ISSN broj. 0354-8651

energija

| ekonomija | ekologija

List Saveza energetičara
Broj 1-2 / Godina XXII / Decembar 2020

ENERGETIKA 2020

ECO SIST d.o.o., Beograd-Novi Beograd je kompanija koja je osnovana krajem 2017. godine. Pretežna delatnost ECO SIST d.o.o. su inženjerske delatnosti i tehničko savetovanje, koje je usmereno na projekte iz oblasti životne sredine. Neki od njih se odnose na projektovanje sistema monitoringa tečnog opasnog otpada u okviru elektroenergetskih objekata, projektovanje sistema za redukciju tečnog opasnog otpada sa daljinskom detekcijom, projektovanje novih uljnih jama i dr. Sa brojnim poslovnim partnerima, kompanija ECO SIST d.o.o. je učetvovala i u projektima iz oblasti informaciono komunikacionih tehnologija. Takođe, pružamo usluge detaljnog ispitivanja lokacija na kojima se nalazila PCB oprema, sa ciljem utvrđivanja vrste, obima i intenziteta kontaminacije radi dalje sanacije i remedijacije zagađenih površina . ECO SIST d.o.o. se bavi i zaštitom i očuvanjem biodiverziteta, pre svega kroz usluge izrade studija i ispitivanja uticaja elektroenergetskih objekata na biljni i životinjski svet. ECO SIST d.o.o. je okupio stručnjake raznih profila u nameri da svojim daljim poslovanjem osvaja različite oblasti tržišta, pružajući visok kvalitet usluga.

ELEKTROIZGRADNJA D.O.O.

PD Elektroizgradnja d.o.o., Beograd je privredno društvo za izgradnju, rekonstrukciju, revitalizaciju i održavanje elektroenergetskih objekata sa iskustvom od preko 60 godina izvođenja radova na naponskim nivoima 110, 35, 10 i MTK postrojenjima. Nekada u sastavu Elektrodistribucije, a danas u vlasništvu Grada Beograda. To je savremena kompanija sa 160 zaposlenih koja poseduje sve potrebne ISO i EUROCERT sertifikate za elektromehaničke i građevinske radove, zaštitu životne sredine i BZR. S obzirom na kvalitetan inženjerski kadar, veliki potencijal u mehanizaciji, mašinskoj podršci i proizvodnji potrebnih elemenata PD Elektroizgradnja je sposobna za realizaciju najvećih izazova u svojoj delatnosti.
Nekada prisutna samo na području Beograda danas deluje na teritoriji cele Srbije i sarađuje sa najpoznatijim svetskim proizvođačima elektroenergetske, upravljačke, telekomunikacione i zaštitne opreme i za najkraće vreme i uz vrhunski kvalitet završava poslove po sistemu “ključ u ruke”.

Privredno društvo PROMONT d.o.o., Beograd je osnovano 1987. godine kao društveno preduzeće sa ciljem da tržištu ponudi usluge inženjeringa, izgradnje i održavanja elektroenergetskih sistema i opreme. Promene zakonske regulative omogućile su da se 1991. godine izvrši vlasnička transformacija i od tada PROMONT posluje kao privatno društvo u 100% vlasništvu gospodina Vladimira Đorđevića.
Poštovanje najviših standarda kvaliteta, iskusan i stručan kadar, kao i raznovrsna i kvalitetna specijalizovana oprema, omogućili su nam da postanemo dugogodišnji značajan i pouzdan partner kompanijama i investitorima iz oblasti elektro energetike i građevinarstva, kako u državnom, tako i u privatnom sektoru.

Energoprojekt Hidroinženjering a.d. Beograd je deo poslovnog sistema Energoprojekt specijalizovan za projektovanje, konsalting, inženjering u oblasti energije, voda, infrastrukture i zaštite životne sredine. Tokom punih 70 godina postojanja Energoprojekt Hidroinženjering je izrastao u vodeću projektantsko-konsultantsku kompaniju na prostorima bivše Jugoslavije u sektoru hidroenergetike, vodoprivrede i ekologije. Projektovao je i razvijao složene projekte u sedamdesetak zemalja širom sveta. Najveću afirmaciju je stekao kao projektant više desetina izgrađenih brana i hidroelektrana, ali kao multidisciplinarna kompanija ostavio je neizbrisiv pečat i u oblastima uređenja i navodnjavanja poljoprivrednog zemljišta, vodosnabdevanja, prikupljanja i odvođenja otpadnih voda, prečišćavanja voda za piće i gradskih i industrijskih otpadnih voda, zaštite čovekove okoline.
Zahvaljujući svojoj multidisciplinarnosti Energoprojekt Hidroinženjering obezbeđuje kompleksne i sveobuhvatne usluge u svim fazama izrade projektne dokumentacije i tokom izgradnje objekata i puštanja u probni rad. Profesionalnost, iskustvo i znanje više od 100 inženjera različitih specijalnosti i drugih visokospecijalizovanih stručnjaka, omogućili su da Energoprojekt Hidroinženjering postane i ostane snažna i pouzdana kompanija, koja može da pruži prepoznatljivu kombinaciju relevantnog iskustva i prisustva u regionu i velikog međunarodnog iskustva.

PD Elektroistok - Izgradnja d.o.o., Beograd, je kompanija sa preko 60 godina iskustva u poslovima izvođenja i inženjeringa u oblasti elektroenergetskih postrojenja napona do 400 Kv. Glavna delatnost Elektroistok - Izgradnje su izvođenje elektromontažnih i građevinskih radova u trafostanicama i dalekovodima napona 110, 220 i 400 Kv kao i inženjering i projektovanje istih. Uz radove na terenu sa montažom, servisom, manipulacijom, obradom i regeneracijom izolacionih sistema energetskih transformatora velikih snaga, te izradom i proizvodnjom čelične konstrukcije dalekovodnih stubova i postrojenja navedenog naponskog nivoa, i uz izuzetnu stručnost i kadrovske, tehničke i tehnološke kapacitete kompanija ima potpuno zaokružen proces rada na projektima izgradnje i rekonstrukcije trafostanica i dalekovoda. Budući da je kompanija od svog nastanka do danas blisko vezana za poslove svog osnivača, Elektromreže Srbije (EMS), tokom godina Elektroistok - Izgradnja je dala veliki doprinos u razvijanju i održavanju infrastrukture elektroenergetskog prenosnog sistema i na taj način temeljno uspostavila bazu znanja, sistema rada i poslovne kulture na kojima se insistira u svakodnevnom radu. Elektroistok - Izgradnja danas broji preko 230 zaposlenih, uspešno drži kontinuitet svog rada i delovanja uz primenu svih novih stručnih znanja, tehnologija i poslovnih metoda kako za osnivača, tako i za tržište, ostvarujući profit.

energija | ekonomija | ekologija

Broj 1-2, Godina XXII, 2020

XXX Međunarodno savetovanje

Pokrovitelji savetovanja:
Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja,
Ministarstvo energetike, razvoja i zaštite životne sredine.

SAVEZ ENERGETIČARA
Adresa: Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija
Telefon: + 381 11 2183 315
Faks + 381 11 2639 368
Mob: +381 63 555 375
+381 63 607 001
E-mail: info@savezenergeticara.org
savez.energeticara1919@gmail.com
Sajt: www.savezenergeticara.org

V.d. sekretar Saveza energetičara: dr Ilija Batas Bjelić
V.d. glavni i odgovorni urednik časopisa: prof. dr Dušan Gordić

Upravni odbor:
Prof. dr Nikola Rajaković, predsednik UO
Prof. dr Milun Babić
Dušan Mrakić
Milenko Nikolić
Prof. dr Slobodan Vukosavić, dopisni član SANU
Prof. dr Željko Đurišić
Prof. dr Dušan Gordić
Sandra Alagić, generalni sekretar
Ilija Batas Bjelić

Štampa: štamparija CMYK Kolibri, Beograd

Članarina: 8.000 RSD
Tekući račun: 325-9500600012664-82
Za inostranstvo: 135€
Devizni račun (€): RS35325960160000189665
SWIFT: OTPVRS22

energija | ekonomija | ekologija

Odabrani radovi sa Međunarodnog savetovanja ENERGETIKA 2020

Zlatibor, 21.06. - 24.06.2020.
Hotel Palisad, Zlatibor
u organizaciji Saveza energetičara
pod pokroviteljstvom

Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije
Ministarstva rudarstva i energetike Republike Srbije

Zlatni sponzori

Sequester Employment

EPC

eco slst

Veliki sponzori

Weidmüller

JADRAN

Sponzor koktela dobrodošlice i ID tračica

ELEKTROMONTAŽA KRALJEVO

Sponzori

IMP institut MIHAJLO PUPIN

Енерготехника Јужна Бачка

ELEKTROIZGRADNJA D.O.O.

METER&CONTROL Solutions for smart energy management

Sponzor svečane večere

ELEKTROISTOK IZGRADNJA BEOGRAD

Donatori

ENERGOPROJEKT Energoprojekt Hidroinženjering a.d.

Melco Buda DOO

Poštovane kolege energetičari

Pred vama je dvobroj časopisa ENERGIJA sa 23 rada koja su selektovana na Savetovanju ENERGETIKA 2020. Radovi su prošli redovnu recenziju za Savetovanje i bili su javno prezentovani na konferenciji tako da na neki način imaju i verifikaciju auditorijuma, što im svakako daje poseban kvalitet. Ideja ovog DVOBROJA je da se aktivnosti Saveza energetičara artikulišu i u štampanoj formi i da se u narednim brojevima našeg časopisa vrati kontinuitet i autoritet našeg časopisa i njegovo posebno mesto u stručnoj javnosti sektora energetike. Časopis ima nameru i da popuni prazninu u ozbiljnom stručnom i naučnom saopštavanju na srpskom jeziku. Naime, praznina je povelika pošto su časopisi ELEKTROPRIVREDA i ELEKTRODISTRIBUCIJA odavno prestali sa izlaženjem nerazumevanjem upravljačkih struktura u našoj elektroprivredi.

Posle Savetovanja iz juna 2020. godine Savez energetičara je nastavio sa aktivnostima i održao dva OKRUGLA STOLA posvećena energetskoj tranziciji koja su imala zapažen odjek u stručnoj javnosti.

Povodom **prvog** okruglog stola „**ENERGETSKA TRANZICIJA I COVID – 19**“ održanog u Privrednoj komori Srbije u Beogradu 14. oktobra 2020. godine u organizaciji Saveza energetičara i Privredne komore Srbije obradili smo sledeće teme:

- „Energetska tranzicija i pandemija: in vivo eksperiment sa visokim učešćem obnovljivih izvora energije“ (prof. dr Nikola Rajaković iz Saveza energetičara);
- „Ubrzanje ili usporenje energetske tranzicije sa COVID-19: širi aspekti energetske realnosti“ (akademik prof. dr Slobodan Vukosavić sa Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu);
- „Uticaj COVID-19 na tržište naftnih derivata“, (Tomislav Mićović iz Udruženja naftnih kompanija Srbije);
- „Kovid kriza - ekonomski tokovi i energetska tranzicija u Srbiji“ (prof. dr Petar Đukić sa Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu);
- „Pandemija i regulativa u energetici“ (Negica Rajakov i Aca Marković iz Agencije za energetiku);
- „Uticaj COVID-19 na tržište električne energije: nacionalni i regionalni aspekti“ (Dejan Stojčevski iz SEEPEX-a) i
- „Uticaj COVID-19 na kretanja u automobilskoj industriji“ (Dragan Milutinović sa RTS-a);

konstatovano je da je pandemija COVID-19 uslovila značajno smanjenje potrošnje energenata kao i promenu strukture potrošnje električne energije. Izrazit pad potrošnje je zabeležen u industriji i administrativno-komercijalnom sektoru, a utvrĎeno je i povećanje potrošnje električne energije u sektoru domaćinstva. U ovakvim okolnostima našli su se i gotovo svi elektroenergetski sistemi evropskih zemalja. Promene su bile značajne i u sektoru nafte i naftnih derivata kao i u sektoru gasa. Analiza reakcija berzi električne energije, ekonomskih posledica pandemije i učinjenih odgovora regulatornih tela na ove izazove bila je od velikog interesa za učesnike okruglog stola, kako za one koji su fizički bili u sali, tako i za one koji su uživo pratili okrugli sto putem elektronskih mreža.

Drugi Okrugli sto pod nazivom „KAKO UBRZATI ENERGETSKU TRANZICIJU U REGIONU I SRBIJI“ u organizaciji Saveza energetičara i SDEWES centra održan je onlajn u ponedeljak 21. decembra 2020. godine i okupio je preko 60 učesnika iz država regiona (Bosna i Hercegovina, Severna Makedonija, Republika Hrvatska, Republika Slovenija, Austrija, Belgija) i Republike Srbije, predstavnika državnih, akademskih, privrednih, nevladinih i medijskih institucija koji su diskutovali na temu „Kako ubrzati energetsku tranziciju u regionu i Srbiji“ i na kojem su se mogle čuti sledeće poruke:

- Dugoročni troškovi nepreduzimanja bilo kakvih mera na polju klimatskih promena veći su za 53 milijarde evra od troškova implementacije Strategije. Gubici i štete usled klimatskih promena premašuju 5 milijardi evra u odnosu na 2000. i otuda sledi da je strategije potrebno tako revidirati da se poveća doprinos smanjenju emisija sa efektom staklene bašte, na čemu je Savez energetičara spreman da aktivno učestvuje i doprinosi kao stručna podrška.
- Za otpočinjanje tranzicije potrebna je spoznaja da podrazumevani scenario (scenario u kome se ekstrapoliraju postojeći trendovi) jednostavno nije održiv, da bi iza toga usledilo definisanje ciljeva i prioriteta sve dok sam proces postane bitniji nego plan.
- Javnost, šira društvena zajednica i donosioci odluka moraju biti upoznati sa pozitivnim efektima tranzicije, ali i sa preskupom zakasnelom tranzicijom. Potencijalne gubitnike tranzicije (rudarski sektor) potrebno je na kraju procesa učiniti pobednicima evolucijom zanimanja koji se uklapaju u dugoročni cilj energetske nezavisnosti regiona.
- Jedini sopstveni resursi koji se mogu koristiti i finansirati prema kriterijumima održivosti su sunce, vetar, biomasa i vodni potencijal.
- Potrebna je bolja povezanost regiona radi smanjenja troškova tranzicije na tržišnim principima, komplementarnosti i međuzavisnosti.
- Najjači kapacitet za planiranje energetske tranzicije prema prikazanim rezultatima u regionu ima Severna Makedonija. Evropska Komisija- Joint Research Centre stoji na raspolaganju sa svojim resursima i alatima za planiranje i može da odigra ulogu korektiva.
- Uticaj energetske tranzicije u EU oseća se na tržištima električne energije BiH i Srbije i biće sve oštrija ekonomska utakmica u kojoj će proizvodnja iz postojećih termoelektrana biti potiskivana u periodima jeftine zelene energije iz vetra i sunca u Evropi. Obnovljivi izvori energije postaju osnova energetskog miksa (bazni deo dijagrama opterećenja) i na osnovu komplementarnosti resursa na severu i jugu Evrope jačaju efekat uglačavanja dijagrama proizvodnje. Dodatni resursi za integraciju velikih količina energije iz obnovljivih izvora su u sprezanju sektoraa (povezivanje sa transportom i grejanjem) kao i u skladištenju energije, odzivu potrošnje, jačanju interkonekcija i tržišta električne energije.
- Srbija zaostaje u pogledu detaljnog prostornog planiranja potrošnje u sektoru grejanja i hlađenja za BiH i Severnom Makedonijom.
- Praktično ograničenje učešća varijabilnih obnovljivih izvora u energetskim sistemima su granice njihove fleksibilnosti koje su veoma prilagodljive.
- Srbija ima na raspolaganju više alata za planiranje Nacionalnog klimatsko energetskog plana, ali ovo posebno važno pitanje ostaje otvoreno do formiranja radnih grupa za njegovu izradu.
- Planiranje energetske tranzicije u regionu treba da urade stručnjaci iz regiona uz reviziju eksternih eksperata jer stručni rad izvan regiona predstavlja put u neuspeh, posebno imajući u vidu lične kvalitete i motivacije učesnika ovog i sličnih panela.

Sva ova otvorena pitanja ostavljaju prostora za dalju diskusiju kakvu neguje Savez energetičara i zavređuju da budu obrađena detaljnije tokom predstojeće 2021. godine!

Prof. dr **Milun Babić**
Predsednik skupštine Saveza energetičara

Prof. dr **Nikola Rajaković,**
Predsednik Saveza energetičara

energija | ekonomija | ekologija

ORGANIZACIONO – PROGRAMSKO – NAUČNI ODBOR

Kopredsednici organizaciono-programsko-naučnog odbora:
Prof. dr Milun Babić, Predsednik Skupštine Saveza energetičara
Prof. dr Nikola Rajaković, Predsednik Saveza energetičara
Sekretarijat organizaciono-programsko-naučnog odbora:
dr Ilija Batas-Bijelić, naučni saradnik
Prof. dr Dušan Gordić, Glavni i odgovorni urednik časopisa "Energija"
Sandra Alagić, Portparol ODS EPS Distribucija Beograd
Marko Popović, Direktor BBN Congress Management
Članovi:
Dr Matthias Jochem, Mitsubishi Hitachi Power System Europe GmbH, Germany
Dr Jean Rizzon, Mitsubishi Hitachi Power System Europe GmbH
Dr Patrick Weckes, Mitsubishi Hitachi Power System Europe GmbH
Prof. dr Jovica V. Milanović, The University of Manchester, Manchester Christian Kissling
Dejan Popović, Predsednik Agencije za energetiku Republike Srbije
Prof. dr Adriana Sida Manea, Politehnica-Universitety of Temisoara, Romania
dr Ivan Souček, Prague Institute of Chemical Technology, Czech Republic
Prof. dr Miloš Banjac, pomoćnik ministra u Ministarstvu Rudarstva i energetike Republike Srbije
Prof. dr Branko Kovačević, predsednik Nadzornog odbora JP Elektroprivreda Srbije
Prof. dr Miloš Nedeljković, Mašinski fakultet u Beogradu
Prof. dr Aleksandar Gajić, Mašinski fakultet u Beogradu
Prof dr Damir Đaković, Fakultet tehničkih nauka u Novim Sadu
prof. dr Zlate Veličković, Vojna akademija, Univerzitet odbrane u Beogradu
Mirko Petković, Rafinerija ulja Modriča a.d. Modriča, Republika Srpska, BiH
Mladen Simović, direktor Energoprojekt ENTEL
Prof. dr Valentino Stojkovski, Faculty of Mechanical Engineering u Skopju, Republika Severna Makedonija
Prof. dr Zoran Markov, Faculty of Mechanical Engineering u Skopju, Republika Severna Makedonija
Ass. mr Marija Lazarevikj, Faculty of Mechanical Engineering u Skopju, Republika Severna Makedonija
Prof. dr Vlatko Cingoski, Goce Delcev University of Štip, Faculty of Electrical Engineering, Republika Severna Makedonija
dr Goce Vasilievski, Rudarski institut, u Skopju, Republika Severna Makedonija
Prof. dr Atanasko Tuneski, Faculty of Mechanical Engineering u Skopju, Republika Severna Makedonija
dr Aleksandar Levkoski, ELEM Macedonian Power Plants u Skopju, Republika Severna Makedonija
doc. dr Vladimir Rajs, Fakultet tehničkih nauka u Novom Sadu
Prof. dr Neven Dujić, Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu
Prof. dr Mirko Komatina, Mašinski fakultet u Beogradu
Prof. dr Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet u Beogradu
Slobodan Babić, Poslovno udruženje Elektromašinogradnja, Beograd
prof. dr Mirjana Laković, Mašinski fakultet u Nišu
Prof. dr Milan Petrović, Mašinski fakultet u Beogradu
Prof. dr Dejan Ivezić, Rudarsko-geološki fakultet u Beogradu
Prof. Daniela Marasova, CSc. Technical university of Kosice Faculty of Mining, Ecology, Czech Republic
Prof. dr Беляков Алексей Васильевич, Российская Федерация
Mr Milenko Nikolić, direktor Instituta Mihailo Pupin - Automatika, Beograd
Olga Stavskaya, Lead Engineer JSC «ZiO-COTES», Russian Federation
Prof. dr Danijela Milošević, dekan Fakulteta tehničkih nauka u Čačku
Prof. dr Milo Tomašević, dekan Elektrotehničkog fakulteta u Beogradu
Prof. dr Radivoje Mitrović, dekan Mašinskog fakulteta u Beogradu
Prof. dr Dobrica Milovanović, dekan Fakulteta inženjerskih nauka u Kragujevcu
Prof. dr Ozren Ocić, Savez energetičara
dr Miodrag Arsić, IMS Beograd
Prof. dr Željko Despotović, Institut Mihailo Pupin Beograd
Prof. dr Zoran Rajić, Poljoprivredni fakultet Beograd
Prof dr Silvana Ilić, Fakultet za menadžment Zaječar
Jovica Budimir, izvršni direktor JP Srbijagas
Prof. dr Pavlović Vladimir, Rudarsko-geološki fakultet
dr Radoslav Raković, "Energoprojekt Entel" a.d. Beograd
prof. dr Martin Ćalasan, Elektrotehnički fakultet Podgorica
Prof. dr Nenad Đajić, Akademija inženjerskih nauka Srbije
Prof. dr Petar Đukić, Tehnološko-metalurški fakultet u Beogradu
Ljubo Maćić, specijalni savetnik Ekonomskog instituta iz Beograda

energija | ekonomija | ekologija

Sadržaj

ISTRAŽIVANJE MOGUĆIH SCENARIJA ENERGETSKE BUDUĆNOSTI REPUBLIKE SRBIJE UZ POMOĆ BACKCASTING METHODOLOGY I SOFTVERA ENERGOVIZIJA MB
(Prof. dr inž. Milun J. Babić) 1

NAJVEĆI IZAZOVI ENERGETSKE TRANZICIJE U SRBIJI: U SREDNJEM I DUGOM ROKU
(Petar Đukić, Slaviša Đukanović) 10

METODE ENERGETSKO – KLIMATSKOG PLANIRANJA U DRŽAVAMA ZAPADNOG BALKANA: NAJNOVIJA DOSTIGNUĆA IZ REPUBLIKE SRBIJE I BOSNE I HERCEGOVINE
(Ilija Batas – Bjelić, Nikola Rajaković) 16

ANALIZA KAPACITETA I USLOVA IZGRADNJE FOTONAPONSKIH SISTEMA NA KROVOVIMA ŠKOLSKIH OBJEKATA U SRBIJI
(Iva Batić, Željko Đurišić) 21

UPOREDNA TERMODINAMIČKA ANALIZA ORGANSKOG RANKINOVOG I KALINA CIKLUSA
(Miloš Banjac, Marija Orlović) 29

ZAŠTITA TRONAMOTAJNOG ENERGETSKOG TRANSFORMATORA ZASNOVANA NA FAZNOJ KOMPARACIJI STRUJA
(Jelisaveta Krstivojević, Zoran Stojanović, Milenko Đurić) 36

PROBLEMATIKA PRIKLJUČENJA VETROELEKTRANA NA PRENOSNU MREŽU EMS AD
(Saša Zdravković, Milan Blažić, Branko Šumonja, Marija Đorđević, Julijana Vićovac, Nebojša Đurin) 44

IMPLEMENTACIJA ALGORITMA KOLONIJE MRAVA ZA OPTIMALNU REKONFIGURACIJU DISTRIBUTIVNE MREŽE
(Predrag Mršić, Nikola Rajaković) 50

UTICAJ ARMIRANO BETONSKOG STUBA NA RASPODELU MAGNETSKOG POLJA MEŠOVITOG VODA
(Teodora Gavrilov, Karolina Kasaš-Lažetić, Kristian Haška, Miroslav Prša) 58

PRIMJENA RC-MODELA U SIMULACIJI DINAMIČKIH PROCESA RAZMJENE TOPLOTE GRAĐEVINSKIH OBJEKATA SA OKRUŽENJEM
(Svetlana Dumonjić-Milovanović, Petar Gvero, Zdravko Milovanović) 65

POBOLJŠAVANJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI HIDRAULIČNIH SISTEMA KOD TEŠKIH MAŠINA
(Dejvid Anastasovski, Emil Zaev, Darko Babunski, Gerhard Rath, Laze Trajkovski) 72

REKONSTRUKCIJA ELEKTROMOTORNOG POGONA KOLICA TRANSPORTNIH TRAKA T5L I T5D U SISTEMU DOPREME UGLJA NA TERMOELEKTRANI „NIKOLA TESLA-B“
ŽeljkoV.Despotović, Aleksandar I.Ribić, Dejan Đokić, Ranko Rakijaš 79

LABORATORIJSKIM ISTRAŽIVANJEM DO IZBORA MJESTA UVOĐENJA STEPENOVANOG VAZDUHA ZA SAGORIJEVANJE U LOŽIŠTE
(Nihad Hodžić, Anes Kazagić, Kenan Kadić) 89

OTKRIVANJE I ANALIZA SIGNALA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA U ENERGETSKOM TRANSFORMATORU UHF METODOM
(mr Đorđe Dukanac, dipl.inž.el.) 96

HIBRIDNO NAPAJANJE TELEKOMUNIKACIONE I MERNE OPREME DALJINSKIH MERNIH STANICA U SISTEMIMA ZAŠTITE OD POPLAVA
(ŽeljkoV.Despotović, Marko Tajdić, Jovan Kon) 102

ANALIZA ALGORITAMA ZA KOMPEZACIJU ZASIĆENJA STRUJNOG TRANSFORMATORA
(Nenad Belčević, Zoran Stojanović) 112

energija | ekonomija | ekologija

TOPLOTNO BILANSIRANJE I POVEĆANJE EFIKASNOSTI KORIŠĆENJA TOPLOTNE ENERGIJE VRTIĆA „ZEKA“ U GRADU KRAGUJEVCU, SRBIJA
(Davor Jovanović, Dušan Gordić, Jelena Nikolić, Nebojša Jurišević, Mladen Josijević) 119

MODIFIKACIJA MODELA HIDROELEKTRIČNE CENTRALE PREKO IZMERENIH ODZIVA REALNE CENTRALE
(Darko Babunski, Pance Bogoevski, Emil Zaev, Atanasko Tuneski) 126

KORIŠĆENJE ALATA ZA TRŽIŠNO MODELOVANJE PRI ANALIZI BENEFITA PO ELEKTRO-ENERGETSKI SISTEM IZGRADNJOM NOVOG INTERKONEKTIVNOG DALEKOVODA
(Srđan Bošković) 131

UTICAJ SOLARNE ELEKTRANE NA KVALITET ELEKTRIČNE ENERGIJE U NISKO-NAPONSKOJ DISTRIBUTIVNOJ MREŽI
(Dr. sc. Hidajet Salkić, dipl.ing.el., Dr. sc. Amir Softić, dipl.ing.el., Amer Salkić, dipl.ing.el.)
..... 137

PRIMENA LAGRANŽOVE OPTIMIZACIJE NA PROBLEMATIKU PROIZVODNJE ENERGIJE IZ OBNOVLJIVIH IZVORA
(Vladan Ristić, dr Nikola Rajaković) 145

OPERATIVNI REŽIM RADA HIDROELEKTRANA U KASKADNOM SISTEMU ZAVISNO OD POTREBE ENERGETSKOG SISTEMA
(Sofija Nikolova Poceva, Anton Chaushevski, Valentino Stojkovski, Zoran Markov) 153

ELEKTRIČNI AUTOMOBIL SA INTEGRISANIM FOTONAPONSKIM SISTEMOM
(Vladimir Antonijević, Željko Đurišić) 160

Istraživanje mogućih scenarija energetske budućnosti Republike Srbije uz pomoć backcasting methodology i softvera Energovizija MB

Resears on possible scenarios of the energy future of the Republic Serbia with the backcasting methodology and Energovision MB Software

Prof. dr inž. Milun J. Babić

Akademija inženjerskih nauka Srbije
Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, Srbija

Rezime **-** Autor ovog rada je, oslanjajući se na savremenu backcasting methodology namenjenu planerima razvoja, izradio originalan softver Energovizija MB za istraživanje mogućih razvojnih scenarija u energetskom sektoru i održivom razvoju, i testirao ga na više primera dobre prakse. Uz pomoć tog softvera, autor je napravio tri moguća scenarija energetske budućnosti Republike Srbije, u zavisnosti od kvaliteta i masovnosti primene programa energetske efikasnosti. Dobijeni rezultati pokazuju da ako nadležne institucije Republika Srbija ne započnu sa ozbiljnom primenom postojećih razvojnih alata za unapređenje energetske efikasniosti u svim sektorima privrede i društva, Republika Srbija će se za 50-60 godina suočiti sa energetskim i ekološkim kolapsom.

Ključne reči **-** energija, energetska efikasnost, održivi razvoj, životna sredina, ekonomija, ekologija, planiranje, forecasting, backcasting, atractor, razvojni alat, Energovizija MB, budućnost

Abstract **-** The author of this paper, using modern backcasting methodology, which is intended for development planning, created original EnergovisionMB software, which can help investigate possible development scenarios in the energy sector and sustainable development, and tested it on several examples of good practice. With the help of this software, the author has created three possible scenarios for the energy future of the Republic of Serbia, depending on the quality and mass implementation of the energy efficiency program. The obtained results show that if the competent institutions of the Republic of Serbia do not start seriously implementing the existing development tools in all sectors of economy and society, it will face with energy and environmental collapse in 50-60 years.

Index Terms **-** energy, energy efficiency, sustainable development, environment, economy, ecology, planning, forecasting, backcasting, attractor, development tool, EnergyvisionMB, future

I. UVOD

Sa rastom standarda i broja stanovnika na našoj planeti, obezbeđivanje potrebne energije za razvojne potrebe postaje sve zaoštrenije i zahteva unapređivanje organizacije i poslovanja svih društenih, državnih i privrednih entiteta, kao i bitno smanjivanje potrošnje energije po jedinici proizvoda i stambenog/poslovnog prostora. Širokim narodnim masama postaje sve jasnije da bahat odnos čoveka prema zadovoljavanju sopstvenih energetskih potreba i ubrzano trošenje postojećih *neobnovljivih* energenata, kao i masovno korišćenje energetski neefikasnih tehnologija, veoma utiču na:

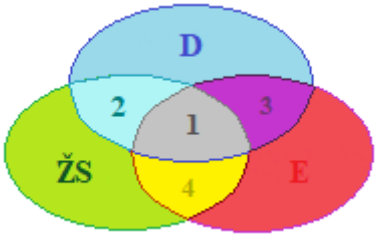
- ruiniranje životne sredine,
- ubrzanu promenu klime,
- zatiranje ili mutiranje mnogih biljnih i životinjskih vrsta i na
- produbljavanje i/ili otvaranje novih međudržavnih sukoba oko raspoloživih energetskih resursa kojih je svakim danom sve manje.

Zbog toga se pred planerima razvoja postavljaju mnogi teško rešivi zadaci koji su vezani za obezbeđivanje tzv. *Održivog razvoja*[1] ljudske civilizacije (slika 1), pa to tera istraživače da ubrzano rade na novim razvojnim metodologijama. Upravo je u ovom radu, nakon prikaza istorijskih razloga koji su uslovili okretanje struke i nauke prema društveno-privrednom i naučno-stručnom globalnom pokretu koji se danas naziva *energetskom efikasnošću*[2] i prikaza tempa napredovanja i ostvarenih dometa

[1] Podrazumeva razvoj društva koji raspoloživim resursima zadovoljava ljudske potrebe, ne ugrožavajući prirodne sisteme i životnu sredinu, čime se osigurava dugoročno postojanje ljudskog društva i njegovog okruženja. Koncept *održivog razvoja* predstavlja novu strategiju i filozofiju društvenog razvoja

[2] Pojam *energetska efikasnost* se najčešće susreće u dva moguća značenja (https://sr.wikipedia.org/sr-ec), od kojih se jedno odnosi na

ovog veoma *važnog alata* u oblasti razvoja energetike u svetu i Srbiji, dat osvrt na *energetsku efikasnost* kao uslov, meru i alat za ostvarivanje uspešne energetske i *održive budućnosti* Srbije, i u okviru toga su kratko interpretirane najnovije razvojne metodologije u *održivom razvoju* i *energetskoj efikasnosti*, među kojima istaknuto mesto ima *backcasting methodology*[3] . U završnom delu ovoga rada ukratko je prikazan princip pripreme ulaznih podataka za softver *Energovizija MB*[4] , koji je baziran na *backcasting methodology* i dat prikaz energetske budućnosti Srbije dobijen uz pomoć tog softvera, za tri moguća scenarija primene programa *energetske efikasnosti*.



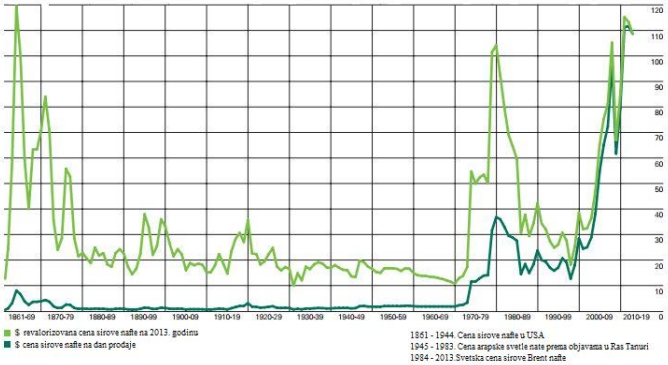
Slika 1. Grafička interpretacija održivog razvoja[5]
D – održivi razvoj društva; ŽS – održivi razvoj životne sredine; E – ekonomski održivi razvoj 1 – održivi razvoj; 2 – podnošljiva održivost; 3 – pravična održivost; 4 – ekonomsko-ekološka održivost

II. PRIKAZ ISTORIJSKIH RAZLOGA KOJI SU USLOVILI OKRETANJE STRUKE I NAUKE PREMA DRUŠTVENO-PRIVREDNOM I NAUČNO-STRUČNOM, GLOBALNOM POKRETU KOJI SE DANAS NAZIVA ENERGETSKOM EFIKASNOŠĆU

Da bismo sagledali razloge privrede i društva da se okrenu osmišljavanju i sprovođenju programa *energetske efikasnosti* i *zaštite životne sredine*, koji predstavljaju temelje globalnog cilja da se sve aktivnosti ljudi podrede uspostavljanju *održivog razvoja* kompletnog biodiverziteta na našoj planeti, osvrnućemo se ukratko na povode koji su ključno doprineli da se počne razmišljati o značaju brižljivog odnosa prema postojećim energetskim resursima. To ćemo učiniti sagledavanjem dva istorijska segmenata. Prvi obuhvata period od 1948. do 1998. godine, a drugi počinje 1999. godine i traje do današnjeg dana.

A. Period od 1948. godine do prve naftne krize

U periodu od 1948. do 1970. godine, *barel*[6] benzina na svetskom tržištu koštao je (slika 2) između 2,50 i 3,00 tadašnjih *USA$*[7], ili gledano iz ovog vremena na tu valutu, tj. sa uračunavanjem inflacije od tada do sada, između 17 i 19 sadašnjih *USA$*. Tada su *USA*[8] bile najveći svetski proizvođač nafte, koja je poticala iz naftnih bušotina koje su se nalazile širom državne teritorije te zemlje. Jeftin benzin i novi autoputevi koji su bili do tada izgrađeni, ili su se ubrzano gradili, dozvoljavali da se porodice u *USA* presele iz bučnih i prenaseljenih gradova u mirnija i tiša prigradska naselja, što je veoma uticalo na porast potrošnje ovog pogonskog energenta.



Slika 2. Cena nafte u *USA$* (nominalna i sa uračunatom inflacijom), od 1861. do 2013. godine[9]

U tom periodu je i započela priča o tzv. američkom snu, posebno početkom 1960-ih godina kada su i žene počele da se masovno zapošljavaju u preduzećima i ustanovama, a porodice krenule sa kupovinom i drugog automobila. U to vreme se činilo da se izvori nafte nalaze u svakom dvorištu u Teksasu, a *galon*[10] ovog energenta koštao je, sada neverovatnih, 25 *USAcenti*. Tada važeći monetarni sistem je za Amerikance odlično funkcionisao, pošto je dolar važio za svetsku valutu, a države u obnovi (pre svega *Nemačka* i *Japan*) su želele dolare za kupovinu američkih proizvoda.

B. Period prve naftne krize

Kako su Nemačka i Japan vremenom ekonomski ojačale, *nemačka marka* i *japanski jen* su učinili *dolar* slabijim, pa su mnoge države počele da zahtevaju samo zlato umesto *dolara*. Kao rezultat tog procesa, u avgustu 1971. godine, *Richard Milhous Nixon* predsednik *USA* povukao je *USA* iz tzv. zlatnog standarda. Taj njegov potez jako je pogodio zemlje koje su proizvodile naftu i bile članice međunarodnog udruženja *OPEC* (slika 3), pošto su cene nafte i dalje bile u dolarima.

uređaje, a drugo na mere i ponašanja. Pod energetski efikasnim uređajem smatra se onaj koji ima veliki stepen korisnog dejstva, tj. male gubitke prilikom transformacije jednog vida energije u drugi. Kada je reč o merama, pod *energetskom efikasnošću* podrazumevaju se mere koje se primenjuju u cilju smanjenja potrošnje energije. Bez obzira da li je reč o tehničkim ili netehničkim merama, ili o promenama u ponašanju, sve mere podrazumevaju isti, ili čak i viši, stepen ostvarenog komfora i standarda. Najčešće mere koje se preduzimaju u cilju smanjenja gubitaka energije i povećanja *energetske efiksnosti* su: zamena *neobnovljivih* energenata *obnovljivim*, zamena energetski nefeikasnih potrošača efikasnim, izolacija prostora koji se greje ili hladi, zamena dotrajale stolarije u prostorima koji se greju ili hlade, ugradnja mernih i regulacionih uređaja za potrošače energije, uvođenje tarifnih sistema od strane distributera koji će podsticati štednju energije, kontrola ulaska sunčeve svetlosti i toplote u prostor i sl.

[3] Definisanje poželjnih razvojnih ciljeva u budućnosti i "vraćanje unazad" da se identifikuju politike, programi i aktivnosti koji će povezivati budućnost i aktuelni trenutak.

[4] Ovaj softver razvio je prof. dr Milun J. Babić

[5] http://www.circularecology.com/sustainability-and-sustainable-development.html#.Xjs24GhKjIU

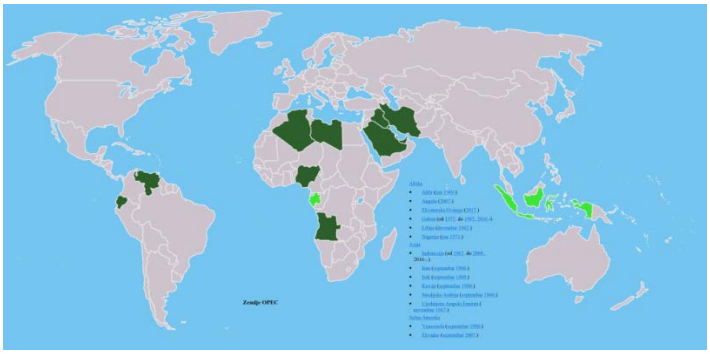
[6] 1 barel = 159 litara

[7] Američki dolar

[8] Sjedinjene Američke Države

[9] https://www.vreme.com/cms/view.php?id=1238975&print= yes

[10] 1 galon = 3,78 litara



Slika 3. Članice *OPEC* (*Organization of the Petroleum Exporting Countries*[11])

Nezadovoljstvo članica *OPEC* je bilo veliko, pa su, najpre 6. oktobra 1973. godine, Egipat i Sirija, uz pomoć ostalih *arapskih republika*, iznenada napale *Izrael* (*Yom Kippur rat*). Njihov cilj je bio povraćaj teritorije koju je *Izrael* osvojio šest godina ranije, ali i potpuna kontrola *Sueckog kanala*.

U navedenom periodu *USA* su i dalje bile najveći proizvođač nafte, a *Irak* je se nalazio na drugom mestu. Iako su još uvek bili saveznici, *Irak* nije bio zadovoljan što su *USA* podigle cene pšenice i šećera i najavile povećanje cena svoje nafte za deset puta. *OPEC* je postao nezadovoljan, jer je shvatio da njegova cena od 3 *dolara* po *barelu*, uz već slab *dolar*, nije realna, a i *USA* više nisu uspevale da zadovolje sopstvene potrebe sa domaćom proizvodnjom nafte. *OPEC* je želeo da digne cene za oko tri puta, dok su *USA* insistirale na maksimalnih 3,75 *dolara* po *barelu*.

Šest dana nakon početka *Yom Kippur rata*, američki predsednik *Richard Milhous Nixon* je odobrio vojnu pomoć *Izraelu* u vrednosti od 2,2 milijarde *dolara*, a *OPEC* je, kao kontrameru povećao cene nafte koju su zemlje članice proizvodile. *Naftna kriza* koja je nastala naglim povećanjem cena nafte, nazvana je kasnije *Prvom naftnom krizom*, i njen početak se vezuje za jesen 1973. godine, kad su zemlje *OPEC* namerno smanjile proizvodnju nafte za oko 5% da bi podigle njenu cenu. Cena je, potom, za par dana narasla sa 3 *dolara* po *barelu* na više od 5 *dolara*, dakle za oko 70%, da bi tokom 1974. godine cena sirove nafte na svetskom tržištu skočila na više od 12 *dolara* po *barelu*. U tom svojevrsnom naftnom embargu posebno su se istakle sledeće članice *OPEC*: *Alžir*, *Irak*, *Katar*, *Kuvajt*, *Libija*, *Saudijska Arabija* i *Ujedinjeni Arapski Emirati*.

C. Period druge naftne krize

U razdoblju koje počinje 1979., a završava se 1980. godinom, cena sirove nafte nastavlja drastično da raste, da bi se na kraju toga perioda privremeno zaustavila na 38 *dolara* za *barel*. Ova kriza dobila je naziv *Druga naftna kriza*, i ona je direktna posledica smanjenja proizvodnje nafte u vreme prvog zalivskog rata između Irana i Iraka 1979. godine. *Prva*, pa potom i ova *Druga*, *naftna kriza* pomogle su da do velikog dela svetske populacije dopru mnoge važne i kredibilne informacije iz energetskog sektora i saznanja, od kojih posebno izdvajamo ona koja su najdirektnije pokazivala:

- da *neobnovljivih* energenata za brzo rastuću industriju i sve brojniju i zahtevniju svetsku populaciju nema dovoljno, te da će cena tih energenata, a posebno nafte, rasti velikom brzinom;
- da se u toku proizvodnje, transporta i potrošnje raspoloživa energija troši neracionalno što, pored ostalog, rezultuje i pojačanom *emisijom gasova "staklene bašte"* i veoma utiče na *klimatske promene* i
- da male industrijske države nemaju razvojnu perspektivu ukoliko se, žrtvujući deo svoje suverenosti, ne udruže u velike državne agregacije i ne pristupe ubrzanom unapređivanju tehnologija radi podizanja *energetske efikasnosti* u svim sferama života.

D. Period nakon druge naftne krize

Između *Prve* i *Druge naftne krize*, a još intenzivnije nakon njih, nastaju prvi dugoročni nacionalni *programi energetske efikasnosti*, koji se, i danas, postepeno unapređuju, omasovljuju i sprovode (*Danska*, *Holandija*, *Nemačka*, *Norveška*, ...), a ubrzava se i proces proširenja *EU*[12]. Briga o povećanju *energetske efikasnosti* dopunjava se brigom o *zaštiti životne sredine*, što dovodi do burnih tehnoloških promena u svim sferama života i do prodora *obnovljivih izvora energije* u široku upotrebu.

Kao dva primere dobre prakse iz tog perioda (a ima ih mnogo) navodimo:

- izuzetno uspešan i rezultativan program *energetske efikasnosti Kraljevine Danske* i
- *program energetske efikasnosti* koji je tada počeo da sprovodi "*Porsche*" (*Nemačka*), omogućio je, krajem sedamdesetih godina prošlog veka, tom poznatom proizvođaču automobila, da za relativno kratko vreme obezbedi sredstava za zamenu tehnologije bojenja uljanim bojama – tehnologijom bojenja biorazgradivim bojama, koja je tada bila veoma skupa.

Savezna vlada *SFRJ*[13], u čijem je sastavu tada bila Srbija, donela je krajem sedamdesetih godina prošlog veka, svoj *program energetske efikasnosti*. Bio je to program rađen po relevantnim evropskim uzorima, ali je bio kratkog daha i bez vidljivih rezultata. Kao retki primeri dobre prakse u Srbiji iz tog perioda, u oblasti *energetske efikasnosti* i korišćenja *obnovljivih izvora energije*, mogu se navesti sledeća tri uspešno realizovana i primenjena istraživačko-razvojna projekta:

- "Optimizacija energetskog sistema Zavoda Crvena Zastava sa aspekta ušteda i zaštite čovekove okoline", Zastava, Kragujevac[14];
- "Katastar lokacija za gradnju malih hidroelektrana na teritoriji *RS"*, nosilac projekta bio je "Energoprojekt", Beograd i
- "Istraživanje i razvoj kontejnerskih mikro hidrocentrala", SOUR Zavodi Crvena Zastava, Kragujevac i Jugoslovenska narodna armija[15].

[11] https://hr.wikipedia.org/wiki/*OPEC*

[12] Evropska unija

[13] Socijalistička Federativna Republika Jugoslavija

[14] korukovodioci projekta akademik Zoran Zarić i prof. dr Milun Babić

[15] rukovodilac projekta prof. dr Milun Babić

U periodu posle 1980. godine u *EU* i najrazvijenijim državama sveta istraživanja, edukacija i sprovođenje mera u oblastima *energetske efikasnosti, zaštite životne sredine* i korišćenja *obnovljivih izvora energije* se rasplamsavaju, a u *SFRJ* i Srbiji, zbog ekonomske krize i raspada države, zamiru. Tek 1995. godine Vlada Srbije formira *Nacionalni savet* za *RGE*[16] , koji obezbeđuje inicijalna sredstva, donosi veoma kvalitetan program rada i osniva *četiri regionalna centra za RGE*[17] . U toku trogodišnje realizacije *RGE*, prema objavljenim podacima, ostvarene su energetske uštede ekvivalentne tržišnoj vrednosti koju imaju 2472 stana prosečne površine 70 m^2. Sa ukupnim podsticajnim sredstvima države vrednim oko 1900000 *DM*, uloženim u obliku kredita, konzumenti kredita su, prema izveštajima *centara RGE*, u toku trogodišnje realizacije *RGE*, ostvarili dobitke koji su bili oko 132 puta veći od ulaganja. Tu nisu uračunati drugi direktni, ili indirektni, pozitivni efekti sprovođenja *RGE*. Na predlog Saveta za *RGE*, Vlada *RS* je tada odlučila da u planovima setve svake godine opredeljuje 60000 *ha* za setvu uljne repice kao bazne sirovine za prozvodnju biodizela, i da pomogne početak proizvodnje biodizela u "Servu Mihalju" (Zrenjanin) i u "Prvoj iskri" (Barič), ali i izgradnju i puštanje u rad 25 malih porodičnih postrojenja za proizvodnju biodizela.

U vreme najvećeg zamaha *RGE*, nakon parlamentarnih izbora, 1988. godine formira se novi parlament i nova Vlada *RS*, i oni svoje prioritete usmeravaju prema Kosovu i Metohiji i pripremama za odbranu od *NATO*, zbog čega Program *RGE* zamire.

E. Period nakon od NATO napada na Srbiju

Nakon napada i bombardovanja Srbije od strane *NATO* snaga 1999. godine i parlamentarnih izbora, pri *Ministarstvu za nauku i tehnologiju* Vlade *RS* zasnovan je 2001. godine istraživačko-razvojni *NPEE*[18] . Programom je upravljao *Kolegijum direktora NPEE*[19] koji je postavljen rešenjem *nadležnog ministra*[20]. *NPEE* je objedinjavao usmerena osnovna, primenjena i razvojna istraživanja radi stvaranja novih znanja neophodnih za razvoj procesa, tehnologija, proizvoda ili usluga koji doprinose povećanju *energetske efikasnosti*. Rezultati *NPEE* su bili podaci i idejno-tehnička rešenja neophodna za gradnju pilot ili demonstracionih postrojenja, a sastavni deo rezultata *NPEE* bili su gradnja i ispitivanje pilot postrojenja, demonstracionih postrojenja, prototipova i proizvodno-operativne aktivnosti produkcije nultih serija. *NPEE* činilo je sledećih 13 nezavisnih potprograma:

- *Energetska efikasnost* u proizvodnji električne energije,
- *Energetska efikasnost* u prenosu i distribuciji električne energije,
- *Energetska efikasnost* u industriji,
- *Energetska efikasnost* komunalnih sistema,
- *Energetska efikasnost* u domaćinstvima,
- Osvajanje opreme i pripreme goriva radi zamene korišćenja električne energije za grejanje,
- Korišćenje *alternativnih* i *obnovljivih energetskih izvora*,
- *Energetska efikasnost* građevinskih objekata i
- *Energetska efikasnost* u saobraćaju,

a njihova programska usmeravanja vršio je *Kolegijum direktora NPEE*[21]. Ovaj istraživačko-razvojni nacionalni program dao je dobre istraživačke rezultate, a *MNTR* ga je ukinulo 2008. godine.

Svi objavljeni naučni radovi i studije urađeni u okviru NPEE jasno su pokazivali da se srpska privreda i društvo po efikasnom korišćenju energije nalaze na evropskom začelju, pa su, u nastavku, nadležni organi *RS* pokušali da donošenjem *Strategije razvoja energetike RS*[22] osnaže angažman privrede i društva na planu podizanja *energetske efikasnosti* u svim oblastima života i na uspostavljanju procesa *održivog razvoja* u *RS*. Ta *Strategija* je kao glavne ciljeve proglasila:

- povećanje ukupne *energetske efikasnosti* za 20%,
- povećanje korišćenja *obnovljivih izvora energije* sa 1.5% na 4.5% i
- zadovoljenje evropskih normi koje važe za *zaštitu životne sredine*;

a njeni opšti ciljevi bili su:

- pouzdano snabdevanje potrošača energijom,
- smanjenje uvoza energenata i energije,
- očuvanje domaćih energetskih resursa,
- smanjenje specifičnog utroška energije po jedinici proizvoda radi povećanja konkurentske sposobnosti privrede na domaćem i stranom tržištu,
- ušteda energije, odnosno smanjenje cene proizvoda,
- smanjenje zagadjenja okoline i
- zadovoljenje evropskih standarda u energetici, ekologiji i industriji.

Ovde posebno ističemo da je veliki doprinos okretanju *RS* prema racionalnom trošenju energetskih resursa i podizanju opšte *energetske efikasnosti* unutar njenog kompletnog privredno-društvenog ambijenta dala *EU*, koja je obezbeđivanjem inicijalnih 5000000 *EUR* za formiranje *Agencije za energetsku efikasnost* i reuspostavljanje *centara za energetsku efikasnost*[23]. Nakon toga je donet *Zakon o energetici* i *Agencija* za *energetsku efikasnost* je postala jedno od institucijalnih rešenja tog zakona. Međutim, delatnost ove agencije je zbog želje nadležnih autoriteta da direktno iz ministarstva upravljaju tokovima novca i projektima i u oblasti *energetske efikasnosti* preneta u delatnost posebnog resora pri *Ministarstvu rudarstva i energetike*, što se

[16] Program za racionalno gazdovanje energijom, predsednik tog Saveta je bio prof. dr Milun Babić

[17] *Regionalni centri za racionalno gazdovanje energijom* u Novom Sadu, Beogradu, Kragujevcu i Nišu

[18] Nacionalni program za *energetsku efikasnost*

[19] *Kolegijum direktora NPEE* bio je činilo je13 direktora i 13 njihovih zamenika, koji su bili najreferentniji profesori univerziteta, ili istraživači u Srbiji za *energetsku efikasnost*. Direktor *NPEE* bio je prof. dr Simeon Oka, a autor ovoga rada bio je direktor Potprograma za *energetsku efikasnost* komunalnih sistema

[20] Nadležni ministar je bio prof. dr Dragan Domazet

[21] *Ministarstvo za naučno-tehnološki razvoj*

[22] *NPEE* je bio jedan od programa *Strategije Privrednog razvoja Srbije do 2010. godine*

[23] Vidi fusnotu[17]

veoma nepovoljno odrazilo na započete projekte i usporilo dinamiku i kvalitet narednih procesa u ovoj oblasti. To je zbog toga što je se, ubrzo potom, sa plana realizacije osmišljenih koordiniranih organizaciono-tehničko-tehnoloških akcija koje su do tada rezultirale konkretnim doprinosima, prešlo na „sprovođenje" *programa energetske efikasnosti* i *održivog razvoja* na deklerativan način, tj. na izradu odgovarajuće, ali nedovoljno obavezujuće, legislative čiji je glavni cilj, kad se sa distance malo bolje sagleda, bio da se dobije forma, koja će od *EU* biti priznata u pristupnom procesu *RS* toj značajnoj međudržavnoj evropskoj agregaciji.

Do danas je izgrađen solidan pravni okvir za oblast *energetske efikasnosti* koji obuhvata zakone, strateške dokumente, uredbe i pravilnike usklađene sa propisima *EU*[24]. U nastavku ćemo navesti najvažnije legislativne dokumente koje su usvojeni od Skupšine i/ili Vlade *RS*[25].

E1. Zakoni

- Zakon o energetici ("*Službeni glasnik RS"*, br. 145/2014),
- Zakon o efikasnom korišćenju energije („*Službeni glasnik RS*", broj 25/2013),
- Zakon o komunalnim delatnostima ("Sl. Glasnik *RS*", broj 88/2011),
- Zakon o planiranju i izgradnji ("Sl. glasnik *RS*", broj 72/2009),
- Zakon o stanovanju ("Sl. glasnik *RS*", broj 50/1992, 76/1992),
- Zakon o održavanju stambenih zgrada ("Sl. Glasnik *RS*", broj 44/95, 46/98);

E2. Strateški dokumenti

- Nacionalni akcioni plan za korišćenje *obnovljivih izvora energije* (*NAPOIE*) („*Službeni glasnik RS*", broj 53/2013);
- *Strategija razvoja energetike RS* do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine („*Službeni glasnik RS*", broj 101/2015);
- Izveštaj o Strateškoj proceni uticaja *Strategije razvoja energetike RS* do 2025. sa projekcijama do 2030. na životnu sredinu;
- Saglasnost na Izveštaj o strateškoj proceni uticaja *Strategije energetike* na *životnu sredinu*,
- Program ostavrivanja *Strategije razvoja energetike* za period od 2017 do 2023. godine („*Službeni glasnik RS"*, broj 104/2017);

E3. Uredbe:

- Uredba o uslovima i postupku sticanja statusa povlašćenog proizvođača električne energije, privremenog povlašćenog proizvođača i proizvođača električne energije iz *obnovljivih izvora energije* („*Službeni glasnik RS*", broj. 56/2016, 60/17 i broj. 54/19);
- Uredba o podsticajnim merama za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora i iz visokoefikasne kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije („*Službeni glasnik RS*", broj 56/2016, broj 60/17 i broj 91/18);
- Uredba o ugovoru o otkupu električne energije („*Službeni glasnik RS*", broj 56/2016 i broj 61/17);
- Uredba o naknadi za podsticaj povlašćenih proizvođača električne energije („*Službeni glasnik RS"*, broj 12/2016, broj 7/2017 i broj 8/19);
- Uredba o utvrđivanju metodologije za određivanje cene snabdevanja krajnjeg kupca toplotnom energijom („*Službeni glasnik RS"*, br. 63/15);
- Uredba o garanciji porekla („*Službeni glasnik RS"*, br. 82/17);
- Uredba o minimalnim zahtevima *energetske efikasnosti* koje moraju da ispunjavaju nova i revitalizovana postrojenja („*Službeni glasnik RS"*, br. 112/17);
- Uredba o visini posebne naknade za podsticaj u 2019. godini („*Službeni glasnik*" broj 8/19);
- Uredba o utvrđivanju programa finansiranja aktivnosti i mera unapređenja efikasnog korišćenja energije u 2019. godini (Sl. glasnik *RS* br. 4/19);
- Uredba o vrstama proizvoda koji utiču na potrošnju energije za koje je neophodno označavanje potrošnje energije i drugih resursa („*Službeni glasnik RS"*, broj 92/13);
- Uredba o izmenama i dopunama uredbe o vrstama proizvoda koji utiču na potrošnju energije za koje je neophodno označavanje potrošnje energije i drugih resursa („*Službeni glasnik RS"*, broj 80/16);
- Uredba o vrstama proizvoda koji utiču na potrošnju energije za koje je neophodno označavanje potrošnje energije i drugih resursa („*Službeni glasnik RS"*, br. 92/13 i 80/16 – prečišćen tekst);
- Uredba o utvrđivanju graničnih vrednosti godišnje potrošnje energije na osnovu kojih se određuje koja privredna društva su obveznici sistema energetskog menadžmenta, godišnjih ciljeva uštede energije i obrasca prijave o ostvarenoj potrošnji energije („*Službeni glasnik RS"*, broj 18/16);

E4. Pravilnici

- Pravilnik o energetskoj dozvoli („*Službeni glasnik RS"*, broj 15/2015);
- Pravilnik o utvrđivanju slobodnog kapaciteta uvećanog za vrednost instalisane snage elektrana za koje je prestao privremeni status povlašćenog proizvođača („*Službeni glasnik RS"*, broj 24/2015);
- Pravilnik o minimalnim kriterijumima u pogledu *energetske efikasnosti* u postupku javne nabavke dobara („*Službeni glasnik RS"*, broj 111/15);
- Pravilnik o kontroli sistema za grejanje i o bližim uslovima koje moraju da ispunjavaju ovlašćena pravna lica za kontrolu sistema za grejanje („*Službeni glasnik RS"*, broj 58/16);
- Pravilnik o kontroli sistema za klimatizaciju ("*Službeni glasnik RS"*, broj 82/16);
-
-

[24] Direktiva 2009/28EZ, decision of the *EU* Council of Ministers, Decision 2012/04/MC - EnC on the implementation of Directive 2009/28/EC and amending Article 20 of the Energy Community Treaty, Regional energy strategy

[25] https://www.mre.gov.rs/dokumenta.php

- Pravilnik o načinu proračuna i prikazivanja udela svih vrsta izvora energije u prodatoj električnoj energiji ("*Službeni glasnik RS"*, broj 96/2017);
- Pravilnik o sadržini elaborata o *energetskoj efikasnosti* postrojenja za proizvodnju električne energije, postrojenja za kombinovanu proizvodnju električne i toplotne energije, sistema za prenos i distribuciju električne energije, postrojenja za proizvodnju i distribuciju toplotne energije („*Službeni glasnik RS"*, broj 30/18);
- Pravilnik o obrascu prijave za evidenciju obveznika naknade za unapređenje *energetske efikasnosti*, obrascu mesečnog i godišnjeg obračuna količina energije/energenata isporučenih potrošačima ili stavljenih u promet na teritoriji *RS,* odnosno uvezenih na teritoriju *RS*, obrascu mesečnog i godišnjeg obračuna obaveze plaćanja naknade, obrascu izveštaja o uplati, kao i načinu dostavljanja ovih obrazaca („*Službeni glasnik RS"*, broj 41/19);
- Pravilnik o minimalnim kriterijumima u pogledu *energetske efikasnosti* u postupku javne nabavke dobara („*Službeni glasnik RS"*, broj 111/15);
- Akcioni planovi za *energetsku efikasnost RS* („*Službeni glasnik RS"*, broj 1/17 od 06. januara 2017. godine i „*Službeni glasnik RS"*, broj 98/13);
- Pravilnik o načinu i rokovima dostavljanja podataka neophodnih za praćenje sprovođenja Akcionog plana za *energetsku efikasnost* u *RS* i metodologiji za praćenje, proveru i ocenu efekata njegovog sprovođenja („*Službeni glasnik RS"*, broj 37/15);
- Pravilnik o obrascu godišnjeg izveštaja o ostvarivanju ciljeva uštede energije („*Službeni glasnik RS"*, broj 32/16, broj 65/18);
- Pravilnik o uslovima za imenovanje energetskih menadžera u organima jedinica lokalne samouprave („*Službeni glasnik RS"*, broj 31/16);
- Pravilnik o uslovima za imenovanje energetskih menadžera u privrednim društvima čija je pretežna delatnost u proizvodnom sektoru i preduzećima kao javnim službama („*Službeni glasnik RS*, broj 98/16);
- Pravilnik o uslovima za imenovanje energetskih menadžera u privrednim društvima čija je pretežna delatnost u sektoru trgovine i usluga, organima državne uprave, drugim organima *RS*, organima autonomne pokrajine i ustanovama („*Službeni glasnik RS"*, broj 82/17);
- Pravilnik o načinu sprovođenja i sadržini programa obuke za energetskog menadžera, troškovima pohađanja obuke, kao i bližim uslovima, programu i načinu polaganja ispita za energetskog manadžera („*Službeni glasnik RS"*, broj 12/15);
- Pravilnik o uslovima u pogledu kadrova, opreme i prostora organizacije koja sprovodi obuku za energetske menadžere i ovlašćene energetske savetnike („*Službeni glasnik RS"*, broj 12/15);
- Pravilnik o uslovima za raspodelu i korišćenje sredstava Budžetskog fonda za unapređenje *energetske efikasnosti RS* i kriterijuma o izuzimanju od obaveze vršenja energetskog pregleda („*Službeni glasnik RS"*, broj 12/19);
- Pravilnik o utvrđivanju modela ugovora o energetskim uslugama za primenu mera poboljšanja *energetske efikasnosti* kada su korisnici iz javnog sektora („*Službeni glasnik RS"*, broj 41/2015);
- Pravilnik o označavanju *energetske efikasnosti* mašina za pranje veša u domaćinstvu („*Službeni glasnik RS"*, broj 24/14);
- Pravilnik o označavanju *energetske efikasnosti* mašina za pranje sudova u domaćinstvu („*Službeni glasnik RS"*, broj 24/14);
- Pravilnik o označavanju *energetske efikasnosti* električnih sijalica i svetiljki („*Službeni glasnik RS"*, broj 24/14);
- Pravilnik o prestanku važenja pravilnika o označavanju *energetske efikasnosti* usisivača („*Službeni glasnik RS"*, broj 20/19);
- Pravilnik o označavanju *energetske efikasnosti* grejača prostora, kombinovanih grejača, kompleta grejača prostora, opreme za regulaciju temperature i solarnog uređaja i kompleta kombinovanog grejača, opreme za regulaciju temperature i solarnog uređaja („*Službeni glasnik RS"*, broj 17/18) i
- Pravilnik o označavanju *energetske efikasnosti* grejača vode, rezervoara tople vode i kompleta grejača vode i solarnog uređaja („*Službeni glasnik RS"*, broj 67/18).

III. O ENERGETSKOJ EFIKASNOSTI KAO USLOVU, MERI I ALATU ZA OSTVARIVANJE USPEŠNE ENERGETSKE BUDUĆNOSTI RS

Kao što je u uvodu ovoga rada rečeno, kada bi ljudska zajednica uspevala da sve svoje razvojne potrebe trajno zadovoljava ne ugrožavajući prirodne sisteme i životnu sredinu, i da takvim postupanjem dugoročno osigurava postojanje ljudskog društva i prirodnog ambijenta u kome obitava, onda bi se takav njegov *razvojni koncept* mogao nazvati *održivim*. *Koncept održivog razvoja* predstavlja novu stratešku i filozofofsku paradigmu društvenog razvoja, a u svakodnevnom životu najčešće se dovodi u vezu sa zadatkom da se sva dejstva ljudske zajednice moraju da usmeravaju na negovanje harmoničnog odnosa sa kompletnom biosferom na planeti i sa očuvanjem prirodnih resursa, kao i sa drugim brojnim ekološkim izazovima koji pritiskaju sve brojniju savremenu civilizaciju.

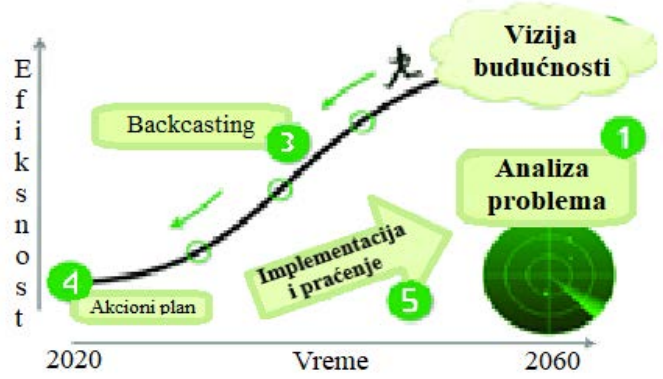
Kako ostvariti ciljeve koje nameće *koncept održivog razvoja*, kad je u praksi prisutno niz dilema i realnih problema uzrokovanih potrebom ljudskog društva da u svakom trenutku obezbedi potrebne količine hrane i energije za svakog čoveka? Ovo zbog toga što su dosadašnje aktivnosti naše civilizacije dovele do:

- „*efekta staklene bašte*",
- smanjivanja ozonskog omotača oko naše planete,
- nestanaka šuma u mnogim područjima,
- pretvaranja plodnog zemljišta u pustare,
- pojave kiselih kiša,
- izumiranja brojnih životinjskih i biljnih vrsta,
- zagađivanja vazduha, rečnih tokova, mora i okeana itd.

Upravo zbog takvog kompleksnog globalnog razvojnog zadatka, najpre je se, kao što se vidi iz drugog odeljka ovog rada, poseglo za promovisanjem čuvarnog odnosa prema raspoloživim energetskim resursima, to jest do zasnivanja brojnih *programa energetske efikasnosti* i međunarodnih sporazuma za borbu

protiv *klimatskih promena*, a s tim u vezi i do intenziviranja korišćenja *obnovljivih izvora energije* u cilju smanjenja potrošnje *neobnovljivih* na najmanju moguću meru. Normalno, radi se i na osvajanju fuzionih tehnologija, na bežičnom prenosu energije itd.

Programi energetske efikasnosti i korišćenja *obnovljivih izvora* su, za sada, *glavni organizaciono-tehničko-tehnološki alati* za uspostavljanje *održivog razvoja*. Metodologije njihove konkretizacije i sprovođenja su raznolike od zemlje do zemlje, pa čak su različite od jednog do drugog društvenog i/ili produkcionog entiteta nižeg hijerarhijskog nivoa. Veoma su, dakle, devirsifikovane, a njihovi konačni rezultati najčešće zavise od posvećenosti i kvaliteta edukacije onih koji koriste te razvojne alate. Zbog toga efektivnost i kvalitet upotrebe pomenutih *razvojnih alata* često postaje upitna, posebno onda kada se u postizanje razvojnih ciljeva uključe *ekološki* i *ekonomski* aspekti i sve ostalo što razvoj neke društvene zajednice definiše kao *održiv* na dugi vremenski period. Problem *međunarodne „standardizacije"* pomenutih *razvojnih alata*, tako da njihovo korišćenje uvek daje pozitivan i kvanifikovano očekivan rezultat u oblasti *obnovljivog razvoja* prisutan je u literaturi, a ovde će se izneti jedan od pokušaja koji smo obogatili originalnim *softverom* za uspostavljanje uzročno-posledičnih korelacija između planiranih akcija i njihovog



Slika 4. Ilustracija planiranja bilo kojih aktivnosti uz pomoć *backcasting methodology*

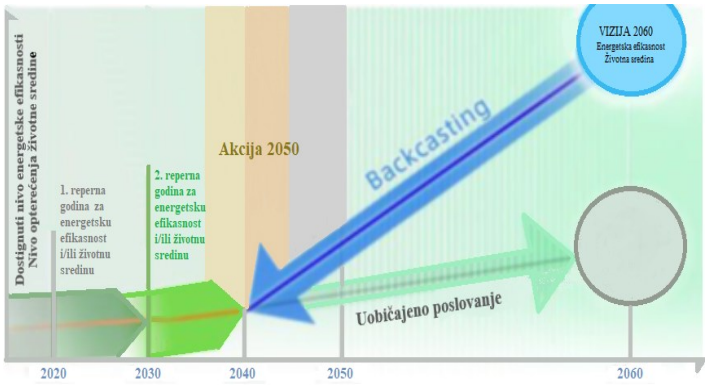
učinka u oblasti *energetske efikasnosti* i *održivog razvoja*. Naša iskustva su pokazala da do skoro masovno korišćeni metodološki pristup poznat u literaturi kao *forecasting methodology*[26], nije dovoljno pouzdan i da njegova primena najčešće ne daje rezultate koji su u skladu sa onim koji su na početku procesa proglašeni poželjnim. Zbog toga smo se analizirali domete novijeg metodološkog pristupa, koji je, kao što je u uvodu rečeno, u literaturi poznat kao *backcasting methodology* i zaključili da njegova primena pri definisanju i primeni *programa energetske efikasnosti* i *zaštite životne sredine*, odnosno *održivog razvoja*, znatno pouzdanija i da daje bolje rezultate u primeni.

Suština ove metodologije prikazana je na slikama 4 i 5[27]. Osnovna svojstva *backcasting methodology*, koju smo postavili u fundament naših istraživanja, omogućuju da se u toku izrade razvojnih scenarija:

- putanje razvoja tehnologija predviđaju na osnovu očekivanog konačnog ishoda;
- pretpostavlja da postoje neki unapred određeni *atraktori*[28], determinisani prirodnim potrebama ljudi, kojima će korišćeni *organizaciono-finansijsko-tehničko-tehnološki pristupi* postepeno težiti, tj. da postoji tzv. *organizaciono-finansijsko-tehničko-tehnološki determinizam* i da se
- uključe svi akteri koji utiču na razvoj programa u njegovoj ranoj razvojnoj fazi, tj. u fazi vizionarstva.

Dakle, osnovna karakteristika *backcasting methodology* je što ona uključuje sve aktere koji utiču na razvoj u ranoj razvojnoj fazi, tj. u tzv. fazi vizionarstva, i što se prilikom njene primene moraju proći sledeći razvojni koraci:

- strateško opredeljenje i definisanje problema;
- orijentacija na problem radi procene budućih potreba;
- razvoj vizije budućnosti;
- stvaranje vizije o tome kako može da se uspostavi željena budućnost i lokacija gde će se rešavati razvojni problemi, sa procenom održivih i neodrživih scenarija;
- postavljnje alternativnih rešenja kroz razgovor između učesnika razvoja;
- istraživanje rešenja/opcija i identifikovanje uskih grla;
- razmatranje mogućih puteva za otklanjanje uskih grla;
- izbor optimalne opcije akcionog plana;
- definisanje uloga razvojnih aktera, potrebnih sredstava i izrada sporazuma o saradnji;
- realizacija akcionog plana u kojoj treba da učestvuju svi glavni razvojni akteri i
- definisanje i sprovođenje podsticajnog odnosa prema naknadnim istraživačkim aktivnostima i inovacijama učesnika u razvoju.



Slika 5. Ilustracija planiranja akcija za dostizanje ciljeva u oblasti *energetske efikasnosti* i *zaštite životne sredine* uz pomoć *backcasting methodology*

[26] Prognoziranje ostvarivanja poželjnih razvojnih ciljeva u budućnosti na osnovu analize trenutnih okolnosti, saznanja i trendova

[27] https://www.google.com/search?q=backcasting&rlz=1C1GGRV_enRS760RS760&sxsrf=ACYBGNT7hcxmzXOaNivh9oH7SQlzESHp3w:1581007951875&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjX7O7Ksb3nAhURwsQBHS22AjEQ_AUoAXoECBAQAw&biw=1350&bih=647

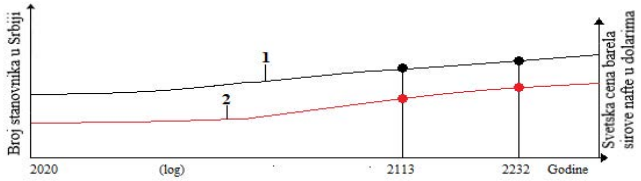
[28] Skup numeričkih ili drugih vrednosti prema kojim dinamički sistem teži iz različitih početnih uslova; tj. skup vrednosti u koji dinamički sistem evoluira nakon dovoljno vremena, tako da procenjene vrednosti koje se nađu dovoljno blizu *atraktora* ostaju blizu čak i ako dođe do blagih pomeranja

IV. PRIKAZ PRIPREME ULAZNIH PODATAKA ZA RAZVIJENI SOFTVER ENERGOVIZIJA MB KOJI JE ZASNOVAN NA BACKCASTING METHODOLOGY I PRIKAZ TRI SCENARIJA ENERGETSKE BUDUĆNOSTI RS U ZAVISNOSTI OD KVALITETA I DUGOROČNOSTI SPROVOĐENJA PROGRAMA ENERGETSKE EFIKASNOSTI

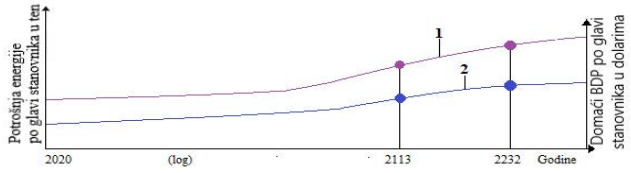
Za izradu scenarija energetske budućnosti Srbije uz pomoć *backcasting methodology* treba pripremiti ulazne podatke za aktuelno stanje (stanje A, u ovom slučaju - 2020. godina) i procenu njima odgovarajućih *atraktorskih* vrednosti na kraju razmatranog vremenskog perioda (stanje B, u ovom slučaju – 2232. godina), kao i *trend krive* promena ulaznih podataka od stanja A do stanja B, sa kontrolnim stanjem C (u ovom slučaju 2113. godina) za sledeće veličine:

- broj stanovnika (slika 6);
- cena energije na svetskom tržištu (slika 6),
- prosečna godišnja potrošnja energije po glavi stanovnika (slika 7),
- godišnji bruto domaći proizvod BDP po glavi stanovnika (slika 7),
- proizvodnja energije iz *neobnovljivih* izvora (slika 8),
- proizvodnja energije iz *obnovljivih izvora* (slika 8) i
- *trend krive* za moguća tri scenarija (1, 2 i 3) sprovođenja *programa energetske efikasnosti* (slika 10).

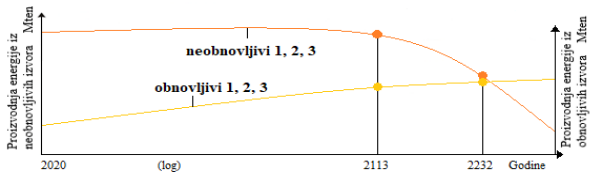
Uz napomenu da su scenariji, korišćeni prilikom izrade ovog rada, rađeni na osnovu poznatih podataka vezanih za realne rezerve domaćih *neobnovljivih* i *obnovljivih izvora* energije, važećih strategija privrednog, društvenog i energetskog razvoja, projekcija rasta cena energenata i podataka vezanih za sadašnji i moguće stepene ukupne *energetske efikasnosti* privrede i društva,



Slika 6. *Trend krive* promene broja stanovnika (kriva 1) i cena energije na svetskom tržištu (kriva 2) od akuelnog (2020. godina) do *atraktorskog* stanja u budućnosti (2232. godina)

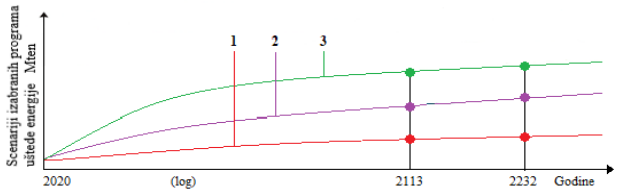


Slika 7. *Trend krive* promene prosečne godišnje potrošnje energije po glavi stanovnika (kriva 1) i godišnjeg bruto domaćeg proizvod *BDP* po glavi stanovnika (kriva 2) od akuelnog (2020. godina) do *atraktorskog* stanja u budućnosti (2232. godina)



Slika 8. *Trend krive* promene proizvodnje energije iz *neobnovljivih* izvora (kriva – *neobnovljivi* 1,2,3) i proizvodnje energije iz obnovljivih izvora (kriva – obnovljivi 1,2,3) od akuelnog (2020. godina) do *atraktorskog* stanja u budućnosti (2232. godina)

Naše okruženje, a to je *EU*, već odavno je, iako javno ne ističe, svoj dalji razvoj i energetsku budućnost počelo da vezuje za Rusku Federaciju. Energiju u budućnosti moći će da obezbede samo jaki društveno-ekonomski entiteti, i zbog toga su se zbog ideje *EU* relativno lako mnogi državni enriteti odrekli mnogih atributa državnosti. Ako Srbija na duži rok izostane iz tog *EU*-pokreta agregacije, ona, definitivno, neće imati šansu da obezbedi potrebnu energiju za svoj razvoj!



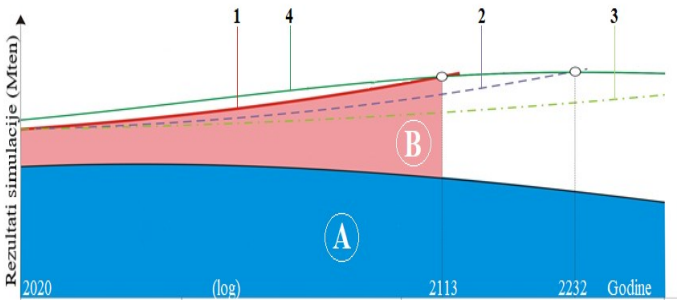
Slika 9. *Trend krive* mogućih ušteda energije za tri analizirana scenarija (1[29], 2[30] i 3[31]) sprovođenja programa *energetske efikasnosti* od akuelnog (2020. godina) do *atraktorskog* stanja u budućnosti (2232. godina)

sa slike 10 se jasno vidi da će Srbija u budućnosti sve više svoj razvoj morati da bazira na uvozu energenata i energije. Da li će Srbija, iako bude imala dovoljno finansijskih sredstava, uspevati da obezbedi energiju i energente u svom okruženju? Jer, očigledno je, energija sve više postaje strateški resurs oko koga se u svetu mnogi već otvoreno otimaju, ili nastoje da ga sačuvaju za sopstvene potrebe. U skoroj budućnosti će biti, po svoj prilici, važnije da li će i ko hteti da vam proda energiju, nego da li imate novca da je platite! Pogledajmo, samo, na kojim područjima se u poslednjih dvadesetak godina vode ratovi i gde se generišu i održavaju procesi uznemirujućeg „društvenog ključanja".

[29] potrošnja energije u *RS* sa sadašnjim nivoom sprovođenja programa *energetske efikasnosti* (primenom *programa energetske efikasnosti* potrošnja energije u *RS* svake godine će se u prvih 30 godina sprovođenja *programa* smanjivati u proseku za 0,35% potrošene energije u prethodnoj godini)

[30] potrošnja energije u *RS* sa sadašnjim nivoom sprovođenja programa *energetske efikasnosti* (primenom *programa energetske efikasnosti* potrošnja energije u *RS* svake godine će se u prvih 30 godina sprovođenja *programa* smanjivati u proseku za 0,95% potrošene energije u prethodnoj godini)

[31] potrošnja energije u *RS* sa sadašnjim nivoom sprovođenja programa *energetske efikasnosti* (primenom *programa energetske efikasnosti* potrošnja energije u *RS* svake godine će se u prvih 30 godina sprovođenja *programa* smanjivati u proseku za 1,68% potrošene energije u prethodnoj godini)



Slika 10. Tri scenarija energetska budućnosti Srbije (*Scenariji 1, 2 i 3*) dobijena uz pomoć softvera *Energovizija MB*

1 – potrošnja energije u *RS* sa sadašnjim nivoom sprovođenja programa *energetske efikasnosti* (primenom *programa energetske efikasnosti* potrošnja energije u *RS* svake godine će se u prvih 30 godina sprovođenja *programa* smanjivati u proseku za 0,35% potrošene energije u prethodnoj godini); 2 - potrošnja energije u *RS* sa unapređenim nivoom sprovođenja programa energetske efikasnosti (primenom *programa energetske efikasnosti* potrošnja energije u *RS* svake godine će se u prvih 30 godina sprovođenja *programa* smanjivati u proseku za 0,95% potrošene energije u prethodnoj godini); 3 - potrošnja energije u *RS* sa znatno unapređenim nivoom sprovođenja programa energetske efikasnosti (primenom *programa energetske efikasnosti* potrošnja energije u *RS* svake godine će se u prvih 30 godina sprovođenja *programa* smanjivati u proseku za 1,68% potrošene energije u prethodnoj godini); 4 – energetski ekvivalenat finansijskih mogućnosti *RS* za uvoz neophodnih energenata; A – proizvodnja energije iz domaćih *neobnovljivih* i *obnovljivih izvora*; B – uvoz energenata i energije

V. ZAKLJUČAK

Nakon prikaza istorijskih povoda za nastanak opšte društvene ideje o neophodnosti da se počne razmišljati o zasnivanju programa *energetske efikasnosti* i pristupa *održivog razvoja*, i upoznavanja sa tempom njihove primene i doprinosa smanjenju potrošnje energije, u ovom radu je ukratko osvetljena savremena *backcasting methodology* koja se sve više koristi pri planiranju i razvoju u energetskom i drugim sektorima. Zatim su prikazana tri scenarija energetske budućnosti RS dobijena primenom softvera *Energovizija MB*, koji upućuju na to da ako nadležne institucije *RS* ne započnu sa ozbiljnom primenom postojećih *razvojnih alata* u svim sektorima privrede i društva, *RS* će se za 50-60 godina suočiti sa energetskim i ekološkim kolapsom!

REFERENCE

[1] [1] Babić M., „Energetska efikasnost – Istorijat – Sadašnje stanje – Budućnost", Uvodno izlaganje na Svečanom skupu povodom 100 godina postojanja Saveza eneretičara, Beograd, 16. oktobar 2019.

[2] Vukašinović V., Gordić D., Živković Marija, Živković D., Josijević M., Jurišević N., "Primena backcasting metodologije pri dugoročnom planiranju korišćenja biomase", *Energija* , 01-Feb (2018): 563-571.

[3] Vojinović Đ., Gvero P., Kotur M., "Priručnik za metode scenarija za energetsko planiranje u lokalnim zajednicama", Univerzitet u Banjoj Luci, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, O. J. Mašinski fakultet Banja Luka, O.J. Mašinski fakultet Istočno Sarajevo, 2015., ISBN 978-99938-39-55-2 (MF, BL)

[4] Quist J., Vergrag P., "Past and future of backcasting: The shift to stakeholder participation and a proposal for a methodological framework", Futures 38 (2006) 1027–1045

[5] Carlsson-Kanyama A. et al, "Participative backcasting: A tool for involving stakeholders in local sustainability planning", Futures 40, (2008) 34–46;

[6] Phdungsilp A., "Futures studies backcasting method used for strategic sustainable city planning", Futures 43, (2011) 707–714

[7] Jaakko Kuisma, "Backcasting for Sustainable Strategies in the Energy Sector, A Case Study at FORTUM Power and Heat", Thesis for the partial fulfilment of the Master of Science in Environmental Management and Policy Lund, Sweden, September 2000

AUTHOR

Prof. dr Milun J. Babić, redovni clan Akademije inženjerskih nauka Srbije, Kraljice Marije 16, 11000 Beograd, Srbija, nastasija@mts.rs

Najveći izazovi energetske tranzicije u Srbiji: u srednjem i dugom roku

Most Challenges of Energy Transition in Serbia: in mid-term and long-term

Petar Đukić[*], Slaviša Đukanović[**],

[*] Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu
[**] Visoka poslovna škola strukovnih studija, Novi Sad

Apstrakt **-** Ozbiljne strukturne promene energetike Srbije tek predstoje. Sistem takvih kadrinalnih i dugoročnih izmena autori ovog rada pojednostavljeno nazivaju energetskom tranzicijom. Dva su osnovna razloga velikog kašnjenja: prvi proističe iz globalnih tokova u vezi klimatskih promena i sve zahtevnijih međunarodnih strategija, a drugi je trenutno stanje u energetsko-ekonomskom kompleksu Srbije, posebno u sektoru zaštite životne sredine i prirodnih resursa. Rastući gubici energije, kao i troškovi zagađenja, već duži niz godina čine energetku Srbije jednom od najzapuštenijih, kako u Evropi, tako i u regionu. Razg za to leži u sve većem kašnjenju preduzimanja ozbiljnih strukturnih promena. Populizam, kao hroničan problem energetske politike, logična je posledica partijske uprave i nekompetentnog (političkog) gazdovanja energetskim potencijalima. Depolitizacija, tehnološka modernizacija i ekologizacija energetskog sistema Srbije očekuju se tek u budućnosti. Održivost sistema i procesa u enegetici je dugoročni cilj koji započinje postepenim i teškim ekonomskim koracima. Skuplja, čistija i socijalno-dostupna energija jeste nešto što podrazumeva viši dohodak i kvalitet života, ali zahteva i novu energetsku kulturu građana, privrede i države.

Ključne reči: energetska tranzicija, energetska efikasnost, ekologizacija energetike, energetske institucije, energetska kultura

Abstract- Serious structural changes in energy sector are expected in the next period. System long-term and fundamental changes we could simply call energy transition. There are two basic reasons for that: the first is caused by global flows influenced by climate changes and strategies, which are more complicated and very demanding; the second reason is situation in the energy sector and economic system in Serbia, especially in the environmental area and natural resources management. The losses and pollution costs, caused by energy sector, make Serbian energy one of the most neglected and the least promising in the region of south-eastern Europe. Serious structural changes in energy sectorare in big delay. Nowadays Serbia wastes the energy, in comparison, not only with more developed countries (OECD and EU) but with comparabl ecountries in the region. Every day Serbian economy and society emit more and more pollutants in environment, and the whole economic system suffers by losses of the energy. Populism as chronic problem of economic and energy policies is the logical consequence of incompetent political party's management and weak economizing with energy potentials. System depoliticization, technology modernization and strategic greening of the whole energy system of Serbia are expected in the future. Sustainability of the processes in energy is long-term task that start swith gradual and difficult economic steps. More expensive, clearer and socially available energy is something that considers higher income and better life quality, but requires new energy culture of citizens, economy structure and state system.

Index Terms- Energy transition, Energy efficiency, Greening of energy, Energy institutions, Energy culture

I. UVOD

Današnji Zemljin energetski potencijal treba da bude dostupan, socijalno i ekološki prihvatljiv za nekih 7,5 milijardi ljudi u svetu, od kojih svaki troši bar dvadeset puta više energije u odnosu na prosečnog potrošača od onih 1,65 milijardi ljudi koliko ih je živelo na Planeti početkom XX veka. Energetski zahtevi današnjih (energetski sve siromašnijih) ljudi, zavisnika od savremenih tehnologija, više su nego specifični i drugačiji u odnosu na vreme od pre 120 godina. Svet se najbrže izmenio (a sada se i strukturalno menja), tokom industrijske ere.

Prava eksplozija društvenih nejednakosti, uz enormno materijalno bogaćenje sve manjeg broja "izabranih", naspram naglog siromašenja najvećeg broja "običnih" ljudi, dodatni je razlog za brigu. Naime, za samo dve godine, broj milijardera čije bogatstvo prevazlazi bogatstvo 3,6 milijardi siromašnih (polovine stanovništva sveta), smanjio se sa 62 u 2016, na svega 8 (osam) u 2018. godini. [1, str.66]. Energetski faktor zaslužan ili odgovoran za ubrzanje tih promena, pa je danas je najviše na udaru globalne održivosti.

I ENERGETSKA TRANZICIJA - GLOBALNI NIVO

Integralna tranzicija energetike podrazumeva štednju, višu energetsku efikasnost zasnovanu na tržišnim merama i podsticajima, povećanje socijalne dostupnosti energije i „ozelenjavanje“ energetike. Jedan od indikatora pregleda istorije unapređenja energetike u svetu jeste evaluacioni sistem organizacije Svetskog saveta za energiju (*WEC*). On svake godine sačinjava novi pregled stanja energetike u svetu, po regionima i zemljama. Mada se metodologija praćenja i ocenjivanja energetske održivosti (metaforično nazvana „energetska trilema“) stalno osvežava i popravlja, u skladu sa novim saznanjima, na osnovu nje dosta pouzdano mogu se ispratiti relativni odnosi i nastojanja. Pregled dugoročnih promena prisutnih tokom skoro dve poslednje decenije (2001-2020), pokazuje da neke od njih ostaju prisutne, a druge se bitno menjaju.

A. Dva modela energetske tranzicije

Energetika najpre, u skladu sa inicijalnim industrijskim razvojem, postaje jedan od vodećih sektora zagađivanja životne sredine većine država sveta. Drugo, veoma je ustaljeni trend tzv. obrnute „U“ krive, koji pokazuje korelaciju energetskog zagađenja na nivou niskog i srednjeg dohotka. Pojednostavljeno, kada dohodak dostigne zavidni nivo, više-srednje razvijenosti, zemlje po pravilu počinju daleko više da ulažu u zaštitu životne sredine, odnosno u čiste tehnologije i zelenu energiju, što sve zajedno vodi ka bržem opadanju zagađenja, ne dovodeći u pitanje dalji ekonomski razvoj. U okolnostima visoke razvijenosti (primer zemalja OECD), tokom poslednje četiri decenije, rast utroška energije, posebno po jedinici BDP, bio je daleko sporiji od rasta dohotka. To ohrabruje, ali nedovoljno. Naime, najbrži ekonomski rast danas je rezervisan za najmnogoljudnije zemlje, a samo one azijske (brzorastuće i u razvoju) broje oko 40% svetske populacije, pa su pretnje od globalne energetske entropije sve veće.

Drugi model razvoja, još u pokušaju, nema boljeg prevoda nego „dekuplovanje“. Reč je o tome da se proaktivnom energetskom politikom i odgovarajućim privrednim strategijama, odnosno tehnološkom modernizacijom i podizanjem energetske efikasnosti, divergiraju trendovi ekonomskog rasta i utroška energije/zagađenja, i da se po modelu „čistijeg razvoja“ već od nivoa srednjeg dohotka troši sve manje energije po jedinici novčanog proizvoda.

B. Efikasnija i modernija energetika - globalna scena

Rezultati su prilično različiti, u zavisnosti od toga da li je reč o energetski, resursno i prostorno, bogatoj ili siromašnoj, međunarodno suficitarnoj ili deficitarnoj privredi, odnosno ekonomiji u ekspanziji ili tehnološki i ekonomski “zreloj” privredi koja strukturno menja svoje izglede za održivu energetsku budućnost. Ti rezultati sintetički uzeti, u grubljoj analizi pokazuji sledeće rezultate globalne tranzicije energetike:

1. Tokom poslednje dve decenije postiglo se mnogo u relativnom napretku i modernizaciji pojedinih energetskih sistema, naročito u pogledu energetske efikasnosti, jer je BDP u većini zemalja sveta, a posebno u zemljama OECD, rastao brže nego potrošnja energije;
2. Bez obzira na proklamovane ciljeve koji se odnose na povećanje udela obnovljivih izvora u energetskom miksu, njihov udeo u globalnoj energetici nije se mnogo popravio. Ipak, danas oko 14% ukupno proizvedene električne energije potiče iz OIE (početkom 21. veka svega jedna desetina), a udeo obnovljivih izvora u primarnoj energiji, u najvećem delu sveta se povećava.[1]
3. Najveći problem sadašnjih trendova je taj što emisija CO_2 iz sagorevanja fosilnih goriva i dalje raste na globalnom nivou, kao i u većini zemalja sveta. U odnosu na 2000. godinu, globalna emisija od 33 Gt, podigla se na 37,1 Gt u 2018. sa tendencijom daljeg rasta u 2019. Ovo se podudara sa trendom povećanja koncentracije CO_2 u atmosferi, koja je tokom 2017. prevazišla nivo od 400 ppm [10, str.22].
4. Zemlje višeg dohotka u većoj meri preduzimaju mere sistemske energetske tranzicije, pa su i rezultati preobražaja (održivosti) njihove energetike prisutniji. Zemlje tradicionalno dobre energetske kulture, kao što su Norveška, Danska, Švajcarska, Rusija, Velika Britanija, kao i Kina, Japan, Kambodža, sprovode energetsku tranziciju ubrzanim tempom.

Na osnovu analiza WEC (*Global energy trends*) nameće se nažalost zaključak da se reforma energetike ne odvija na isti način u relativno različitim sredinama. Sve u svemu, napredak u energetskoj tranziciji nije rezervisan samo za tehnološki razvijene i bogate nacije. Mnogo toga zavisi od lokalne, regionalne i nacionalne energetske politike i kulture.

C. Primer Namibije, Kine, Kambodže

Primer Namibije može da postane na samo ilustrativan, već i podsticajan. Ona se prema (WEC) nalazi među 10 najuspešnijih u energetskoj tranziciji. Mada je relativno mala zemlja, njen energetski sistem je nisko-ugljenični i dobro sektorski i tehnološki povezan, a proizvodi električni *mix* u kome hidro-potencijal učestvuje sa 58%. Trenutno izvozi 60% proizvodnje (u Zimbabve, Južnu Afriku, Somaliju). Pritom Namibija ima ambiciozne planove korišćenja obnovljivih izvora sa implementacijom nacionalnog klimatskog plana, uz određenje sopstvenog dorinosa klimatskom sporazumu Pariz 21 [22] .

Kina, kao najmnjogoljudnija zemlja sveta pokazuje drugačije iskustvo. Njen 13-togodišnji plan označen je kao „zeleni rast“, a kao ključni cilj prepoznaje redukciju zagađenja i promociju “zelene” energije. Danas je Kina najveći investitor u obnovljivu energiju i niskougljenične izvore što najviše uključuju solarne panele, vetrogeneratore, kao i nuklearna postrojenja i biomasu. Napredak i tranzicioni put koji se poznaje. [5, str. 313]

Za svet u celini Kina predstavlja posebno iznenađenje. Ona je jedna od 10 zemalja sveta koja je tokom energetske tranzicije za dve decenije XXI veka napravila najveći pomak - 23% [23]. Ilustracije radi, krajem 2018, od pet vodećih gradova sveta prema kumulativnom broju električnih vozila, četiri su iz Kine: Šangaj, Peking, Šenžen i Hangdžou. Takav ishod je ostvaren utvrđenim ciljem godišnje prodaje od 2 miliona električnih vozila do 2020 [7,

[1]Možda optimistično deluje informacija da je u SAD, nakon Trampovog ustoličenja, odnosno u 2018. proizvodnja električne energije iz OIE prvi put pretekla udeo elektro energije dobijene iz uglja. Ovaj trend se nastavlja, bez obzira na zvaničnu politiku Bele kuće.

str.15]. Postoje zemlje, kao što su Kambodža ili već pomenuta Namibija, koje su ostvarile veći procentualni uspeh, ali imajući u vidu strategiju Kine da ostvari dominantan rast i postane ekonomski i tehnološki vodeća nacija sveta, njen preobražaj i nova ekološka politika zaista jesu za respekt.

II EU I SVET, UČINAK U ENERGETSKOJ TRANZICIJI

Prvih pet zemalja po napretku u globalnoj ekološkoj tranziciji elektro-energetike su evropske: Danska, Letonija, Litvanija, Luksemburg i Velika Britanija. Ove zemlje su smanjile upotrebu fosilnih goriva i povećale udeo korišćenja OIE radi proizvodnje električne energije, posebno u oblasti primene sunca, vetra, biomase, kao i hidropotencijala (WEC, 2019). U svim slučajevima reč o tehnološki naprednim ili čak najrazvijenijim malim ekonomijama EU. Međutim, u ovom spisku nema Nemačke i Francuske. Velika Britanija više nije članica EU, mada se odriče (evropskog) modela preobražaja svoje energetike. Stalno podizanje lestvice ciljeva EU, pokazalo se kao relativno dobar metod, čak i ako se ne ostvare svi strateški numerički ciljevi: podizanje udela OIE do 40%, gašenje svih elektrana na ugalj do 2030, kao i nulta karbonska neto-emisija do 2050.

Suštinski, u svetu danas samo Evropska unija ostvaruje kontinuirani pad emisije GSB u ukupnom skoru. Već do 2012. EU je, u odnosu na baznu 1990. smanjila emisiju GHG za 18%. Noviji podaci su još uverljiviji, jer je ukupno smanjenje u 2018. u odnosu na bazu iz 1990. iznosilo 22%. EU danas iz sagorevanja fosilnih goriva, godišnje emituje oko 3,1 teratona ekv. CO_2, što je čak za 20% niže od evidentirane emisije 2010 (WB, 2019.). Ipak, pred evropskom zajednicom naroda (EU ili van nje svejedno) preostaju bitni izazovi: skladištenje električne energije, mogući sajber kriminal, održanje evropske kohezije kao i tržišne neizvesnosti vezane posebno za investicije i sprovođenja akcije za klimu[2].

A. Energetika Srbije kao deo evropske

Srbija i geo-fizički i politički pripada evropskom ekonomskom prostoru, pa je logično i njeno članstvo u Energetskoj zajednici, koja obuhvata 8 zemalja (zemlje bivše SFRJ, Albanija, Ukrajina i Gruzija). U trenutku nastanka ovog teksta, Energetska zajednica pokreće postupak protiv Srbije zbog neispunjene obaveze o gašenju velikih i opasnih ležišta, mere koja je propisana i predviđena za početak 2018. Iz zvaničnih institucija Srbije, ne čuju se prepoznatljivi i ubedljivi argumenti da je nešto u toj oceni pogrešno. Istovremeno, prva polovina januara 2020. protiče sa velikim prekoračenjima zagađujućih materija u vazduhu iznad većih gradova Srbije, od kojih su neki dospeli na neslavnu listu vodećih u svetu.

B. Ekološko-energetske posledice NATO bombardovanja Republike Srpske i SRJ

Bombardovanjem priobalja Drine u Republici Srpskoj (u jesen 1995) bačene su tri i po tone osiromašenog uranijuma. Zatim je, agresijom na SR Jugoslaviju, 1999. izručeno između 30 i 80 tona. Neurohirurg, Danica Grujičić tvrdi da je NATO nuklearni otpad iz elektrana razbacao svuda po Srbiji. Na taj način su nam godinama kontaminirali ne samo zemlju, već i podzemne vode, a kasnije i vazduh.[3] Kao posledica toga, godišnji broj novoobolelih lica od malignih bolesti na teritoriji Srbije, povećan je sedam puta (sa oko 5.000 lica u 1994. na oko 36.000 u 2017. godini). [17] [4]

Veliku opasnost po zdravlje ljudi predstavlja razaranje transformatorskih stanica i nekontrolisano isticanje sintetičkog trafo-ulja, piralena, supstance koja u zemlji i vodi ostaje večno, jer priroda nema mehanizme za njegovo razlaganje.[5]

Tokom NATO bombardovanja onesposobljeno je za rad devet velikih trafo-stanica u gradovima kao i dve trafo-stanice u termoelektranama Obrenovac i Veliki Crljeni.[6] Prilikom bombardovanja TE "Kolubara", isteklo je oko 100 tona piralena, koji je prirodnim tokom dospeo u Savu i Dunav.[7] Disertacija Miljane Stojanović-Milosavljević jedina je doktorska studija o akcidentnom kretanju piralena u prirodi, koja je urađena kod nas posle NATO bombardovanja[8]. Ova biohemičarka je za vreme i posle bombardovanja uzela i analizirala 1.800 uzoraka tla, podzemnih i nadzemnih voda i rečnog dna. Istražila je vodotok reke Lepenice od ulaska u Kragujevac pa do ulivanja u Veliku Moravu, vodotok Velike Morave, kao i rečne nanose Lepenice i reke Ždraljice od fabrike "Zastava" pa do završetka kragujevačke kotline, uključujući tu i izvorišta i bunarske vode. U toku

[2] EU je svesna težine ovih izazova a to je verovatno dokaz spremnosti da se sa njima izbori.

[3] "To je dokazao i Institut u Vinči, koji je samo u okolini Vranja pronašao oko 400 penetratora iz projektila i svi su bili napravljeni od nuklearnog otpada. Problem je što se većina tih delova municije posle eksplozije bombe zarila u zemlju i tamo ostala trajno. Kada se te materije zabiju pod tlo, one korodiraju, a zatim se šire putem zemlje i vode, dok preko prašine dospevaju u vazduh. Ljudi to udišu, radioaktivne čestice se lepe za pluća, a zatim putem krvotoka dolaze do ostalih organa i izazivaju rak." Videti u: Račić, A. (2018): *Isto,* str. 38

[4] Račić Alek (2018): *NATO agresija traje,* Svetigora, Cetinje, str. 27-37

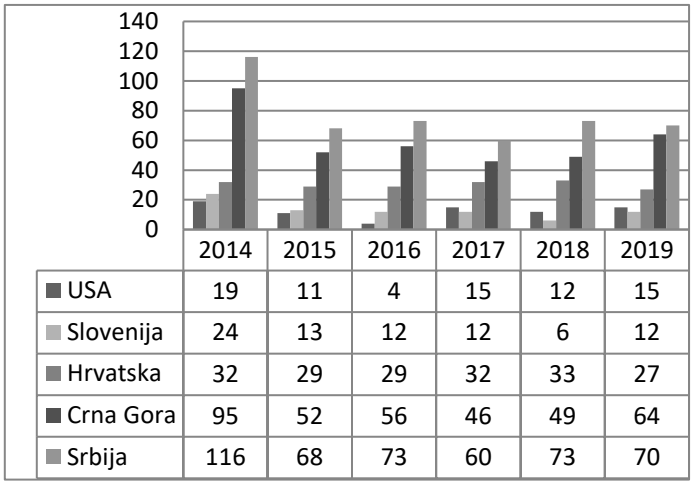
[5] Račić, A. (2019): "Hemijske i biološke posledice NATO bombardovanja Srbije", Tehnika – Kvalitet IMS standardizacija i metrologija, 19/2019., str. 478

[6] Milošević Miodrag (1999): Agresija - EPS, Energija, Ekonomija, Ekologija, 2/1999., str. 11

[7] Slično tome, u Boru se, prilikom razaranja trafo-stanice, u okolinu izlilo 25 tona trafo-ulja. Zatim, u Prahovu, je uništeno skladište otpadnog materijala u kome se nalazilo oko 5 tona trafo-ulja i oko 120 tona motornog ulja, koje je najvećim delom izgorelo u požaru. Nadalje, u Beogradu, prilikom bombardovanja trafostanica "Beograd 3" i "Beograd 9", zapaljene su velike količine trafo-ulja. Konačno, u Kragujevcu, prilikom bombardovanja fabrike "Zastava automobili", ukupno je isteklo 1.428 litara piralenskog trafo-ulja. Račić, A. (2019): *Isto,* str. 478-480

[8] Stojanović-Milosavljević, M. *Pravci kretanja polihlorovanih bifenila (piralena) u vodama nakon NATO bombardovanja,* doktorska disertacija, Univezitet u Beogradu, Biološki fakultet, 128 str. 2002. Internet, https://www.scribd.com/doc/248015846/Pravci-Kretanja-Polihlorovanih-Bifenila-Piralena-u-Vodama-Posle-NATO-Bombardovanja-Doktorat-Miljane-Stojanovi%C4%87-Milosavljevi%C4%87

istraživanja dolazila je u dodir sa kancerogenim materijalom. Umrla je od maligne bolesti 2010. godine. [9]



	2014	2015	2016	2017	2018	2019
USA	19	11	4	15	12	15
Slovenija	24	13	12	12	6	12
Hrvatska	32	29	29	32	33	27
Crna Gora	95	52	56	46	49	64
Srbija	116	68	73	60	73	70

Slika 1. Globalni rang opšte održivosti energetike odabranih zemalja 2014-2019. Izvor: WEC 2019.

Slična sudbina zadesila je i desetine hrabrih vatrogasaca i elektromontera, koji, zbog neposrednog dodira sa štetnim materijama prilikom lokalizovanja požara na bombardovanim petrohemijskim, ili mehaničkog otklanjanja grafitne paučine na elektroprenosnim postrojenjima, danas nisu više među živima. Prema proceni autora knjige: "NATO agresija traje", maksilofacijalnog hirurga, Aleka Račića, broj novoobolelih od malignih bolesti u 2018. godini, na teritoriji Srbije (bez Kosmeta) prelazi 40.000! Posle ovako onespokojavajućih činjenica, biće razumljivije relativno loše stanje javnog zdravlja, kao i aktuelna pozicija energetike.

III RELATIVNA ODRŽIVOST ENERGETIKE SRBIJE U DUGOM ROKU

Stanje energetike, tokom poslednje dve decenije, prema analizama WEC, čak u 119 zemalja je unapređeno, dok je u 9 zemalja nazadovalo. Stopa napredovanja u okviru energetske trileme pokazatelj je "tranzicionog napretka", ali se u izveštajima WEC podvlači i kao ohrabrenje zemljama da dalje unapređuju svoje energetske politike i strategije (WEC, 2019, p. 4).

Za blizu dve decenije praćenja tokova i ocena energetske trileme, samo devet zemalja su ostvarile apsolutno nazadovanje.[10] Na grafikonu koji sledi (slika 1.) može se uočiti relativna pozicija (rang opšte održivosti) prema oceni WEC od 2014 do 2019. U razmatranje su uzete i ocene za energetiku SAD, koja je početkom perioda imala bolji rang od Slovenije.

Međutim, tokom poslednje tri godine održivost energetike SAD pada na 15 mesto u svetu, dok Slovenija sigurno drži 12. mesto. Za razliku od njih, Srbija je, imala najgoru ocenu početkom perioda (čak 116 rang 2014.) ali je tokom poslednje tri godine popravila skor i relativnu poziciju, pa je trenutno oko 70. mesta. Od nama obližnjih zemalja, iza Srbije su samo Severna Makedonija (na 71. mestu) a slede Albanija na 73. i Bosna i Hercegovina na 79. mestu.

Ovo poređenje u tabeli-slici 1. ima smisla po više osnova. Iz njega se najpre vidi da se relativna pozicija zemlje relativno brzo menja u zavisnosti od privrednog razvoja koji ubrzava i onogućana strukturne promene (pozitivan primer Slovenije u nšem okruženju, poput t primera Kambodže u Aziji i Namibije u Africi). Drugi faktor je energetska politika i kvalitetne (odgovorne razvojne strategije koje iz nje proističu).

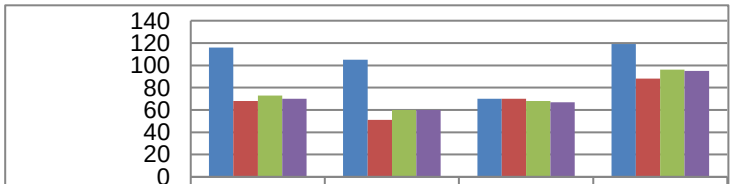
A. Srbija u zaostajanju ili laganom napretku

Na osnovu prikazanih podata o razultatima održivosti energetske politike (Energz Trillema index) za Srbiju, ne bi se moglo pouzdano reći ni da Srbija zostaje, ali ni to da vidljivo napreduje. Na slici 2. dat je pregled ocena ko(rangova) koji su energetici Srbije dodeljivani tokom perioda 2014-2019. Podaci o rangovima za 2014. izričito su nepovoljni, zbog učinka velikog poplavnog talasa.

Inače elektrosnabdevanje ni jednom trajno nije došlo u pitanje. Na slici se se vidi relativni napredak, odnosno da je tokom poslednje tri godine prosečni ukupni rang energetske trileme Srbije kreće oko 70. mesta, kao i da je prosek za energetsku sigurnost blizu 60, za energetsku dostupnost blizu 70, a da je najgori rang ekološke podobnosti energetike - iznad 90 mesta.

B. Srbija pred dugoročnim tranzicionim izazovima

Relativni razvoj problema loše energetske efikasnosti, odlično je obrađen u radu pod naslovom "Serbian Energy Efficiency problems" [11]autorske grupe Gvozdenac, Kljajić, Gvozdanac-Urošević. Pri tome je naznačeno da su ovi procesi u Srbiji u odnosu na EU bili divergentni, što pokazuju i podaci o utrošku električne energije po stanovniku, gde je Srbija jedna od predvodnika.



	Ukupi rang - "energ. trilema"	En. sigurnost	En. dostupnost	Ekol. održivost
Srbija 2014	116	105	70	119
Srbija 2017	68	51	70	88
Srbija 2018	73	60	68	96
Srbija 2019	70	60	67	95

Slika 2. Promene ranga Srbije, prema parametrima "energetske trileme" WEC od 2014- 2019

[9] Račić, A (2019): "Hemijske i biološke posledice NATO bombardovanja Srbije", Tehnika – Kvalitet IMS standardizacija i metrologija, 19/2019., str. 478

[10]Dobro je da među njim nije Srbija.

[11]„ D. Gvozdenac *, Kljajić M., Gvozdenac-Urošević B, (2014), "Serbian Energy Efficiency problems", *Thermal Science*: Year 2014, Vol. 18, No. 3, pp. 683-694

Isto se može reći i za ugljeničnu intenzivnost – osobađanje CO_2 po jedinici ostvarene energije.[12]
U okviru opšteg globalnog ranga (70.) relativno snažna pozicija energetske sigurnosti, koja je prethodno padala samo u kratkom roku (kriza i poplave). Dostupnost energije pogoršana je od 2010, usled novih cena gasa i propasti Južnog toka, dok je ekološka održivost, dimenzija koja je inicilajno najviše unapređena, pogoršana nakon 2010. Vidljiv je takođe pad ranga, odnosno incidentno nazadovanje ekonomske, sigurnosne i ekološke održivosti u vreme poplava 2014. kao i kasniji napredak ali samo do 2017. Nakon te godine evidentan je trend slabog nazadovanja ekološke i socijalne održivosti, dok je ukupna održivost relativno stabilna.

IV. ZAKLJUČNO: UNAPREĐENJE ENERGETSKE POLITIKE - U POKUŠAJU

A. Država

Srbija se trudi da unapredi energetsku politiku tako što sprovodi preporučene mere poboljšanja energetske efikasnosti. Ipak, uvođenje (minimalnih) taksi za energetsku efikasnost ostvareno je tokom leta 2019. na cenu svih energenata, verovatno je usledilo tako da se najmanje oseti po džepu građana, u avgustovskim računima za struju i gas, kao i po cenama goriva koje su na pumpama podignute za oko 2 dinara po litru. Ispostavilo se da je račun za struju od 350 kWh (valjda porodični minimum) mesečno uvećan za 15 dinara. Suštinski, u pitanju je namera da se bar nečim odgovori na primedbe (čitaj zehteve) iz pomenutog Izveštaja Evropske komisije uručenog vladi Srbije 31. maja, 2019. godine. Država i vlast bez obzira ko je trenutno vrši, moraju voditi mnogo odgovorniju dugoročnu energetsku politiku.

Energetska administracija Srbije na nivou državnih, kako vladinih tako i kontrolnih i drugih tela, morala bi da se formira i funkcioniše tako da bude dorasla teškom zadatku sprovođenja ne formalne već suštinske energetske tranzicije. U tom smislu neopgodno je da se formira i poseban skupštinski odbor za eneregetiku i klimatske promene, koji bi sačinjen na ekspertskom principu, prvenstveno sa ciljem edukacije i koncipiranja reformi u energetskom sektoru.

B. Kompanije

Još 2014. sačinjena je studija Strateško restrukturiranje poslovanja EPS- od strane Vlade i EPSa od koje trenutno ni traga ni glasa. Sindikat EPS-a ima karakter unutrašnje interesne organizacije poslovodstva i radnika sa ciljem da se stanje produži i trenutne koristi jedne i druge strukture uvećavaju. To pokauzuju sledeći podaci. On danas ima monopolski (nezakonit) status, jer od poslodavaca dobija godišnju pomoć od oko 800 miliona dinara (preko 7 miliona evra godišnje).[13] Tu spadaju i sredstva za lečenje i rekreaciju radnika, što takođe nije po zakonu, ali je to ušlo u kolektivni ugovor koji je potpisao ministar energetike 2015. godine. Sindikalisti EPS-a inače su isposlovali od nove strukture vlasti još 2000. koja se na kopovima Kolubare, retroaktivno priznavanje beneficiranog radnog staža za 90% zaposlenih, što je uneto u zakon, i „važi unazad“, sve od 1984.

Energetske kompanije u Srbiji treba da se restrukturiraju – to je nedvosmislen nalaz struke, koji na svoj način potvrđuju analize Fiskalnog saveta. Međutim, tranzicija energetike Srbije nije samo fiskalno pitanje, prevazilazi interese uravnoteženja državnog budžeta, ma koliko oni bili prioritetni. Restrukturianje treba da vodi ka efiaksnijem poslovanju, čistijoj energiji, tehnološki modernijoj energetici više energetske efikasnosti. Pri svemu tome od energetske tranzicije, kao i svuda u svetu, očekuje se i da bude socijalno pravična i društveno odgovorna. Upravo zbog toga naophodna je saradnja inženjera energetičara, ekonomista, u stručnim telima za restrukturiranje, zajedno sa predasavnicima, vlade, menadžmenta i sindikata u energetskim kompenijama.

C. Građani

Zračak nade pruža evidentno ubrzanje primene obnovljivih izvora (sunca i vetra), podstaknuto preuzetim međunarodnim obavezama i razvojnim strategijama naše zemlje [8]. Saglasno tome, glavni napori se moraju usmeriti na zamenu sve manje izdašnih rezervi lignita širom primenom geotermalne energije i energije biomase, kojima Srbija obiluje, kao i odlučnijim podsticanjem ekološki podobnijeg (posebno javnog električnog) saobraćaja.

Time će biti ostvarene trostruke koristi: smanjiće se uvozna zavisnost od sve dostupnijih, ali i skupljih naftno-gasnih goriva, poboljšaće se kvalitet domaće životne sredine i otvoriće se nova radna mesta za obrazovane mlade ljude. Takva politika zahteva tesnu saradnju sa građanima. Građani treba da shvate se da je takav scenario besmislen uz sadašnju “cenovnu” energetsku politiku i njoj odgovarajuću eneregstsku efikasnost.

D. Nova energetska politika i kultura

Radi omasovljenja nove energetske kulture, neophodna je ne samo širenje znanja, informacijske i ekološke kulture, već i bolja finansijska pismenost, pa i viši novo opšte kulture ljudi, kako materijalne, tako i duhovne. Novim načinom života, i održivim životnim stilovima, podstaknutim boljim znanjem i novim „zelenim“ tehnologijama, pre svega umrežavanjem u nove pametni eko-energetske sistema, ljudi će u svom životnom i radnom okruženju sami stvarati optimalne uslove, a neizbežne nevolje i teškoće lakše savladavati i prevazilaziti u hodu. Tzv. novi životni stilovi i navike obrazovanih i kulturnih ljudi, kao i njihov prirodniji i slobodniji način života, zahtevaće upotrebu daleko manje materijalnih resursa i energije, viši nivo utilizacije i reciklaže materijala, povoljniji bilans utroška i koriti energije uz manji utrošak neobnovljivih prirodnih resursa, i relativno brzo smanjenje negativnog ekološkog otiska. Ima još dosta argumenata za tezu da bi kvalitetna i dosledna energetska tranzicija i viši nivo energetske kulture, mogli da ponudi, kako svetu, tako i Srbiji i okruženju, daleko više nade za održivu budućnost.

REFERENCE

[1] J. B. Dušanić, *Ekonomija postmoderne,* CATENA MUNDI, Beograd, 2019

[12] Gvozdenac, (2016); Đukić, Batas(2018) str. 121-142

[13]Podaci su dobijeni iz Ekonomsko-socijalnog saveta, i važe za 2015. Od tada se ništa nije izmenilo u tom pogledu.

[2] Fiskalni savet, „Analiza poslovanja i preporuke za reformu i povećanje investicija EPSa“, 19. novembar 2019. godine, http://www.fiskalnisavet.rs/latinica/index.php, pristup 19. januar 2020.
[3] *Fossil Exit Strategy for Europe*, World Bioenergy Association, Stockholm, Sweden, (2016) www.worldbioenergy.org/sities/default/files/16114_Fossil Exit Strategy.pdf (pristup: 25. februar 2017.)
[4] D. Gvozdenac, M., Kljajić, B Gvozdenac-Urošević , (2014), “Serbian Energy Efficiency problems”, *Thermal Science*: Year 2014, Vol. 18, No. 3, pp. 683-694
[5] Huang, J., Fan, J., Furbo, S. *Potential Analysis of Solar District Heating in China*, ISES Solar World Congress, 29 Oct. 2 Nov, 2017., Abu Dhabi, UAE, Proceedings, pp. 310-321
[6] IAEA, *World Energy Outlook*, https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019, (pristup 1.II 2019)
[7] ICCT (International Council on Clean Transportation) (2019) *Electric vehicle capitals: showing the path to a mainstream market*, Briefing, November 2019., p.15, https://theicct.org/sites/defoult/files/publications/EV_capitals_2018_20181121.pdf (pristup: 30. januar 2020.)
[8] Nacionalna strategija održivog korišćenja prirodnih resursa i dobara *"Službeniglasnik RS", br.33/2012 od 15.4.2012. godine*
[9] P. Đukić, *Bespućaekonomskepolitike- tranzicija, institucije, razvoj*, Tehnonološko-metalurškifakultet, Beograd, 2019
[10] Đukić, P., Bjelić, I, B., „Srbija pred izazovima tranzicije energetskog sektora“, *Ekonomski vidici*, 3-4, 2018, str. 121-142,
[11] Đukić, P., Đukanović, S., "Budućnost energetike Srbije: u znaku energetskih tržišta, napuštanja fosilnih goriva I energetske efikasnosti", časopis *Energetika - ekologija - ekonomija*, savetovanje Energetika 2017, br.1-2. str. 37-45
[12] P., Đukić, S. Đukanović, *Održivi razvoj - društveno ekonomski i ekološki aspekti*, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu 2018
[13] M. Milošević, „Agresija – EPS”, *Energija, Ekonomija, Ekologija*, 2/1999., str. 11-14
[14] R. Mulić , “Terocid Milosrdnog anđela”, *Energija, Ekonomija, Ekologija*, 1-2/2000., str. 279-283
[15] M. Petrović, *Sunčeva trpeza – vodič ka biodiverzietu Srbije i slobodnoj ishrani samoniklim biljem*, Srpska akademija nauka i umetnosti Beograd, Univerzitet u Kragujevcu. 2010
[16] Program ostvarivanja strategije razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. za period 2017. do 2023. godine, Predlog Programa2017.
[17] A. Račić, *NATO agresija traje*, Svetigora, Cetinje, 2018
[18] A Račić, “Hemijske i biološke posledice NATO bombardovanja Srbije”, Tehnika – Kvalitet IMS standardizacija i metrologija, 19/2019., str. 478-481
[19] M. Stojanović-Milosavljević, *Pravci kretanja polihlorovanih bifenila (piralena) u vodama nakon NATO bombardovanja*, doktorska disertacija, Univezitet u Beogradu, Biološki fakultet, 128 str. 2002. Internet, https://www.scribd.com/doc/248015846/Pravci-Kretanja-Polihlorovanih-Bifenila-Piralena-u-Vodama-Posle-NATO-Bombardovanja-Doktorat-Miljane-Stojanovi%C4%87-Milosavljevi%C4%87
[20] *Strategija razvoja energetike Republike Srbije* do 2025. sa projekcijama do 2030. godine, „Službeni glasnik RS” br. 101/2015
[21] WB *Energy intensity level of primary energy*, https://data.worldbank.org/indicator/EG.EGY.PRIM.PP.KD, (2019)
[22] WEC (World EnergyTrilemma Index 2019, FullReport, https://www.worldenergy.org/publications/entry/world-energy-trilemma-index-2019,
[23] WEC , https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Issues_Monitor_2019_-_European_DSOs_and_TSOs.pdf
[24] WEC , Pathway to a Cleaner Energy Future https://www.wecenergygroup.com/csr/climate-report.pdf, pristup 1.febrauar, 2020.

AUTHORS

Petar Đukić – redovni profesor, Tehnološko-metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu
Slaviđa Đukanović profesor**, Visoka poslovna škola strukovnih studija, Novi Sad** –.
Correspondence Author – Petar Đukić, djukic@tmf,bg.ac.rs, djukic954@gmail.com, contact number 064 8591446

Metode energetsko – klimatskog planiranja u državama Zapadnog balkana: najnovija dostignuća iz Republike Srbije i Bosne i Hercegovine

Ilija Batas – Bjelić[*], Nikola Rajaković[**]

[*] Institut tehničkih nauka SANU
[**]Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu

Abstrakt- Uprkos činjenici da se nalaze u neposrednom susedstvu Evropske Unije i da imaju otvoren pristup najnovijim tehnologijama i instrumentima za sprovođenje energetskih politika, zemlje Zapadnog balkana zaostaju u energetskoj tranziciji. Evropska Unija je aktivirala noviimpuls u sprovođenju energetske tranzicije kroz Evropski zeleni plan, čiji se uticaj na Zapadni Balkan prenosi u vidu nacionalnih energetsko-klimatskih planova čija je izrada u toku. Doprinosi najnovijih dostignuća u Republici Srbiji (npr. nedavno predstavljena Niskougljenična strategija Republike Srbije sa akcionim planom) i Bosni i Hercegovini (aukcije za fotonaponske elektrane) energetskoj tranziciji, biće analizirani korišćenjem tehnike optimizacije na bazi simulacija i pristupom koji se bazira na integraciji sektora. Dodatno, predstaviće se metode modeliranja koje polaze odintegralne procenekojom se obuhvataju međusobni uticaji sistema klima – energija. Osnovna svrha ovih istraživanja je da se donosiocima odluka na Zapadnom balkanu omogući pristup najnovijim znanjima iz održivih energetskih sistema, a građanima više koristi od usvajanja strateških dokumenatai pravednije energetske tranzicije.

Ključne reči- Evropski zeleni dogovor, energetska tranzicija, sprezanje sektora, Zapadni Balkan, energetska strategija

I. UVOD

Naučno dokazane klimatske promene, poznate i vidljive na Zapadnom Balkanu (ZB), obesmišljavaju dalji ekonomski razvoj na način i prema pretpostavkama od pre 100 godina. Stoga se pristupilo pripremama za implementaciju nacionalnih energetsko klimatskih planova (NECP)[1], kao glavnom koraku energetskih tranzicija u zemljama ZB, a kojim su obuhvaćene teme:

1) Energetska efikasnost,
2) Obnovljivi izvori energije,
3) Emisije gasova sa efektom staklene bašte,
4) Smanjenje emisija,
5) Energetsko povezivanje,
6) Istraživanje i razvoj.

Zemlje ZB pokazuju različito interesovanje i metode pripreme NECP dokumenata. Priprema NECP dokumenata je preporučena od strane Energetske zajednice (EnC) u decembru 2017. godine, i praćena je uputstvima[2], ali nije bilo previše napretka[3] tokom 2018. i 2019.godine. Napredak je ostvaren u imenovanju timova u nekim državama, mada retkost je da je nakon ovog koraka intenzivan rad nastavljan na tehničim detaljima koji su sastavni deo dokumenta NECP. U pripremi NECP dokumenata najdalje se otišlo u Severnoj Makedoniji, zatim Crnoj Gori, Bosni i Hercegovini (BIH), ali je u ostalim državama ZB ostvaren vrlo mali napredak. Severna Makedonija radi na novoj energetskoj strategiji sa elementima strukture NECP dokumenta[4]. EnC je tokom 2019. godine organizovala radionicu na temu metoda izrade NECP dokumentata, ali opet bez značajnog napretka, što za rezultat ima da u 2020 godine nema nijednog NECP dokumenta u državama ZB, koji bi obuhvatio period 2021-2030.

A. Stari nesporazumi

Direktiva 2001/80/EC stupila je na snagu u EnC 1. Januara2018., a nacrt nacionalnog akcionog plana za smanjenje emisija (NERP) u Republici Srbiji (RS) bio je pripremljen i prihvaćen od EnC još 2016 godine, međutim usvojen je tek Januara 2020.godine, nakon spora koji je EnC pokrenula protiv Republike Srbije[5], i ozbiljnih zabrinutosti u javnosti zbog zagađenja vazduha u gradovima Republike Srbije. Drugi spor koji je EnC pokrenula protiv RS i BiH tiče se državne pomoći u sektoru proizvodnje lignita[6]. Pored ovoga povećavaju se pritisci na odlaganje energetske tranzicije u sektoru proizvodnje električne energije, posebno imajući u vidu da je u susednoj Crnoj Gori uveden sistem ograničavanja i trgovanja emisijama [1] u visini od 24€/tCO_2 koje plaća zagađivač. Ovo je

[1] https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-strategy-and-energy-union/national-energy-climate-plans
[2] https://energy-community.org/dam/jcr:c9886332-a1f5-43ee-b46c-31c637aedfa6/PG_03_2018_ECS_NECP.pdf
[3] https://balkangreenenergynews.com/2018-tracks-progress-for-sustainability-in-energy-community-contracting-parties/
[4] https://www.energy-community.org/news/Energy-Community-News/2019/011/12.html
[5] https://energy-community.org/news/Energy-Community-News/2020/01/15.html
[6] https://energy-community.org/news/Energy-Community-News/2020/02/07.html

signal dodatnog pritiska koji se očekuje na BIH i RS u smislu uvođenja sličnih mehanizama kako bi se sprečilo da proizvodnja električne energije iz lignita bude preneta u susedne zemlje kroz bilateralne ugovore, usled izbegavanja oporezivanja emisija. U međuvremenu, Evropska Unija (EU) je odlučna da postane prvi klimatski neutralan kontinent, što uključuje i zemlje ZB, do 2050 godine, što je veoma vidljivo iz nedavnog prezentovanja i mogućeg usvajanja obavezujućeg Evropskog zelenog dogovora[7].

B. Zaostajanje za EU regulativom

Skorašnje strateške studije energetike sa značajnim udelom obnovljivih izvora energije uključuju BiH i RS [2], [3], i tako doprinose vidljivosti zaostajanja energetske tranzicije u zemljama ZB. Lični utisci sagovornika[8] po pitanju statusa energetske tranzicije govore o velikim prazninama ostavljenim: u administrativnom okviru, procedurama za priljučenje obnovljivih izvora energijena mrežu, nakon što su se podsticajne kvote u RS popunjene krajem 2019 godine. Ove podsticajne mere, uvedene su 2010 godine, ali je za realizaciju projekata vetroelektrana bilo potrebno nepunih 10 godina, dok su fotonaponske elektrane izgrađene još 2018 godine sa značajnim finansijskim podsticajima jer su u međuvremenu cene opreme značajno umanjene. Pa ipak, finansijski podsticaji za obnovljive izvore energije u BiH i RS manji su nego za sektor proizvodnje lignite [4]. Sadašnji nivo finansijskih podsticaja za obnovljive izvore energije u RS, koji se prikuplja od domaćinstava, ne obezbeđuje potpunu likvidnost isplata troškova podsticanja, tako da se dovodi u pitanje njegova održivost i zatvara se prostor za njegovu dalju primenu nakon što je instalirano 500MW vetro i 10MW fotonaponskih elektrana.

II. METODE IZRADE NECP DOKUMENATA

Dosadašnja priprema NECP dokumenata u EU koja se prepuručuje za ZB odstrane NewClimate instituta obuhvata alate:

1) TIMES.
2) PRIMES.
3) POTEnCIA.
4) LEAP.
5) PROSPECTS+

Metoda na kojoj se može zasnivati priprema NECP dokumenta za RS može se bazirati na preporučenom alatu TIMES[9]. Druga opcija bi mogla biti alat PRIMES, koji je nedavno korišćen u izradi dokumenta Niskougljenična strategija Republike Srbije sa akcionim planom[10] (LCSAPS). Takođe, treba ukazati da je alat LEAP bio korišćen u pripremi dokumenta Strategija razvoja energetike Republike Srbije do 2025. godine sa projekcijama do 2030. godine („Službeni glasnik RS“, broj 101/2015)[11]. Alat POTEnCIA,[5],verovatno neće biti korišćen od strane Ministarstva rudarstva i energetike RS.

Pored značajnih prednosti i iskustva u korišćenju navedenih alata u zemljama ZB, njihov nedostatak je u tome što su ograničeni čvrstom podelom na sektore, i što nisu dovoljno fleksibilni prema ključnim tehnologijama za energetsku tranziciju, posebno varijabilnim obnovljivim izvorima energije, električnim vozilima, toplotnim pumpama i uopšte tamo gde postoje dinamike na satnom nivou.

Spregnuti alati poput OSeMOSYS [6], TIMES-Dispaset [7] and EnergyPLAN-GENOPT,[8], imaju prednosti za pripremanje NECP dokumenata, jer imaju mogućnost simulacija koje su na nivou sata.Ovi spregnuti alati, omogućavaju modeliranje svih sektora i tehnologija koji su ključni za energetsku tranziciju, ali što je najvažnije, omogućavaju sprezanje sektora i simulaciju primene mere koje su po sebi korisne[12]. Sam princip Pametnih energetskih Sistema, [9], dovoljan je da se omoguće potpuno održivi energetski sistemi (100%) uključujući satne simulacije, pored elektroenergetskog, sektore grejanja/hlađenja i transporta. Na ovaj način moguće je ispitati mnoštvo izvodljivih scenarija tako da se nađe optimalni miks, a da se ne dođe do slučajeva suboptimalnosti.Poznato je da se hidroenergetski kapaciteti BiH i RS mogu povećati, tako da je moguće lakše uvećati udeo solarne i energije vetra pod uslovima:

1) Dostupnosti prirodnih resursa i mrežnih ograničenja.
2) Raspoloživosti upravljive potrošnje i skladištenja energije.
3) Konverzije električne u toplotnu energiju.

Potrebno je energetski konzum posmatrati u dva odvojena pravca

1) Snažna elektrifikacija sektora grejanja/hlađenja i transporta
2) Uštede primenom mera energetske efikasnosti

Optimizacija troškova takvih Pametnih energetskih sistema proizilazi iz sprezanja sektora, [10]–[12], jer je potvrđen sinergetski efekat kod zadovoljavanja višestrukih ciljeva energetske politike. Stoga se ovaj pristup preporučuje za pripremu dokumenata NECP, jer ovi dokumenti obuhvataju sve sektore, pa tako sinergetski efekti mogu biti najizraženiji.

A. Metode modeliranja integralnom procenom

Dalja perspektiva posmatranja pojedinačnih nacionalnih energetskih sistema i metoda kojima se oni planiraju treba da uvaži i postojanje metoda modeliranja sa integralnom procenom (IAM) tako da se uključe međuzavisnosti između različitih sistema uključujući klimatski sistem, koje se koriste za potrebe Međuvladinog panela o klimatskim promenama. Ove IAM metode omogućavaju modelovanje dinamike razvoja sistema pod ograničenjima životne sredine i socio-ekonomskim ograničenjima. Ova sistemska dinamika uočljiva je kod međuzavisnosti ekonomskog sistema, populacije, korišćenja zemljišta, vode, energije, resursa i materijala na dužim

[7] https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en

[8] Prezentacija: Barriers to market-based deployment of renewables in the WB6. Results of online questionnaire and interviews, 12/11/2019, Vienna

[9] https://balkangreenenergynews.com/serbia-to-use-sems-tool-for-energy-planning/

[10] https://www.ekologija.gov.rs/wp-content/uploads/javne_rasprave/Strategija%20niskougljeni%C4%8Dnog%20razvoja%20sa%20akcionim%20planom_za%20javnu%20raspravu.pdf

[11] https://www.mre.gov.rs/doc/efikasnost-izvori/STRATEGIJA%20RAZVOJA%20ENERGETIKE%20REPUBLIKE%20SRBIJE%20DO%202025%20GODINE%20SA%20PROJ.doc

[12] "Publication - Supporting the Energy Transition in the Western Balkans."Accessed January 15, 2020. https://www.agora-energiewende.de/en/publications/supporting-the-energy-transition-in-the-western-balkans/.

vremenskim intervalima i šireg geografskog obuhvata,[13]. Metode IAM su uznapredovale od svojih začetaka[14], [15] i prvih kritika, [16], tako da koriste više ulaznih promenljivih i opisuju više međuzavisnosti i dvosmernih povratnih spregaizmeđu sistema. Sve IAM metode u praksi se zasnivaju se na alatima za simulaciju svih kontinenata, tako da se na Zemlji ne dostigne ili prekorači povećanje temperature od 2°C. Jedan takav alat, MEDEAS, realizovan je u programskom okruženju Python, tako da omogućava sprezanje sa sofisticiranim modelima koji se primenjuju u energetskim sistemima, iako je već aktuelni model veoma razvijen,[17]. Ovo sprezanje dodatno omogućava istraživanje satnih efekata varijabilnosti, koji su najznačajniji za energetsku tranziciju što do sad nije bilo moguće,[18].

B. *Unapređenje metoda sa integralnom procenom*

Metode sa integralnom procenom mogu se unaprediti istraživanjima varijabilnosti obnovljivih izvora energije kroz satne simulacije. Međutim, istraživanja još manjih vremenskih intervala kod sveobuhvatne analize varijabilnosti proizvodnje iz obnovljivih izvora energije nameće se kao prirodan nastavak u ovom pravcu – dinamičko tarifiranje sa odzivom potrošnje.

U principu danas se razmatra nekoliko opcija za balansiranje varijabilne proizvodnje električne energije iz obnovljivih izvora (vetar isunce):

1) Velika energetska skladišta kao što su reverzibilne hidroelektrane, velika podzemna skladišta toplote, skladišta komprimovanog vazduha i skladišta tečnog vodonika – integracija sektora,
2) Jačanje interkonektivnih dalekovodnih veza koje omogućavaju da se iskoriste efekti geografske raspodeljenosti intenziteta solarnog zračenja iintenziteta vetra,
3) Odziv potrošnje za kraće vremenske horizonte do 6 časova,
4) Fleksibilizacija postojeće termoenergetske proizvodnje (fleksibilne gasne elektrane ifleksibilnije elektrane na ugalj),
5) Integracije tržišta električne energije do pan-evropskog jedinstvenog tržišta koje može značajno da pomogne u ublažavanju neravnomernosti u proizvodnji ipotrošnjienergije,
6) Operativno vođenje sistema (optimalna eksploatacija) što bliža realnom vremenu (umesto vremenskih intervalaod 1 h prelazi se na interval od 15 min pa čak i 5 min kako bi se koncept dinamičkog tarifiranja mogao uspešnije primeniti).

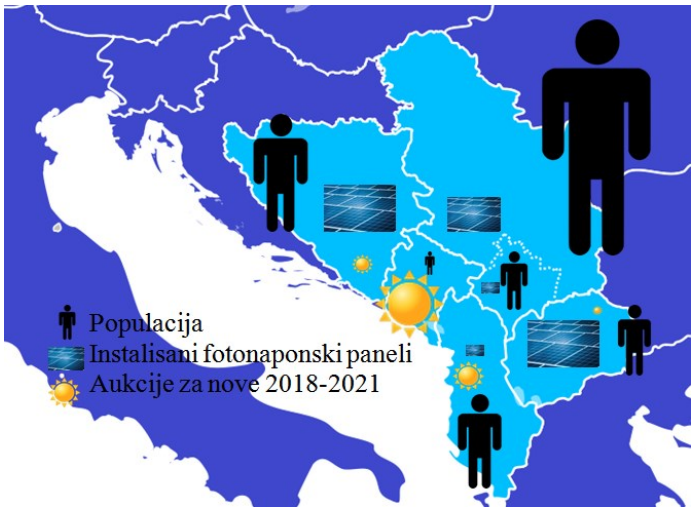
III. REZULTATI ISTRAŽIVANJA

Republika Srbija i Bosna i Hercegovina, zaostaju za zemljama ZB po pitanju energetske tranzicije u sledećim aspektima:

1) Instaliranim kapacitetima fotonaponskih panela i aukcijama za nove kapacitete.
2) Neto merenjima i neto obračunavanjem potrošnje.
3) Demokratizaciji energije kroz energetske zadruge.
4) Pripremanju dokumenata NECP i metodama za energetsko-klimatsko planiranje.

A. *Instalirani fotonaponski paneli i aukcije za nove.*

Značajnije zaostajanje Republike Srbije za zemljama regiona ZB po pitanju instaliranih fotonaponsikih panela i aukcijama za nove vidljivo je na Slici 1.



Slika 1 Zaostajanje RS i BiH po pitanju instaliranih fotonaponsikih panela i aukcijama za nove

Do skora je i Bosna i Hercegovina zaostajala po pitanju aukcija za nove fotonaponske panele, ali je u međuvremenu situacija promenjena,[19]. Još značajnije zaostajanje RS vidljivo je imajući u vidu populaciju i bruto nacionalni proizvod (nije prikazanona slici). U pogledu energetskih strategija optimizam postoji, ali nije potkrepljen finansijskom osnovom, pa u tom delu ili nema rezultata ili se finansiranje energetske tranzicije prebacuje sa državnog na privatni sektor[13]. Ovo je rezultat efektivnosti korišćenja sredstava podsticaja do sada, imajući u vidu dasu troškovi izgradnje obnovljivih izvora znatno smanjeni. Ako se državni sektor potpuno isključi iz finansiranja energetske tranzicije, postavlja se pitanje optimalnosti iskorišćenja sredstava od strane privatnog sektora, imajući u vidu do sada prikazanu težnju za maksimizacijom profita na uštrb zaštite životne sredine. Stoga pažljivo pripremljene aukcije deluju kao mogući instrument podsticanja obnovljivih izvora energije,ali nažalost još nisu prepoznate uRepublici Srbiji.

Aukcije su se dogodile u Severnoj Makedoniji za oko 100MWna napuštenim površinskim kopovima[14]. Republika Srbija je još ranije krenula sa pripremom veće fotonaponske elektrane na lokaciji rudnika termoelektrane u Kostolcu, ali iako je planirana investicija skromna (u poređenju sa novim blokom B3 termoelektrane Kostolac), projekat kasni, zbog finansiranja i nemogućnosti javnog preduzeća da finansije usmerava u razvoj sopstvenih kapaciteta. Republika Srbija ne zaostaje suviše kada su u pitanju istraživanja solarne energetike, jer su u[20]ispitani potencijali za instalaciju fotonaponskih panela na napuštenim površinskim kopovima blizu Kostolca. Posmatrajući snagu istaliranih kapaciteta u (MW) u susednim članicama EU, BiH (19) i RS (13), zaostaju još značajnije jer Republika Hrvatska (61),

[13] http://www.klimatskastrategija.eu/wp-content/uploads/2019/12/Low-Carbon-Development-Strategy-with-Action-plan_eng.pdf

[14] https://e-nabavki.gov.mk/PublicAccess/home.aspx#/dossie/19a0a528-f257-46a7-9603-d67f8eed3f96/1

Bugarska (1.036), Rumunija (1.377), Mađarska (665), Slovenija (258)iGrčka (2.652). Ovo ima za rezultat da kompanije koje se bave proizvodnjom fotonaponskih panela svesno zaobilaze BiH i RS, locirajući proizvodnju u Severnoj Makedonji[15], Hrvatskoj[16],[17],Kosovu*[18] što obećava i dalje zaostajanje. Ovo zaostajanje je veće imajući u vidu da je odnedavno Grčka planirala aukcije za dodatnih 3GW fotonaponskih sistema na napuštenim ugljenokopima[19]. Sve navedeno predstavlja prepreku za naučnu saradnju BiH i RSsa članicama EU na polju fotonaponskih sistema, poput saradnje Republike Hrvatske i Savezne Republike Nemačke[20].

B. Neto merenja i neto obračunavanje potrošnje

Neto merenje i neto obračunavanje potrošnje još nema zakonsku osnovu u vidu pravilnika. Tim pravilnicima bi i fizička (pravna već jesu) lica u BiH i RS bila omogućena da sklapaju ugovore o otkupu viška električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora energije registrovanim snabdevačima, i tako obezbede ekonomsku izvodljivost projekata bez mera podsticaja od strane države. Tako i energetske zadruge mogu da imaju bilateralne ugovore sa snabdevačima kojima se preuzimaju nepotrošeni viškovi električne energije. Međutim, građani (fizička lica) još uvek nisu definisani kao zakonski učesnik u trgovini električnom energijom. Dok građani čekaju donošenje ovih pravilnika o sopstvenoj potrošnji i neto merenjima, Severna Makedonija planira da usvoji Zakon o neto merenjima, a koji je već usvojen u Albaniji[21].

C. Demokratizacija energije i energetske zadruge

Pored državnih institucija i preduzeća, građani i privatni sektor preduzimaju inicijative za razvoj projekata korišćenjem inovativnih finansijskih i poslovnih modela. Jedan od finansijskih modela koji je u postsocijalističkom ambijentu prvi prihvaćen od građana u Republici Hrvatskoj, a zatim i u BiH je grupno finansiranje, a tek odnedavno je prva energetska zadruga sa ovakvim finansijskim modelom registrovana u Šapcu. Interes građana za energetskim zadrugama postoji i u drugim državama ZB.Sa druge strane privatni sektor traži rešenja za smanjenje troškova snabdevanja električnom energijom instaliranjem sopstvene proizvodnje iz fotonaponskih panela i kroz bilateralne ugovore sa snabdevačima.

Teškoće sa osnivanjem i funkcionisanjem energetskih zadruga u postsocijalističkom ambijentu ZB prikazane su u[22], napominjući da tokom Januara 2019 nije bilo ovih projekata u RS i BiH. Međutim, sredinom godine najpre je organizovana kampanja grupnog finansiranja projekta "Solarna Pećka"[21] u BiH, da bi tek u Agustu 2019 u Šapcu bila osnovana prva energetska zadruga u RS "Sunčani krovovi".

D. Metode klimatsko energetskog planiranja

Izvan državnih institucija, kapacitet za klimatsko energetsko planiranja radi pripreme NECP dokumenata postoji u skoro svim zemljama ZB. Svi spomenuti osnovni alati načelno su dovoljni za pokrivanje pripreme NECP dokumenata, međutim uočeni su nedostaci u pokrivanju sledećih aspekata:

1) Ostalih (neenergetskih) sektora sa značajnim emisijama
2) Svih gasova sa efektima staklene bašte,
3) Svih ciljeva smanjenja emisija sa efektma staklene bašte.

Takođe je uočena potreba za korišćenjem osnovih alata u sprezi sa optimizationim modelima, a jedino LEAP pokriva dovoljno široko neenergetske sektore[22]. U BiH je formiran tim za izradu NECP dokumenta, dok u RS on još uvek nije poznat. Ipak, za očekivati je da će se započeti proces pripremanja NECP dokumenata intenzivirati tokom 2020 godine [23].

IV. ZAKLJUČAK

Primena novih tehnologija obnovljivih izvora energije i tehnologija energetske efikasnosti u zemljama ZB pod striktnom je kontrolom države, bez vidljivih pozitivnih efekata za društvo.Postojećim načinom primene građani su dovedeni pred svršen čin jer praktično moraju da prihvate veće troškove radi smanjenja zagađenja zbog čuvanja zdravlja stanovništva, umesto da pravednom energetskom tranzicijom dobiju jasne odgovornosti za sve moguće scenarije energetske politike.Moguću ulogu u otklanjanju zaostajanja u energetskoj tranziciji imaće energetske zadruge, makar u nekim gradovima.

Sem Severne Makedonije, niti jedna od država ZB neće biti spremna za skoro uključivanje u Energetsku Uniju, jer na osnovu do sada poznatih informacija, teško je očekivati da će NECP dokumenti, koji se odnose na period 2021-2030, biti pripremljeni i usvojeni tokom 2020 godine.. Treba očekivati da će jedinstvena metoda (pa čak i jedinstven alat) za pripremu NECP dokumenata biti prihvaćena među državama ZB. Sa druge strane za očekivati je da ova metoda bude na neki način prilagođena do sada korišćenim metodama od strane članica EU.

Države ZB sa najvećim brojem stanovnika BiH i RS zaostaju u energetskoj tranziciji na ZB jer nisu uspešnousvojile njene osnovne principe. Stoga, nadalje treba očekivati sporove sa EnC, a zatim i uvođenje taksi na emisije CO_2.

V. ZAHVALNOST

Autori se zahvaljuju EASMEna finansijskoj podrški za relizaciju priojekta LOCOMOTION projekatbr. 821105. Izrečeni stavovi i zaključci isključiva su odgovornost autora, i ne predstavljaju stavove niti zaključke EASME.

[15] http://www.camel-solar.com/cs/solar-systems-about/
[16] https://g-solar.eu/contact/
[17] https://solvis.hr/en/
[18] https://www.jahasolar.com/
[19] https://www.energia.gr/article/162650/strofh-stis-ape-nees-aithseis-gia-fv-1500-mw-sta-exantlhmena-lignitika-pedia-apo-thn-deh-ananeosimes
[20] https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/news/2019/german-croatian-cooperation-in-photovoltaics.html
[21] https://balkangreenenergynews.com/rs/u-crowdfunding-kampanji-solarna-pecka-prikupljeno-6-687-dolara/
[22] "Energy and climate modelling tools in the Western Balkans experience from ECRAN and RIPAP", Agnes Kelemen, Klimapolitika Ltd.

TITLE: NATIONAL ENERGY AND CLIMATE PLANNING APPROACH FOR THE WESTERN BALKANS: NEWEST ACHIEVEMENTS FROM REPUBLIC OF SERBIA AND BOSNIA AND HERZEGOVINA

Abstract: Just in the immediate neighborhood of European Union (EU), Western Balkan (WB) countries are lagging behind in the energy transition regardless technological advances and policy instruments available. EU recently created a momentum for the energy transition acceleration with the European Green Deal, which is forwarded to the WB through the Energy Community secretariat and in general, the response in the form of National Energy and Climate Plans (NECPs) is expected in the short to midterm. Recently presented the new Republic of Serbia's Low Carbon Development Strategy with Action plan (LCDSA) will be analyzed, commented and improvements suggested for the acceleration of the energy transition, based on the newest findings from the simulation-based optimization techniques using the sectors coupling approach. Furthermore, integrated assessment modeling techniques (IAM), exploring the climate and energy cross impacts with the more details will be included. The purpose of the research is to provide the decision makers in the WB with the best available insights regarding sustainable energy systems, and citizens of the WB with to benefit from adoption of these strategies.

VI. LITERATURA

[1] "Montenegro introduces cap and trade scheme for major CO2 emitters," *Reuters*, 24-Feb-2020.
[2] M. Victoria, K. Zhu, T. Brown, G. B. Andresen, and M. Greiner, "The role of photovoltaics in a sustainable European energy system under variable CO2 emissions targets, transmission capacities, and costs assumptions," *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. n/a, no. n/a, doi: 10.1002/pip.3198.
[3] D. Bogdanov *et al.*, "Radical transformation pathway towards sustainable electricity via evolutionary steps," *Nat Commun*, vol. 10, no. 1, pp. 1–16, Mar. 2019, doi: 10.1038/s41467-019-08855-1.
[4] "Rocking the Boat: What is Keeping the Energy Community's Coal Sector Afloat?" Energy Community Secretariat, Sep-2019.
[5] L. Mantzos *et al.*, "POTEnCIA model description - version 0.9," European Commission, EUR - Scientific and Technical Research Reports, 2016.
[6] M. Welsch *et al.*, "Incorporating flexibility requirements into long-term energy system models – A case study on high levels of renewable electricity penetration in Ireland," *Applied Energy*, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.08.072.
[7] S. Quoilin, W. Nijs, I. H. Gonzalez, A. Zucker, and C. Thiel, "Evaluation of simplified flexibility evaluation tools using a unit commitment model," presented at the 2015 12th International Conference on the European Energy Market (EEM), 2015, pp. 1–5, doi: 10.1109/eem.2015.7216757.
[8] I. Batas Bjelić and N. Rajaković, "Simulation-based optimization of sustainable national energy systems," *Energy*, vol. 91, pp. 1087–1098, 2015, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.09.006.
[9] B. V. Mathiesen *et al.*, "Smart Energy Systems for coherent 100% renewable energy and transport solutions," *Applied Energy*, vol. 145, pp. 139–154, 2015, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.01.075.
[10] Ilija Batas Bjelic, Nikola Rajakovic, "Advantages of Sector Coupling to the Sustainable Energy Systems Planning," presented at the SDEWES2019.0596, Dubrovnik, 2019, pp. 563–563.
[11] H. C. Gils, S. Simon, and R. Soria, "100% Renewable Energy Supply for Brazil—The Role of Sector Coupling and Regional Development," *Energies*, vol. 10, no. 11, p. 1859, 2017.
[12] T. Brown, D. Schlachtberger, A. Kies, S. Schramm, and M. Greiner, "Synergies of sector coupling and transmission reinforcement in a cost-optimised, highly renewable European energy system," *Energy*, vol. 160, pp. 720–739, Oct. 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.06.222.
[13] I. de Blas, L. J. Miguel, and I. Capellán-Pérez, "Modelling of sectoral energy demand through energy intensities in MEDEAS integrated assessment model," *Energy Strategy Reviews*, vol. 26, p. 100419, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.esr.2019.100419.
[14] D. H. Meadows, *Limits to Growth*. New American Library Incorporated, 1974.
[15] M. Mesarovic, E. Pestel, and N. D. Karunaratne, "Mankind at the Turning Point – The Second Report of the Club of Rome," *Economic Analysis and Policy*, vol. 6, no. 3, pp. 69–73, Mar. 1976, doi: 10.1016/S0313-5926(76)50005-1.
[16] H. Apel, "Criticism of the Mesarovic-Pestel Model and a Possible Alternative," in *Systems Theory in the Social Sciences: Stochastic and Control Systems Pattern Recognition Fuzzy Analysis Simulation Behavioral Models*, H. Bossel, S. Klaczko, and N. Müller, Eds. Basel: Birkhäuser Basel, 1976, pp. 374–385.
[17] G. Martelloni, F. Di Patti, I. Perissi, S. Falsini, and U. Bardi, "MEDEAS-World model calibration for the study of the energy transition," *arXiv:1906.01997 [physics]*, Jun. 2019.
[18] I. Capellán Pérez, "Development and application of environmental integrated assessment modelling towards sustainability," Jun. 2016, doi: http://hdl.handle.net/10810/19438.
[19] "EFT wants concession in BiH for 60 MW solar power plant," *Balkan Green Energy News*, 03-Feb-2020. [Online]. Available: https://balkangreenenergynews.com/eft-wants-concession-in-bih-for-60-mw-solar-power-plant/. [Accessed: 12-Feb-2020].
[20] D. Doljak, D. Popović, and D. Kuzmanović, "Photovoltaic potential of the City of Požarevac," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 73, pp. 460–467, 2017, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.154.
[21] "Net metering introduced in Albania," *pv magazine International*. [Online]. Available: https://www.pv-magazine.com/2019/06/21/net-metering-introduced-in-albania/. [Accessed: 30-Jul-2019].
[22] I. Capellán-Pérez, N. Johanisova, J. Young, and C. Kunze, "Is community energy really non-existent in post-socialist Europe? Examining recent trends in 16 countries," *Energy Research & Social Science*, vol. 61, p. 101348, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.erss.2019.101348.
[23] Thomas Day, Sofia Gonzales- Zuñiga, Maria Jose de Villafranca Casas, Swithin Lui, Silke Mooldijk, "Consolidation of climate planning processes in the Energy Community Contracting Parties," *NewClimate Institute*, 18-Jun-2019. [Online]. Available: https://newclimate.org/2019/06/18/consolidation-of-climate-planning-processes-in-the-energy-community-contracting-parties/. [Accessed: 25-Feb-2020].

AUTHORS

First Author – Ilija Batas Bjelić, naučni saradnik, Institut tehničkih nauka SANU, Knez Mihailova 35/IV, 11000 Beograd, Republika Srbija ilija.batas-bjelic@itn.sanu.ac.rs
Second Author – Nikola Rajaković, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Republika Srbija, rajakovic@etf.rs

Correspondence Author – Ilija Batas Bjelić, ilija.batas@gmail.com , +381 11 2636 994

Analiza kapaciteta i uslova izgradnje fotonaponskih sistema na krovovima školskih objekata u Srbiji

Analysis of capacities and conditions of photovoltaic systems construction on the school buildings roofs in Serbia

Iva Batić*, Željko Đurišić*

* Elektrotehnički fakultet, Univerziteta u Beogradu

Apstract- Školski objekti i pripadajuće fiskulturene sale predstavljaju značajan potencijal za izgradnju fotonaponskih (FN) panela, koji bi bili integrisani u krovove ovih objekata. S obzirom da su krovne površine pasivne, izgradnja fotonaponskih sistema ne narušava funkcionalnost objekta, niti na bilo koji način negativno utiče na okolinu. Instalacijom fotonaponskih sistema na krovovima školskih objekata u maksimalnoj mogućoj meri se približavaju proizvodnja i potrošnja električne energije, pa ovakvi sistemi obezbeđuju značajno smanjenje gubitaka električne energije u distributivnoj i prenosnoj mreži. Osim lokalne proizvodnje električne energije, izgradnjom fotonaponskih sistema na krovovima školskih objekata postiže se i edukativan efekat. Inastalacijom merno-akvizicionog sistema koji bi merne podatke o parametrima proizvodnje fotonaponske elektrane i potrošnje električne energije škole uključio u školske laboratorije, đacima bi se približila tehnologija, kao i sagledavanje mogućnosti podmirivanja električne energije iz ovog osnovnog obnovljivog izvora energije. U ovom radu prikazani su rezultati procena kapacitata raspoloživih krovnih površina školskih objekata u Srbiji za instalaciju fotonaponskih panela. Za svaku kategoriju školskog objekta izvršena je procena moguće godišnje proizvodnje po jedinici prosečne krovne površine. Sumiranjem svih rezultata, date su procene moguće instalisane snage i godišnje proizvodnje električne energije za različite scenarije.

Ključne reči - školski objekti, fiskulturne sale, krovne površine, fotonaponski sistemi, instalisana snaga

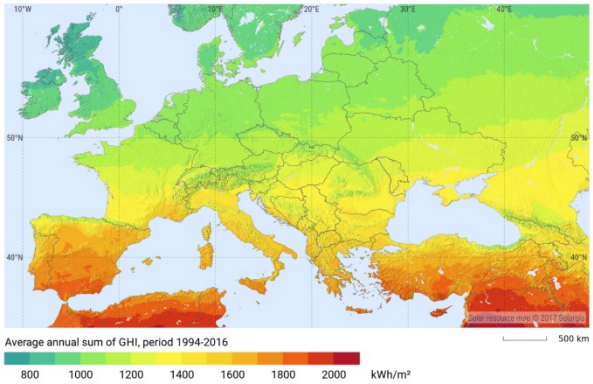
Abstract - School and school gym buildings represent a relevant potential for construction of photovoltaic panels, to be integrated into roofs of these buildings. Given that roof structures are passive, construction of photovoltaic systems does not interfere with the building functionality, does not it in any way adversely affect the environment. Installation of photovoltaic systems on building roofs brings the production and consumption of electricity closest possible, therefore such systems ensure significant reduction in power losses in transmission and distribution grids. In addition to locally produced electricity, construction of photovoltaic systems on the school buildings' roofs produces an educational effect as well. By installing a measuring and acquisition system which would include the measuring data on the photovoltaic power plant production parameters and school electricity consumption into school labs, technology would be closer to students, as well as possibilities to meet the demand for electricity from this basic renewable energy source. This paper presents the results of evaluations of the available roof surfaces of school buildings in Serbia for the photovoltaic panels installation. For each category of school building, an estimate of possible annual production per unit of average roof area was made. Summarizing all the results, estimates of possible installed capacity and annual electricity production for different scenarios are given.

Keywords - school buildings, school gym buildings, roof tops, photovoltaic systems, installed power

UVOD

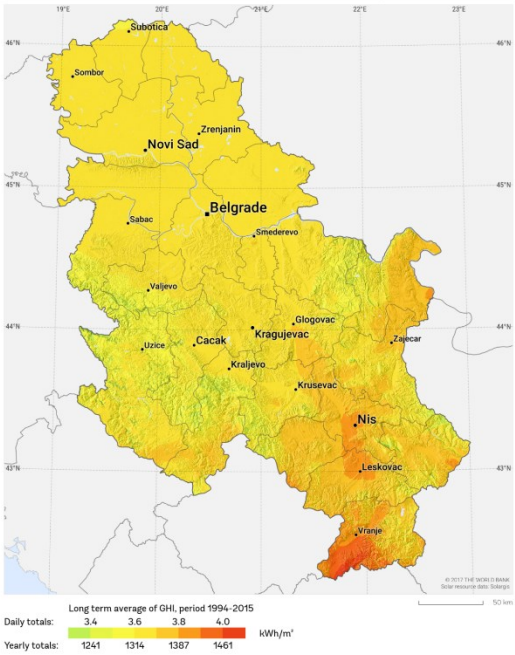
Školski objekti, kao i njihove pripadajuće fiskulturne sale predstavljaju značajan potencijal za izgradnju fotonaponskih panela integrisanih u krovove ovih objekata čija izgradnja ne bi narušavala funkcionalnost objekta, niti na bilo koji način negativno uticala na životnu sredinu. Količina električne energije koja se može dobiti iz fotonaponskih sistema pre svega zavisi od dozračene solarne energije na lokaciji objekta koji se analizira.

Snaga solarnog zračenja na površini Zemlje zavisi od više faktora, a to su: geografska širina, oblačnost, godišnje doba i doba dana. Realna slika prosečne godišnje insolacije na horizontalnoj površini (*Global Horizontal Irradiation* – GHI) za Evropu prikazana je na slici 1.



Slika 1. Solarni potencijal Evrope [1]

Na osnovu slike 1. može se izvesti zaključak da Srbija ima energetski potencijal solarnog zračenja koji je preko 30% veći od energetskog potencijala solarnog zračenja u Nemačkoj, koja je lider u proizvodnji električne energije iz fotonaponskih sistema u Evropi.



Slika 2. Solarni potencijal Srbije [1]

Na slici 2. prikazana je mapa globalnog potencijala solarnog zračenja na teritoriji Republike Srbije. Može se zaključiti da prosečna godišnja dozračena energija sunca po jedinici horizontalne površine na otvorenom terenu iznosi od 1450 kWh/m^2 na jugu, do oko 1250 kWh/m^2 na severu Srbije.

MATEMATIČKI MODEL ZA PROCENU PROIZVODNJE ELEKTRIČNE ENERGIJE KROVNO INTEGRISANIH FOTONAPONSKIH PANELA

Prosečna električna snaga koju fotonaponski panel injektira u distributivnu mrežu (P_{PVi}) u svakom satu *i* je definisana sledećom relacijom:

$$P_{PVi} = \eta P_{PVSTC} \frac{I_{PVi}}{I_{STC}} \cdot \left(1 + \alpha_{TPV}(T_{PVi} - T_{STC})\right) \qquad (1)$$

gde su:

P_{PVSTC} – deklarisana snaga fotonaponskih panela pri standardnim test uslovima (*Standard Test Conditions - STC*);
I_{PVi}– solarna iradijacija na površini FN panela u satu *i*;
I_{STC} = 1000 W/m^2 – solarna iradijacija koja odgovara STC;
η – stepen iskorišćenja sistema;
α_{TPV} – temperaturni koeficijent promene efikasnoti FN panela, tipično iznosi $\alpha_{TPV} = -0.5\ \%/°C$;
$T_{STC} = 25°C$ – temperatura FN panela pri STC;
T_{PVi} - temperatura panela u satu *i*.

Insolacija na površini panela u satu *i* zavisi od geografske pozicije objekta, azimutnog i altitudnog ugla FN panela, oblačnosti i senke koju mogu stvarati okolni objketi i brda. Ukupni stepen iskorišćenja sistema η uvažava gubitke usled zaprljanja panela, neuparenosti modula u stringu, degradaciju efikasnosti panela u toku eksploatacije, gubitaka na invertoru i gubitaka u elektirčnim vezama. Tipična vrednost efikasnosti sistema u prosečnoj godini eksploatacije FN panela iznosi η = 0,85%.
Smanjenje efikasnosti fotonaponske konverzije sa porastom temperature je obuhvaćeno sa koeficijentom α_{TPV}. Procena temperature FN panela se obično vrši na osnovu ambijentalne temperature prema sledećoj relaciji:

$$T_{PVi} = T_{ambi} + \left(\frac{NOCT-20}{800}\right) \cdot I_{PVi} \qquad (2)$$

gde je T_{ambi} - ambijentalna temperatura u analiziranom satu *i*.
Parametar NOCT (*Normal Operation Cell Temperature*) je temperatura solarnog modula pri ambijentalnoj temperaturi od 20 ^{0}C, solarnoj iradijaciji od 800 W/m^2 i brzini vetra od 1 m/s. Ovaj parametar se standardno dobija od proizvođača FN modula. Njegova tipična vrednost je NOCT=47 ^{0}C.
Za precizne proračune proizvodnje fotonaponskih panela i estimaciju njihovih dnevnih dijagrama proizvodnje potrebno je posedovati podatke o komponentama solarne iradijacije (direktnoj i difuzionoj) na ciljnoj lokaciji, ambijentalnoj temperaturi na mestu analiziranog objekta, geometrijskim elementima konstrukcije, zasenčenju okolnih objekata, tehničkim parametrima fotonaponskih modula i invertora i eksploatacionim uslovima.
Procena ukupne godišnje proizvodnje električne energije krovno integrisanih fotonaponskih panela može se izvršiti na osnovu dostupnih podataka o ukupnoj insolaciji na horizontalnoj površini, ambijentalnoj temperaturi i prostornoj orijentaciji fotonaponskih panela. Razvijeno je više softvera, koji imaju višegodišnje baze mernih podataka pomoću kojih je moguće izvršiti proračun godišnje proizvodnje fotonaponskih panela.
Jedan od često korišćenih softvera je PVGIS, čiji je razvoj finansiran od strane Evropska komisije. To je besplatni online program za proračun Sunčevog potencijala kao i proizvodnje energije samostalnih ili mrežno povezanih fotonaponskih panela u Evropi ili Africi. Proračun potencijala i proizvodnje električne energije iz fotonaponskih sistema, na mesečnom ili godišnjem

nivou, vrši se na osnovu zadatog broja modula i njihove prostorne orijentacije. Program vrši procenu direktne, difuzione i reflektovane komponente solarnog zračenja kombinujući model pri vedrom danu (*clear-day* model) i realne podatke o ukupnoj insolaciji, merene pod uglovima od 0°, 15°, 25° i 40°. Program sadrži satelitski snimak terena koji se analizira, tako da se prilikom proračuna iradijacije na površini FN panela uzima u obzir i efekat senki koje potiču od okolnih objekata i reljefa terena. Program daje informacije o srednjoj iradijaciji za svaki mesec, kao i za čitavu godinu.

METODOLOGIJA ZA PROCENU PROIZVODNJE FOTONAPONSKIH PANELA INTEGRISANIH U KROVOVE ŠKOLSKIH OBJEKATA U SRBIJI

Školski objekti poseduju značajan potencijal za izgradnju fotonaponskih panela na svojim krovovima. S obzirom da su krovne površine pasivne, izgradnja fotonaponskih sistema ne narušava funkcionalnost objekta, niti na bilo koji način negativno utiče na okolinu. Osim lokalne proizvodnje električne energije, izgradnjom fotonaponskih sistema na krovovima školskih objekata postiže se i edukativan efekat. U tom pogledu, preporučuje se instalacija merno-akvizicionog sistema koji bi merne podatke o parametrima proizvodnje fotonaponske elektrane i potrošnje električne energije škole uključili u školske laboratorije i na taj način približili đacima tehnologije i kvantitativno sagledavanje efekata podmirivanja potreba za električne energije školskog objekta iz ovog osnovnog obnovljivog izvora energije. Proračun električne energije koja se može dobiti iz fotonaponskih sistema integrisanih u krovove školskih objekata je izvršena na osnovu: potencijala solarne energije na pretpostavljenoj lokaciji objekata, raspoložive krovne površine i njene prostorne orijentacije i efikasnosti fotonaponskih modula.

U tabeli 1. prikazani su osnovni podaci o solarnom potencijalu i mogućnostima proizvodnje električne energije krovno integrisanih fotonaponskih panela na različitim lokacijama u Srbiji. Prikazane su proračunate vrednosti optimalnih nagibnih i azimutnih uglova fotonaponskih panela pri kojima je godišnja proizvodnje električne energije maksimalna.

Dati su podaci o godišnjoj insolaciji i proceni neto godišnje proizvodnje električne energije fotonaponskih panela postavljenih pod proračunatim optimalnim nagibnim i azimutnim uglom. Proračuni su dati za sve veće gradove u Srbiji, tako da praktično pokrivaju celu teritoriju Republike Srbije. Proračuni očekivane neto godišnje proizvodnje, koji su prikazani u poslednjoj koloni u tabeli 1, urađeni su pod sledećim pretpostavkama*: Površina na kojoj je instaliran fotonaponski panel se nalazi na otvorenom terenu bez senki* i *fotonaponski panel je realizovan sa silicijumskim fotonaponskim ćelijama čija nazivna (STC) efikasnost iznosi 17%.*

Tabela 1. Proračunate vrednosti insolacije i moguće proizvodnje električne energije fotonaponskih panela za više lokacije u Srbiji, dobijeni na osnovu proračuna u PVGIS softveru [2]

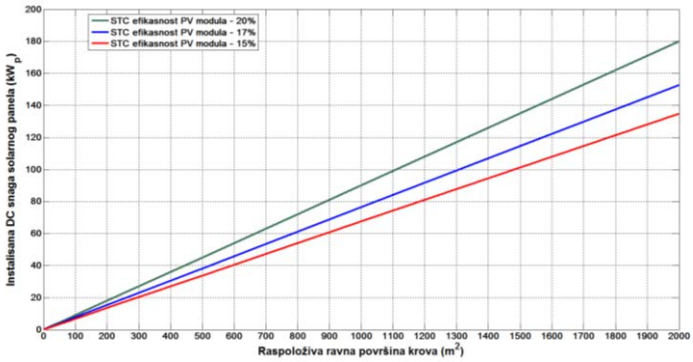
	Koordinate WGS 84	Reprezent ativni grad	Okolni gradovi	Optimalna orijentacija panela		Srednja godišnja iradijacija (Wh/m²/dan)		Neto godišnja proizvodnja FN sistema E_f(kWh/m²/god)
				Nagibni ugao	Azimut	Na horizontalnu ravan	Na optimalno orijentisanu ravan	Na optimalno orijentisanu ravan
1	46°05'36"N 19°40'05"E	Subotica	Horgoš, Palić, Senta	35,0°	-1,0°	3428	3908	186
2	45°46'09"N 19°07'21"E	Sombor	Crvenka, Kula	34,0°	-1,0°	3372	3816	182
3	45°46'09"N 19°07'21"E	Novi Sad	B. Palanka, Ruma, Zrenjanin	34,0°	0,0°	3549	4034	192
4	45°06'59"N 21°17'59"E	Vršac	Zrenjanin, Bela Crkva, Kovin	35,0°	0,0°	3644	4166	198
5	44°44'05"N 20°33'21"E	Beograd	Zemun, Pančevo, Obrenovac	33,0°	2,0°	3616	4104	195
6	44°37'26"N 21°11'28"E	Požarevac	Smederevo, V. Plana, Svijalnac	34,0°	0,0°	3643	4140	196
7	44°16'14"N 19°53'53"E	Valjevo	Loznica, Ljig, Aranđelovac	34,0°	-1,0°	3649	4167	198
8	44°00'59"N 20°54'59"E	Kragujevac	Lapovo, Topola, Ćuprija, Pračin	34,0°	-1,0°	3708	4214	200
9	43°53'22"N 20°21'22"E	Čačak	G.Milanovac, Užice, Kraljevo	35,0°	-3,0°	3752	4286	204
10	43°53'59"N 22°16'59"E	Zaječar	Bor, Knjaževac, Negotin	32,0°	-3,0°	3641	4070	192
11	43°34'59"N 21°19'59"E	Kruševac	Trstenik, Stalać, Aleksandrovac	33,0°	-3,0°	3771	4259	202
12	43°27'59"N 19°47'59"E	Nova Varoš	Prijepolje, Priboj	36,0°	-3,0°	3792	4406	214
13	43°18'59"N 21°53'59"E	Niš	Aleksinac, Blace, Prokuplje	32,0°	-3,0°	3696	4136	196
14	43°08'59"N 22°34'59"E	Pirot	Dimitrovgrad, B.Palanka	32,0°	-1,0°	3598	4001	190
15	43°08'30"N 20°31'22"E	Novi Pazar	Raška, Tutin, Sjenica	35,0°	3,0°	3894	4457	213
16	42°58'59"N 21°56'59"E	Leskovac	Vlasotince, Lebane, C.Trava	32,0°	-3,0°	3744	4189	198
17	42°53'02"N 20°52'31"E	Kosovska Mitrovica	Priština, Leposavić	34,0°	-3,0°	3885	4425	211
18	42°33'21"N 21°54'37"E	Vranje	Bujanovac, Gnjilane, Preševo	33,0°	-2,0°	3676	4140	198
19	42°22'59"N 20°24'59"E	Đakovica	Dečani, Orahovac	33,0°	0,0°	4007	4587	218
20	42°12'48"N 20°44'53"E	Prizren	Dragaš, Suva Reka	34,0°	4,0°	3961	4500	214

Podaci prikazani u tabeli 1 omogućavaju orijentacionu procenu očekivane godišnje proizvodnje električne energije koja se može dobiti iz FN panela u različitim regionima u Srbiji. U koloni *Optimalna orijentacija panela* dat je podatak o nagibnom i azimutnom uglu FN panela pri kojem će godišnja proizvodnja električne energije biti maksimalna. U poslednjoj koloni u tabeli 1 dat je podatak o očekivanoj prosečnoj godišnjoj proizvodnji električne energije koja se može postići po jedinici površine FN panela kada je on optimalno prostorno orijentisan. Može se zaključiti da se nabolje iskorišćenje investicije u izgradnju fotonaponskih panela može ostvariti na jugu Srbije, gde se može očekivati oko 218 kWh/m^2/
god, dok je najmanja proizvodnja na severu, gde iznosi 182 kWh/m^2/god. Upotrebom fotonaponskih panela sa većom efikasnošću (>17%), specifična proizodnja po jedinici krovne površine se može proporcionalno povećati. Zaključak sprovedene analize je da je varijacija solarnog potencijala na teritoriji Srbije relativno mala i da je izgradnja fotonaponskih panela sa aspekta potencijala opravdana u svim regionima u Srbiji.

METODOLOGIJA ZA PROCENU PROIZVODNJE FOTONAPONSKIH PANELA INSTALISANIH NA KONSTRUKCIJAMA SA RAVNIM KROVOVIMA

Značajan broj škola i pripadajućih fiskulturnih sala u Srbiji ima ravne krovove. Kosi krovovi čiji je nagib manji od 10° se mogu tretirati kao ravni krovovi. Ravni krovovi omogućavaju da se na njima može postaviti noseća konstrukcija sa optimalnom orijentacijom (azimutnim i nagibnim uglom). Optimalni azimutni ugao se može usvojiti da je 0°, odnosno da je fotonaponski

modul južno orijentisan. Za optimalni nagibni ugao može se usvojiti 33°. Kod izgradnje konstrukcije mora se voditi računa o međusobnom rastojanju redova fotonaponskih panela tako da ne dolazi do međusobnog zasenčenja. Na grafikonu 1 prikazani su rezultati proračuna maksimalno mogućeg kapaciteta za instalaciju fotonaponskih panela na ravnoj krovnoj površini.



Grafikon 1. Maksimalna instalisana snaga fotonaponskih panela sa modulima visoke (20%), srednje (17%) i niske (15%) efikasnosti na ravnoj površini krova

Pretpostavljeno je da se moduli postavljaju pod optimalnim nagibnim uglom. Razmatrane su opcije realizacije fotonaponskih panela sa modulima visoke (20%), srednje (17%) i niske (15%) efikasnosti. Instalisana snaga se odnosi na snagu na priključcima panela (DC snagu) pri standardnim (STC) uslovima. U analizama koje slede procena specifične snage i proizvodnje fotonaponskih panela je vršena uz pretpostavku da se instaliraju fotonaponski paneli efikasnosti 17%. Uz ovu pretpostavku, procena snage fotonaponskih panela (P_{PV}), koja se može instalirati na određenoj ravnoj krovnoj površini, može se izvršiti na osnovu sledeće relacije:

$$P_{PV}(\mathrm{kW_p}) = 0.0765 * A(\mathrm{m^2}), \qquad (3)$$

gde je $A(\mathrm{m^2})$ – raspoloživa ravna površina krova na kojoj se postavljaju fotonaponski paneli.

Procena godišnje proizvodnje električne energije (E) fotonaponskih panela instaliranih na nosećim konstrukcijama na ravnim krovovima objekata može se izvršiti prema sledećoj relaciji:

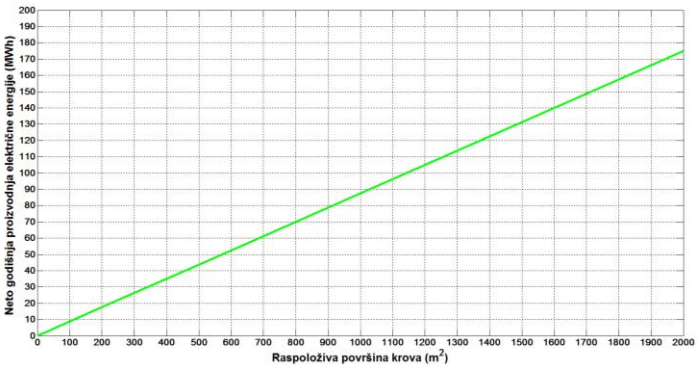
$$E(\mathrm{kWh}) = 0{,}45 * E_1\left(\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2}}\right) * A(\mathrm{m^2}), \qquad (4)$$

gde su: $E_1\left(\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2}}\right)$ – brojni podatak prikazan u poslednjoj koloni tabele 1,

$A(\mathrm{m^2})$, – raspoloživa horizontalna površina krova na kojoj se postavljaju fotonaponski paneli,

0,45 – koeficijent koji uvažava neophodno minimalno rastojanje između redova panela.

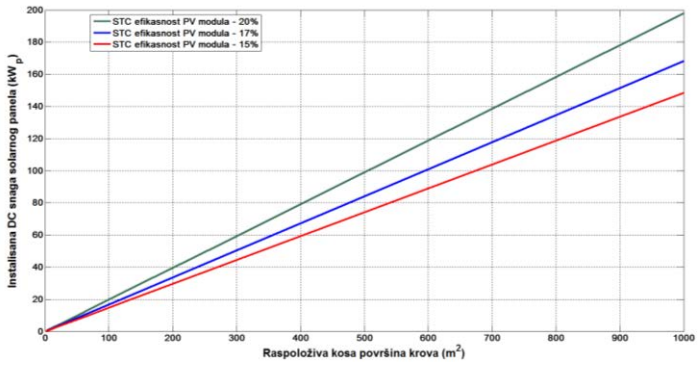
Prethodna relacija je izvedena pod pretpostavkom da je fotonaponski panel izveden u redovima koji su optimalno prostorno orijentisani. Dobijena analitička relacija je ilustrovana grafikonom 2 za otvoren prostor u regionu Beograda.



Grafikon 2. Procena godišnje proizvodnje FN sistema instaliranog na ravnoj površini krova školskog objekta na otvorenom terenu u regionu Beograda na konstrukciji koja obezbeđuje optimalan azimutni i nagibni ugao FN sistema

METODOLOGIJA ZA PROCENU PROIZVODNJE FOTONAPONSKIH PANELA INSTALISANIH NA KONSTRUKCIJAMA SA KOSIM KROVOVIMA

Krovovi čiji je nagib veći od 10° se tretiraju kao kosi krovovi i na njima se fotonaponski panel formira tako što se fotonaponski moduli polažu na konstrukciji po površini krova (prate nagib i azimutni ugao krova). Na grafikonu 3 prikazani su rezultati proračuna maksimalno mogućeg kapacitet za instalaciju FN panela na proizvoljnoj kosoj površini krova.



Grafikon 3. Maksimalna instalisana snaga fotonaponskih panela sa modulima visoke (20%), srednje (17%) i niske (15%) efikasnosti na kosoj površini krova

Razmatrane su opcije realizacije fotonaponskih panela sa modulima visoke (20%), srednje (17%) i niske (15%) efikasnosti. Instalisana snaga se odnosi na DC snagu na priključcima panela pri standardnim (STC) uslovima.

U tabeli 2. dati su podaci o optimalnoj orijentaciji (nagibnom i azimutnom uglu) površine pri kojoj se postiže maksimalna godišnja proizvodnja električne energije fotonaponskih panela. Svako odstupanje od naznačenih vrednosti dovodi do smanjenja godišnje proizvodnje električne energije po jedinici površine krova, odnosno po jedinici instalisane snage FN panela. Noseće konstrukcije fotonaponskih panela bi se mogle postaviti tako da

obezbeđuju optimalnu orijentaciju, ali su se pokazale u praksi nepraktičnim i najčešće nisu ekonomski opravdane. U analizama koje slede, procena specifične snage i poroizvodnje fotonaponskih panela je vršena uz pretpostavku da se instaliraju fotonaponski paneli efikasnosti 17%. Uz ovu pretpostavku, procena snage fotonaponskoh panela (P_{PV}) koja se može instalirati na određenoj kosoj krovnoj površini se može izvršiti na osnovu sledeće relacije:

$$P_{PV}(\mathrm{kW_p}) = 0{,}17 * A(\mathrm{m^2}), \qquad (5)$$

gde je $A(\mathrm{m^2})$ – raspoloživa površina krova na koju je postavljen FN panel.

Procena godišnje proizvodnje električne energije fotonaponskih panela (E) instaliranih na kosim krovovima školskih objekata može se izvršiti prema sledećoj relaciji:

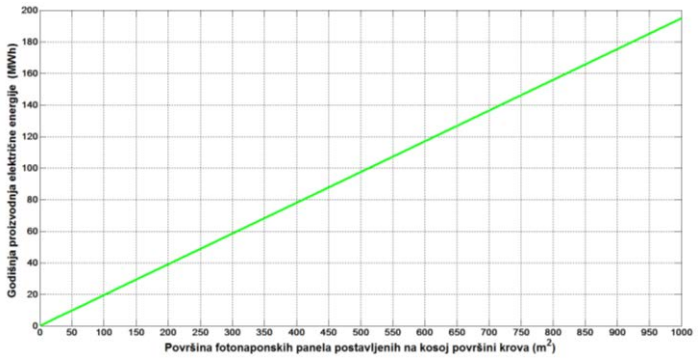
$$E(\mathrm{kWh}) = k * E_1\left(\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2}}\right) * A(\mathrm{m^2}), \qquad (6)$$

gde su: $E_1\left(\frac{\mathrm{kWh}}{\mathrm{m^2}}\right)$- brojni podatak dat u poslednjoj koloni tabele 1.

$A(\mathrm{m^2})$, – raspoloživa kosa površina krova,

k – koeficijent koji uvažava redukciju proizvodnje FN panela zbog odstupanja azimutnog i nagibnog ugla od optimalnih vrednosti.

Dobijena analitička relacija je ilustrovana grafikonom 4.



Grafikon 4. Procena godišnje proizvodnje FN sistema instaliranog na kosoj optimalno orijentisanoj površini krova školskog objekta u Beogradu

Vrednosti koeficijenta k za različite nagibne i azimutne uglove analizirane krovne površine su dati u tabeli 2. U obzir su uzeti samo azimutni uglovi u opsegu istok-jug-zapad pošto na severno orijentisanim krovnim površinama ne postoji ekonomska opravdanost za postavljanje fotonaponskih panela.

Tabela 2. Vrednosti korekcionog koeficijenta k za različite prostorne orijentacije FN panela

Nagibni ugao krovne površine	Azimutni ugao krovne površine																		
	-90	-80	-70	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
0	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88
5	0,88	0,89	0,89	0,90	0,91	0,91	0,91	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88
10	0,88	0,89	0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,88	0,88
15	0,88	0,89	0,91	0,92	0,94	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,93	0,92	0,90	0,88	0,87
20	0,87	0,88	0,91	0,93	0,95	0,96	0,97	0,97	0,98	0,98	0,98	0,97	0,96	0,96	0,94	0,92	0,90	0,88	0,86
25	0,86	0,88	0,91	0,93	0,95	0,96	0,98	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,96	0,94	0,92	0,89	0,87	0,85
30	0,84	0,88	0,90	0,93	0,95	0,96	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,92	0,89	0,86	0,83
35	0,83	0,86	0,89	0,92	0,95	0,96	0,98	0,99	1,00	1,00	1,00	0,99	0,97	0,96	0,94	0,91	0,88	0,85	0,82
40	081	0,85	0,88	0,91	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	0,99	0,99	0,98	0,97	0,95	0,93	0,90	0,87	0,84	0,80
45	0,79	0,83	0,87	0,90	0,93	0,95	0,96	0,98	0,98	0,99	0,98	0,97	0,96	0,94	0,91	0,88	0,85	0,82	078
50	0,77	0,81	0,85	0,88	0,91	0,94	0,96	0,96	097	0,97	0,96	0,96	0,95	0,92	0,89	0,87	0,83	0,80	0.76

MERE ZA INTEGRACIJU FOTONAPONSKIH SISTEMA U KROVOVE ŠKOLSKIH OBJEKATA U SRBIJI

Prema anketama koje su sprovedene zaključuje se da svega nekoliko škola u Srbiji ima instalisane fotonaponske sisteme na svojim krovovima. Pošto se radi o zanemarljivom broju škola, za postojeće stanje može se pretpostaviti da ne postoje instalirani fotonaponski sistemi u školskim objektima u Srbiji.

Prvo unapređenje podrazumeva izgradnju fotonaponskih sistema na raspoloživim krovnim površinama koje imaju najbolju prostornu orijentaciju sa aspekta ukupne godišnje insolacije. Instalisana snaga FN sistema treba da obezbedi godišnju proizvodnju električne energije koja pokriva do 50% ukupne godišnje potrošnje električne energije u analiziranom školskom objektu. Raspoložive površine su po predpostavci ravne površine krovova, kao i kose krovne površine čija je orijentacija u granicama ±90° u odnosu na jug. Biće pretpostavljeno da se može prekriti fotonaponskim panelima maksimalno 90% ovih krovnih površina.

Drugo unapređenje podrazumeva izgradnju fotonaponskih sistema na raspoloživim krovnim površinama koje imaju najbolju prostornu orijentaciju sa aspekta ukupne godišnje insolacije. Instalisana snaga FN sistema treba da obezbedi godišnju proizvodnju električne energije koja pokriva 100% ukupne godišnje potrošnje električne energije u analiziranom školskom objektu. Ukoliko ukupna raspoloživa krovna površina objekta ne može obezbediti dovoljnu instalisanu snagu fotonaponskih panela za pokrivanje 100% godišnje potrošnje električne energije objekta, onda ova mera podrazumeva instalaciju FN sistema na celoj raspoloživoj krovnoj površini. Raspoložive površine su po predpostavci ravne površine krovova, kao i kose krovne površine čija je orijentacija u granicama ±90° u odnosu na jug. Biće pretpostavljeno da se može prekriti fotonaponskim panelima maksimalno 90% ovih krovnih površina.

Prema nacionalnoj tipologiji školskih objekata u Republici Srbiji definisani su tipovi i podtipovi škola. Tipologija nije obuhvatila parametre koji su bitni za izgradnju fotonaponskih sistema, tako da se ne može uzeti kao reprezentativna za sagledavanje pogodnosti i kapaciteta školskih objekata u pogledu integracije fotonaponskih sistema [3,4].

U tabeli 3 prikazani su geometrijeki elementi bitni za sagledavanje kapaciteta za izgradnju fotonaponskih sistema na

tipovima škola definisanih u nacionalnoj tipologiji. Tabela je proširena sa tri sportske školske sale.

Tabela 3. Geometrijski elementi bitni za sagledavanje kapaciteta za izgradnju fotonaponskih sistema na tipovima škola definisanih u nacionalnoj tipologiji proširenoj sa tri sale [3,4]

ŠKOLE	Ukupna površina kosog krova [m²]	Nagibni ugao	Površina ravnog krova [m²]	Površine kosog krova [m²] i njihove orijentacije				
				E	SE	S	SW	W
A1	325	30°		47,5		115		47,5
A2	768	35°			266		94	
A2pt	2095	35°		1095		50		900
A3	890	42°			293		152	
A3pt	1300	35°		425		212		425
B1	189	42°				93		
B2	515	6°					280	
B3	300	10°	581	150				150
C1	211	30°					70	
C2	214	30°	505	140				74
C3	1790	18°				531		
C3pt			1615					
D3			1760					
SALE								
01			371					
02	972	24° (W) 16° (E)		731				214
03	538	6°	260		269		269	

U tabeli 4. prikazani su osnovni parametri efekata izgradnje fotonaponskih sistema na odabranim školskim objektima i sportskim salama prema **unapređenju 1**. Podaci o ukupnoj potrošnji električne energije školskih objekata su dobijeni anketiranjem, osim za škole A2, B1, B2, C1, C3 i D3, koje ovaj podatak nisu dale ili je podatak bio nelogičan. Za ove škole procena godišnje potrošnje električne energije je izvršena na osnovu prosečne specifične potrošnje električne energije u školama u Republici Srbiji, koja iznosi 16,36 kWh/m2 . Svi proračuni su rađeni sa pretpostavkom da se škole nalaze u regionu Beograda. Ukupni investicioni troškovi se odnose na projektovanje, kupovinu opreme, izradu noseće konstrukcije i izgradnju fotonaponskih panela.

Može se zaključiti da na svim školskim objektima postoji mogućnost instalacija fotonaponskih panela koji bi u potpunosti pokrili polovinu ukupne godišnje potrošnje električne energije školskih objekata i sala. Treba istaći da su dijagrami potrošnje električne energije i proizvodnje fotonaponsih panala u ovakvim objektima slabo korelisani kako na sezonskom, tako i na dnevnom nivou.

Tabela 4. Osnovni parametri efekata izgradnje fotonaponskih (FN) sistema na odabranim školskim objektima i sportskih sala prema **unapređenju 1** [5]

ŠKOLE	Ukupna neto površina (m²)	Ukupna godišnja potrošnja električne energije (MWh/god)	Ukupna instalisana snaga FN sistema na krovu objekta (kW_p)	Godišnja proizvodnja električne energije FN sistema (MWh/god)	Ukupna investicija za izgradnju FN sistema (Euro)	Smanjenje emisije CO_2 (tona/god)
A1	260	8,4	3,7	4,2	3700	9,114
A2	675	20,3	9,4	10,2	9400	22,026
A2pt	1055	17,3	7,6	8,7	7600	18,771
A3	2115	57,4	26,5	28,7	25200	62,279
A3pt	2305	40,0	17,5	20,0	17500	43,400
B1	145	2,4	1,1	1,2	1100	2,604
B2	840	13,8	6,1	6,9	6100	14,973
B3	1990	48,8	21.3	24,4	20200	52,948
C1	185	3,0	1,4	1,5	1400	3,255
C2	990	33,6	14,7	16.8	14700	36,456
C3	2765	45,3	20,2	22.7	19200	49,151
C3pt	3765	48,0	21,0	24,0	19900	52,080
D3	4600	75,3	32.9	37.7	31200	81,701
SALE						
01	330	5,4	2,4	2,7	2400	2,930
02	864	18,7	9,6	9,4	9600	10,145
03	707	15,3	6,7	7,7	6700	8,301

U tabeli 5. prikazani su osnovni parametri efekata izgradnje fotonaponskih sistema na odabranim školskim objektima i salama prema **unapređenju 2.** Svi proračuni su rađeni sa pretpostavkom da se škole nalaze u regionu Beograda. Ukupni investicioni troškovi se odnose na projektovanje, kupovinu opreme, izradu noseće konstrukcije i izgradnju fotonaponskih panela.

Tabela 5. Osnovni parametri efekata izgradnje fotonaponskih (FN) sistema na odabranim školskim objektima i sportskim salama prema **unapređenju 2** [5]

ŠKOLE	Ukupna neto površina (m²)	Ukupna godišnja potrošnja električne energije (MWh/god)	Ukupna instalisana snaga FN sistema na krovu objekta (kW_p)	Godišnja proizvodnja električne energije FN sistema (MWh/god)	Ukupna investicija za izgradnju FN sistema (Euro)	Smanjenje emisije CO_2 (tona/god)
A1	260	8,4	7,5	8,4	7500	9,114
A2	675	20,3	18,7	20,3	18700	22,026
A2pt	1055	17,3	16,5	17,3	16500	18,771
A3	2115	57,4	52,7	57,4	47400	62,279
A3pt	2305	40,0	35,0	40,0	33200	43,400
B1	145	2,4	2,2	2,4	2200	2,604
B2	840	13,8	12,1	13,8	12100	14,973
B3	1990	48,8	42,6	48,8	40400	52,948
C1	185	3,0	2,8	3,0	2800	3,255
C2	990	33,6	29,3	33,6	27800	36,456
C3	2765	45,3	40,3	45,3	38300	49,151
C3pt	3765	48,0	41,9	48,0	39800	52,080
D3	4600	75,3	65,8	75,3	59200	81,701
SALE						
01	330	5,4	4,7	5,4	4700	5,859
02	864	18,7	19,2	18,7	19200	20,289
03	707	15,3	13,4	15,3	13400	16,601

Može se zaključiti da na svim školskim objektima postoji mogućnost instalacija fotonaponskih panela koji bi u potpunosti pokrili godišnju potrošnju električne energije školskog objekta i sala. Treba istaći da su dijagrami potrošnje električne energije i proizvodnje fotonaponsih panala u ovakvim objektima slabo korelisani kako na sezonskom, tako i na dnevnom nivou.

PROCENA EFEKATA IZGRADNJE FOTONAPONSKIH SISTEMA NA ŠKOLSKIM OBJEKTIMA NA NIVOU SRBIJE

Na osnovu proračuna proizvodnje fotonaponskih sistema na krovovima tipskih školskih objekata izvršena je procena efekata izgradnje fotonaponskih sistema na nivou svih školskih objekata u Srbiji. S obzirom da nisu bili dostupni statistički podaci o geometrijskim elementima i raspoloživim površinama za krovove školskih objekata, procene proizvodnje su izvršene uz uvažavanje sledećih pretpostavki:

• *Raspoložive površine i nagibni uglovi krovova svih objekata u okviru jedne kategorije su isti;*
• *Solarni potencijal na prosečnom školskom objektu u Srbiji iznosi 3,6 kWh/m^2/dan na horizontalnoj površini;*
• *Orijentacija krovova školskih objekata sa kosim krovovima može biti podjednako verovatna za svaki pravac.*

Pored navedenih pretpostavki, usvojeno je da je fotonaponske panele pogodno postaviti na 80% objekata u svakoj od kategorija definisanih nacionalnom tipologijom. Preostalih 20 % objekata se smatra nepogodnim za instalaciju fotonaponskih sistema zbog neraspoloživosti krovne površine, kompleksne geometrije ili prisustva senke od okolnih objekata.

U tabeli 6. dati su podaci proračuna efekata instalacije fotonaponskih sistema na školskim objektima u Srbiji nakon primene mere **unapređenja 1**, a u tabeli 7. nakon primene mera **unapređenja 2**.

Tabela 6. Osnovni parametri efekata izgradnje fotonaponskih (FN) sistema na školskim objektima u Srbiji prema **unapređenju 1**[5]

TIP ŠKOLE	Broj škola	Ukupna godišnja potrošnja električne energije (GWh/god)	Ukupna instalisana snaga FN sistema na krovovima objekata (MW_p)	Godišnja proizvodnja električne energije FN sistema (GWh/god)	Ukupna investicija za izgradnju FN sistema (Miliona Eura)	Smanjenje emisije CO_2 (tona/god)
A1	596	5,0	2,07	2,3	1,97	2489
A2	300	6,1	2,52	2,8	2,39	3030
A3	242	3,9	1,62	1,8	1,54	1948
B1	664	1,6	0,63	0,7	0,60	758
B2	449	6,2	2,52	2,8	2,39	3030
B3	538	26,3	10,61	11,8	10,08	12771
C1	337	1,0	0,45	0,5	0,43	541
C2	274	9,2	3,78	4,2	3,59	4546
C3	413	18,7	7,55	8,4	7,17	9091
D3	77	5,8	2,34	2,6	2,22	2814
Ukupno	3890	84	34	38	32	41018

Tabela 7. Osnovni parametri efekata izgradnje fotonaponskih (FN) sistema na školskim objektima u Srbiji prema **unapređenju 2** [5]

TIP ŠKOLE	Broj škola	Ukupna godišnja potrošnja električne energije (GWh/god)	Ukupna instalisana snaga FN sistema na krovovima objekata (MW_p)	Godišnja proizvodnja električne energije FN sistema (GWh/god)	Ukupna investicija za izgradnju FN sistema (Miliona Eura)	Smanjenje emisije CO_2 (tona/god)
A1	596	5,0	3,67	4,0	3,30	4330
A2	300	6,1	4,50	4,9	4,05	5300
A3	242	3,9	2,85	3,1	2,57	3360
B1	664	1,6	1,19	1,3	1,07	1410
B2	449	6,2	4,59	5,0	4,13	5410
B3	538	26,3	19,36	21,1	17,42	22840
C1	337	1,0	0,73	0,8	0,66	0870
C2	274	9,2	6,79	7,4	6,11	8010
C3	413	18,7	13,77	15,0	12,39	16240
D3	77	5,8	4,31	4,7	3,88	5090
Ukupno	3890	84	62	67	56	72860

ZAKLJUČAK

Izgradnja fotonaponskih sistema predstavlja značajnu investiciju s obzirom na cenu koštanja komponenti ovog sistema. Sa druge strane, prednost FN sistema je što su oni modularni,tako da je moguća njihova fazna izgradnja, odnosno proširivanje kapaciteta. Krovovi škola često imaju površine različite orijentacije i nagiba, pa izgradnja fotonaponskih sistema na svim površinama nema iste energetske i ekonomske pokazatelje. Iz tog razloga prioritet izgradnje imaju površine sa najboljom godišnjom inosolacijom, koje će obezbediti najbrži povraćaj investicije i najveću specifičnu proizvodnju energije.

Potencijal za izgradnju fotonaponskog panela na raspoloživoj krovnoj površini prosečnog školskog objekata višestruko prevazilazi godišnje potrebe za električnom energijom školskog objketa. Predložene mere integracije fotonaponskih sistema u krovove školskih objekata su orijentisane ka pokrivanju dela ili celokupne potrošnje električne energije ovih objekata iz ovog obnovljivog izvora. Zbog loše sezonske i dnevne korelisanosti potreba za elektirčnom energijom i proizvodnjom energije fotonaponskih panela, pokrivanje potrošnje se može posmatrati samo kroz godišnji energetski bilans. Pri definisanju potrebnih instalisanih snaga fotonaponskih sistema za postizanje zadatih mera pretpostavljeno je postojeće stanje u pogledu potrošnje električne energije školskih objekata. Sprovođenjem mera unapređenja energetske efikasnosti, potrebe za električnom energijom će biti smanjene, tako da bi i potrebe za instalisanim fotonaponskim sistemima bile proporcionalno smanjene.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je realizovan u okviru istraživanja na projektu finsnsiranog od strane Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, kao i u okviru istraživanja na projektu, Inteligentne energteske mreže", br. III 42009 koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

REFERENCE

[1] https://solargis.com/

[2] M. Forcan, Ž. Đurišić, J. Mikulović (2016) An algorithm for elimination of partial shading effect based on a Theory of Reference PV String, Solar Energy 132, pp. 51–63

[3] Jovanović Popović M., Ignjatović D., Rajčić A., Đukanović LJ., Nedić M., Stanković B., Ćuković, Ignjatović N., Živković B., Sretenović A., Đurišić Ž., Kotur D. (2018) Zgrade školskih i predškolskih ustanova – metodološki okvir formiranja tipologije i poboljšanja energetske efikasnosti / School and Kindergarten Buildings / A methodological framework for the formulation of typology and the improvement of energy efficiency, Beograd: GIZ-Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit GIZ GmbH, (dvojezično izdanje) ISBN 978-86-80390-28-4, COBISS SR-ID 270972428, 97str, dostupno na: http://eeplatforma.

[4] Jovanović Popović M., Ignjatović D., Rajčić A., Đukanović LJ., Nedić M., Stanković B., Ćuković Ignjatović N., Živković B., Sretenović A., Đurišić Ž., Kotur D. (2018) Nacionalna Tipologija Školskih zgrada Srbije/National Typology of School Buildings in Serbia, Beograd: GIZ-Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit (GIZ)GmbH dvojezično izdanje) ISBN 978-86-80390-29-1, COBISS SR-ID 270974732, 261 str. dostupno na: http://eeplatfora

[5] Jovanović Popović M., Ignjatović D., Zeković B., