog momenta opterećenja. Na taj način se smanjuje negativan uticaj radnog mehanizma na napojnu mrežu bagera.

VIII ZAKLJUČAK

Cilj rada je da se istakne značaj očuvanja i eventualnog produženja životnog veka postojećih postrojenja u fazi energetske tranzicije do potpunog prelaska na obnovljive energetske izvore. Svakako u okviru takvih aktivnosti treba težiti ka rešenjima koja će kroz primenu istovremeno ispunjavati opšte prihvaćene ciljeve o energetskej efikasnosti i visoke pouzdanosti, uz izbor opreme koja će biti dostupna na tržištu u očekivanom periodu eksploatacije.

U radu je prikazana modernizacija pogona radnog elementa bagera verđičara. Posle uvodnog poglavlja prikazan je mehanizam radnog elementa i razmatran je njegov uticaj na rad elektromotornog pogona. Sledeći deo rada opisuje originalno rešenje sa sredjenaponskim pokretačkim motorom nakon čega su dati rezultati merenja pre modernizacije. Realizovan modernizovan pogon radnog elementa bagera verđičara sa frekventnim pretvaračem opisan je u petom poglavlju nakon čega je dat prikaz i analiza merenih veličina pogona nakon modernizacije.

Pored navedenih prednosti primene modernih pogona postignuto je i poboljšanje faktora snage celog bagera i umanjen je uticaj periodičnih promena opterećenja iz mehaničkog podsistema na napojnu mrežu.

Kontrolisano ubrzanje i ograničenje momenta motora obezbeđuje manje naprezanje mehaničkog podsistema.

U periodu od modernizacije do danas, broj i trajanja zastoja zbog pogona radnog elementa bagera je bio zanemariv, što potvrđuje ispravnost odluke rukovodstva da se izvrši modernizacija.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Ignjatović, D. *Rudarske mašine II deo*, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2011
- [2] Bager verđičar, <https://rudarbalkan.blogspot.com/2016/02/ukratko-o-bageru-verdicaru.html> [pristupljeno 14.3.2024]

- [3] Kunze, G., Göhring, H., Jacob, K. *Baumaschinen Erdbau- und Tagebaumaschinen*, Praxis, ViewegTeubner, 2009.
- [4] Jovančić, P. *Održavanje rudarskih mašina*, Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, 2014.
- [5] Leonhard, W. *Control of Electrical Drives*, Springer-Verlag, Berlin, N. York, 1985.
- [6] Cohen, L. Time-frequency distributions-a review, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 77, No. 7, pp. 941-981, 2002. <https://doi.org/10.1109/5.30749>
- [7] Cohen, L. *Time-frequency analysis*, Prentice-Hall PTR, 1995
- [8] ABB industrial drives, ACS880, single drives 0.55 to 6000 kW Catalogue, 2024. <https://www.abb.com/global/en/product/drives/low-voltage-ac-drives/industrial-drives/acs880-single-drives> [pristupljeno 14.3.2024]
- [9] ABB DRIVES, *Technical guide book*, 2016 ABB 3AFE64514482 REV I 16.2.2016. https://library.e.abb.com/public/df559f6df460420c8a0b14d07d109263/TechnicalGuideBook_EN_3AFE64514482_RevI.pdf?x-sign=arsVM8eWTFP0aH7aIRXCo81+d5eH4mxuaYDaI2Ev3kSemrW3xcBoPapPV/YhMQ6R [pristupljeno 14.3.2024]

AUTORI/AUTHORS

mr Neša Rašić - predavač, Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd Odsek Visoka škola elektrotehnike i računarstva, nesar@viser.edu.rs, ORCID [0009-0000-8160-7653](https://orcid.org/0009-0000-8160-7653)

dr Aleksandra Grujić - profesor s.s., Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd Odsek Visoka škola elektrotehnike i računarstva, aleksandrag@gs.viser.edu.rs, ORCID [0000-0002-8372-2468](https://orcid.org/0000-0002-8372-2468)

dr Ivana Vlajić-Naumovska - profesor s.s., Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd Odsek Visoka škola elektrotehnike i računarstva, ivana.vlajic.naumovska@viser.edu.rs, ORCID [0009-0003-6364-8154](https://orcid.org/0009-0003-6364-8154)

msr Milan Ivezić - asistent, Akademija tehničko-umetničkih strukovnih studija Beograd Odsek Visoka škola elektrotehnike i računarstva, milan.ivezic@viser.edu.rs, ORCID [0009-0003-8260-4456](https://orcid.org/0009-0003-8260-4456)

dr Milan Bebić, - vanredni profesor, Elektrotehnički fakultet Univerzitet u Beogradu, bebic@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0003-2694-6980](https://orcid.org/0000-0003-2694-6980)

Regulated Drive of Working Element of Bucket-Chain Excavator ERs710

Abstract – Until the goal of complete transition to renewable energy sources is achieved, care must be taken to meet current energy needs. Of the total electricity produced in the Republic of Serbia in 2022, more than 68% will be energy obtained in thermal power plants. This data clearly indicates the necessity of preserving and extending the life of existing energy plants, which also include mining machines for unearthing the so-called overburden and coal (excavators) working in surface mines. The paper presents the modernization of the drive of the working element of the bucket-chain excavator.

Index Terms – Bucket-chain excavator, Asynchronous motor, Frequency converter, Modernization

Metode odabira kablova u okviru vetroparka uz pomoć softvera

Mina Stefanović, Iva Batić, Tomislav Rajić

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Rezime - S obzirom da vetroelektrane pripadaju obnovljivim izvorima energije i da se u svetu sve više obraća pažnja na emitovanje štetnih materija od strane termoelektrana, svedoci smo da obnovljivi izvor energije, pa samim tim i vetroparkovi, doživljavaju sve veći razvoj poslednjih godina. Imajući tendenciju brzog razvoja u budućnosti, kao i mogućnost da nadmaše konvencionalne izvore energije, predmet ispitivanja ovog rada će biti vetroparkovi, odnosno način njihovog kablovskog povezivanja.

Kablovi su neizostavni deo elektroenergetskog sistema i služe za prenos električne energije do krajnjih potrošača. Biće prikazan proračun tokova snaga u softveru u različitim situacijama, na osnovu koga će se vršiti odabir kabla.

Ključne reči - vetroparkovi, kablovi, strujno opterećenje

I UVOD

Energija vetra je, uz ogrevno drvo, prvi oblik primarne energije koju je čovek koristio. Veruje se da je energija vetra korišćena za navodnjavanje još pre 3000 godina. Prvu vetroturbinu koja je korišćena za generisanje električne energije napravio je Danac Poul la Cour 1891. godine. Zanimljivost je da je Poul la Cour koristio ovako proizvedenu električnu energiju za elektrolizu vode i na taj način je proizvodio vodonik za gasne lampe koje su korišćene u lokalnoj školi. Danas se može reći da je on bio 100 godina ispred svoga vremena, jer su savremene vizije razvoja vetroenergetike povezane upravo sa korišćenjem vetrogeneratora za proizvodnju vodonika u udaljenim vetrovitim lokacijama u Severnom moru.

Nakon završetka Drugog svetskog rata, ekonomija u elektroenergetici biva okrenuta velikim termoelektranama na fosilna goriva i velikim hidroelektranama, tako da vetrogeneratori, kao i ostali mali izvor energije, postaju nekonkurentni i polako prelaze u zaborav. Energetska kriza iz 1973. godine, a kasnije i sve veći ekološki problemi u vezi sa sagorevanjem fosilnih goriva, ponovo popularizuju obnovljive izvore energije i početkom devedesetih godina vetrogeneratori doživljavaju renesansu. Velika finansijska ulaganja i jasna opredeljenost najrazvijenijih država da stimulišu proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora su rezultirale izuzetno brzim razvojem vetroenergetike [1-3].

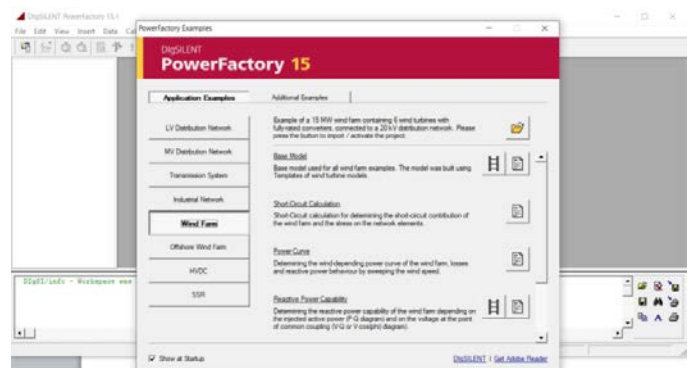
Kablovi su neizostavni deo elektroenergetskog sistema i služe za prenos električne energije do krajnjih potrošača. Pod kablom se podrazumevaju provodnici koji su električno izolovani i smešteni u zajednički omotač za zaštitu od spoljašnjeg uticaja (mehanička oštećenja, vlaga, korozija itd.) [4, 5]. Kablovski vod je deo elektroenergetskog sistema koji se sastoji od kabla ili međusobno povezanih kablova spojnica, čiji se krajevi preko kablovskih

završnica uključuju na druge sisteme (generator, transformator, potrošač i dr.). Energetski kablovi koriste se najčešće u gradskim sredinama i na kraćim rastojanjima. Pri prenosu električne energije na velike udaljenosti kablovi najviših napona ne mogu parirati nadzemnim vodovima, prvenstveno zbog konstrukcijskih karakteristika i ekonomičnosti. Prednost kablova u odnosu na nadzemne vodove ogleda se u smanjenju utroška prostora i pre svega u sigurnosti prenosa električne energije [6-8].

Kako bismo pravilno izvršili odabir kablova u okviru nekog vetroparka, u ovom radu je korišćen softver DIGSilentGmbH. DIGSILENT je nezavisna softverska i konsultantska kompanija koja pruža visoko specijalizovane usluge u oblasti elektroenergetskih sistema za prenos, distribuciju, proizvodnju, industrijska postrojenja i obnovljive izvore energije. DIGSILENT-ov inovativni portfolio proizvoda obuhvata PowerFactory, StationWare i sisteme za nadzor. PowerFactory je vodeći softver za analizu elektroenergetskog sistema koji pokriva čitav niz funkcionalnosti, od standardnih funkcija do visoko sofisticiranih i naprednih aplikacija. Za upravljanje zaštitom, DIGSILENT nudi StationWare, centralnu bazu podataka postavki zaštite i sistem upravljanja imovinom i poslovnim procesima. Sa nadzornim sistemima, DIGSILENT pruža multifunkcionalne merne sisteme. Monitoring elektroenergetskog sistema PFM300 sadrži nadzor mreže i postrojenja, snimanje kvarova, kvalitet električne energije i analizu karakteristika mreže. DIGSILENT je sertifikovan prema standardu ISO 9001:2015 [1].

II METODOLOGIJA

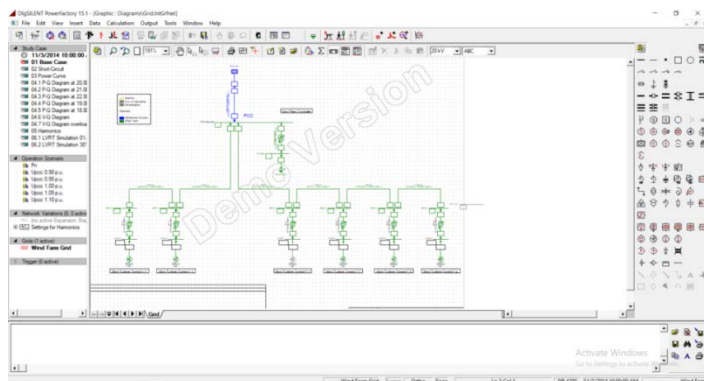
Na slici 1. su prikazani primeri koje softver DIGSilent nudi kao gotove mreže. Odabrana je „Vetro farma” snage 15 MW, koja sadrži 6 vetroturbina i koja je priključena je na 20 kV distributivnu mrežu.



Slika 1. Primeri gotovih mreža [1]

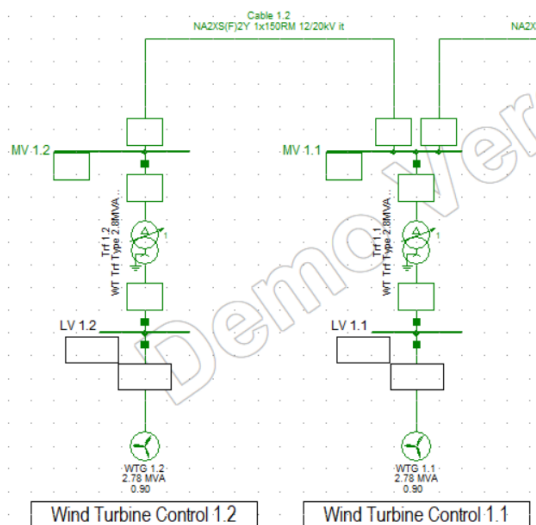
Šema odabrane mreže „Vetro farma” je prikazana na slici 2., kao

i različite vrste komandi (desni i gornji deo ekrana), radni list (centralni deo ekrana), pregled različitih projekata ili različitih radnih listova u okviru jednog projekta (levi deo ekrana).



Slika 2. Radno okruženje [1]

Na slici 3. prikazane su uvećane dve vetroturbine iz šeme koja se razmatra, a koje su međusobno povezane kablom poprečnog preseka 150 mm².



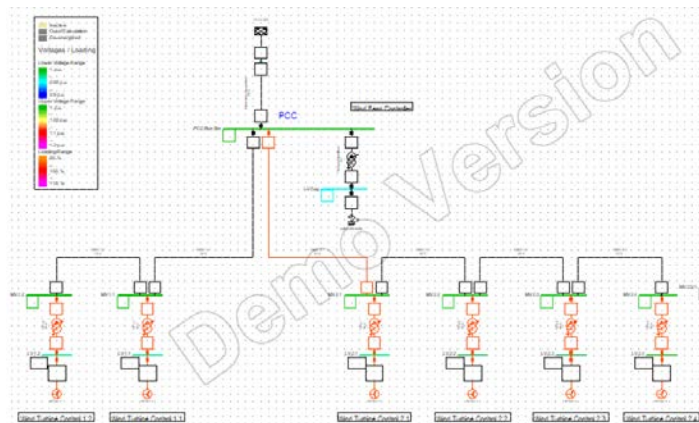
Slika 3. Uvećani prikaz vetroturbina [1]

II-1 Analiza šeme vetroparka u programu DigSilent

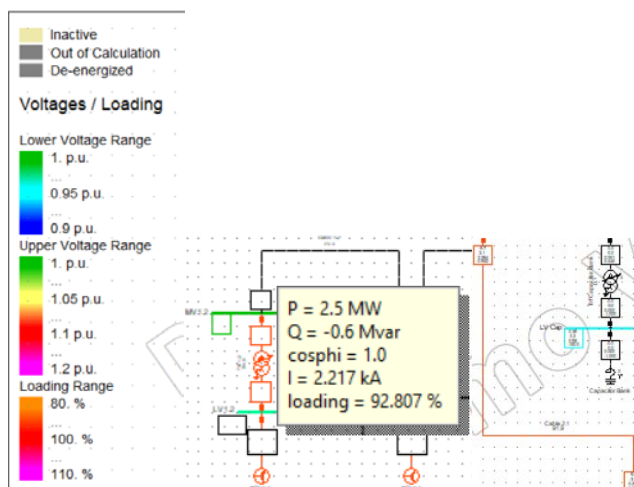
Posmatra se šema vetroparka sa šest vetroturbina. Na početku razmatranja svaka vetroturbina ima aktivnu snagu od $P=2,5$ MW, nominalnu prividnu snagu od $S=2,778$ MVA i faktor snage $\cos\phi=1$. Kablovi koji povezuju vetroturbine su poprečnog preseka 150 mm², dok je kabl koji ide ka mreži preseka 400 mm².

Proračun tokova snaga na početku razmatranja prikazan je na slici 4.

Nivo opterećenja se na šemi prikazuje različitim bojama, kao što je prikazano na slici 5. Kako je šema pretežno narandžaste boje, zaključuje se da se ima opterećenje od 92,807% na svakoj jedinici, prikazano na slici 5. Veliko opterećenje je takođe prisutno na kابلu oznake 2,1 od 91,9%.



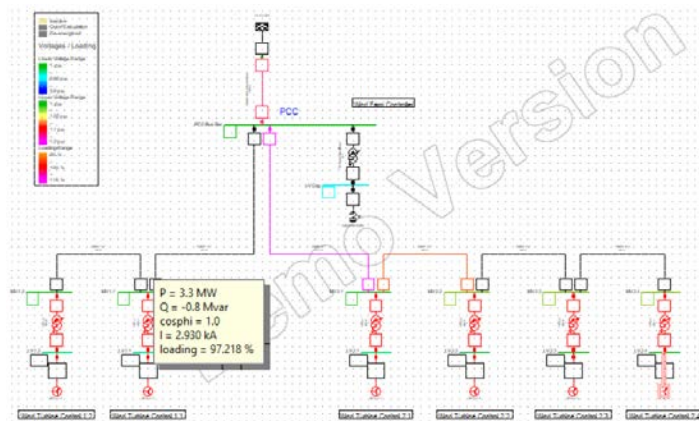
Slika 4. Proračun tokova snaga na početku razmatranja



Slika 5. Nivo opterećenja za slučaj $P=2,5$ MW

Sada se posmatra režim kada je snaga svih vetroturbina $P=3,3$ MW, dok je prividna snaga $S=3,5$ MVA. Kablovi su istog poprečnog preseka, kao u prethodnom slučaju. Sledeći izraz predstavlja vezu između snage vetroagregata i brzine vetra.

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 v^3 \quad (1)$$



Slika 6. Proračun tokova snaga za režim 3,3 MW

Snaga P koja je prenet na rotor vetrogeneratora je proporcionalna površini koju pokriva rotor, gustini vazduha ρ , trećem stepenu brzine vazduha v , kao i faktoru iskorišćenja α .

Proračun tokova snaga je prikazan na slici 6. Zaključuje se da se sa povećanjem aktivne snage na svim turbinama, povećava i opterećenje, koje sada iznosi 97,218%.

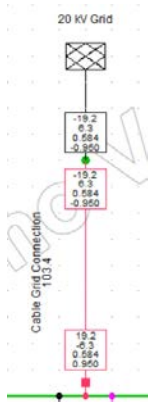
Kada su u pitanju kablovi, proračun prikazuje da je kabl oznake 2.1 obojen ljubičastom bojom, što znači da je opterećeniji nego u prethodno posmatranom slučaju, kada je bio narandžaste boje. Njegovo preopterećenje u ovom slučaju je 121,4%.

Za razliku od prethodnog slučaja, kada kabl oznake 2.2 nije bio opterećen, sada je prilično opterećen i to 90,8%. Preopterećenje je prikazano na slici 7.



Slika 7. Preopterećenje kablova za slučaj kada sve vetroturbine imaju $P=3,3$ MW

Preopterećenje se može primetiti i na kابلu koji povezuje vetropark sa 20 kV mrežom, čak 103,4%, prikazano na slici 8.



Slika 8. Nivo opterećenja za slučaj $P=3.3$ MW

Cilj ovog rada je pronaći optimalni presek kabl, tako da nigde u mreži nemamo preopterećenje kada agregati rade sa maksimalnom snagom.

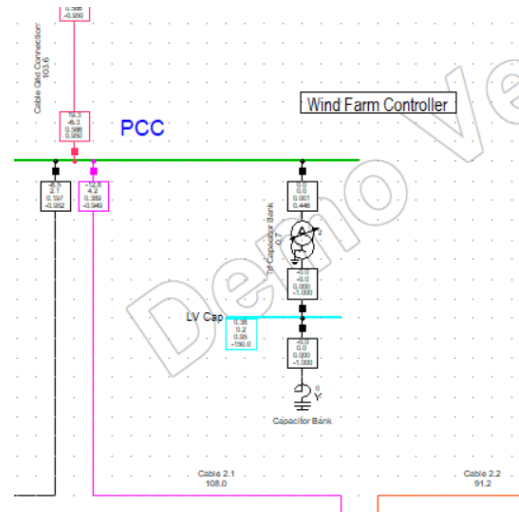
II-2 Odabir optimalnog preseka kablova

Kako bi se otklonilo preopterećenje u vetroparku, proizvoljno će biti izabran prvi veći presek kabl oznake 2.1, a to je 185 mm². Svi ostali parametri na šemi ostaju nepromenjeni. Proračun tokova snaga prikazan je na slici 9.

