

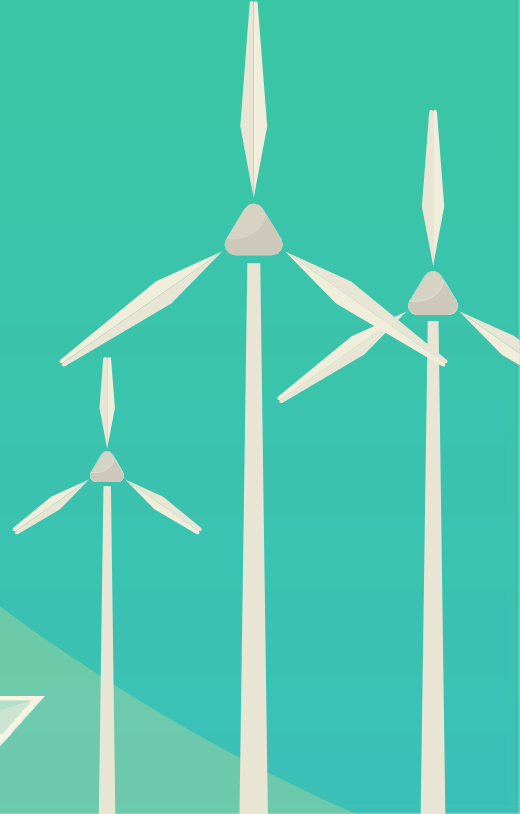
ISSN 0354-8651



List Saveza energetičara
Broj 1 / Godina XXIII / Mart 2021.

energija

| ekonomija | ekologija



energija

| ekonomija | ekologija



Energija / Ekonomija / Ekologija

Broj 1, Mart 2021

Izdavač:

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

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, Univerzitet u Kragujevcu

Uređivački odbor i izdavački savet:

prof. dr Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu
prof. dr Dejan Ivezić, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu
prof. dr Mirka Komatina, Mašinski fakultet, Univerzitet u Beogradu
prof. dr Željko Despotović, Institut Mihailo Pupin Beograd
prof. dr Petar Đukić, Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu
prof. dr Nenad Đajić, Akademija inženjerskih nauka Srbije
prof. dr Damir Đaković, Fakultet tehničkih nauka u Novim Sadu
prof. dr Nenad Đajić, Akademija inženjerskih nauka Srbije
dr Vladimir Šiljkut, JP Elektroprivreda Republike Srbije
prof. dr Jovica V. Milanović, The University of Manchester, Velika Britanija
prof. Vladimir Terzija, Humboldt Fellow, IEEE Fellow, EiC Elsevier IJEPES
prof. dr Adriana Sida Manea, Politehnica University Timisoara, Rumunija
prof. dr Neven Duić, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, Hrvatska
prof. dr Rade Ćirić, University of Agder, Norveška
prof. dr Nataša Markovska, MANU Skopje, Severna Makedonija
dr Stanko Janković, TenneT TSO GmbH, Savezna Republika Nemačka
prof. dr Mirza 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] Iva BATIĆ, Željko ĐURIŠIĆ, Miroljub BABIĆ
Tehno-ekonomska analiza proizvodnje vodonika iz biodizela i njegove upotrebe za proizvodnju električne energije u gorivnim ćelijama za pogon električnih vozila / Techno-economic Analysis of Hydrogen Production from Biodiesel and Its Use for Electricity Production in Fuel Cells for Electric Vehicles
- [07] Žarko KOPRIVICA, Dragan MIHIĆ
Uticaj programirane promene faznog stava struje na specifičnu silu cilindričnih linearnih motora sa stalnim magnetima / Influence of a Programmed Change of the Current Phase Angle on Specific Force of Tubular Permanent Magnet Linear Motors
- [11] Dejan IVEZIĆ, Marija ŽIVKOVIĆ, Boban PAVLOVIĆ, Aleksandar MADŽAREVIĆ
Mogućnost korišćenja toplotnih pumpi sa otpadnom toplotom iz postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda kao toplotnim izvorom / Possibilities for Utilization of Waste Heat from Wastewater Treatment Plants by Heat Pumps
- [16] Karolina KASAŠ-LAŽETIĆ, Gorana MIJATOVIĆ, Dejana HERCEG, Miroslav PRŠA
Analiza zagrevanja bakarnih provodnika sa strujom / Heating Analysis of Copper Conductors with Current
- [22] Vladan RISTIĆ, Nikola RAJAKOVIĆ, Dragana VUJANOVIĆ
Izračunavanje kapaciteta skladišta energije potrebnog za ostrvski rad mikromreže / Calculation of the Needed Storage Capacity in the Island Microgrid

- [29] Vladana RAJAKOVIĆ-OGNJANOVIĆ, Tina DAŠIĆ
Značaj monitoringa kvaliteta vode u jezerima hidroelektrana / The Significance of Water Quality Monitoring in Hydropower Lakes
- [32] Jovana PETROVIĆ, Ivan BOŽIĆ
Kratkoročno predviđanje vibracionog ponašanja Fransis turbine nakon višedecenijske eksploatacije / Short-Term Prediction of Francis Turbine Vibration Behavior after Decades of Operation
- [37] Darko BABUNSKI, Emil ZAEV, Atanasko TUNESKI, Laze TRAJKOVSKI, Radmila KOLEVA
Simulacija i odstranjivanje stick-slip efekta servosistema sprovodnog aparata hidraulične turbine / Simulation and Removal of Stick-Slip Effect on a Wicket Gate Hydraulic Servomechanism
- [42] Marija LAZAREVIKJ, Viktor ILIEV, Valentino STOJKOVSKI
Nestacionarno strujanje fluida u paralelnom cevovodu izrađenom od različitih materijala / Transient Fluid Flow in Parallel Pipeline Designed of Pipes with Different Materials
- [50] Đorđe DUKANAC
Analiza vremena ispitivanja i greške očitavanja pametnih brojila električne energije u zavisnosti od njihovog podešenja / Analysis of Test Time and Reading Errors of Smart Electricity Meters Depending on Their Setting
- [56] Biljana SUSLOV, Miša BULAJIĆ
Program energetske efikasnosti HIP-Petrohemija Pančevo / Energy Efficiency Program of HIP-Petrohemija Pancevo
- [61] Srbislav SARIĆ, Biljana SARIĆ
Rekonstrukcija transformatorske stanice 35/10kV u spoljašnje razvodno postrojenje 20kV / Reconstruction of the 35/10kV Substation in an External 20kV Distribution Plant

Tehno-ekonomska analiza proizvodnje vodonika iz biodizela i njegove upotrebe za proizvodnju električne energije u gorivnim ćelijama za pogon električnih vozila

Techno-economic Analysis of Hydrogen Production from Biodiesel and Its Use for Electricity Production in Fuel Cells for Electric Vehicles

Iva Batić*, Željko Đurišić*, Miroljub Babić**

* Elektrotehnički fakultet, Univerziteta u Beogradu

** Makpetrol D.O.O. Beograd

Rezime - Jedan od mogućih pravaca dekarbonizacije i elektrifikacije teretnog i putničkog transporta je upotreba gorivnih ćelija sa vodonikom kao pogonskim gorivom. S obzirom da je primena biomase za proizvodnju električne energije u velikoj meri nekonkurentna u odnosu na vetroelektrane i solarne elektrane, njena primena za dobijanje vodonika predstavlja jedan od mogućih pravaca razvoja ovog obnovljivog izvora energije.

U ovom radu su analizirane tehnologije za proizvodnju vodonika iz biodizela. Izvršena je analiza strukture i ukupnih troškova proizvodnje vodonika iz biodizela, kao i energetski bilans ovog procesa. Sagledani su uslovi korišćenja vodonika za pogon gorivnih ćelija u električnim vozilima. Sprovedena je analiza efikasnosti energetskog ciklusa: biodizel – vodonik – električna energija – mehanička energija za pogon električnih vozila. Kao krajnji rezultat izvršena je procena troškova proizvodnje kWh električne energije iz biodizela i uporedna analiza sa vozilom koje je pogonjeno dizel motorom i električnim motorom napajanim iz baterija.

Ključne reči - biodizel, proizvodnja vodonika, gorivne ćelije, električna vozila

Abstract - One of the possible directions of decarbonisation and electrification of freight and passenger transport is the use of fuel cells with hydrogen as a fuel. Considering that the use of biomass for electricity generation is largely uncompetitive compared to wind and solar power plants, its use for hydrogen production is one of the possible directions of development of this renewable energy source.

In this paper, technologies for hydrogen production from biodiesel were analyzed. An analysis of the structure and total costs of hydrogen production from biodiesel was performed, as well as the energy balance of this process. The conditions of using hydrogen to drive fuel cells in electric vehicles were considered. The efficiency of the energy cycle analysis was performed: biodiesel - hydrogen - electricity - mechanical energy to drive electric vehicles. As a final result, an estimation of the

costs of production of kWh of electricity from biodiesel and a comparative analysis with a vehicle powered by a diesel engine and an electric motor powered by batteries was performed.

Index Terms - biodiesel, hydrogen production, fuel cells, electric vehicles

I UVOD

Čovečanstvo je na pragu nove ere koju karakterišu napredne tehnologije i nove vrste goriva. Bićemo svedoci novih i potpuno različitih načina proizvodnje i upotrebe energije. Energiju bi mogli da generišu izvori sa gotovo nultim zagađenjem. Vodonik kao sintetičko gorivo, u budućoj eri, nakon ekonomije fosilnih goriva, može postati glavni energent za mnoge primene u industriji, transportu, kao i u proizvodnji električne energije u distributivnim mrežama.

Danas je vodonik prepoznat kao nezagađujući nosač energije, jer ne doprinosi globalnom zagrevanju ako se proizvodi iz obnovljivih izvora energije. Najznačajnija je činjenica da se vodonik može dobiti iz širokog spektra primarnih izvora energije. Pored toga, vodonik je praktično jedini sekundarni nosač energije koji je pogodan za širok spektar primena na tržištu, od transportnih i prenosnih do stacionarnih upotreba. Vodonik je već deo današnje hemijske industrije, ali kao izvor energije njegovi benefiti se mogu postići tehnologijama kao što su gorivne ćelije, koje obezbeđuju direktnu konverziju hemijske energije vodonika u električnu energiju.

Pošto se vodonik može proizvoditi iz širokog spektra primarnih energija i može se trošiti u većem broju primena, perspektivno je izvesno da će postati jedan od bitnih izvora energije. Prednost vodonika u odnosu na električnu energiju je što se može dugoročno skladištiti u velikim količinama, što je posebno bitno u elektroenergetskim sistemima sa visokim stepenom penetracije intermitentnih obnovljivih izvora energije.

Sve više stručnjaka širom sveta vodonik smatra istinskim gorivom budućnosti. Vodonik se kondenzuje na $-252,77\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Specifična težina tečnog vodonika je 71 g/L, što mu daje najveću gustinu energije po jedinici mase između svih goriva i nosača energije: 1 kg vodonika sadrži energije koliko 2,1 kg prirodnog gasa ili 2,8 kg nafte. Ova karakteristika napravila je od vodonika gorivo koje se koristi u pogonu i za snabdevanje svemirskih brodova energijom. Za razliku od ostalih goriva, poput nafte, prirodnog gasa i uglja, vodonik je obnovljiv i netoksičan kada se koristi u gorivnim ćelijama. Vodonik ima veoma veliki potencijal kao ekološki prihvatljivo gorivo i u smanjenju uvoza energetskih resursa [1].

Budućnost ekonomije zasnovane na vodoniku predstavlja vodonik kao nosač energije u okviru sigurnog i održivog energetskog sistema.

II TEHNOLOGIJA PROIZVODNJE VODONIKA IZ BIODIZELA POSTUPKOM PARNOG REFORMINGA

Proizvodnja vodonika se uglavnom vrši centralizovano u namenskim pogonima pretežno reforming procesom prirodnog gasa vodenom parom u velikim količinama, centralnim proizvodnim pogonima.

Biodizel, koji je metil estar masne kiseline (FAME), proizveden iz reakcije transesterifikacije biljnog ulja uz pomoć metanola, je potencijalno obećavajuća sirovina za distributivnu proizvodnju vodonika (DHG) uz pomoć postupka parnog reforminga [2]. Biodizel je obnovljivi izvor koji ne zagađuje okolinu, pa je ovako dobijen vodonik praktično obnovljivo gorivo. Osim toga, biodizel karakteriše malo prisustvo sumpora, što ga čini povoljnom sirovinom za primene u katalitičkim procesima, jer je poznato da je sumpor snažan katalizatorski otrov.

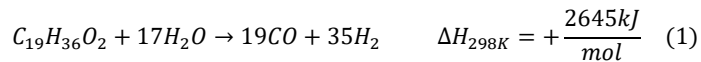
Poslednjih godina izrađeno je nekoliko eksperimentalnih studija koje su razjasnile proces parnog reforminga biodizela. U okviru studije [2] sprovedena su istraživanja čiji je glavni akcenat stavljen na pronalaženje odgovarajućih uslova rada za parni reforming biodizela. Stabilan sastav proizvedenog gasa postignut je sa preko 100 sati trajanja procesa upotrebom katalizatora na bazi plemenitih metala, primenom malih masenih protoka i dovoljno visoke ulazne temperature katalizatora veće od 750°C. Prethodna parametarska studija otkrila je štetan uticaj niskih ulaznih temperatura katalizatora zbog efekta koksiranja. Što se tiče minimalno dozvoljenog koeficijenta odnosa količine pare i ugljenika (S/C), pokazuje se da se stabilni radni uslovi sa potpunom konverzijom biodizela mogu postići pri koeficijentima S/C od samo 2 (S/C=2).

U okviru istraživanja [2], predložen je novi koncept prerađivača goriva zasnovan na potpuno integrisanom toplotnom sistemu parnog izmenjivanja biodizela. Sistem za proizvodnju vodonika zasnovan na sirovinskom biodizelu analiziran je primenom komercijalnog softvera Aspen Plus.

Metodologija koja je predstavljena u ovom radu je izvod preuzet iz rada [2], u kojem se mogu naći detaljnija objašnjenja. Kao model supstance za biodizel odabran je metil-oleat (C₁₉H₃₆O₂). Smatra se da je metil-oleat pogodna referentna supstanca za modeliranje parnog reforminga biodizela, jer je molarni odnos C:H:O veoma sličan biodizelu (C_{18,3}H_{34,8}O₂).

Parni reforming metil-oleata može se opisati pomoću tri linearno nezavisne hemijske jednačine, i to reakcija parnog reforming

(SR) jednačina (1), reakcija izmenjivanja voda-gas (WGS) jednačina (2) i reakcija metanacije jednačina (3).

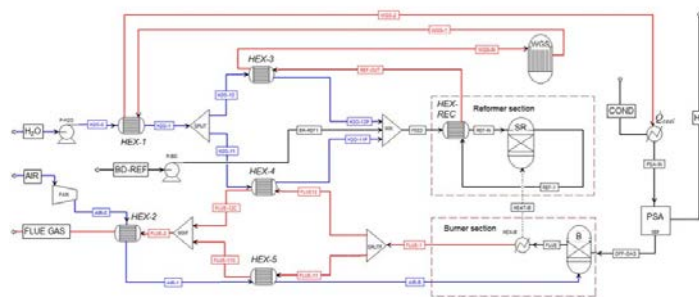


Pored ovih glavnih reakcija, koksovanje katalizatora može se desiti u postojećim realnim uslovima pri niskim temperaturama reforminga, niskim koeficijentima odnosa S/C i visokim ulaznim brzinama masenog protoka. Termodinamički se ne očekuje stvaranje koksa pri koeficijentima S/C većim od 2, čija stvarna vrednost zavisi od uslova rada izmenjivača.

III OPIS SISTEMA DISTRIBUIRANE PROIZVODNJE VODONIKA IZ BIODIZELA PARNIM REFORMINGOM

U ovom radu je dat prikaz sistema za distribuiranu proizvodnju vodonika od 50 Nm³/h iz biodizela parnim reformingom sa integrisanim sistemom grejanja je predstavljen na slici 1, [2]. Ovakav sistem je pogodan za instalacije na postojećim benzinskim pumpama. Model se sastoji od parnog reformera (SR), reaktora za pomeranje vodenog gasa (WGS reaktor), jedinice za adsorpciju promenljivog pritiska (PSA unit) i gorionika (B).

Cilj je bio da se eliminiše potreba za dvostrukim gorionikom i da se smanji potrošnja biodizela za obezbeđivanje dodatne toplote za parni izmenjivač. Pokazano je da se toplota za parno izmenjivanje može obezbediti isključivo sagorevanjem otpadnih gasova iz jedinice za apsorpciju (PSA).



Slika 1. Toplotno integrisani sistem za proizvodnju vodonika od 50 Nm³/h, zasnovan na parnom reformingu biodizela [2]

Efikasnost toplotnog sistema definisana je na sledeći način:

$$\eta_{Syst} = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot LHV_{H_2}}{\dot{m}_{BD-REF} \cdot LHV_{BD-REF} + \dot{m}_{BD-B} \cdot LHV_{BD-B}} \quad (4)$$

Gde su: LHV - niža toplotna vrednost; $\dot{m}_{H_2} = (dm/dt)_{H_2}$ - maseni protok proizvedenog vodonika; $\dot{m}_{BD-REF} = (dm/dt)_{BD-REF}$ - maseni protok biodizela do reformera; $\dot{m}_{BD-B} = (dm/dt)_{BD-B}$ - maseni protok biodizela do gorionika.

Za dati sistem, brojilac jednačine (4) je konstanta, jer je proizvodnja vodonika fiksirana na 50 Nm³/h. Tako se, efikasnost toplotnog sistema može izračunati na osnovu zahtevanog biodizela za reforming i gorionik. Dodatna potreba za

električnom energijom P_{el} je potrebna za hlađenje izlaznog toka iz WGS reaktora na potrebnu ulaznu temperaturu PSA jedinice, kao i za napajanje pumpi za biodizel i vodu i za ventilator. Gubici toplote i pritiska se mogu zanemariti.

Kao jedan od bitnih parametara za efikasnost rada sistema pokazao se pritisak u sistemu. Izvršena je analiza na $S/C=5$ promenom pritiska sistema od 6 bar do 13 bar. Povećanjem pritiska, efikasnost proizvodnje vodonika, definisana jednačinom (4), se povećava sa 53,9%, koliko se imala na 6 bar, do 62,4% na 13 bar, što se uglavnom pripisuje poboljšanoj PSA-efikasnosti koja rezultira smanjenom količinom biodizela dovedenog u izmenjivač (m_{BD-REF}). Uprkos blagom povećanju potrebnog masenog protoka biodizela do gorionika m_{BD-REF} , ukupna potrošnja goriva smanjena je sa 26,4 kg/h na 22,8 kg/h. Očigledno je primena visokog pritiska korisna za dati sistem generisanja H_2 , uključujući PSA jedinicu.

Dobija se maksimalna teorijska neto efikasnost H_2 od 78,2%. Utroši se 18,79 kg/h biodizela da bi se proizvelo 50 Nm^3/h (4,436 kg/h) vodonika. Sistem radi pri koeficijentu S/C od 2,53, čime se eliminiše potreba za dodatnim snabdevanjem gorionika biodizelom. Potražnja za endotermnom toplotom za parni reformer (47,6 kW) se obezbeđuje tako što gorionik koristi PSA otpadni gas. Sistem proizvodi 5,391 l/h vodonika pri pritisku dovoda od 10 bar (što odgovara 50 Nm^3/h H_2 pod standardnim uslovima).

Proces parnog reforming procesa proizvodnje vodonika iz biodizela se može opisati sledećom hemijskom jednačinom:



Datoj jednačini odgovara jednačina masenog bilansa:

$$m_{BD} + m_{H_2O} = m_{CO} + m_{H_2} \quad (6)$$

Kao zaključak može da se izvede da se od 100 kg biodizela, postupkom parnog reforming bez gubitaka, dobija približno 24 kg vodonika, uz potrošnju vode od približno 104 kg i dobijenog ugljenmonoksida od približno 180 kg.

IV MODEL ZA EKONOMSKU ANALIZU PROIZVODNJE VODONIKA IZ BIODIZELA PARNIM REFORMINGOM

U prvom koraku izračunata je ukupna kapitalna investicija (TCI), koja je obuhvatila troškove opreme i kapitalne zahteve za ugradnju jedinica, instrumentaciju i kontrolu, sistem cevovoda, električne sisteme i nepredviđene slučajeve. Efekti skaliranja i krive iskustva, inflacija, pritisak i materijalni faktori su uzeti u obzir kao što je prikazano u jednačini (7).

$$EC_n = EC_{ref} \cdot \left(\frac{s}{s_{ref}}\right)^d \cdot \left(\frac{CEPCI_{2014}}{CEPCI_{ref}}\right) \cdot F_{pre} \cdot F_{mat} \cdot (1-L)^{\log_2(n)} \quad (7)$$

$$TCI = \sum_{i=1}^m EC_i \cdot (1 + \sum_{j=1}^5 F_{eco,j}) \quad (8)$$

gde su: EC_n - troškovi opreme za n -tu proizvedenu jedinicu. EC_{ref} i s_{ref} su troškovi opreme i kapacitet referentne komponente, d je faktor skaliranja, $CEPCI$ - indeks troškova korišćenog postrojenja za hemijsko inženjerstvo, F_{pre} i F_{mat} su opcioni pritisak i materijalni faktori. L je iskustvena stopa i n ukupan broj proizvedenih izmenjivačkih jedinica. Za iskorišćenu tehnologiju pretpostavljena je stopa iskustva između 10% i 20%, što znači da se jedinični troškovi proizvodnje smanjuju za 10% do 20%, kada

se ukupan obim proizvedenih jedinica udvostruči. Ukupni kapitalni troškovi izračunati su prema jednačini (8).

Zahtevi za troškove ugradnje opreme, instrumentacije i upravljanja, sistema cevovoda i električnih sistema uzeti su u obzir množenjem troškova kupljene opreme unapred definisanim faktorima odnosa $F_{eco,j}$. Anuitetna metoda amortizacije korišćena je za izračunavanje godišnjih kapitalnih zahteva.

V STRUKTURA TROŠKOVA PROIZVODNJE VODONIKA IZ BIODIZELA

Operativni troškovi sastoje se od troškova za biodizel i komunalne usluge (električna energija, napojna voda). Godišnji troškovi održavanja, osiguranja, poreza i obrtnog kapitala su pretpostavljeni u odnosu na kapitalnu investiciju (TCI): 4,5%, 2% i 10%, respektivno. Troškovi rada procenjeni su pretpostavljajući 300 radnih sati godišnje uz bruto troškove rada od 37,32 €/h. Svi relevantni parametri za tehnološko-ekonomsku procenu dati su u tabeli 1.

Tabela 1. Relevantni parametri za tehnološko-ekonomsku procenu proizvodnje vodonika iz biodizela [2]

Specifikacije postrojenja i cene komunalnih usluga	Jedinica	Ekonomski faktori		
Životni vek postrojenja: 20	godina	Kamatna stopa:	7	% na TCI
Sati punog opterećenja: 8640	h/godišnje	Faktor instalacije:	25	% EC
		Instrumentacija i kontrola:	22	% EC
Ukupni broj radnih sati godišnje: 300	h/godišnje	Sistem cevi:	5	% EC
Bruto troškovi rada: 37,32	€/h	Električni sistem:	10	% EC
		Nepredviđeni troškovi:	16	% EC
Cena el. energije: 0,139	€/kWh	Održavanje:	4.5	% TCI
Cena vode: 1,71	€/m ³	Osiguranje i porezi:	2	% TCI
Cena biodizela (sa porezima): 1,36	€/l	Obrtni kapital	10	% TCI

Neto troškovi proizvodnje vodonika (NPC) su izračunati na osnovu optimizovanog reformer koncepta prikazanog na slici 1 i ekonomskih faktora i pretpostavki predstavljenih u tabeli 1. Za prvu proizvodnu reforming jedinicu, ukupni troškovi opreme iznose 442 031 €. Najskuplja oprema je reformer biodizela zajedno sa instaliranim gorionikom i PSA jedinicom, što otprilike respektivno iznosi 45,8% , 18,7% i 18,0%, od ukupnih troškova opreme.

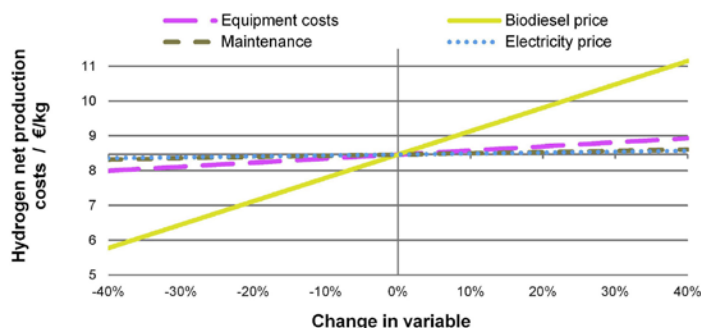
Na osnovu godišnjih zahteva za kapitalnim troškovima i tržišnih cena sirovina, komunalnih usluga i troškova rada u Nemačkoj u 2014. godini, procenjeni su ukupni troškovi proizvodnje vodonika od 10,58 €/kg H_2 , od toga, troškovi biodizela čine više od 63% NPC-a. Godišnji kapitalni troškovi su druga najveća stavka troškova, s tim što udeo od 17,83% kapitalnih troškova nema bitan uticaj na NPC u poređenju sa cenom biodizela. Troškovi rada, poreza i osiguranja imaju mali efekat na troškove proizvodnje vodonika. Relativno visoka tržišna cena biodizela je rezultat uzimanja u obzir poreza (akciza). U nekim evropskim zemljama vodonik i sirovine koje se koriste u njegovom

proizvodnom procesu su neoporezivi, pa posledica toga, značajno su niži troškovi proizvodnje vodonika.

VI ANALIZA OSETLJIVOSTI

Uticaj tri najvažnije stavke troškova na NPC (cena biodizela, godišnji kapitalni troškovi i troškovi održavanja), kao i cena električne energije, razmatraju se u analizi osetljivosti. Naročito se cene biodizela mogu vremenom značajno razlikovati usled globalnih promena cena nafte ili zakonskih i fiskalnih okvirnih uslova. Urađena je analiza osetljivosti za 25-tu proizvedenu izmenjivačku jedinicu pretpostavljajući stopu iskustva od 20%. Počevši od početnog NPC-a od 8,46 €/kg, troškovi i cene su varirani u rasponu od +/- 40%. Rezultati su predstavljeni na slici 2.

Variranje cene biodizela znatno utiče na troškove proizvodnje vodonika i iznosi 5,77 €/kg za 40% nižu cenu od bazne, odnosno 11,15 €/kg za 40% višu tržišnu cenu, respektivno. Variranje troškova opreme ima značajno niži uticaj sa NPC-om u rasponu od 8 do 8,93 €/kg. S obzirom da je tačnost procene troškova opreme unutar ±30%, analiza NPC ukazuje da bi za ove granične vrednosti troškovi proizvodnje vodonika bili u rasponu između 8,1 i 8,81 €/kg. Troškovi održavanja i električne energije zanemarljivo utiču na troškove proizvodnje vodonika.



Slika 2. Rezultati analize osetljivosti 25-te jedinice [2]

Kao zaključak može se reći da je cena biodizela dominantna u proceni troškova proizvodnje vodonika. Na osnovu slike 2. može se zaključiti da cena vodonika dobijenog iz biodizela praktično linearno zavisi od cene sirovine, odnosno biodizela. Ta zavisnost se može iskazati sledećom relacijom:

$$C_{H_2} \left(\frac{\text{EURO}}{l} \right) \approx 5 * C_{BD} \left(\frac{\text{EURO}}{l} \right) + 1,7 \quad (9)$$

Gde je C_{H_2} specifična cena vodonika, a C_{BD} je specifična cena biodizela sa uključenim porezima. Relacija (9) je izvedena pod pretpostavkom kapitalnih troškova koji odgovaraju 25. instaliranoj jedinici.

VII PERSPEKTIVE I USLOVI KONKURENTNOSTI VOZILA SA VODONIČNIM GORIVNIM ČELIJAMA

Razvoj automobilske industrije i generalno transporta ljudi i roba je okrenut ka elektrifikaciji i dekarbonizaciji zbog problema zagađivanja životne sredine i iscrpljenosti fosilnih goriva. Međutim, u tehnološkom pogledu postoji nekoliko međusobno konkurentnih smernica daljeg razvoja. U studiji [3] izvršena je tehno-ekonomska analiza pet tehnologija vozila i to:

- Vozila sa unutrašnjim sagorevanjem (eng. *Internal combustion engine vehicle* – ICEV)
- Hibridna električna vozila (eng. *Hybrid electric vehicles* - HEV),
- Hibridna električna vozila sa punjenjem (eng. *Plug-in hybrid electric vehicles* - PHEV),
- Električna vozila sa baterijama (eng. *Battery electric vehicles* - BEV).
- Električna vozila sa gorivnim ćelijama (eng. *Fuel cell electric vehicle*- FCEV).

U tabeli 2. prikazani su ključne karakteristike za analizirane tipove vozila prema podacima iz 2017. godine. Oznake u tabeli imaju sledeće značenje: MSRP (*manufacturer's suggested retail price*) - preporučena proizvođačka cena električnog vozila u maloprodaji.

Kao što se može videti iz tabele 2, u svetu je još uvek dominantna prodaja vozila sa unutrašnjim sagorevanjem. Za analiziranu kategoriju modela tipa *Sedan* srednje veličine, u 2017. godini je prodato oko 17 miliona vozila ICEV, oko 100000 BEV i isto toliko PHEV, oko 400000 HEV, dok je prodaja vozila sa gorivnim ćelijama (FCEV) bila svega 2300. Ipak, očekuje se da će razvoj tehnologije gorivnih ćelija za vozila i pad cene vodonika u budućnosti ovu kategoriju vozila učiniti vrlo konkurentnom električnim vozilima sa baterijama.

Tabela 2. Poređenje vozila sa različitim tehnologijama pogona, zasnovano na limuzini srednje veličine (poreski kredit nije uračunat) [3]

	ICEV	HEV	PHEV	BEV	FCEV
Ekonomija goriva (km/litri)	10,63-14,88	17,01-21,26	46,77-55,27 (Elek.)	46,77-55,27 (Elek.)	27,63-31,89
Domet (km)	~804,67	~804,67	~804,67	193,12-402,34	~563,27
MSRP (\$)	20-30k	25-35k	30-40k	30-50k	55-60k
Ukupna godišnja prodaja ¹	~17 miliona	~400.000	~100.000	~100.000	~2.300

¹(zasnovano na podacima o prodaji vozila iz 2017-te godine <https://afdc.energy.gov/data/>)

U tabeli 3. prikazane su očekivane karakteristike i specifične cene ključnih komponenata u vozilima sa različitim tehnologijama za 2035.

Kao glavni ekonomski pokazatelj za procenu konkurentnosti vozila uzet je parametar svedenih troškova vlasnika vozila (*CVO* - *cost of vehicle ownership*), koji su računati prema sledećem modelu:

$$CVO = \frac{VPP + F - R}{S} \quad (10)$$

gde su: VPP maloprodajna cena vozila u 2018. (*vehicle purchase price in 2018*) izražena USD, S - je ukupni put koji je prešlo vozilo u toku životnog veka izražen u kilometrima.

Tabela 3. Prognozirane karakteristike vozilima sa različitim tehnologijama za 2035. godinu [3]

Tehnologija	Jedinice	Scenario 2035.		
		Usporeni	Bazni	Ubrzani
Kretanje troškova pre marže na malo				
Sistemiški troškovi gorivnih ćelija	\$/kW-net	40,3	33,9	30,3
Troškovi rezervoara vodonika	\$/kWh	11,7	9,5	8,2
Troškovi baterija	\$/kW	28,0	25,0	20,0
Cena motora	\$/kW	8	7	6
Specifična snaga				
Specifična snaga gorivnih ćelija	W/kg	659	680	740
Gustina energije baterije	kWh/kg	0,15	0,16	0,20
Specifična snaga motora	W/kg	1700	1750 ⁵	1800
Drugi trendovi				
Gustina energije rezervoara vodonika	kWh/kg	1,6	1,8	2,3
Pik efikasnosti gorivne ćelije	%	60	62	65
Atkisonova pik efikasnost	%	41	45	47
Gliderevo smanjenje mase	%	15,1	29,8	38,3

Na osnovu podataka iz *The Transportation Energy Data Book*, u studiji je uzeto da je $S=113.858$ km za eksploatacioni period od 5 godina, odnosno $S=347.660$ km, za eksploatacioni period od 15 godina. Pretpostavljeno je da vozila svih analiziranih tipova pogona prelaze isti put u projektovanom eksploatacionom veku. R - je ostatna vrednost vozila nakon završetka eksploatacionog veka. Pretpostavljeno je da ostatna vrednost pada na $R=0$ nakon 15 godina eksploatacije, odnosno da iznosi 38,2% od VPP nakon 5 godina eksploatacije.

F - su ukupni troškovi za gorivo za period eksploatacije od $n=5$ ili 15 godina, koji su diskontovani sa stopom od 7%. Ovi troškovi su računati prema jednačini (11):

$$F = \sum_{n=1}^{n=5(15)} \frac{p_e^n \cdot S_n}{FE \cdot (1+0,07)^{n-1}} \quad (11)$$

gde je p_e^n specifična cena energije u n -toj godine izražena USD/jedinici energije, na primer za električno vozilo to je USD/kWh, USD/litra za vozila na benzin, odnosno USD/kg za vozila na vodonik. Specifični troškovi su procenjeni na osnovu efikasnosti konverzije pojedinih energenata. S_n put koji je prešlo vozilo u n -toj godini eksploatacije. Svi proračuni su bazirani na

modelu *Toyota Camry*, kao popularnog automobila srednje klase i veličine, uz pretpostavku da je realizovan sa različitim pogonom. Pri čemu je pretpostavljeno da vozilo za sve analizirane pogone zadržava slične performanse (ubrzanje do 96,56 km/h, autonomiju i slično) kod svih pet analiziranih pogona.

U tabeli 4. prikazani su rezultati sprovedenih analiza u kojima su komparativno prikazani podaci o performansama i ekonomskim pokazateljima za test vozilo pogonjeno različitim tehnologijama. Estimacije su urađene za 2035. godinu.

Na osnovu tri analizirana scenarija: bazni, usporeni i ubrzani, procenjene su tehničke performanse i ekonomski parametri za pet tehnologija vozila u budućnosti. Prema sprovedenim analizama, FCEV mogu potencijalno biti konkurentni po pitanju troškova i imati uporedive performanse čak i sa vozilima sa motorima sa unutrašnjim sagorevanjem (ICEV).

U scenarijima do 2035. godine, petogodišnji troškovi vlasništva nad FCEV-om su oko 36% veći od troškova za ICEV, (22% veći za 15-godišnji period vlasništva vozila). S obzirom da vozila sa unutrašnjim sagorevanjem nisu perspektivna zbog ekologije i vrlo je izvesno da će njihova upotreba u budućnosti biti opterećena visokim ekološkim taksama ili će biti potpuno zabranjena, bitnije je poređenje FCEV i njima konkurentnih BEV. Sprovedene analize pokazuju da će već 2035. godine troškovi vlasništva FCEV biti oko 15% niži od BEV-a (12% niži za eksploatacioni vek od 15 godina). Pokazuje se da je cena vodonika presudna za određivanje konkurentnosti troškova FCEV-a. Projekcije cene vodonika na stanicama su oko 6 USD po kg u 2035. godini.

Tabela 4. Uporedna analiza performansi i ekonomskih pokazatelja za vozila različitih tehnologija u 2035. godini [3]

Tehnološki rezultati scenarija 2035					
	ICEV	HEV	PHEV	BEV	FCEV
2035 Usporeni scenario					
Ekonomija goriva (km/litra)	12,33	19,56	37,84	28,91	35,29
0-60 mph / vreme (s)	8,3	8,3	8,3	8,1	8,3
Snaga motora/gorivne ćelije (kW)	131	104	55	-	117
Snaga motora (kW)	-	30	107	200	167
Domet (km)	482,80	489,24	1161,95	321,87	452,23
Masa (kg)	1649	1801	2088	2598	2181
Kapacitet baterije (kWh)	-	1,3	23	86	22
2035 Bazni scenario					
Ekonomija goriva (km/litra)	13,6 ¹	20,41	48,89	34,44	37,84
0-60 mph / vreme (s)	8,3	8,3	8,3	8,3	8,3
Snaga motora/gorivne ćelije (kW)	116	92	44	-	95

Snaga motora (kW)	-	30	100	148	145
Domet (km)	482,80	492,46	1298,74	321,87	455,44
Masa (kg)	1439	1590	1860	2197	1872
Kapacitet baterije (kWh)	-	1,3	22	77	22
2035 Ubrzani scenario					
Ekonomija goriva (km/litri)	14,03	21,26	52,72	35,71	40,39
Ubrzanje 0-60 mph/s	8,3	8,3	8,3	8,2	8,3
Snaga motora/gorivne ćelije (kW)	108	83	39	-	84
Snaga motora (kW)	-	30	94	142	130
Domet (km)	482,80	474,76	1512,78	323,48	450,62
Masa (kg)	1318	1466	1712	1931	1666
Kapacitet baterije (kWh)	-	1,3	21	73	22

VIII TEHNOLOGIJE VODONIČNIH GORIVNIH ĆELIJA ZA POGON ELEKTRIČNIH VOZILA

Tehnologije gorivnih ćelija za primenu u električnim vozilima se intenzivno razvijaju. Kao perspektivna tehnologija za ovu primenu najbolje se pokazala gorivna ćelija sa propusnom membranom za protone (PEMFC). One rade na niskim temperaturama od oko 100 °C, ali takođe i na temperaturama od 150-200°C. Ove gorivne ćelije koriste elektrolit od polimera koji ima ulogu propusne membrane za protone, dok se zbog relativno niske temperature koristi platina kao katalizator. Koliko je intenzivan razvoj gorivnih ćelija u automobilske industriji pokazuje podatak koji je izneo Daimler. Od 2010. do 2017. godine, dakle za samo 7 godina razvoja, postignuta je manja masa gorivne ćelije za 30%, upotreba platine je smanjena čak 90%, a da su pritom postignute značajno bolje karakteristike u pogledu radnih performansi gorivnih ćelija.

Analizirajući energetske efikasnost celokupnog procesa konverzije biodizela u vodonik i vodonika u električnu i mehaničku energiju za pogon vozila, može se zaključiti da je ovaj proces efikasniji od tradicionalnih motora sa unutrašnjim sagorevanjem. Efikasnost reforming procesa proizvodnje vodonika iz biodizela je, pri optimalnim uslovima, oko 78%, efikasnost savremenih tehnologija gorivnih ćelija ide do 60%, dok je efikasnost elektromehaničke konverzije u električnim motorima sa pretvaračima oko 90%.

IX ZAKLJUČAK

U naučnim krugovima postoje intenzivne aktivnosti ka promovisanju vodonika kao goriva budućnosti. Jedna od perspektivnih primena vodonika jeste u automobilske industriji. Cena vodonika je presudni faktor da bi troškovi vlasništva FCEV postali konkurentni nad ostalim tehnologijama pogona vozila sa sličnim tehničkim performansama. U ovom radu dat je pregled

tehnologije proizvodnje vodonika parnim reforming postupkom. Pokazano je da tehnologija proizvodnje vodonika iz biodizela, na postojećem nivou može obezbediti troškove od 7 – 9 €/kg. Usporedna ekonomska analiza vozila različitih kategorija, koja je sprovedena u studiji [3], pokazuje da će već 2035. godine troškovi vlasništva vozila sa gorivnim ćelijama biti oko 15% niži od troškova vozila sa baterijama, dok će u 2050. ova razlika biti još veća, kao rezultat jačeg napretka u proizvodnji i isporuci gorivnih ćelija i vodonika. Pokazuje se da je cena vodonika presudna za određivanje konkurentnosti troškova vozila sa gorivnim ćelijama. Projekcije cene vodonika na stanicama su oko 6 USD/kg u 2035. godini i 2,5 USD/kg u 2050. godini. Ovi ciljevi cena vodonika su presudni da bi se troškovi vlasništva vozila sa gorivnim ćelijama postali konkurentni nad ostalim tehnologijama pogona vozila sa sličnim tehničkim performansama.

Kao generalni zaključak vezan za tehnološke i političke perspektive električnih vozila, nameće se utisak da je interes automobilske industrije i globalne energetske politike da se razvijaju paralelno tehnologije vozila sa baterijama i vodoničnim gorivnim ćelijama, kako bi se stvorila zdrava tehnološka konkurencija, koja bi permanentno doprinosila razvoju oba koncepta i boljoj geopolitičkoj stabilnosti u pogledu sirovinskih baza potrebnih za razvoj automobilske industrije u budućnosti.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao u toku izrade elaborata *Tehno-ekonomska analiza proizvodnje vodonika iz biodizela i njegove upotrebe za proizvodnju električne energije u gorivnim ćelijama za pogon električnih vozila* koji je rađen za potrebe firme Makpetrol d.o.o. Beograd kojoj dugujemo posebnu zahvalnost.

LITERATURA

- [1] Felseghi, R.A., Carcadea, E., Raboaca, M.S., Trufin, C.N., Filote, C. Hydrogen Fuel Cell Technology for the Sustainable Future of Stationary Applications, *Energies*, Vol 12, Issue 23, pp. 4593, 2019. <https://doi.org/10.3390/en12234593>
- [2] Martin, S., Albrecht, F.G., van der Veer, P., Liefink, D., Dietrich, R.U. Evaluation of on-site Hydrogen generation via steam reforming of biodiesel: Process optimization and heat integration, *International journal of hydrogen energy* Vol. 41, No. 16, pp. 6640-6652, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.02.138>
- [3] Yuche, C., Marc, M. Model-based techno-economic evaluation of fuel cell vehicles considering technology uncertainties, *Transportation Research Part D 74: Transport and Environment*, Vol. 74, pp. 234–244, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.002>
- [4] Tehno-ekonomska analiza proizvodnje vodonika iz biodizela i njegove upotrebe za proizvodnju električne energije u gorivnim ćelijama za pogon električnih vozila, elaborat, Makpetrol d.o.o. Beograd 2021.

AUTORI

dr Iva Batić - naučni saradnik, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, iva@etf.rs

dr Željko Đurišić - vanredni profesor, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, djurisic@etf.rs

mr Miroljub Babić - direktor, Makpetrol D.O.O. Beograd, miroljub.babic@makpetrol.rs

Uticaj programirane promene faznog stava struje na specifičnu silu cilindričnih linearnih motora sa stalnim magnetima

Influence of a Programmed Change of the Current Phase Angle on Specific Force of Tubular Permanent Magnet Linear Motors

Žarko Koprivica, Dragan Mihić

Energetski pretvarači i pogoni, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

Rezime - Cilindrični linearni motori sa stalnim magnetima su zbog svojih istaknutih osobina sve više zastupljeni u oblastima gde se tradicionalno koriste hidraulični i pneumatski aktuatori. U ovom radu je predložen metod koji se bazira na programiranoj promeni faznog stava struje u cilju ostvarenja veće specifične sile. Predloženi metod uzima u obzir uticaj zasićenja na elektromagnetsku interakciju i oblik struja. Simulacioni rezultati su dobijeni korišćenjem metode konačnih elemenata. Ovakav način određivanja faznog stava se može primeniti na sve mašine sa stalnim magnetima kod kojih je izraženo zasićenje magnetskog kola.

KLjučne reči - Cilindrični linearni motori sa stalnim magnetima, specifična sila, metod konačnih elemenata, zasićenje magnetskog kola

Abstract - Due to their prominent properties, tubular permanent magnet linear motors are increasingly being employed in areas in which hydraulic and pneumatic actuators are traditionally used. In order to achieve the highest possible specific force, a method based on a programmed change of the phase angle is proposed. The proposed method takes the influence of the magnetic circuit saturation on the electromagnetic interaction and current form. Simulation results are obtained using the finite element method. This method of determining the phase angle can be applied to all machines with permanent magnets in which the saturation of the magnetic circuit is pronounced.

Index Terms - tubular permanent magnet linear motors, specific force, finite element method, saturation of magnetic circuit

I UVOD

Hidraulični i pneumatski aktuatori su veoma zastupljeni u robotici, avio i auto industriji. Oni imaju svoje nedostatke kao što su ograničena radna temperatura fluida, kontaminacija fluida i opasnost od curenja i gubitka pritiska u sistemu. Zbog toga postoji sve veća potreba da se oni zamene elektromehaničkim aktuatorima [1]-[3]. U tu svrhu se koriste cilindrični linearni motori sa stalnim magnetima (CLMSM). Prednosti CLMSM u odnosu na hidraulične i pneumatske

aktuatoru su veća efikasnost, jednostavnija kontrola pogonske sile, preciznije pozicioniranje i veća pouzdanost [4].

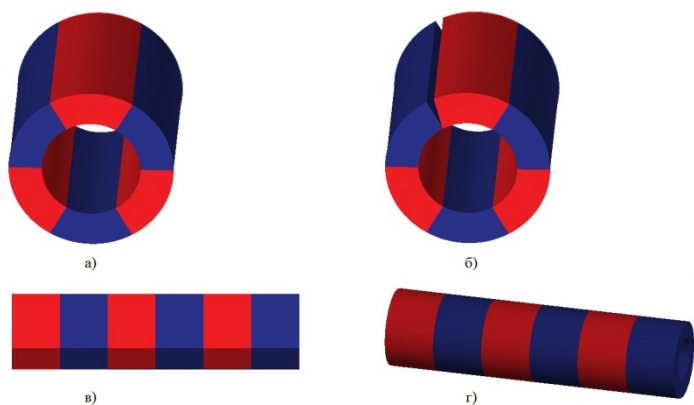
U cilju postizanja što veće specifične sile, predložene su razne metode uglavnom bazirane na modifikaciji geometrije motora kao što su optimizacija odnosa unutrašnjeg i spoljašnjeg prečnika statora [4], optimizacija jarma [5], optimizacija zupca [6], optimizacija oblika magneta [7] i optimizacija montaže stalnih magneta na translatoru [8]-[9]. Navedene metode uglavnom usložnjavaju geometriju i poskupljuju proces proizvodnje.

U ovom radu je prikazan način uvećanja specifične sile koji se bazira na programiranoj promeni faznog stava struje. Proračun sile se vrši korišćenjem softverskog paketa FEMM (Finite Element Method Magnetics) [10] koji se bazira na metodi konačnih elemenata. Konstrukcija i princip rada CLMSM-a su prikazani u drugom poglavlju. U trećem poglavlju je izvršeno modelovanje CLMSM-a i analiza magnetskog polja. U četvrtom poglavlju je predložen način uvećanja specifične sile. Zaključci su izvedeni u petom poglavlju.

II KONSTRUKCIJA I PRINCIP RADA CLMSM-A

CLMSM su električni motori čija konstrukcija proizilazi iz konvencionalnih sinhronih motora sa stalnim magnetima. Postupak dobijanja CLMSM-a od obrtne mašine se može objasniti misaonim eksperimentom. Rotor sinhronog motora se zaseče po uzdužnoj osi, zatim se ispruži, i na kraju zavije po poprečnoj osi u cilindar kao što je prikazano na slici 1. Na taj način, stalni magneti formiraju naslagane prstenove naizmeničnog polariteta [11]. Stator CLMSM-a se sastoji iz cirkularnih (kružnih) namotaja smeštenih u žlebove magnetskog kola koji su poluzatvorenog oblika. Ovakva konstrukcija je izabrana jer umanjuje komponentu valovitosti sile koja je posledica interakcije između stalnih magneta na translatoru i zubaca magnetskog kola statora [12].

Na stator CLMSM-a dovodi se simetričan trofazni sistem napajanja. On stvara raspodelu magnetskog polja koja se translatorno pomera. Međusobnim delovanjem ovog polja i polja stalnih magneta generiše se linijska pogonska sila koja deluje na translator.



Slika 1. (a) Rotor sinhronog motora sa stalnim magnetima (b) rotor sinhronog motora sa stalnim magnetima sa malim zasekom (v) razvijeni rotor sinhronog motora – translator planarnog linearnog motora sa stalnim magnetima (g) translator cilindričnog linearnog motora sa stalnim magnetima.

III MODELOVANJE CLMSM-A METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Pošto je CLMSM osnosimetričan, njegov 2D model u programu FEMM je predstavljen polovinom poprečnog preseka motora, slika 2. Dimenzije motora izražene u milimetrima su date na slici 3. Stator sadrži dvanaest žlebova. Translator je tri puta duži od statora kako bi se eliminisale privlačne sile između krajeva translatora i krajeva magnetskog kola statora. Svaki fazni namotaj motora se sastoji od 30 provodnika, pri čemu je pozitivan smer motanja “u papir”, a negativan “van papira”. Pored toga, za svaki deo mašine su dodeljeni odgovarajući materijali, definisani su granični uslovi kao i mreža konačnih elemenata koja je prikazana na slici 4.

Električni period translatora jednak je dužini jednog para polova $2\tau = 39.6\text{mm}$. U slučaju kada se fazni stav struje menja linearno, tada pomeraju translatora od 2τ odgovara promena faznog stava struje statora za 360° . Saglasno slici 3, površina poprečnog preseka namotaja je $S = 27.6\text{mm} \times 5.8925\text{mm} = 162.633\text{mm}^2$. Imajući u vidu da je tipična vršna vrednost gustine struje kod sinhronih mašina sa stalnim magnetima $J_{\max} = 10\text{A/mm}^2$ [13],

nominalna struja motora je $I_{\text{nom}} = J_{\max} \cdot S / (30\sqrt{2}) = 38.33\text{A}$.

Struje statora su date izrazima:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{\text{nom}} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{i \cdot \varphi}, I_b = I_{\text{nom}} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{i \cdot (\varphi - 120^\circ)}, \\ I_c &= I_{\text{nom}} \cdot \sqrt{2} \cdot e^{i \cdot (\varphi - 240^\circ)}, \end{aligned} \quad (1)$$

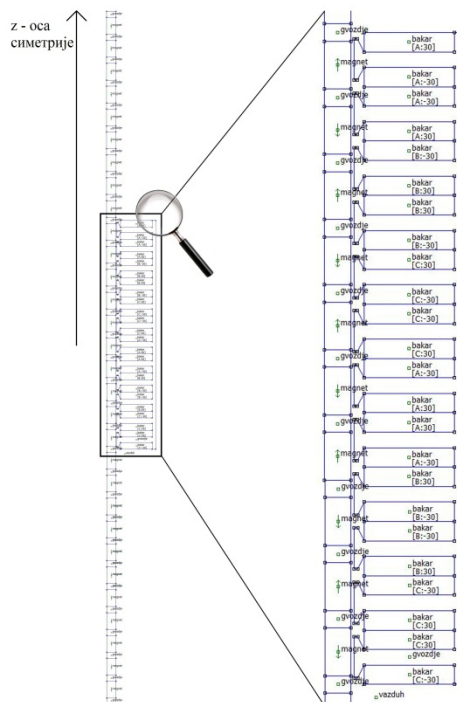
dok se fazni stav koji se menja linearno definiše kao

$$\varphi = \frac{-z}{39.6\text{mm}} + \varphi_0, \quad (2)$$

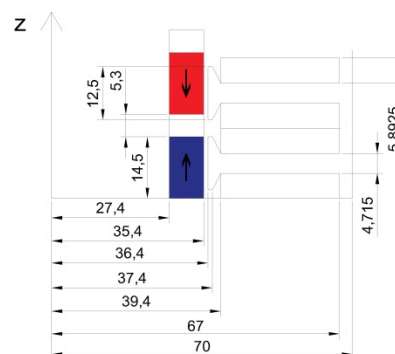
gde je φ_0 početna faza. Predznak minus je posledica toga što se za pozitivnu učestanost napajanja translator kreće u negativnom smeru z ose. Početna faza je određena tako da se ostvari maksimalna pogonska sila za položaj $z = 0$.

Slike 5 i 6 prikazuju raspodelu linija magnetskog fluksa i magnetske indukcije, respektivno. Na osnovu raspodele magnetske indukcije može se uočiti da delovi magnetskog kola mašine ulaze u zasićenje, što je prvenstveno izraženo u zupcima.

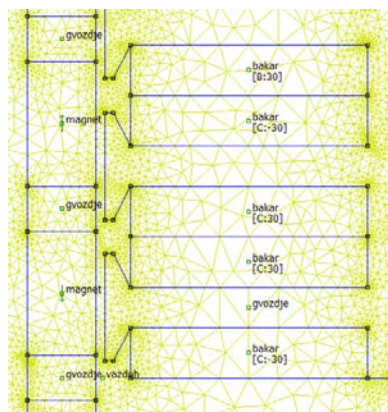
Ova pojava ima direktan uticaj na oblik sile, njenu vrednost i valovitost.



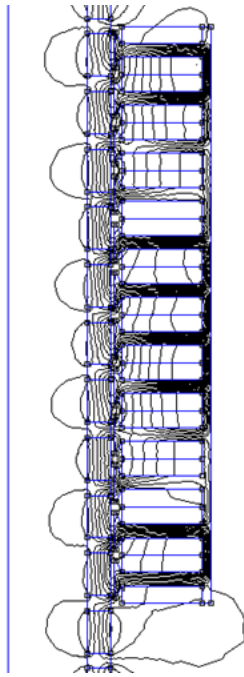
Slika 2. Model motora u programu FEMM



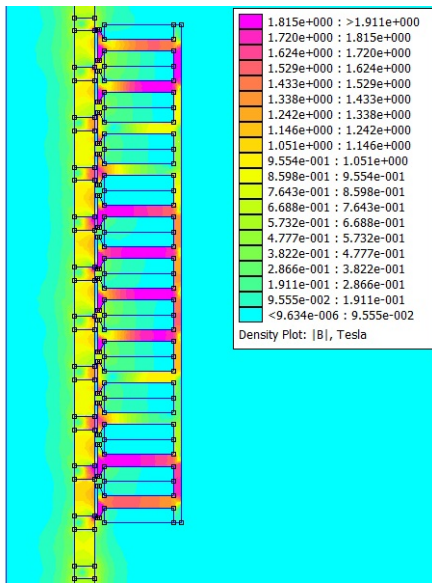
Slika 3. Dimenzije motora



Slika 4. Podela domena na konačne elemente



Slika 5. Raspodela linija fluksa



Slika 6. Raspodela inteziteta magnetske indukcije

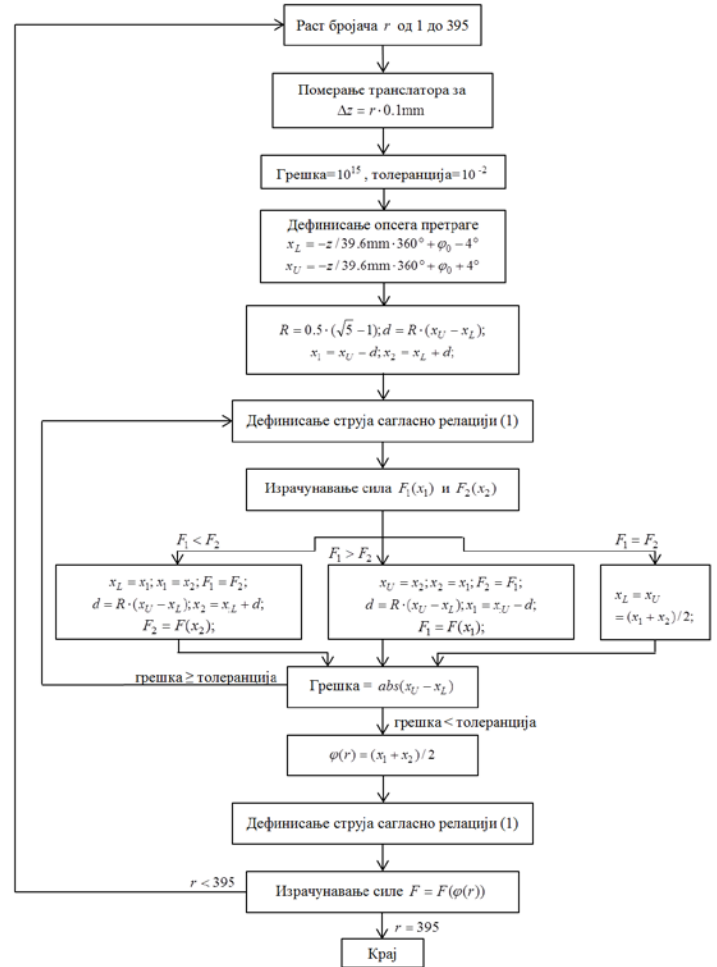
IV PREDLOŽENI NAČIN UVEĆANJA SPECIFIČNE SILE

Kao što je već rečeno, linearna promena faznog stava struje podrazumeva da se on menja saglasno relaciji (2). U cilju uvećanja specifične sile predlaže se programirana promena faznog stava struje. Ovaj pristup se zasniva na određivanju faznog stava struje tako da se za svaki položaj translatora postigne maksimalna pogonska sila. U primenjenom algoritmu određivanje faznog stava se vrši podelom opsega pretrage zlatnim presekom. Za određeni položaj translatora, opseg pretrage je:

$$\text{Opseg} = [-z/39.6\text{mm} \cdot 360^\circ + \varphi_0 - 4^\circ, -z/39.6\text{mm} \cdot 360^\circ + \varphi_0 + 4^\circ]. \quad (3)$$

Usvojeni opseg je rezultat pretpostavke da maksimalna apsolutna razlika faznih stavova kod predloženog metoda i linearnog pristupa ne prelazi 4° . Izborom šireg opsega se ne utiče na rezultat, dok se vreme simulacije uvećava.

Na slici 7 je prikazan algoritam na kojem se bazira predloženi način uvećanja specifične sile. U svakom koraku simulacije se vrši pomeraj translatora za $\Delta z = 0.1\text{mm}$. Pošto je period translatora 39.6mm potrebno je izračunati silu u 396 tačaka. U početnom položaju vrednost sile je ista kao kod linearne promene faznog stava i zato brojač raste do 395.

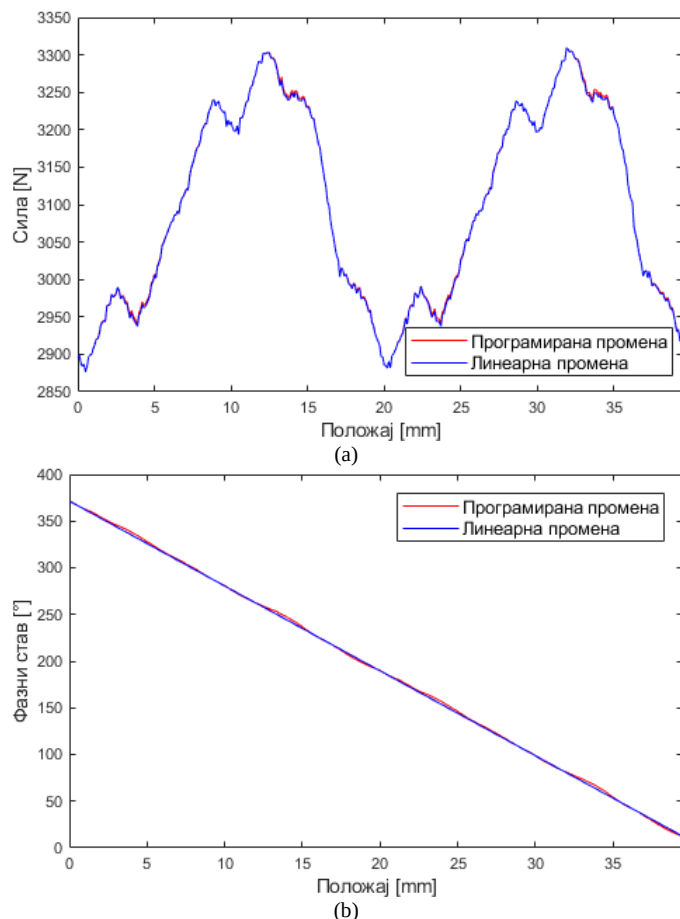


Slika 7. Algoritam na kojem se bazira predloženi način uvećanja specifične sile

Nakon definisanja greške i tolerancije, definiše se opseg pretrage saglasno relaciji (3). Pravilom zlatnog preseka, unutar opsega se određuju dve tačke x_1 i x_2 . U tim tačkama se izračunavaju sile i te vrednosti se porede. Nove granice pretrage se određuju u zavisnosti od odnosa dobijenih sila. Greška se izračunava kao apsolutna razlika granica opsega. Ukoliko je nova greška manja od tolerancije, fazni stav se računa kao aritmetička sredina x_1 i x_2 , a ako nije manja postupak se ponavlja. Zatim se izračunava vrednost sile za optimalnu vrednost faznog stava. Postupak se ponavlja dok brojač ne dostigne krajnju vrednost.

Poređenje simulacionih rezultata programiranog i linearnog određivanja faznog stava je prikazano na slici 8. Kao što se može

videti na slici 8(a) postoji velika bliskost ostvarenih sila. Međutim, generisana sila je veća u slučaju predloženog pristupa za svaki položaj translatora. Odgovarajuća srednja vrednost sile je 3098.6N, dok je u slučaju linearne promene ostvarena vrednost 3097.57N. Slično kao za pogonsku silu, između faznih stavova postoji velika sličnost, što se uočava na slici 8(b). Maksimalna razlika faznih stavova za isti položaj translatora je 3.3° , čime se potvrđuje opravdanost izbora opsega pretrage.



Slika 8. (a) Zavisnost sile od položaja sa linearnom i programiranom promenom faznog stava struje (b) zavisnost faznog stava od položaja sa linearnom i programiranom promenom faznog stava struje

Posmatrajući sliku 8(a) može se uočiti izražena valovitost sile. Ona je uglavnom posledica privlačne sile između magneta na translatoru i zubaca magnetskog kola statora. Kada se translator pomera duž z ose, raspodela linija polja se menja, pa se magnetsko kolo statora drugačije zasićuje. Zbog te nelinearnosti se fazni stav ne menja linearno sa promenom položaja ukoliko se želi ostvariti maksimalna pogonska sila u svakom položaju. Predloženi metod to uzima u obzir i na taj način se postiže veća specifična sila. Kao što se može videti ne postoji značajno uvećanje srednje vrednosti sile, ali predloženi metod pokazuje unapređenje u odnosu na klasičan način promene faznog stava.

V ZAKLJUČAK

U ovom radu je prikazan način uvećanja specifične sile CLMSM-a metodom koji se bazira na programiranoj promeni faznog stava struje. Pokazano je da zasićenje magnetskog kola ima direktan uticaj na optimalni fazni stav struje. Predloženi metod se može primeniti u slučajevima kada nije bitno brzinu održavati konstantnom, već je bitno ostvariti što veću pogonsku silu.

LITERATURA

- [1] Wu, Y.C., Cirolini, M., Hayashi, T.C., Ziemniczak, A., Perondi, E.A., Eckert, P.R. Multiphysics analysis of tubular linear permanent magnet synchronous motor operating immersed in crude oil, in Proc. *12th International Symposium on Linear Drives for Industry Applications (LDIA)*, Neuchatel, Switzerland, 1-3 July 2019. <https://doi.org/10.1109/ldia.2019.8770982>
- [2] Lee S., Kim, W.J. Active suspension control with direct-drive tubular linear brushless permanent-magnet motor, *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, Vol. 18, No. 4, pp. 859–870, 2010. <https://doi.org/10.1109/tcst.2009.2030413>
- [3] Bol, E.D. Investigation of linear motors as electric actuators for aircraft, *Boeing Technical Journal*, 2018.
- [4] Bianchi N., Bolognani, S., Corte, D., Tonel, F. Tubular linear permanent magnet motors: An overall comparison, *IEEE Transaction Industri Application*, Vol. 39, No. 2, pp. 466–475, 2003. <https://doi.org/10.1109/tia.2003.809444>
- [5] Basak A., Flores Filho A.F. Design optimisation of a novel slotless linear stepping motor, in Proc. *7th International Conference on Electrical Machines and Drives, ICEMD*, Durham, UK, pp. 368–372, 11-13. September 1995.
- [6] Commings, P., Moscrop, J., Cook, C. Novel tooth design for a tubular linear motor for machine tool axis, in Proc. *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM)*, Istanbul, Turkey, pp. 660–665, 13-15. April 2011. <https://doi.org/10.1109/icmech.2011.5971198>
- [7] Wang, Q., Chen, Y., Guo, Y., Zhang, J., Li, Y. Performance modeling and analysis of a doubly yokeless permanent magnet linear motor with improved thrust force quality, *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 160586–160594, Nov. 2019. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2950951>
- [8] Wang, J., Howe, D., Lin, Z. Comparative studies on linear motor topologies for reciprocating vapour compressors, in Proc. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Antalya, Turkey, pp. 364–369, 3-5. May 2007. <https://doi.org/10.1109/iemdc.2007.382694>
- [9] Tavana N.R., Dinavahi, V. Design of slotted permanent magnet linear synchronous motor for improved thrust density, in Proc. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, Chicago, pp. 1225–1228, 12-15. May 2013. <https://doi.org/10.1109/iemdc.2013.6556289>
- [10] Meeker, D.C. *Finite Element Method Magnetics, Version 4.2*, 2018.
- [11] 4020 and 5020 High Performance Linear Servomotor Technical Data Sheet, Moog Inc., Elma, NY, 2017. <https://www.moog.com/literature/MCG/LinearServoMotorDtS.pdf> [pristupljeno 15.01.2021]
- [12] Zhu, Y.W., Koo, D.H., Cho, Y.H. Detent force minimization of permanent magnet linear synchronous motor by means of two different methods, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 44, No. 11, pp. 4345–4348, 2008. <https://doi.org/10.1109/tmag.2008.2001320>
- [13] Hendershot, J.R., Miller, T.J.E. *Design of brushless permanent-magnet machines*, Motor Design Books LLC., USA, 2010.

AUTORI

Žarko Koprivica, mast. inž. el. i rač., Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, kopri@etf.rs

doc. dr Dragan Milić, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, dragan84m@etf.bg.ac.rs

Mogućnost korišćenja toplotnih pumpi sa otpadnom toplotom iz postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda kao toplotnim izvorom

Possibilities for Utilization of Waste Heat from Wastewater Treatment Plants by Heat Pumps

Dejan Ivezić, Marija Živković, Aleksandar Madžarević, Boban Pavlović

Univerzitet u Beogradu – Rudarsko-geološki fakultet

Rezime - U narednom periodu se planira izgradnja nekoliko desetina sistema za prečišćavanje otpadnih voda u većim gradovima u Srbiji. Iskustva iz postrojenja koja su trenutno u radu, pokazuju da bi prečišćena otpadna voda, s obzirom na protok i temperaturu, mogla da predstavlja značajan izvor obnovljive energije. U radu su prikazani primeri dobre prakse korišćenja ove energije u sistemima daljinskog grejanja u zemljama Evropske unije. Analiziran je rad postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda u Šapcu i razmotrena je mogućnost njegovog korišćenja u sistemu daljinskog grejanja.

Ključne reči – toplotna pumpa, sistem daljinskog grejanja, postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda

Abstract - In the next period, it is planned to build several wastewater treatment systems in major cities in Serbia. Experiences from the facilities currently in operation show that treated wastewater (taking into consideration available flow and temperature) could be a significant source of renewable energy. The paper presents examples of good practice in the use of this energy source by heat pumps in district heating systems in the EU countries. The operation of the wastewater treatment plant in the city of Šabac was analysed and the possibility of its use in the local district heating system was considered.

Index terms - heat pump, district heating systems, wastewater treatment plant

I UVOD

Toplotna pumpa je uređaj koji toplotu prenosi sa toplotnog rezervoara niže temperature (toplotni izvor) na rezervoar više temperature (toplotni ponor), a za prenos toplote se najčešće koristi mehanički rad (rad kompresora) [1]. Primena toplotnih pumpi za grejanje i hlađenje prostora, pripremu sanitarne tople vode i za različite industrijske primene je danas uobičajena. Osnovna pretpostavka za korišćenje toplotnih pumpi je postojanje toplotnog izvora relativno stabilne (nepromenljive) temperature. Kao toplotni izvori se uobičajeno koriste vazduh, voda, zemlja ili različiti izvori otpadne toplote.

Smatra se da će sistemi daljinskog grejanja i toplotne pumpe integrisane u centralizovane sisteme imati značajnu ulogu u

snabdevanju toplotnom energijom u budućnosti [2]. Procenjuje se da se oko 25% toplotne energije, u sistemima daljinskog grejanja u Evropskoj uniji (EU), može proizvesti korišćenjem velikih toplotnih pumpi [3]. Voda iz kanizacionih sistema i postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda je trenutno najčešći toplotni izvor koji koriste velike toplotne pumpe u sistemima daljinskog grejanja u EU [4].

U Srbiji postoje značajni, lokalno dostupni izvori energije: komunalni otpad, otpadna toplota iz postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda (PPOV), otpadna toplota iz industrijskih postrojenja, koja se u urbanim sredinama mogu iskoristiti jedino u sistemima daljinskog grejanja (SDG). Nijedan od pomenutih izvora energije se u Srbiji ne koristi [5].

Međutim, postoje planovi [6] da se u svim naseljima u Srbiji, koja su veća od 2.000 ekvivalentnih stanovnika (ES), do 2041. godine izgrade PPOV, a može se usvojiti da je rentabilno i prihvatljivo da gradovi sa preko 50.000 ES imaju anaerobnu digestiju i proizvodnju biogasa. U tom smislu se može prihvatiti da će ova postrojenja u srednjoročnom periodu predstavljati značajan potencijal za korišćenje i proizvodnju energije, između ostalog i putem toplotnih pumpi.

Kao ilustracija mogućnosti korišćenja energetskeg potencijala PPOV putem toplotnih pumpi, u radu su prikazani primeri iz nekoliko zemalja EU. Dati su kratki opisi postrojenja, osnovne tehničke karakteristike i ostvareni rezultati rada. Primeri su izabrani tako da karakteristike SDG i PPOV budu uporedivi sa sistemima u Srbiji. Na osnovu prikazanih primera dobre prakse, analiziran je rad PPOV u Šapcu i razmotrena je mogućnost njegovog korišćenja u sistemu daljinskog grejanja

II TOPLOTNE PUMPE U SISTEMIMA DALJINSKOG GREJANJA - PRIMERI DOBRE PRAKSE U EU

Temperature niskotemperaturnih izvora, na kojima se bazira rad toplotnih pumpi u zemljama EU, su u opsegu od 5° do 40°C. Najzastupljeniji toplotni izvor u zemljama EU su trenutno komunalne otpadne vode sa oko 30%, a 25% čini otpadna industrijska toplota i toplota dimnih gasova, dok oko 25% toplotnih izvora čine energija mora, reke ili jezerske vode [3]. Prema raspoloživim podacima, u sisteme daljinskog grejanja integrisano je 112 toplotnih pumpi u 13 evropskih država (Tabela

1). Najčešće se u sistemima daljinskog grejanja danas u Evropi koriste toplotne pumpe pojedinačne snage 5-20 MW_{TH}, dok prosečna snaga iznosi 11 MW_{TH} [4].

Tabela 1. Velike toplotne pumpe u SDG [3]

Država	Ukupna snaga (MW _{th})	Broj postrojenja	Broj jedinica
Norveška	84,5	8	15
Švedska	1.022,3	13	43
Danska	45	9	11
Finska	154,6	4	9
Italija	36,6	5	9
Švajcarska	35,4	9	13
Austrija	10,1	2	3
Litvanija	15	1	1
Slovačka	1,8	1	1
Češka	6,4	1	1
Poljska	3,7	1	2
Francuska	5,5	2	3
Holandija	1,2	1	1

U nastavku su prikazani reprezentativni primeri korišćenja toplotnih pumpi koje otpadnu vodu koriste kao izvor toplote.

Primer 1: Stokholm, Švedska [7]

Toplana „Hammarbyverket” se nalazi u južnom delu Stokholma i igra važnu ulogu u daljinskom grejanju grada. Toplana je u radu od 1986. godine. Toplotne izvore u toplani čine 7 toplotnih pumpi (225 MW), dva električna kotla (80 MW) i dva kotla na biodizel (200 MW). Prve četiri toplotne pumpe instalirane su 1986. godine, peta 1991. godine, a preostale dve 1997. godine. Od 1998. godine, dve toplotne pumpe se koriste i u sistemu daljinskog hlađenja (23 MW). Godišnje, ovaj sistem proizvede 1.235 GWh energije.

Za rad toplotnih pumpi koristi se toplota otpadne vode koja se doprema iz PPOV „Henriksdals”. Temperatura otpadne vode je između 7 i 22°C, dok je temperatura vode u napojnoj mreži daljinskog grejanja 70-80° C. Protok otpadne vode je u opsegu od 4,000 do 18,000 m³/h. Zbog dnevnih varijacija u protoku, koriste se dva skladišta vode zapremine po 2.400 m³.

Ovaj projekat integracije toplotnih pumpi u SDG doveo do značajnih pozitivnih efekata u pogledu smanjenja štetnog uticaja na životnu sredinu, odnosno smanjenja emisija i to: CO₂ - 60%, SO_x - 95% i NO_x - 80%.

Primer 2: Turku, Finska [8]

Turku je treći grad po veličini i predstavlja centar jugozapadnog dela Finske. Postrojenje za prečišćavanje otpadne vode je počelo sa radom 2009. godine. Postrojenje sa dve toplotne pumpe je instalirano ispod zemlje u naselju Kokola u okviru postrojenja za prečišćavanje otpadnih voda. Snaga toplotnih pumpi za grejanje

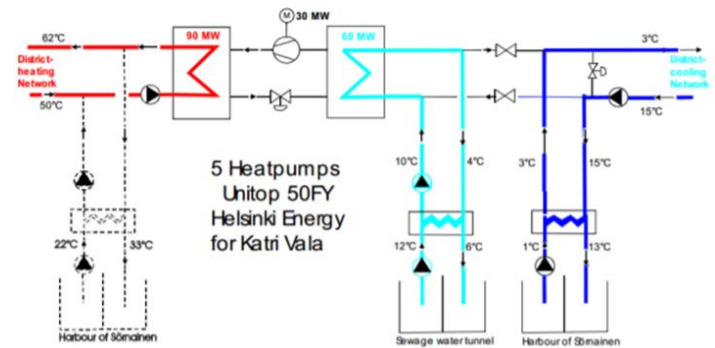
je 21,2 MW, a u režimu hlađenja 15,3 MW. COP sistema je u opsegu od 3,6 do 3,8.

Mreža daljinskog grejanja ima temperaturu vode u napojnom vodu 82°C. Temperatura povratne vode iz sistema daljinskog grejanja je oko 40°C. Minimalna temperatura otpadne vode iz postrojenja za prečišćavanje otpadne vode je 4°C, a maksimalna 18°C. Da bi se balansiralo oscilovanje u dnevnom protoku daljinskog sistema za hlađenje, pored postrojenja sa toplotnim pumpama je locirano skladište zapremine 15.000 m³.

Postrojenje u Turku godišnje proizvede 302 GWh toplotne energije - što je dovoljno za 24.000 stanovnika, ili 8% stanovnika na području sa kog se generiše otpadna voda. Toplotna energije dobijena radom toplotnih pumpi je uglavnom zamenila upotrebu nafte i uglja, pa se procenjuje da je time smanjena godišnja emisija gasova staklene bašte za 150.000 t CO₂.

Primer 3: Helsinski, Finska [9]

Helsinki, glavni grad Finske, sa više od 600.000 stanovnika, ima SDG od 1953. godine. Sistem je zasnovan na kogeneraciji u kojoj se toplota dobija sagorevanjem uglja i prirodnog gasa. Međutim, sve veći udeo energije u sistemu daljinskog grejanja i hlađenja zasnovan je na resursima koji bi inače bili neiskorišćeni. U tom cilju je 2006. godine u postojeći sistem integrisano pet toplotnih pumpi, pojedinačnog kapaciteta 16,80 MW, koje pokrivaju 4% ukupne potrebne toplotne energije u mreži i 33% ukupnog rashladnog opterećenja. Kanalizaciona otpadna voda temperature 10°C, koristi se za zagrevanje povratnog toka vode u SDG sa 50°C na 62°C (Slika 1). COP sistema iznosi 3,51.



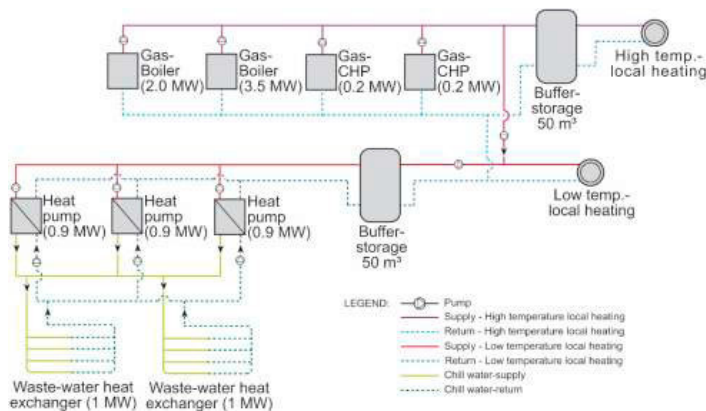
Slika 1. Shematski prikaz rada sistema u Helsinkiju

Rad ovih postrojenja je obezbedio nižu cenu toplotne energije u poređenju sa gasnim kotlovima (CHP postrojenjem), veću energetska efikasnost u proizvodnji toplotne energije i smanjenje upotreba uglja. Emisija GHG gasova je smanjena za 12,80%.

Primer 3: Štuttgart, Nemačka [10]

Novi poslovno-stambeni kompleks „Neckarpark“ u Štuttgartu zauzima površinu od 22 ha. Otpadna toplota iz kanalizacije će se koristiti za grejanje i hlađenje oko 70.000 m² prostora uz pomoć toplotnih pumpi. U tu svrhu konstruisani su razmenjivači toplote dužine 1 km koji su postavljeni ispod kanalizacionog kolektora. Maksimalan protok vode je 2.500 l/s, a najniži 200 l/s. Najniža temperatura vode u kanalizacionoj mreži je 6 °C.

Mreža daljinskog grejanja je podeljena na 4 voda (Slika 2). Dva voda snabdevaju potrošače toplom vodom temperature 75°C (napojni vod). Temperatura vode u povratnom vodu je 50°C. Druga dva voda su sa temperaturom od 43°C (napojni vod) i 28°C (povratni vod). Niskotemperaturni režim rada se obezbeđuje uz pomoć tri toplotne pumpe ukupne snage 2,6 MW. Toplota iz visokotemperaturnog voda može biti prenet na niskotemperaturni vod. Daljinski sistem grejanja je povezan sa CHP postrojenjem (0,4 MW_{th} i 0,2 MW_{el}) i gasnim kondezacionim kotlovima (5,5 MW) koji se uključuju u slučaju vršnog opterećenja.



Slika 2. Shema sistema daljinskog grejanja/hlađenja

Planirano je da Stambeni kompleks bude opremljen PV solarnim panelima kako bi se u radu toplotne pumpe povećao udeo obnovljivih izvora energije.

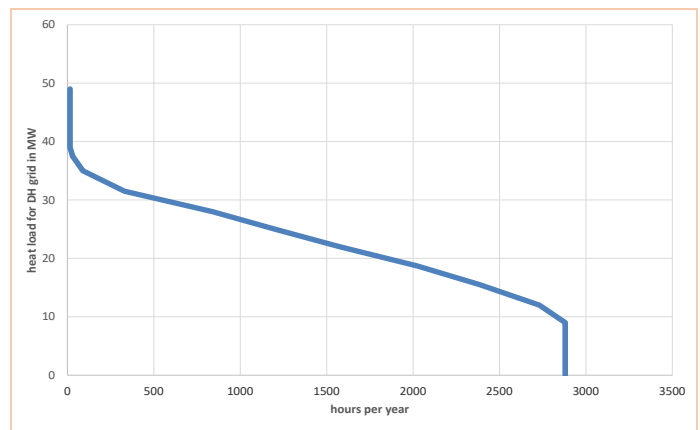
III SISTEM DALJINSKOG GREJANJA U ŠAPCU

JKP "Toplana-Šabac" zagreva više od 7.500 domaćinstava i više od 500 komercijalnih objekata. Ukupna zagrevana površina je 473.000 m², pri čemu površina koja se greje u domaćinstvima iznosi oko 374.000 m², dok je površina u komercijalnim zgradama oko 99.000 m². Ukupna dužina mreže sistema daljinskog grejanja je oko 23 km. Prosečna potrošnja prirodnog gasa iznosi oko 7 miliona m³ godišnje [11].

Uobičajeno vreme zagrevanja je 16 sati dnevno u periodu od 5 do 21 sata, osim u toku tzv. "ledenih dana" (prosečne dnevne temperature u rasponu od -3°C do -18°C) kada sistem daljinskog grejanja radi 24 sata dnevno. Prosečan broj radnih sati toplane tokom grejne sezone iznosi 3.000 sati. Kada dnevne temperature prelaze 14°C, sistem grejanja prekida rad [12].

Broj stepen - dana za Šabac i njegovo klimatsko područje je 2.588. Grad Šabac u proseku u grejnoj sezoni ima 181 dan grejanja sa prosečnom srednjom temperaturom u grejnom periodu od 5.7 °C [13].

Kriva opterećenja u sistemu daljinskog grejanja je prikazana na Slici 3 [11]. Analizom krive toplotnog opterećenja može se uočiti da je moguće ostvariti oko 2800 radnih sati pri toplotnom opterećenju do 9 MW, tj. oko 2700 sati rada pri toplotnom opterećenju od 10 MW. U Šapcu trenutno ne postoji centralni sistem za pripremu sanitarne vode niti centralni sistemi za hlađenje prostora u postojećim zgradama.



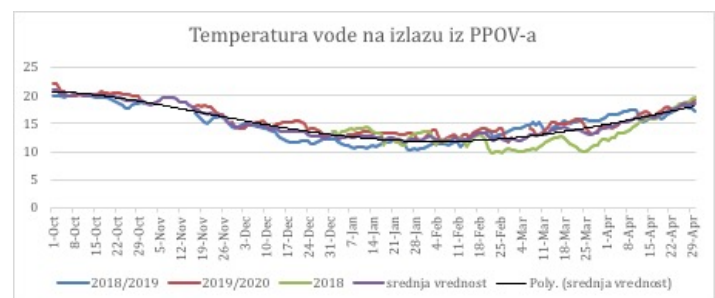
Slika 3. Kriva godišnjeg opterećenja SDG u Šapcu [11]

Kriva opterećenja u sistemu daljinskog grejanja je prikazana na Slici 3 [11]. Analizom krive toplotnog opterećenja može se uočiti da je moguće ostvariti oko 2800 radnih sati pri toplotnom opterećenju do 9 MW, tj. oko 2700 sati rada pri toplotnom opterećenju od 10 MW. U Šapcu trenutno ne postoji centralni sistem za pripremu sanitarne vode niti centralni sistemi za hlađenje prostora u postojećim zgradama.

IV PPOV U ŠAPCU

PPOV u Šapcu je izgrađeno 2017. godine. Otpadne vode koje nastaju na području Šapca su po svom poreklu većim delom komunalne, a manjim delom industrijske otpadne vode i vode od infiltracije. Tehnologija prečišćavanja otpadnih voda u okviru postrojenja obuhvata primarni (fizički) tretman, sekundarni (biološki) tretman i tretman mulja.

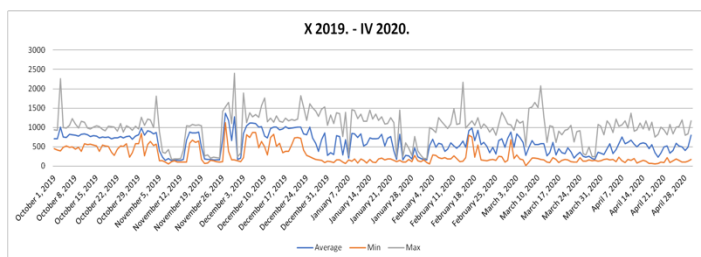
S obzirom na količinu i temperaturu prečišćene vode, ona predstavlja značajan, niskotemperaturni energetska izvor. Na Slici 4 su prikazane temperature vode na mestu ispusta u Savu za period januar-april 2018. godine i period grejnih sezona (od oktobra do aprila) 2018/2019 i 2019/2020. Temperatura vode direktno zavisi od spoljašnje temperature i u slučaju najnižih zabeleženih spoljašnjih temperatura u razmatranom periodu ne pada ispod 9°C.



Slika 4. Temperatura vode na izlazu iz PPOV Šabac (°C)

Za razliku od temperature vode na ispustu, koja je zavisna od temperature spoljašnjeg vazduha i relativno predvidiva, protok vode karakteriše značajno veća nepredvidljivost. Na Slici 5, prikazan je protok na mestu ispusta u Savu za period grejne sezone 2019/2020. Uočava se da je na dnevnom nivou promena

protoka značajna. Prosečan odnos časovnog maksimalnog i minimalnog protoka tokom dana, za razmatrani period iznosi 3,1, ali u pojedinim danima je ovaj odnos je bio i veći od 5, a u ekstremnim slučajevima i veći od 10.



Slika 5. Protok vode na izlazu iz PPOV Šabac (m³/h)

Srednja vrednost protoka u periodu od početka rada postrojenja iznosi 606,2 m³/h, sa prosečno najvećim protokom tokom marta (695 m³/h), a najnižim tokom januara (488 m³/h). Tokom meseci, protok najviše varira u januaru, kada odnos najvišeg i najnižeg srednjeg dnevnog protoka iznosi 3,1, dok su najmanje promene protoka zabeležene tokom oktobra, kada ovaj odnos iznosi 2,4.

V OČEKIVANI EFEKTI PRIMENE TOPLOTNE PUMPE

Stohastičnost protoka, kao i promenljivost temperature, utiču na promenljivost količine energije prečišćene vode, a koja bi se mogla iskoristiti u sistemu sa toplotnom pumpom. Posmatrano po mesecima, prosečna snaga toplotnog izvora se kreće od 2.836 kW u januaru do 4.038 kW u martu, odnosno nalazi se u opsegu od $\pm 20\%$ od srednje vrednosti (3.518 kW). Odnos između maksimalne i minimalne raspoložive snage tokom meseca je u opsegu od 2,5 do 3. Ovo je određeno za prosečnu vrednost potoka, prosečni minimum i prosečni maksimum, uz pretpostavljeni pad temperature prečišćene vode na isparivaču toplotne pumpe od 5°C.

Gruba analiza sprovedena u [5, 14] je pokazala, ukoliko bi se instalirala toplotna pumpa snage 7,2 MW, sa usvojenim koeficijentom grejanja 3, da bi takvo postrojenje moglo da obezbedi do 32,5% godišnjih potrebe za toplotnom energijom u SDG u Šapcu. S druge strane, ukoliko bi ista ta količina toplotne energije bila proizvedena pomoću gasnih kotlova efikasnosti 91%, bilo bi potrebno oko 2,4 miliona m³ prirodnog gasa.

Na osnovu preliminarne podataka dobijenih analizom sprovedenom za Šabac, u [14] su analizirani mogući efekti uvođenja toplotnih u SDG u gradovima u kojima se tek očekuje izgradnja PPOV. Pokazano je da bi se postiglo smanjenje lokalne emisije CO₂ od oko 13%, dok bi ukupno smanjenje ove emisije (uključujući i emisiju pri proizvodnji električne energije) iznosilo oko 4%. Izračunate vrednosti smanjenje direktne emisije CO₂ pokazuju različite efekte u različitim gradovima, što je i očekivano s obzirom na postojeću strukturu korišćenih energenata i veličinu SDG. Tako bi se direktna emisija u Užicu smanjila za oko 43%, u Subotici za 33%, u Beogradu 11%, Novom Sadu 8%, Nišu 17%, itd.

Ekološki efekti primene toplotnih pumpi su vezani i za smanjenje emisije polutanata i to:

- CH₄ - lokalno iz SDG 17%, odnosno 12.5% ukupno ,

- N₂O - lokalno iz SDG 26%, odnosno 0,5% ukupno,
 - NO_x - lokalno iz SDG 15,7%, odnosno 7% ukupno i
 - SO_x - lokalno iz SDG 32%, odnosno 18% ukupno.

VI ZAKLJUČAK

Korišćenje otpadne vode za proizvodnju toplotne energije toplotnim pumpama smanjilo bi korišćenje fosilnih goriva u sistemima daljinskog grejanja. Optimalna snaga toplotne pumpe određuje se za svaki sistem daljinskog grejanja ponaosob i zavisi i od temperature i toplotne snage toplotnog izvora i od režima temperatura u sistemu daljinskog grejanja, kao i baznog opterećenja sistema. Pošto su toplotne pumpe efikasnije kada potrošaču obezbeđuju fluid niže temperature, razmatranje uvođenja toplotnih pumpi treba da bude usmereno na područja na kojima su mali toplotni gubici i niža temperatura povratne vode.

Potpuna procena efekta korišćenja energije otpadnih voda putem toplotnih pumpi, mora da obuhvati i raspoloživost električne energije za rad pumpi i strukturu proizvodnje električne energije. Veliki udeo uglja u proizvodnji električne energije u Srbiji čini da se najbolji efekti postižu kada se supstituiše proizvodnja toplotne energije korišćenjem uglja ili mazuta, dok zamena prirodnog gasa kao energenta za proizvodnju toplotne energije toplotnim pumpama nema značajniji pozitivan efekat na smanjenje emisije ugljendioksida. Očekivano veće korišćenje OIE za proizvodnju električne energije će predstavljati bitan stimulans za korišćenje toplotnih pumpi u SDG.

LITERATURA

- [1] Živković, M., Ivezić, D. *Osnove energetike*. Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, 2019.
- [2] Heat Roadmap Europe, <https://heatroadmap.eu/> [pristupljeno 15.01.2021]
- [3] Research Institutes of Sweden (RISE), Heat Pump Centre (2019), Heat Pumps in District Heating and Cooling Systems, Heat Pump Centre, Borås, Sweden, <https://heatpumpingtechnologies.org/publications/heat-pumps-in-district-heating-and-cooling-systems-final-report/> [pristupljeno 15.01.2021]
- [4] David, A., Mathiesen, B.V., Averfalk, H., Werner, S., Lund, H. Heat roadmap Europe: large-scale electric heat pumps in district heating systems, *Energies*, Vol 10, Issue. 4, pp 578, 2017. <https://doi.org/10.3390/en10040578>
- [5] Ivezić, D., Živković, M., Madžarević, A. Efekti potencijalnog korišćenja postrojenja za prerađivanje otpadnih voda kao energetskih izvora u sistemima daljinskog grejanja u Srbiji, in Proc. Zbornik radova sa Stručno-naučna konferencije TOPS 2019, pp. 87-97, Zlatibor, 15-19 maj 2019.
- [6] Uredba o ograničenim vrednostima emisije zagađujućih materija u vodi i rokovima za njihovo dostizanje, Sl. glasnik RS br 67/2011, 48/2012 i 1/2016.
- [7] Heat Pumps in Combination with District Heating Increases Energy Efficiency at Hammarbyverket, IEA Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex47/wp-content/uploads/sites/54/2018/12/annex-47hammarbyverket.pdf> [pristupljeno 17.01.2021]
- [8] Turku Energia – Ecological heating and cooling, https://www.friotherm.se/wp-content/uploads/sites/4/2017/11/E11-15_Turku-Energia.pdf; <https://econetgroup.fi/en/references-slamek/turku-wastewater-treatment-plant-finland> [pristupljeno 17.01.2021]
- [9] Heat Pumps in District Heating: Case Studies, Department of Energy & Climate Change, UK https://www.gshp.org.uk/pdf/DECC_Heat_Pumps_in_District_Heating_Case_studies.pdf [pristupljeno 17.01.2021]
- [10] Erhorn, H., Görres, J., Illner, M., Bruhn, J.-P. „NeckarPark Stuttgart“: District heat from wastewater, *Energy Procedia*, Vol 149, pp. 465-472, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.211>

- [11] Doczekal, C., Rajaković, N., Batas Bjelić, I., Jerotić, S. Heating/cooling demand and technical concept for district heating/cooling in Šabac, In *H2020: Market uptake of small modular renewable district heating and cooling grids for communities*, Project No. 691679, 2018.
- [12] JKP „Toplana Šabac“, <https://toplanasabac.rs/> [pristupljeno 20.01.2021]
- [13] BIZEE, *Degree Days - Custom Degree Day Data*, 2018, <https://www.degree-days.net> [pristupljeno 20.01.2021]
- [14] Istraživanje mogućnosti smanjenja emisije polutanata i ublažavanja uticaja na klimatske promene sistema daljinskog grejanja u Srbiji - Završni elaborat, Rudarsko-geološki fakultet, Ugovor sa Ministarstvom zaštite životne sredine Republike Srbije, 401-00-1207/2018-05, 2018.

AUTORI

dr Dejan Ivezić - redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet, dejan.ivezic@rgf.bg.ac.rs
dr Marija Živković - redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet, marija.zivkovic@rgf.bg.ac.rs
dr Aleksandar Madžarević - docent, Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet, aleksandar.madzarevic@rgf.bg.ac.rs
Boban Pavlović - istraživač pripravnik, Univerzitet u Beogradu - Rudarsko-geološki fakultet, boban.pavlovic@rgf.bg.ac.rs

Analiza zagrevanja bakarnih provodnika sa strujom

Heating Analysis of Copper Conductors with Current

Karolina Kasaš-Lažetić*, Gorana Mijatović*, Dejana Herceg*, Miroslav Prša**

* Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, R. Srbija

** Penzionisan sa Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, R. Srbija

Rezime - U radu je prikazan metod merenja temperature na površi tri bakarna provodnika poprečnih preseka, 4 mm², 6 mm² i 10 mm². Pošto su prethodno određene karakteristike temperaturne sonde, izvršene su serije merenja na konkretnim žičanim pro-vodnicima. Prve dve serije merenja su vršene pomoću generatora vremenski konstantne struje, pri čemu su posmatrana dva slučaja: kada je, tokom merenja, napon na krajevima provodnika održavan konstantnim i kada je, tokom merenja, jačina struje u provodniku održavana konstantnom. Nakon toga su izvršena merenja temperature na površi provodnika za slučaj napajanja provodnika vremenski promenljivom, prostoperiodičnom strujom, opet za dva posebna slučaja: kada je, tokom merenja, efektivna vrednost napona na krajevima provodnika održavana konstantnom i kada je, tokom merenja, efektivna vrednost jačine struje u provodniku održavana konstantnom. Zbog prisustva površinskog efekta, Džulovi gubici su bili veći u slučaju napajanja provodnika vremenski promenljivom strujom, što znači da je porast temperature bio brži i da je, pri istim naponima, odnosno, jačinama struja postizana viša temperatura. Džulovi gubici su bili veći i kada je, tokom merenja, jači-na struje u provodniku održavana konstantnom, kako u slučaju vremenski konstantnog, tako i pri vremenski promenljivom napajanju provodnika. Merenja temperature su vršena u toku 30 minuta, na svake 2 sekunde. Rezultati merenja, su prikazani grafički, vremenskim dijagramima temperature, a grafički je prikazano i poređenje metoda i rezultata svih ispitivanih provodnika.

Ključne reči - Merenje temperature na površi provodnika, konstantan napon/struja, vremenski konstantno/promenljivo napajanje

Abstract - The method for the temperature measurement on the surface of three copper conductors, with cross-sections of 4 mm², 6 mm² i 10 mm², are presented in this paper. After the determination of temperature probe, the series of temperature measurements are performed on chosen wire conductors. The first two series are performed applying DC generator, in two different cases: when, during the measurement the voltage on the conductor's end was held constant and the current inside the conductor was held constant. After that, the temperature measurements on the conductor's surface were performed supplying conductors with AC, time harmonic currents, again in two particular cases: constant RMS voltage value on the

conductor's ends and constant RMS value of current inside the conductor. The measuring results were expected for all four cases and for all three conductors. Due to presence of skin effect, the Joule's losses were higher in the AC cases, meaning that the temperature increase was faster and that the final reached temperature, for the same values of voltage or currents, was higher. It was also demonstrated that the higher Joule's losses appeared when the current was kept constant during the measurements, in both DC and AC supplying. The measurements were performed with the instrument which enabled the results recording on USB stick; hence the measurements duration was 30 minutes, recording result every two seconds. The measuring results were presented graphically, together with graphical presentation of the comparison between methods and the results for all investigated conductors.

Index Terms - temperature measurement on the conductor's surface, dc/ac supplying, constant voltage/current

I UVOD

Bakarni provodnici se, zajedno sa aluminijumskim provodnicima, najčešće koriste u elektroenergetskoj praksi. Usled struja u provodnicima, dolazi do Džulovog efekta, pri čemu se deo električne energije pretvara u toplotu. Samim tim, raste temperatura unutar provodnika i na njegovoj površi, što je uvek ograničavajući faktor u korišćenju provodnika određenog poprečnog preseka.

Rešavanje ovog problema matematičkim putem, bilo da se radi o analitičkim ili približnim metodama, je uvek komplikovan, jer je problem sastavljen od dva dela; određivanja Džulovih gubitaka u svim tačkama provodnika, i određivanja raspodele temperature unutar i na površi provodnika. Osim toga, problem nije linearan, pošto se određene veličine menjaju u toku procesa zagrevanja.

Rezultate proračuna bi svakako trebalo verifikovati, a najpouzdanija verifikacija bi bila merenjem temperature. Zbog toga je odlučeno da se, čak pre samog proračuna, pristupi merenju temperaturne raspodele, kako bi se unapred znalo kakvi rezultati proračuna bi mogli da se očekuju.

Pošto bi rezultati merenja trebalo da posluže samo za poređenje sa rezultatima proračuna, merenje nije zahtevalo neku ekstremno visoku preciznost, tako da nije bilo obavljeno u temperaturno jako stabilizovanom prostoru, niti je bila primenjena automatska

stabilizacija napona ili jačine struje izvora. I pored toga, rezultati merenja daju odličan uvid u događanja unutar i na površi bakarnih provodnika sa strujom.

II TEORIJSKI PRISTUP

U ovom radu su posmatrani cilindrični provodnici od bakra, konstantnog prečnika, koji je mnogo manji od dužine provodnika. Zbog toga, problem može da se definiše kao dvodimenzionalan i da se posmatra u cilindričnom koordinatnom sistemu. Pri tome se osa provodnika poklapa sa z osom usvojenog koordinatnog sistema, a time i vektor gustine struje, kao i vektor jačine električnog polja u provodniku, imaju samo z komponentu,

$$\begin{aligned}\vec{J} &= \vec{i}_z \cdot J_z = \vec{i}_z \cdot J, \\ \vec{E}_{\text{u prov}} &= \vec{i}_z \cdot E_z = \vec{i}_z \cdot E.\end{aligned}\quad (1)$$

Zapreminska gustina snage Džulovih gubitaka u provodniku može da se definiše kao [1]:

$$\frac{dP_j}{dv} = \vec{J} \cdot \vec{E} = JE = \rho J^2 = \sigma E^2 = \frac{1}{\rho} E^2. \quad (2)$$

Važno je napomenuti da u izrazu (2), specifična otpornost ρ i specifična provodnost σ zavise od temperature.

U izrazu (2) može da se uoči i razlika između dva posmatrana slučaja, kada se, tokom merenja održava konstantnom jačina struje, $I = \text{const.}$, i kada se, tokom merenja, napon na krajevima provodnika održava konstantnim, $U = \text{const.}$ U prvom slučaju, kada je jačina struje konstantna ($J = \text{const.}$), zapreminska gustina snage raste tokom vremena, zbog porasta specifične otpornosti usled porasta temperature (temperaturni koeficijent bakra je pozitivan). U slučaju konstantnog napona na krajevima provodnika ($E = \text{const.}$), zapreminska gustina snage opada tokom vremena, zbog povećanja specifične otpornosti materijala pri porastu temperature. Prema tome, može da se očekuje da će brzina porasta temperature u vremenu, kao i konačno dostignuta temperatura, u drugom slučaju imati niže vrednosti.

Za manje promene temperature, promene specifične otpornosti materijala usled temperature, mogu da se izraze jednačinom [2]:

$$\rho_s = \rho_0(1 + \alpha\vartheta), \quad (3)$$

dok, za veći opseg temperature, promena specifične otpornosti može da se prikaže izrazom [2]:

$$\rho_s = \rho_0(1 + \alpha\vartheta + \beta\vartheta^2 + \gamma\vartheta^3). \quad (4)$$

U (3) i (4) su konstante α , β i γ temperaturni koeficijenti za ispitivani materijal (u ovom slučaju bakar), dok je konstanta ρ_0 specifična otpornost materijala na temperaturi 0°C .

U slučaju vremenski promenljivih struja u provodniku, kada je prisutan i površinski efekat, a ponekad i efekat blizine, promena specifične otpornosti u zavisnosti od temperature može da se izrazi kao [3]:

$$\rho_s = \rho_0(1 + \alpha\vartheta)(1 + y_s + y_p). \quad (5)$$

Jednačina (5) može da se napiše i u obliku [4]:

$$\rho_s = k_1 k_2 \rho_0(1 + \alpha\vartheta). \quad (6)$$

U izrazima (5) i (6) konstante y_s i k_1 su koeficijenti koji definišu uticaj površinskog efekta na zavisnost specifične otpornosti materijala od temperature. Koeficijent y_p predstavlja faktor koji uzima u obzir efekat blizine, dok koeficijent k_2 definiše uticaj gubitaka u feromagnetskom materijalu, kada se posmatra alučel uže ($y_{\text{pCu}} = 0$).

Ukupna snaga Džulovih gubitaka može da se izračuna integracijom (2):

$$P_j = \int_V \frac{dP_j}{dv} dv = \int_V JE dv = \int_V \rho J^2 dv = \int_V \sigma E^2 dv, \quad (7)$$

a ukupna energija Džulovih gubitaka u vremenu od $t = 0$, do konačnog vremena, $t = t$, određuje se integracijom (7) po vremenu:

$$W_j = \int_0^t \int_V \frac{dP_j}{dv} dv dt = \int_0^t \int_V \rho J^2 dv dt = \int_0^t \int_V \sigma E^2 dv dt. \quad (8)$$

Raspodela temperature po celoj zapremini provodnika, prouzrokovana zapreminskom gustinom toplotne energije, $\dot{q}_v$, predstavlja rešenje parabolice diferencijalne jednačine [5]:

$$\psi c_p \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla \cdot (k \nabla T) = \dot{q}_v. \quad (9)$$

U izrazu (9) je ψ specifična masa provodnika, k je toplotna provodnost, a c_p je specifični toplotni kapacitet materijala provodnika.

U slučaju vremenski konstantnih struja, problem nije suviše složen. Površinski efekat ne postoji, tako da se struje raspoređuje ravnomerno po poprečnom preseku provodnika; vektor gustine struje je isti u svim tačkama provodnika, pa nema potrebe da se vrši integracija prikazana u (7). Kako su sve veličine vremenski konstantne, nije potrebna ni integracija (8). U tom slučaju i specifična otpornost i otpornost provodnika zavise samo od temperature.

S druge strane, kao što je već napomenuto, pri vremenski promenljivom napajanju provodnika, prisutan je površinski efekat. U slučaju prostoperiodičnog napajanja, površinski efekat može da se opiše izrazom za dubinu prodiranja:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}. \quad (10)$$

Prema izrazu (10), specifična otpornost definiše i dubinu prodiranja, odnosno, izrazitost površinskog efekta. Prema tome, raspodela struje po poprečnom preseku provodnika zavisi i od temperature, preko specifične otpornosti, tako da ceo problem postaje nelinearan. Proces stvaranja raspodele toplote postaje veoma kompleksan i sadrži u sebi velik broj međusobnih uticaja različitih parametara. Na taj način i proračun raspodele temperature u provodniku i na njegovoj površi postaje takođe veoma složen.

Mnogi računarski programi, kao, na primer COMSOL Multiphysics [6] ili neki drugi pristupi [7] do [10] mogu da reše ovakve probleme, ali bi rezultate proračuna svakako trebalo potvrditi na neki način, pri čemu je najbolje potvrditi računskih rezultata dobiti merenjima.

III OPIS MERNE METODE

Da bi predviđena merenja mogla da se obave, konstruisan je nosač provodnika, prikazan na Sl. 1.



Slika 1. Nosač provodnika sa naponskim priključcima

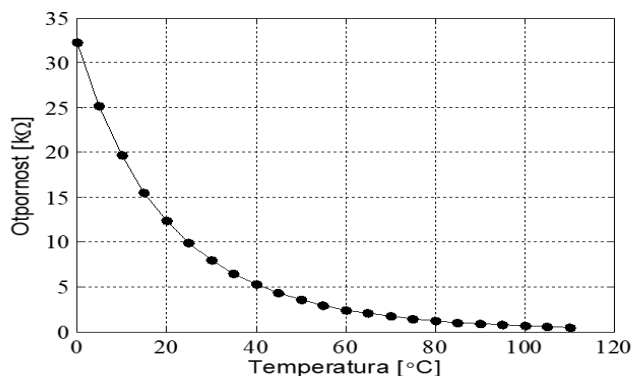
Dužina provodnika, između naponskih priključaka je iznosila 2 m, a naponski priključci su bili povezani sa držačem provodnika, sa donje strane nosača.

Provodnik se povezivao sa generatorima vremenski konstantnog ili vremenski promenljivog napajanja pomoću odgovarajućih zavrtanja i podloški, kako bi se osigurao dobar kontakt, značajan posebno pri većim jačinama struje. Na sredini nosača je bila izbušena rupa, prečnika $\phi = 6$ mm, za postavljanje temperaturne sonde, kao što je prikazano na Sl. 2.



Slika 2. Postavljanje temperaturne sonde

Korišćena temperaturna sonda je konstruisana na bazi otpornika sa negativnim temperaturnim koeficijentom (NTC otpornik) od 10 k Ω . Kalibracija sonde je bila izvršena u Kalibracionoj laboratoriji Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, a postupak kalibracije je opisan u [11]. Kriva zavisnosti otpornosti sonde od temperature je data na Sl. 3 [11].



Slika 3. Dijagram zavisnosti otpornosti temperaturne sonde od temperature

Da bi rezultati dobijeni merenjem pri konstantnoj jačini struje mogli da se porede sa rezultatima merenja pri konstantnom naponu na priključcima provodnika, bilo je neophodno odrediti otpornost otpornika. Otpornost otpornika je definisala parove jačina struje – napon, a izmerena je za svaki od provodnika, U – I metodom, simultanim merenjem jačine struje u provodniku i napona na njegovim krajevima. Za svaki provodnik je bilo izvršeno 25 merenja i otpornost je određena kao srednja vrednost tih merenja. Otpornosti provodnika, kao i parovi napon – jačina struje su dati u Tabeli 1.

Tabela 1. Otpornosti provodnika i parovi napon – jačina struje

Provodnik	R (m Ω)	Parovi napon – jačina struje					
		U (mV)	I (A)	U (mV)	I (A)	U (mV)	I (A)
4 mm ²	9,39	120	13,0	200	21,6	280	30,3
		360	38,9	440	48,6		
6 mm ²	6,65	180	27,0	300	45,0	420	63,0
		540	81,0	660	99,0		
10 mm ²	3,68	140	38,0	210	57,1	280	76,1
		350	95,1	420	114,1		

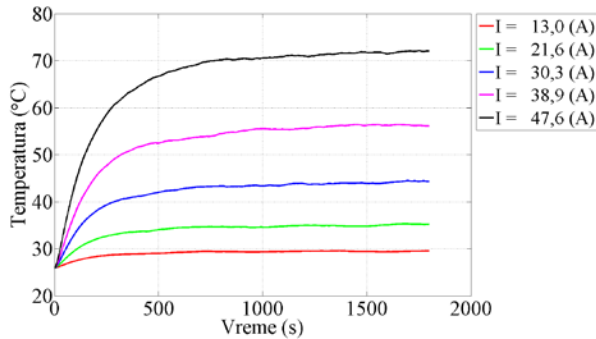
Za merenja je korišćena sledeća oprema: Generator vremenski promenljive struje, koji je konstruisan u firmi „Energobull, d.o.o“ i može da ostvari prostoperiodičnu struju efektivne vrednosti jačine do 180 A. Kao izvor vremenski konstantne struje je korišćen uređaj Benning TEBECHOP, sa strujom jačine do 200 A. Jačina struje, kako vremenski konstantne, tako i vremenski promenljive, je merena pomoću preciznog šanta GANZ SH-2, sa 5 strujnih priključaka, do 120 A i naponom do 60 mV. Napon na šantu je meren univerzalnim instrumentom VOLTcraft M-4660A Multimeter, dok je otpornost temperaturne sonde merena instrumentom FLUKE 8846a Precision Multimeter.

Instrument FLUKE 8846a Precision Multimeter omogućava zapisivanje izmerenih podataka na USB memoriju. Ta mogućnost je iskorišćena za zapisivanje rezultata merenja u memoriju svake 2 sekunde, pri čemu je ukupno trajanje jednog merenja iznosilo 30 minuta (900 podataka za svako merenje). Rezultati merenja su zatim prebačeni u Excel tabele, odakle su, nakon dodatne obrade podataka prikazani grafički.

IV REZULTATI MERENJA

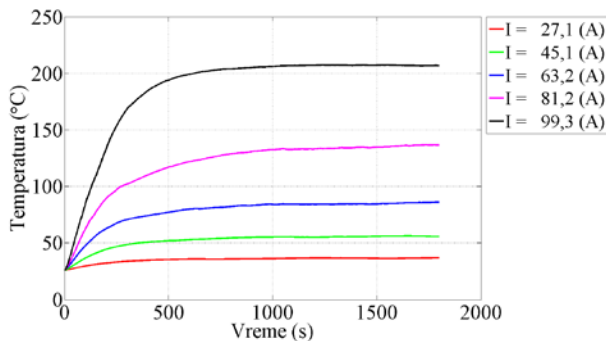
Kao što je već rečeno, u ovom radu će i rezultati merenja i njihovo poređenje biti prikazani grafički. Na Sl. 4 je prikazan vremenski dijagram promene temperature najtanjeg bakarnog provodnika, površine poprečnog preseka 4 mm². Prilikom zagrevanja provodnika je vremenski konstantna jačina struje u provodniku održavana konstantnom, pri promenljivom naponu na krajevima provodnika. Jačina struje je tokom merenja opadala, zbog povećanja specifične otpornosti bakra i time povećanja otpornosti provodnika. Pošto izvori nisu obezbeđivali konstantnu jačinu struje, tokom vremena je bilo neophodno pratiti promene jačine struje i ručno ih korigovati, odnosno, jačina struje je morala da se povećava sve vreme merenja. To povećavanje, svakako nije moglo da bude trenutno i savršeno, pa se i te promene opažaju na rezultatima merenja, na svim ispitivanim provodnicima.

Kao što može da se uoči na Sl. 4, dijagrami porasta temperature tokom vremena imaju karakterističan oblik, a činjenica da krive nisu glatke je posledica, kako ručnog podešavanja konstantne jačine struje, tako i promene temperature ambijenta. Naime, prostorija u kojoj su vršena merenja je bila klimatizovana standardnim klima uređajem, koji ima svoj histerezis i male varijacije temperature nisu mogle da budu kompenzovane.



Slika 4. Vremenski dijagram temperature na površi provodnika 4 mm²

Vremenski dijagram temperature na površi provodnika poprečnog preseka 6 mm², pri konstantnoj vrednosti vremenski konstante jačine struje tokom merenja, prikazan je na Sl. 5.

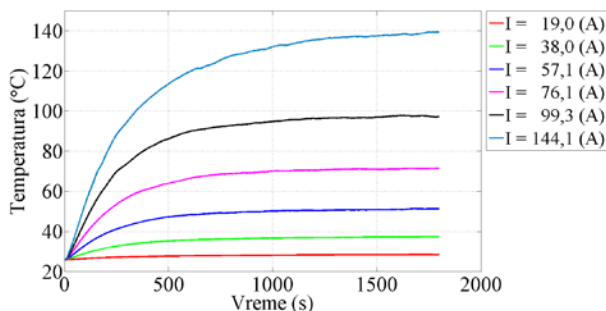


Slika 5. Vremenski dijagram temperature na površi provodnika 6 mm²

I u ovom slučaju se vide male promene temperature usled promena temperature okoline (krive nisu sasvim glatke).

U skladu sa (7) i (8), zbog većih jačina struja, porast temperature je brži, i krajnja postignuta temperatura je viša.

Na Sl. 6 je prikazan vremenski dijagram temperature na površini najdebljeg ispitivanog provodnika, poprečnog preseka 10 mm², pri konstantnoj jačini vremenski konstantne struje u provodniku.

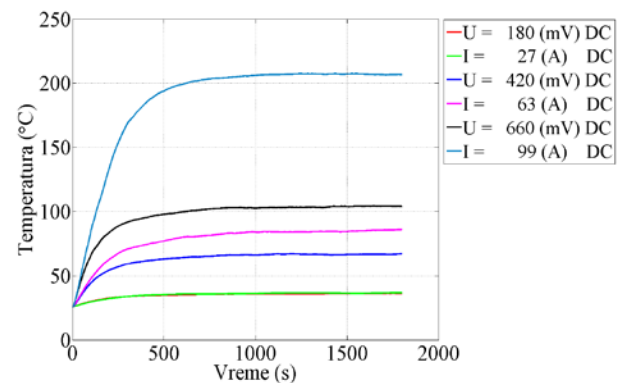


Slika 6. Vremenski dijagram temperature na površi provodnika 10 mm²

Prema očekivanju, zbog najvećih vrednosti jačina struja tokom grejanja provodnika, u ovom slučaju je porast temperature još brži, a viša je i konačna temperatura.

Kao primer upoređivanja rezultata, na Sl. 7 su prikazane neke od krivih zagrevanja provodnika poprečnog preseka 6 mm², za napajanje provodnika vremenski konstantnom jačinom struje i vremenski konstantnim naponom.

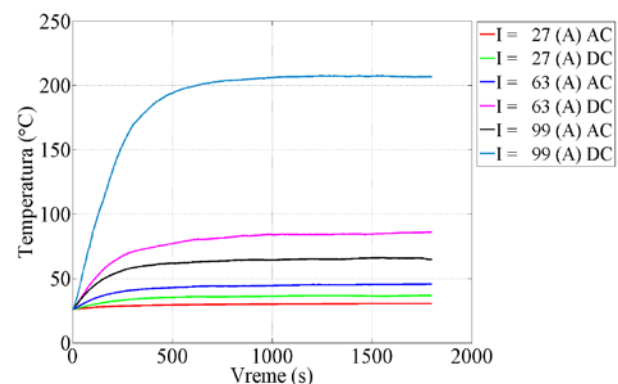
U prikazanom dijagramu su dati parovi podataka o temperaturama na površi provodnika, napajanog vremenski konstantnim generatorima, pri čemu je, u jednom slučaju, za vreme merenja, napon održavan konstantnim, a u drugom slučaju je struja održavana konstantnom. Od vremenskih dijagrama za 5 različitih jačina struja (vidi Sl. 5), u ovom poređenju su, kao primer, prikazana 3 para zagrevanja provodnika u toku vremena.



Slika 7. Poređenje napajanja provodnika 6 mm², konstantnim naponom ili konstantnom jačinom struje.

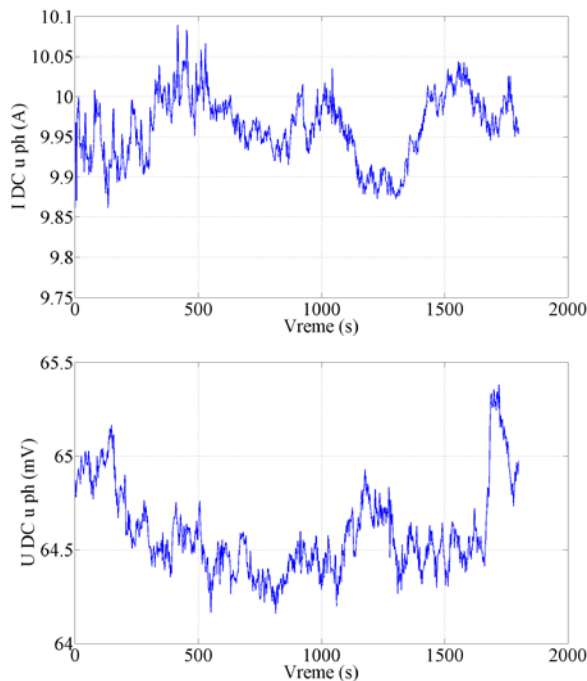
Prema izrazima (7) i (8), kada je, tokom merenja, jačina struje konstantna, zagrevanje provodnika je brže i konačna temperatura je viša, nego u slučaju kada je napon na krajevima provodnika konstantan. Takvo ponašanje temperature na površi provodnika je evidentno na gornjem dijagramu, prikazanom na Sl. 7.

Poređenje napajanja vremenski konstantnom ili vremenski promenljivom strujom, dato je na Sl. 8. Pri tome je, ponovo kao primer, posmatran provodnik poprečnog preseka 6 mm². Ovog puta su prikazani rezultati za vremenski promenljivo napajanje provodnika, a tokom merenja je napon održavan konstantnim.

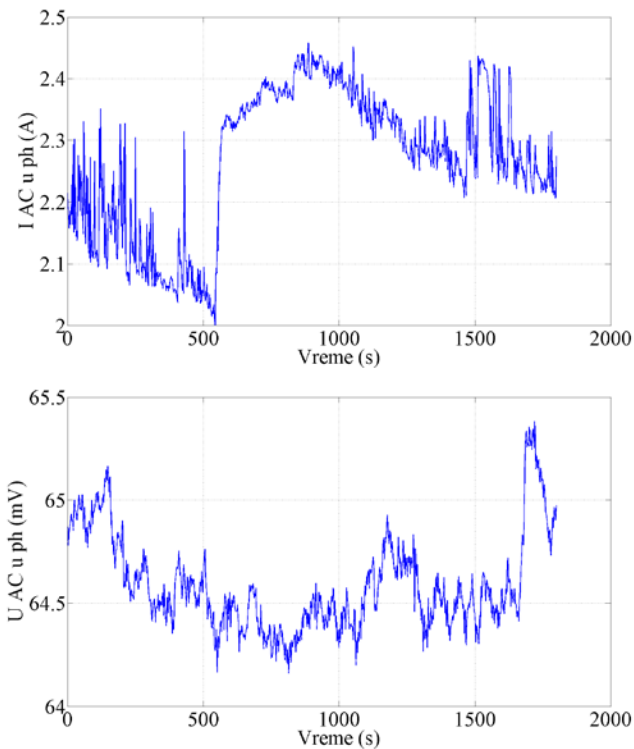


Slika 8. Poređenje napajanja provodnika 6 mm², vremenski konstantnim i vremenski promenljivim naponom

Kao i prethodno, i ovo poređenje je prikazano na konkretnom primeru zagrevanja provodnika poprečnog preseka 6 mm², za tri para napona na krajevima provodnika.



Slika 9. Vremenski dijagram izlaznih veličina vremenski konstantnih generatora

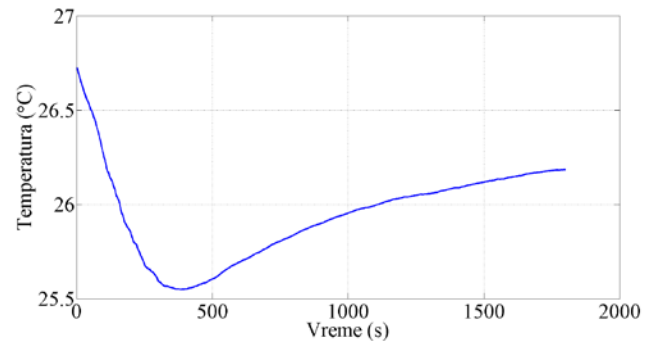


Slika 10. Vremenski dijagram izlaznih veličina vremenski promenljivih generatora

U slučaju napajanja provodnika vremenski promenljivim naponima, prisustvo površinskog efekta dodatno utiče na način zagrevanja provodnika. Bilo da se uticaj površinskog efekta prikaže ekvivalentnim porastom otpornosti provodnika, ili dodatnim zagrevanjem provodnika usled postojanja indukovanih struja, rezultat je isti i jasno je vidljiv i na Sl. 8.

Da bi se sa sigurnošću utvrdio razlog zbog koga krive u izvršenim merenjima nisu glatke, snimljene su karakteristike oba korišćena generatora, pri malim jačinama struja, odnosno, praktično u praznom hodu, kada nema značajnog zagrevanja provodnika. Promene izlaznih veličina tih generatora, u toku 30 min., prikazane su na Sl. 9 i Sl. 10.

Kao što može da se uoči na Sl. 9 i Sl. 10, izlazne veličine generatora (jačina struje na izlazu strujnog generatora i napon na izlazu naponskog generatora) nisu stabilizovane, konstantne, već se menjaju tokom merenja, prouzrokujući promene temperature. Osim toga, ni temperatura ambijenta nije bila konstantna tokom merenja, što prikazuje vremenski dijagram Prikazan na Sl. 11.



Slika 11. Promena temperature ambijenta tokom merenja

Tokom merenja je, kao što je već napomenuto, u prostoriji u kojoj su merenja vršena, bio uključen klima uređaj, koji je vršio samu grubu stabilizaciju temperature okoline, kao što to može da se uoči na Sl. 11.

Kada je temperatura ambijenta dostigla svoju maksimalnu vrednost, približno 366 s nakon početka merenja, klima uređaj se uključio i temperatura ambijenta je počela da pada.

Kao što je rečeno na početku, cilj ovih istraživanja je bilo određivanje temperature na površi provodnika u cilju verifikacije rezultata dobijenih proračunima. Zbog toga od rezultata merenja nije bila zahtevana velika tačnost i opisana odstupanja izlaznih veličina na generatora, kao i odstupanje od konstantne temperature ambijenta, su bila sasvim prihvatljive opcije.

V ZAKLJUČAK

Polazeći od naizgled jednostavnog problema merenja temperature na površi provodnika sa strujom, pokazalo se da je bilo potrebno razmotriti još niz uslova, koji su zahtevali drugačije pristupe i davali različita rešenja. Istraženi su svi slučajevi kada je u provodniku bila uspostavljena vremenski konstantna struja, kao i situacije kada je struja u provodniku bila vremenski promenljiva, prostoperiodična. Osim toga, ustanovljeno je da je bilo veoma važno definisati da li je, tokom merenja, jačina struje (efektivna vrednost u vremenski promenljivom slučaju) u provodniku ili napon na krajevima provodnika imala konstantnu vrednost. Razlika između ta dva slučaja se pokazala suštinskom i sve kombinacije su bile izmerene, upoređene i diskutovane.

Uočavanjem parametara koji utiču na tačnost merenja i stepenom tih uticaja, sada je moguće ostvariti i mnogo preciznija merenja temperature, kako na neizolovanim, tako i na izolovanim

provodnicima.

Prikazani dijagrami dobijeni merenjem temperature na površi provodnika imaju karakterističan oblik i veličine, tako da mogu uspešno da se koriste u praksi, za procenu zagrevanja provodnika u određenim situacijama.

Na kraju, rezultati ovih istraživanja će sigurno poslužiti kao verifikacija rezultata dobijenih analitičkim ili numeričkim proračunima.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju osoblju kompanije „d.o.o. Energobul“ iz Novog Sada, na pomoći prilikom merenja temperature provodnika.

Autori se zahvaljuju kolegama iz Centra za metrologiju, Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, na pomoći prilikom kalibracije temperaturne sonde, uređajima datim na korišćenje i korisnim savetima tokom merenja.

Ovaj rad je deo istraživanja koji finansira Ministarstvo za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije, putem projekata TR 32055 i TR 32019.

LITERATURA

- [1] Popović, B. *Elektromagnetika*, Beograd, Građevinska knjiga, 1986.
- [2] Prša, M. *Osnovi elektrotehnike za studente elektrotehničkih fakulteta*, Novi Sad, Stylos, 1995.
- [3] Lindström, L. Evaluating impact on ampacity according to IEC-60287 regarding thermally unfavorable placement of power cables, Stockholm, 2011, pp. 23-24. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:511556/FULLTEXT01.pdf> [pristupljeno 15.03.2020]
- [4] Kotni, L. A proposed algorithm for an overhead transmission line conductor temperature rise calculation, *International Tranaction on Electrical Energy Systems*, Vol. 24, pp. 578-596, 2014. <https://doi.org/10.1002/etep.1715>
- [5] Karahan, M., Kalenderli, O. Coupled electrical and thermal analysis of power cables using finite element method, 2011. <https://doi.org/10.5772/27350>
- [6] COMSOL MULTIPHYSICS, CLS 3.5a documentation 2008.
- [7] Paulech J. Cooling of an electric conductor by free convection – analytical, computational and experimental approaches, 2012. <http://www.posterus.sk/?p=13724>. [pristupljeno 15.03.2020]
- [8] Chávez, O. Méndez, F. The simultaneous influence of the skin effect, environmental conditions and variable resistivity on current and temperature distribution in overhead conductors, in *Proc. World Congress on Engineering 2010*, Vol. II, , pp. 1-6, 2010. http://www.iaeng.org/publication/WCE2010/WCE2010_pp1162-1167.pdf [pristupljeno 15.03.2020]
- [9] Yannu L., Yongchun, L., Yanming, L., Wenrong, S., Peng, Y., Junhao, L. Coupled electromagnetic – Thermal modeling the temperature distribution of XLPE cable, in *Proc. Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, pp. 1-7, 2009. <https://doi.org/10.1109/appeec.2009.4918246> [pristupljeno 15.03.2020]
- [10] Yang, L., Qiu, W., Huang, J., Hao, Y., Fu, M., Hou, S., Li, L. Comparison of conductor temperature calculations based on different radial position temperature detections for high-voltage power cable, *Energies*, Vol. 11, Issue 1, pp. 1-17, 2018. <https://doi.org/10.3390/en11010117> [pristupljeno 15.03.2020]
- [11] Kasaš-Lažetić, K., Mijatović, G., Herceg, D., Antić, D., Prša, M. Temperatura na površi provodnika sa vremenski promenljivom strujom, in *Proc. XVIII Međunarodni skup Infoteh - Jahorina 2019*, Jahorina, 20-22.03.2019. str. 73-78, 2019. <https://infoteh.etf.ues.rs.ba/zbornik/2019/radovi/ENS-2/ENS-2-1.pdf> [pristupljeno 15.03.2020]

AUTORI

dr Karolina Kasaš-Lažetić, docent, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, R. Srbija, kkasas@uns.ac.rs
dr Gorana Mijatović, docent, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, R. Srbija, gorana86@uns.ac.rs
dr Dejana Herceg, docent, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, R. Srbija, vuletic@uns.ac.rs
dr Miroslav Prša, profesor, penzionisan sa Fakulteta tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, R. Srbija, prsa@uns.ac.rs

Izračunavanje kapaciteta skladišta energije potrebnog za ostrvski rad mikromreže

Calculation of the Needed Storage Capacity in the Island Microgrid

Vladan Ristić*, Nikola Rajaković**, Dragana Vujanović***

* Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“

** Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu i Savez energetičara

*** Brose d.o.o. Beograd – Palilula

Rezime - Intenzivna integracija obnovljivih izvora energije, poput, primera radi, vetroelektrana i solarnih elektrana, nametnula se kao jedini put prema uspešnoj dekarbonizaciji elektroenergetskog sektora. Međutim, sve veći udeo koji ovakvi izvori zauzimaju u proizvodnim kapacitetima sistema predstavlja izazov kako za operatore tih sistema, tako i za regulatore, pošto varijabilnost njihove proizvodnje u značajnoj meri otežava postizanje ravnoteže između generisane i potrošene energije u sistemima. U nekim situacijama, nesmotrena integracija prevelikih količina varijabilnih izvora može, samim tim, dovesti i do ozbiljnih narušavanja kriterijuma pouzdanog i bezbednog rada sistema. Kako osetljivost potrošača na odstupanja u pokazateljima kvaliteta električne energije konstantno raste, to je jasno da neprekidno napajanje ovih potrošača ne sme biti dovedeno u pitanje ni u kom slučaju. Odatle se može steći utisak o važnosti hitnog rešavanja gorepomenutog problema za pravilno funkcionisanje elektroenergetskih sistema u budućnosti. Kao jedno od perspektivnijih rešenja, sve češće se pominju kapaciteti za skladištenje električne energije. U skladu sa time, ovaj rad se bavi predstavljanjem metodologije za određivanje skladišnog kapaciteta neophodnog za neometani ostrvski rad mikromreže. Za potrebe rada, smatrano je da se konzum mikromreže energijom snabdeva iz distribuiranih izvora energije, pri čemu su izvršeni proračuni obuhvatali jednogodišnji vremenski period. Dobijeni rezultati su prikazani u analitičkom i grafičkom obliku.

Ključne reči - Autonomija mikromreža, Energetski balans, Obnovljivi izvori, Skladištenje energije

Abstract - The only way in which the decarbonisation of the power sector can be successfully achieved is via the extensive integration of renewable sources, such as the wind and solar plants. The integration of ever higher shares of variable renewable energy in the power systems brings challenges to operators and regulators, since the variability of these generation capacities makes the balancing of supply and demand rather difficult. These characteristics of the mentioned sources may lead to severe imbalance in the produced and required energy that can, further, compromise the security of energy supply. The criterion of reliability of supply should be met because of the sensitive loads in grid, making the solving of the power balancing problem one of the most important subjects in the process of integration of renewable sources in the systems, with

the installation of energy storages being one of the most promising solutions. Considering all of that, this paper deals with the development of methodology for determining a storage capacity necessary for the secure operation of the microgrid equipped with the distributed energy sources, working in an island mode. The results obtained from calculations covering a year-long period are shown both in the analytical and the graphical form.

Index Terms - Energy Storage, Microgrid Autonomy, Power Balance, Renewables

1 UVOD

Elektroenergetski sistemi su, pod sve jačim uticajem savremenih ekoloških tendencija, pretrpeli značajne promene u prethodnim decenijama. Ove promene se odnose kako na operativni aspekt, tako i na metodologiju u skladu sa kojom se obavlja planiranje njihovog razvoja u narednom periodu. Očigledan primer ovakve evolucije se može uočiti u pritiscima da termoelektrane, koje su ne tako davno sagledavane kao oslonac stabilnog rada sistema, budu što hitnije isključene sa mreže. Opravdanje za ovakve inicijative se nalazi u velikoj koncentraciji gasova koji izazivaju efekte staklene bašte, pri čemu su termoelektrane označene kao jedan od najvećih krivaca za to. Njihov izlazak iz pogona mora biti praćen adekvatnom kompenzacijom u vidu energije kojom će se zadovoljiti potrebe potrošnje. Obnovljivi izvori se sagledavaju kao optimalni odgovor na ovaj zahtev.

Iako je veliki broj studija dokazao pozitivan uticaj ovakvog zaokreta u percepciji sistema za generisanje električne energije, ipak postoje i neke posledice na koje je neophodno ukazati. Jedna od poteškoća vezanih za predstavljenu problematiku i oslanjanje na varijabilne obnovljive izvore je otežano postizanje nivoa pouzdanosti rada elektroenergetskog sistema istovetnog onom koji su garantovale termoelektrane. Empirijskom metodom je pokazano da je ovaj zadatak daleko izazovniji i kompleksniji nego što su predviđale čak i najpesimističnije prognoze. Naime, do takvog zaključka se sa sigurnošću može doći, jer nijedno od predloženih rešenja nije u potpunosti opravdalo ono što se od njega očekivalo. Među najperspektivnijima se, ipak, ističu ona koja obuhvataju ugradnju velikih kapaciteta za skladištenje električne energije. Ovi kapaciteti bi se punili onda kada se u

sistemu pojavi višak energije, to jest, kada su proizvodne mogućnosti raspoloživih izvora veće od potrošnje. Sa druge strane, skladišta bi se praznila onda kada u sistemu dođe do nedostatka energije, čime bi se osigurala njegova izbalansiranost.

Shodno značaju razmatrane tematike, nije iznenađujuće to što se može pronaći veliki broj kvalitetnih naučnih radova posvećenih problemima srodnim onom izloženom u prethodnim pasusima. Neki od ovih radova su temi pristupili isključivo sa stanovišta pouzdanosti [1], dok su drugi bili usmereni ka identifikovanju najefikasnijih načina za upravljanje različitim aspektima rada mikromreža. Od takvih radova treba pomenuti [2], u kome se predlaže vid adaptivnog sekundarnog upravljanja mikromrežama, pri čemu se garantuje njihov ispravan rad u zadatim vremenskim okvirima. Takođe se ne sme izostaviti ni [3], koji prezentuje primenu kvadratnog programiranja radi ekonomske optimizacije plasmana energije iz obnovljivih izvora energije kako napajanje predefinisane potrošnje ne bi bilo ugroženo ni u jednom trenutku. U studiji [4] je predstavljena specijalizovana metoda optimizacije namenjena isključivo mikromrežama kojima se na raspolaganju nalaze veliki kapaciteti za skladištenje električne energije.

Pored toga, mora se naglasiti da se većina razvijenih upravljačkih mehanizama zasniva na principu praćenja stanja napunjenosti sistema za skladištenje i prilagođavanja odgovarajućih kontrolnih radnji vrednosti tog pokazatelja. Takva tehnika je, primera radi, izložena u [5], gde je načinjen prvi korak u ovom smeru, i to uvođenjem koncepta pseudo-stanja napunjenosti pomoću koga su poboljšane performanse mikromreže koja je analizirana. Kao logičan nastavak rada [5], rad [6] opisuje strategiju za integraciju upravljačkih metoda baziranih na praćenju stanja napunjenosti u mikromreže. Kako bi se obezbedila uravnoteženost mikromreža, korišćen je algoritam dinamičkog prosečnog konsenzusa.

Aktuelnost teme simbioze mikromreža i sistema za skladištenje električne energije nesumnjivo potvrđuju i različiti radovi koji potiču iz prethodnih nekoliko godina, zasnovani na određivanju veličine potrebnog kapaciteta ovih sistema. Na primer, [7] pruža sveobuhvatan pregled algoritama pomoću kojih bi se potrebni kapacitet skladišta mogao odrediti. Pritom su uvažavane promene koje se predviđaju za nastupajući period, poput potencijalnih varijacija snage potrošnje, pojeftinjenja sistema za skladištenje ili smanjenja emisije ugljen-dioksida. Rad [8] je posvećen sličnom tipu pregleda, ali uz izmeštanje fokusa na načine formulisanja problema i alate pomoću kojih se brzo i pouzdano može odrediti potreban kapacitet sistema za skladištenje energije. Što se tiče tehnika optimizacije koje bi se mogle primeniti na ovakav vid problema, iskoristivost nekih od njih je ispitana u [9], gde se optimizacija sivih vukova (eng. *Grey Wolf Optimization*) pokazala kao dobra u pogledu efikasnog i preciznog definisanja kapaciteta skladišta. Mora se naglasiti da su pritom ispitivane i neke od opšteprihvaćenih metoda optimizacije, kao što su optimizacija roja čestica (eng. *Particle Swarm Optimization*), genetski algoritam (eng. *Genetic Algorithm*) i metoda veštačke kolonije pčela (eng. *Artificial Bee Colony*).

Iako se iscrpni metod pretraživanja, predstavljen u narednim poglavljima ovog rada, može, na prvi pogled, učiniti kao korak unazad u poređenju sa tehnikama objašnjenim u pomenutim radovima, mišljenje autora je da bi se isti pre mogao smatrati svojevrsnom alternativom za neke od njih. Ovo bi posebno

moglo doći do izražaja u slučajevima u kojima je dostupnost ulaznih podataka ograničena, jer izloženi metod zahteva samo karakteristike proizvodnih kapaciteta i konzuma domaćinstava i industrijskih opterećenja u regionu od interesa. To mu daje mogućnost prilagođavanja velikom broju praktičnih situacija i mikromrežama različitih osobina na koje bi se moglo naići. Ovo je postignuto bez izlaganja pouzdanosti ili efikasnosti izvršenih proračuna bilo kakvoj vrsti rizika, što je i potvrđeno rezultatima koji su numerički i grafički prikazani u nastavku ovog rada.

Što se koncepcije rada tiče, u okviru Poglavlja II je dat opis mikromreže koja je korišćena za sve proračune izvršene u toku pripreme rada, pri čemu je posebna pažnja data osobinama proizvodnih kapaciteta i tipova potrošnje prisutnih u mikromreži. Dalje, Poglavlje III sadrži skup ulaznih pretpostavki i podataka potrebnih za izradu ovih proračuna, praćen obrascima koji su pritom korišćeni. Dobijeni rezultati čine srž Poglavlja IV, pri čemu se poslednji deo ovog poglavlja bavi dodatnom analizom osetljivosti. U ovoj analizi je obrađena zavisnost potrebnih kapaciteta sistema za skladištenje energije od instalisanih snaga obnovljivih izvora u mikromreži. Rad se završava Zaključkom u okviru koga su sumirani rezultati rada, još jedanput naglašeni važni teorijski aspekti, istaknute pretpostavke usvojene prilikom proračuna i potvrđene prethodno izvedene konkluzije.

II KARAKTERISTIKE MIKROMREŽE

Osnovnu svrhu ovog rada predstavljala je izrada metodologije namenjene određivanju najmanjeg potrebnog kapaciteta sistema za skladištenje električne energije, lociranog uz mikromrežu koja radi u ostrvskom modu. Da bi se ovaj cilj ostvario, bilo je neophodno, pre svega, načiniti odgovarajuće pretpostavke vezane za karakteristike same mikromreže. Ove karakteristike, ipak, nisu usvajane nasumično, već su bazirane na poznatim osobinama primera postojećih mikromreža. Za početak, smatrano je da se energija za snabdevanje potrošnje mikromreže obezbeđuje iz tri osnovna kapaciteta za generisanje. To su:

- vetroelektrana;
- solarna elektrana;
- elektrana na biomasu.

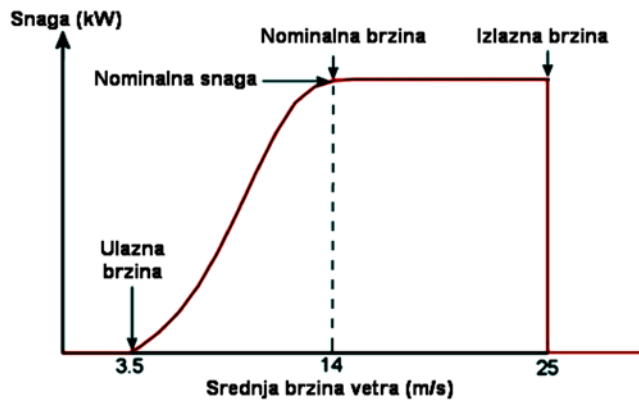
Takođe, uzeto je da se kompletan konzum mikromreže može svrstati u jednu od dve opšte kategorije:

- potrošnja domaćinstava;
- industrijska potrošnja.

Uz to, uvažena je i činjenica da se ne ponaša svaka industrijska potrošnja na identičan način, u skladu sa čime je i industrijska potrošnja mikromreže podeljena u dve potkategorije:

- industrijska potrošnja koja radi u jednoj smeni;
- industrijska potrošnja koja radi u tri smene.

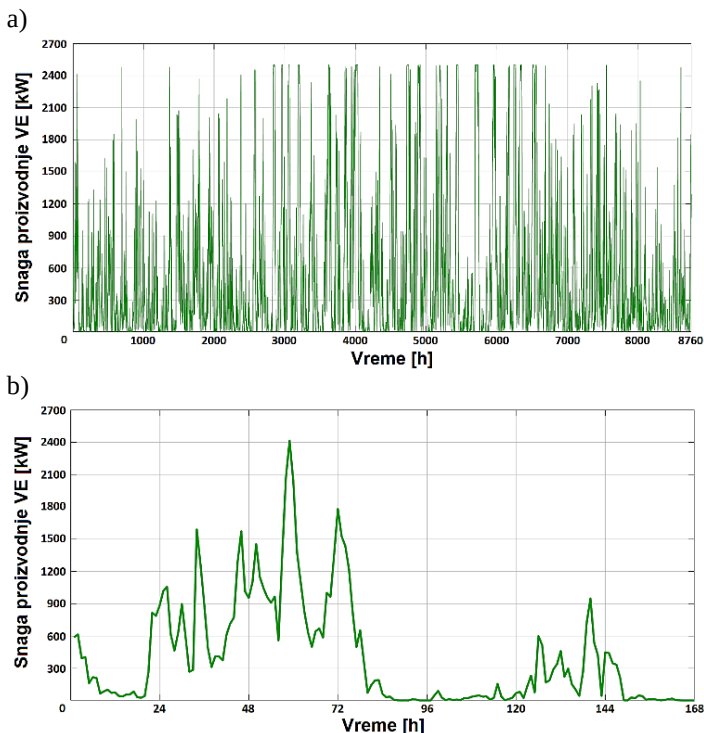
Prvi proizvodni kapacitet u kome će biti reči u sklopu ovog poglavlja je vetroelektrana. U cilju određivanja satnih vrednosti proizvodnje vetroelektrane u toku posmatranog jednogodišnjeg perioda, bilo je potrebno definisati satne vrednosti brzine vetra na području na kome je pretpostavljeno da se čitava mikromreža nalazi. Pojašnjenje povezanosti trenutne brzine vetra na lokaciji na kojoj je vetroelektrana podignuta i snage kojom se energija proizvodi u njoj dato je grafičkim putem na dijagramu na Slici 1, prikazanom na početku naredne stranice.



Slika 1. Snaga proizvodnje vetroturbine u zavisnosti od brzine vetra

Satne vrednosti brzine vetra su dobijene iz merenja, sprovedenih na području Srednjeg Banata, u Vojvodini (severni deo Srbije), u periodu od početka jula 2012. godine do kraja juna 2013. godine. Ova merenja su rađena sa desetominutnom rezolucijom. Kako su analize sprovedene u okviru ovog rada kao referentni vremenski korak uzimale interval od jednog časa, bilo je neophodno prilagoditi izmerene brzine vetra takvom principu. Shodno tome, za svaki od sati posmatranih u radu, brzina vetra je definisana kao prosek brzina vetra izmerenih u toku tog sata.

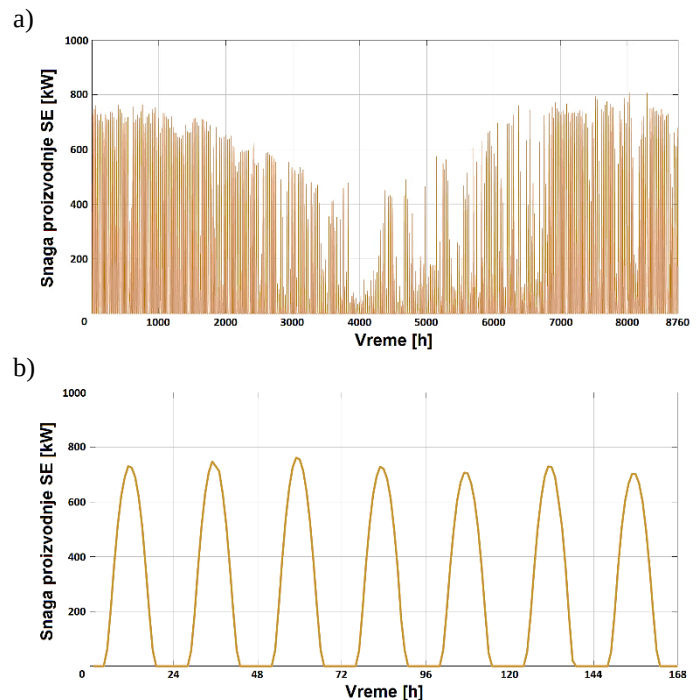
Za instalisanu snagu ove elektrane je uzeta vrednost od 2,5 MW. Dobijene snage proizvodnje elektrane su date na Slici 2, pri čemu se njen gornji deo (a) odnosi na čitav posmatrani jednogodišnji period, dok se njen donji deo (b), radi bolje preglednosti, odnosi isključivo na prvu sedmicu tog perioda.



Slika 2. Snaga proizvodnje vetrolektrane tokom a) čitavog jednogodišnjeg perioda, b) prve nedelje ovog perioda

Kao što je već naglašeno, deo Slike 2 označen sa (b) je dodat zbog poboljšanja čitljivosti prikazanih podataka, pošto su autori svesni da dijagram označen sa (a) na ovoj slici pruža dobar uvid u promenljivost snage proizvodnje energije u vetrolektrani, ali bi se mogao smatrati nepreglednim ukoliko bi se zahtevali tačni iznosi snaga kojima se ova proizvodnja vrši. Upravo je pomenuta promenljivost snage generisanja razlog zbog koga se sposobnost vetrolektrana da održavaju stabilnost sistema dovodi u pitanje, odakle se rađa potreba za sistemima za skladištenje energije.

Satne vrednosti proizvodnje solarne elektrane su određene primenom Geografskog informacionog sistema za fotonaponske panele (eng. *Photovoltaic Geographical Information System*), javno dostupnog na zvaničnoj internet stranici Evropske komisije [10]. Nakon što je uzeto da instalisana snaga solarne elektrane iznosi 1 MW, bilo je potrebno još definisati lokaciju na kojoj se ova elektrana nalazi, kao i vremenski raspon koji se posmatra. Time su dobijene satne vrednosti proizvodnje date na Slici 3, pri čemu se gornja polovina slike i ovaj put odnosi na čitavu godinu, dok je donji deo slike zasnovan na prvoj sedmici te godine.

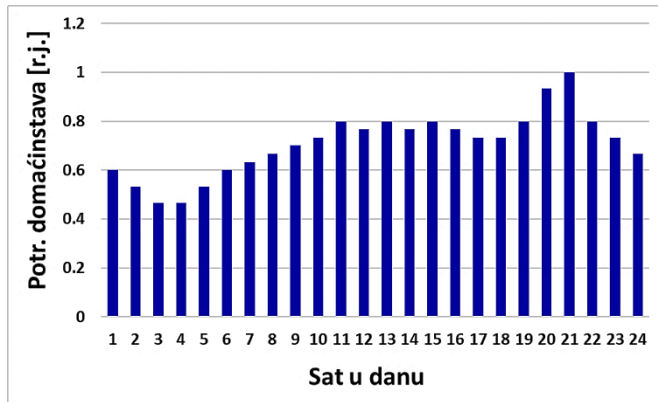


Slika 3. Snaga proizvodnje solarne elektrane tokom, a) čitavog jednogodišnjeg perioda, b) prve nedelje ovog perioda.

Kao što je i očekivano, varijabilnost proizvodnje, već uočena kod vetrolektrane, prisutna je i u vrednostima dobijenim za solarnu elektranu. Nesigurnost koju bi primena samo ova dva izvora za zadovoljenje potreba potrošača u mikromreži mogla izazvati je dovela do toga da je smatrano da, pored njih, u mikromreži mora postojati i dodatni generatorski kapacitet koji bi se aktivirao isključivo u slučajevima u kojima bi to bilo nužno. Za ovu ulogu je u radu odabrana elektrana na biomasu, namenjena očuvanju pouzdanosti mikromreže i neprekidnosti napajanja potrošnje. Kao njena instalisana snaga, usvojena je vrednost od 1,1 MW.

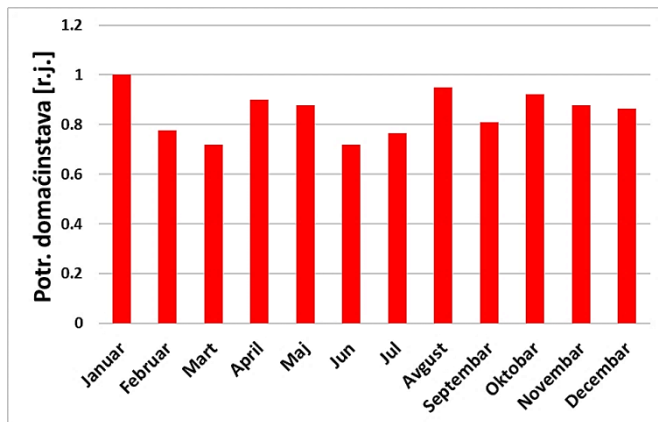
Prvi tip potrošnje prisutan u posmatranoj mikromreži koji će biti predstavljen na ovom mestu jeste potrošnja domaćinstava. Pošto

ova potrošnja nema konstantnu vrednost u toku dana, bilo je neophodno odrediti način na koji se ona menja u zavisnosti od toga koji se sat posmatra. U ove svrhe, korišćen je dijagram dat na Slici 4. Vrednosti na ovom dijagramu su normalizovane tako da dnevni maksimalni iznos potrošnje, do koga dolazi u dvadeset i prvom satu, odgovara jediničnoj vrednosti, dok su potrošnje u svim ostalim satima skalirane u odnosu na ovaj maksimum i odgovaraju relativnim vrednostima nižim od jedinice [11].



Slika 4. Tipični dijagram dnevne promene potrošnje domaćinstava

Takođe se mora napomenuti da vrednosti potrošnje domaćinstava ni u kom slučaju ne ostaju konstantne tokom različitih meseci u godini. Razlog za ovo se može naći u velikom broju faktora od kojih zavisi iznos snage konzuma, pri čemu je značajan procenat ovih faktora u direktnoj sprezi sa klimatskim uslovima koji vladaju u odgovarajućem mesecu. Da bi se i ovaj efekat uvažio, iskorišćen je dijagram mesečne varijacije maksimalne potrošnje, dat na Slici 5. Na ovom dijagramu su prikazane normalizovane vrednosti maksimalnih potrošnji za svaki od meseci, skalirane u odnosu na godišnji maksimum potrošnje. U skladu sa time, januaru, kao mesecu u kome je godišnji maksimum zabeležen, odgovara jedinična vrednost, dok su vrednosti za sve ostale mesece niže od jedinice. Ovaj dijagram je baziran na merenim vrednostima potrošnje u već pomenutoj oblasti Srednjeg Banata.



Slika 5. Tipični dijagram mesečne promene potrošnje domaćinstava

Da bi se ovi dijagrami preveli u apsolutne vrednosti potrošnje, bilo je potrebno usvojiti i godišnju maksimalnu vrednost iste, za šta je usvojen iznos od 550 kW.

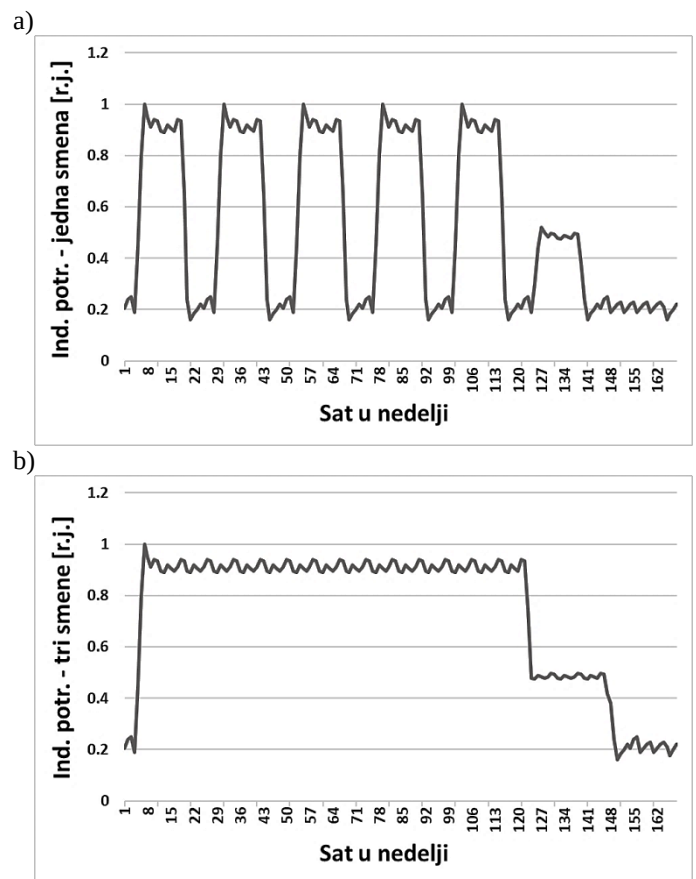
Do ove vrednosti dolazi u dvadeset i prvom satu januarskih dana. Međutim, moglo bi se postaviti pitanje određivanja vrednosti potrošnje u svakom od ostalih sati u toku godine. Ovaj korak je sproveden u delo korišćenjem obrasca (1).

$$P_{hj} = P_{h-max} \cdot \mu_{sj} \cdot \mu_{mj} \quad (1)$$

Ovde oznake imaju sledeće značenje:

- P_{hj} [kW] – vrednost snage potrošnje domaćinstava u mikromreži u satu j u toku godine;
- P_{h-max} [kW] – godišnji maksimum snage potrošnje domaćinstava u mikromreži, jednak 550 kW;
- μ_{sj} – koeficijent kojim se potrošnja skalira prema satu u toku dana, određen na osnovu Slike 4;
- μ_{mj} – koeficijent kojim se potrošnja skalira po mesecu u toku godine, određen na osnovu Slike 5.

Što se tiče industrijske potrošnje, pretpostavljeno je da njena promena zavisi samo od sata u toku dana i dana u toku nedelje, a ne od klimatskih uslova koji odgovaraju posmatranom trenutku. U skladu sa time, kreirani su nedeljni dijagrami potrošnje, dati na Slici 6, na kojoj se gornja polovina (označena sa (a)) odnosi na industrijsku potrošnju koja radi u jednoj smeni [12], dok donja polovina (obeležena slovom (b)) odgovara industrijskoj potrošnji koja radi u sve tri smene u toku dana.



Slika 6. Tipični nedeljni dijagrami promene potrošnje
a) industrijskog konzuma koji radi u jednoj smeni, b)
industrijskog konzuma koji radi u tri smene

Kao što se može videti, smatrano je da industrijski potrošači u mikromreži od interesa od ponedjeljka do petka uvek rade punim kapacitetom, da u subotu rade sa 40% kapaciteta, a da u nedelju nijedan od njih ne radi. Uz to, na ovim dijagramima su prikazani relativni iznosi snaga potrošnje, svedeni u odnosu na maksimalnu vrednost iste, u skladu sa čime se može doći do zaključka da je i ovde bilo neophodno usvojiti taj maksimum u cilju izračunavanja apsolutnih potrošnji koje bi odgovarale svakom od posmatranih sati. Shodno tome, i za industrijsku potrošnju koja radi u jednoj smeni, i za industrijsku potrošnju koja radi u sve tri smene je uzeta maksimalna vrednost snage jednaka 400 kW.

III METODOLOGIJA PRORAČUNA

Temu praktičnog dela ovog rada čini metodologija za određivanje kapaciteta sistema za skladištenje energije, lociranog u neposrednom okruženju fiktivne mikromreže. Da bi se to moglo realizovati, bilo je potrebno odrediti osnovni kriterijum ispravnog rada mikromreže. U te svrhe je odabrana neprekidnost napajanja potrošača u mikromreži. Da bi kreirana metodologija obezbedila zadovoljenje ovog kriterijuma, bilo je neophodno pratiti stanje napunjenosti kapaciteta za skladištenje, i to za svaki od sati u posmatranom jednogodišnjem vremenskom intervalu. Ovaj korak je realizovan primenom formule (2).

$$W_j = W_{init} + \sum_{i=1}^j \Delta W_i, \quad j = 1, 2 \dots 8760 \quad (2)$$

U ovoj formuli, simboli imaju sledeće značenje:

- W_j [kWh] – stanje napunjenosti posmatranog sistema za skladištenje električne energije u satu j ;
- W_{init} [kWh] – početno stanje napunjenosti posmatranog sistema za skladištenje električne energije, za koje je usvojen iznos od 80% instalisanih kapaciteta istog;
- ΔW_i [kWh] – promena stanja napunjenosti posmatranog sistema za skladištenje električne energije u satu i .

Kako je već naglašeno, početno stanje napunjenosti sistema za skladištenje energije je smatrano konstantnom vrednošću, te nije bilo potrebe da se iznova proračunava svaki put kada bi se ovaj izraz koristio, to jest, za svaki od sati u toku godine. Ovo je, od potrebnih ulaznih podataka, ostavilo jedino promenu stanja napunjenosti u odgovarajućem satu kao nepoznatu vrednost. Za sat j , taj iznos je određivan u skladu sa izrazom (3).

$$\Delta W_j = (P_{wj} + P_{sj} - P_{hj} - P_{ij}) \cdot \Delta t \quad (3)$$

U nastavku će biti data pojašnjenja svake od oznaka korišćenih u ovom obrascu, izuzev oznake P_{hj} , koja je već objašnjena u delu teksta koji je pratio formulu (1). Preostali simboli znače sledeće:

- P_{wj} [kW] – vrednost snage proizvodnje energije u vetroelektrani u satu j u toku godine;
- P_{sj} [kW] – vrednost snage proizvodnje energije u solarnoj elektrani u satu j u toku godine;
- P_{ij} [kW] – vrednost ukupne snage industrijske potrošnje u mikromreži u satu j u toku godine;
- Δt [h] – pretpostavljeni vremenski korak prema kome su rađeni proračuni, jednak jednom času.

Sama analiza je sprovedena tako što je, na njenom početku, bila pretpostavljena početna vrednost instalisanog kapaciteta sistema za skladištenje električne energije, nakon čega je, korišćenjem obrazaca (2) i (3), izračunavano stanje njegove napunjenosti za svaki sat u toku godine. Ovaj postupak je trajao sve dok stanje napunjenosti ne bi postalo negativno, što bi se, u praksi, odrazilo na pouzdanost rada sistema i dovelo do neizbežnih restrikcija isporuke energije potrošačima. Takvo stanje je nedopustivo, te je, u tom satu, aktivirana elektrana na biomasu, čime je stanje napunjenosti skladišta povećavano za vrednost instalisane snage ove elektrane. Ako bi se ovime rešio uočeni problem, to jest, ako bi stanje napunjenosti postalo veće od nule, proračuni bi bili nastavljani za sledeći sat u toku godine. U suprotnom, proces je obustavljan, nakon čega je instalisani kapacitet skladišta energije povećavan za odgovarajući predefinisani iznos. Proračuni su potom otpočinjani iznova, od prvog sata, prateći već pojašnjeni postupak naizmenične primene izraza (2) i (3). Iako bi se, na prvi pogled, moglo učiniti da bi se čitava problematika mogla svesti na jednostavan linearni sistem, neizvesnost aktivacije elektrane na biomasu je predstavljala otežavajući faktor zbog koga ovakav vid uprošćavanja ipak nije bilo moguće primeniti.

Konačno, potrebno je posebno izdvojiti momenat u kome bi ceo ciklus bio prekinut i u kome bi se moglo smatrati da je dovoljni kapacitet sistema za skladištenje energije određen. Naime, nakon što bi proces proračunavanja stanja napunjenosti bio prekidano i ponovo pokretan dovoljan broj puta, došlo bi se do najmanje vrednosti ovog kapaciteta pri kojoj njegovo stanje napunjenosti, uz povremene intervencije elektrane na biomasu, ne bi padalo ispod nultog iznosa ni za jedan sat u toku godine. Upravo je taj instalisani kapacitet sistema za skladištenje električne energije proglašavan dovoljnim, jer bi pri njemu bio ispunjen navedeni uslov za pouzdano funkcionisanje razmatrane mikromreže.

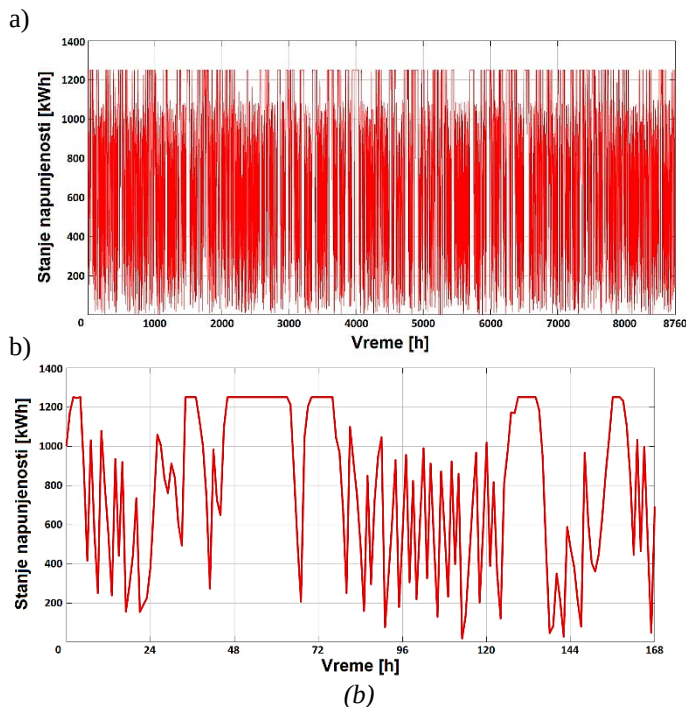
IV PRIKAZ REZULTATA ANALIZE

Da bi se ilustrovala mogućnost primene izložene metodologije na praktične primere mikromreža, sproveden je test-proračun. Ovaj proračun je rađen na mikromreži čije su karakteristike detaljno opisane u Poglavlju II ovog rada. U skladu sa koracima od kojih se proračun sastojao, bio je neophodno usvojiti još samo dve ulazne pretpostavke pre njegovog pokretanja – jednu vezanu za početnu vrednost kapaciteta sistema za skladištenje energije i jednu vezanu za veličinu koraka u kojima je ovaj kapacitet povećavan između dva susedna ciklusa proračuna. Posebna pažnja je morala biti posvećena veličini pomenutih koraka, jer bi preveliki koraci mogli dovesti do nepreciznosti u rezultatima i ugroziti pouzdanost proračuna, dok bi premala vrednost koraka bespotrebno produžila trajanje proračuna i negativno uticala na efikasnost čitavog postupka. Nakon određenog broja pokušaja, empirijskom metodom je utvrđeno da je veličina koraka koja zadovoljava oba prethodno nabrojana kriterijuma 50 kWh. Što se tiče inicijalne pretpostavljene vrednosti instalisanog kapaciteta sistema za skladištenje, usvojena je vrednost od 800 kWh.

Konačno, nakon što su razjašnjene i poslednje nepoznanice koje bi mogle sprečiti adekvatno obavljanje proračuna u skladu sa opisanom procedurom, prešlo se i na vršenje samih proračuna. Ovim postupkom je utvrđeno da bi kapacitet skladišta energije potreban za pouzdan rad mikromreže bio jednak 1250 kWh.

Važno je da se na ovom mestu naglasi i to da se dobijeni rezultat vezan za potrebni kapacitet sistema za skladištenje ni na koji način ne može svrstati u iracionalne ili praktično neostvarive. O ovome mogu posvedočiti i praktični primeri, poput postrojenja izgrađenog na ostrvu Porto Santo (Madeira, Portugal), koje broji oko 5500 stanovnika. Potrošači locirani na ovom ostrvu energiju dobijaju isključivo iz vetroelektrana i solarnih elektrana koje su postavljene širom ostrva. Ovo ih, shodno elaboraciji iz uvodnog dela ovog rada, čini podložnim problemima u vezi balansiranja proizvodnje i potrošnje. Da bi se ovakvi negativni efekti sprečili, odnosno, da bi se postigla povećana pouzdanost, na ostrvu je podignut i sistem za skladištenje energije instalisanog kapaciteta jednakog 3 MWh [13]. Shodno tome, može se doći do zaključka da instalisani kapacitet od 1250 kWh, predložen u ovom radu, svakako spada u opseg koji se u praksi može postići. Time je, na određeni način, potvrđena i primenljivost izložene metodologije na eventualne praktične situacije sa kojima bi mogla biti suočena.

Satni dijagrami stanja napunjenosti sistema za skladištenje čija je implementacija sugerisana dobijenim rezultatima se mogu videti na Slici 7, na kojoj je, kao i u slučajevima koji su se odnosili na rad vetroelektrana i solarnih elektrana, gornja polovina, označena sa (a), posvećena prikazu stanja napunjenosti tokom cele godine, dok donja polovina, obeležena sa (b), za temu ima stanje tokom prve nedelje obuhvaćenog vremenskog perioda.



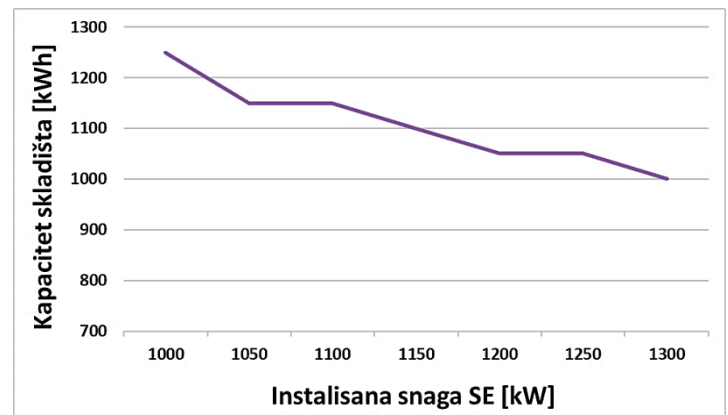
Slika 7. Satni dijagrami napunjenosti sistema za skladištenje tokom

a) čitavog jednogodišnjeg perioda, b) prve nedelje ovog perioda

Sa ovog dijagrama je evidentno da bi, ukoliko se posluša savet dat u ovom radu i podigne sistem za skladištenje kapaciteta od 1250 kWh, njegovo stanje napunjenosti u nekim satima u godini moglo padati na vrednosti bliske nultoj, ali da ni u jednom satu ne bi došlo do negativnih iznosa ovog stanja, to jest, do prekida isporuke električne energije korisnicima u mikromreži.

U nastavku toga se može zaključiti da je primena metodologije objašnjene u nekim od prethodnih poglavlja dovela do odabira adekvatnog odgovora na postavljen problem, te da bi, u slučaju njegove praktične implementacije, i osnovni kriterijum ispravnog rada mikromreže bio ispunjen. Stoga, neprekidnost napajanja potrošnje mikromreže ne bi bila narušena ni u jednom satu u posmatranom vremenskom periodu, što je, po mišljenju autora, imperativ kojim se mora voditi pri planiranju rada mikromreža. Da bi se ovakav stav još više potkrepio praktičnim podlogama, dovoljno je podsetiti na to da se u elektroenergetskim sistemima sve češće javljaju i osetljivi elektronski potrošači, ali i potrošači povezani na mrežu preko poluprovodničkih komponenti. Prema tome, bilo kakav prekid napajanja ovih potrošača bi, ma koliko bio kratkotrajan, mogao dovesti do njihovog neispravnog rada, pa čak i trajnih kvarova. Ovo bi, dalje, moglo izazvati kako štetu materijalne prirode, tako i potencijalni rizik po život ljudi koji se u trenutku kvara nalaze u blizini predmetne potrošnje.

Poslednja analiza koja je izrađena u sklopu ovog rada se može sagledati kao dodatak dosadašnjim teoretskim razmatranjima i sprovedenim simulacijama. Ova analiza je predstavljala analizu osetljivosti u kojoj je praćen uticaj koji bi postepeno povećanje instalisanog kapaciteta solarne elektrane moglo imati na promenu potrebnog kapaciteta skladišta električne energije. U sklopu ove analize, instalisana snaga solarne elektrane je povećavana za po 50 kW u svakoj novoj iteraciji, nakon čega su iznova rađeni proračuni definisani obrascima (2) i (3). Za očekivati je bilo da će, u skladu sa povećanjem količine energije prisutne u sistemu, veća snaga solarne elektrane dovesti do smanjenja potrebnog sistema za skladištenje, bez ikakvog narušavanja neprekidnosti isporuke energije prema potrošačima. Rezultati izvršene analize osetljivosti se mogu videti na dijagramu, datom na Slici 8.



Slika 8. Rezultati dodatne analize osetljivosti

Kao što se sa prikazanog grafika može primetiti, snaga solarne elektrane od 1,3 MW bi dovela do pada kapaciteta potrebnog za skladištenje energije do vrednosti od 1 MWh. Takođe, mora se napomenuti da tendencija pada kapaciteta sistema za skladištenje ostaje relativno konstantna kako se povećava instalisana snaga solarne elektrane. Odatle je jasno da su očekivanja, izneta pre Slike 8, bila opravdana i da su unapred postavljene hipoteze bile potvrđene ovom analizom, čime je mogućnost primene razvijene metodologije za proračun kapaciteta skladišta električne energije na situacije slične onoj opisanoj u radu još jedanput dokazana.

V ZAKLJUČAK

Temu ovog rada činila je prezentacija kreirane metodologije za određivanje najmanjeg kapaciteta sistema za skladištenje energije pri kome ne bi došlo do ugrožavanja pouzdanosti napajanja konzuma mikromreže. Pretpostavljeno je da mikromreža nema veze sa ostatkom elektroenergetskog sistema, te da potrošači u njoj električnu energiju dobijaju iz solarne elektrane, elektrane na biomasu i vetroelektrane. Nakon usvajanja odgovarajućeg seta ulaznih podataka i pretpostavki, prešlo se na proračune koji su zahvatili vremenski period od godinu dana, gde je za pogodan vremenski korak proračuna usvojen interval od jednog sata, čime je garantovana dovoljna preciznost proračuna, bez ugrožavanja njihove efikasnosti. Naknadno je ispitan i način na koji bi se povećanjem instalisane snage solarne elektrane moglo uticati na potreban kapacitet sistema za skladištenje energije. Rezultati koji su ostvareni pri svim sprovedenim analizama su bili usklađeni sa postavljenim očekivanjima, čime je verifikovana njihova tačnost.

Sve navedeno ukazuje na to da je razvijena tehnika ne samo dobro prilagođena za rad sa test-sistemima, poput onog čije su karakteristike date u radu, već da bi jako lako mogla pronaći svoje mesto i u praktičnim slučajevima. Ovde se, prevashodno, misli na situacije u kojima se planira podizanje mikromreža u udaljenim područjima, namenjenih napajanju osetljive potrošnje, čije snabdevanje energijom ne sme biti prekinuto ni na trenutak. Primer za ovo se može pronaći u mrežama izgrađenim za potrebe malih rudarskih naseobina, gde je, pored industrijskog konzuma, prisutna i potrošnja baraka za stanovanje radnika, kao i ostalih propratnih objekata čije je postojanje u tim naseljima neophodno.

Takva podela potrošnje na dve kategorije bi se mogla smatrati pandanom one prikazane i obrađene u okviru ovog rada. Ovaj primer samo stavlja akcenat na već pomenutu važnost činjenice da ovakva metodologija odgovara nezanemarljivom procentu praktičnih situacija, što bi moglo dovesti do njene šire primene u narednom periodu, u kome se očekuje intenzivna integracija mikromreža, kao jednog od izvora fleksibilnosti u sistemu.

Naravno, iako su mikromreže jedan od izvora fleksibilnosti od kojih se najviše očekuje u budućnosti, to nikako ne znači da su jedina opcija koji se razmatra. Primera radi, princip upravljanja potrošnjom (eng. *demand response*), baziran na dvosmernoj komunikaciji između operatora i potrošača, može uneti dodatnu fleksibilnost u sistem. Iako ovaj princip nije obuhvaćen u okviru ovog rada, to ne znači da ne bi bilo zanimljivo ispitati mogućnost kombinovanog uticaja koji bi se ostvario zbirnim dejstvom skladištenja energije i upravljanja potrošnjom. U skladu sa time, autori ovog rada imaju nameru da nastave sa istraživanjima, pri čemu rezultati ovog rada mogu poslužiti kao garancija značaja budućih radova koji će se baviti sličnim temama.

ZAHVALNICA

Autori bi ovom prilikom želeli da iskažu zahvalnost prema AD „Elektromreža Srbije“, operatoru prenosnog sistema Srbije, zbog dozvoljavanja pristupa nekim od podataka neophodnih za izradu ovog rada, kao i Elektrotehničkom fakultetu Univerziteta u Beogradu, zbog obezbeđivanja softverskih alata u kojima su izrađeni proračuni čiji se rezultati mogu videti u radu.

LITERATURA

- [1] Abdulgalil, M.A., Khalid, M., Alshehri, J. Microgrid Reliability Evaluation Using Distributed Energy Storage Systems, in Proc. 2019 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), China, pp. 2837-2841, 2019. <https://doi.org/10.1109/isgt-asia.2019.8881068>
- [2] Rodrigues, Y.R., Monteiro, M.R., Zambroni de Souza, A.C., Riberiro, P.F., Wang, L., Eberle, W. Adaptive Secondary Control for Energy Storage in Island Microgrids, in Proc. 2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Portland, SAD, pp. 1-5, 2018. <https://doi.org/10.1109/pesgm.2018.8586228>
- [3] Wibowo, R.S., Firmansyah, K.R., Aryani, N.K., Soeprijanto, A. Dynamic economic dispatch of hybrid microgrid with energy storage using quadratic programming, in Proc. 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON), Singapore, pp. 667-670, 2016. <https://doi.org/10.1109/tencon.2016.7848086>
- [4] Jo, H., Kim, J.-Y., Byeon G., Kim, S.-K. Optimal Scheduling Method of Community Microgrid with Customer-owned Distributed Energy Storage System, in Proc. 2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, Porto, Portugal, pp. 1-6, 2019. <https://doi.org/10.1109/sest.2019.8849149>
- [5] Nair V.V., Ilango, K. Microgrid control strategies for enhanced storage management, in Proc. International Conference on Technological Advancements in Power and Energy (TAP), Kolam, Indija, pp. 1-5, 2017. <https://doi.org/10.1109/tapenergy.2017.8397356>
- [6] Li, C., Dragicevic, T., Plaza, M.G., Andrade, F., Vasquez, J.C., Guerrero, J.M. Multiagent based distributed control for state-of-charge balance of distributed energy storage in DC microgrids, in Proc. 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON 2014, Dalas, SAD, pp. 2180-2184, 2014. <https://doi.org/10.1109/iecon.2014.7048804>
- [7] Hannan, M.A., Faisala, M., Jern Kera, P., Begum R.A., Dongd, Z.Y., Zhangd, C. Review of optimal methods and algorithms for sizing energy storage systems to achieve decarbonization in microgrid applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 131, pp. 1-24, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110022>
- [8] Jayashree, S., Malarvizhi, K. Methodologies for Optimal Sizing of Battery Energy Storage in Microgrids: A Comprehensive Review, in Proc. International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI 2020), Koimbatore, India, pp. 1-5, 2020. <https://doi.org/10.1109/iccci48352.2020.9104131>
- [9] Sukumar, S., Marsadek, M., Ramasamy, A., Mokhlis, H. Grey Wolf Optimizer Based Battery Energy Storage System Sizing for Economic Operation of Microgrid, in Proc. IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe 2018), Palermo, Italy, pp. 1-5, 2018. <https://doi.org/10.1109/eeeic.2018.8494501>
- [10] Photovoltaic geographical information system, https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ [pristupljeno 03.11.2020].
- [11] Bailes, A. Electricity Demand and the Duck Curve, 2015. <https://www.energyvanguard.com> [pristupljeno 03.11.2020].
- [12] Tran-Quoc T., Le Pivert, X., Saheli, M., Beaudé, O. Stochastic approach to assess impacts of electric vehicles on the distribution network, in Proc. 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Europe 2012), Berlin, pp. 1-8, 2012. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01103833> [pristupljeno 03.11.2020].
- [13] Microgrid, Battery Energy Storage and Distributed Generation Solutions – Global Customer References, ABB, <https://library.abb.com> [pristupljeno 03.11.2020].

AUTORI

Vladan Ristić, AD „Elektromreža Srbije“ / Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, vladan.ristic@ems.rs
dr Nikola Rajaković, Savez energetičara Srbije / Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, rajakovic@etf.rs
Dragana Vujanović, Brose d.o.o. Beograd – Palilula, dragana.v1995@gmail.com

Značaj monitoringa kvaliteta vode u jezerima hidroelektrana

The Significance of Water Quality Monitoring in Hydropower Lakes

Vladana N. Rajaković-Ognjanović*, Tina Dašić *

Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

Rezime - Pri planiranju akumulacionih hidroelektrana, važan segment je i adekvatan monitoring kvaliteta vode. Uz odgovarajući monitoring program omogućava se višenamensko korišćenje veštačkih jezera. Eutrofikacija vode u jezeru je fenomen koji je prisutan kod svih jezera. Posledica eutrofikacije jeste ugroženost akvatičnog ekosistema. Eutrofikacija je fenomen koji nastaje kao odgovor akvatičnog ekosistema na povećanu koncentraciju nutrijenata, fosfora (P) i azota (N), usled prirodnih i antropogenih aktivnosti. Pored osnovnih, klasičnih pokazatelja kvaliteta vode koji su u korelaciji sa eutrofikacijom najnovija istraživanja pokazuju da su jezera sve više izložena eutrofikaciji usled klimatskih promena i opšte prisutnog zagađenja životne sredine. U ovom radu prikazani su rezultati analize kvaliteta vode reke Komarnice, u Crnoj Gori na kojoj se planira izgradnja akumulacione pribranske HE Komarnica. Ključni zaključci istraživanja su: uvesti monitoring (permanentnu kontrolu) kvaliteta vode u jezerima kako bi se što uspešnije kontrolisala i sprečila eutrofikacija. Izuzetno je važno razumeti da ne postoji jedinstvena jednačina ili formula koja bi mogla da važi za monitoring svih jezera. Svako jezero ima svoje jedinstvene karakteristike. Zavisnost hlorofila, koncentracije fosfora i zapremine jezera menja se u zavisnosti od meseca, sezone i godine. Predlog za monitoring kvaliteta vode na jezeru koje će biti izgrađeno na Komarnici, koje predstavlja deo sistema buduće hidroelektrane je mesečno praćenje koncentracije hlorofila, nutrijenata i zapremine jezera. Sezonsko praćenje zavisi od padavina, hidroloških i limnoloških karakteristika i trendova sušnih i kišnih epizoda. Analize i dosadašnja istraživanja su pokazala da uvođenje obaveznih parametara za praćenje kvaliteta vode ne poskupljuje proizvodnju električne energije i očuvanje energije, a značajno poboljšava i unapređuje kvalitet životne sredine.

Ključne reči - monitoring, kvalitet vode, eutrofikacija, hidroelektrane.

Abstract - When planning the construction of a hydroelectric power plant, an important segment is adequate monitoring of water quality. With an appropriate monitoring program, the multifunctional use of artificial lakes is enabled. Eutrophication (nutrient over-enrichment) of water in a lake is a phenomenon that has been noticed in all lakes. The consequence of eutrophication is the endangerment of the aquatic ecosystem. Eutrophication is a phenomenon that occurs as a response of the aquatic ecosystem to the increased concentration of nutrients,

phosphorus (P) and nitrogen (N), due to natural and anthropogenic activities. Recent research indicates a correlation between local climate change and water circulation and the impact of climate change on all phenomena in the hydrological cycle. Temperature fluctuations, huge amounts of rain when precipitation is analysed, constant heating and increase in humidity all affect more intense eutrophication. The key conclusions of the research dealing with the construction of the hydroelectric power plant in Komarnica are: to introduce monitoring (permanent control) of water quality in lakes in order to minimize or control, even prevent eutrophication. Each artificial lake has its own unique characteristics. The dependence of chlorophyll, phosphorus and lake volume varies depending on the month, season and year. The proposal for the lake that will be built on Komarnica, which is part of the future hydroelectric power plant, is a monthly monitoring of the concentration of chlorophyll, nutrients and the volume of the lake. Seasonal monitoring depends on precipitation, hydrological and limnological characteristics and trends of dry and rainy episodes. Analyzes and previous research have shown that the introduction of mandatory parameters for monitoring water quality does not increase the cost of electricity production and energy conservation, but significantly improves and enhances the quality of the environment.

Index terms - monitoring, water quality, eutrophication, hydropower plants.

I UVOD

Eutrofikacija jezerskih voda fenomen je koji je prisutan kod svih jezera (veštačkih i prirodnih), a posebno je važna sa aspekta uticaja na kvalitet vode jer od dobrog kvaliteta vode zavisi mogućnost korišćenja akumulacije za planirane namene. Proces eutrofikacije posledica je činjenice da su jezera (akumulacije) otvoreni dinamički ekosistemi u kojima se odvijaju sukcesivne promene sastava biocenoze dok se ne uspostavi neko ravnotežno (klimaksno) stanje, u kome je biocenoza stabilizovana i u ravnoteži sa biotopom [1, 2]. Nivo trofičnosti na kom će se uspostaviti ravnotežno stanje zavisi od različitih parametara kao što su: klimatski, hidrogeološki, morfometrijske karakteristike jezera (akumulacije), karakteristike sliva (vegetacija, gustina naseljenosti, način korišćenja sliva), antropogeni uticaji i drugi. Ključni parametar, prema brojnim istraživanjima, je koncentracija nutrijenata koji dospevaju u jezero. Od nutrijenata posebno se ističu koncentracija fosfora (P)

i azota (N). Navedeni nutrijenti predstavljaju hranljivu materiju za alge (fitoplankton) i vodene biljke i veća koncentracija azota i fosfora uzrokuje prekomerni rast i razmnožavanje fitoplanktona i akvatičnog bilja. Bujanjem prve karike u lancu ishrane, dolazi do porasta brojnosti i biomase i viših nivoa akvatičnih organizama (zooplankton, ribe i ostala vodena fauna). Životni procesi kao što su disanje, ekskrecija i izumiranje dovode do narušavanja kvaliteta vode (smanjuje se providnost i koncentracija rastvorenog kiseonika, a povećava se HPK, BPK, pH vrednost), jezero stari, odnosno pogoršava se njegovo trofičko stanje.

U prvim godinama nakon punjenja, akumulacije predstavljaju mlade ekosisteme, sa malim brojem biljnih i životinjskih vrsta i malom biomasom i uglavnom se nalaze u oligotrofnom stanju (stanju najboljeg kvaliteta). Vremenom, u jezeru dolazi do sukcesivnih promena koje u velikoj meri zavise od količine hranljivih materija koje dospevaju iz spoljašnje sredine. Permanentnim praćenjem parametara kvaliteta vode moguće je pravovremeno reagovati i preduzeti odgovarajuće mere kako bi se kvalitet vode u akumulaciji održao na zahtevanom nivou. Za kontrolu eutrofikacije potrebno je pratiti i meriti koncentracije nutrijenata (obavezno meriti ukupnu koncentraciju azota (N_{tot}) i fosfora (P_{tot})), koncentraciju hlorofila, prozračnost vode merenjem dubine pomoću seki diska (SD) i hemijsku potrošnju kiseonika (HPK) [3, 4].

II OCENA STEPENA TROFIČNOSTI

Za ocenu stepena trofičnosti jezera moraju biti poznati i usvojeni određeni standardi. Najčešće se koristi i primenjuje Karlsonov standard o indeksu trofičnosti, mada postoje i druge klasifikacije [3]. Vrednosti koje definišu trofičnost jezera prema ovom standardu prikazane su u tabeli 1 [4]. U prvoj koloni je opisno prikazan stepen trofičnosti, a u drugim kolonama date su vrednosti parametara koje definišu odgovarajući stepen trofičnosti. Za sve navedene parametre (ukupna koncentracija fosfora i azota, koncentracija hlorofila i hemijska potrošnja kiseonika) sa većom vrednošću raste i stepen eutrofikacije jezera. Samo za parametar kojim se određuje prozračnost jezera seki diskom je obrnuto proporcionalna zavisnost. Što je veća prozračnost vode to je trofičnost jezera manja.

Tabela 1. Standardne vrednosti za ocenu stepena trofičnosti jezera [4]

Stepen eutrofikacije	Sadržaj hlorofila (mg/m^3)	P_{tot} (mg/m^3)	N_{tot} (mg/m^3)	HPK (mg/L)	SD (m)
Oligotrofno	0-1,0	0-2,5	0-30	0-0,3	5,0-10,0
Slabo mezotrofno	1,0-2,0	2,5-5,0	30-50	0,3-0,4	1,5-5,0
Mezotrofno	2,0-4,0	5,0-25	50-300	0,4-2,0	1,0-1,5
Izraženo mezotrofno	4,0-10,0	25-50	300-500	2,0-4,0	0,4-1,0
Eutrofno	10,0-65	50-200	500-2000	4,0-10	0,3-0,4
Hipereutrofno	65,0-100	200-600	2000-6000	10,0-25	0-0,3

Pored osnovnih, klasičnih pokazatelja kvaliteta vode koji su u korelaciji sa eutrofikacijom najnovija istraživanja pokazuju da su jezera sa hladnom vodom, na visokoj nadmorskoj visini, izložena eutrofikaciji usled klimatskih promena i opšte prisutnog zagađenja životne sredine. U studiji koju je grupa kinsekih istraživača objavila [5] istaknuta je zavisnost između lokalnih klimatskih promena i kruženja vode i uticaja klimatskih promena na sve pojave u hidrološkom ciklusu. Promena (fluktuacija) temperature, anomalije (ogromne količine kiše) koje se javljaju

kod analiza padavina, uz konstantno zagrevanje i porast vlage ukazale su da su svi navedeni faktori značajni za eutrofikaciju. Studija je ukazala na sledeće: jezera na visokoj nadmorskoj visini u kojima je hladna voda, kod kojih je antropogeno zagađenje skoro zanemarljivo izložena su klimatskim promenama i utiču na stepen trofičnosti (podstiču eutrofikaciju) jezerske vode [5].

Da bi se kvalitet vode u budućoj akumulaciji mogao predvideti i modelirati neophodno je poznavanje parametara kvaliteta vodotoka koji se pregrađuje, odnosno na kome će biti formirana akumulacija. Dobar kvalitet vode u vodotoku, posebno niska koncentracija nutrijenata, povoljni su pokazatelji koji ukazuju na malu mogućnost razvoja eutrofikacionih procesa. U suprotnom, ako parametri kvaliteta nisu povoljni, potrebno je preduzeti odgovarajuće mere na slivu, već u periodu planiranja sistema i njegove izgradnje, kako bi se kvalitet vode doveo do zadovoljavajućih vrednosti. Dobar primer takvih aktivnosti je sliv reke Komarnice, na kojoj se planira izgradnja akumulacione hidroelektrane. U naselju Šavnik, koje će se nalaziti na rubu buduće akumulacije, izgrađeno je postrojenje za prečišćavanje otpadnih voda, kako bi kvalitet vode u reci bio što višeg kvaliteta.

Rezultati dobijeni nakon analize uzoraka vode duž toka reke Komarnice prikazani su u tabeli 2. Svi parametri, odnosno svi dobijeni rezultati ukazuju da vode na ispitivanim mernim mestima odgovaraju klasi vode koja se u prirodnom stanju može koristiti za piće, uz eventualnu dezinfekciju. Sa aspekta mogućeg razvoja procesa eutrofikacije posebno je značajno (ohrabrujuće) veoma malo prisustvo azotnih i fosfatnih jedinjenja, koji predstavljaju glavne nutrijente, odnosno pokretače procesa eutrofikacije. Na slici 1 prikazan je merni instrument za merenje koncentracije kiseonika u vodi, koji je korišćen pri analizi kvaliteta vode reke Komarnice.

Tabela 2. Rezultati analiza uzoraka iz toka reke Komarnice

parametri, jedinice	Uzorci*			
	#1	#2	#3	#4
Boja ($^{\circ}Pt-Co$)	0	0	0	0
Mutnoća (NTU)	0,36	0,20	0,41	0,29
Temperatura ($^{\circ}C$)	7,9	7,4	8,2	9,3
Rastvoreni kiseonik, O_2 , mg/L	10,83	10,86	10,32	10,28
pH	7,81	7,78	7,70	7,99
EC, $\mu S/cm$	168	170	174	225
TDS, mg/L	81,5	85,3	82,9	106,9
Ukupna tvrdoća, $mg/L CaCO_3$; $^{\circ}dH$	132; 7,4	126; 7,0	134; 7,5	164; 9,2
Bikarbonati, HCO_3^- , mg/L	166,76	154,74	124,16	205,16
Litijum, Li^+ , mg/L	0	0	0	0
Natrijum, Na^+ , mg/L	2,18	2,56	0,07	1,43
Amonijum, NH_4^+ , mg/L	0,05	0	0	0
Kalcijum, Ca^{2+} , mg/L	49,6	46	54	62
Magnezijum, Mg^{2+} , mg/L	2,1	1,6	0,1	1,8
Kalijum, K^+ , mg/L	3,4	2,7	0	7,2
Fluoridi, F^- , mg/L	0,00	0,00	0,00	0,00
Hloridi, Cl^- , mg/L	1,29	0,98	1,31	1,25
Nitrati, NO_3^- , mg/L	0	0	0	0
Nitriti, NO_2^- , mg/L	0	0	0	0,38
Fosfati, PO_4^{3-} , mg/L	0	0	0	0
Sulfati, SO_4^{2-} , mg/L	3,22	2,37	2,60	3,96

*Legenda (lokacije uzorkovanja): #1-Dubravka vrelo; #2-Uzvodno od Dubravskih vrela; #3-Izvor na levoj obali Komarnice; #4-Reka Komarnica-profil Duži.



Slika 1. Određivanje sadržaja koncentracije rastvorenog kiseonika na licu mesta duž reke Komarnice

Izbor mera koje će se sprovesti u cilju zaštite akumulacije od eutrofikacije zavise od karakteristika konkretnog problema, ekoloških i ekonomskih faktora. Ipak, neke opšte mere koje se po pravilu sprovode za svaku akumulaciju su: čišćenje akumulacije do kote normalnog uspora neposredno pre prvog punjenja, kontrola kvaliteta voda koje ulaze u jezero i po potrebi planiranje izgradnje postojenja za prečišćavanje otpadnih voda kako bi se sprečilo unošenje nutrijenata, kontrola upotrebe đubriva u slivu akumulacije i izbegavanje dugih plitkih deonica. Važan segment pri planiranju brana i akumulacija je i planiranje adekvatnog monitoringa kvaliteta vode.

III MONITORING KVALITETA VODE U JEZERIMA

Pri razmatranju sisitema brana – akumulacija jedno od ključnih pitanja je aspekt bezbednosti. Bezbednost samog pregradnog objekta – brane definisana je normativnim dokumentima, od kojih je najvažniji Pravilnik o tehničkom osmatranju visokih brana, u okviru koga je striktno definisan način kontinuiranog praćenja stanja brane i pripadajućih objekata. Važan segment je i adekvatan monitoring kvaliteta vode. Uz odgovarajući monitoring program omogućava se pravovremeno reagovanje u slučaju da dođe do pogoršanja parametara kvaliteta vode [6].

Nulto stanje je važno merenje, koje je neophodno sprovesti nakon prvog punjenja akumulacije, kako bi se kasnijim redovnim osmatranjima mogle pratiti promene kvaliteta vode. Dalje osmatranje podrazumeva kontinuirano praćenje (najmanje jednom mesečno) manjeg broja ključnih parametara kvaliteta i povremeno sprovođenje kompletnih analiza kvaliteta vode. Ključni parametri koje je neophodno pratiti [6]:

- koncentracija ukupnog fosfora,
- koncentracija nitrata,
- sadržaj hlorofila (mg/L),
- ukupne rastvorene materije (*eng.* total dissolved solids-TDS),

- mutnoća,
- sadržaj rastvorenog kiseonika,
- pH vrednost vode,
- biohemijska potrošnja kiseonika za pet dana (BPK₅) na 20 °C,
- gustina cijanobakterija.

IV ZAKLJUČAK

Veštačka jezera osim njihove osnovne funkcije (hidroenergetsko korišćenje, snabdevanje vodom stanovništva i/ili industrije, navodnjavanje), uz adekvatno održavanje, praćenje i kontrolu kvaliteta vode, mogu imati i druge koristi za stanovništvo. Akumulacije se mogu koristiti za različite aktivnosti, od rekreativnih, sportskih, do komercijalnih i mogu biti korisne za širu zajednicu. Eutrofikacija jezerske vode može ugroziti sve te aktivnosti, zbog čega je potrebno preduzeti odgovarajuće mere u cilju zaštite kvaliteta vode u akumulacijama [1]. Pored opštih mera, koje se sprovode za svaku akumulaciju (čišćenje akumulacije do kote normalnog uspora neposredno pre prvog punjenja, kontrola kvaliteta voda koje ulaze u jezero), primenjuju se i mere specifične za svaki objekat. Važan segment pri planiranju brana i akumulacija je i planiranje adekvatnog monitoringa kvaliteta vode. Praćenje koncentracije najznačajnijih parametara kvaliteta potrebno je sprovoditi stalno (na mesečnom nivou), a posebno su značajne koncentracije hlorofila i nutrijenata. Sezonsko praćenje zavisi od padavina, hidroloških i limnoloških karakteristika i trendova sušnih i kišnih epizoda. Analize i dosadašnja istraživanja su pokazala da uvođenje obaveznih parametara za praćenje kvaliteta vode značajno poboljšava brigu i unapređuje kvalitet životne sredine.

LITERATURA

- [1] Đorđević, B. i dr.: Izbor mera zaštite akumulacija od eutrofikacije, in Proc. Zbornik radova Akumulacije kao izvorišta za snabdevanje vodom, Leskovac, 13-15. decembar 1995.
- [2] Đorđević, B., Dašić, T. *Ekologija vodoprivrednih sistema*, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Akademija inženjerskih nauka Srbije, 2019.
- [3] *Eutrophication of Water, Monitoring, Assessment and Control*, OECD, pp. 154, 1982. <https://doi.org/10.1002/iroh.19840690206>
- [4] Du, H., Chen, Z., Mao, G., Chen, L., Crittenden, J., Li, Y.R.M., Chai, L. Evaluation of eutrophication in freshwater lakes: A new non-equilibrium statistical approach, *Ecological indicators*, Vol. 102, pp. 686-692, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.03.032>
- [5] Lu, X., Lu, Y., Chen, D., Su, C., Song, S., Wang, T., Tian, H., Liang, R., Zhang, M., Khan, K. Climate change induced eutrophication of cold-water lake in an ecologically fragile nature reserve, *Journal of Environmental Sciences*, Vol. 75, pp. 359-369, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.05.018>
- [6] Valle, A.C.M., Aguiar, M.A.A., Cruz G.Jr. The impact of water quality as an environmental constraint on operation planning of a hydro-thermal power system, *Renewable Energy*, Vol. 34, Issue. 3, pp. 655-659, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.05.024>

AUTORI

dr Vladana N. Rajaković - Ognjanović, vanredni profesor, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo, vladana@grf.bg.ac.rs

dr Tina Dašić, vanredni profesor, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Institut za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo, mtina@grf.bg.ac.rs

Kratkoročno predviđanje vibracionog ponašanja Fransis turbine nakon višedecenijske eksploatacije

Short-Term Prediction of Francis Turbine Vibration Behavior after Decades of Operation

Jovana Petrović, Ivan Božić

Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet

Rezime - Savremeni pristupi u prognoziranju i sprečavanju havarije, smanjenju broja i dužine trajanja zastoja, otkrivanju i praćenju otkaza u stvarnim višedecenijskim pogonskim uslovima hidroagregata, zasnivaju se na vibrodijagnostici. Multidisciplinarnost takvih pristupa ogleda se u identifikaciji pojedinih vibracija u hidroagregatima, primeni različitih vibrodijagnostičkih metoda, oceni kvaliteta izmerenih podataka, analizi i predikciji zasnovanih na veštačkoj inteligenciji. U radu je prikazan jedan od mogućih pristupa rešavanja kompleksne problematike predviđanja ponašanja jedne hidraulične turbine koja je u eksploataciji više od pola veka. Za kratkoročno predviđanje apsolutnih i relativnih vibracija razvijen je odgovarajući algoritam korišćenjem veštačkih neuronskih mreža. Dobijeni rezultati su prikazani u zavisnosti od različitih eksploatacionih uslova.

Ključne reči - Fransis turbina, vibracione karakteristike, predikcija, neuronske mreže

Abstract - Contemporary approaches in forecasting and preventing accidents, reducing the number and duration of downtimes, detecting and monitoring the failures in the real decades-long operating conditions of units in hydropower plants, are based on vibrodiagnostics. The multidisciplinary character of such approaches is reflected in the identification of certain vibrations in the hydro-aggregates, the application of various vibrodiagnostic methods, the quality assessment of measured data, as well as analysis and prediction based on artificial intelligence. The paper presents one of the possible approaches to solving the complex problem of predicting the behavior of a hydraulic turbine that has been in operation for more than half a century. An appropriate algorithm using artificial neural networks has been developed for short - term prediction of absolute and relative vibrations. The obtained results are presented depending on various operating conditions.

Index Terms - Francis turbine, vibration characteristics, prediction, neural networks

Merenje i analiza mehaničkih vibracija je, zbog svoje pouzdanosti, najčešće upotrebljavana tehnika detekcije i lokalizacije oštećenja rotirajućih mašina. U odnosu na druge metode ispitivanja bez razaranja, kontinualni monitoring vibracija pruža dovoljno informacija o stanju delova sistema, čime se sprečava brzo širenje oštećenja i pojava havarijskog otkaza.

Često vrlo male i u početku zanemarljive vibracije mogu pobuditi rezonanciju nekih drugih delova strukture i mogu se pojačati do te mere da postanu glavni i vrlo ozbiljan izvor buke i značajnih vibracija. Istraživanjem problema vibracija kod rotirajućih mašina došlo se do zaključka da je veliki broj problema vibracija uzorkovan malim brojem uzoraka, od kojih su najčešći debalans, nesaosnost i rezonanca [1]. Jasnim definisanjem stanja rada turbogeneratorskog sistema, u [2] je data mogućnost formiranja analize stabla otkaza sastavnih komponenta mašinskog sistema. Detaljno istraživanje vibracija u hidroagregatima, uzroci njihovog nastanka kao i promene stanja i karakteristika hidrauličnih turbina usled vibracija dato je u [3].

S druge strane, u cilju ocene vibracionog stanja hidroturbine i automatizacije vibrodijagnostičkih metoda sve je češća upotreba metoda veštačke inteligencije (VI) [4,5].

Primena veštačke neuronske mreže (VNM) za kratkoročno predviđanje vibracija jednog hidroagregata data je u [6], gde su za ulazne uticajne parametre (kota akumulacije, snaga generatora, pritisci u spirali i cevovodu, temperature nosećeg i vodećeg ležaja) razvijeni modeli predikcije relativnih i apsolutnih vibracija vratila u zoni gornjeg vodećeg ležaja i apsolutnih vibracija kućišta turbinskog ležaja.

Upravo su u nastavku ovog rada prikazani neki od rezultata primene VNM za kratkoročno predviđanje vibracionog ponašanja hidroagregata koji je u višedecenijskoj eksploataciji.

II VIBRACIJE U HIDROAGREGATIMA

Savremeni sistemi za monitoring rada hidroelektrana prikupljaju podatke i obrađuju sve neophodne veličine u procesu upravljanja i zaštita hidroagregata. Uopšteno, upravljanje i kontrola rada agregata (turbina i generator) se sastoji od:

- kontrole mašine sa stanovišta optimalnog korišćenja agregata;
- opšteg stanja agregata sa stanovišta održavanja;
- načina otkrivanja mogućih otkaza;
- analize, dijagnostike i trenda otkrivenih otkaza.

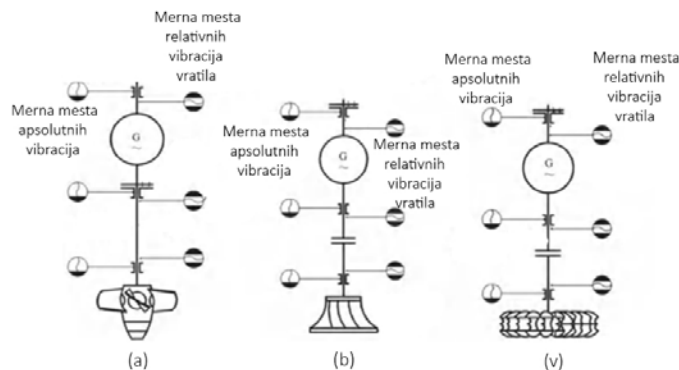
Vibracije u hidrauličnim turbinama, prema uzroku njihovog nastanka, su raznovrsne, ali su najčešće posledica:

- protoka kroz turbinu (turbulentno strujanje u kompleksnoj geometriji strujnog prostora sa neuniformnim i nestacionarnim karakterom);
- nestabilnosti protoka (pri normalnim prelaznim režimima ili pri ustaljenom radu agregata u parcijalnim režimima opterećenja);
- kavitacije;
- hidroelastičnih vibracija (posledica geometrije obrtnog kola, tj. hidrauličnih profila lopatica obrtnog kola);
- karakteristika konstrukcije turbine i njenih pojedinih sklopova i mehaničkih delova.

U cilju određivanja vibracionog stanja i rada generatora, prate se vibracije kućišta statora, jezgra statora, kućišta vodećeg (radijalnog) ležaja, kućišta nosećeg (aksijalnog) ležaja i dr.

Kontinualnim monitoringom i analizom vibracija celokupnog hidroagregata u toku eksploatacije se prati njegovo stvarno stanje i utvrđuju promene koje blagovremeno definišu potrebne aktivnosti preventivnog održavanja.

Različiti tipovi i specifičnosti konstrukcija hidrauličnih turbina, koji su ugrađeni u takve agregate, uslovljavaju zaseban vibrodiagnostički pristup. Nezavisno od tipa konvencionalnih turbina, uobičajena merna mesta za kontinualno merenje vibracija prikazana su na slici 1 [7].

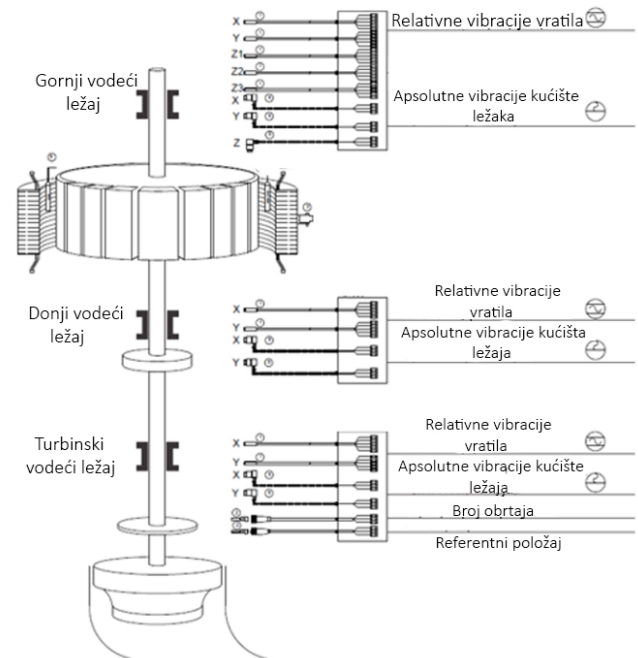


Slika 1. Merna mesta vibracija različitih tipova turbina:
a) Kaplan turbina; b) Francis turbina; c) Pelton turbine

Merenja se obavljaju kako na nepokretnim delovima agregata (merenje apsolutnih vibracija kućišta ležajeva i generatora, glava namotaja, magnetnog kola) i na njenim obrtnim delovima (relativne vibracije vratila). Za jednu Francis turbine principijalna šema merenja vibracija data je na slici 2.

Pored kontinualnog (on-line) merenja u realnom vremenu rada agregata, vrše se i periodična (off-line) ispitivanja na mašini koja

je zaustavljena. Analiziranje stanja i vibrodiagnostičkog ponašanja agregata zavisi od kvaliteta dobijenih rezultata pri ispitivanju u ustaljenim i prelaznim režimima (puštanje u rad, kočenje pri zaustavljanju, zaletanje pri naglom rasterećenju), ali i pri različitim toplotnim stanjima mašine i pri uslovima rada (obrtanje u nepobuđenom stanju, prazan hod pobuđena mašina, sinhronizacija, različiti režimi opterećenja).



Slika 2. Principijalna šema merenja vibracija na hidroagregatu sa Francis turbinom [8]

III VEŠTAČKE NEURONSKE MREŽE ZA KRATKOROČNO PREDVIĐANJE

U cilju planiranja pouzdane eksploatacije hidroelektrana i donošenja pravovremenih odluka pri njihovom održavanju, predviđanje vibracionog ponašanja hidroagregata može biti od izuzetne koristi. Upravo takve predikcije na osnovu realnih postojećih arhiviranih podataka iz proizvodnje omogućuju upravljanje rizikom od otkaza svakog hidroagregata.

Metoda VNM je tehnika računarske inteligencije koja se zasniva na sistemu za obradu informacija ljudskog mozga, a koji se mogu koristiti kao alternativna metoda za inženjerske analize i predviđanja [9].

U skladu sa sve većom savremenom primenom VI u raznim domenima tehnike, kao i njenih razvijenih modela za raznovrsne predikcije, i u hidroenergetskoj praksi se VI pokazala kao pouzdan alat, posebno imajući u vidu stohastični karakter brojnih radnih parametara.

Metode VI za višenamenske predikcije se zasnivaju na istorijskim podacima merenih i radnih parametara, pa se, i predviđanjem određenih vibracionih veličina može blagovremeno sprečiti poremećaj rada hidroagregata, a takođe veća oštećenja i havarije.

Upravo prednosti primene VNM se ogledaju u njihovim sposobnostima samoučenja, te se predviđanje realizuje kao predviđanje budućeg ponašanja na osnovu ponašanja iz prošlosti. Među raznovrsnim merenim podacima obično ne postoje jasne funkcionalne veze, te su višeparametarske relacije i predviđanja jedino mogu utvrditi pomoću VI.

VNM predstavlja sistem međusobno povezanih elemenata, neurona, koji se sposoban da definisanim metodama uči, aproksimira funkciju zavisnosti ulaznih i izlaznih veličina na osnovu predočenih obučavajućih parova [9].

Za obučavanje VNM potrebno je formirati obučavajuće parove, korišćenjem prikupljenih podataka. Za dobijanje što boljih rezultata, tj. mreža koja će generisati najmanju grešku potrebno je varirati parametre algoritma učenja, arhitekture mreže, aktivacionu funkciju itd.

Povećavanjem broja skrivenih slojeva i neurona u skrivenim slojevima ima svojih prednosti i mana. Povećanjem broja skrivenih slojeva i neurona rezultuje boljom sposobnošću generalizacije VNM. Međutim, kod obučavanja neuronskih mreža, veoma je važna brzina obučavanja, odnosno brzina konvergencije koja se smanjuje sa povećanjem broja skrivenih slojeva i neurona u skrivenim slojevima [10].

U nastavku rada je prikazana jedna od mogućnosti primene VNM za procenu dinamičkog ponašanja agregata koji je više od pola veka u eksploataciji. Na osnovu arhiviranih podataka merenih apsolutnih i relativnih vibracija u pogonu, razvijen je odgovarajući model predikcije i prikazani dobijeni rezultati uzimajući u obzir dominantne uticajne parametre.

IV KRATKOROČNO PREDVIĐANJE VIBRACIONOG PONAŠANJA FRANSIS TURBINE

Za predviđanje vibracije razvijen je model prikazan na slici 3 i primenjen za agregat A u HE „Vrla 3“, koja se nalazi u sistemu Vlasinskih hidroelektrana [11].

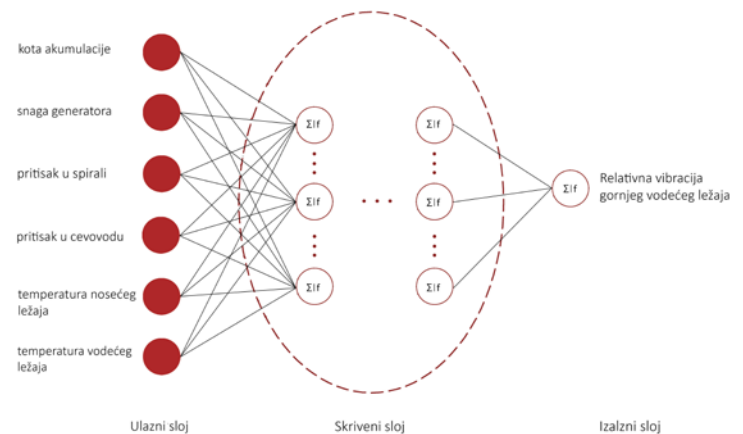
Tabela 1. Tehničke karakteristike hidroelektrane „Vrla 3“

HE Vrla 3	
Instalisana snaga HE	28,95 MW
Instalisani protok HE	18,4 m ³ /s
Agregat A - turbina	
Tip	Fransis
Nominalna snaga	13,5 MW
Maksimalni pad	192,3 m
Minimalni pad	168,3 m
Nominalni protok	8,5 m ³ /s
Prečnik obrtnog kola	2 m
Agregat A - generator	
Prividna snaga	16 MVA
Sinhrona brzina obrtanja	600 o/min
Faktor snage	0,9

Osnovne karakteristike hidroelektrane i razmatranog hidroagregata su prikazane u tabeli 1.

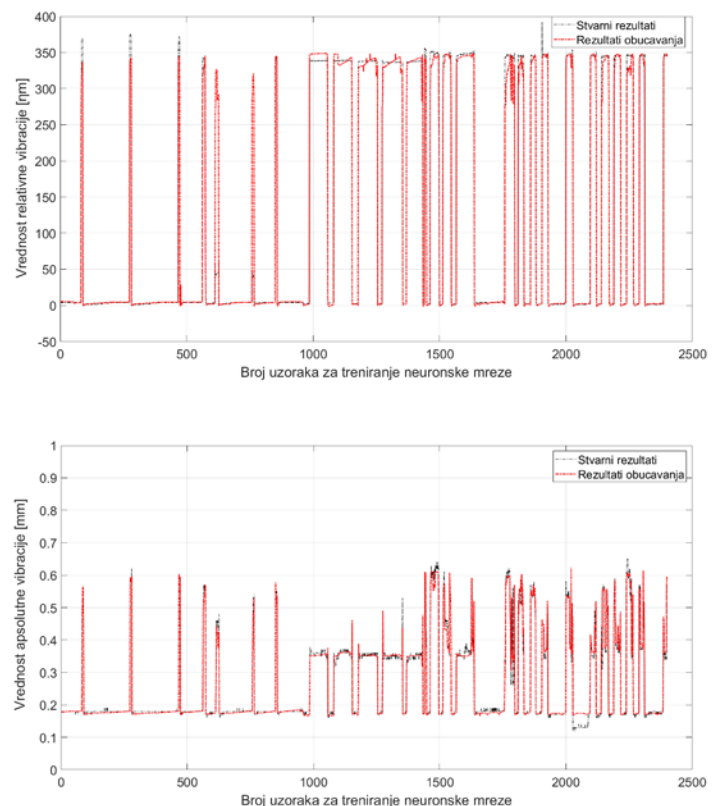
Arhitektura mreže za kratkoročno predviđanje sa ulaznim

podacima data je na slici 3. Zbog jednostavnosti prikaza arhitektura je predstavljena u uprošćenom obliku, dok se realna mreža sastoji od 9 skrivenih slojeva.



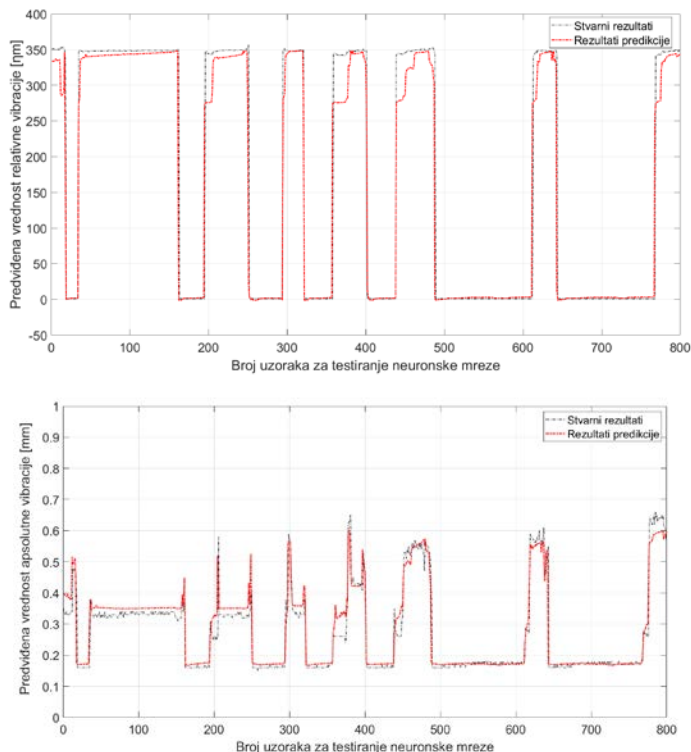
Slika 3. Arhitektura veštačke neuronske mreže

Detaljna istraživanja, razvoj modela i rezultati predikcije pojedinih vibracionih parametara prikazani su u [6], a u nastavku je dat primer obučavanja VNM za kratkoročno previđanje relativnih vibracija gornjeg vodećeg i apsolutnih vibracija turbinskog ležaja (slika 4).



Slika 4. Rezultati treniranja veštačke neuronske mreže za kratkoročno predviđanje relativnih i apsolutnih vibracija

Na apscisi prikazanih dijagrama nalazi se broj uzorka za treniranje (obučavanje) neuronske mreže, dok se na ordinatama nalaze vrednosti relativnih i apsolutnih vibracija, respektivno. Odstupanja koja se uočavaju između obučanih vrednosti vibracija u odnosu na stvarne vrednosti su u zoni očekivane greške i kao takva su prihvatljiva.



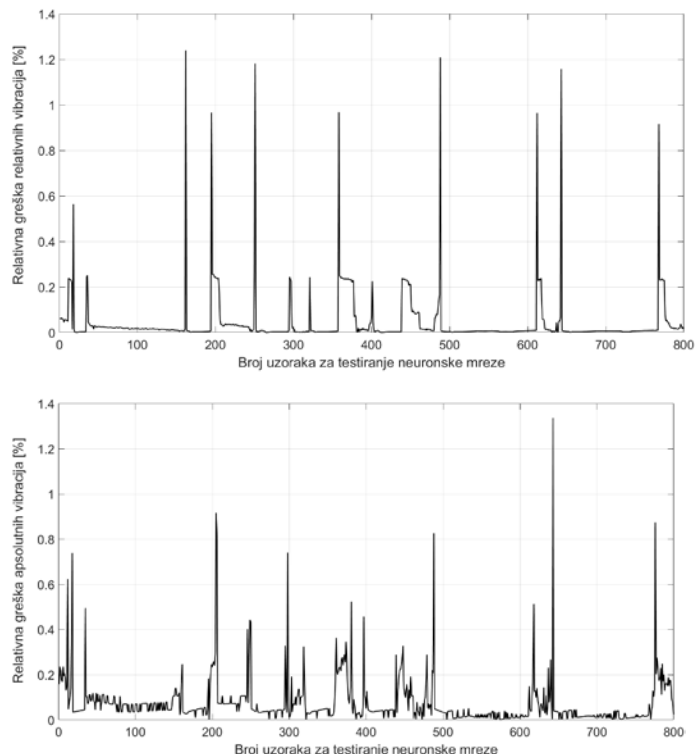
Slika 5. Rezultati testiranja veštačke neuronske mreže za kratkoročno predviđanje relativnih i apsolutnih vibracija

Na slici 5 prikazani su rezultati testiranja obučene mreže za podatke koji nisu obuhvaćeni treniranjem. U cilju kratkoročnog predviđanja relativnih i apsolutnih vibracija uočava se dobra obučenost mreže i trendovi promene vibracija za posmatrani period. U tabeli 2 su, pomoću vrednosti MAPE, MAE i RMSE, prikazane ocene obučenosti mreže, kao i kvaliteta njene primenljivosti za kratkoročne predikcije razmatranih vibracija.

Tabela 2. Greške predikcije

		MAPE [%]	MAE	RMSE
Relativne vibracije vratila u zoni gornjeg vodećeg ležaja	Treniranje	0.0328	0.0038	0.6325
	Test	0.0779	0.0052	0.7839
Apsolutne vibracije kućišta turbinskog ležaja	Treniranje	0.016	0.00017	0.00044
	Test	0.09	0.0092	0.0013

Na slici 6 je grafički predstavljena relativna greška testiranja veštačke neuronske mreže za kratkoročno predviđanje pomenutih relativnih i apsolutnih vibracija. Maksimalna relativna greška predikcije i relativnih i apsolutnih vibracija ne prelazi 1,5%, što ukazuje na pouzdanost primene razvijenih modela za kratkoročno predviđanje.



Slika 6. Rezultati relativne greške testiranja veštačke neuronske mreže za kratkoročno predviđanje relativnih i apsolutnih vibracija

Neophodno je istovremeno istaći i da su vrednosti apsolutnih vibracija turbinskog ležaja zadovoljavajući za dugotrajni rad, tj. prema standardu ISO 10816-5, za broj obrtaja 600 o/min, ove vibracije pripadaju grupi B [12]. S druge strane, vrednosti relativnih vibracija gornjeg vodećeg ležaja svrstavaju razmatrani hidroagregat u grupu C (standard ISO 7919-5) tj. u mašine sa nezadovoljavajućim vibracijama za kontinualni dugotrajni rad. Prethodno navedeno ukazuje da je za razmatrani hidroagregat sa Fransis turbinom, koji je u višedecenijskoj eksploataciji, praćenje i predikcija njegovog vibracionog ponašanja od izuzetnog značaja i da prikazana metodologija ima svoju veliku praktičnu primenljivost.

V ZAKLJUČAK

Dalje usavršavanje algoritma za predikciju vibracionog ponašanja hidroagregata u eksploataciji, ali i ostalih karakteristika hidrauličnih turbine može podići pouzdanost cele hidroelektrane. Kvalitetne predikcije budućeg ponašanja hidroagregata smanjuju njihov eventualni zastoj ili havariju, ali i doprinose donošenju pravovremenih odluka o počecima njihove modernizacije i revitalizacije.

Primena i značajnost predviđanja vibracija hidroagregata koristeći VNM ogleda se u tome da je i pored predviđanja samih vibracija, moguće predvideti uzroke njihovih pojava, kao i ponašanje vibracija sa promenom uticajnih faktora. Analize dobijenih rezultata i dostupnih savremenih metoda zasnovanih na veštačkoj inteligenciji pokazuju svrsishodnost razvijenog algoritma, ali i mogućnost za njegovo dalje unapređivanje.

ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije i Javnom preduzeću "Elektroprivreda Srbije", ogranak HE Đerdap - Vlasinske hidroelektrane.

LITERATURA

- [1] Criqui, A.F. False and misleading sources of vibration, in Proc, 23rd Turbomachinery Symposium, Texas A&M University. Turbomachinery Laboratories, pp. 137-150, 1994. <https://doi.org/10.21423/R1VQ1N>
- [2] Hartog, D. *Vibracije u mašinstvu*, Beograd, 1972.
- [3] Jiang, H., Dong, S., Liu, Z., He, Y., Ai, F. Performance Prediction of the centrifugal compressor based on a limited number of sample data, *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 5954128 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5954128>
- [4] Владиславлев, Л.А., *Вибрация гидроагрегатов гидроэлектрических станций*, Энергия, Москва, 1972. http://lib.hydropower.ru/books/doc_00031382.pdf
- [5] Šaranović, I., Janković, N. Dijagnostika vibracionog stanja hidroturbina primenom koncepta veštačke inteligencije, in Proc. *Međunarodni simpozijum Infoteh Jahorina*, 2002.
- [6] Cvetković, D., Prašćević, M. *Buka i vibracije*, Fakultet zaštite na radu, Niš, 2005.
- [7] Petrović J. *Predikcija vibracionih karakteristika hidraulične turbine u eksploataciji pomoću veštačkih neuronskih mreža*, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, Beograd, 2020.
- [8] Wu, Y., Li, S., Liu, S., Dou, H.S., Quan, Z. *Vibration of Hydraulic Machinery*, Mechanisms and Machine Science, Vol. 11, 2013. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-6422-4>
- [9] Hartog, D. *Vibracije u mašinstvu*, Građevinska knjiga, Beograd, 1972.
- [10] Jovanović, R., Božić, I. Primena veštačkih neuronskih mreža u određivanju energetskih karakteristika propelernih hidrauličnih turbina, *Energija, ekonomija, ekologija*, Vol. XVII, No. 1-2, pp. 297-304, 2015.
- [11] Jovanović, R. Izvodi sa predavanja na predmetu *Inteligentni sistemi upravljanja*, Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Beograd, 2019.
- [12] Vlasinske hidroelektrane, Tehničke karakteristike hidroelektrane „Врла 3“, <https://www.energetskiportal.rs/predstavljamohidroelektrane-u-srbiji/> [pristupljeno 12.01.2021]
- [13] Why ISO 7919 Is Important For Vibration Measurement Engineers, <http://www.vibsens.com/index.php/knowledge-base/iso10816-iso7919-charts/iso7919-charts> [pristupljeno 12.01.2021]

AUTORI

Jovana Petrović, mast. inž. maš., student doktorskih studija, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, petrovicjovanamas@gmail.com
dr Ivan Božić, dipl. inž. maš., vanredni profesor, Rukovodilac Laboratorije za istraživanje, razvoj, ispitivanje i optimizaciju hidroelektrana, Univerzitet u Beogradu - Mašinski fakultet, ibozic@mas.bg.ac.rs

Simulacija i odstranjivanje stick-slip efekta servosistema sprovednog aparata hidraulične turbine

Simulation and Removal of Stick-Slip Effect on a Wicket Gate Hydraulic Servomechanism

Darko Babunski, Emil Zaev, Atanasko Tuneski, Laze Trajkovski, Radmila Koleva

Faculty of Mechanical Engineering, "Ss Cyril and Methodius" University in Skopje

Rezime - Trenje je ponovljiv i neželjeni problem koji se javlja kod hidrauličnih sistema i uvek mora da postoji tendencija da se odstrani. U ovom radu je prezentovani frikcioni model servomehanizma preko kog je moguće ostvariti najtačnije rezultate simulacije, kako i način kompenzacije frikcije, preko tehnike koja je prezentovana modelom hidrauličnog cilindra koji se koristi kod sprovednog aparata hidraulične turbine koji je upravljani servomehanizmom. Prikazan je način modeliranja hidrauličnog cilindra i njegovog servomehanizma, koji su deo mehanizma sprovednog aparata gde se stik-slip fenomen javlja kod komponenti koji su u kontaktu. Prezentirana teorija i dobijeni rezultati precizno prikazuju okolnosti kada se stik-slip efekt javlja kod hidrauličnih sistema. Simulacija efekta je obavljena korišćenjem softvera Simulink i Hopsan i analiza dobivenih rezultata je prikazana u ovom radu. Odstranjivanje stik-slip efekta je izvedeno pomoću projektovanja kaskadnog upravljanja primenjenog da upravlja ponašanjem sistema i da odstrani pojavu isprekidanog kretanja servomehanizma i hidrauličnog aktuatora.

Ključne reči - kaskadno upravljanje, trenje, hidraulična turbina, stick-slip efekat

Abstract - Friction is a repeatable and undesirable problem in hydraulic systems where always has to be a tendency for its removal. In this paper, the friction model is presented through which the most accurate results are achieved and the way of friction compensation, approached through technique presented with the mathematical model of a hydraulic cylinder of a hydro turbine wicket gate controlled by a servomechanism. Mathematical modelling of a servo mechanism and hydraulic actuator, and also the simulation of hydraulic cylinder as a part of a hydro turbine wicket gate hydraulic system where the stick-slip phenomenon is present between the system components that are in contact is presented. Applied results in this paper and the theory behind them precisely demonstrate under what circumstances the stick-slip phenomenon appears in such a system. The stick-slip effect is simulated using Simulink and Hopsan software and the analysis of the results are given in this paper. Removal of the stick-slip effect is presented with the design of a cascade control implemented to control the behaviour of the system and remove the appearance of a jerking motion.

Index Terms - Cascade Control, Friction, Hydro Turbine, Stick-Slip phenomenon

I INTRODUCTION

The friction is complex phenomenon which is mainly related to the resistance to relative movement of contacting surfaces. Friction properties have been studied through various models in order to predict and present the frictional behaviour of a hydraulic servomechanism. Stick-slip effect is continuous transition between static and kinetic friction force and vice versa at near zero velocity and lasts until it is removed. During Stick-slip, a system is believed to undergo transitions between a static (solid-like) state and a kinetic (liquid-like) state. [1] Even if the servomechanism is small part of Hydro Power Plant, it is very important part of governing control system. A mathematical model of wicket gate hydraulic servomechanism is presented and also simulated in two modelling and simulation software: MATLAB/Simulink and HOPSAN. Using both of the simulation software is for checking the accuracy of the responses and to compare the obtained results because of no chance to make any experimental activities and measurements in laboratory or directly on wicket gate hydraulic servomechanism. Removing the stick-slip phenomenon of a hydraulic servomechanism is presented through implementation of Cascade PID controller.

II MATHEMATICAL MODELLING OF HYDRAULIC SERVOMECHANISM

Hydraulic servo system consisted of servo valve which controls hydraulic cylinder is highly non-linear. The primary force causing is the pressure difference across the piston of a servo valve which controls the hydraulic cylinder. Second Newton Law which is applicable in wicket gate hydraulic servomechanism is presented mathematically by the following equations:

$$m \cdot a = \sum F \quad (1)$$

$$\sum F = P_1 A_1 - P_2 A_2 - F_{friction} - F_{load} \quad (2)$$

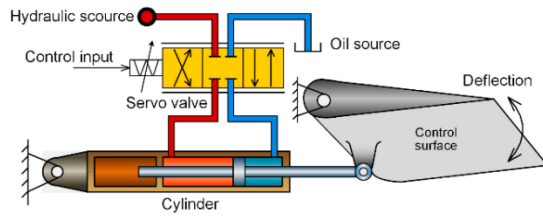


Figure 1. Hydraulic servomechanism

Friction is usually modelled as a discontinuous static mapping between the velocity and the friction force that depends on the velocity's sign and is directly related to the velocity. Due to the fact that the friction does not have an instantaneous response to a change in velocity, i.e. it possesses internal dynamics [3]. The total friction can be divided into different types of friction, which are characterized by the velocity state at which they act and their dependence of that state. Friction is mainly divided on static, kinetic and viscous friction according to Figure 2.

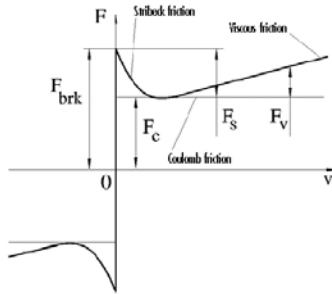


Figure 2. LuGre friction curve

There are several models existing that describe the friction [2], but LuGre model is an extension of Dahal model that captures the Stribeck effect and thus can describe the stick-slip motion. The LuGre model contains only a few parameters, and thus can easily be matched to experimental data. Because of this, obtained results in this paper are presented through LuGre friction model which is presented with the following mathematic model:

$$\frac{dz}{dt} = \dot{x} - \sigma_0 \frac{|\dot{x}|}{g(\dot{x})} \quad (3)$$

$$g(\dot{x}) = F_c + (F_s - F_c)e^{-(v_z/v_2)^2} \quad (4)$$

$$F = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 \dot{x} \quad (5)$$

where F_c, F_s, v_2, σ_2 are representing the static friction, while σ_0 and σ_1 are representing the kinetic friction [4] [5] [6].

Despite the models of LuGre friction, important place in this paper takes the equation that describes the amount of fluid that is flowing through the servomechanism:

$$q_{L1} = C_q w x_d \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_s - P_1)}; \quad q_{L2} = C_q w x_d \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_2)} \quad (6)$$

This research is done when the position of the servo mechanism piston is in ideal, central position and if there is no leakage through the orifices of the mechanism. Mathematical description for this is as following:

$$c_v^{(1)} = \frac{Q_n}{\sqrt{\Delta P_N}} \cdot \frac{1}{x_{v,max}} \quad (7)$$

The relationship between the flow and pressure is described with the following equations [4] [5]:

$$K_{q1} = C_q w \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_s - P_1)}; \quad K_{q2} = C_q w \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_2)} \quad (8)$$

$$K_{c1} = \frac{C_q w x_{v0}}{\sqrt{2 \cdot \rho (P_s - P_1)}}; \quad K_{c2} = \frac{C_q w x_{v0}}{\sqrt{2 \cdot \rho \cdot P_2}} \quad (9)$$

Density of hydraulic oil described through Bulk modulus equation is as important as the other parameters and coefficient that affect the hydraulic servomechanism.

$$Q_i - Q_0 = \frac{dV}{dt} + \frac{V}{\beta_e} \frac{d\rho}{dt} \quad (10)$$

Because of the controlling function, servo valve is important component in wicket gate servomechanism system. Its transfer function where delay is not considering when moving the spool is described as following:

$$G_{valve}(S) = \frac{1}{\tau \cdot s + 1} \quad (11)$$

Transfer function of the wicket gate hydraulic servomechanism is presented through the following equation:

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_q(A_1 - A_2)}{\left\{ M \cdot s^2 \cdot \frac{v_0}{\beta} \cdot s + K_c \right\} + (A_1^2 - A_2^2)^2} \quad (12)$$

Besides the mathematical modelling of the wicket gate servomechanism, the simulation in Simulink and Hopsan and responses from both software are presented in the paper.

Wicket gate hydraulic servomechanism system has a six-state variable non-linear mathematical model described with appropriate differential equations.

III SIMULATION OF HYDRAULIC SERVOMECHANISM WHEN STICK-SLIP EFFECT OCCURS

Two software are used to simulate the stick-slip phenomenon in the hydraulic servomechanism in order to obtain appropriate responses and to check their accuracy.

When modelling and simulating stick-slip effect, the most important part is to use the right model to describe the friction force where all of the parameters that are affecting the system are taken into consideration. This could only be achieved with implementing LuGre friction model into the observed hydraulic servomechanism system. LuGre model simulated in Simulink are presented on Figure 3 below.

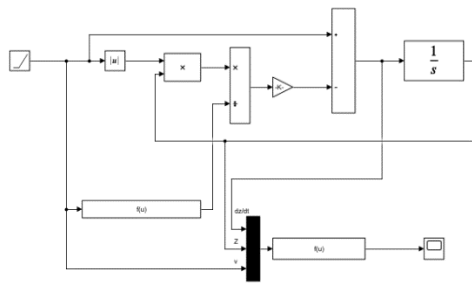


Figure 3. LuGre friction model modelled in Simulink

Given response friction force - time is shown on Figure 4.

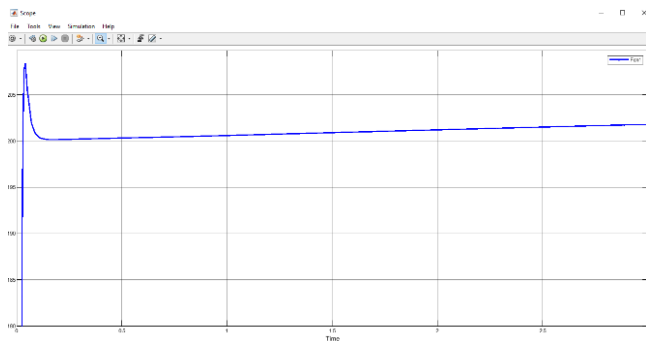


Figure 4. Friction force – time response of LuGre friction model

According to Figure 2, on which is shown response of LuGre friction model where a few representations of friction models are packaged into one model. Same response is shown on Figure 4, where it is clearly demonstrated that LuGre friction model is combination of Stribeck, Viscous friction and Coulomb friction force.

Stick-slip phenomenon is recognizable after a continuous transition between the states of stick into slip and vice versa without occurrence of gradual disappearance of the states of transition between sticking and slipping. Stick-slip phenomenon is present in the system until it is completely removed from the system.

Hydraulic servomechanism system is modelled and simulated in Matlab/Simulink and it is shown on Figure 5.

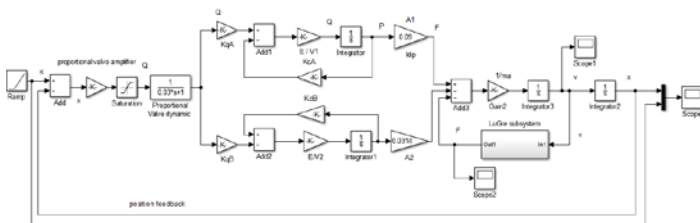


Figure 5. Simulink model of Hydraulic servomechanism system with LuGre friction model subsystem

Hydraulic servomechanism system shown on Figure 5 is combination of the following elements that are affecting the system where the stick slip effect is present: transfer function of servo valve, flow gain through the servo valve, flow-pressure

coefficient, volume of hydraulic cylinder in both chambers, modulus of elasticity etc.

Through the response of the system, it could be concluded that the stick-slip effect is present in the simulated model if transition between sticking and slipping phase is continuous.

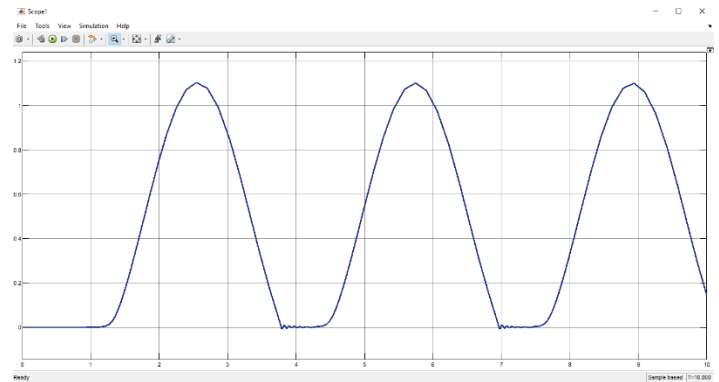


Figure 6. Velocity – time response in a wicket gate hydraulic servomechanism

According to the theory behind the stick-slip phenomenon and the simulated model, response of the hydraulic servomechanism system is represented on Figure 6 and is clearly shown that the continuous transition between sticking and slipping stage without any change in gradual disappearance of the states of transition between both stages is continuous. Velocity – time response is shown because it is very specific and characterizes the appearance of stick-slip effect because the transition between static and kinetic friction force is happening at near zero velocity as it is shown in details on Figure 7, photo of the stage where kinetic friction force exceeds the static friction force.

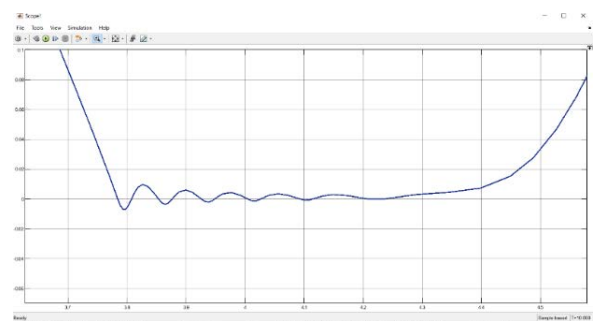


Figure 7. Detail view of the transition between the kinetic and static friction force

Second software, Hopsan which is specialized for modelling of hydraulic and mechatronics systems is used just for comparing the obtained results. Modelling in Hopsan is done with component connecting one to another without defining differential equations for each component or transfer function of the system, but only defining the right values of some default given parameters, depending on the type of the components. Beside the manner of modelling is completely different between both software Hopsan and Matlab/Simulink, and through the given responses could be noted that they should be similar enough one to another and to make a conclusion that stick-slip

effect is present in the system modelled in both software independently. Because this paper is about representing the simulation and removal of stick-slip effect of a wicked gate hydraulic servomechanism, it seems like the mass shown on Figure 8 could lead to confusion with explanation that it is an excess element that should not be present in this model. But, because of the principle of working and the algorithm of the Hopsan software, mass is only an element with 0 value that connects the hydraulic part and the force applied on the hydraulic parts.

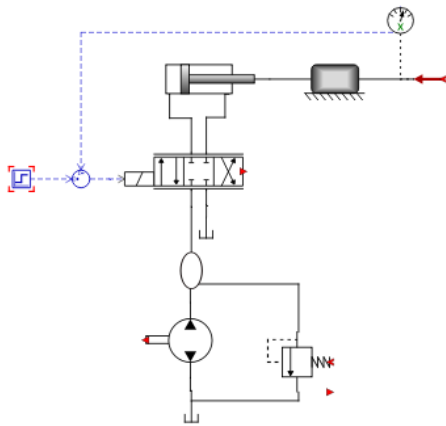


Figure 8. Model of a hydraulic servomechanism in Hopsan

According to the Figure 8, model of a hydraulic servomechanism is done in Hopsan software [6] and the response velocity-time is shown on Figure 9.

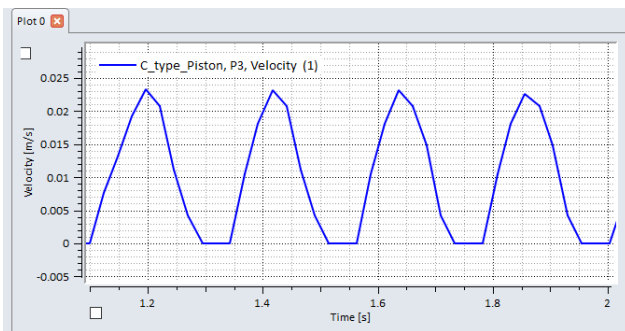


Figure 9. Velocity-time response of a hydraulic servomechanism system done in Hopsan

According to Figure 9, the continuous transition between the static and kinetic friction force i.e. continuous transition between sticking and slipping state and vice versa is noticeable. Comparing Figure 6 and Figure 9, difference in both curves could be noticed, but that is because of the different background configuration of both software and completely different principle of working and calculating the models. But the given curves are slightly different one to another i.e. no significant difference in responses of both software. Conclusion could be made and could be established that stick-slip effect is possible to be simulated with both software, Hopsan and Matlab/Simulink with slight difference in the responses.

IV REMOVAL OF STICK-SLIP PHENOMENON OF A HYDRAULIC SERVOMECHANISM SYSTEM

In this paper, a possible way of removing the stick-slip effect from a hydraulic servomechanism system has been presented.

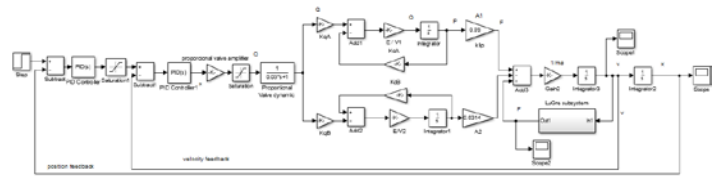


Figure 10. Cascade control of a hydraulic servomechanism with LuGre subsystem

On Figure 10 is shown Simulink model of Cascade PID control of a hydraulic servomechanism model including two PID controllers and are present two feedbacks, velocity and position feedback [7]. Implementing Cascade PID control in a system where stick-slip effect occurs is a successful story because through the velocity control, the sudden jump of velocity magnitude at near zero velocity is eliminated. If the moment of a sharp increase/decrease at near zero velocity is eliminated when the transition of a state of sticking to slipping and vice versa is overcome, then could be noted that the stick-slip effect of a system is eliminated. On Figure 11 is presented position-time response of a system only with one PID controller with position feedback. According to the given response can be stated that only with position control, the stick-slip effect is still present in the system i.e. the transition between the sticking and slipping effect and vice versa is continuous over time without tendency to be declined which indicates that position feedback control is not a successful method for stick-slip effect removing.

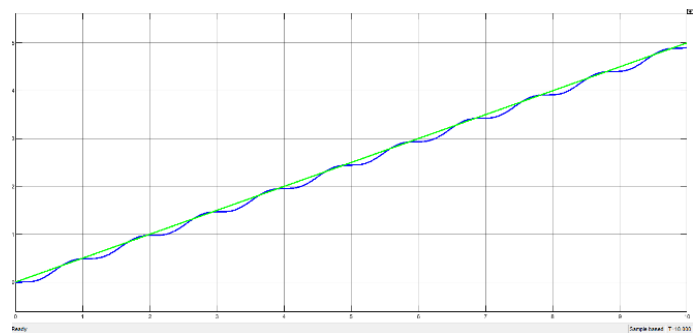


Figure 11. Position – time response of a system with a position feedback

Figure 12 represents the velocity-time and position-time response of a Cascade PID control system where velocity feedback is present in the system. According the responses, is concluded that implementing second PID controller i.e. velocity feedback control, stick-slip effect is completely removed from the system and over time when it becomes stable, remains stable.

Because in this paper two software - Matlab/Simulink and Hopsan are presented, Cascade PID control model is done also in Hopsan in order to compare the obtained results in Simulink.

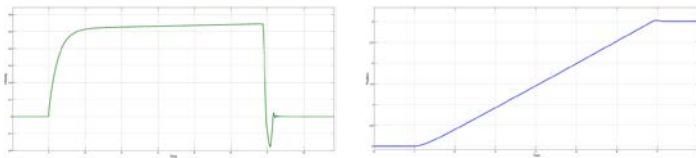


Figure 12. a) Velocity – time response of a system with Cascade PID control – no stick-slip presence; b) Position – time response of a system with Cascade PID control – no stick-slip presence

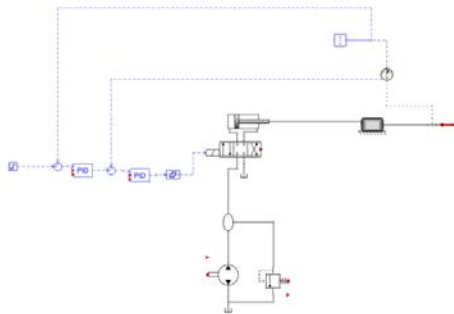


Figure 13. Hopsan model of a hydraulic servomechanism

The model is similar with the one with Cascade control done in Simulink. Both feedback, velocity and position are present in the system which indicates that the responses given in Hopsan can be compared with the one given by Simulink.

Hopsan model of a hydraulic servomechanism is shown on Figure 13.

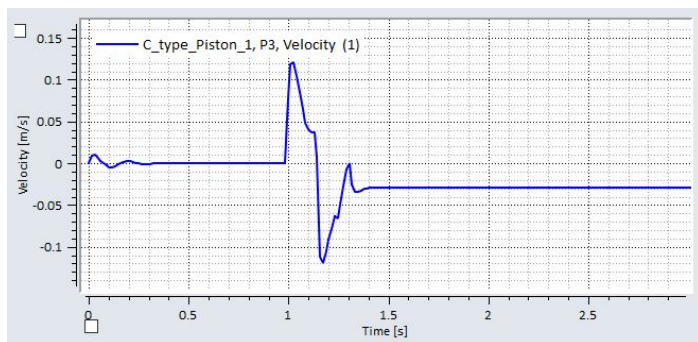


Figure 14. Velocity-time response of a hydraulic servomechanism model in Hopsan

According to the Figure 14 velocity-time response given in Hopsan, can be noticed that Cascade PID control is successful configuration when stick-slip effect is removed from a system while modelling in Hopsan and that the responses are more or less similar in both software which means that Hopsan is software that can be used for modelling hydraulic system and the given responses can be taken as relevant ones.

V CONCLUSION

Mathematical model of a hydraulic servomechanism system, including the transfer function of the components that it contains have been presented. Modelling is performed using Matlab/Simulink and Hopsan software. In addition, simulation is performed in both programs which primary aim is to compare the given responses, as well the accuracy of it. The presence of the stick-slip effect is confirmed by both programs, which led to very similar results. Removing the occurrence of the stick-slip effect is also presented through the simulation made in Simulink and Hopsan by using Cascade PID control i.e. by implementing velocity feedback control in the system because the impact of the stick-slip effect in the system can be removed and that can be done by adding velocity feedback control but not with position feedback control.

LITERATURA/ REFERENCES

- [1] Jiménez, A.-E., Bermúdez, M.-D. *Friction and wear*, in: Tribology for Engineers, pp 33-63, 2011.
- [2] Astrom, K.J., Canudas de Wit, C. Revisiting the LuGre friction model, *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 28, Issue 6, pp. 101-114, 2008. <https://doi.org/10.1109/mcs.2008.929425>
- [3] Chennapan S., Rajaram M. *Dynamic Analysis of Closed Loop Hydraulic System With 5/3 Way Custom Valve Using PID Controller*, Politecnico di Milano, Italy, 2010/2011.
- [4] Babunski, D., Zaev, E., Tuneski, A. Modelling and Real-Time Simulation of Hydro Turbine Wicket Gate Servomechanism, *Energetika, ekonomija, ekologija*, Vol. XIX, No. 1-2, pp. 257-263, 2017.
- [5] Zaev, E., Babunski, D., Tuneski, A., Rath, G. Hardware-in-the-loop for Simulation of Hydraulic Servo Systems and their Control, in Proc. 6th Mediterranean Conference on Embedded Computing MECO 2017, Bar, Montenegro, pp. 78-81, 11-15. June 2017. <https://doi.org/10.1109/meco.2017.7977164>
- [6] Babunski, D., Zaev, E., Tuneski, A., Trajkovski, L., Koleva, R. Co-Simulation of Hydro Turbine Wicket Gate Control Servomechanism, *Energetika, ekonomija, ekologija*, Vol. XX, No. 1-2, pp. 355-360, 2018.
- [7] Babunski, D., Zaev, E., Tuneski, A., Koleva, R. Modeling and Simulation of a Hydraulic System under Conditions of the Stick-Slip Effect Occurrence and Its Removal, in Proc. 19th International Conference on Thermal Science and Engineering of Serbia - SIMTERM 2019, Sokobanja, Serbia, pp. 645-651, 2019.

AUTORI/AUTHORS

Darko Babunski Ph.D., Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering – Skopje, darko.babunski@mf.edu.mk

Emil Zaev Ph.D., Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering – Skopje, emil.zaev@mf.edu.mk

Atanasko Tuneski Ph.D., Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering – Skopje, atanasko.tuneski@mf.edu.mk

Laze Trajkovski Ph.D., Associate Professor, Faculty of Mechanical Engineering – Skopje, laze.trajkovski@mf.edu.mk

Radmila Koleva, Faculty of Mechanical Engineering – Skopje, radmila.koleva@mf.edu.mk

Nestacionarno strujanje fluida u paralelnom cevovodu izrađenom od različitih materijala

Transient Fluid Flow in Parallel Pipeline Designed of Pipes with Different Materials

Marija Lazarevikj, Viktor Iliev, Valentino Stojkovski

Ss. Cyril and Methodius University in Skopje, Faculty of Mechanical Engineering-Skopje, Department of Hydraulic Engineering and Automation

Rezime - Nestacionarno strujanje fluida i pojava hidrauličnog udara u svojim specifičnostima uključuju uslove okruženja u kojem se odvija strujanje fluida. Raznolikost materijala za izgradnju cevovoda (čelik, polietilen ili drugi materijal) definiše uslove za razvoj hidrauličnog udara. Predmet istraživanja u ovom radu su paralelno vezani cevovodi izrađeni od različitih materijala i međusobni uticaj u uslovima nestacionarnog strujanja fluida. Izvršeno je numeričko istraživanje na dugim (pravim) cevovodima. Korišćen je softverski paket AFT-Impulse koji je već testiran uporednim eksperimentalno izmerenim vrednostima. Model za analizu razmatra paralelno vezane cevovode od čelika i polietilena. Rezultati simulacionih uslova dati su kroz uporedne dijagrame, gde se interaktivni uticaj jasno i nedvosmisleno otkriva. Uslovi eksploatacije i interaktivni uticaj dati su u komentaru i zaključku ovog rada.

Ključne reči – građevinski materijal, protok fluida, cevovod, simulacije, nestacionarno strujanje fluida, hidraulični udar

Abstract - Transient fluid flow and the occurrence of water hammer in their specifics include the conditions of the environment in which the flow takes place. The variety of pipeline construction material (steel, polyethylene or other material) defines the conditions for the development of water hammer. The construction of parallel hydraulically connected pipelines from different materials and mutual influence in the conditions of transient fluid flow conditions of operation is the subject of research in this paper. The research was performed numerically on long (line) pipelines. The AFT-Impulse software package was used, which had already been tested with comparative experimentally measured values. The analysis model considers pipelines made of steel and polyethylene material in parallel hydraulic connection. The results of the simulation conditions are given through comparative diagrams, where the interactive influence is clearly and unambiguously revealed. The conditions of exploitation and interactive influence are given in the commentary and conclusion of this paper.

Index Terms - constructive material, fluid flow, pipeline, simulations, transient fluid flow, water hammer

I INTRODUCTION

Water hammer is result of sudden change in the liquid flow rate induces substantial increase or decrease of pressure in hydraulic pipeline systems. This phenomenon may be result of valve closure or opening and changing of the operating mode of hydraulic turbomachinery. Uncontrolled water hammer can disturb operation of the hydraulic systems and, in the worst case, destroy and damage system components. Water hammer pressure rise or drop may be controlled by installing protecting devices for appropriate control of operating regimes [1], [2]. The classical water hammer may be affected by transient cavitation and water column separation (WCS), unsteady skin friction effects, viscoelastic behavior of the pipe wall and fluid-structure interaction [3].

Mathematical model for transient fluid flow in pipe is obtained using a one-dimensional approach of modeling with conservation laws for mass flow (continuity equation (eq.1)) and momentum (momentum equation (eq.2)) [4]:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + a^2 \frac{\partial Q}{\partial x} / (g \cdot A \cdot \partial x) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} / (g \cdot A \cdot \partial t) + \lambda \cdot Q \cdot |Q| / (2 \cdot g \cdot D \cdot A^2) = 0 \quad (2)$$

In equation (1) and (2), Q is discharge, H denotes the piezometric head (pressure) at the centerline of the pipeline at location x and time t , D is the pipeline diameter, λ is the friction factor in the Darcy-Weisbach formula, x is the distance along the centerline of the pipe, g is the gravity acceleration and a is pressure wave speed.

The hyperbolic set of equation (1) and (2) are quasi-linear hyperbolic functions and can't be solved with a general analytical solution, but given initial and boundary conditions, can be calculated numerically.

The pressure wave speed in the system is calculated according to following equation (3), [4]:

$$a^2 = 1 / (1/K + D/\delta \cdot E) \quad (3)$$

In equation (3) K represents bulk modulus of elasticity of the fluid, ρ is density of the fluid, E is young's (elasticity) modulus of pipe material, δ is pipe equivalent wall-thickness.

The numerical investigation in this paper is focused on determining the impact of the pipeline construction on the transient flow regimes that occur during closing or opening of the valve in pipeline system. The pipeline design is defined by the choice of pipeline wall material, thus pipeline made of one material, as well as pipeline constructed from different materials are both numerically studied.

II NUMERICAL SETUP AND TEST CASES

The pipeline sections materials are selected in order to achieve a significant difference in the modulus of elasticity which implies different speed of propagation of the hydraulic shock wave, and different deformability of the pipeline wall. These parameters affect the transient flow regimes.

In this paper, the transition modes in the pipeline systems are analyzed when:

- the closing time (t_z) and the opening time (t_o) of the pipeline is 8 seconds (linearly);
- the law of fluid flow rate change is linear and the flow rate is $0,2 \text{ m}^3/\text{s}$;
- gravitational water flow from a tank at 60 m head;
- parallel pipeline sections have the same length of 2000 m, while the connecting pipes in the pipeline are 1000 m long. The section lengths are chosen to ensure a difference in the time of presence of the hydraulic shock wave.

The parameters that are defining the pipeline sections i.e. type of material, inner diameter, wall thickness and wave speed are given in table 1.

Table 1. Parameters of the pipeline sections

Pipe material	Inner diameter ID (mm)	Wall thickness δ (mm)	Elasticity modulus (MPa)	Wave speed a (m/s)
HDPE	245	13,8	1071,5	261
HDPE	387,5	22,5	1071,5	265,8
STEEL	254,5	9,3	203424	1281,5
STEEL	387	9,5	203559	1220

Different cases of connections of the pipeline sections were numerically investigated:

- Case 1. Pipeline consisting of parallel sections with joint points;
- Case 2. Pipeline consisting of parallel sections with an inflow junction to the parallel sections and two independent outlets. The closing/opening of the valves in the individual sections is performed at the same time;
- Case 3. Pipeline consisting of parallel sections with an outflow junction from the parallel sections;
- Case 4. Pipeline with sequentially connected sections.

The choice of the pipeline sections materials provides a pipeline construction of homogeneous material – only steel or only polyethylene, or a pipeline construction of combined materials – individual sections are made of different materials and each one specifically affects the transient regimes.

The first configuration is set to provide equal hydraulic conditions in the parallel pipe sections in steady state flow at both the inlet and outlet of the sections (with mutual junctions). The system (Figure 1) provides non-simultaneous transient processes with wave interference at the joint points.

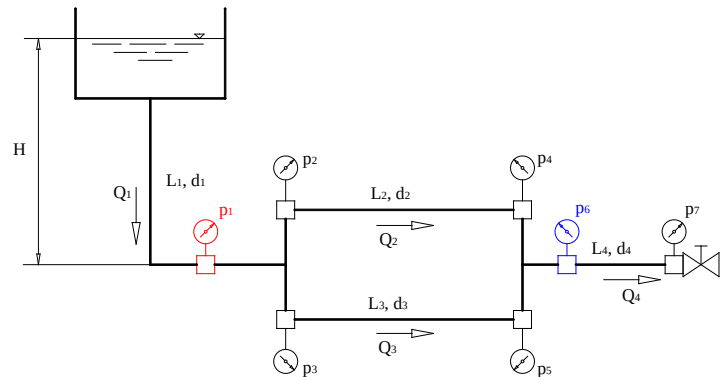


Figure 1. Pipeline with parallel branches and same inflow-outflow junction (Case 1)

The four analyzed combinations of materials for the described first configuration are given in table 2.

Table 2. Variants of first pipeline configuration (Case 1)

MODE	P1	P2	P3	P4
M1	C	C	C	C
M2	C	PE	C	C
M3	C	PE	PE	C
M4	PE	PE	PE	PE

C- steel pipe; PE-polyethylene pipe

The second pipeline configuration (Figure 2) is set to ensure equal hydraulic conditions of the parallel branches during steady state flow at the inlet junction of the sections (mutual inflow junction). The system aims to provide non-simultaneous arrival of the hydraulic shock wave (in the first phase of the water hammer) in order to see the impact of the counter pressure wave in the pipe section where the wave speed is smaller.

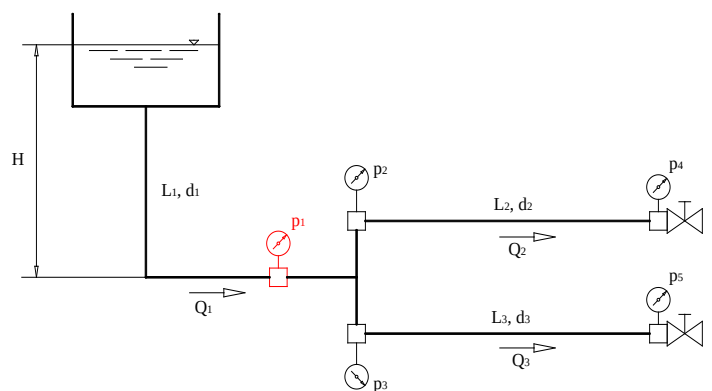


Figure 2. Pipeline with parallel branches and same inflow junction (Case 2)

The four analyzed combinations of materials for the described second pipeline configuration are given in table 3.

Table 3. Variants of second pipeline configuration (Case 2)

MODE	P1	P2	P3
M1	C	C	C
M2	C	PE	C
M3	C	PE	PE
M4	PE	PE	PE

C- steel pipe; PE-polyethylene pipe

The third pipeline configuration (Figure 3) is set to ensure equal hydraulic conditions of the parallel branches during steady state flow at the inlet and outlet junction of the sections (with mutual outflow junction).

The system aims to determine the impact of the transient states when pressure waves are joining at a junction.

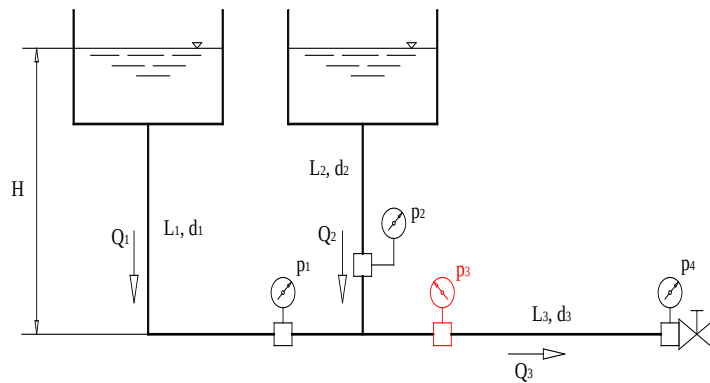


Figure 3. Pipeline with parallel branches and same outflow junction (Case 3)

The four analyzed combinations of materials for the described third pipeline configuration are given in table 4.

Table 4. Variants of third pipeline configuration (Case 3)

MODE	P1	P2	P3
M1	C	C	C
M2	PE	C	C
M3	PE	PE	C
M4	PE	PE	PE

C- steel pipe; PE-polyethylene pipe

The fourth pipeline configuration (Figure 4) consists of sequentially connected sections made of different materials. The system aims to determine the impact of the sequence of connection in the pipeline construction.

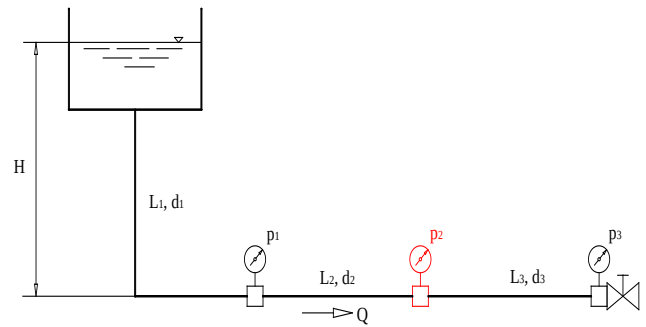


Figure 4. Pipeline with serial connection of branches (Case 4)

The four analyzed combinations of materials for the described fourth pipeline configuration are given in table 5.

Table 5. Variants of third pipeline configuration (Case 4)

MODE	P1	P2	P3
M1	PE	PE	PE
M2	PE	C	PE
M3	C	PE	C
M4	C	C	C

C- steel pipe; PE-polyethylene pipe

III RESULTS AND DISCUSSION

Numerical simulations of the transient regimes are performed using the AFT Impulse software package. First, the minimum time step Δt needs to be determined for the iterative calculation. This time step is determined from the Lewy-Courant criteria [2], that is $Cr < 1$ [2].

$$\Delta t < L/(a \cdot n) \text{ and } Cr = a \cdot \Delta t / (\Delta x) < 1 \quad (4)$$

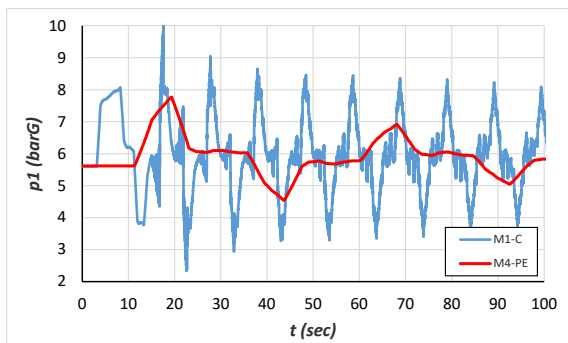
where n represents the number of segments that pipeline is divided in, while Δx is the length of one segment.

CASE 1:

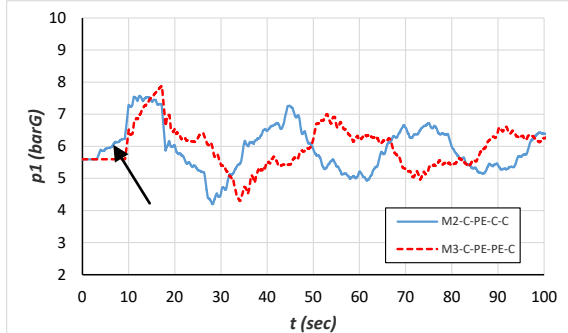
The results from the numerical simulations of the transient regimes are presented by the change of the gauge pressure p_1 which defines the flow conditions at the inlet junction, and the pressure p_6 which defines the flow conditions at the outlet junction.

A) CLOSING OF PIPELINE

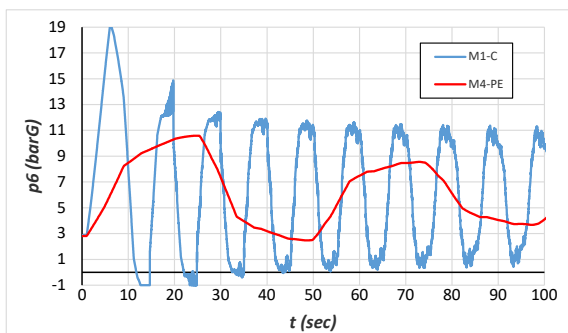
When closing the pipeline, the variation of the gauge pressure p_1 in front of the inlet junction for pipeline of same and different material is shown on Figure 2 a) and b) respectively, while the variation of the gauge pressure p_6 at the outlet junction for pipeline of same and different material is shown on Figure 3 a) and b) respectively.



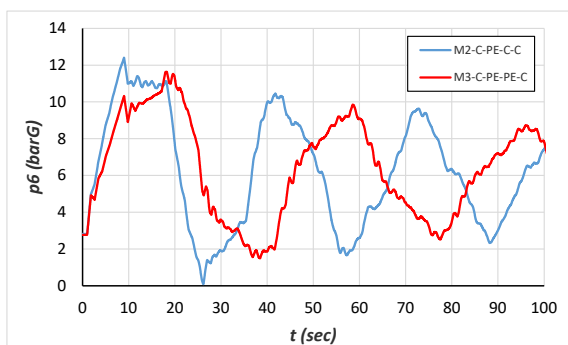
a) pipeline of same material (M1-steel and M4-polyethylene)



b) pipeline of different wall material at parallel branches (M2 and M3)

Figure 5. Pressure variation in transient flow of closing pipeline at manometer p_1 – inlet junction (Case 1)

a) pipeline of same material (M1-steel and M4-polyethylene)



b) pipeline of different wall material at parallel branches (M2 and M3)

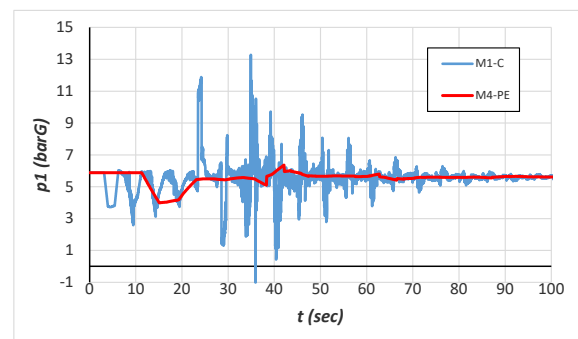
Figure 6. Pressure variation in transient flow of closing pipeline at manometer p_6 – outlet junction (Case 1)

According to the numerically obtained results that describe the transient states during valve closure, it can be noted that:

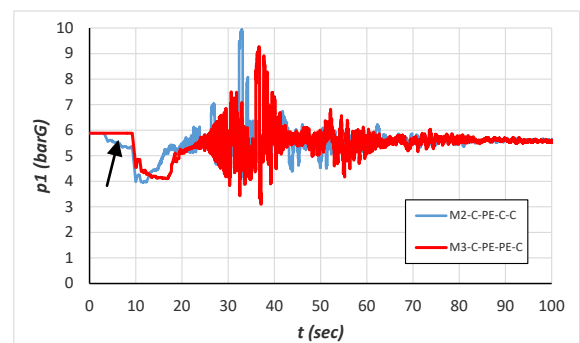
- in terms of pressure variation caused by the water hammer, the pipeline construction with polyethylene pipes induces lower pressure rise in the system;
- the configuration with pipe sections with different materials (adding polyethylene pipes) has positive effects on lowering the induced pressure rise;
- the configuration with pipe sections with different materials causes different law of pressure change, both in amplitude and frequency of the transient states;
- during the non-simultaneous hydraulic shock wave propagation, the appearance of a counter-wave due to the pressure increase, while the first (basic) one has not arrived, causes a decrease in the pressure rise in the observed section (Figure 5 b);
- in case of the mode M1 (closing of the valve(pipeline)) are affected by transient cavitation and water column separation at location p_6 .

B) OPENING OF PIPELINE

When opening the pipeline, the variation of the gauge pressure p_1 in front of the inlet junction for pipeline of same and different material is shown on Figure 7 a) and b) respectively, while the variation of the gauge pressure p_6 at the outlet junction for pipeline of same and different material is shown on Figure 8 a) and b) respectively.

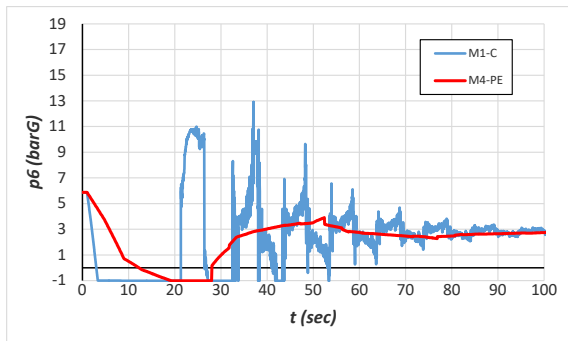


a) pipeline of same material (M1-steel and M4-polyethylene)

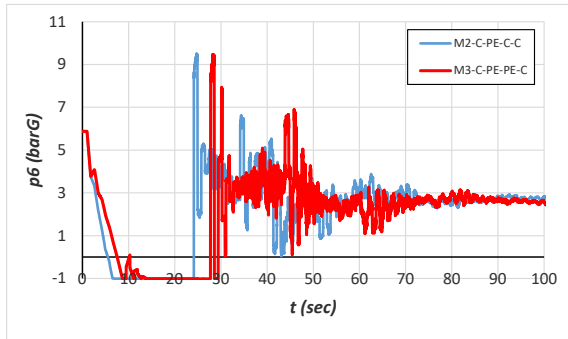


b) pipeline of different wall material at parallel branches (M2 and M3)

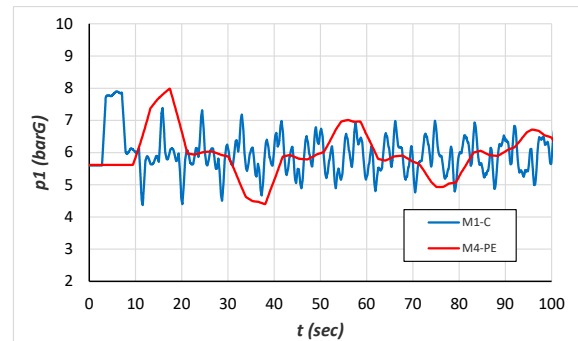
Figure 7. Pressure variation in transient flow of opening pipeline at manometer p_1 – inlet junction (Case 1)



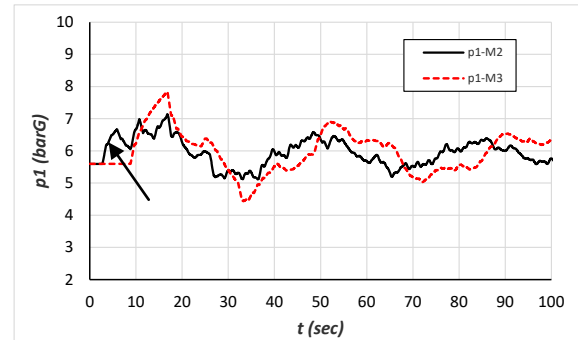
a) pipeline of same material (M1-steel and M4-polyethylene)



b) pipeline of different wall material at parallel branches (M2 and M3)

Figure 8. Pressure variation in transient flow of opening pipeline at manometer p_6 – outlet junction (Case 1)

a) pipeline of same material (M1-steel and M4-polyethylene)



b) pipeline of different wall material at parallel branches (M2 and M3)

Figure 9. Pressure variation in transient flow of closing pipeline at manometer p_1 – inlet junction (Case 2)

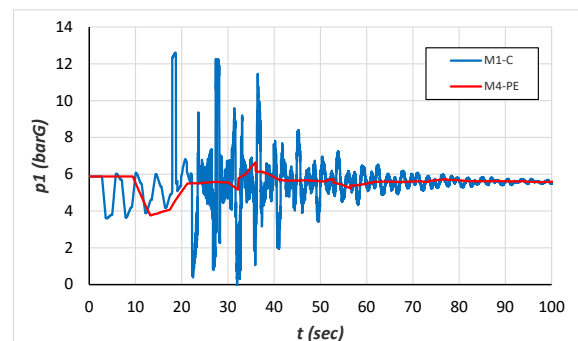
According to the numerically obtained results that describe the transient states during valve opening, it can be noted that:

- in terms of pressure variation caused by the 'negative' water hammer, the pipeline construction with polyethylene pipes induces decrement of the pressure rise in the system;
- the configuration with pipe sections with different materials (adding polyethylene pipes) has positive effects on lowering the loads in the system;
- during the non-simultaneous hydraulic shock wave propagation, the appearance of a counter-wave due to the pressure increase, while the first (basic) one has not arrived, causes a decrease in the pressure rise in the observed section (Figure 4 b);
- in case of the opening of the valve(pipeline)) the all mode of simulations are affected by transient cavitation and water column separation at location p_6 .

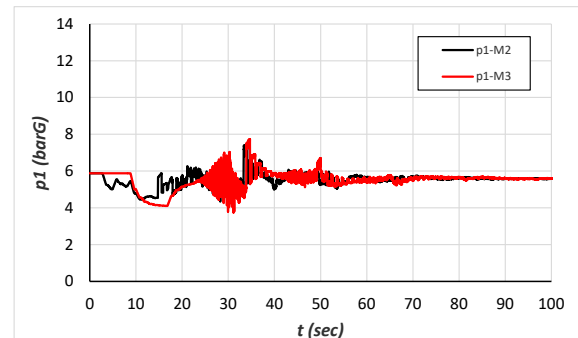
CASE 2:

CLOSING-OPENING OF PIPELINE

The transient fluid flow conditions during valve closure and valve opening are given in Figures 9 and 10, respectively presented by the gauge pressure p_1 variation.



a) pipeline of same material (M1-steel and M4-polyethylene)



b) pipeline of different wall material at parallel branches (M2 & M3)

Figure 10. Pressure variation in transient flow of opening pipeline at manometer p_1 – inlet junction (Case 2)

The results from the numerical simulations of valve closure show that the pipeline construction does not affect the pressure rise intensity i.e. the amplitude, but the frequency of the transient states (Figure 9 a).

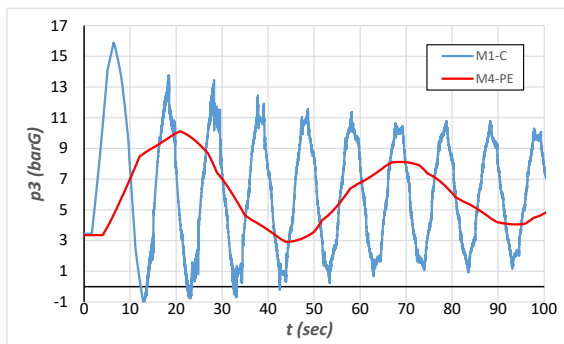
The non-simultaneous arrival of the hydraulic shock wave from the parallel branches into the junction reduces the pressure amplitude (Figure 9 b).

The results from the simulation of transient fluid flow during valve opening show high pressure oscillations in the pipeline designed only from steel pipes (Figure 10 a), while adding polyethylene pipe significantly decreases the pressure amplitude (Figure 10 b).

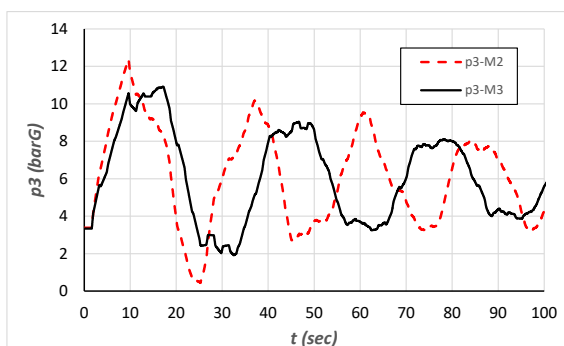
CASE 3:

CLOSING-OPENING OF PIPELINE

The transient fluid flow conditions during valve closure and valve opening are given in Figures 11 and 12, respectively presented by the gauge pressure p_3 variation.



a) pipeline of same material (M1-steel and M4-polyethylene)



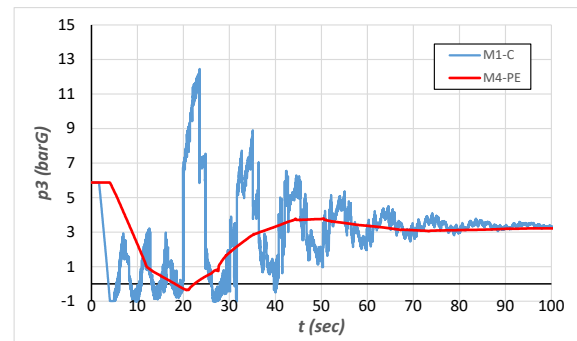
b) pipeline of different wall material at parallel branches (M2 and M3)

Figure 11. Pressure variation in transient flow of closing pipeline at manometer p_3 – outlet junction (Case 3)

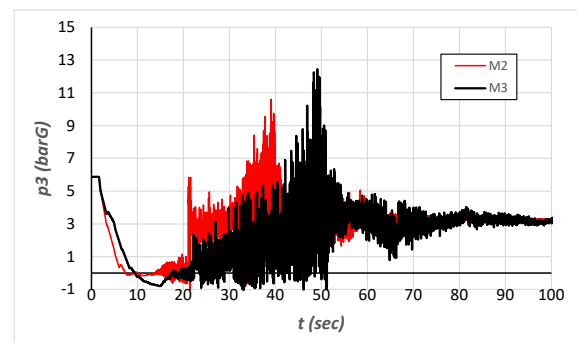
The results from the numerical simulations of valve closure show that:

- the pipeline construction of only steel pipes causes high pressure amplitude (Figure 11 a). If the pipeline is designed of polyethylene pipes, the pressure amplitude is lower and there is no vacuum pressure;

- the pipeline construction of different materials pipes provides more favorable transient states compared to the construction of steel pipes only;
- in case of the mode M1 are affected by transient cavitation and water column separation at location p_3 .



a) pipeline of same material (M1-steel and M4-polyethylene)



b) pipeline of different wall material at parallel branches (M2 and M3)

Figure 12. Pressure variation in transient flow of opening pipeline at manometer p_3 – outlet junction (Case 3)

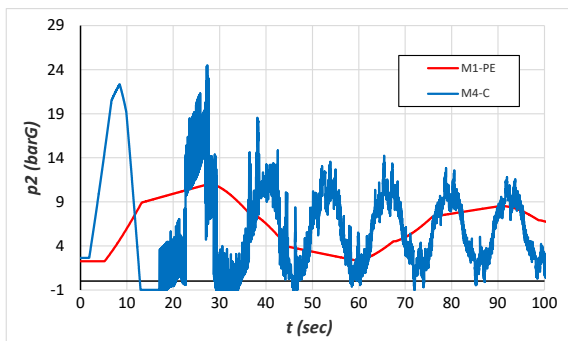
The results from the numerical simulations of valve opening show that:

- the pipeline construction of only steel pipes causes high pressure amplitude with reach under pressure (Figure 12 a). If the pipeline is designed of polyethylene pipes, the pressure amplitude is lower and there is vacuum pressure with low magnitude;
- the pipeline construction of different materials pipes does not provide more favorable transient states in the pipeline (Figure 12 b). Best conditions are achieved with construction of only polyethylene pipes;
- in case of the mode M1 and M3 are affected by transient cavitation and water column separation at location p_3 .

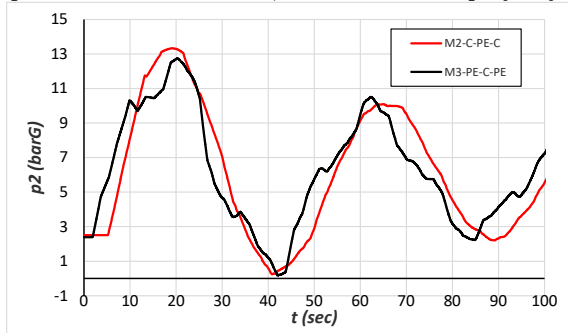
CASE 4:

CLOSING-OPENING OF PIPELINE

The transient fluid flow conditions during valve closure and valve opening are given in Figures 13 and 14, respectively presented by the gauge pressure p_2 variation.

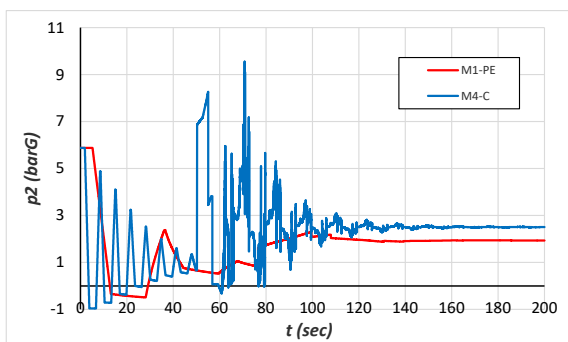


a) pipeline of same material (M1-steel and M4-polyethylene)

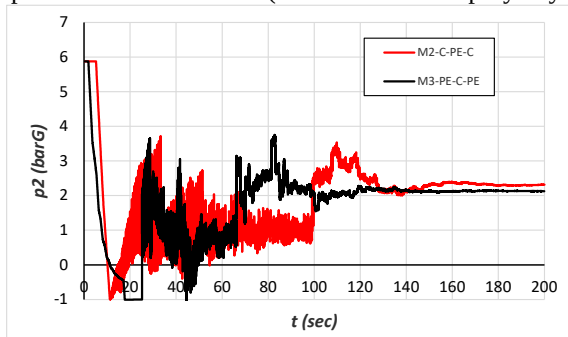


b) pipeline of different wall material at serial section connection (M2 and M3)

Figure 13. Pressure variation in transient flow of closing pipeline at manometer p_2 – section on pipeline (Case 4)



a) pipeline of same material (M1-steel and M4-polyethylene)



b) pipeline of different wall material at serial section connection (M2 and M3)

Figure 14. Pressure variation in transient flow of opening pipeline at manometer p_2 – section on pipeline (Case 4)

The results from the numerical simulations of valve closure show that the pipeline construction from only steel pipes causes high

pressure amplitude and high intensity of water column separation (Figure 13 a). If the same pipeline configuration is constructed from polyethylene pipes, the pressure rise is considerably smaller. When changing the sequence of the pipe sections made of different materials, there is a difference in the hydraulic shock wave shape.

The transient flow when opening the valve shows high pressure oscillations in the pipeline made of steel sections only (Figure 14 a), while adding a polyethylene section significantly decreases the pressure amplitude. The sequence of the pipe sections influences the transient states.

IV CONCLUSION

The numerical models considered in this paper provide information about the transient states in rigid (steel) and elastic (polyethylene) pipeline, and the influence of the pipeline construction with different connection of its sections which are made of different materials. The numerical calculations were performed for both opening and closing of the pipeline system. The effects from the transient states are presented by the pressure variation in selected characteristic points in the system and they show that adding an elastic pipe section as a part of the pipeline or elastic pipes defining the whole pipeline reduce the water hammer effects. According to the numerically obtained results, decreasing of the water hammer effects can be achieved by installing an elastic pipe section, i.e. the choice of pipe material type can help controlling the water hammer. Considering the results in this paper, a recommendation can be made for future solutions of pipeline systems in dealing with water hammer effects to construct combined systems including elastic pipes.

LITERATURA/REFERENCES

- [1] Wylie, E.B., Streeter, V. L. *Fluid Transients in Systems*, Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, 1993.
- [2] Chaundry, M.H. *Applied hydraulic transients*, Van Nostrand Reinhold Co., New York, 1979.
- [3] Bergant, A., Tijsseling, A.S., Vitkovsky, J.P., Covas, D.I.C., Simpson, A.R., Lambert, M.F. Parameters affecting water hammer wave attenuation, shape and timing. Part 1, Mathematical tools and Part 2: Case studies. *IAHR Journal of Hydraulic Research*, Vol. 46, No. 3, Part 1, pp. 373-381, Part 2, pp. 382-391, 2008. <https://doi.org/10.3826/jhr.2008.2848> and <https://doi.org/10.3826/jhr.2008.2847>
- [4] Wylie E.B., Streeter V.L. *Fluid Transients*, University of Michigan, 2001.
- [5] Stojkovski, V., Kostikj, Z., Iliev, V., Lazarevikj, M. Comparison of measured and numerical results for unsteady fluid flow at water distribution system, in Proc. 5th International Scientific Conference COMETA 2020, Jahorina, 26-28. November 2020.
- [6] Stojkovski, V., Kostić, Z., Nošpal A. CFD analiza strujnog prostora u odnosu na kavitacijski režim rada kod Howell Bunger ventila sa ugrađenim deflektorom, *Energetika, ekonomija, ekologija*, Vol. XIII, No. 2, pp. 90-93, 2011.
- [7] Chaundry, M.H. *Applied hydraulic transients*, Van Nostrand Reinhold company, New York, 1979.
- [8] Stojkovski V., Kostic, Z. Prediction of the energy production from small hydropower plants, *Energetika, ekonomija, ekologija*, Vol. XVII, No. 1-2, pp. 117-121, 2015.
- [9] Stojkovski V., Stojkovski F. Influence of water supply system on efficiency at run-of-river small hydropower plant, in Proc. 6th International conference & workshop REMOO 2016, Budva, 18-20. mart 2016.
- [10] Wylie, E.B., Streeter, V.L. *Fluid transient*, Mc.Graw-Hill, New York, 1978.
- [11] Zaruba, L. *Water hammer in pipe-line system*, Elsevier, Amsterdam, 1993.
- [12] Iliev, V., Nachevski, G. Water hammer in high pressure steel pipelines, in Proc. 6th International Metallurgical Congress, PEM-7, pp. 111, 2014.

- [13] Iliev V., Popovski P., Markov Z. Water hammer analysis using characteristics method and numerical simulation, *Mechanical Engineering - Scientific Journal*, Vol. 31, No. 1-2, pp. 53-62, 2013.
- [14] Iliev V., Popovski P., Markov Z. A dynamic behavior of low head hydropower plant during the transient operational regimes, in Proc. 6th *International meeting of the workgroup on cavitation and dynamic problems in hydraulic machinery and systems*, Ljubljana, 9-11. September 2015.
- [15] Iliev, V., Ivljanin, B., Markov, Z., Popovski, P. Sensitivity of transient phenomena analysis of the Francis turbine power plants, *International Journal of Engineering Research and Applications*, Vol.5, No. 8, pp. 1480-1488, 2015.
- [16] Iliev, V., Popovski, P., Markov, Z. A comparison of numerical prediction and the experimental dynamic behavior at transient regimes of hydropower

plant, *Technics Technologies Education Management (TTEM)*, 9 (1), pp.3-10, 2014.

AUTORI/AUTHORS

Marija Lazarevikj, Assistant, Faculty of Mechanical Engineering – Skopje, Department of Hydraulic Engineering and Automation, marija.lazarevikj@mf.edu.mk

Viktor Iliev Ph.D., Professor, Faculty of Mechanical Engineering – Skopje, Department of Hydraulic Engineering and Automation, viktor.iliev@mf.edu.mk

Valentino Stojkovski Ph.D., Professor, Faculty of Mechanical Engineering – Skopje, Department of Hydraulic Engineering and Automation, valentino.stojkovski@mf.edu.mk

Analiza vremena ispitivanja i greške očitavanja pametnih brojila električne energije u zavisnosti od njihovog podešenja

Analysis of Test Time and Reading Errors of Smart Electricity Meters Depending on Their Setting

Đorđe Dukanac

Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd

Rezime - Vreme provere registara pametnih brojila klase tačnosti 0,2 S za indirektno merenje aktivne električne energije preko mernih transformatora, prilikom prve, vanredne ili periodične kontrole i overe, značajno je povećano prema poslednjem Pravilniku o brojlama aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 S od 23.12.2016. godine. Posebno je to izraženo kada je brojilo podešeno da pokazuje izmerenu vrednost električne energije u kWh na sekundarnim stranama mernih transformatora kod često primenjivanog brojila aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 S, naznačenog faznog napona $110/\sqrt{3}$ V i za naznačenu struju 1 A. Na taj način dosta je povećano i ukupno vreme kao i troškovi ispitivanja takvih brojila. Pored toga, kod na ovaj način podešenih brojila električne energije sa rezolucijom na tri decimalna mesta i jedinicom u kWh, postojaće dodatna greška pri očitavanju merene vrednosti aktivne električne energije i posebno pri izračunavanju energije gubitaka aktivne električne energije. Biće razmotren prihvatljiviji pristup podešavanja ovakvih brojila.

Ključne reči - brojilo energije, registar energije, greška očitavanja, vreme ispitivanja, prenosni odnos.

Abstract - The time of checking the registers of smart meters of accuracy class 0.2 S for indirect measurement of active electricity via instrument transformers, during the first, extraordinary or periodic control and verification has been significantly increased according to the latest Rules on meters of active electrical energy of accuracy class 0.2 S from December 23, 2016. This is especially pronounced when the meter is set to show the measured value of electrical energy in kWh on the secondary side of instrument transformers with the often used meter of active electrical energy of accuracy class 0.2 S, rated phase voltage $110/\sqrt{3}$ V and for the rated current 1 A. In that way, the total time as well as the costs of testing such meters has increased a lot. In addition, with electricity meters set in this way with a resolution of three decimal places and a unit in kWh, there is an additional error when reading the measured value of active electrical energy and especially when calculating the energy loss of active electrical energy. A more acceptable approach to setting such meters will be considered.

Index Terms - electricity meter, energy register, reading error,

test time, transformation ratio

I UVOD

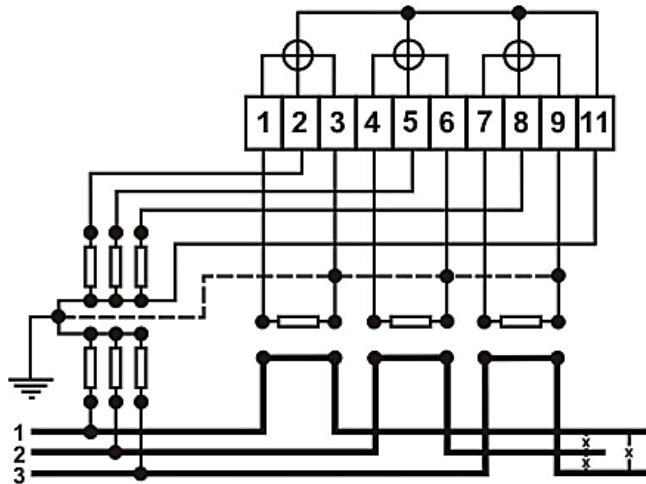
Neki od razloga za zamenu postojećih elektromehaničkih brojila sa pametnim električnim brojlama sa daljinskim očitavanjem potrošnje struje u zemljama Evropske unije i u Srbiji su: ušteda električne energije, povećanje energetske efikasnosti, sprečavanje krađe struje, ali i činjenica da energetske resursi nisu neiscrpn. Između 2018. i 2023. godine očekuje se da će stopa prodora pametnih brojila električne energije u Evropskoj uniji porasti sa približno 44 % na 71 %.

Električno brojilo je namenjeno merenju aktivne i reaktivne električne energije, maksimuma srednje snage, trenutnih vrednosti snage, struja, napona i učestanosti. Pametna brojila pored merenja aktivne i reaktivne električne energije i snage u standardnoj klasi tačnosti imaju mogućnost daljinskog očitavanja i dvosmernu komunikaciju između brojila i bazne stanice. Pametnim brojlama omogućeno je daljinsko uključivanje i isključivanje, otkrivanje neovlašćenih radnji, profilisanje opterećenja za bolju korisničku uslugu i pouzdano napajanje, obaveštavanje o prekidima napajanja i imaju mogućnost višestrukih tarifa. Podaci o potrošnji struje postaju sasvim dostupni, a uvid u potrošnju omogućava i bolju procenu, te efikasnije planiranje proizvodnje i distribucije električne energije.

Pametno brojilo se obično sastoji od sledećih hardverskih sastavnih delova:

- naponskih i strujnih senzora;
- napajanja;
- jedinice za merenje energije;
- mikrokontrolera;
- komunikacijskog međusklopa;
- sata u realnom vremenu (Real time clock).

Na slici 1. prikazana je šema veza za trofazno brojilo za četvorožični priključak sa tri merna sistema koje se uobičajeno koristi u postrojenjima. Ova električna brojila priključena su na električnu mrežu preko naponskih i strujnih mernih transformatora i mere aktivnu i reaktivnu električnu energiju iz struja i napona na sekundarnim stranama strujnih i naponskih mernih transformatora.



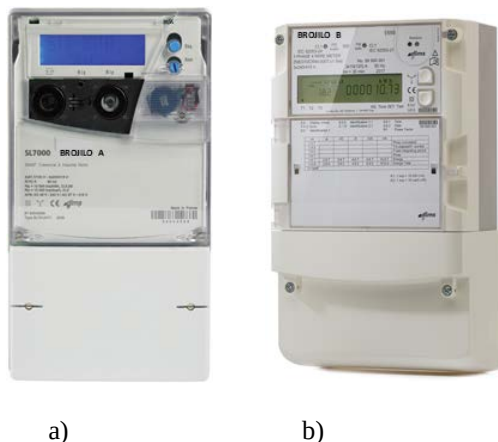
Slika 1. Šema veza trofaznog brojila za četvorožični priključak sa tri merna sistema.

III ISPITNI REŽIM

Mnoga pametna električna brojila nemaju mogućnost prebacivanja svog rada u ispitni režim sa mogućnošću skraćenog ispitivanja tačnosti prikazivanja vrednosti iz registara električne energije.

U ispitnom režimu (test mode) prikazuju se ispitna očitavanja bez uticaja na vrednosti podataka postojeće potrošnje i obračuna energije u merilu. Povećanjem rezolucije registra na ekranu, kraći intervali merenja električne energije mogu da se koriste u ispitnom režimu kako bi se smanjilo zahtevano vreme ispitivanja i oni neće da remete podatke o obračunu. Kada se nastavi prekinuti normalni režim, očitavanja snimljena tokom ispitnog režima biće odbačena i biće vraćene vrednosti podataka potrošnje i obračun postojeće energije sa najvećom mogućom podesivom rezolucijom u normalnom radu na tri decimalna mesta.

Na slici 2. prikazana su dva brojila električne energije (*A* i *B*) klase 0,2 S: a) bez i b) sa mogućnošću rada u ispitnom režimu.



Slika 2. Brojila električne energije (*A* i *B*) klase 0,2 S: a) bez mogućnosti [1] i b) sa mogućnošću rada u ispitnom režimu [2].

III PODEŠAVANJE BROJILA

Pametno električno brojilo pomoću odgovarajućeg uslužnog programa proizvođača može da se podesi od strane ovlašćenog lica za buduću upotrebu. Saglasno odobrenom nivou pristupa mogu da se podešavaju mnoge bitne osobine električnog brojila (npr. tip veze (trožično ili četvorožično brojilo), nazivni napon, datum, vreme, prenosni odnosi strujnih i naponskih mernih transformatora, konstante optičkih davača, konstante impulsnih davača za daljinsko merenje, fizička adresa, tarifni stavovi, formati registara energije i snage, obračunska jedinica, sadržaj obračunskih veličina, komunikacioni parametri itd.).

Rezultat merenja brojilom izražava se u kilovatčasovima (*kWh*) ili megavatčasovima (*MWh*).

Kod brojila *A* na slici 2.a), najviše 9 cifara prikazuje se na ekranu, sa najvećom rezolucijom na tri decimalna mesta.

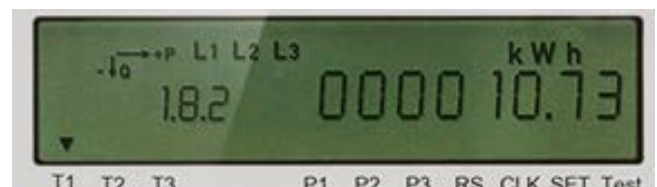
Na slici 3 prikazan je ekran trofaznog, četvorožičnog brojila *A*, sa slike 2.a), na kome je prikazana trenutna vrednost ukupne aktivne električne energije za suprotan smer energije sa rezolucijom prikazivanja energije na tri decimalna mesta u kilovatčasovima.



Slika 3. Ekran brojila *A*, sa slike 2.a), klase tačnosti 0,2 S, na kome je prikazana trenutna **vrednost** ukupne aktivne električne energije za povratni smer energije sa rezolucijom prikazivanja energije na tri decimalna mesta u kilovatčasovima.

Kod industrijskog i komercijalnog brojila *B* na slici 2.b), najviše 8 cifara prikazuje se na ekranu, sa najvećom rezolucijom na tri decimalna mesta.

Na slici 4. prikazan je ekran trofaznog, četvorožičnog brojila *B*, sa slike 2.b), na kome je prikazana trenutna vrednost aktivne električne energije u drugoj tarifi sa rezolucijom prikazivanja energije na dva decimalna mesta u kilovatčasovima.



Slika 4. Ekran brojila *B*, sa slike 2.b), klase tačnosti 0,2 S, na kome je prikazana trenutna vrednost aktivne električne energije u drugoj tarifi sa rezolucijom prikazivanja energije na dva decimalna mesta u kilovatčasovima.

Na slici 5. vidi se prikaz ekrana trofaznog, četvorožičnog brojila *B*, sa slike 2.b), na kome je prikazana trenutna vrednost aktivne električne energije u prvoj tarifi sa rezolucijom prikazivanja energije na tri decimalna mesta u megavatčasovima.

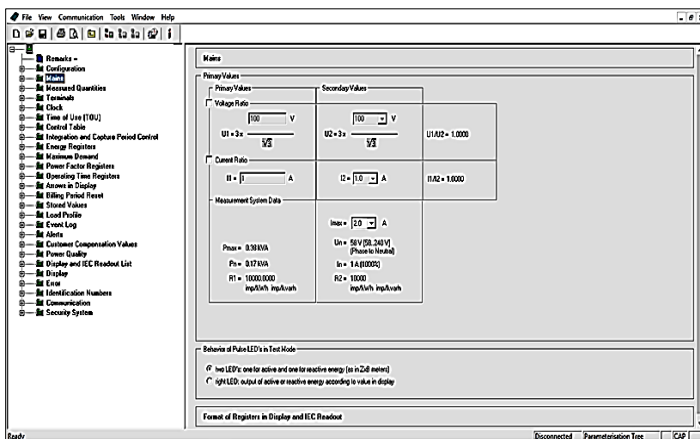


Slika 5. Prikaz ekrana brojila *B*, sa slike 2.b), klase tačnosti 0,2 *S*, na kome je prikazana trenutna vrednost aktivne električne energije u prvoj tarifi sa rezolucijom pokazivanja energije na tri decimalna mesta u megawatčasovima.

Trofazna četvorožična pametna brojila koja su priključena na električnu mrežu preko naponskih i strujnih mernih transformatora i mere električnu energiju iz struja i napona na sekundarnim stranama tih mernih transformatora mogu da budu tako podešena da rezultate izmerene energije prikazuju na svom ekranu kao stvarno izmerenu energiju na sekundarima ili na primarima strujnih i naponskih mernih transformatora.

Kada je brojilo „sekundarno“ podešeno za pokazivanje stvarne vrednosti energije na sekundarnim stranama strujnih i naponskih mernih transformatora, transformatorski odnosi u brojilu podešeni su kao jednaki $1A:1A$ i $\frac{100}{\sqrt{3}}V:\frac{100}{\sqrt{3}}V$, respektivno. Jedinica merenja električne energije u tom slučaju uvek je podešena u *kWh*. Na slici 6. prikazana je kartica za unos prenosnih odnosa strujnih i naponskih transformatora za brojilo *B* sa slike 2.b).

Kada je brojilo „primarno“ podešeno za pokazivanje stvarne vrednosti energije na primarnim stranama mernih transformatora, transformatorski odnosi u brojilu podešeni su u skladu sa odgovarajućim nazivnim prenosnim odnosima mernih transformatora. Jedinica merenja električne energije u tom slučaju uvek je podešena u *MWh*.



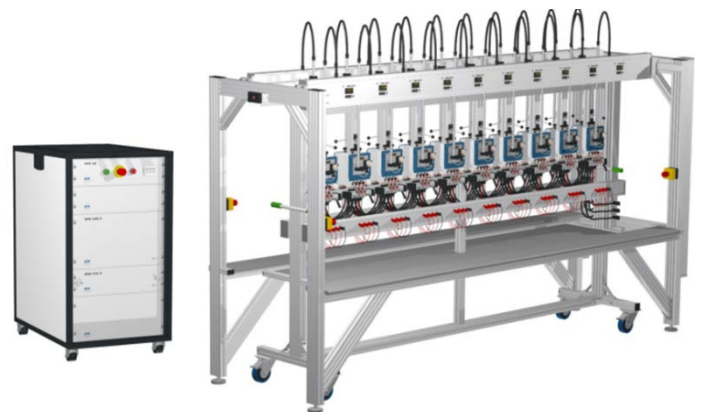
Slika 6. Kartica uslužnog programa za brojilo *B* sa slike 2.b) u kojoj je, saglasno odobrenom nivou pristupa, moguće od strane ovlašćenog lica da se podese prenosni odnosi strujnih i naponskih mernih transformatora.

Sadašnja uobičajena praksa, posebno kada preduzeće održava više stotina brojila, je da se rezolucija registara aktivne električne energije u električnim brojilima klase tačnosti 0,2 *S* podešava na tri decimalna mesta u *kWh*, i da se na ekranu brojila prikazuju vrednosti aktivne električne energije izmerene na sekundarnim stranama mernih transformatora. Jedna od „prednosti“ jeste da na

ovaj način radnici koji montiraju električna brojila u nekom elektroenergetskom postrojenju (i nisu ispitivači brojila u laboratoriji) ne moraju da vode računa o tome da li su podešeni prenosni odnosi mernih transformatora u brojilima jednaki sa stvarnim prenosnim odnosima na terenu. Međutim, radnici koji očitavaju mesečna stanja energije sa brojila (obično daljinski) i na osnovu toga rade obračun prenete električne energije i energije gubitaka imaju dodatni posao da očitavanu energiju sa sekundara svakog od brojila prevedu u traženu, stvarnu primarnu vrednost.

IV PROVERA REGISTRARA

Na slici 7. prikazan je stacionarni ispitni sistem za električna brojila u laboratoriji na kome se sprovodi i provera registara aktivne električne energije. On se sastoji od trofaznog električnog izvora i trofazne stanice.



Slika 7. Stacionarni sistem za ispitivanje električnih brojila.

Provera tačnosti pokazivanja registara brojila aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 *S* naznačenog međufaznog napona 110 *V* i za naznačenu struju 1 *A* otežana je donošenjem novog Pravilnika o brojilima aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 *S* (objavljenog u Službenom glasniku RS br. 104/2016) [3].

Ovaj poseban Pravilnik za brojila klase 0,2 *S* zamenio je Metrološko uputstvo za overavanje elektronskih (statičkih) višefunkcijskih brojila električne energije (objavljeno u Glasniku Zavoda za mere i dragocene metale, br. 1/2007) [4].

Staro Metrološko uputstvo za overavanje elektronskih (statičkih) višefunkcijskih brojila električne energije je i dalje u upotrebi za električna brojila klase 0,5 *S*. Prema ovom starom Metrološkom uputstvu, vreme trajanja provere brojčanika treba da se izabere tako da se odnos vrednosti energije koju registruje brojčanik brojila i vrednost energije koja se dobije množenjem konstante davača impulsa i broja impulsa koje je registrovao brojčak impulsa priključen na davač impulsa za daljinsko merenje, može odrediti sa tačnošću koja je najmanje 4 puta veća od klase tačnosti ispitivanog brojila, za svaki brojčanik.

Prema važećem Pravilniku [3], u Prilogu 3: „Overavanje brojila“, pod tačkom 7. „Provera registra“ zadata je jednačina za najmanju energiju potrebnu za proveru registra, izraženu u vatčasovima:

$$E_{min} = \frac{1000 \cdot R}{b} \quad (1)$$

gde su:

R – rezolucija registra energije,
 b – najveća dozvoljena greška u procentima.

Ova jednačina izvedena je iz uslova da razlika između zadate energije i očitane energije na registru ne može biti veća od $\frac{1}{10}$ dozvoljene greške pri nominalnim vrednostima. Ona je doslovno preuzeta iz Međunarodne preporuke *OIML R 46-1/-2* iz 2012. godine [5], izdate od strane Međunarodne organizacije za zakonsku metrologiju (*OIML*) sa sedištem u Francuskoj, čiji je član i Republika Srbija.

Prema jednačini (1), u slučaju „sekundarno“ podešenih električnih brojila sa registrima energije sa rezolucijom na 3 decimalna mesta (0,001 kWh) najmanja energija koja je potrebna da protekne kroz brojilo radi provere registra električnog brojila klase 0,2 S ($b = 0,2\%$) je:

$$E_{min,sek} = \frac{1000 \cdot R}{b} = \frac{1000 \cdot 0,001 \text{ kWh}}{0,2} = 5 \text{ kWh} \quad (2)$$

Prema rezultatu iz jednačine (2), za „sekundarno“ podešena električna brojila za naznačenu struju 1 A, najveću struju 2 A i naznačeni međufazni napon 100 V, za čisto vreme provere registra aktivne energije dobija se:

$$t_{min,sek} = \frac{E_{min}}{\sqrt{3} \cdot I_{max} \cdot U} = \frac{5 \text{ kWh}}{\sqrt{3} \cdot 2 \text{ A} \cdot 100 \text{ V}} = 14,434 \text{ h} = 14 \text{ h } 26 \text{ min} \quad (3)$$

Dnevni rad u ovolikom trajanju ne može da se propisano organizuje sa jednim kontrolorom, jer prema Zakonu o radu [6] (objavljenom u Službenom glasniku RS broj 95/2018) zaposleni ima pravo na dnevni odmor u neprekidnom trajanju najmanje 11 sati u okviru 24 h u slučaju preraspodele radnog vremena (članovi 57. i 66.), dok je prekovremeni rad ograničen na 12 sati (članovi 53. i 66.). S druge strane, jedan ovlašćeni kontrolor za overu brojila stavlja svoj žig na brojilo po završetku svih ispitivanja propisanih prema Pravilniku o brojilima aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 S.

Kada je električno brojilo podešeno, što je najčešći slučaj, za pokazivanje energija za dve tarife, potrebno je da se posebno provere dva registra aktivne električne energije, a ukupno vreme provere registara je 28 h 52 min.

Kada električno brojilo treba da bude podešeno da pored rada u dve tarife beleži izmerenu energiju u dva smera (od izvora ka korisniku i obrnuto), onda moraju da se posebno provere četiri registra aktivne električne energije, a ukupno vreme provere tih registara je 57 h 44 min.

U Češkoj Republici, stalnoj članici *OIML*-a i Evropske unije, važe „Opšte mere koje se tiču metroloških i tehničkih zahteva za zakonski kontrolisane merne instrumente uključujući metode ispitivanja za potvrdu tipa i verifikaciju zakonski kontrolisanih mernih instrumenata: električna brojila“, broj 0111-OOP-C022-18, koje su stupile na snagu 28.3.2019. god. [7].

U pomenutom češkom pravilniku piše da se za brojila klase tačnosti 0,2 S uslovi ispitivanja pojednostavljaju. Uslov je da razlika između zadate i očitane energije ne sme da bude veća od 1/4 dozvoljene greške (tačka 7.7 strana 33 [7]). Dopušta se

primena struja u opsegu od naznačene do najveće struje za dato električno brojilo. Ovo znači 2,5 puta manje vreme ispitivanja tačnosti pokazivanja brojača u slučaju brojila aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 S u odnosu na vreme propisano domaćim Pravilnikom o brojilima aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 S [3].

Kao primer „primarnog“ podešavanja podataka za aktivnu energiju, smatraće se da su prenosni odnosi naponskog i strujnog mernog transformatora:

$$n_U = \frac{110000 \text{ V}}{100 \text{ V}} = 1100 \quad i \quad n_I = \frac{1500 \text{ A}}{1 \text{ A}} = 1500 \quad (4)$$

Njihov proizvod iznosi:

$$n_T = n_U \cdot n_I = 1100 \cdot 1500 = 1,65 \cdot 10^6 \quad (5)$$

Prema jednačini (1), u slučaju „primarno“ podešenih električnih brojila sa registrima energije sa rezolucijom na 2 decimalna mesta (0,01 MWh) najmanja energija koja je potrebna da protekne kroz brojilo radi provere registra električnog brojila klase 0,2 S ($b = 0,2\%$) je:

$$E_{min,pr} = \frac{1000 \cdot R}{b} = \frac{1000 \cdot 0,01 \text{ MWh}}{0,2} = 50 \text{ MWh} \quad (6)$$

Prema rezultatu iz jednačine (2), za „primarno“ podešena električna brojila za naznačenu struju 1 A, najveću struju 2 A i naznačeni međufazni napon 100 V, za neto vreme provere registra aktivne energije dobija se:

$$t_{min,pr} = \frac{E_{min}}{\sqrt{3} \cdot n_T \cdot I_{max} \cdot U} = \frac{50 \text{ MWh}}{\sqrt{3} \cdot 1,65 \cdot 10^6 \cdot 2 \text{ A} \cdot 100 \text{ V}} = 0,08748 \text{ h} = 5,25 \text{ min} \quad (7)$$

Prema jednačini (7), izračunato vreme ispitivanja provere registra u slučaju „primarno“ podešenog električnog brojila neuporedivo je kraće nego posmatrano vreme izračunato prema jednačini (3) za slučaj „sekundarno“ podešenog električnog brojila.

V GREŠKA OČITAVANJA

Izmerena vrednost fizičkih veličina zna se samo sa izvesnom sigurnošću. Greška merenja se procenjuje. Merenje aktivne električne energije pomoću trofaznog četvorožičnog električnog brojila spada u neposredna merenja jer se rezultati merenja direktno očitavaju sa ekrana brojila.

Apsolutna greška bilo kog mernog instrumenata, pa tako i električnog brojila, računa se prema obrascu:

$$\Delta x = kx + l x_{min} = kx + \Delta x_0 \quad (8)$$

gde su:

- k – data klasa tačnosti mernog instrumenta,
- x – izmerena vrednost,
- x_{min} – vrednost poslednje cifre (rezolucija) i
- l – sačinilac
- Δx_0 – greška očitavanja.

Relativna greška merenja je:

$$\delta_U = \frac{\Delta x}{x} = k + \frac{l x_{min}}{x} \quad (9)$$

Rezultat jednog direktnog merenja x' se izražava kao:

$$x' = x \pm \Delta x \quad (10)$$

Svi digitalni instrumenti imaju nerazdvojivu mernu nesigurnost zbog ograničenog broja cifara koje mogu da se prikažu na ekranu instrumenta. Najmanja brojčani korak koji može da bude prikazan na digitalnom ekranu naziva se rezolucija.

Unutrašnje kolo digitalnog instrumenta mora da zaokruži merenje tako da odgovara broju cifara za prikaz. Ovaj postupak zaokruživanja uvodi neizvesnost jer kada se pročita merena vrednost sa ekrana, nikada ne bi moglo da se zna koja bi sledeća cifra bila bez zaokruživanja. Zato se uzima da je nesigurnost polovina vrednosti poslednjeg prikazanog decimalnog mesta, pa je vrednost sačinioća $l = \frac{1}{2}$.

U ovom radu, posmatra se greška pri očitavanju električnog brojila pri različitim načinima podešavanja transformatorskih odnosa u brojilu i shodno tome različitim podešenim mernim jedinicama za merenje električne energije (u kWh za „sekundarno“ podešena i u MWh za „primarno“ podešena brojila električne energije).

Za brojila klase tačnosti 0,2 S, biće $k = 0,002$, pa je:

$$\Delta x_U = 0,002 \cdot x + 0,5 \cdot x_{min} = 0,002 \cdot x + \Delta x_O \quad (11)$$

Posmatraće se samo sistematska (instrumentalna) greška merenja koja ostaje stalna i na koju ne utiče povećanje broja merenja.

Greška očitavanja mesečno izmerene vrednosti aktivne električne energije pri „sekundarno“ podešenom električnom brojilu svedena na primarnu stranu, za slučaj prenosnih odnosa naponskog i strujnog transformatora $n_U = \frac{110000 V}{100 V} = 1100$ i $n_I = \frac{1500 A}{1 A} = 1500$, je:

$$|\Delta x_{OS}| = 0,5 \cdot (1,65 \cdot 10^6 \cdot 0,001 \cdot 10^3) Wh = 825000 Wh = 0,82 MWh \quad (12)$$

Greška očitavanja mesečno izmerene vrednosti aktivne električne energije pri „primarno“ podešenom električnom brojilu je:

$$|\Delta x_{OP}| = 0,01 MWh \quad (13)$$

što je 82 puta manja greška očitavanja nego pri očitavanju „sekundarno“ podešenog brojila.

Na primarnim stranama strujnog i naponskog mernog transformatora ukupna protekla energija za mesec dana, pri nazivnim vrednostima struje i napona, je:

$$E_P = \sqrt{3} \cdot U_P \cdot I_P \cdot T = \sqrt{3} \cdot 110000 \cdot 1500 \cdot 24 \cdot 30 Wh = 205767,64 MWh \quad (14)$$

Ako brojilo počinje da radi podešeno od nule, greška očitavanja kod „sekundarno“ podešenog brojila na tri decimalna mesta u kWh je mala i za posmatrane nazivne primarne vrednosti struja i napona iznosi $\pm 0,0004$ % izmerene vrednosti. Tada je ukupna relativna greška koja se pravi zapravo veća od klase tačnosti brojila 0,2 S i iznosi $\pm 0,2004$ %.

Međutim, brojila uglavnom ne počinju rad podešena na nulu, već je to neka slučajno zabeležena vrednost energije koja je protekla tokom vremena. Protekla energija x_R se računa kao razlika dva merenja x'' i x' :

$$x_R = x'' - x' \quad (15)$$

Greška očitavanja se onda duplira i iznosi $\pm 0,0008$ % izmerene vrednosti. Tada je ukupna relativna greška veća od klase tačnosti brojila 0,2 S i iznosi $\pm 0,2008$ %.

Očigledno je da udeo ove greške očitavanja mesečno izmerene aktivne električne energije raste za manje nazivne vrednosti sekundarne struje i sekundarnog napona.

Međutim, pošto su energetske transformatori obično opterećeni u proseku sa 50 % naznačenog opterećenja [8,9], ukupna protekla energija za mesec dana, pri nazivnim vrednostima struje i napona je dvostruko manja, pa je ukupna relativna greška merenja tada za brojilo koje je bilo podešeno za rad od nule $\pm 0,2008$ %, a za brojilo kod koje su obe vrednosti energije slučajne $\pm 0,2016$ %.

Pri proračunima gubitaka na dalekovodima, treba voditi računa da električna brojila koja mere energiju na dva naspramna kraja nekog dalekovoda nemaju istu grešku očitavanja jer kroz njih teku različite aktivne snage zbog gubitaka na tom delokovodu. Energija gubitaka na dalekovodu je razlika energija x_{R1} i x_{R2} na dva kraja dalekovoda 1 i 2:

$$x_G = x_{R1} - x_{R2} = (x_1'' - x_1') - (x_2'' - x_2') \quad (16)$$

Greška očitavanja će da bude najmanje dvostruko veća. Pored toga, udeo greške očitavanja u ovom slučaju je značajniji, jer je veličina gubitaka na dalekovodu (2 – 4) % od ukupne izmerene energije koja prođe kroz dalekovod. Ako se pretpostavi da je ukupna protekla energija za mesec dana na početku dalekovoda jednaka vrednosti dobijenoj u jednačini (14), relativna greška merenja mesečnih gubitaka energije na dalekovodu:

- 1) ako su oba brojila pri prvom merenju bila podešena na nulu biće $\pm (0,22 - 0,24)$ %,
- 2) ako je samo jedno brojilo pri prvom merenju bilo podešeno na nulu $\pm (0,23 - 0,26)$ %,
- 3) ako oba brojila imaju obe vrednosti energije kao slučajne vrednosti relativna greška merenja biće $\pm (0,24 - 0,28)$ %.

Ako se pretpostavi da je dalekovod bio opterećeni u proseku sa 50 % naznačenog opterećenja, ukupna protekla energija za mesec dana, pri nazivnim vrednostima struje i napona biće dvostruko manja pa će i gubici da budu srazmerno manji. Otuda je ukupna relativna greška merenja gubitaka energije tada:

- 1) ako su oba brojila pri prvom merenju bila podešena na nulu $\pm (0,24 - 0,28)$ %,
- 2) ako je samo jedno brojilo pri prvom merenju bilo podešeno na nulu $\pm (0,26 - 0,32)$ %,
- 3) ako oba brojila imaju obe vrednosti energije kao slučajne vrednosti (u krajnjem i početnom stanju očitavanja) relativna greška merenja biće $\pm (0,28 - 0,36)$ %.

Ovo je primetno veća greška u odnosu na najveću dozvoljenu grešku električnog brojila od $\pm 0,2$ %.

U današnje vreme razvijaju se električna brojila klase 0,1 S [10]. Kod jednog takvog brojila, za iste nazivne vrednosti struje, najveće struje i napona kao za posmatrano brojilo klase 0,2 S, pri „sekundarno“ podešenom brojilu i za zadate prenosne odnose mernih transformatora kao u prethodnim primerima, bio bi očigledno još veći uticaj greške očitavanja aktivne električne energije.

VI ZAKLJUČAK

Podešavanjem brojila električne energije na način da beleži stvarnu utrošenu energiju dobijenu na osnovu vrednosti struja i napona na sekundarnim stranama strujnih i naponskih mernih transformatora, respektivno, primenom važećeg Pravilnika o brojlama aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 S, koji se primenjuje od 23.12.2016., javlja se veliko izračunato vreme ispitivanja registara izmerene električne energije pri prvom, redovnom (periodičnom) i vanrednom kontrolisanju i overavanju brojila. Posebno je to izraženo na primeru često korišćenog brojila klase tačnosti 0,2 S za nazivnu struju 1 A i nazivni fazni napon 57,7 V. U Češkoj Republici, koja je stalni član OIML-a kao i Republika Srbija, zahtevano vreme provere registra električne energije brojila klase 0,2 S je 2,5 puta kraće.

Kao bolji pristup, preporučuje se „primarno“ podešavanje brojila električne energije tako da pokazuje traženu, stvarnu vrednost aktivne električne energije sa primarne strane mernih transformatora iz sledećih razloga:

- 1) značajno je manje vreme ispitivanja tačnosti pokazivanja registara aktivne električne energije;
- 2) značajno je manja greška očitavanja vrednosti registra aktivne električne energije;
- 3) primetno je manja relativna greška merenja mesečnih gubitaka energije na nekom od elemenata elektroenergetskog sistema (energetskom transformatoru, nadzemnom vodu, kابلu i sl.);
- 4) neposredno sa ekrana električnog brojila očitava se stvarno potrošena električna energija;
- 5) moguće je da jedan kontrolor obavi ispitivanje tačnosti pokazivanja registra aktivne energije u vremenu koje je skladu sa Zakonom o radu.

LITERATURA

- [1] ITRON SL7000 IEC7 user manual, https://www.otec.com.ua/show_catalogue_pdf/194683/1 [pristupljeno 20.01.2021]
- [2] Landis + Gyr. D000062026 en a – E650 Series 4 – ZMD400AT/CT, ZFD400AT/CT - User Manual. 2.2 Standards., <https://landisgyr.com.cn/uploadfiles/d000062026.pdf> [pristupljeno 20.01.2021]
- [3] Pravilnik o brojlama aktivne električne energije klase tačnosti 0,2 S („Službeni glasnik RS“, br. 104/2016), http://www.dmdm.rs/Pravilnici/pravilnik_o_brojilima_aktivne_elektricne_energije_klase_tacnosti_02_s.pdf [pristupljeno 20.01.2021]
- [4] Metrološko uputstvo za overavanje elektronskih (statičkih) višefunkcijskih brojila električne energije (Glasnik ZMDM, br. 1/2007), http://www.dmdm.rs/PDF/MusMup/MUP_elbrojila_el_en_visenamenski_1_07.pdf [pristupljeno 22.01.2021]
- [5] International Recommendation OIML R 46-1/-2: „Active electrical energy meters“, Part 1: Metrological and technical requirements, Part 2: Metrological controls and performance tests, 2012., https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r046-1-2-e12.pdf [pristupljeno 22.01.2021]
- [6] Zakon o radu („Službeni glasnik RS“, br. 95/2018), https://www.paragraf.rs/propisi/download/zakon_o_radu.pdf [pristupljeno 22.01.2021]
- [7] Opatření obecné povahy, číslo: 0111-OOP-C022-18 kterým se stanovují metrologické a technické požadavky na stanovená měřidla, včetně metod zkoušení při schvalování typu a při ověřování stanovených měřidel: „elektroměry“, https://www.cmi.cz/sites/all/files/public/download/Uredni_deska/OOP/OOP_%2022-18%20Elektrom%C4%99Bry.pdf [pristupljeno 23.01.2021]
- [8] BEE Code Transformers, https://nredcap.in/PDFs/BEE_manuals/BEE_CODE_TRANSFORMERS.pdf [pristupljeno 23.01.2021]
- [9] ABB Environmental Product Declaration - Power Transformer TrafoStar 500 MVA (ONAN/ONAF) Registration nr. S-P-00019. ABB Transformer AB Ludvika, Sweden, 2003. <https://library.e.abb.com/public/566748ad75116903c1256d630042f1af/ProductDeclarationStarTrafo500.pdf> [pristupljeno 23.10.2020].
- [10] Power Quality Meters: ION9000 Series Advanced Power Quality Meters., [https://www.productinfo.schneider-electric.com/nadigest/5c51d645347bdf0001f1f280/Master/17704_MAIN%20\(bookmap\)_0000041932.xml/\\$/Metering-00BF619F](https://www.productinfo.schneider-electric.com/nadigest/5c51d645347bdf0001f1f280/Master/17704_MAIN%20(bookmap)_0000041932.xml/$/Metering-00BF619F) [pristupljeno 23.01.2021]

AUTORI

mr Đorđe Dukanac, magistar elektrotehničkih nauka, „Elektromreža Srbije“ a.d., djordje.dukanac@ems.rs

Program energetske efikasnosti HIP-Petrohemija Pančevo

Energy Efficiency Program of HIP-Petrohemija Pancevo

Biljana Suslov, Miša Bulajić

“HIP-Petrohemija” a.d. Pančevo

Rezime - Program energetske efikasnosti za HIP-Petrohemija a.d. Pančevo 2020-2022. godina je planski dokument koji izražava planiranje potrošnje energije i poboljšanja energetske efikasnosti sistema u periodu od naredne tri godine, kao sprovođenje obaveza koje proističu iz Zakona o efikasnom korišćenju energije (Sl. glasnik RS, br. 25/2013) i u skladu sa ciljevima Strategije razvoja energetike Republike Srbije. U periodu od 2013-2019. godine u HIP su sprovedeni investicioni programi i realizovani planirani remont i svih postrojenja, pri čemu je realizovano više planiranih poslovnih projekata sa ciljem podizanja energetske efikasnosti. U kapitalne projekte i investiciono održavanje uloženo je oko 42 miliona evra, dok je za tekuće održavanje i remonte potrošeno oko 35 miliona evra, sve finansirano iz sopstvenih izvora. Skup mera i akcija upravljanja rizikom po opstanak i održivost petrohemijskih postrojenja su investiciona ulaganja u strateške projekte modernizacije i projekte povećavanja proizvodnih kapaciteta uz ugradnju energetski efikasne opreme. Program energetske efikasnosti referencira sprovedena energetska poboljšanja u prethodnom periodu i planirana poslovna poboljšanja u narednom periodu, a sve u cilju kontinualnog poboljšanja energetske efikasnosti postrojenja HIP-Petrohemije.

Ključne reči - Energija, Efikasnost, Strategija, Unapređenje, Usklađenost, Uštede

Abstract - Energy efficiency program of HIP-Petrohemija a.d. Pancevo 2020-2022 is a planning document that expresses the planning of energy consumption and improvement of energy efficiency of the system in the next three years, as compliance with the Law on Efficient Use of Energy (Official Gazette of RS, No. 25/2013) and in accordance with the goals of the Energy Development Strategy of the Republic of Serbia. In the period from 2013-2019, investment programs were implemented in HIP and planned overhauls of all plants were realized, whereby several planned business projects were realized with the aim of raising energy efficiency. About 42 million euros were invested in capital projects and investment maintenance, while about 35 million euros were spent on current maintenance and plant overhaul, all financed from own sources. The set of measures and actions for risk management for the survival and sustainability of petrochemical plants are investments in strategic modernization projects and projects to increase production capacity with the installation of energy efficient equipment. The energy efficiency program references the implemented energy improvements in the

previous period and the planned business improvements in the following period, all with the aim of continuously improving the energy efficiency of the HIP-Petrohemija plant.

Index Terms - Energy, Efficiency, Strategy, Improvement, Compliance, Savings

I PREDMET I PODRUČJE PRIMENE

Program energetske efikasnosti je planski dokument koji HIP-Petrohemija kao obveznik sistema energetskog menadžmenta usvaja za period od tri godine. Program energetske efikasnosti 2020-2022 referencira sprovedena energetska i poslovna poboljšanja u prethodnom periodu i planirana poboljšanja za naredni trogodišnji period, a sve u cilju kontinualnog poboljšanja energetske efikasnosti postrojenja HIP. Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine definisala je stvaranje uslova za unapređenje energetske efikasnosti u svim sektorima kao strateški cilj Republike Srbije. Strategijom se energetska efikasnost uočava kao „novi domaći izvor energije“ i važan uslov za postizanje cilja - poboljšanje konkurentnosti. Tri strateška prioriteta RS obuhvataju aspekt energetske efikasnosti. Energetska efikasnost, kao strateški cilj je deo prioriteta „održiva energetika“. U okviru „energetske bezbednosti“ kao prioriteta, navodi se izgradnja energetski efikasnijih novih proizvodnih kapaciteta električne energije koji koriste ugalj, a u okviru „energetskog tržišta“ navodi se rehabilitacija distributivnih mreža stvarajući osnov za unapređenje snabdevanja, unapređenjem energetske efikasnosti. Plan smanjivanja potrošnje primarne energije u RS je definisan i usklađen sa obavezama Republike Srbije prema Energetskoj zajednici u okviru relevantnih akcionog plana za odgovarajući period.

II OPŠTI PODACI HIP-PETROHEMIJA PANČEVO

HIP-Petrohemija a.d. Pančevo je značajna kompanija hemijske industrije Jugoistočne Evrope sa tradicijom poslovanja dužom od 40 godina. Kompanija je osnovana 1975. godine, a počela sa proizvodnjom 1977. godine. Petrohemijski kompleks zauzima 241 hektar u industrijskoj zoni Pančeva, Crepaje i Elemira. Nalazi se na raskrsnici kopnenih i vodenih puteva i najkraćim transportnim vezama sa celom Evropom, što omogućava efikasno snabdevanje i otpremu robe. HIP-Petrohemija je jedini proizvođač polietilena i sintetičkog kaučuka u Srbiji, tako da predstavlja jednog od najznačajnijih snabdevača domaćeg i

regionalnog tržišta. U svom sastavu HIPP ima sedam proizvodnih fabrika i sopstvena energetska i distributivna elektroenergetska postrojenja, fabriku za obradu otpadnih voda, laboratorije, radne jedinice za održavanje i brojne specijalizovane službe, koje su podrška proizvodnji. HIP-Petrohemija ima 1300 zaposlenih radnika, najvećim delom visokog i srednjeg obrazovanja tehničkih struka.

Petrohemijska industrija je značajan potrošač energije i prirodnih resursa i zato je proces upravljanja energijom bio u fokusu razvoja održivog poslovanja u prethodnom periodu. Pored tehnološkog razvoja kompanije, Petrohemija je u poslednjih pet godina uložila značajne resurse i znanje u oblasti upotrebe energije. Kontinualno poboljšavanje energetske performansi predstavlja jedan od strateških ciljeva naše kompanije. Razvoj menadžmenta energijom je HIP-Petrohemiji doneo značajne finansijske uštede i poslovni boljitak. U Politiku HIP-Petrohemije su integrisani strateški ciljevi u oblasti energije. Organizovano upravljanje energijom podrazumeva integrisani pristup i neprekidno bavljenje energijom u svim strukturama kompanije čiji je cilj racionalna potrošnja energije. Primena investicionih, operativno-tehničkih i poslovnih unapređenja dovela je do velikog poboljšanja energetske efikasnosti postrojenja.

III ISTORIJA HIP-PETROHEMIJA

Petrohemijski kompleks HIP-Petrohemija a.d. Pančevo se nalazi u središtu Jugoistočne Evrope i karakteriše ga izuzetno povoljna lokacija koju odlikuju najkraće transportne veze sa celom Evropom, odnosno raskrsnica dva najvažnija transportna koridora koji povezuju zapadnu Evropu i Bliski istok (Pan-evropski koridori br.10 i br.7) i blizina reke Dunav. Razvijena transportna mreža (drumska, železnička i rečna) i infrastruktura omogućava HIP-Petrohemiji efikasno snabdevanje sirovinama i otpremu proizvoda.

Razvojni put HIP-Petrohemija a.d. Pančevo počinje od 1969. godine kada je doneta odluka o izgradnji petrohemijskog kompleksa u Pančevu, sastavljenog od šest proizvodnih fabrika, međusobno tehnološki povezanih etilenskom i hlornom linijom. Nakon višegodišnjeg pripremnog perioda 1975. godine osniva se preduzeće za proizvodnju petrohemijskih proizvoda, sirovina i hemikalija u sastavu složenog sistema Hemijske industrije Pančevo, a 1977. godine na jugoslovenskom, a zatim i svetskom tržištu pojavljuju se polimerni materijali: "Hiplex" - polietilen visoke gustine, "Hipnil" i "Hipten" - polietilen niske gustine. Hemijska industrija Pančevo se 1990. godine transformiše a HIP-Petrohemija postaje društveno preduzeće. Naredne, 1991. godine Fabrika sintetičkog kaučuka iz Elemira postaje jedna od fabrika u sastavu HIP-Petrohemije, a startuje i Fabrika za proizvodnju PE cevi i elektrofuzionih fittinga na lokaciji Luka Dunav u Pančevu, kao prva fabrika iz programa razvoja prerade. HIP-Petrohemiji se 1997. godine pridružuje i Fabrika Panonijaplast iz Crepaje, fabrika za preradu plastičnih masa.

Ukupni proizvodni kapaciteti HIP-Petrohemije su do 1999. godine iznosili 1.136.614 tona petrohemijskih proizvoda godišnje. Sa sadašnjim kapacitetima HIPP godišnje prerađuje oko 500.000 tona sirovog benzina i proizvode oko 700.000 tona petrohemijskih proizvoda. Razlog smanjivanja kapaciteta je

nemogućnost korišćenja oštećenih fabrika za proizvodnju hlora, vinilhlorida i polivinil hlorda posle 1999. godine, a time i funkcionisanje preduzeća u zaokruženom tehnološkom sistemu. Danas se pored sedam proizvodnih fabrika u njenom sastavu nalaze i Fabrika Energetika i Fabrika za obradu voda, Radne jedinice za održavanje, kao i brojne specijalizovane organizacione celine, koje su podrška proizvodnji. HIP-Petrohemija a.d. Pančevo je od 2015. godine, prema Odluci Vlade RS o određivanju subjekata privatizacije od strateškog značaja, svrstana u grupu 17 subjekata privatizacije od strateškog značaja za privredu RS. Nakon sprovedenog Unapred pripremljenog plana reorganizacije (UPPR) 2017. godine, HIPP-u je omogućeno da posluje sa održivim rezultatom i da samostalno funkcioniše.

IV METODOLOGIJA ENERGETSKOG MENADŽMENTA

Kao jedan od strateških ciljeva u oblasti energije, rukovodstvo HIP-Petrohemije je donelo odluku da implementira i sertifikuje Sistem menadžmenta energijom u HIP-Petrohemiji prema standardu ISO 50001, kako bi se upravljanje energijom sprovodilo sistemski i uspostavilo kontinualno poboljšavanje energetske efikasnosti postrojenja. Sistem menadžmenta energijom je implementiran u sistem poslovanja u periodu 2014-2015. godine, a sertifikovan decembra 2015. godine od strane akreditovanog sertifikacionog tela. Od tada se redovno sprovode godišnji nadzori od strane nezavisnog sertifikacionog tela i HIPP je usaglašen sa zahtevima standarda i pravilima sertifikacije. Implementacijom standarda ISO 50001, HIP-Petrohemija je išla u susret svim zakonskim obavezama u oblasti energetike, jer se pokazalo da su elementi standarda ISO 50001 potpuno usklađeni sa zahtevima zakonske regulative RS i EU.

Sistem menadžmenta energijom Republike Srbije (SEM) je uspostavljen 2016. godine, stavljanjem u primenu Zakona o efikasnom korišćenju energije (Sl.gl.RS 25/13) i podzakonskom regulativom u ovoj oblasti. HIP-Petrohemija je obveznik ovog sistema kao jedan od značajnih potrošača energije u Republici Srbiji. Petrohemija je do sada sprovedla sve postavljene obaveze prema zahtevima SEM. Osnovni cilj sistema upravljanja energijom je da se primene mere poboljšanja i otklone „slaba“ mesta u upotrebi energije, kako bi se za isti proizvodni kapacitet, potrošilo manje primarne energije. Smanjenje potrošnje energije po jedinici proizvoda donosi smanjenje finansijskih troškova za nabavku energenata i smanjenje emisije štetnih gasova u vazduh po jedinici proizvoda. Da bi se sve ovo postiglo, sistem postavlja zahteve za povećanje energetske efikasnosti postojećih postrojenja, kao i nabavku energenta, opreme, usluga i projektovanje novih postrojenja uz postavljanje energetske kriterijuma za nabavku i projektovanje.

Implementacija sistema menadžmenta energijom započinje izradom energetskog bilansa sistema i sprovođenjem energetskog pregleda, kojim se utvrđuje postojeće referentno stanje (energetska poredbeni vrednost), pronalaze „slaba“ mesta sistema i ukazuje na potrebna tehničko-tehnološka unapređenja u procesu. Definisane su referentne/poredbene vrednosti za pojedine energente i pojedine potrošače. Definisani su indikatori za praćenje energetske performanse za HIPP (EnPI), kao specifična potrošnja energije u odnosu na utrošenu osnovnu sirovinu sirovi benzin (GJ/t SB), dok se u proizvodnim fabrikama

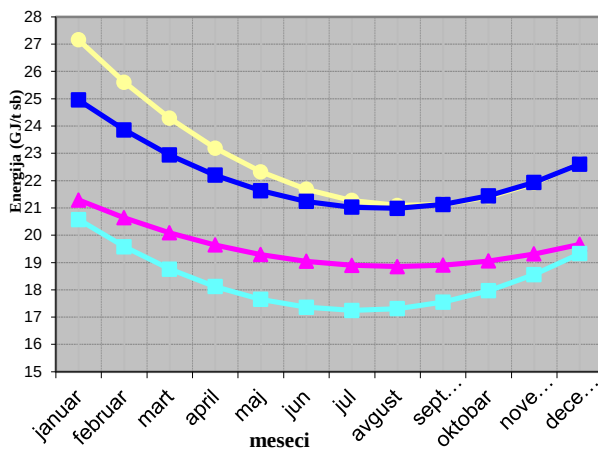
definiše EnPI kao specifična potrošnja energije u odnosu na ukupnu količinu proizvoda (GJ/t). Planiraju se tehničko-tehnološke mere za poboljšanje energetske efikasnosti postrojenja, a godišnje se preispituju efekti i periodično unapređuju mere upravljanja, sve u cilju kontinualnog poboljšanja energetske efikasnosti.

V ENERGETSKI BILANS 2015-2019. GODINA

Identifikovane su sve vrste energije koje se koriste u procesima HIPP i koje se periodično prate, mere i analiziraju. Navedeni su eksterni i interni energenti koji se koriste i troše u HIP-Petrohemiji – eksterni: Električna energija, Prirodni gas, Ulje za loženje (mazut), Dizel gorivo, Motorna goriva i interni: Piroloitičko ulje, Loživi gas (RG), Rafinat II, Procesni gas, Vodena para, Instrumentalni i procesni vazduh. HIP-Petrohemija je svoje procese podelila prema području primene EnMS na procese proizvodnje, procese podrške i administracije. Navedeni su korisnici / procesi i organizacione celine HIP-Petrohemije, kao korisnici energije: fabrike: Etilen, PEVG, PENG, Petroplast, Panonijaplast, FSK, Energetika, Fabrika za obradu voda; podrška: Trafo stanica HIP 2, Održavanje; Administracija; eksterni korisnici.

Energetska poredbena vrednost („base line“/BL) je kvantitativna referentna vrednost koja pruža osnovu za poređenje energetske performansi organizacije. EnB u HIPP se projektuje na osnovu analize energetske performansi u prethodnih 5 godina. Od početka primene sistema menadžmenta energijom EnB je ažuriran više puta, u skladu sa izmenama u procesu i na opremi (2015. god; 2016. god; 2018. god; 2020. god.). 2020. godine je projektovan novi BL HIPP 2020, na osnovu analize potrošnje energije u periodu 2015-2019. godine i on je važeći u narednom periodu. Kao indikator energetske performansi HIPP (EnPI) je usvojen GJ/t SB - količina potrošene energije prema količini utrošene osnovne sirovine / sirovog benzina (SB) u procesu proizvodnje fabrike Etilen.

BASE LINE HIPP 2020.

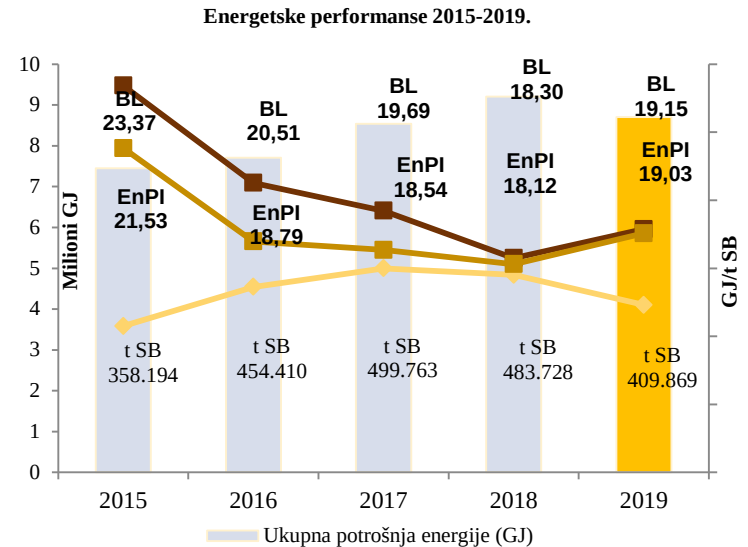


Slika 1. Base line HIPP 2020

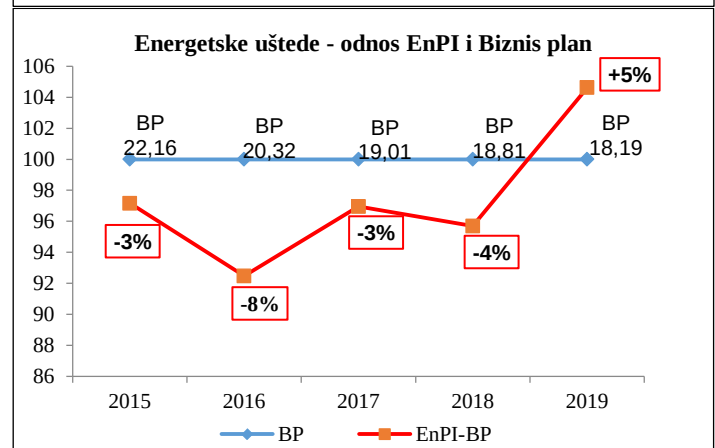
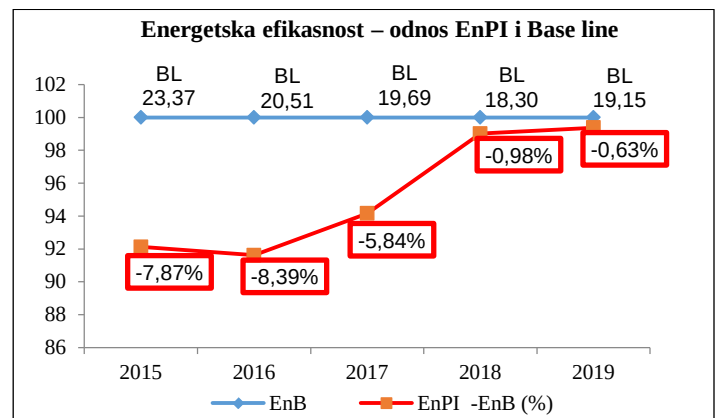
Base line HIPP predstavlja skup funkcija specifičnih potrošnji energije (GJ/t SB) u zavisnosti od kapaciteta prerade SB i kalendarskog meseca u godini (uticaj spoljne temperature na potrošnju). Na dijagramu (slika 1) je prikazan BASE LINE 2020,

u zavisnosti od više karakterističnih kapaciteta prerade SB.

Na osnovu merenja i praćenja potrošnje svih energenata, analizirane su energetske performanse postrojenja HIPP u periodu 2015-2019. godina, sa osvrtom na postignute efekte za prethodnih pet godina. Na Slici 2 je prikazana potrošnja energije (GJ), specifična potrošnja energije / EnPI (GJ/t SB) i poređenje sa usvojenom poredbenom vrednosti / BL (GJ/t SB).



Slika 2. EnMS HIPP 2015-2019.



Slika 3. Energetska efikasnost HIPP 2015-2019.

Na osnovu analize energetske performansi HIPP u toku prethodnih 5 godina, zaključuje se:

- 1) Realizovano je smanjenje specifične potrošnje energije HIPP za proteklih 5 godina od 11,61% ili 2,32% prosečno godišnje.
- 2) Specifična potrošnja energije je povećana 2019.god u odnosu na 2018.god za 0,91 GJ/t ili 5% iz razloga smanjenog obima proizvodnje za 15,3% (dvomesečni zastoj proizvodnje, kapitalni remont, realizacija investicionog programa).
- 3) Poboljšana je energetska efikasnost u svakoj od godina u periodu 2015-2019.god, jer je ostvarena specifična potrošnja energije manja od referentne poredbene vrednosti „Base line“.
- 4) Ostvarene su finansijske uštede za nabavku energenata u periodu od 2015-2019. godine, jer je potrošeno manje ukupne energije i finansijski troškovi su manji od planiranih.

Novi aktivator katalizatora (PEVG)	1.152.268	2019	Smanjenje gubitaka katalizatora
Iskorišćenje gasovityh ugljovodnika (FSK)	758.710	2015	EE=0,85 mil eur/god
Rekonstr. sistema pakovanja (FSK)	198.534	2015	EE=0,5 eur/god
Postrojenje za uklanjanje stirena iz vazduha (FSK)	1.087.319	2019	Smanjenje emisije stirena
Rekonstrukcija pumpne stanice za rashladnu vodu (Energetika)	723.739	2015	EE= 2 mil eur/god
Zamena izolacije na međupogonskom cevovodu vodene pare (Energetika)	433.925	2018	EE=300.000 eur/god
Rekonstrukcija rashladnih tornjeva / sanacija drvene građe (Energetika)	2.343.797	2014-2019	Pouzdanost procesa

VI SPROVEDENE MERE POBOLJŠANJA ENERGETSKE EFIKASNOSTI U PRETHODNOM PERIODU

Postignuti su značajni efekti na unapređenju energetske efikasnosti postrojenja HIPP, kao posledica realizovanih investicionih projekata, sprovedenih planova preventivnog održavanja i godišnjih remonta postrojenja. U periodu 2013-2019.god u kapitalne projekte i investiciono održavanje uloženo je oko 42 miliona evra, dok je za tekuće održavanje i remonte potrošeno oko 34,6 miliona evra, sve finansirano iz sopstvenih izvora. U tabeli ispod su navedeni najznačajniji investicioni projekti koji su realizovani u prethodnom periodu, a za cilj su imali energetske, operativnu efikasnost i/ili ekološke zahteve koji obezbeđuju održivi razvoj kompaniji.

Tabela 1. Investicioni projekti 2013-2019.

Naziv projekta	Capex	God.	Efekti
Investiciono održavanje 4 peći za pirolizu (Etilen)	2.728.056	2014-2019	EE=100.000 eur/god po peći
Sanacija izolacije rezervoara Tk-1106 (Etilen)	133.853	2017	EE=200 eur/god
Rekonstrukcija Tk-1101 A (Etilen)	711.985	2018	Smanjenje emisije ugljovodnika
Reinstrumentacija, faza I (Etilen)	3.397.000	2019	EE=1,2 mil eur/god
Zamena sistema regulacije turbo-kompresora (Etilen)	1.829.709	2019	Pouzdanost procesa
Mašina za oblaganje streč folijom (PENG)	254.900	2019	EE=80.000 eur/god
Sanacija temelja i elektromotora kompresora (PENG)	1.920.000	2019	Pouzdanost procesa
Nova linija za pakovanje (PEVG)	1.099.152	2019	EE=5 mil eur/god
Nova linija za pakovanje (PEVG)	1.099.152	2019	
Rashladna jedinica vent gasa (PEVG)	859.199	2015	EE=0,8 mil eur/god

VII PROGRAM MERA ENERGETSKE EFIKASNOSTI

Planiranje upotrebe i potrošnje energije je jedan od značajnih procesa u okviru planiranja poslovanja i upravljanja kompanijom. Program poboljšanja energetske efikasnosti predstavlja alat za upravljanje procesnim rizicima u cilju uspostavljanja proaktivne kulture i ulaganje u kontinuitet poslovanja. Program energetske efikasnosti je planski dokument koji definiše planirane ciljeve uštede energije i novca, usklađen je sa planiranim ciljevima strategije Republike Srbije.

Program i planovi poboljšanja HIPP definišu mere unapređenja energetske efikasnosti u nekoliko kategorija:

1) Investicije - kapitalni projekti

Naziv projekta	Capex	God.
Reinstrumentacija, faza II (Etilen)	4.500.000	2022
Povećanje energetske efikasnosti peći za pirolizu, (Etilen)	4.000.000	2024
Rekonstrukcija krova Tk-1101 C (Etilen)	800.000	2022
Kontinualni analizator sadržaja dimnih gasova (Etilen)	300.000	2022
LowNOx gasni gorionici na kotlovima (Etilen)	1.000.000	2022
Revitalizacija izmenjivača toplote (Etilen)	1.200.000	2024
Pumpa kotlovske vode P-1001 (Etilen)	500.000	2024
Revitalizacija procesnih pumpi (Etilen)	1.000.000	2024
Kontinualni analizator sadržaja dimnih gasova (Energetika)	300.000	2022
LowNOx gasni gorionici na kotlovima (Energetika)	1.000.000	2024
Energetski efikasni gorionici na kotlu (FSK)	330.000	2022
Ekonomajzeri na kotlovima za predgrevanje napojne vode (FSK)	180.000	2022
Jedinica za termičku oksidaciju TUO	1.100.000	2024

SCADA elektroenergetskog sistema	800.000	2021
Linija za proizvodnju PE folije (Petroplast)	1.500.000	2022
Iskorišćenje toplote otpadnih voda za potrebe grejanja (Etilen)	100.000	2022
Unapređenje energetske efikasnosti grejanja (MO)	64.000	2021

2) Investicije – tehničko-tehnološke izmene uz primenu inovativnih tehnologija

- Adaptacija elektroenergetskog sistema i rasklopne opreme na srednjem naponu;
- Znavljanje kotlovskih postrojenja.

3) Investiciono održavanje postrojenja u cilju smanjenja gubitaka energije

- Zamena vatrostalne izolacije, reaktorskih zmija i brenera na pećima za pirolizu (Etilen);
- Eliminacija nepotrebnog viška vazduha u pećima (Etilen);
- Zamena izolacije na međupogonskom cevovodu vodene pare;
- Zamena izmenjivača toplote;
- Zamena odvajaa kondenzata;
- Sistem prikupljanja kondenzata u podstanicama;
- Zamena prozora na objektima u cilju smanjivanja gubitaka energije;

4) Mere bez ulaganja - optimizacija tehnološkog procesa

- Rad sa jednim pregrejačem pare (Etilen);
- Rad sa jednim kotlom (Energetika);
- Optimizacija rada krek-gas i propilenskog kompresora (Etilen)
- Diskontinualan rad kotlarnice u zavisnosti od spoljnih faktora (FSK);
- Optimizacija procesnih parametara.

5) Supstitucija energenata u cilju boljeg iskorišćenja energije

- Supstitucija gas / mazut pri upotrebi u kotlovskim postrojenjima;
- Supstitucija energenata za grejanje u dislociranim objektima.

6) Nabavka opreme i usluga uz postavljanje energetske kriterijuma za nabavku u skladu sa zakonskom regulativom

- Zamena postojeće opšte rasvete LED svetilkama;
- Zamena elektromotora, motorima veće klase efikasnosti (IE2, IE3);
- Zamena starih vozila i nabavka novih sa manjom potrošnjom goriva.

7) Unapređenje merenja i verifikacije potrošnje energije

- Modernizacija mernih instrumenata za praćenje realnih parametara potrošnje energije;
- Ugradnja analizatora kiseonika za kotlove;
- Instaliranje kontinualnih vodomera u cilju ušteda u potrošnji vode.

8) Poboljšavanje komercijalnih uslova pri nabavci energenata

- Godišnje ugovaranje nabavke prirodnog gasa, mazuta i električne energije uz optimalne komercijalne uslove.

9) Unapređenje nivoa znanja, kompetencije i svesti svih zaposlenih

- Primena sistema energetske menadžmenta prema standardu ISO 50001;
- Centri za obuku zaposlenih;
- Učešće zaposlenih na međunarodnim stručnim skupovima;
- Obuka i sticanje licence za energetske menadžere za sektor industrije.

VIII ZAKLJUČAK

Primenom mera unapređenja energetske efikasnosti, HIP-Petrohemija je dostigla rang Evropskih i regionalnih petrohemijskih procesa koji imaju istu tehnologiju, uporedive kapacitete i starost opreme. Dalji napredak će omogućiti konkurentnost HIP-Petrohemije po pitanju energetske potrošnje, uz uslov rada na kapacitetu min 85% od dizajniranog. Primena Sistema menadžmenta energijom i kontinualno sistemsko preispitivanje i poboljšavanje upotrebe energije je veliki pomak unapred u procesnoj industriji. U julu 2014. godine usvojena je Strategija razvoja HIP-Petrohemija za period 2014 – 2030. godine, a trenutno je u toku realizacija projekata prve faze Strategije. Uz stručan kadar i odgovorni menadžment koji je posvećen unapređenju energetske efikasnosti, HIP-Petrohemija:

- postiže značajne finansijske uštede i postaje konkurentna na tržištu;
- ostvaruje efikasno usaglašavanje sa zakonskom regulativom i tehničkim preporukama;
- smanjenjem potrošnje energije garantuje održivi razvoj kompanije i znatan ekološki napredak;
- postaje jedan od nosioca razvoja energetske efikasnosti u regionu.

LITERATURA

- [1] „Program energetske efikasnosti HIP 2020-2022“ „HIP-Petrohemija“ a.d. Pančevo, 2020.
- [2] Zakon o efikasnom korišćenju energije, Službeni glasnik Republike Srbije, broj 25/2013.
- [3] Priručnik za obuku energetske menadžera za oblast industrijske energetike, Republika Srbija, Ministarstvo rudarstva i energetike i Univerzitet u Beogradu, Mašinski fakultet, 2016.
- [4] ISO 50001:2018, Sistemi menadžmenta energijom – Zahtevi sa uputstvom za korišćenje, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd
- [5] ISO 50004:2020, Sistemi menadžmenta energijom – Uputstvo za primenu, održavanje i poboljšavanje sistema menadžmenta energijom, Institut za standardizaciju Srbije, Beograd;

AUTORI

Biljana Suslov, dipl.ing el.teh, HIP - Petrohemija a.d. Pančevo, biljana.suslov@hip-petrohemija.rs

Miša Bulajić, dipl.ing teh, HIP - Petrohemija a.d. Pančevo, miša.bulajic@hip-petrohemija.rs

Rekonstrukcija transformatorske stanice 35/10kV u spoljašnje razvodno postrojenje 20kV

Reconstruction of the 35/10kV Substation in an External 20kV Distribution Plant

Srbislav Sarić*, Biljana Sarić**

*JP Elektroprivreda Srbije Beograd Tehnički centar Novi Sad Odsek za tehničke usluge Sremska Mitrovica, R.Srbija

** ODS „EPS Distribucija“ Beograd Ogranak Elektrodistribucija Sremska Mitrovica, R.Srbija

Rezime – Na distributivnom području Novog Sada, u vlasništvu ODS EPS Distribucija nalazi se 35 transformatorskih stanica 35/10kV koje su u proseku stare preko 50 godina. S obzirom na tendenciju da se na ovom distributivnom području postepeno ukidaju naponski nivoi 35kV i 10kV i prelazi na naponski nivo 20kV, neke od ovih transformatorskih stanica su planirane za rekonstrukciju u razvodna postrojenja 20kV. Rekonstrukcija ovih transformatorskih stanica zahteva velika finansijska sredstva jer je njihov građevinski deo u veoma lošem stanju, elektroenergetska oprema je nepouzdana i teško se održava, a pogonska spremnost sve važniji faktor u prikazu uspešnog poslovanja preduzeća. Prilikom rekonstrukcije ovih transformatorskih stanica mora se voditi računa o mogućnosti rezervnog pravca napajanja za kupce električne energije, brzini intervencija i nesmetanom izvođenju preventivnog održavanja. Sa pojavom reklozera otvorilo se novo poglavlje u svetu elektroenergetike. Naime, sada se gore navedeni problemi i zahtevi mogu rešiti na jednostavniji i jeftiniji način uz korišćenje reklozera. U radu će biti prikazan predlog rekonstrukcije transformatorske stanice 35/10kV „Kuzmin“ na području Ogranka Elektrodistribucija Sremska Mitrovica koja je u eksploataciji preko 60 godina, u spoljašnje razvodno postrojenje 20kV koje se formira uz pomoć reklozera ugrađenih na čelično rešetkastim stubovima. Predloženo rešenje može poslužiti za rešavanje istih ili sličnih problema, pre svega, na distributivnom području Novi Sad.

Ključne reči – reklozer, transformatorska stanica, razvodno postrojenje, pouzdanost

Abstract – In the distribution area of Novi Sad, owned by ODS EPS Distribucija, there are 35 substations 35/10kV that are on average over 50 years old. Considering the tendency to gradually eliminate the voltage levels of 35kV and 10kV in this distribution area and the transition to the voltage level of 20kV, some of these substations are planned for reconstruction into 20kV distribution plants. Reconstruction of these substations requires large financial resources, because their construction part is in a very bad condition, electric power

equipment is unreliable and difficult to maintain, and operational readiness is an increasingly important factor in presenting successful business. During the reconstruction of these transformer stations, the possibility of a backup power supply route for electricity customers, the speed of intervention and the smooth performance of preventive maintenance must be taken into account. The appearance of reclosers opened a new chapter in the world of electricity. Namely, now the above problems and requirements can be solved in a simpler and cheaper way with the use of reclosers. The paper will present a proposal for the reconstruction of the substation 35/10 kV "Kuzmin" in the area of the Branch Distribution Sremska Mitrovica, which has been operating for more than 60 years, in an external 20 kV distribution plant formed with the help of reclosers built on steel lattice poles. The proposed solution can be used to solve the same or similar problems, primarily in the distribution area of Novi Sad.

Index Terms – recloser, substation, distribution plant, reliability

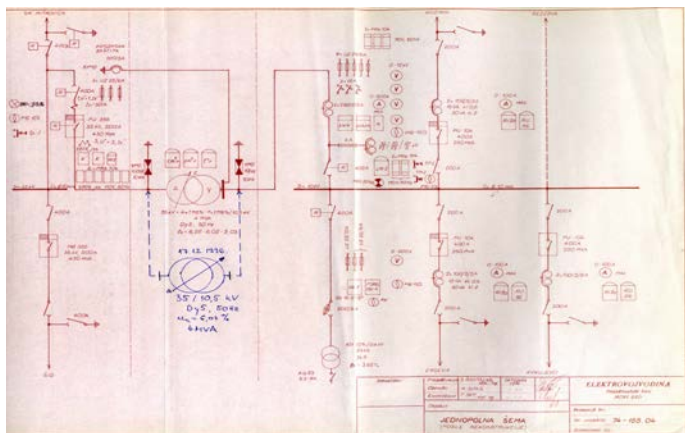
I UVOD

Ogranak Elektrodistribucija Sremska Mitrovica ima četiri TS 35/10kV i svaka od njih je stara preko 50 godina, a najspecifičnija je TS 35/10kV „Kuzmin“. Ogranak na čijem se konzumnom području nalaze jedna ili više ovakvih transformatorskih stanica odlaže aktivnosti na njihovoj rekonstrukciji za neke „bolje dane“. U međuvremenu, za saniranje šteta koje nastaju na tim transformatorskim stanicama ulažu se ne baš mala sredstva. Takođe, za preventivna održavanja na takvim elektroenergetskim objektima (EEO), ulažu se značajna materijalna sredstva kako bi se povećala njihova pouzdanost.

II KONZUMNO PODRUČJE TS 35/10kV „KUZMIN“ U PRETHODNOM PERIODU

TS 35/10kV „Kuzmin“ je u eksploataciji preko 60 godina. Napravljena je da bi napajala konzumno područje između Sremske Mitrovice i Šida, tj. mesta: Kuzmin, deo Martinaca,

Erdevik, Bingula, Stara Bingula, Kukujevc i Bačinci. Prema podacima iz 2000. godine instalirana snaga distributivnih transformatorskih stanica na ovom konzumnom području iznosila je 10130kVA, a prema podacima EPS Snabdevanja za 2020. godinu na ovom području je imalo 5458 kupaca električne energije svih kategorija, odnosno 11,88% od ukupnog broja kupaca na konzumu Ogranka Elektro distribucija Sremska Mitrovica. Ova TS je na početku eksploatacije imala energetski transformator (ET) nazivne snage 2,5MVA, da bi prilikom rekonstrukcije 1974.godine ugrađen energetski transformator instalirane snage 4MVA. TS je te godine potpuno rekonstruirana i od tada do danas se ništa značajno nije radilo na njoj. Krajem 1996. godine ugrađen je još jedan ET nazivne snage 4MVA i on je bio u tzv. „krutoj“, paralelnoj vezi sa postojećim ET (Slika 1.).



Slika 1. Jednopolna šema TS 35/10kV „Kuzmin“

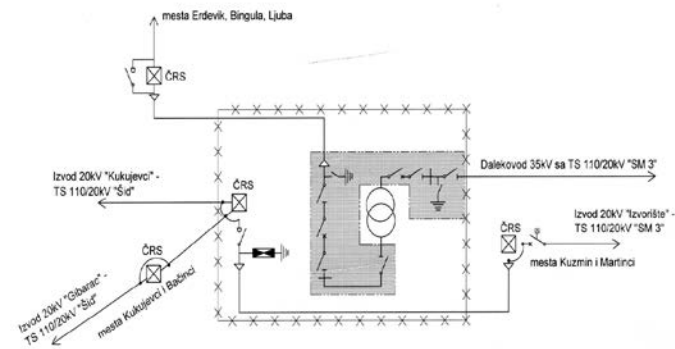
Povećanje instalirane snage na TS je bilo neophodno jer se zbog migracije stanovništva tokom 90-tih godina prošlog veka, na posmatranoj TS vršna snaga u zimskom periodu povećala na 6,5MVA.

Građevinski deo ovog EEO je u veoma lošem stanju jer prethodnih 20 godina nije ulagano u njegovo održavanje. Takođe, nije se radilo na obnavljanju postojeće elektroenergetske opreme, pa danas na TS još uvek imamo malouključeni prekidač PU 355 bez motorno-opružnog pogona sa primarnim prekostrujnim okidačem. Ova transformatorska stanica nije daljinski upravljiva, ali ima zbirni signal, dok pomoćni napon koristi iz uređaja NC 300. Potpuno je jasno da je ova TS nepouzdana i da je sve teže održavati.

U poslednjoj deceniji, Ogranak Elektro distribucija Sremska Mitrovica je kroz investicione programe mnogo ulagao u prelazak dela konzumnog područja TS 35/10kV „Kuzmin“ sa 10kV na 20kV naponski nivo. Tako su mesta: Kuzmin, Martinci, Stara Bingula, Kukujevc i Bačinci prešli na naponski nivo 20kV. Danas TS 35/10kV „Kuzmin“ ima samo jedan izvod 10kV „Erdevik“ koji napaja naseljena mesta Erdevik i Bingula, a njima se dodalo mesto Ljuba. S obzirom da više nije bilo potrebe za dva energetska transformatora od po 4MV, jedan je isključen, galvanski odvojen i služi kao „hladna“ rezerva ovom drugom.

Nekada je TS 35/10kV „Kuzmin“ imala mogućnost napajanja

preko dva dalekovoda 35kV, jednog iz pravca TS 110/20kV „Sremska Mitrovica 3“ i drugog iz TS 110/20kV „Šid“. Ovi dalekovodi su bili rezerva jedan drugom. Nakon zamene izolacije na dalekovodu 35kV od TS 110/20kV „Sremska Mitrovica 3“ do TS 35/10kV „Kuzmin“, odlučeno je da se drugi dalekovod 35kV od TS 110/20kV „Šid“ iskoristi kao 20kV dalekovod preko kojeg će se direktno iz TS 110/20kV „Šid“ napajati nekadašnji 10kV izvodi sa TS 35/10kV „Kuzmin“ – izvod 10kV „Kukujevc i Bačinci“ i izvod 10kV „Kuzmin“. Na taj način se prelaskom ova dva 10kV izvoda na 20kV naponski nivo, omogućilo i dvostrano napajanje naseljenih mesta Kukujevc, Bačinci, Kuzmin i dela Martinaca (Slika 2.).



Slika 2. Postojeće stanje

Rezervni pravac napajanja za mesto Kukujevc je izvod 20kV „Gibarac“ sa TS 110/20kV „Šid“ sa kojeg se u redovnom uklopnom stanju napaja i mesto Bačinci. Rezervni pravac napajanja za mesto Kuzmin je izvod 20kV „Izvorište“ sa TS 110/20kV „Sremska Mitrovica 3“ preko koga se u redovnom uklopnom stanju napaja mesto Martinci. Mesto Stara Bingula je ranije prebačeno na napajanje preko izvoda 20kV „Fruška gora“ sa TS 110/20kV „Sremska Mitrovica 3“, a rezervni pravac napajanja mu je sa TS 110/20kV „Sremska Mitrovica 1“ preko izvoda 20kV „Veliki Radinci“.

Preostali i jedini izvod 10kV „Erdevik“ sa TS 35/10kV „Kuzmin“ preko koga se napajaju naseljena mesta Erdevik, Ljuba i Bingula, ima mogućnost delimičnog rezerviranja od strane TS 35/10kV „Šid“ preko izvoda 10kV „Berkasovo“. Ova veza je prilično nepouzdana zbog starosti opreme u TS 35/10kV „Šid“ i TS 35/10kV „Kuzmin“, ali i zbog velike dužine dalekovoda. Takođe, treba napomenuti da u sadašnjem uklopnom stanju, dalekovod 35kV od TS 110/20kV „Sremska Mitrovica 3“ do TS 35/10kV „Kuzmin“ nema mogućnost rezerviranja.

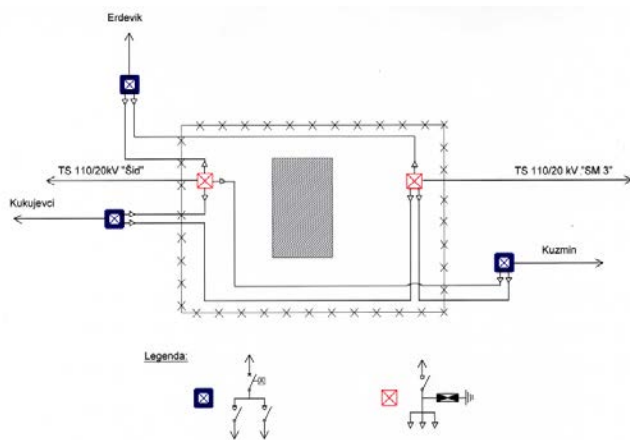
III REKONSTRUKCIJA TS 35/10kV U SPOLJAŠNJE RP 20kV „KUZMIN“

Kako rekonstrukcija postojeće TS 35/10kV „Kuzmin“ zahteva velika finansijska sredstva, nametnulo se pitanje, da li je moguće obezbediti veću pouzdanost napajanja ovog dela konzumnog područja (oko 5500 kupaca) na neki drugi način koji će znatno manje koštati.

Uvažavajući nekoliko bitnih činjenica: stanje građevinskog dela TS 35/10kV „Kuzmin“, prelazak konzumnog područja

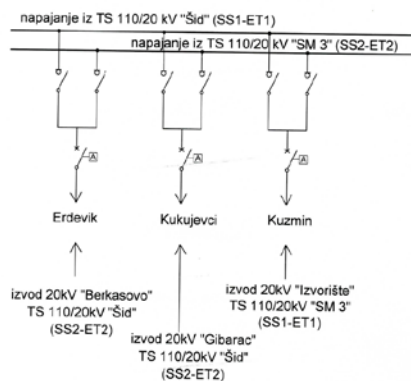
ove TS sa 10kV na 20kV naponski nivo, obezbeđivanje rezervnih pravaca napajanja svih naseljenih mesta, dosadašnje izgrađene ČRS i ugrađene reklozere u blizini TS 35/10kV „Kuzmin“, mogućnost eventualne buduće izgradnje TS 110/20kV (s obzirom na blizinu dalekovoda 110kV), brzine intervencije odnosno izolovanje mesta kvara i nesmetano izvođenje planiranih radova, autori rada su smatrali da je najbolje formirati spoljašnje razvodno postrojenje 20kV uz upotrebu reklozera.

Na slici 3. prikazano je zamišljeno spoljašnje razvodno postrojenje 20kV. U odnosu na postojeće stanje (slika 2) dograđen je jedan ČRS, dva reklozera, šest sklopka rastavljača, tri odvodnika prenapona i oko 550m kablovskih vodova 20kV. Građevinski deo dosadašnje TS 35/10kV „Kuzmin“ sada gubi funkciju i može se ukloniti. Pri tome se smatralo da je i ostatak konzumnog područja (izvodi 10kV „Berkasovo“ i „Erdevik“) takođe prešao na naponski nivo 20kV.



Slika 3. Spoljašnje razvodno postrojenje 20kV

Na ovaj način ostvarena je 100% rezerva u napajanju kupaca električnom energijom. Formiranjem ovakvog RP 20kV dobija se sistem dvostrukih glavnih sabirnica (Slika 4.).



Slika 4. Sistem dvostrukih glavnih sabirnica sa reklozerima

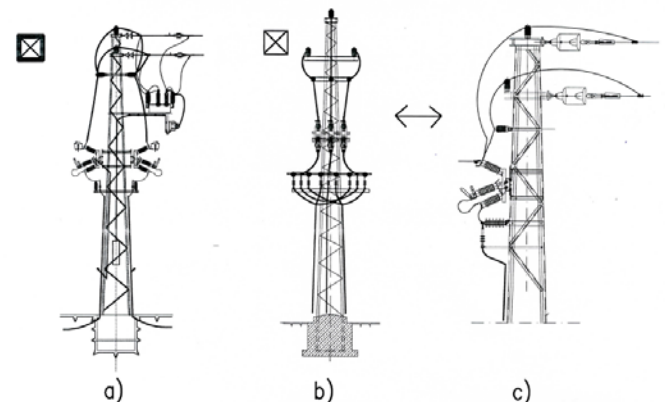
Da bi se obezbedila 100% rezerva ET 110/20kV na TS 110/20kV „Šid“ i TS 110/20kV „Sremska Mitrovia 3“

neophodno je da se alternativni pravci napajanja galvanski povežu sa sekcijama sabirnica suprotnim od onih sa kojih se u redovnom uklopnom stanju napajaju naseljena mesta nekadašnjeg konzumnog područja TS 35/10kV „Kuzmin“ (Erdevik, Kukujevci i Kuzmin).

Analizirajući predmetno spoljašnje razvodno postrojenje 20kV može se primetiti da je centralni prostor dvorišta, tj. mesto gde je sada građevinski objekat i oko njega, ostao slobodan. Čelični stubovi i kablovi su postavljeni uz ogradu. Cilj je da se u slučaju eventualne gradnje buduće TS 110/20kV svi radovi mogu izvoditi nesmetano i bezbedno, a potreba za TS 110/20kV je sve veća sa gradnjom auto-puta prema Bosni i Hercegovini.

Takođe se može uočiti neobičan raspored komutacionih aparata ugrađenih na ČRS (Slika 5.). Na slici 5.a) dat je ČRS na kome je ugrađen jedan reklozer i dva sklopka rastavljača. Prikazana je jedna od mogućih konfiguracija komutacionih aparata. Reklozer je postavljen na strani sa koje dolazi dalekovod, jedan sklopka rastavljač je ispod reklozera, a drugi na suprotnoj strani ČRS u odnosu na reklozer. Znači, ovi sklopka rastavljači bi bili u istoj visini i imali bi zajedničke montažne elemente. Svaki kablovski vod bi imao svoje odvodnike prenapona koji bi bili postavljeni na istoj konzoli na kojoj se nalaze odgovarajuće kablovske glave. Međusobne galvanske veze između elemenata na predmetnom ČRS mogle bi biti ostvarene uz pomoć slaboizolovanih provodnika (SIP) ili AlČe uže i potpornih izolatora ili srednjenaponskim samonosivim kablovskom snopom (SN SKS).

Na slici 5.b) prikazana je glava ČRS na kome su ugrađeni jedan sklopka rastavljač i tri seta kablovskih glava, a na slici 5.c) prikazana je ista ta glava ČRS gledana iz profila. Ovo je jedna od mogućih konfiguracija.



Slika 5. Izgled stuba sa komutacionim aparatima

Sklopka rastavljač je ugrađen sa suprotne strane stuba u odnosu na dolazni dalekovod, a ispod njega se nalaze dve konzole koje mogu biti napravljene i kao jedna celina. Na gornjoj konzoli, za svaku fazu, postavljeni su potporni izolator i odvodnik prenapona, a na njih bakarna (Cu) sabirница. Na donjoj konzoli postavljeno je devet kablovskih glava, tri po svakoj fazi. Kablovske glave se direktno vezuju na bakarne

sabirnice jer su potporni izolatori i odvodnici prenapona postavljeni upravno u odnosu na kablovske glave. Sva tri seta kablova bi se postavili uz stub sa iste strane kao i sklopka rastavljač, s tim da jedan ide po sredini, a druga dva uz bočne ivice ČRS.

Ovakvom konfiguracijom na jednom i na drugom ČRS omogućeno je kvalitetno izolovanje mesta kvara i nesmetano obavljanje mikrolokalizacije kvara na bilo kojoj žili, bilo kog kabla. Pri tome se može napraviti takvo uklopno stanje da svi kupci imaju električnu energiju.

Ma koliko izgledalo da je ovakav ČRS sa ugrađenom komutacionom opremom složen, njegovo održavanje bilo bi potpuno isto kao i održavanje bilo kog ČRS na kome se nalazi reklozer, linijski rastavljač i konzola za ogranak sa dalekovoda.

IV ZAKLJUČAK

Analizom troškova neophodnih za rekonstrukciju sadašnje TS 35/10kV „Kuzmin“ došlo se do iznosa od (250.000-300.000) € dok bi za formiranje spoljašnjeg razvodnog postrojenja, kakvo je prikazano u ovom radu, bilo potrebno (80.000-100.000) €.

Ovako formirano spoljašnje razvodno postrojenje je sigurno najisplativije rešenje ako se uzme u obzir stanje građevinskog objekta sadašnje TS 35/10kV „Kuzmin“ i njegovo buduće održavanje, namera da se i ostatak konzumnog područja prebaci na 20kV naponski nivo, povećanje pouzdanosti napajanja kupaca električne energije. Takođe, rasporedom

elemenata postrojenja po obodu dvorišta oslobođen je i prostor za eventualnu gradnju buduće TS 110/20kV, a pri tom sigurno i efikasno korektivno i preventivno održavanje.

Ponudeno rešenje može da bude dobra podloga za rešavanje nekih drugih sličnih ili istih problema na distributivnom području ODS EPS Distribucije.

LITERATURA

- [1] Elektrodistribucija Sremska Mitrovica, Fizički obim elektroenergetskih objekata, Sremska Mitrovica 31.12.2000
- [2] Nahman, J. Pouzdanost u procesu planiranja distributivnih mreža, in Proc. *Stručni skup o planiranju razvoja elektrodistributivnih mreža* Beograd, Privredna Komora Srbije, 15.11.2017. http://www.ciredserbia.org.rs/kolokvijumi/2017/JNahman_POUZDANO-ST.pdf
- [3] Požar, H. *Visokonaponska rasklopna postrojenja*, Tehnička knjiga-Zagreb, 1973.
- [4] Nahman, J., Mijailović, V. *Razvodna postrojenja*, Akademski misao, Elektrotehnički fakultet Beograd, 2005.
- [5] Sarić, S., Sarić, B. Upotreba reklozera za formiranje spoljašnjeg razvodnog postrojenja 20kV, in Proc. *XI Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama sa regionalnim učešćem CIRED 2018*, Kopaonik, 24-28. septembar 2018. <https://bbn.co.rs/sr/odrzani-skupovi/cired-2018/>

AUTORI

Srbislav Sarić, JP Elektroprivreda Srbije Beograd Tehnički centar Novi Sad Odsek za tehničke usluge Sremska Mitrovica, srbislav.saric@eps.rs

Biljana Sarić, ODS „EPS Distribucija“ Beograd Ogranak Elektrodistribucija Sremska Mitrovica

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