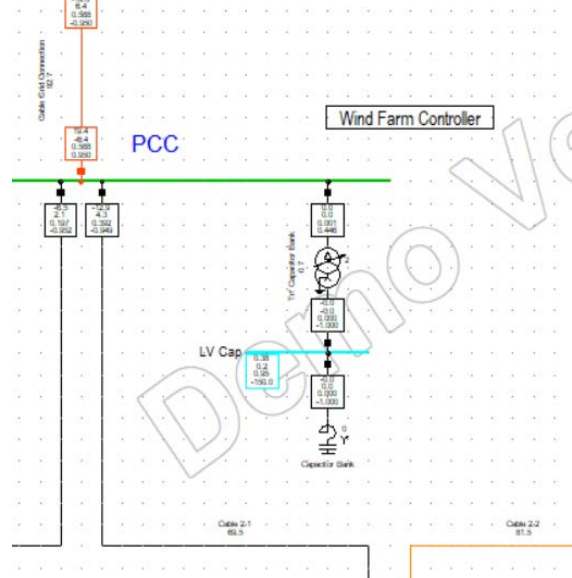
Proračun tokova snaga pokazuje da je kabl oznake 2.1 i dalje preopterećen, i to 108%, dok je kabl oznake 2.2 opterećen, ali u granicama dozvoljenog, 91,2%. Kabl koji povezuje vetropark sa mrežom ima preopterećenje od 103,6%.

S obzirom da kabl oznake 2.1 i dovodni kabl ne zadovoljavaju zadate uslove, biće izabrani veći poprečni preseki. Takođe će biti izabran veći poprečni presek kabl oznake 2.2, kako bi se opterećenje smanjilo. Za kabl oznake 2.1 to je 400 mm², za kabl

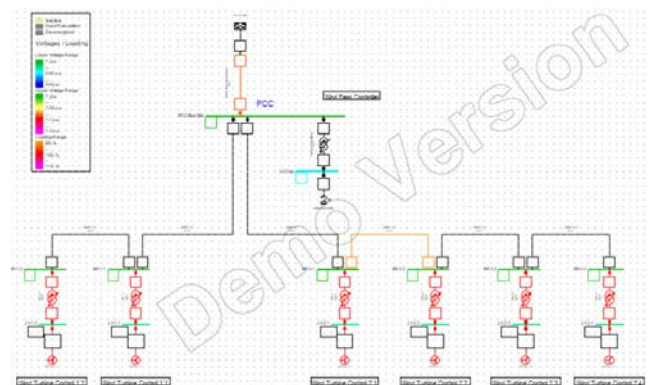
2.2 je 185 mm², a za dovodni kabl, koji je do sada bio preseka 400 mm², sada će biti 500 mm². Proračun tokova snaga prikazan je na slici 10.



Slika 9. Proračun tokova snaga



Slika 10. Proračun tokova snaga

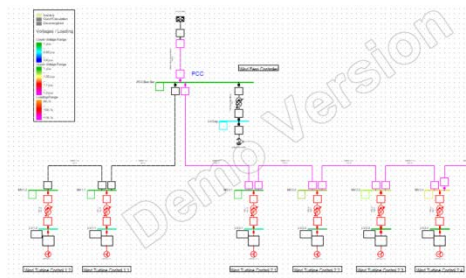


Slika 11. Šema celokupne mreže sa zadovoljavajućim parametrima

Uvođenjem većih poprečnih preseka, dobija se zadovoljavajuće rešenje. Kabl oznake 2.1 više nije preopterećen, njegovo opterećenje je sada 69,5%, kabl oznake 2.2 ima opterećenje od 81,5%, dok dovodni kabl takođe više nije preopterećen, već ima opterećenje od 92,7%.

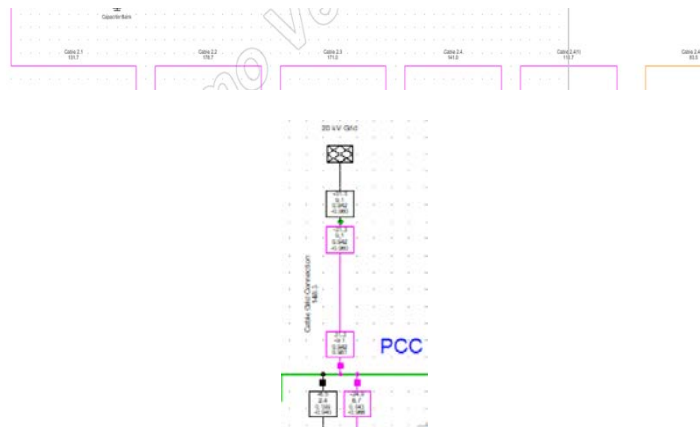
Šema celokupne mreže sa zadovoljavajućim parametrima data je na slici 11.

Sada se posmatra složenija šema sa još četiri vetroagregata istih karakteristika na slici 12.



Slika 12. Šema sa deset vetroagregata

Ovakva konfiguracija je dovela do toga da skoro svi kablovi budu preopterećeni, što se može videti na slici 13.



Slika 13. Nivo opterećenja za dodata četiri vetroagregata

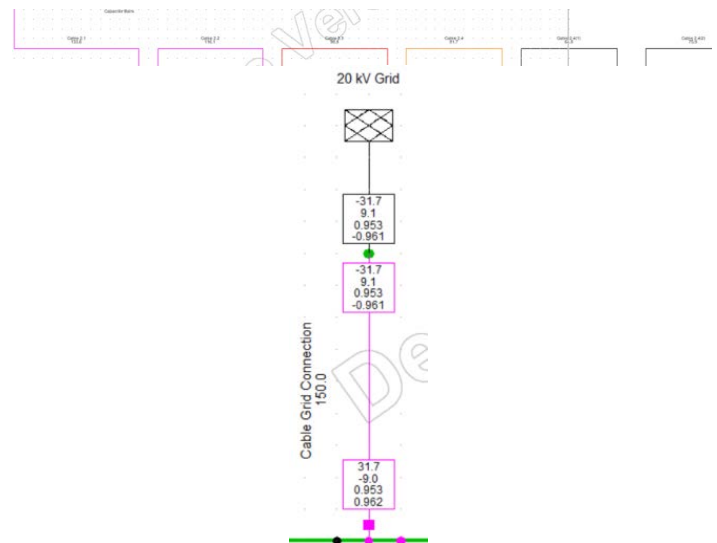
Na šemi sa slike 12 se vidi da su dodati vetroagregati narančaste boje, što ukazuje na opterećenje manje nego kod agregata crvene boje koji rade sa maksimalnom snagom. Kao i do sada, cilj je pronalaženje optimalnog poprečnog preseka kablova, tako da mreža ne bude preopterećena.

U ovom slučaju opterećenja su iznosila: kabl 2.1 – 131,7%, kabl 2.2 – 178,7%, kabl 2.3 – 171%, kabl 2.4 – 141%, kabl 2.4(1) – 111,7%, kabl 2.4(2) – 83,5%, dovodni kabl – 148,3%.

II-3 Odabir optimalnog preseka kada su dodata četiri vetroagregata

Izabrani su sledeći poprečni preseki: kabl 2.1 – 400 mm², kabl 2.2 – 400 mm², kabl 2.3 – 400 mm², kabl 2.4 – 400 mm², kabl 2.4(1) – 400 mm², kabl 2.4(2) – 185 mm² (kako bi se smanjilo

opt), dovodni kabl – 500 mm².



Slika 14. Nivo opterećenja za dodata četiri vetroagregata sa optimalnim presekom kablova

Nakon proračuna tokova snaga, dobijene su sledeće vrednosti, slika 14.

U ovom slučaju opterećenja su iznosila: kabl 2.1 – 133,6%, kabl 2.2 – 116,1%, kabl 2.3 – 98,8%, kabl 2.4 – 81,7%, kabl 2.4(1) – 64,8%, kabl 2.4(2) – 75,9%, dovodni kabl – 150%.

Na osnovu proračuna tokova snaga, može se zaključiti da kablovi oznaka 2.1, 2.2, kao i dovodni kabl, ne zadovoljavaju uslov u pogledu opterećenja. Kabl oznake 2.3 je opterećen blizu gornje granice, te će se uzeti u razmatranje, kako bi se smanjilo opterećenje.

Kako program ne nudi veće poprečne preseke od 500 mm², za dovodni kabl izabrana su dva paralelna kabla od 400 mm², a to je takođe primenjeno i na kablove oznaka 2.1 i 2.2. Za kabl oznake 2.3 izabran je poprečni presek od 500 mm².

Od samog početka proračuna proizvoljno je izabrano da kablovi budu položeni u kanalu direktno u zemlji, na dubini od 1m, raspoređeni horizontalno, u veoma vlažnoj sredini.

Nakon proračuna tokova snaga, dobijena su opterećenja prikazana na slici 15.

U ovom slučaju opterećenja su iznosila: kabl 2.1 – 67,2%, kabl 2.2 – 58,5%, kabl 2.3 – 89,3%, dovodni kabl – 84,6%.

Zaključuje se da su izabrani preseki zadovoljavajuće rešenje problema.

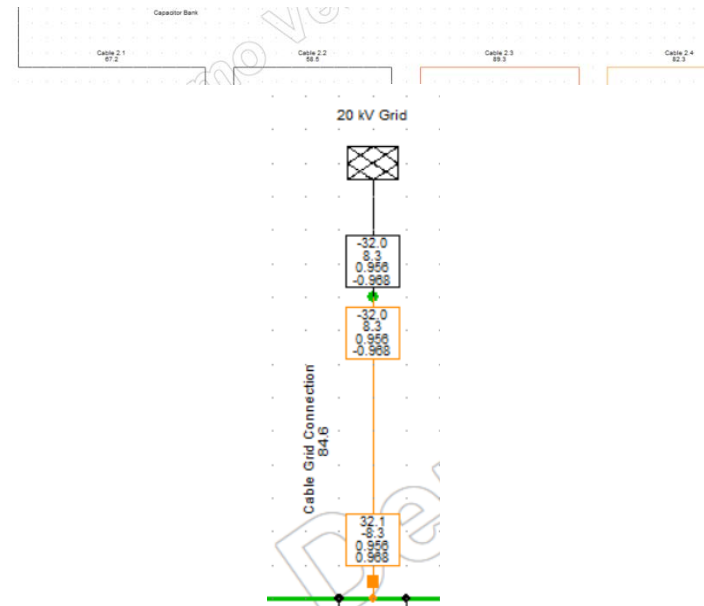
Međutim, pokazano je da je opterećenje dovodnog kabla zadovoljavajuće, ali ipak prilično veliko (84,6%).

Razmotriće se alternativno rešenje.

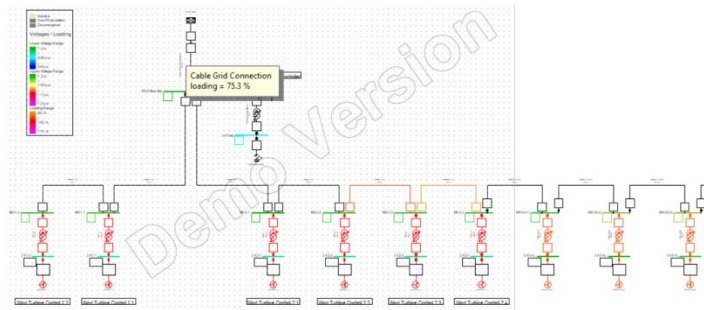
Alternativno rešenje je povećan poprečni presek koji podrazumeva dva paralelna kabla od 500 mm².

Proračun tokova snaga prikazan je na slici 16. Opterećenje

dovodnog kabla je 75.3%, što i jeste manje nego u prethodno posmatranom slučaju na slici 15.



Slika 15. Nivo opterećenja nakon proračuna tokova snaga



Slika 16. Proračun tokova snaga za slučaj sa dva paralelna dovodna kabla od 500 mm²

Rezultati su prikazani u tabelama. Tabela 1 prikazuje vrednosti posmatrane do momenta priključenja četiri dodatna agregata, dok tabela 2 uvažava prisutnost dodatnih agregata.

Tabela 1. Dobijene vrednosti do momenta priključenja 4 agregata

Opterećenje [%] / Opis konfiguracije	Dovodni kabl	Kabl 2.1	Kabl 2.2
P=2.5MW S=2.778MVA Svi kablovi 150 mm ²	Vrednost zadovoljavajuća, nije od značaja	91,9	Vrednost zadovoljavajuća, nije od značaja
P=3.3MW S=3.5MVA Svi kablovi 150 mm ²	103,4	121,4	90,8
Kabl 2.1 185 mm ²	103,6	108	91,2

Dovodni 500 mm ² 2.1 - 400mm ² 2.2 - 185mm ²	92,7	69,5	81,5
---	------	------	------

Tabela 2. Dobijene vrednosti od momenta priključenja 4 agregata

Opterećenje [%] / Opis konfiguracije	Dovodni kabl	Kabl 2.1	Kabl 2.2	Kabl 2.3	Kabl 2.4	Kabl 2.4(1)	Kabl 2.4(2)
Još 4 agregata Dovodni 500 mm ² 2.1 - 400mm ² 2.2 - 185mm ²	148,3	131,7	178,7	171	141	111,7	83,5
Dovodni 500 mm ² od 2.1 do 2.4(1)- 400mm ² 2.4(2) - 185mm ²	150	133,6	116,1	98,8	81,7	64,8	75,9
Dovodni 2x400 mm ² u zemlji 2.1-2x400 mm ² 2.2-2x400 mm ² 2.3-500 mm ²	84,6	67,2	58,5	89,3	82,4	64,8	75,9
Dovodni 2x500 mm ² u zemlji	75,3	67,2	58,5	89,3	82,4	64,8	75,9

III ZAKLJUČAK

Stalni napredak čovečanstva u sferama nauke sve više osavremenjuje elektroenergetske sisteme, omogućavajući da se isprati trend rasta potrošnje, poveća pouzdanost mreža i konačno obrati pažnja na sve popularniju i zastupljeniju zaštitu životne sredine. Takođe, stalni tehnološki razvoj nudi sve veći broj softverskih alata pomoću kojih je moguće analizirati probleme u vezi sa energetske kablovima. Jedan od njih je i DigSilent, koji je korišćen za proračune u ovom radu.

Što se softverskog alata tiče, njegovo korišćenje je prilično jednostavno, pregledan je korisnički interfejs i brzo se dobijaju potrebni rezultati. Treba napomenuti da je prilikom analize u ovom radu samo deo podataka preuzet iz programa, da on pored njih daje uvid u mnogo detaljniju analizu svih procesa vezanih za energetske kablove i sisteme. Stoga se treba nadati da će u skladu sa stalnim napretkom tehnologije ovakvi softveri postati dostupniji, precizniji i još jednostavniji, jer mogu značajno olakšati inženjerski rad.

Na osnovu dobijenih rezultata proračunom tokova snaga zaključak je da se za veća opterećenja moraju birati veći poprečni preseki kablova. Na opterećenje, pored poprečnog preseka, utiče i broj paralelno vođenih kablova, kao i mesto polaganja kabla. Na opterećenje čitave mreže utiče broj priključenih vetroagregata, kao i njihova snaga.

U ovom radu posmatran je slučaj kada svi vetroagregati rade istom maksimalnom snagom i smatra se da, ukoliko svi kablovi mogu da podnesu takvo opterećenje, moći će bez problema da podnesu i manje opterećenje, kada su neki agregati isključeni ili

ne daju maksimalnu snagu, u slučajevima sa nešto slabijim vetrom.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Power System Software & Engineering. <https://www.digsilent.de/en/> [pristupljeno 14.02.2024]
- [2] Đurišić, Ž. *Vjetroelektrane*, Beograd, Elektrotehnički fakultet, 2015.
- [3] Kuzman, M., Grujić, D. Uloga zajednica obnovljivih izvora energije u energetske tranziciji, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 1, pp. 40-50, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE21-4.64R>
- [4] Strezoski, L. Sistemi za upravljanje distribuiranim energetske resursima: stanje u oblasti, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 3, pp. 24-29, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-3.24S>
- [5] Đukić, P., Đukanović, S. Konfuzija u energetske tranziciji – svet i Srbija danas, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 3, pp. 17-23, 2023.
- [6] Nikolačević, S.V. *Kablovska tehnika*, Beograd, JP Službeni list SRJ, 2007.
- [7] Tasić, D.S. *Osnovi elektroenergetske kablovske tehnike*, Niš, Elektronski fakultet, 2001.
- [8] Nikolačević, S., *Kablovska Tehnika*, JP Službeni list SRJ, Beograd 2007.

AUTORI/AUTHORS

Mina Stefanović, dipl. inž. el. i rač, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, stefanovicmina.97@gmail.com, ORCID [0009-0006-1674-1921](https://orcid.org/0009-0006-1674-1921)
dr Iva Batić, naučni saradnik, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija, iva@etf.rs, ORCID [0000-0003-0150-3235](https://orcid.org/0000-0003-0150-3235)
dr Tomislav Rajić, docent, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Srbija, rajic@etf.rs, ORCID [0000-0003-4796-4117](https://orcid.org/0000-0003-4796-4117)

The Cable Selection Methods in Wind Farms Using Software

Abstract – Given that wind power plants belong to renewable energy sources and that the world is paying more and more attention to the emission of harmful substances by thermal power plants, we are witnessing that renewable energy sources, and therefore also wind farms, are experiencing increasing development in recent years. Having the tendency of rapid development in the future, as well as the possibility of surpassing conventional energy sources, the subject of examination of this paper will be wind farms, that is, the method of their cable connection.

Cables are an indispensable part of the power system and serve to transmit electricity to end consumers. The calculation of the power flows in the software will be shown in different situations, based on which the cable selection will be made.

Index Terms – Wind power plants, Cables, Current ampacity

Od ideje do realizacije vetroparka – Pregled administrativne procedure i zakonske regulative u Republici Srbiji

Miloš Ječmenica, Nikola Grbić

Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Rezime - U radu je prikazan tipičan tok realizacije projekta vetroparka u Republici Srbiji. Kroz pregled zakonske regulative i administrativne procedure u postupku ishodovanja neophodnih dozvola i saglasnosti, kao i izrade svih faza projektno-tehničke dokumentacije, detaljno je predstavljen tok aktivnosti koje je potrebno sprovesti na putu od ideje do dobijanja upotrebne dozvole i priključenja vetroparka na elektroenergetsku mrežu. Na primeru projekta vetroparka, ukupne instalisane snage preko 10 MW sprovedena je analiza administrativne procedure, zakonske regulative i tehničkih zahteva sa obrazloženjem svake aktivnosti tokom realizacije ovog projekta. Formirana je metodologija koja se može koristiti za temeljnije sagledavanje obima i kompleksnosti aktivnosti pri razvoju ovakvih projekata, uključujući i fotonaponske elektrane. Shodno tome, poželjno je korišćenje softverskih alata za praćenje i upravljanje projektima. Očekuje se da ovaj rad bude od koristi pri sagledavanju neophodnih aktivnosti na razvoju ovakvih i sličnih projekata iz oblasti obnovljivih izvora energije.

Ključne reči - obnovljivi izvori energije, vetropark, fotonaponska elektrana, projekat za građevinsku dozvolu, upotrebna dozvola

I UVOD

Učešće električne energije iz vetroelektrana, u odnosu na ukupnu potrošnju električne energije, se neprekidno povećava. Globalno, 77,6 GW novih kapaciteta energije vetra je priključeno na električne mreže tokom 2022. godine, čime je ukupni instalirani kapacitet vetroelektrana širom sveta dostigao 906 GW, što je rast od 9% u poređenju sa 2021, [1]. Podaci za Srbiju su ohrabrujući jer je trenutno u fazi realizacije nekoliko vetroparkova.

Jedan od ključnih izazova u korišćenju energije vetra je promenljivost brzine vetra. Vetar nije uvek dostupan i konstantan, dok brzina vetra varira tokom dana, sezona i godina. To dovodi do oscilacija u proizvodnji električne energije, što predstavlja izazov za stabilnost elektroenergetskog sistema. Da bi se izbalansirala promenljiva proizvodnja električne energije iz vetra, često je potrebno skladištiti višak energije kada je vetar jak, a istu koristiti u slučaju slabog vetra [2]. Unapređenje tehnologije vetrogeneratora, veći kapaciteti skladištenja energije i bolje upravljanje elektroenergetskim mrežama pomažu u smanjenju uticaja promenljivosti brzine vetra na stabilnost snabdevanja električnom energijom iz vetroelektrana.

U prvom delu rada predstavljeni su polazni koraci pri početku realizacije ovakvog projekta, poput izbora lokacije i merenja vetropotencijala na njoj. U nastavku je dat pregled inicijalnih koraka pri realizaciji projekta vetroparka sa pregledom

administrativne procedure, zakonske regulative i prikazom tehničkih opisa ključnih koraka, u skladu sa pravilima struke. Opisani su ključni koraci u razvoju projekta vetroparka u Republici Srbiji, gde je detaljno prikazan postupak priključenja ovakvih energetske objekata na distributivni i prenosni sistem, sa osvrtnom na važeću zakonsku regulativu. Zatim, opisan je tok ovog projekta od projektovanja, preko izvođenja i puštanja u rad do priključenja na prenosni sistem. Na primeru mrežnog i dinamičkog plana aktivnosti projekta može se ustanoviti zahtevani obim ovog projekta.

II PRIPREMNA FAZA

Ovo poglavlje pruža osnovne smernice i uputstva za investitore vetroparkova i može se posmatrati kao sinteza administrativnih procedura, zakona, propisa i tehničkih zahteva kod ovih elektroenergetskih projekata. Kroz naredne korake hronološki je dat opis osnovnih aktivnosti u pripremnoj fazi ovakvog projekta.

II-1 Izbor lokacije i određivanje kvaliteta vetra

Prvi korak u razvoju projekta vetroparka je određivanje lokacije vetroparka. Izbor odgovarajuće lokacije za vetropark je ključan za uspešan razvoj projekta vetroparka, a u nastavku su dati neki od faktora koje je potrebno razmotriti pri njenom odabiru:

- Kvalitet vetra koji se obično analizira uzimajući u obzir tri osnovna pokazatelja: brzinu, smer i turbulentnost.

Visoka brzina vetra obično rezultuje većom proizvodnjom energije u vetroelektranama, usled činjenice da kinetička energija vetra raste sa kvadratom njegove brzine. To ima za posledicu da relativno male promene u brzini vetra mogu znatno uticati na količinu dostupne energije. Električna energija koju proizvodi vetroelektrana je srazmerna trećem stepenu brzine vetra. Ovo svojstvo visoke osetljivosti na brzinu vetra čini vetroparkove efikasnim na lokacijama s konstantno visokom brzinom vetra. Od interesa je odabrati lokacije sa povoljnim brzinama vetra kako bi se postigla što veća proizvodnja energije, a ujedno, i brži povrat investicije.

Smer vetra je važan jer vetroagregati moraju da budu okrenuti prema vetru kako bi efikasnije iskoristili kinetičku energiju vetra. Precizno praćenje smera vetra omogućava optimalno usmeravanje vetroelektrana prema vetru i povećava efikasnost. Turbulentnost vetra odnosi se na promene brzine i smera vetra koje se događaju u kratkim vremenskim intervalima. Visoka turbulentnost može negativno uticati na performanse vetroelektrane jer oscilacije brzine i smera vetra mogu uzrokovati mehanička naprezanja na opremi. Stoga je poželjno da vetar bude što manje turbulentan kako bi se osigurala stabilna proizvodnja energije.

Sam proces određivanja kvaliteta vetra na određenoj lokaciji počinje postavljanjem mernih (anemometarskih) stubova. U procesu merenja vetra poželjno je da visina merenja bude ista ili bliska visini rotora vetrogeneratora pa je preporučljivo da se postavi što viši stub za merenje, kako bi i merni podaci obezbedili bolji i pouzdaniji proračun proizvodnje vetroparka.

Po podizanju mernog stuba otpočinje period merenja gde je jednogodišnji period merenja obično dovoljan da se odrede sezonske varijacije u brzini, smeru i pravcu vetra. Korelišući podatke sa mernih stubova sa podacima okolnih meteoroloških stanica može se dobiti godišnja promenljivost vetra. Svrha merenja vetra je merenje brzine, pravca i smera vetra i temperature vazduha. Ovi parametri su od značaja za tehnno-ekonomsku analizu izvodljivost projekta na izabranoj lokaciji [3]. Parametri koji mogu da utiču na potencijal vetra su izmereni vazdušni pritisak i relativna vlažnost vazduha. Merenja na nekoliko visinskih profila se vrše kako bi se odredio vertikalni gradijent vetra.

Učestalost vetra iz pojedinih pravaca se koristi prilikom definisanja rasporeda vetrogeneratora unutar vetroelektrane. Podaci o temperaturi vazduha su značajni kako bi se odredili temperaturni uslovi u kojima će vetroelektrana biti operativna i kako bi se izbegla mogućnost pojave zaleđivanja. Temperatura se obično meri na visini od 2 m od tla i na visini koja odgovara visini rotora. Merenja vazdušnog pritiska u kombinaciji sa merenjima temperature vazduha omogućava se određivanje gustine vazduha.

Na osnovu podataka sa mernog stuba (merenja u trajanju od minimum godinu dana), podataka o orografiji (opisivanje brda i planina) i hrapavosti terena, korišćenjem namenskih softvera (WasP, WindSim, ...) može se prostornom ekstrapolacijom dobiti mapa vetroenergetskog potencijala na datoj lokaciji. Rastojanja između susednih vetrogeneratora koja su neophodna da bi se umanjio uticaj efekta zavetrine i mehanička naprezanja usled turbulencija iznose 5D (gde je D prečnik vetroturbine) u pravcu dominantnog vetra i 3D u pravcu normalnom na njega, ali se u praksi koriste rastojanja od 7D i 2,7D, respektivno.

- b) Topografija terena se odnosi na fizičke karakteristike analiziranog područja, uključujući prisutnost brda, planina, dolina, zaravni, reka i drugih geografskih obeležja, i ima važnu ulogu u uticaju vetra na lokaciji. Najpogodniji slučaj je kada na lokaciji vetroparka nema velikih prepreka koje bi mogle smanjiti snagu vetra i/ili povećati njegovu turbulentnost iznad dozvoljenih granica.
- c) Pristup infrastrukturi je od značaja jer sam vetropark zahteva dostupnost saobraćajne, elektroenergetske i telekomunikacione mreže. Takođe, dostupnost i blizina raspoložive ove infrastrukture će uticati na redukovanje troškova izgradnje i održavanja čitavog projekta.
- d) Pri odabiru lokacije od značaja je i udaljenost od naselja kako bi se osigurala bezbednost stanovnika, smanjio negativan uticaj usled buke koju stvaraju vetrogeneratori pri radu [4], redukovao efekat treperenja senke koji potiče od visokih lopatica vetrogeneratora koje rotiraju velikom brzinom i stvaraju senku.

- e) Sama lokacija je poželjno da bude odabrana tako da minimizuje negativne ekološke uticaje.
- f) Takođe, finansijski aspekti u pogledu troškova izgradnje i održavanja vetroparka na određenoj lokaciji imaju važnu ulogu u izboru lokacije.
- g) Društveni faktori koji mogu uticati na projekat, uključuju odnose sa lokalnom zajednicom i potencijalne benefite koje bi sam projekat mogao doprineti lokalnoj zajednici.
- h) Mogućnost rešavanja imovinsko-pravnih odnosa u smislu ostvarivanja prava na zemljištu (kupovine, zakupa ili ostvarivanja prava službenosti na zemljištu).

II-2 Izrada plana detaljne regulacije

U pripremnoj fazi projekta potrebno je proveriti da li je u važećim planskim dokumentima na izabranoj lokaciji predviđena izgradnja vetroelektrane, jer u slučaju da nije, najčešće, se pristupa pokretanju izrade plana detaljne regulacije (PDR). Izrada PDR-a za vetropark je kompleksan proces koji uključuje različite pravne, tehničke, ekonomske i ekološke aspekte. Cilj njegove izrade je stvaranje uslova za korišćenje zemljišta za potrebnu saobraćajnu i tehničku infrastrukturu i elektroenergetske objekte, kao i utvrđivanje režima i uslova korišćenja zemljišta. PDR je detaljno obrađen u [5]. U ovom procesu karakteristično je nekoliko koraka, i to: pokretanje procedure izrade PDR, inicijativa za izradu i odluka o izradi plana, početak izrade i rani javni uvid, izrada nacrti i njegova stručna kontrola, javni uvid i njegovo donošenje.

III POSTUPAK PRIKLJUČENJA VETROELEKTRANE NA DISTRIBUTIVNI SISTEM

JP Elektro distribucija Srbije je zadužena za distribuciju električne energije, u svojstvu operatora distributivnog sistema (ODS) i nadležna je za priključenje elektrana na distributivni sistem električne energije (DSEE). U skladu sa [5], [6], [9], [10] i ostalim podzakonskim aktima, u toku postupka priključenja, na zahtev investitora vetroelektrane, nadležni ogranak ODS-a sprovodi sledeće aktivnosti:

- izdaje mišljenje o uslovima i mogućnostima priključenja na DSEE objekta za proizvodnju električne energije;
- izrađuje studiju priključenja elektrane na DSEE;
- izdaje uslove za dokumente prostornog i urbanističkog planiranja;
- izdaje uslove za projektovanje i priključenje;
- izdaje rešenje o odobrenju za priključenje elektrane na DSEE;
- zaključuje ugovor o pružanju usluge za priključenje elektrane na DSEE;
- zaključuje ugovor o eksploataciji elektrane i
- zaključuje ugovor o izgradnji nedostajuće infrastrukture.

U postupku priključenja vetroelektrane na DSEE od interesa je pojasniti i bliže opisati pojedinačne korake, i to:

- Ishodovanje mišljenja o uslovima i mogućnostima priključenja na DSEE objekta za proizvodnju električne energije koje se izdaje za potrebe izdavanja energetske dozvole i obavezno je za sve elektrane za koje je u skladu sa [6] potrebno ishodovanje energetske dozvole. Iako se

mišljenje može ishodovati u bilo kom momentu pre podnošenja zahteva za građevinsku dozvolu, zbog vremenske efikasnosti preporučuje se da se ishoduje pre otpočinjanja procedure pribavljanja akata od nadležnih organa za izdavanje građevinske dozvole i pre pristupanja izrade planskog dokumenta;

- Ishodovanje studije priključenja elektrane na DSEE se izrađuje u svrhu pronalaženja optimalnih uslova priključenja elektrane na DSEE, nije obavezna za investitora, a pogodna je pri donošenju investicione odluke za izgradnju elektrane na razmatranoj lokaciji;
- Obezbeđenje planskog osnova je neophodno kako bi izgradnja elektrane bila moguća u skladu sa [5], pri čemu uslovi za izradu planskog dokumenta ne sadrže nivo detalja dovoljan za izradu kompletne tehničke dokumentacije elektrane;
- Ishodovanje uslova za projektovanje i priključenje, koje izdaje ODS, je potrebno za izgradnju elektrane u skladu sa [6] i koristi se za izradu tehničke dokumentacije i pribavljanje dokumenata od nadležnih organa;
- Zaključivanje ugovora o izgradnji nedostajuće infrastrukture ukoliko je za priključenje elektrane potrebna izgradnja infrastrukture koja ne spada u priključak, zaključuje se ugovor između investitora i nadležnog ogranka ODS, u skladu sa [5], a zaključuje se nakon ishodovanja uslova, a pre ishodovanja građevinske dozvole;
- Zaključivanje ugovora o pripremanju zemljišta u slučaju ukoliko je za izgradnju elektrane potrebno izmeštanje postojećih objekata DSEE i zaključuje se između investitora i nadležnog ogranka ODS, u skladu sa [5];
- Zaključivanje ugovora o pripremi izgradnje priključka nakon ishodovanja rešenja o odobrenju za priključenje, odnosno, nakon ishodovanja građevinske dozvole, podrazumeva izradu tehničke dokumentacije i obezbeđivanje odgovarajuće dokumentacije za gradnju priključka;
- Ishodovanje rešenja o odobrenju za priključenje od strane ODS-a, i predstavlja dokument na osnovu koga se priključuje elektrana na DSEE u skladu sa [6]. Uslov za izdavanje rešenja o odobrenju za priključenje na DSEE je prethodno izdata građevinska dozvola za vetroelektranu, rešeni imovinsko-pravni odnosi, kao i tehnički podaci vetrogeneratora i blok transformatora;
- Zaključivanje ugovora o pružanju usluge priključenja na DSEE, Nakon ishodovanja odobrenja, između investitora i nadležnog ogranka ODS, u [6], gde se utvrđuju prava i obaveze vezane za izgradnju priključka elektrane (od postojeće tačke na DSEE do budućeg mesta priključenja. U skladu sa [6], priključak, koji je predmet ugovora o pružanju usluge priključenja na DSEE, nije deo instalacija elektrane i ne može biti predmet projektno-tehničke dokumentacije elektrane. Od interesa je navesti da je izgradnja priključka u nadležnosti operatora sistema, I nakon izgradnje priključak postaje deo DSEE.

- Zahtev za priključenje je aktuelan nakon završetka izgradnje elektrane, završetka izgradnje priključka elektrane, pribavljanja upotrebne dozvole i ispunjenja ostalih zakonskih odredbi, i podnosi ga investitor nadležnom ogranku ODS-a. U praksi, izdavanje upotrebne dozvole može potrajati duže nego što je propisano, a od interesa investitoru je da vetropark što pre plasira proizvedenu električnu energiju u prenosni sistem. U tom kontekstu, može se dostaviti potvrda komisije za tehnički pregled kojom se odobrava puštanje elektrane u probni rad. Nakon podnošenja zahteva za priključenje, nadležni ogranak ODS sprovodi funkcionalno ispitivanje elektrane i priključka u cilju utvrđivanja ispunjenosti odredbi odobrenja, kao i zakonskih i drugih propisa.

Sumarno, priključenje elektrane na DSEE je moguće nakon ispunjenja niza sledećih koraka:

1. realizacije ugovora o izgradnji nedostajuće infrastrukture (ukoliko je bio zaključen), odnosno nakon izgradnje nedostajuće infrastrukture potrebne za priključenje elektrane;
2. realizacije ugovora o pripremanju zemljišta radi izmeštanja objekata DSEE (ukoliko je bio zaključen);
3. realizacije ugovora o pružanju usluge priključenja, odnosno nakon što je priključak za elektranu izgrađen;
4. ispunjenja svih uslova iz odobrenja za priključenje;
5. ishodovanja upotrebne dozvole ili akta kojim se odobrava puštanje u probni rad za elektranu i transformatorsku stanicu (TS);
6. zaključivanja ugovora o snabdevanju električne energije u skladu sa članom 145. [6];
7. sprovođenja funkcionalnog ispitivanja elektrane i priključka elektrane, internog tehničkog pregleda od strane stručnih službi nadležnog ogranka ODS;
8. definisanja balansne odgovornosti i pristupa sistemu na mestu priključenja elektrane na DSEE; i
9. zaključivanja ugovora o eksploataciji elektrane.

Elektrana ne sme isporučivati energiju u DSEE bez zaključenog ugovora o otkupu električne energije koju proizvodi elektrana.

Zaključivanje ugovora o eksploataciji elektrane i priključenje elektrane na DSEE se zaključuje kada investitor elektrane ispuni uslove definisane u odobrenju, kao i druge uslove propisane zakonskim i drugim propisima, odnosno nakon uspešno završenog funkcionalnog ispitivanja, neposredno pre priključenja elektrane.

IV POSTUPAK PRIKLJUČENJA NA PRENOSNI SISTEM

U ovom delu biće objašnjen postupak za priključenje vetroelektrane na prenosni sistem, pod ingerencijom JP EMS AD. Ključni koraci u procesu priključenja su:

- izrada studije priključenja objekta;
- izrada planske i tehničke dokumentacije i pribavljanje potrebnih dozvola za izgradnju priključka;
- praćenje izgradnje priključka;
- izdavanje odobrenja za priključenje objekta; i
- provera ispunjenosti tehničkih uslova iz odobrenja za priključenje objekta.

Proces priključenja objekata na prenosni sistem Republike Srbije se sprovodi u skladu sa regulativama [5], [6], [9], [11], [12], [13], [14], [15], [16].

IV-1 Izrada studije priključenja

Studijom priključenja se definiše moguć način priključenja na prenosni sistem, a njen prilog su dokumenta neophodna za dalju izradu tehničke dokumentacije i pribavljanje potrebnih dozvola (mišljenje operatora prenosnog sistema, tehnički uslovi i projektni zadatak).

IV-2 Izrada planske i tehničke dokumentacije i pribavljanje potrebnih dozvola za izgradnju priključka

U ovoj fazi procesa priključenja objekta sprovode se sledeće aktivnosti: rešavanje imovinsko – pravnih odnosa na zemljištu potrebnom za izgradnju priključnog dalekovoda i priključno-razvodnog postrojenja (PRP), obezbeđivanje izrade i propisane kontrole kompletne planske i projektno-tehničke dokumentacije, pribavljanje potrebnih uslova i dozvola za priključak (lokacijskih uslova (LU) i građevinske dozvole), što obuhvata pripremu idejnog rešenja (IDR) za lokacijske uslove, pripremu i reviziju idejnog projekta (IDP), izradu i tehničku kontrolu projekta za građevinsku dozvolu (PGD), izradu i pribavljanje odobrenja na Studiju uticaja na životnu sredinu i ostalu potrebnu dokumentaciju saglasno propisima.

IV-3 Praćenje gradnje priključka

Međusobna prava i obaveze operatora prenosnog sistema i isporučioaca električne energije u ciklusu gradnje priključka regulišu se putem ugovora o praćenju gradnje priključka.

IV-4 Odobrenje za priključenje objekta

Odobrenje za priključenje objekta na prenosni sistem definiše: mesto priključenja na sistem, način i tehničke uslove priključenja, troškove priključenja, potrebna ispitivanja usaglašena sa [13], instalisani kapacitet, odobrenu snagu, mesto primopredaje energije i način merenja energije i snage, kao i rok za priključenje objekta.

IV-5 Provera ispunjenosti tehničkih uslova iz odobrenja za priključenje objekta

Nakon izgradnje objekta i priključka neophodno je proveriti da li postoje neusaglašenosti sa [13].

IV-6 Eksploatacija objekta

Na samom kraju projekta, a u cilju utvrđivanja uslova eksploatacije objekta koji će biti priključen na prenosni sistem neophodno je da operator prenosnog sistema i proizvođač usaglasa i potpišu ugovor o eksploataciji objekta.

V PROJEKTOVANJE, IZGRADNJA I PUŠTANJE U RAD VETROELEKTRANE

U nastavku su detaljno opisani i hronološki raspoređeni koraci, koji se odnose na projektovanje, izvođenje radova i puštanje u rad, projekta vetroparka, i to:

1. Prethodna studija opravdanosti sa generalnim projektom je definisana kroz članove 111-115, 117, 131, 132 [5] i članove 14 i 34 [17], [18]. Njome se utvrđuje se prostorna, ekološka, društvena, finansijska, tržišna i ekonomska opravdanost

investicije, za varijantna rešenja definisana generalnim projektom. U slučaju da je u toku izrade generalnog projekta analizirano više varijantnih rešenja, vrši se izbor optimalne varijante na osnovu prirodnih, tehničkih, tehnoloških, ekonomskih, funkcionalnih, ekoloških i drugih uslova. Sastavni deo prethodne studije opravdanosti je generalni projekat koji se izrađuje samo za objekte koji se finansiraju sredstvima iz budžeta Republike Srbije. Dakle, za vetroparkove privatnih investitora nije obavezna izrada prethodne studije opravdanosti sa generalnim projektom.

2. Informacija o lokaciji je definisana članom 53 u [5]. Za vetroelektrane, nadležni organ za izdavanje informacije o lokaciji je onaj koji je nadležan za izdavanje lokacijskih uslova, odnosno ministarstvo nadležno za poslove građevinarstva. Informacija o lokaciji se može izdati bilo kom zainteresovanom fizičkom ili pravnom licu uz zahtev, bez obaveze podnošenja dodatne dokumentacije, a koje ne mora biti vlasnik parcele za koju se isti podnosi, niti mora imati bilo kakav ugovor sa vlasnikom parcele vezano za korišćenje, vlasništvo ili bilo koje drugo pravo na parceli.
3. Idejno rešenje (IDR) je formulisano u članu 117a [5], 15 i 35-41 [17], i izrađuje se za potrebe pribavljanja lokacijskih uslova (LU) (član 53a. [5]) ili kao deo urbanističkog projekta za potrebe urbanističko-arhitektonske razrade lokacije (član 117a. [5]). IDR-om se prikazuje planirana koncepcija objekta, sa prikazom i navođenjem svih podataka neophodnih za utvrđivanje lokacijskih uslova, i ono je sastavni deo LU, ukoliko, u toku dalje realizacije projekta, dođe do izmena projektovanog rešenja, ukoliko one prouzrokuju izmenu podataka definisanih lokacijskim uslovima (npr. promene gabarita ili položaja objekta, promene saobraćajnog rešenja, promene kapaciteta instalacija, promene namene i sl.), potrebno pristupiti izmeni lokacijskih uslova, uz izradu novog - izmenjenog idejnog rešenja. U slučaju odstupanja od idejnog rešenja do kojih može doći u toku izrade projekta za građevinsku dozvolu, a koje ne prouzrokuju promenu navedenih podataka, odnosno koje nisu od značaja za sadržinu lokacijskih uslova, nije potrebno pristupiti izmeni lokacijskih uslova. IDR-om vetroparka definiše samo one elemente koji su zahtevani propisima i u skladu sa maksimalnim ograničenjima definisanim PDR-om ili drugim uslovima. Sve mere koje je neophodno definisati, treba težiti (koliko god je moguće) da budu definisane kao raspon opcija kako bi omogućili ishodovanje LU dovoljno fleksibilnih za primenu različitih tehničko-tehnoloških rešenja, kao i kasnije promene tipa/modela vetrogeneratora, a da LU ostanu važeći. Konkretno, u IDR-u treba predvideti temelje do maksimalnih dimenzija prema PDR-u, predvideti stub vetrogeneratora do maksimalne visine dozvoljene PDR-om, ostaviti mogućnost različite materijalizacije stuba. Uz same vetrogeneratore treba predvideti pristupno-manipulativne platforme za potrebe izgradnje i održavanje vetrogeneratora, a u IDR dimenzije/površina manipulativnog platoa treba da bude maksimalno dozvoljena planskom dokumentacijom.
4. Lokacijski uslovi su bliže opisani u članu 53a - 57. [5], [10] i članu 6-15 [19], i pribavljaju se u cilju utvrđivanja svih urbanističkih, tehničkih i drugih uslova za izradu tehničke

dokumentacije kojima se definišu mogućnosti i ograničenja na predmetnoj lokaciji, za izgradnju, odnosno dogradnju objekta ili izvođenje radova predviđenih u idejnom rešenju. U slučaju izgradnje priključka na komunalnu i drugu infrastrukturu, koja se vrši na osnovu rešenja o odobrenju (član 145. [5]), objekta za čiju izgradnju su već prethodno izdati LU i koji se gradi na osnovu izdate građevinske dozvole. Ukoliko ti lokacijski uslovi za objekat sadrže i uslove za izvođenje predmetnog priključka, u tom slučaju se ne pribavljaju posebni uslovi za sam priključak, već se rešenje o odobrenju za izgradnju priključka može izdati na osnovu lokacijskih uslova izdatih za objekat koji se priključuje. Nadležni organ za izdavanje lokacijskih uslova za vetroelektranu je Ministarstvo nadležno za poslove građevinarstva. LU se izdaju za predmetnu lokaciju i izgradnju, odnosno radove predviđene IDR-om, i za vetropark važe 12 meseci od dana izdavanja, odnosno isteka važenja građevinske dozvole izdate u skladu sa ovim uslovima. Nakon njihovog izdavanja moguće je pristupiti izmeni jednog ili više uslova obuhvaćenih lokacijskim uslovima, u postupku objedinjene procedure.

5. Idejni projekat i studija opravdanosti su formulisani članovima 111. - 115, 118, 131, 132. [6], i članovima 16. i 42. [17], [18], i idejni projekat (IDP) vetroelektrane se izrađuje za potrebe izgradnje vetroelektrane i na osnovu njega se izrađuje projekat za građevinsku dozvolu (PGD) i projekat za izvođenje (PZI). Studija opravdanosti, čiji je sastavni deo IDP, izrađuje se obavezno samo za objekte koji se finansiraju sredstvima iz budžeta. Dakle, za vetroparkove u privatnom vlasništvu nije obavezna izrada studije opravdanosti. IDP se izrađuje na osnovu generalnog projekta (ako postoji) i lokacijskih uslova i njime se vrši razrada koncepcije objekta utvrđene generalnim projektom (ako postoji), odnosno lokacijskim uslovima. Studijom opravdanosti određuje se naročito prostorna, ekološka, društvena, finansijska, tržišna i ekonomska opravdanost investicije za izabrano rešenje, razrađeno IDP-om, koji predstavlja njen sastavni deo. Na osnovu studije opravdanosti se donosi odluka o opravdanosti ulaganja, za projekte koji se finansiraju sredstvima iz budžeta. IDP-om vetroparka je potrebno definisati koncepciju objekata u maksimalno dopuštenoj fleksibilnoj formi kojom bi se dopustila izrada PGD-a za različite ali slične modele turbina. Očekivano je da je za nivo IDP potrebno definisati model kao najverovatniji ali uglavnom investitor vetroparka želi da ima mogućnost da model promeni u fazi izrade PGD, jer u procesu razvoja projekta, istovremeno sa izradom tehničke dokumentacije traju i pregovori za kupovinu opreme sa proizvođačima vetrogeneratora, pa se i tehničke karakteristike njih razlikuju za različite modele. PGD-om će biti definisan model turbine konačno izabran od strane investitora. IDP vetroparka najčešće sadrži sledeće delove, i to:
 - o glavna sveska (sveska 0);
 - o projekat arhitekture pogonske prostorije i spoljnog uređenja (sveska 1);
 - o projekat konstrukcije stuba (sveska 2.1);
 - o projekat konstrukcije temelja (sveska 2.2);
 - o projekat platoa i puteva (sveska 2.3);
 - o projekat elektroenergetskih instalacija vetrogeneratora (sveska 4.1);

- o projekat elektroenergetskih instalacija vetroelektrane (sveska 4.2);
- o projekat centralnog sistema za nadzor i upravljanje radom vetroelektrane sa telekomunikacionim instalacijama (sveska 5);
- o projekat mašinskih instalacija (sveska 6); i
- o elaborat zaštite od požara.

IDP vetroparka treba da sadrži projekat stuba u skladu sa važećim propisima na nivou detalja neophodnim za ishodovanje pozitivnog mišljenja revizije komisije. Ako je reviziona komisija nadležnog ministarstva, čiji se izveštaj o izvršenoj stručnoj kontroli Idejnog projekta prilaže uz projekat za građevinsku dozvolu, ukazala na određene nedostatke u idejnom projektu i utvrdila zahteve po kojima je projektant obavezan da postupi u projektu za građevinsku dozvolu, vršilac tehničke kontrole PGD u svom izveštaju, koji dostavlja investitoru, posebno konstatuje da li je postupljeno po zahtevima revizije komisije.

6. Energetska dozvola je bliže definisana kroz članove 30-35 [6] i obavezna je za objekte za proizvodnju električne energije snage 1 MW i više. Energetsku dozvolu izdaje ministarstvo zaduženo za poslove energetike. S obzirom na to da najčešće korišćeni vetrogeneratori imaju snagu preko 1 MW, mandatorno je izdavanje energetske dozvole.
7. Studija o proceni uticaja na životnu sredinu je zakonski definisana kroz 20]. U skladu sa [20] i [21] određeno je da je za vetroelektrane snage preko 50 MW obavezna izrada studije, za vetroelektrane snage preko 10 MW se može zahtevati procena uticaja na životnu sredinu dok studija nije potrebna za vetroelektrane snage ispod 10 MW, osim ako se ne radi o postrojenjima koje će se graditi u zaštićenom prirodnom dobru i zaštićenoj okolini nepokretnog kulturnog dobra, kao i u drugim područjima posebne namene.
8. Projekat za građevinsku dozvolu je bliže opisan članom 118a [5] i članovima 17, 50-59 [17], i predstavlja skup međusobno usaglašenih projekata kojim se dalje razrađuje rešenje utvrđeno IDP-om. PGD-om vetroparka se definiše model vetrogeneratora konačno izabran od strane investitora, koji se može razlikovati od modela prikazanog u IDP ali treba da bude kompatibilan sa njim kako bi se izbeglo ponovno vraćanje na IDP. PGD vetroparka sadrži najčešće sledeće delove, i to:
 - o glavna sveska i izvod iz projekta sa priložima (sveska 0);
 - o projekat arhitekture pogonske prostorije i spoljnog uređenja (sveske 1);
 - o projekat konstrukcije stuba (sveska 2.1);
 - o projekat konstrukcije temelja (sveska 2.2);
 - o projekat platoa i puteva (sveska 2.3);
 - o projekat konstrukcije pogonske prostorije (sveska 2.4);
 - o projekat elektroenergetskih instalacija vetrogeneratora (sveska 4.1);
 - o projekat elektroenergetskih instalacija vetroelektrane (sveska 4.2);
 - o projekat elektroenergetskih instalacija uzemljenja i gromobrana (sveska 4.3);
 - o projekat centralnog sistema za nadzor i upravljanje radom vetroelektrane sa telekomunikacionim

- instalacijama (sveska 5);
 - o projekat mašinskih instalacija (sveska 6.1);
 - o projekat lifta (sveska 6.2); i
 - o elaborat zaštite od požara.
9. Tehnička kontrola projekta za građevinsku dozvolu je bliže opisana kroz članove 129 i 129a [5], i članove 4, 76-83 [17], i njoj podleže PGD.
10. Građevinska dozvola je formulisana u članovima 69, 135 – 142 [5], kao i članovima 16 - 27 [19], i predstavlja dokument kojim se daje pravo investitoru na izgradnju objekta. Iz razloga što visina aktuelnih na tržištu vetrogeneratora prelazi 50 m, a prema članu 133. [5] vetroelektrane spadaju u objekte za koje dozvolu izdaje ministarstvo nadležno za poslove građevinarstva. Osim visine, dodatni razlozi zbog kojih građevinsku dozvolu izdaje ministarstvo nadležno za poslove građevinarstva je i to što, najčešće, snaga vetroparka prelazi 10 MW i to što se sam vetropark nalazi često u granicama nepokretnih kulturnih dobara od izuzetnog značaja i kulturnih dobara. Prema članu 7 [22], vetroelektrane spadaju u G kategoriju objekata sa klasifikacionim brojem objekta 230201.
- Vetroparkovi snage preko 10 MW se priključuju na prenosni sistem. Prema članu 68a [9] je uređeno da je maksimalna snaga vetroparka (vetroelektrane) koja se može priključiti na distributivni sistem 10 MW. U nastavku su navedene ključne građevinske dozvole koje je potrebno pribaviti u postupku razvoja projekta tipičnog vetroparka. Za izgradnju vetroparka snage preko 10 MW neophodno je ishodovati nekoliko građevinskih dozvola (često preko 10). To su:
- o građevinska dozvola za vetroelektranu koja obuhvata izgradnju vetrogeneratora, interne kablovske i optičke mreže i instalacije uzemljenja unutar vetroparka, kao i izgradnju TS koja je u vlasništvu investitora vetroparka i koja se gradi radi sabiranja električne energije proizvedene u vetroparku i podizanja naponskog nivoa sa 35 (33) kV (naponski nivo interne kablovske mreže između vetrogeneratora i TS), kao i za TS i vodove na visokom naponu 110 kV, 220 kV ili 400 kV;
 - o građevinska dozvola za priključno-razvodno postrojenje (PRP) i predstavlja objekat za priključenje vetroparka na prenosni sistem. Operator prenosnog sistema (AD Elektromreža Srbije) je investitor po građevinskoj dozvoli za ovaj objekat, a investitor vetroparka je finansijer objekta.
 - o građevinska dozvola za visokonaponski dalekovod između PRP-a i postojeće TS prenosnog sistema. Operator prenosnog sistema je investitor po građevinskoj dozvoli za ovaj objekat, dok je investitor vetroparka finansijer objekta.
 - o građevinska dozvola za rekonstrukciju i dogradnju postojeće TS prenosnog sistema koja se radi za potrebe priključenja vetroelektrane. Operator prenosnog sistema je investitor po građevinskoj dozvoli za ovaj objekat, a investitor vetroparka je finansijer objekta.
 - o građevinska dozvola za izgradnju dalekovoda ili kabla za napajanje sopstvene potrošnje PRP-a i TS. Investitor objekta je operator distributivnog sistema (Elektrodistibucija Srbije).

- o građevinska dozvola za izgradnju novih ili rekonstrukciju postojećih saobraćajnica za potrebe vetroelektrane na teritoriji opštine.
- o građevinska dozvola za izgradnju privremenih površina, proširenja puteva, skladišta i sličnih površina.
- o građevinska dozvola za izgradnju prateće infrastrukture poput telekomunikacione veze itd.

U slučaju razvoja projekta vetroelektrane snage do 10 MW koja se priključuje na distributivni sistem, umesto građevinskih dozvola za objekte koji čine priključak na prenosni sistem, potrebno je pribaviti samo građevinsku dozvolu ili rešenje o odobrenju za izvođenje radova za izgradnju srednjenaponskog kabla za povezivanje na distributivni sistem električne energije (na deonici od pozicije vetrogeneratora do postojeće TS distributivnog sistema) i za izgradnju komandno-upravljačkog rasklopnog postrojenja. Vetroelektrane snage do 10 MW danas obično imaju do najviše 3 vetrogeneratora jer su pojedinačne snage vetrogeneratora u opsegu od 3 do preko 7 MW.

11. Projekat za izvođenje radova (PZI) je definisan kroz član 123 [5] i članove 18, 61-69 [17], i uglavnom se izrađuje sa svim neophodnim tehničkim detaljima I crtežima za izvođenje radova. Sastavni deo PZI-a je Glavni projekat zaštite od požara, a PZI-om temelja, platoa, puteva definišu se svi arhitektonski, građevinski, zanatski i instalaterski detalji sa specifikacijama materijala i opreme, pratećim proračunima i metodologijom izgradnje, neophodnim za neposredno izvođenje radova.
12. Prijava radova je detaljni opisana članovima 135 i 145 [5], i 31-33 [19], i njome investitor obaveštava nadležni organ, koji je izdao građevinsku dozvolu, o početku i roku završetka izvođenja radova. Rok za završetak građenja počinje da teče od dana podnošenja prijave radova. O podnetoj prijavi radova nadležni organ obaveštava građevinsku inspekciju i organ nadležan za poslove zaštite od požara. Uz prijavu radova za vetroelektranu se podnosi Saglasnost na studiju o proceni uticaja na životnu sredinu, ako je obaveza njene izrade utvrđena propisom kojim se uređuje procena uticaja na životnu sredinu, odnosno odluka da nije potrebna izrada ove studije.
13. Izvođenje radova je postupak detaljnije opisan kroz članove 149 i 152 [5], [22], [23], [24], [25], [26], i članove 21-30 [27], i vrši se na osnovu PZI-a.
14. Projekat izvedenog objekta (PIO) definisan u članu 124 [5] i 19, 70-74 [17], i predstavlja skup međusobno usaglašenih projekata koji se izrađuje za potrebe utvrđivanja njegove podobnosti za upotrebu, odnosno pribavljanja upotrebne dozvole, korišćenja i upotrebe objekta, a predstavlja projekat za izvođenje sa unetim izmenama nastalim u toku građenja.
15. Tehnički pregled je bliže definisan u članu 124 [5][24][27], i njime se utvrđuje podobnost objekta za upotrebu, odnosno utvrđuje usklađenost izvedenih radova sa građevinskom dozvolom i tehničkom dokumentacijom na osnovu koje se objekat gradi, odnosno izvodili radovi, kao i sa tehničkim propisima i standardima koji se odnose na pojedine vrste radova, odnosno materijala, opreme i instalacija.

16. Upotrebna dozvola je definisana članom 158 [5], i 42-49. [19], [24],[27], kao i članovima 97 i 98 [28], i uz zahtev za njeno izdavanje, se podnosi sledeća dokumentacija:

- o izveštaj komisije za tehnički pregled kojim se utvrđuje da je objekat podoban za upotrebu sa predlogom da se može izdati upotrebna dozvola;
- o projekat za izvođenje sa potvrdom i overom investitora, stručnog nadzora i izvođača radova da je izvedeno stanje jednako projektovanom stanju ili projekat izvedenog objekta;
- o elaborat geodetskih radova za izvedeni objekat i posebne delove objekta; i
- o elaborat geodetskih radova za podzemne instalacije.

Upotrebna dozvola izdaje se za ceo objekat ili za deo objekta koji predstavlja tehničko-tehnološku celinu i može se kao takav samostalno koristiti. Potom se vrši upis prava svojine na objektu i o tome obaveštava investitora i nadležni organ uprave u roku od 7 dana od dostavljanja upotrebne dozvole.

17. Licenca za obavljanje energetske delatnosti je bliže opisana kroz članove 23-27 [6][29], i predstavlja dokument kojim se potvrđuje ispunjenost uslova propisanih u [6] i [29], a neophodna je za energetske subjekt koji poseduje bar jednu elektranu čija je ukupna snaga veća ili jednaka 1 MW. Drugim rečima, to je dozvola kojom se investitoru daje mogućnost da obavlja određenu energetske delatnost. S obzirom na to da je snaga vetrogeneratora veća od 1 MW, može se zaključiti da je za vetroelektrane obavezna licenca za obavljanje energetske delatnosti. Zahtev za izdavanje licence se podnosi Agenciji za energetiku Republike Srbije. Uslov za izdavanje licence za obavljanje energetske delatnosti je to da je za vetroelektranu izdata upotrebna dozvola, kao i da vetroelektrana ispunjava uslove i zahteve utvrđene tehničkim propisima, propisima o zaštiti od požara i eksplozija, kao i propisima o zaštiti životne sredine.

VI DINAMIČKI PLAN RAZVOJA PROJEKTA

Na slici 1 prikazan je mrežni plan aktivnosti projekta vetroparka koji se odnosi na prethodno analiziranu administrativnu proceduru. Može se primetiti da su aktivnosti objašnjenje u prethodnim poglavljima uzročno-posledično i međusobno povezane u graf, dok su različitim bojama razvrstane različite etape mrežnog plana. Prikazani mrežni plan aktivnosti dovoljno govori o samoj kompleksnosti projekta i ističe neophodnost potrebe za upravljanjem projekta na najvišem nivou, koristeći namenske softverske alate. Radi jednostavnijeg upoznavanja čitaoca, na slici 2 je prikazan vizuelno prihvatljiviji oblik mrežnog plana aktivnosti analiziranog projekta.

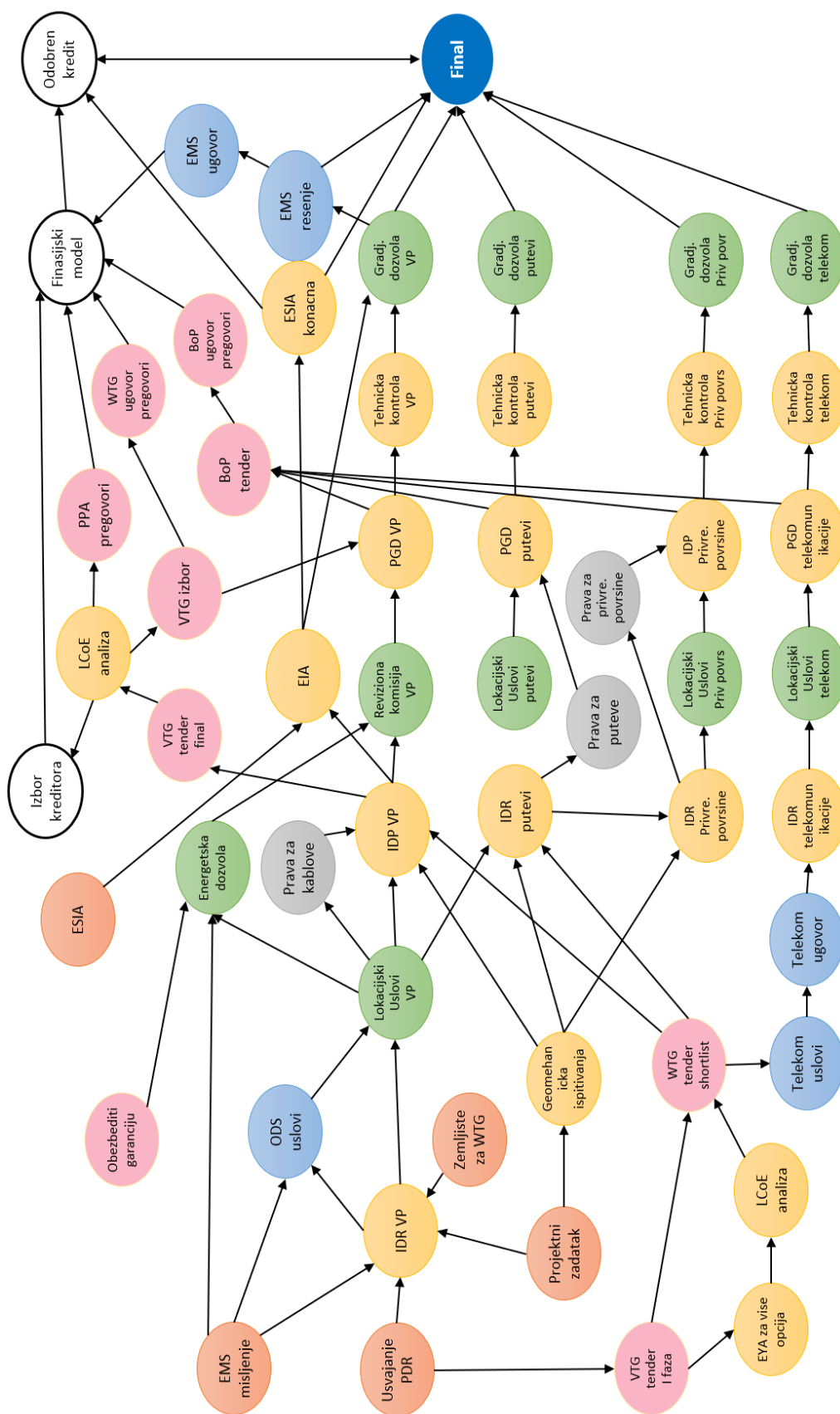
Dinamički plan razvoja projekta, u najširoj podeli, obuhvata:

1. Izradu planske dokumentacije za vetropark – sa pojedinačnim aktivnostima, poput: izrade nacrtu PDR i njegovog javnog uvida, i zatim njegovog usvajanja;
2. Izrada planske i projektno-tehničke dokumentacije priključnog dalekovoda – sa pojedinačnim, hronološki

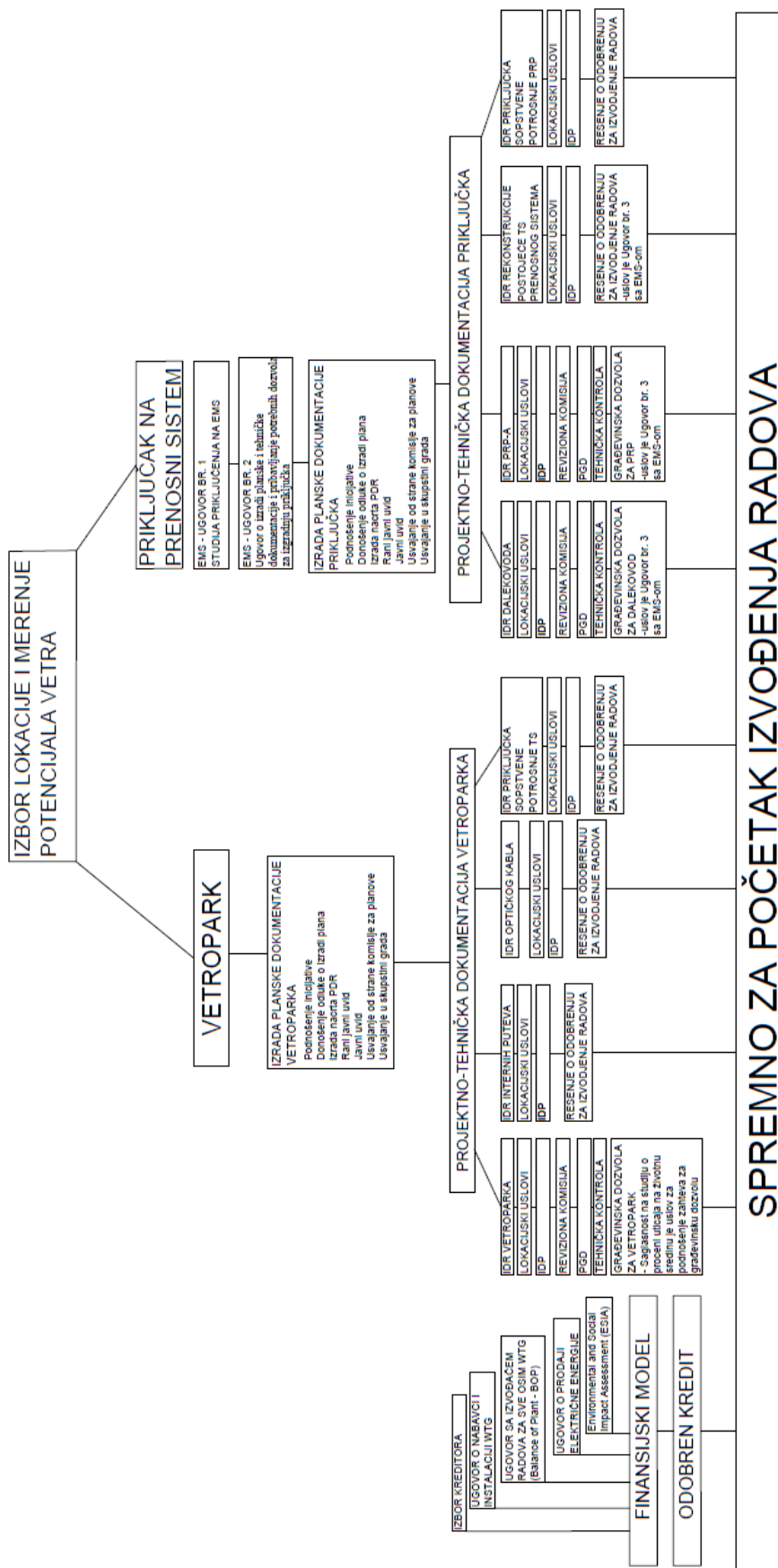
raspoređenim aktivnostima, kao što su: izrada PDR-a, IDR-a i njegove revizije, podnošenje IDR na centralnu evidenciju objedinjene procedure (CEOP) za dobijanje lokacijskih uslova, a zatim izrada IDP i njegovog pregleda od strane republičke revizije komisije, izrada PGD i njegove tehničke kontrole i, na posletku, ishodovanje građevinske dozvole (postupak je iterativan za svaku građevinsku dozvolu vetroparka);

3. Izrada projektno-tehničke dokumentacije za PRP – sa pojedinačnim aktivnostima kao što su: izrada IDR, podnošenje IDR PRP-a na CEOP za dobijanje lokacijskih uslova, izrada IDP-a, pregled IDP od strane Revizije komisije, izrada PGD-a, tehnička kontrola PGD-a i ishodovanje građevinske dozvole za PRP, kao i ishodovanje građevinske dozvole za izgradnju kabla za napajanje sopstvene potrošnje PRP-a;
4. Izrada projektno tehničke dokumentacije za sam vetropark - sa pojedinačnim aktivnostima kao što su: izrada IDR-a i njegovo podnošenje na CEOP za dobijanje lokacijskih uslova, ishodovanje lokacijskih uslova i rešavanje imovinsko-pravnih odnosa na parcelama na kojima će biti postavljeni vetrogeneratori, regulisanje imovinsko-pravnih odnosa za polaganje elektroenergetskih i telekomunikacionih vodova u koridorima saobraćajnica, a koji su deo projekto-tehničke dokumentacije vetroparka, rešavanje imovinsko-pravnih odnosa sa ostalim imaocima prava ukoliko oni postoje, izrada terenskih i laboratorijskih geotehničkih ispitivanja i izrada geotehničkih elaborata, izrada IDP-a i njegov pregled od strane republičke revizije komisije, potom ishodovanje energetske dozvole za vetropark (koja predstavlja uslov za građevinsku dozvolu), izrada PGD-a sa tehničkom kontrolom i, finalno, ishodovanje građevinske dozvole za sam vetropark;
5. Uporedo sa izradom projektno-tehničke dokumentacije neophodno je sprovesti nabavku vetrogeneratora koji predstavljaju najveći deo investicionih troškova projekta. Izrada projektno-tehničke dokumentacije je potrebno da bude u skladu sa izabranim modelom vetrogeneratora. U PGD-u vetroparka bi trebalo da bude predviđen i konačno usvojeni model i tip vetrogeneratora. Pojedinačne aktivnosti u procesu njihove nabavke predstavlja: slanje zahteva za dostavljanje preliminarne ponuda, angažovanje stručnog konsultanta koji će izvršiti procenu proizvodnje električne energije analiziranjem karakteristika ponuđenih vetrogeneratora izbor i potpisivanje ugovora sa isporučiocem vetrogeneratora;
6. Isporučka i ugradnja vetrogeneratora, TS, PRP i ostale infrastrukture;
7. Ispitivanje i puštanje u probni rad; i
8. Dobijanje upotrebne dozvole i priključenje na mrežu.

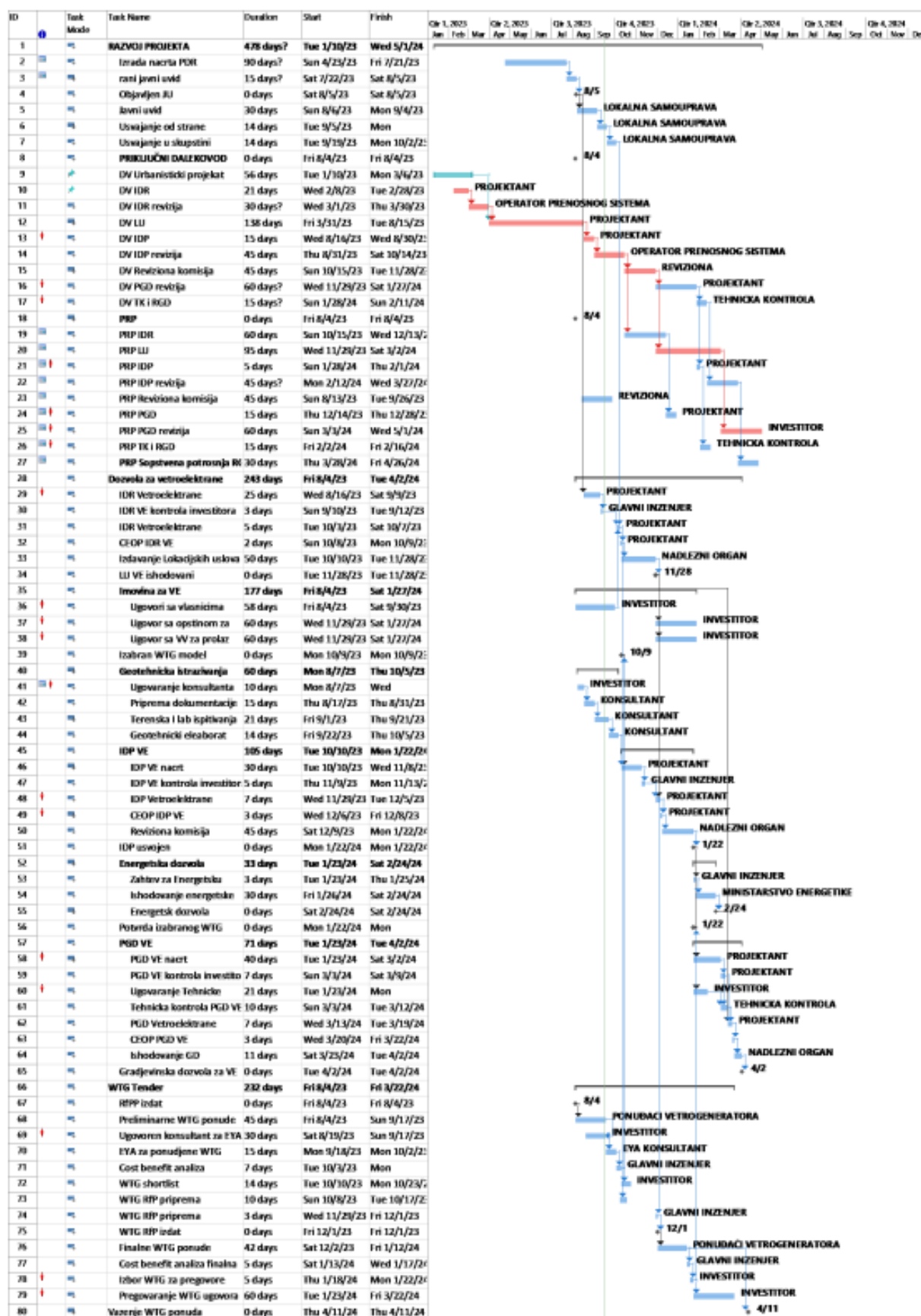
S tim u vezi, na slici 3 prikazan je izgled dinamičkog plana razvoja ovog projekta. Na prikazanom planu mrežnih aktivnosti i dinamičkom planu može se konstatovati da je ovaj projekat multidisciplinarni i veoma zahtevan za realizaciju.



Slika 1. Mrežni plan aktivnosti projekta vetroparka



Slika 2. Mrežni plan aktivnosti projekta vetroparka, uproščeni prikaz



Slika 3. Dinamički plan razvoja projekta vetroparka

VII DISKUSIJA

U dosadašnjem izlaganju prikazan je detaljni pregled ključnih koraka potrebnih za realizaciju vetroparkova u Republici Srbiji. Međutim, u praksi se ne retko dešava a, i pored uloženi napora u planiranju projekta, iskrnsu i situacije koje se ne mogu predvideti dinamičkim planom aktivnosti, poput problematike pri rešavanju imovinsko-pravnih odnosa ili pak administrativnih kašnjenja.

Analizirani primer projekta vetroparka zahteva rešavanje imovinsko-pravnih odnosa, u najčešćem slučaju, za: temelje vetrogeneratora, platforme za postavljanje kрана za svaki vetrogenerator, privremenog skladišta opreme i materijala u toku izgradnje, pristupne saobraćajnice, elektroenergetsku i telekomunikacionu kablovsku kanalizaciju, transformatorske stanice, priključnog dalekovoda i priključno-razvodnog postrojenja.

Investitor vetroparka je u obavezi da, prilikom podnošenja zahteva za izdavanje odgovarajućih građevinskih dozvola, dostavi dokaz o pravu na korišćenjem ili vlasništvom nad zemljištem, što se u najvećem broju slučajeva dokazuje, zaključenim Ugovorom o: kupoprodaji zemljišta, zakupu zemljišta ili zasnivanju službenosti. U slučaju da vlasnici zemljišta nisu voljni da sa investitorom vetroparka zaključe odgovarajući ugovor, investitor je prinuđen da, kako bi pronašao rešenje, nastavi razgovor sa vlasnicima susednih parcela, što može uticati na izmene u samom projektu. Sa druge strane, Zakonom o planiranju i izgradnji predviđene su određene zakonske službenosti za elektroenergetske objekte, u koje se može svrstati i ovaj analizirani projekat vetroparka. Konkretno, ovo može biti od značaja prilikom regulisanja prava prolaza kroz susedne parcele tokom izgradnje, u situacijama dopremanja elisa vetrogeneratora, kao i prelaska dalekovoda preko susednih parcela. U tom slučaju, korisnicima zemljišta se nadoknađuje naneta šteta, kao na primer usled eventualnih proizvedenih gubitaka na usevima.

Rešavanje ovih imovinsko-pravnih pitanja zahteva detaljnu pravnu analizu, pregovore sa svim relevantnim stranama, te često i angažovanje stručnjaka iz oblasti prava, kao i pomnu koordinaciju sa lokalnim vlastima. Ovo i predstavlja ključni deo ovog dela projekta jer nerešeni imovinsko-pravni odnosi mogu značajno usporiti ili čak onemogućiti realizaciju projekta.

Sa druge strane, nažalost postoje administrativna kašnjenja, od lokalne samouprave do nadležnih ministarstava, na koje investitor ne može uticati, a koja mogu bitno uticati na dinamički tok projekta, povećanje potrebnih resursa, a često dovode i do odustajanja investitora u projekte ovog tipa.

VIII ZAKLJUČAK

Rad je fokusiran na analizu administrativnih procedura, propisane zakonske regulative i tehničkih uslova za realizaciju, kako projekata vetroparkova, tako i projekata fotonaponskih (solarnih) elektrana, instalisanih snaga od preko 10 MW.

Sistematizovana je i uzročno-posledično raspoređena pravna legislativa, kako bi olakšao rad i uštedeli resursi na projektima. Rad ima za cilj da približi ovu suvoparnu tematiku tehničkim licima, i da na neposredan način direktno utiče na uštedu resursa pri rukovođenju projekata poput analiziranog.

Rad može poslužiti kao vodič za buduće investitore, projektante, izvođače, predstavnike nadzora, kao i za ostale učesnike u razvoju i realizaciji ovakvih i sličnih elektroenergetskih projekata, od ideje do priključenja na prenosni sistem i dobijanja upotrebne dozvole.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Climate online baze podataka, <https://gwec.net/globalwindreport2023> [pristupljeno 15.03.2021]
- [2] Radovanović, M., Đurišić, Ž. Optimalno planiranje balansne rezerve za pokrivanje debalansa u proizvodnji vetroelektrana u Južnom Banatu, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 24, No. 4, pp. 74-80, 2022. <https://doi.org/10.46793/EEE22-4.38R>
- [3] Ječmenica, M., Lazović, Đ. Tehno-ekonomska analiza projekta vetroparka, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 26, No. 3, pp. 58-62, 2024. <https://doi.org/10.46793/EEE24-3.58J>
- [4] Stanković, N. Analiza uticaja buke u fazi izgradnje i eksploatacije parka vetroelektrana na lokalitetu Kostolca, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. 25, No. 1, pp. 67-73, 2023. <https://doi.org/10.46793/EEE23-1.67S>
- [5] "Zakon o planiranju i izgradnji" – „Sl. glasnik RS“, br. 72/2009, 81/2009 - ispr., 64/2010 - odluka US, 24/2011, 121/2012, 42/2013 - odluka US, 50/2013 - odluka US, 98/2013 - odluka US, 132/2014, 145/2014, 83/2018, 31/2019, 37/2019 - dr. zakon, 9/2020, 52/2021 i 62/2023, https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_planiranju_i_izgradnji.html
- [6] Zakon o energetici, „Sl. glasnik RS“, br. 145/2014, 95/2018 - dr. zakon, 40/2021, 35/2023 - dr. zakon i 62/2023) https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_energetici.html [pristupljeno 15.05.2024]
- [7] Pravila o radu distributivnog sistema, „Službeni glasnik RS“, br. 5 od 5. februara 2010, 3 od 15. januara 2014, 41 od 16. aprila 2014. http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/t2014_02/t02_0026.htm [pristupljeno 15.05.2024]
- [8] Uredba o lokacijskim uslovima, „Sl. glasnik RS“, br. 115/2020“ [Službeni glasnik Republike Srbije broj 115 od 11.09.2020.](https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-koriscenju-obnovljivih-izvora-energije.html) [pristupljeno 15.05.2024]
- [9] Zakon o korišćenju obnovljivih izvora energije, „Službeni glasnik RS“, br. 40 od 22. aprila 2021, 35 od 29. aprila 2023. <https://www.paragraf.rs/propisi/zakon-o-koriscenju-obnovljivih-izvora-energije.html> [pristupljeno 15.05.2024]
- [10] Zakon o slobodnom pristupu informacijama od javnog značaja, „Službeni glasnik RS“, br. 120 od 5. novembra 2004, 54 od 13. juna 2007, 104 od 16. decembra 2009, 36 od 28. maja 2010, 105 od 8. novembra 2021. https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_slobodnom_pristupu_informacijama_od_javnog_znacaja.html [pristupljeno 15.05.2024]
- [11] Uredba o uslovima isporuke i snabdevanja električnom energijom, „Službeni glasnik RS“ br.63/2013 https://www.paragraf.rs/propisi/uredba_o_uslovima_iskoruke_i_snabdevanja_elektricnom_energijom.html [pristupljeno 15.05.2024]
- [12] Pravilnik o energetske dozvoli, „Službeni glasnik RS“ br. 15/15 https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_energetskoj_dozvoli.html [pristupljeno 15.05.2024]
- [13] Pravila o radu prenosnog sistema, [Pravila-o-raduprenosnog-sistema-07.11.2023-1.pdf](https://www.paragraf.rs/propisi/pravila-o-raduprenosnog-sistema-07.11.2023-1.pdf) [pristupljeno 15.05.2024]
- [14] Metodologija za određivanje troškova priključenja na sistem za prenos i distribuciju električne energije, „Službeni glasnik RS“ br.109/15 http://demo.paragraf.rs/demo/combined/Old/t/t2015_12/t12_0377.htm [pristupljeno 15.05.2024]
- [15] Pravilnik o određivanju troškova priključenja na sistem za prenos električne energije, [demo.paragraf.rs/propisi/pravilnik-o-odredzivanju-troskova-prikljucenja-na-sistem-za-prenos-elektricne-energije-07.11.2023-1.pdf](https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik-o-odredzivanju-troskova-prikljucenja-na-sistem-za-prenos-elektricne-energije-07.11.2023-1.pdf) [pristupljeno 15.05.2024]
- [16] Procedura za priključenje objekata na prenosni sistem (usvojena od strane Agencije za energetiku Republike Srbije shodno članu 117. Zakona o energetici), <https://ems.rs/wp-content/uploads/2023/11/Pravila-za-prikljucenje-objekata-na-prenosni-sistem-07.11.2023.pdf> [pristupljeno 15.05.2024]
- [17] Pravilnik o sadržini, načinu i postupku izrade i načinu vršenja kontrole tehničke dokumentacije prema klasi i nameni objekta, „Sl. glasnik RS“, br. 73/2019, <https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik-o-sadrzini-nacinu-i-postupku-izrade-i-nacinu-vrsenja-kontrole-tehnicke-dokumentacije-prema-klasi-i-nameni-objekata.html> [pristupljeno 17.05.2024]

- [18] Pravilnik o sadržini i obimu prethodnih radova, prethodne studije opravdanosti i studije opravdanosti, <http://gradjevinskedomozvole.rs/Files/00612/Pravilnik-o-sadrzini-i-obimu-prethodnih-radova-prethodne-studije-opravanosti-i-studije-opravanosti.pdf> [pristupljeno 17.05.2024]
- [19] Pravilnik o postupku sprovođenja objedinjene procedure elektronskim putem, "Sl. glasnik RS", br. 68/2019, https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_postupku_sprovođenja_objedinjene_procedure_elektronskim_putem.html [pristupljeno 17.05.2024]
- [20] Zakon o proceni uticaja na životnu sredinu, "Sl. glasnik RS", br. 135/2004 i 36/2009, https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_proceni_uticaja_na_zivotnu_sredinu.html [pristupljeno 17.05.2024]
- [21] Uredba o utvrđivanju Liste projekata za koje je obavezna procena uticaja i Liste projekata za koje se može zahtevati procena uticaja na životnu sredinu, "Sl. glasnik RS", br. 114/2008, https://www.paragraf.rs/propisi/uredba_o_utvrđivanju_liste_projekata_za_koje_je_obavezna_procena_uticaja_i_liste_projekata_za_koje_se_mozet_zahtevati_procena_uticaja_na_zivotnu_sredinu.html [pristupljeno 17.05.2024]
- [22] Pravilnik o klasifikaciji objekata, "Sl. glasnik RS", br. 22/2015, https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_klasifikaciji_objekata.html [pristupljeno 17.05.2024]
- [23] Pravilnik o načinu, postupku i sadržini podataka za utvrđivanje ispunjenosti uslova za izdavanje licence za izradu tehničke dokumentacije i licence za građenje objekata za koje građevinsku dozvolu izdaje ministarstvo, odnosno autonomna pokrajina, kao i o uslovima za oduzimanje tih licenci, "Službeni glasnik RS", broj 24 od 6. marta 2015, https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_nacinu_postupku_i_sadrzini_podataka_za_utvrđivanje_ispunjenosti_uslova_za_izdavanje_licence_za_izradu_tehnicke_dokumentacije_i_licence_za_gradjenje_objekata.html [pristupljeno 17.05.2024]
- [24] Pravilnik o objektima na koje se ne primenjuju pojedine odredbe zakona o planiranju i izgradnji, "Sl. glasnik RS", br. 85/2015, https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_objektima_na_koje_se_ne_primenjuju_pojedine_odredbe_zakona_o_planiranju_i_izgradnji.html [pristupljeno 17.05.2024]
- [25] Pravilnik o izgledu, sadržini i mestu postavljanja gradilišne table, "Sl. glasnik RS", br. 6/2019, <https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik-o-izgledu-sadrzini-i-mestu-postavljanja-gradilisne-table.html> [pristupljeno 17.05.2024]
- [26] Pravilnik o sadržini i načinu vođenja knjige inspekcije, građevinskog dnevnika i građevinske knjige, "Sl. glasnik RS", br. 62/2019, https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_sadrzini_i_nacinu_vodjenja_knjige_inspekcije_gradjevinskog_dnevnika_i_gradjevinske_knjige.html [pristupljeno 17.05.2024]
- [27] Pravilnik o sadržini i načinu vršenja tehničkog pregleda objekta, sastavu komisije, sadržini predloga komisije o utvrđivanju podobnosti objekta za upotrebu, osmatranju tla i objekta u toku građenja i upotrebe i minimalnim garantnim rokovima za pojedine vrste objekata, "Sl. glasnik RS", br. 27/2015, 29/2016 i 78/2019, https://www.paragraf.rs/propisi/pravilnik_o_sadrzini_i_nacinu_vrsenja_tehnickog_pregleda_objekta_sastavu_komisije_sadrzini_predloga_komisije_o_utvrđivanju_podobnosti_objekta_za_upotrebu_osmatranju_tla_i_objekta.html [pristupljeno 17.05.2024]
- [28] Zakon o državnom premeru i katastru, "Sl. glasnik RS", br. 72/2009, 18/2010, 65/2013, 15/2015 - odluka US, 96/2015, 47/2017 - autentično tumačenje, 113/2017 - dr. zakon, 27/2018 - dr. zakon, 41/2018 - dr. zakon i 9/2020 - dr. zakon, https://www.paragraf.rs/propisi/zakon_o_drzavnom_premeru_i_katastru.html [pristupljeno 17.05.2024]
- [29] Pravilnik o licenci za obavljanje energetske delatnosti i sertifikaciji, "Sl. glasnik RS", br. 87/2015, <https://www.mre.gov.rs/extfile/inspection/sr/164/0/Pravilnik%20o%20licenci%20za%20obavljanje%20energetske%20delatnosti%20i%20sertifikaciji.pdf> [pristupljeno 17.05.2024]

AUTORI/AUTHORS

Miloš Ječmenica – doktor nauka elektrotehnike i računarstva, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, jecmenica@etf.bg.ac.rs, ORCID [0000-0001-6345-5000](https://orcid.org/0000-0001-6345-5000)
Nikola Grbić – master inženjer elektrotehnike i računarstva, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, student nikolagrbić1998@gmail.com

From the Idea to the Realization of the Wind Farm – Overview of the Administrative Procedure and Legal Regulations in the Republic of Serbia

Abstract – The paper presents a typical course of realization of a wind park project in the Republic of Serbia. Through a review of the legal regulations and administrative procedures in the process of obtaining the necessary permits and consents, as well as the preparation of all stages of project-technical documentation, the flow of activities that must be carried out on the way from the idea to obtaining a use permit and connecting the wind farm to the power grid is presented in detail. On the example of a wind farm project with a total installed capacity of over 10 MW, an analysis of the administrative procedure, legal regulations and technical requirements was carried out with an explanation of each activity during the realization of this project. A methodology was formed that can be used for a more thorough assessment of the scope and complexity of activities during the development of such projects, including photovoltaic power plants. Accordingly, it is desirable to use software tools for project monitoring and management. It is expected that this paper will be useful in considering the necessary activities for the development of such and similar projects in the field of renewable energy sources.

Index Terms – Renewable energy sources, Wind park, Photovoltaic power plant Project for construction permit, Usage permit

Realizacija sistema za ispitivanje kompresorskih motora specijalne namene baziranog na primeni frekventno regulisanog elektromotornog pogona

Željko V. Despotović, Vladimir Kvrđić

Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

Rezime - U radu je prikazana modernizacija i realizacija sistema za ispitivanje kompresorskih motora specijalne namene baziranog na primeni frekventne regulacije pogonskog asinhronog motora. Prema tehničkim zahtevima je obezbeđeno zadavanje i održavanje brzine obrtanja kompresora primenom frekventne regulacije u opsezima 0 - 500 - 1000 - 1450 - 2000 o/min, sa zadavanjem preciziranih vremenskih intervala za svaki od ovih opsega. Za zadato vreme je potrebno da kompresor napuni bocu sa komprimovanim vazduhom kapaciteta od 10 litara do pritiska od 50 bar. Brojevi obrtaja kompresora se mere mernim sistemom koga čine inkrementalni enkoder, akviziciona kartica i digitalni pokazivač. Tokom rada kompresora vrši se njegovo podmazivanje pumpom koja daje pritisak ulja od 3,5 - 5 bar, pri čemu se radna temperatura održava u opsegu 50 °C - 70 °C. U radu su prikazani i eksperimentalni rezultati dobijeni tokom eksploatacionih ispitivanja i puštanja u rad prikazanog sistema za ispitivanje kompresorskih motora specijalne namene.

Ključne reči - Kompresor, pneumatika, elektromotorni pogon, frekventni regulator, merenje, akvizicija

I UVOD

Svi helikopteri su opremljeni kompresorima koji ih snabdevaju komprimovanim vazduhom. Kao i druge komponente helikoptera i kompresori moraju da se rigorozno ispituju posle određenog broja časova leta. Potrebno je da se utvrdi i verifikuje njihova sposobnost postizanja određenog pritiska za zadato vreme [1-4]. Za tu svrhu služe odgovarajući ispitni stolovi. Konceptija ovakvih i sličnih ispitnih stolova je danas bazirana na pogonskim asinhronim motorima u kombinaciji sa frekventnim regulatorima ili AS servomotorima bez četkica (ali sa elektronskom komutacijom). Pogoni sa asinhronim motorima i pripadajućim frekventnim regulatorom su postali konkurentni DC pogonima u pogledu performansi pre svega, ali i u pogledu cene. Najveći problem pomenutih ispitnih stolova je taj što kompresori stvaraju velike vibracije koje se prenose na samu konstrukciju ispitnog stola, a preko nje i na pod prostorije u kojoj je ispitni sto instaliran. Dodatni problem je što se pored vibracija stvara i velika buka. Određenim konstruktivnim rešenjima je potrebno smanjiti na dozvoljeni nivo vibracije i onemogućiti njihovo prenošenje na telo ispitnog stola i pod prostorije. Na ovaj način se smanjuje smanjena i buka u prostoriji, čime su ostvareni bolji uslovi rada operatera koji vrši ispitivanje kompresora.

Ugovorom je bila predviđena popravka i modernizacija stola za ispitivanje helikopterskih kompresora AK-50T1. Nakon analize postojećeg ispitnog stola došlo se do zaključka da isti ne može da

se dovede u radno stanje zbog dotrajalosti delova i da je neophodno projektovati i proizvesti potpuno novi ispitni sto sa drugačijim konceptom i novim pogonom. Potrebno je bilo da tokom ispitivanja ispitni sto omogući zadavanje brzina rada kompresora sa sledećim ugaonim brzinama: 500 o/min u trajanju od 5 min, 1000 o/min u trajanju od 5 min, 1450 o/min u trajanju od 15 min i 2000 o/min u trajanju od 5 min [3-5]. Za to vreme je potrebno da kompresor napuni bocu sa komprimovanim vazduhom kapaciteta od 10 l do pritiska od 50 bar [1-4]. Ugaone brzine kompresora se mere mernim sistemom koga čine inkrementalni enkoder, akviziciona kartica i digitalni pokazivač. Tokom rada kompresora vrši se njegovo podmazivanje pumpom koja daje pritisak ulja od 3,5 - 5 bar, pri čemu je temperatura ulja 50 - 70 °C [1-3].

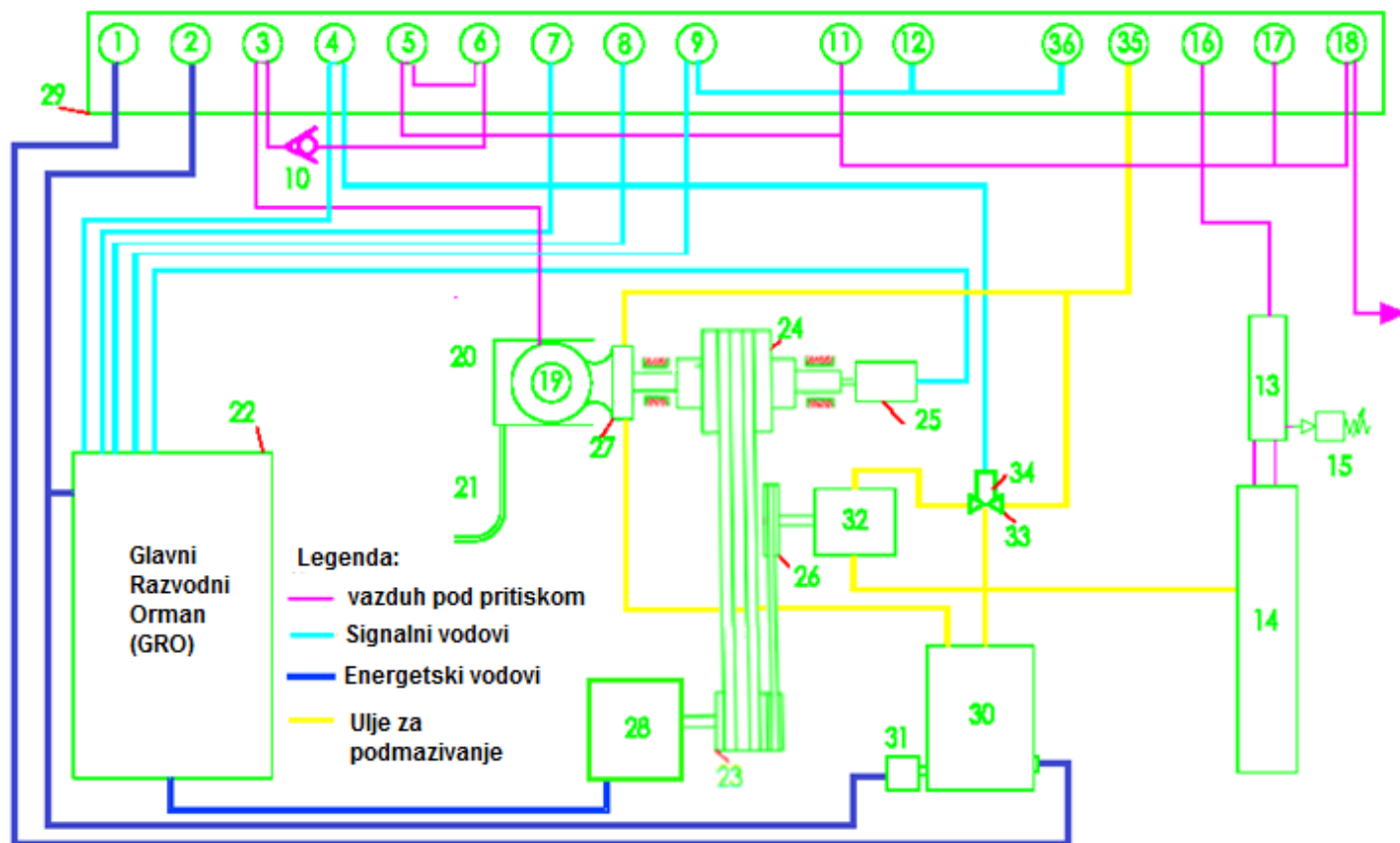
II TEHNIČKI OPIS REALIZOVANOG SISTEMA

Ispitni uređaj, u nastavku teksta-*ispitni sto*, se sastoji od pet osnovnih delova: (1) pneumatske instalacije, (2) hidrauličke instalacije, (3) pogonskog mehanizma, mehaničkog rama i sistema za nošenje napred pomenute opreme (4) elektroenergetskog dela za napajanje pogonske grupe (asinhroni elektromotor i frekventni regulator) i sistema grejanja ulja i (5) elektronskog akviziciono-mernog dela.

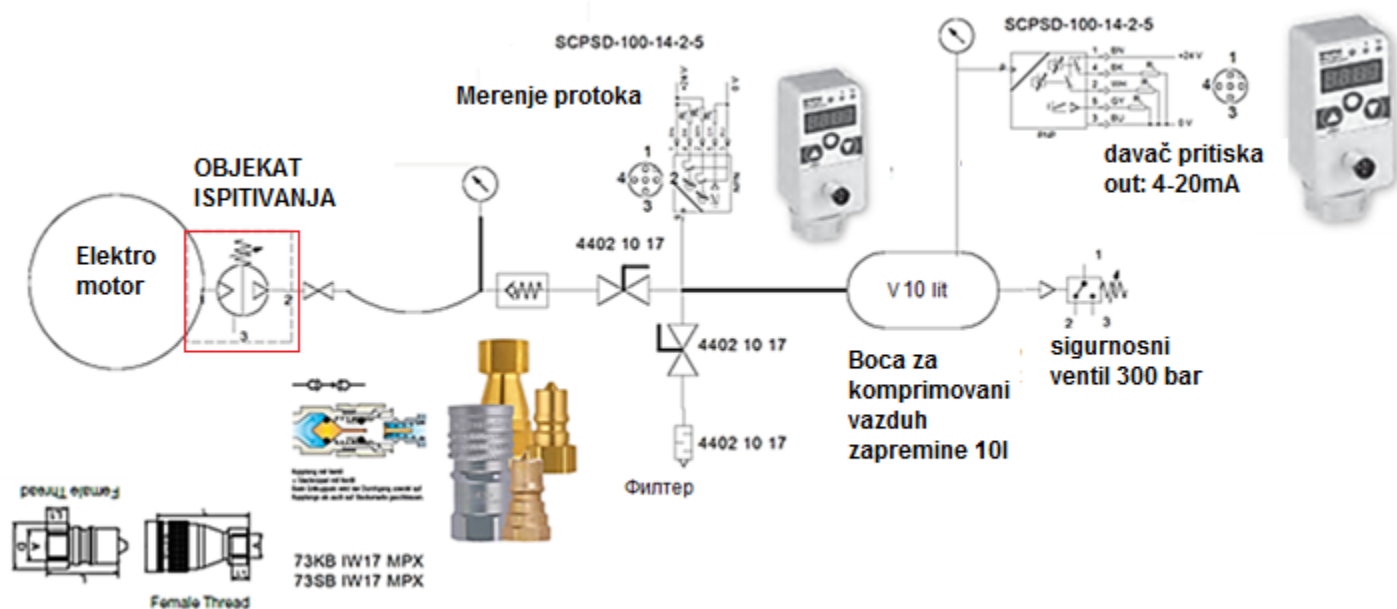
Blok šema realizovanog ispitnog stola je data na slici 1. U nastavku je prema označenim brojevima pozicija na slici 1 dat njihov opis: (1) davač temperature sa displejom, (2) taster grejača ulja (uključen/isključen sa svetlosnom indikacijom), (3) brzorastavna spojica sa crevom, (4) davač pritiska ulja sa displej pokazivačem, (5) davač pritiska vazduha sa displej pokazivačem, (6) slavina ventil za zatvaranje vazduha, (7) davač broja obrtaja sa displej pokazivačem, (8) potencijometar za zadavanje broja obrtaja pogonskog elektromotora, (9) taster za uključanje tajmera, (10) nepovratni ventil, (11) kontrolno mesto za priključak etalon manometra za proveru davača pritiska vazduha na poziciji (5), (12) programabilni tajmer, (13) razvodni blok, (14) boca za vazduh zapremine 15 l, (15) sigurnosni ventil proizvođača Bauer, (16) davač pritiska vazduha u boci sa displej pokazivačem, (17) kontrolno mesto za priključak etalon manometra za proveru davača pritiska vazduha u boci na poziciji (15), (18) slavina ventila za ispuštanje vazduha, (19) klipni kompresor koji se ispituje, (20) zaštitna kapa za hlađenje kompresora, (21) priključak za industrijski vazduh, (22) glavni razvodni orman (GRO) za napajanje sistema, (23) kaišnik elektromotora, (24) kaišnik pogona kompresora, (25) davač broja obrtaja (enkoder), (26) kaišnik uljne zupčaste pumpe, (27) prirubnica za pričvršćivanje kompresora, (28) pogonski asinhroni

elektromotor, (29) komandna pult operatera (rukovaoca), (30) rezervoar za ulje zapremine 5 l, (31) grejač ulja u rezervoaru, (32) uljna zupčasta pumpa, (33) prelivni ventil, (34) senzor za

pritisak ulja, (35) kontrolno mesto za priključak etalon manometra za proveru davača pritiska ulja, (36) taster za start (poništanje mernog vremena), pri startu ciklusa punjenja boce.



Slika 1. Blok šema realizovanog ispitnog stola za ispitivanje kompresora helikoptera



Slika 2. Principska blok šema realizovane pneumatske instalacije ispitnog stola

III PNEUMATSKA INSTALACIJA

Blok šema sa osnovnim principskim prikazama pneumatske instalacije je data na slici 2. Objašnjenje pojedinih delova i funkcija je referisano na principsku blok šemu na slici 1. Savitljivo crevo preko brzo rastavne spojnice (3) ulazi na komandnu tablu (pult) operatera (29) koja je postavljena frontalno i obezbeđuje nesmetano rukovanje i observaciju merenih veličina od strane operatera. U instalaciji su takođe ugrađeni nepovratni ventil (10), slavina ventila za zatvaranje vazduha (6), davača pritiska vazduha sa displejom za očitani pritisak (5). Kontrolno mesto (11) služi za priključak etalon manometra za proveru davača pritiska vazduha (5). Razvodni blok (13) je detaljno prikazan na slici 2. Boca (14) za vazduh je zapremine 10 l i sa njom je povezan sigurnosni ventil Bauer (15) za granični pritisak 300 bar, kao što pokazuje slika 2. Pritisak vazduha u boci se meri posredstvom davača pritiska sa kojim je povezan pripadajući displej pokazivač (16). Kontrolno mesto (17) služi za priključak etalon manometra, kojim se proverava davača pritiska vazduha u boci.

Za ispuštanje ili pražnjenje kompresorske boce se koristi slavina ventila (18). Merenje vremena u sekundama do maksimalnog pritiska se koristi tajmer (12), koji se aktivira preko tastera (9), dok se njegovo resetovanje vrši preko tastera (36). Hlađenje kompresora vrši se pomoću zaštitne kape (20), koja je preko priključka za industrijski vazduh (21) povezana sa vazдушnom instalacijom, a samim tim ima funkciju natpunjenja kompresora.

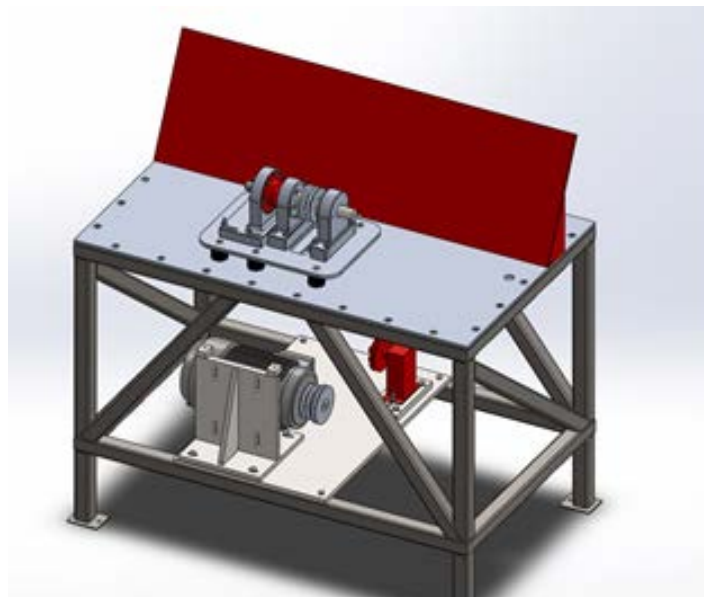
IV HIDRAULIČKA INSTALACIJA I POGONSKI MEHANIZAM

Kao što je prikazano na principskoj blok šemi na slici 1, hidraulička, odnosno uljna instalacija sastoji se od rezervoara za ulje (30) sa grejačem (31), uljne zupčasta pumpa (32) prelivnog ventila (33), senzora za pritisak ulja (34), kontrolnog mesta za etalon manometar za ulje (35) i vodova za ulje pod pritiskom i povratno ulje. Zagrevanje ulja vrši se preko grejača (31) dok se temperatura kontroliše pomoću davača temperature uz koji se ugrađuje displej pokazivač (1) za očitavanje stvarne vrednosti temperature. Uključenje grejača ulja se ostvaruje pomoću tastera (3) koji u sebi ima svetlosnu indikaciju stanja uključenosti grejača. Ulje određene temperature i pritiska dovodi se preko uljne zupčaste pumpe (32), prelivnog ventila (33) u priрубnicu (27), kroz koju ulazi u kompresor i podmazuje ga. Vod povratnog ulja vezan je sa donje strane priрубnice (27) i rezervoara (30).

Pogonska grupa je sastavljena iz frekventnog regulatora koji se nalazi u upravljačkom ormanu (22), elektro motora (28) na koji se nadovezuje sistem kaišnika (23)-(24)-(26), koji prenose snagu do potrošača. Očitavanje svih parametara se obavlja na komandnoj tabli, odnosno pultu (29).

Na slici 3 je prikazan konstruktivni izometrijski izgled ispitnog stola kompresora, sa prikazom dispozicije pogonskih mehanizma u odnosu na mehanički ram ispitnog stola. Pogonsko vratilo kompresora sa uležištenjem je postavljeno na izdvojenu platformu. Na platformi se nalazi nosač kompresora koji je krutom spojnicom povezan sa pogonskim vratilom. Ovo vratilo je pomoću trajno podmazanih kugličnih ležajeva uležišteno u dva nosača koji se nalaze na platformi. Između uležištenja se nalazi kaišnik koji pogoni vratilo preko dva klinasta kaiša. Platforma je

oslonjena na šest gumenih amortizera koji prigušuju vibracije nastale od rada kompresora. Za razliku od prethodnog stola, kod koga je noseća konstrukcija stola prigušivala vibracije nastale radom kompresora, kod novog rešenja se ove vibracije veoma malo prenose na sto i pod prostorije, tako da je rad novog uređaja daleko mirniji i tiši.



Slika 3. Izometrijski pogled izgled ispitnog stola kompresora

Pogon vratila ispitnog stola sa elektromotorom jednosmerne struje kojim se upravljalo regulatorom sa Vard-Leonardovom grupom je zamenjen asinhronih motorom snage 4 kW upravljanim frekventnim regulatorom.

U okviru ovog tehničkog rešenja je promenjen način zatezanja pogonskih kaiševa vratila kompresora, tako da je izbegnuto proklizavanje kaiševa i povećana pouzdanost rada stola. Kaiševi se zatežu pomeranjem elektromotora u vertikalnoj ravni. Ranije je zatezanje bilo pomeranjem motora u horizontalnoj ravni. Sada je omogućeno veće pomeranje motora, a samim tim i kvalitetnije zatezanje kaiševa. Osim toga, kaiševi pogona vratila se sve vreme nalaze u vertikalnoj ravni, tako da na vratilo deluje sila koja nema horizontalnu komponentu.

Pumpa za podmazivanje kompresora se pogoni kaišnim prenosom direktno sa vratila elektromotora, a zatezanje ovog kaiša se vrši pomeranjem u horizontalnoj ravni ploče koja nosi pumpu za podmazivanje. Kod prethodnog ispitnog stola ova pumpa se pogonila sa vratila pogona kompresora. Iz tog razloga je otvor u ploči koja nosi uležištenja kompresora bio veći, što je smanjivalo krutost te ploče i povećavalo vibracije ispitnog stola. Zatezanje kaiša ove pumpe je bilo otežano.

V ELEKTROENERGETSKI I MERNO-UPRAVLJAČKI DEO ISPITNOG STOLA

Napajanje ispitnog stola je sa mrežnog priključka 3 x 400V/230V, 50 Hz sa primenjenim sistemom TNCS zaštite od opasnog napona dodira. Najveći potrošač u sistemu je pogonski asinhroni motor izlazne snage 4 kW koji se napaja i frekventnog regulatora. Frekventni regulator je montiran na unutrašnjoj montažnoj ploči GRO. Frekventnom regulacijom je obezbeđena

regulacija, odnosno održavanje željenog broja obrtaja pogonskog vratila kompresora koji se ispituje. Kao povratna sprega po brzini obrtanja se koristi inkrementalni enkoder RI 58-O Hengstler, koji je montiran na osovini pogonskog mehanizma (pozicija 25 na slici 1). Signali sa enkodera se nakon transliranja nivoa +5 V na nivo +24 V, dovode na NPN ulaze (0-24 V) frekventnog regulatora. Ovi digitalni ulazi su u frekventnom regulatoru setovani kao povratna sprega po brzini. U sklopu frekventnog regulatora je implementirana V/f regulacija brzine pogonskog elektromotora, uz korišćenje povratne sprege po brzini. U sklopu algoritma upravljanja je realizovana kompenzacija statorske otpornosti elektromotora [6-8].

Upravljanje elektro motora frekventnim regulatorom ima mogućnost kontinualne promene broja obrtaja od minimalnog do maksimalnog, tako što se obrtanjem potencijometra zadate vrednosti (8) na komandnoj tabli (29) vrši zadavanje (povećavanje ili smanjivanje) broj obrtaja pogonskog vratila (videti Sliku 1). Očitavanje broja obrtaja vrši se na displeju (7) na komandnoj tabli (29), a signal povratne sprege se dobija sa davača-enodera (25) koji je vezan na vratilo kaišnika (24) (videti sliku 1).

Iz glavnog razvodnog ormara (GRO) se napaja grejač za zagrevanje hidrauličkog ulja za podmazivanje. U GRO se nalazi sva potrebna sklopna i zaštitna oprema (automatski osigurači), translator signala nivoa 0-5 V na 0-24 V, izvor napajanja 24Vdc/5A za napajanje svih senzora i displej pokazivača. U GRO je predviđen sistem za hlađenje opreme u njegovoj unutrašnjosti (pre svega frekventnog regulatora). Instalirana je grupa ventilator + termostat, uz obezbeđenje ulaza za usis vazduha iz okoline i izlaza sa žaluzinama, koji služi za potis zagrejanog vazduha.

Pored broja obrtaja pogonskog vratila kompresora, na komandnoj tabli, odnosno komandnom pultu (29) se prikazuju sve vreme u toku rada: pritisak komprimovanog vazduha, pritisak i temperatura ulja za podmazivanje, temperatura cilindra kompresora i vreme rada kompresora.

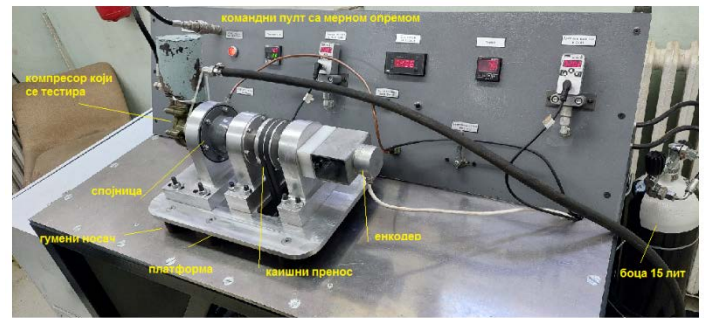
Na slici 4 je prikazan kompletan izgled realizovanog ispitnog stola. Na ovom prikazu se jasno uočavaju pozicije GRO (leva strana ispitnog stola), pozicija platforme za montažu kompresora, prenosnog mehanizma i enkodera, kao pozicije pogonskog asinhronog motora i merno-akvizicione opreme.



Slika 4. Izgled realizovanog ispitnog stola za ispitivanje kompresorskih motora

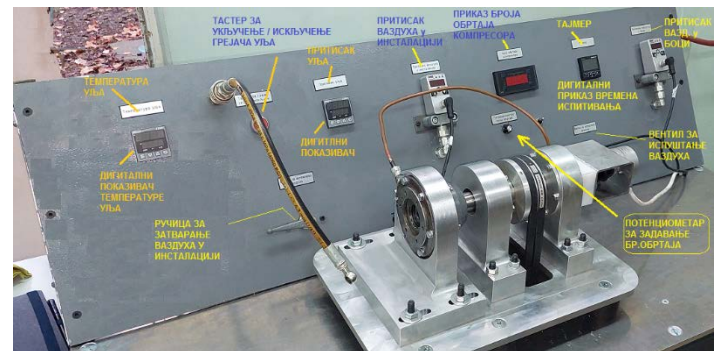
Na slici 5 je prikazan detalj realizovanog ispitnog stola integralno sa komandnim pultom, pripadajućom mernom

opremom i vibracionom platformom oslonjenom na gumene odbojnice (oslonce).



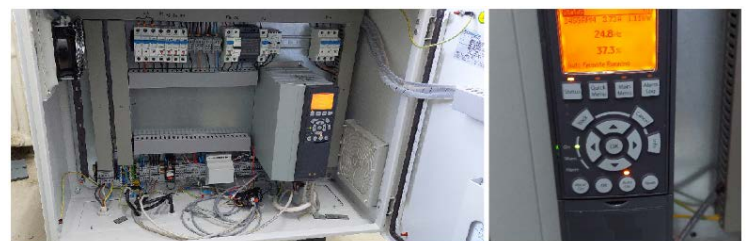
Slika 5. Ispitni sto sa prikazom detalja komandnog pulta sa mernom opremom i elastično oslonjenom montažnom platformom ispitivanog kompresora

Na slici 6 je prikazan detaljan prikaz komandnog pulta ispitnog stola sa realizovanom mernom opremom za praćenje parametara tokom ispitivanja kompresora



Slika 6. Detaljan prikaz komandnog pulta ispitnog stola sa pripadajućom mernom opremom

Na slici 7 je dat prikaz unutrašnjosti glavnog razvodnog ormara (GRO) sa pripadajućom sklopnom i zaštitnom opremom, kao i sa pratećom elektronskom opremom i izvorima napajanja za senzore. U prikazu je istaknuta pozicija frekventnog regulatora i prikaz na njegovom displeju sa koga se mogu videti neki parametri u toku ispitivanja: brzina obrtanja pogonskog motora 1459 o/min (učestanost obrtnog polja pogonskog elektromotora 24,8 Hz), struja pogonskog motora 3,73 A (pogon radi sa 37,3% nominalne snage), odnosno izlazna snaga 1,11 kW.

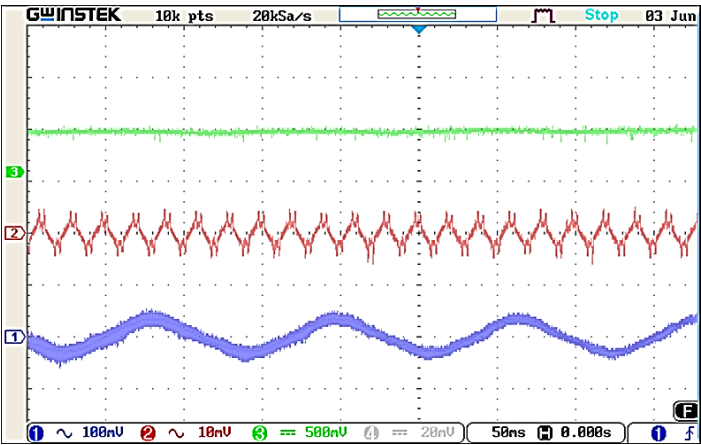


Slika 7. Detaljan prikaz unutrašnjosti GRO sa prikazom displeja frekventnog regulatora u režimu 1459 o/min i pri izlaznoj snazi 1,1 kW

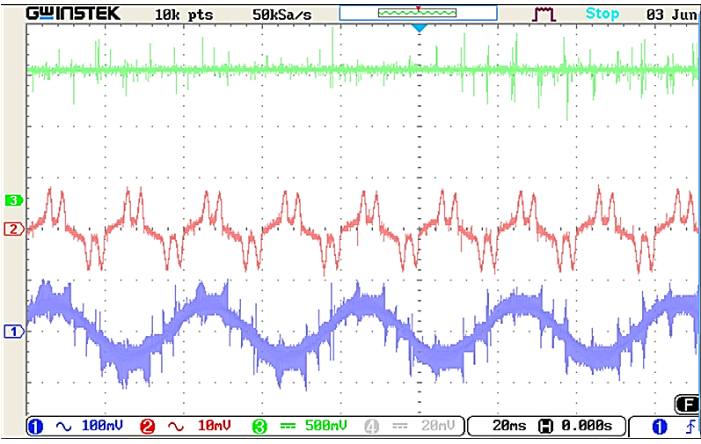
VI EKSPERIMENTALNA VERIFIKACIJA

U nastavku su prikazani neki eksperimentalni rezultati koji su dobijeni na regulisanom elektromotornom pogonu kompresora. Rezultati su prikazani osciloskopskim snimcima, pri čemu su merene tri veličine: (1) struja pogonskog asinhronog elektromotora, (2) ulazna struja frekventnog regulatora i (3) brzina obrtanja kompresora.

Na slici 8 su prikazani osciloskopski snimci merenih veličina u režimu kada je zadata brzina obrtanja iznosila 514 o/min. Sa snimka se može očitati stvarna izmerena vrednost brzine obrtanja koja je iznosila 500 o/min. Maksimalna vrednost linijske struje pogonskog motora je iznosila 4 A, dok je efektivna vrednost struje iznosila 2,83 A. Pogonski motor je radio u režimu sa učestanošću od 8,3Hz.



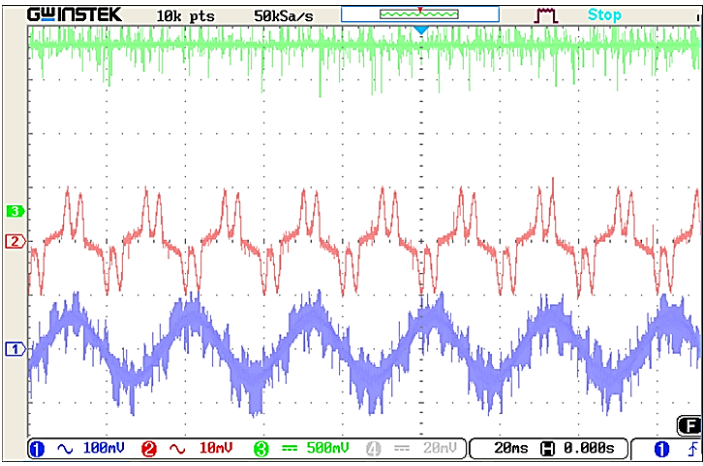
Slika 8. Osciloskopski snimci u režimu zadate brzine 514 o/min; CH1 - struja pogonskog motora (10 A/div), CH2 - struja mreže (10 A/div), CH3 - brzina obrtanja izlaznog vratila 650 o/min /div



Slika 9. Osciloskopski snimci u režimu zadate brzine 1530 o/min; CH1 - struja pogonskog motora (10 A/div), CH2 - struja mreže (10 A/div), CH3 - brzina obrtanja izlaznog vratila 650 o/min /div, vremenska baza 20 ms/div

Osciloskopski snimci merenih veličina u režimu kada je zadata brzina obrtanja iznosila 1530 o/min prikazani su na slici 9. Sa snimka se može očitati stvarna izmerena vrednost brzine obrtanja koja je iznosila 1560 o/min. Maksimalna vrednost linijske struje

pogonskog motora je iznosila 6 A, dok je efektivna vrednost struje iznosila 4,25 A. Pogonski motor je radio u režimu sa učestanošću od 26 Hz.



Slika 10. Osciloskopski snimci u režimu zadate brzine 2000 o/min; CH1 - struja pogonskog motora (10 A/div), CH2 - struja mreže (10 A/div), CH3 - brzina obrtanja izlaznog vratila 650 o/min /div, vremenska baza 20 ms/div

Na slici 10 su prikazani osciloskopski snimci merenih veličina u režimu kada je zadata brzina obrtanja iznosila 2000 o/min. Sa snimka se može očitati stvarna vrednost brzine obrtanja koja je iznosila 1950 o/min. Maksimalna vrednost linijske struje pogonskog motora je iznosila 8 A, dok je efektivna vrednost struje iznosila 5,67 A. Pogonski motor je radio u režimu sa pobudnom učestanošću od 33,3 Hz.

Kao što se vidi iz prethodnih eksperimentalnih rezultata, primenom frekventne regulacije je moguće postići kontinualnu regulaciju brzine obrtanja pogonskog motora čime se dobija jedno fleksibilno rešenje ispitnog stola kojim je moguće postići ispitivanje kompresorskih motora u širokom opsegu brzina obrtanja i snaga.

Tabela 1. Osnovne tehničke karakteristike uređaja

Napajanje električnom energijom	3x400/230V, 50Hz
TNCS sistem	
Snaga pogonskog elektromotora:	4 (kW) pri 1450 (o/min)
Maksimalni broj obrtaja na prirubnici	2000 (o/min)
Maksimalni pritisak vazdušne instalacije	70 bar
Zapremina boce za vazduh pod pritiskom	10 (dm ³)
Pritisak ulja za podmazivanje	3,5–5 bar
Zapremina rezervoara za ulje	5 dm ³
Snaga grejača za zagrevanje ulja za podmazivanje	700 W
Ulje za podmazivanje	MS- 20
Dimenzije	1500x 802x1320 (mm)
Masa	250 kg

U tabeli 1 su date osnovne tehničke karakteristike razvijenog ispitnog stola za testiranje kompresorskih motora.

VII ZAKLJUČAK

U radu je prikazana realizacija ispitnog stola za ispitivanje i testiranje kompresorskih motora specijalne namene. Konstruktivnim rešenjima su maksimalno smanjene vibracije i onemogućeno je njihovo prenošenje na telo ispitnog stola i pod prostorije. Time je smanjena i buka u prostoriji, čime su ostvareni bolji uslovi rada operatera koji vrši ispitivanje kompresora. U elektroenergetskom delu je inovirano rešenje elektromotornog pogona i umesto DC pogonskog motora sa Ward-Leonardovom grupom je primenjeno rešenje sa regulisanim AC pogonom (frekventnim regulatorom). Na ovaj način je obezbeđeno kontinualno podešavanje učestanosti, odnosno brzine obrtanja pogonskog motora kompresora. Takođe u ovom rešenju je implemetiran merno akvizicioni sistem. Prema tehničkim zahtevima je obezbeđeno zadavanje i održavanje brzine obrtanja kompresora primenom frekventne regulacije u opsezima 0 - 500 - 1000 - 1450 - 2000 o/min, sa zadavanjem preciziranih vremenskih intervala za svaki od ovih opsega. Tokom rada kompresora je obezbeđeno njegovo podmazivanje pumpom koja daje pritisak ulja od 3,5 – 5 bar, pri čemu se radna temperatura održava u opsegu 50 °C - 70 °C.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Istraživanje u ovom radu je podržano od strane Ministarstva Nauke, Tehnološkog razvoja i Inovacija Republike Srbije u okviru krovnog projekta pod Ugovorom br. 451-03-66/2024-03/200034.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Ulan Ude Aviation Plant.: Руководство по капитальному ремонту ВОЗДУШНЫЙ КОМПРЕССОР АК-50Т1
- [2] Ulan Ude Aviation Plant.: Паспорт КОМПРЕССОР АК-50Т1 Серия 3., 1991.
- [3] „V.Z. M.Stanojlović“ Lista delova vazdušnog kompresora AK-50T1, Beograd, 2004.
- [4] „V.Z. M.Stanojlović“: Lista ispitivanja vazdušnog kompresora AK-50T1, Beograd, 2002.
- [5] „V.Z. M.Stanojlović“: Radna lista rastavljanja vazdušnog kompresora AK-50T1, Beograd, 2002.
- [6] Design Guide VLT® AutomationDrive FC 301/302, 0.25–75 kW, Danfoss A/S Ulsnaes 1, DK-6300 Graasten, <https://www.danfoss.com/en/products/dds/low-voltage-drives/vlt-drives/vlt-automationdrive-fc-301-fc-302/> [pristupljeno 24.03.2024]
- [7] Operating Instructions VLT® AutomationDrive FC 302, 12-pulse, Danfoss A/S Ulsnaes 1, DK-6300 Graasten, <https://assets.danfoss.com/documents/latest/271241/AQ361181055259en-000601.pdf> <https://www.danfoss.com/en/products/dds/low-voltage-drives/vlt-drives/vlt-automationdrive-fc-301-fc-302/> [pristupljeno 24.03.2024]
- [8] Programming Guide VLT® AutomationDrive FC 301/302, Software versions, control card MK I: 7.62, 48.2X, Software version, control card MK II: 8.10, Danfoss A/S Ulsnaes 1, DK-6300 Graasten, <https://files.danfoss.com/download/Drives/DrivesM0013101.pdf> [pristupljeno 24.03.2024]

AUTORI/AUTHORS

dr Željko V.Despotović, Institut Mihalo Pupin, Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-2977-6710](https://orcid.org/0000-0003-2977-6710)
dr Vladimir Kvrđić, Institut Mihalo Pupin, Univerzitet u Beogradu, vladimir.kvrgic@pupin.rs, ORCID [0000-0003-3527-9892](https://orcid.org/0000-0003-3527-9892)

Realization of a System for Testing Special-Purpose Compressor Motors Based on the Application of a Frequency Controlled AC Drive

Abstract – The paper presents the modernization and realization of a system for testing special-purpose compressor motors based on the application of frequency controlled of the induction motor drive. According to the technical requirements, setting and maintaining the speed of the compressor is provided using frequency control in the ranges 0 - 500 - 1000 - 1450 - 2000 min-1, with the setting of specified time intervals for each of these ranges. For the specified time, the compressor needs to fill a bottle with compressed air with a capacity of 10 l to a pressure of 50 bar. The compressor revolutions are measured by a measuring system consisting of an incremental encoder, an acquisition card and a digital indicator. During the operation of the compressor, it is lubricated by a pump that provides an oil pressure of 3.5 - 5 bar, while the operating temperature is maintained in the range of 50 °C - 70 °C. The paper also presents the experimental results obtained during operational tests and commissioning of the presented system for testing compressor motors for special purposes.

Index Terms – Compressor, Pneumatics, AC drive, Frequency control, Measuring, Acquisition

Određivanje lančanice nadzemnih strujnih vodova primenom geodetskih metoda merenja

Petar Nikolić, Dragan Marinović, Bojan Rakić, Goran I. Jovanović, Žarko Nestorović

Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“, Beograd, Ogranak HE Đerdap, Kladovo

Rezime – Lančanica nadzemnih strujnih vodova opisuje se primenom funkcije kosinus hiperbolički. Funkcija kosinus hiperbolički opisuje položaj nadzemnog voda koji bi on trebao da zauzima u prostoru i pogodna je pri projektovanju vodova. Pravi položaj nadzemnog voda u prostoru jedino je moguće odrediti merenjem odgovarajućih veličina koje omogućavaju izračunavanje njegovih koordinata u prostoru. Nadzemni strujni vod se u tom slučaju predstavlja diskretnim skupom tačaka, dok se parametri funkcije lančanice mogu odrediti nekom metodom matematičkog modeliranja na osnovu skupa tačaka. U ovom radu razmatra se određivanje položaja provodnika dalekovoda DV405 koji se nalazi nizvodno od brane Đerdap 1. Određivanje matematičkog modela zasnovano je na polinomnoj regresiji drugog reda. Dobijeni rezultati pokazuju visoku saglasnost modela i rezultata dobijenih merenjem. Pojedina značajna odstupanja izmerenih vrednosti i vrednosti dobijenih modeliranjem mogu se objasniti relativno velikim rastojanjima od tačaka sa kojih je merenje izvršeno do tačaka nadzemnog voda.

Ključne reči – diskretizacija, polinomna regresija, greške merenja, verovatnoća, statistika

I UVOD

Oblik nadzemnog strujnog voda predstavlja se lančanicom odnosno funkcijom kosinus hiperbolički. Lančanica predstavlja krivu koju bi, za dve krajnje tačke obešeni nadzemni strujni vod, trebalo da zauzme u prostoru. Ova osobina nadzemnog voda pogodna je za korišćenje u fazi njegovog projektovanja kada se uzimaju u obzir topografija terena i izgrađeni objekti na pravcu dalekovoda. Slika 1 ilustruje oblik lančanice nadzemnih strujnih vodova.



Slika 1. Oblik nadzemnih strujnih vodova (Izvor: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/PylonsSunset-5982.jpg>)

Pravi položaj i oblik krive koji nadzemni vod zauzima u prostoru

može se odrediti jedino merenjem. Geodetske metode merenja radi određivanja tačnog položaja i oblika strujnog voda u prostoru predstavljaju najpouzdaniji izvor za ovu vrstu informacije iz najmanje dva razloga:

- geodetske metode merenja obezbeđuju prikaz svih objekata u jedinstvenom koordinatnom sistemu i
- poznata je tačnost sa kojom su koordinate tačaka određene.

Navedene dve osobine geodetskih metoda omogućavaju da se određuje međusobni položaj objekata u prostoru i da se procenjuje raspon položaja tačaka u kome se one mogu pojaviti sa podjednakom verovatnoćom. Raspon položaja tačaka pojavljuje se kao posledica neizbežnih grešaka u procesu realizacije geodetskih merenja.

Kada se odredi skup tačaka (koordinate odnosno stacionaže - rastojanja i visine) koje definišu položaj nadzemnog voda u prostoru pojavljuje se problem određivanja teorijskog oblika funkcije koja najbolji mogući način aproksimira dati diskretni skup tačaka. Određivanje oblika krive koja na najbolji način aproksimira diskretni skup tačaka u ovom istraživanju vrši se primenom polinomne regresije drugog stepena uz primenu metode najmanjih kvadrata za određivanje koeficijenata funkcije.

II MATERIJAL I METODE

Ulazni podaci dobijeni su merenjem nadzemnog voda koji pripada dalekovodu DV405 nizvodno od brane Đerdap 1. Slika 2 ilustruje položaj dalekovoda DV405 dok su u tabeli 1 date približne koordinate tačaka vešanja užeta.

Tabela 1. Koordinate krajnjih tačaka nadzemnog strujnog voda (Izvor: Geosrbija <https://a3.geosrbija.rs/>)

Tačka	Y [m]	X [m]
S1	621986	4947505
S2	621602	4947013

Koordinate tačaka u prostoru za dalekovod DV405 dobijene su obradom rezultata geodetskih merenja. Ka strujnom vodu dalekovoda DV405 opažani su pravci i merena zenitna odstojanja. Korišćena je totalna stanica Leica TS30. Merenja su vršena sa tačaka koje imaju poznate koordinate (Y,X,Z) u geodetskom koordinatnom sistemu za osmatranje velike brane Đerdap 1. Koordinate tačaka nadzemnog voda određene su metodom presecanja. Na osnovu koordinata tačaka strujnog voda u tačkama vešanja obeleženim oznakama S1 i S2 i duž faznog užeta izvršeno je modeliranje odnosno određivanje koeficijenata polinoma drugog reda. Prema teoriji, lančanica bi trebalo da ima

oblik funkcije kosinus hiperbolički [1] ali u ovom radu predmet istraživanja jeste saglasnost oblika strujnog voda DV405 sa polinomom drugog stepena pa se neće testirati saglasnost sa funkcijom kosinus hiperbolički.



Slika 2. Položaj dalekovoda DV405 nizvodno od brane Đerdap 1
(Izvor: Geosrbija <https://a3.geosrbija.rs/>)

Matematički model za polinomnu regresiju drugog reda glasi:

$$y = fx^2 + gx + h \quad (1)$$

gde su:

- y - visina
- x - raspon (stacionaža – udaljenost tačke od početne tačke S1) i
- f, g, h - nepoznati koeficijenti.

Nepoznati koeficijenti određuju se primenom polinomne regresije na način da se kroz svaku tačku za koju su poznate visine i stacionaže postavi jedna jednačina sledećeg oblika:

$$y_i = fx_i^2 + gx_i + h \quad (2)$$

Za rešavanje sistema jednačina definisanih formulom (2) dovoljno je odrediti tri tačke (tri visine i tri stacionaže - raspona). Međutim ovako pojednostavljen sistem jednačina može biti nepouzdan i iz tog razloga je izvršeno merenje daleko većeg broja tačaka. U ovom slučaju imamo pedeset jednačina i tri nepoznate što dovodi do preodređenosti sistema linearnih jednačina. Nepoznate su zbog toga određene po metodi najmanjih kvadrata odnosno po metodi koja obezbeđuje da suma kvadrata odstupanja visina od modela bude minimalna [2].

Kada se koeficijenti f, g, h odrede na ovaj način onda se njihove konkretne vrednosti unesu u jednačinu (1) i na taj način se dobije model za lančanicu nadzemnog strujnog voda.

Razlike:

$$\delta_i = y_{x_i} - y_i \quad (3)$$

gde su:

- δ_i - razlika visina određenih primenom modela (1) i dobijenih merenjem,
- y_{x_i} - vrednost visine dobijene primenom modela (1) za vrednost stacionaže-raspona x_i (u tački x_i) i
- y_i - vrednost visine određena geodetskim merenjem.

Srednja greška modela dobija se po formuli:

$$m_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{n-u}} \quad (4)$$

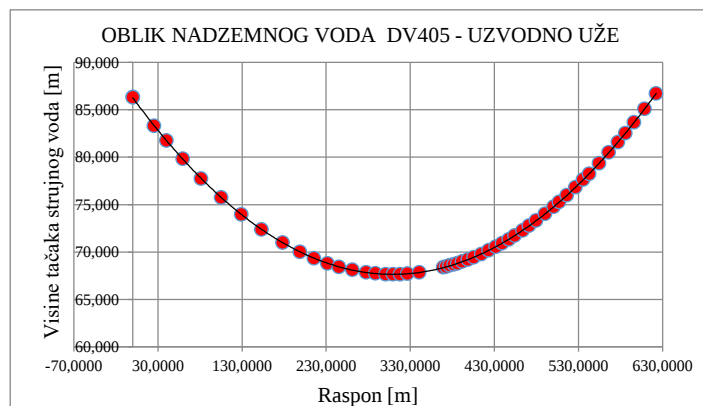
gde su:

- m_0 - srednja greška modela,
- n - broj merenja i
- u - broj nepoznatih.

Srednja greška modela je opšti (globalni) pokazatelj odstupanja modela i rezultata merenja dok su razlike u tački δ_i lokalni pokazatelji odstupanja modela i rezultata merenja (pokazatelji odstupanja u svakoj tački).

III REZULTATI I DISKUSIJA

Merenja su izvršena u 53 tačke uzvodnog faznog užeta dalekovoda DV405. Ostvarena globalna srednja kvadratna greška modela iznosi $m_0 = 0,026$ m dok odstupanja pripadaju rasponu $[-0,061$ m, $+0,071$ m]. Broj merenja iznosi $n = 53$, dok broj nepoznatih iznosi $u = 3$ što znači da je broj stepeni slobode pri određivanju koeficijenata jednak $n - u = 50$. Relativno veliki broj prekobrojnih merenja ukazuje na visoku pouzdanost dobijenih rezultata. Slika 3 prikazuje oblik lančаницe strujnog voda (uzvodno uže dalekovoda DV405), dok slika 4 prikazuje odstupanja visina dobijenih primenom modela u odnosu na rezultate dobijenih merenjem.

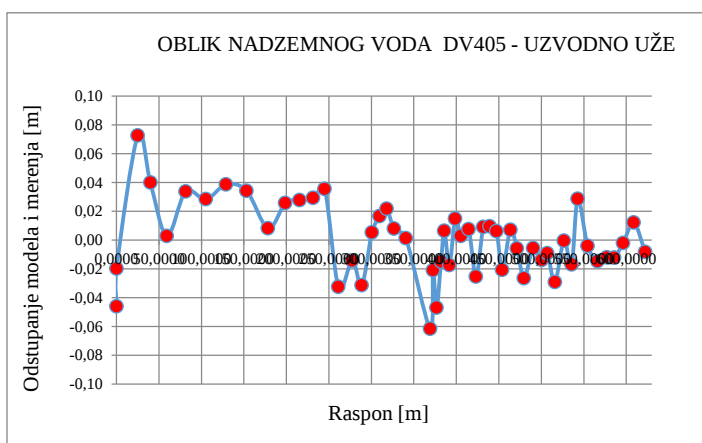


Slika 3. Oblik uzvodnog faznog užeta dalekovoda DV405

Koeficijenti modela (2) izračunati po metodi najmanjih kvadrata dati su u tabeli 2.

Tabela 2. Vrednost koeficijenata u modelu (2)

Koeficijent	Vrednost
f	0,000195
g	-0,120585
h	86,299



Slika 4. Odstupanje visina modela od izmerenih vrednosti

Zamenom koeficijenata datih u tabeli 2 u model (1) dobija se analitički oblik posmatranog nadzemnog voda:

$$y = 0,000195x^2 - 0,120585x + 86,299 \quad (5)$$

Na osnovu modela (5) moguće je odrediti tačku minimuma nadzemnog voda (raspon i visinu).

$$y' = 2 \cdot 0,000195x - 0,120585 = 0 \quad (6)$$

$$x = -\frac{-0,120585}{2 \cdot 0,000195} = 309,431 \text{ m} \quad (7)$$

Na osnovu rezultata (7) sledi da se najniža tačka strujnog voda nalazi na rastojanju od 309,431 m od početne tačke (označene sa S1 na slici 1). Minimalna visina strujnog voda dobija se primenom formule (5):

$$y = 0,000195 \cdot 309,43^2 - 0,120585 \cdot 309,43 + 86,299 \quad (8)$$

$$y = 67,64 \text{ m} \quad (9)$$

Greška određivanja najniže tačke nadzemnog strujnog voda ne bi trebalo da pređe vrednost $y = 67,64 \text{ m} \pm 0,03 \text{ m}$.

Dobijeni rezultat ukazuje na relativno visoku tačnost određivanja modela nadzemnog voda na osnovu rezultata geodetskih merenja. Kako su geodetska merenja sprovedena samo sa desne obale (sa srpske strane) to su rastojanja od stajne tačke (tačke sa koje su vršena merenja) prilično velika (do 1 km) što utiče na tačnost rezultata merenja na levoj obali (rumunskoj strani). Rezultat značajnog odstupanja na stacionaži (rasponu) od 369,2 m može nastati i ako je došlo do njihanja strujnog voda jer je pretpostavka da strujni vod miruje tokom merenja.

Dalja istraživanja mogu se zasnivati na češćim merenjima posmatranog nadzemnog voda uz registrovanje podataka o atmosferskim uslovima kao i o strujnim opterećenjima u

posmatranom vodu. Navedeni podaci se mogu koristiti kako za ponašanje nadzemnog voda pri različitim temperaturnim uslovima tako i za eventualno praćenje stabilnosti dalekovodnih stubova. Određivanje velikog broja koordinata koje definišu nadzemni vod mogu se koristiti i za izračunavanje njegove ukupne dužine sa relativno visokom tačnošću.

IV ZAKLJUČAK

Rezultati merenja i modeliranja ukazuju na visoku saglasnost modela polinoma drugog stepena i rezultata merenja dobijenih za diskretan skup tačaka koje aproksimiraju posmatrani nadzemni vod u prostotu. Modeliranje strujnog voda polinomom drugog stepena omogućava određivanje njegove minimalne tačke (raspona i minimalne visine) primenom analitičke matematičke kao i određivanje greške ovih veličina. Osmatranje strujnog voda pri različitim uslovima uz beleženje odgovarajućih parametara omogućava dobijanje različitih podataka uključujući i eventualne promene položaja i geometrije kako strujnog voda tako i dalekovodnih stubova.

ZAHVALNICA/ACKNOWLEDGEMENT

Rezultati merenja dobijeni su dodatnim radom prilikom redovnih aktivnosti koje se sprovode u okviru redovnih geodetskih osmatranja brane Đerdap 1 od strane geodetske grupe u okviru tehničke službe ogranka Đerdap Akcionarskog Društva „Elektroprivreda Srbije“.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Hanging with Galileo, <http://whistleralley.com/hanging/hanging.htm> [pristupljeno 13.02.2024]
- [2] Perović, G., Moric, H. *Metod najmanjih kvadrata: (monografija 1): sa 87 slika i 90 tabela*, Beograd, Perović, G., 2005.

AUTORI/AUTHORS

Petar Nikolić – dipl.ing., Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“, Beograd Ogranak HE Đerdap, petar.nikolic@djerdap.rs, ORCID [0009-0008-5390-7913](https://orcid.org/0009-0008-5390-7913)

Dragan Marinović – dipl.ing., Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“, Beograd, Ogranak HE Đerdap, dragan.marinovic@djerdap.rs, ORCID [0009-0000-7384-3875](https://orcid.org/0009-0000-7384-3875)

Bojan Rakić – dipl.ing., Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“, Beograd, Ogranak HE Đerdap, bojan.rakic@djerdap.rs, ORCID [0009-0005-8437-5946](https://orcid.org/0009-0005-8437-5946)

Goran I. Jovanović – dipl.ing., Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“, Beograd, Ogranak HE Đerdap, goran.jovanovic@djerdap.rs, ORCID [0009-0008-2580-1417](https://orcid.org/0009-0008-2580-1417)

Žarko Nestorović – dipl.ing., Akcionarsko društvo „Elektroprivreda Srbije“, Beograd, Ogranak HE Đerdap, zarko.nestorovic@djerdap.rs, ORCID [0000-0002-7928-7416](https://orcid.org/0000-0002-7928-7416)

Determining the Catenary of Overhead Power Lines Using Geodetic Measurement Methods

Abstract – The catenary of overhead power lines is described by cosine hyperbolic function. Cosine hyperbolic function describes the position of overhead power line which it should be taken in the space, and it is suitable in the process of overhead power lines design. The real position of overhead power line it is only possible to be determined by measuring

certain values which could be used for determination of their coordinates. Overhead power line in that case is described by discrete set of points, while the parameters of catenary could be modelled on the base of that set of points by utilizing certain mathematical model. In this paper the position determination of power line DV405, which is located downstream of DJerdap 1 dam, is considered. The mathematical form of power line is based on the polynomial regression of second order. The results showed high concordance between values obtained by measurements and the utilized model. Some significant deviation between measured and modelled values might be explained by relatively large distance between the station point and the measured point of power line.

Index Terms – Discretization, Polynomial regression, Measurement errors, Probability, Statistics

CIP - Каталогизација у публикацији
Народна библиотека Србије, Београд

621.3

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

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



www.savezenergeticara.org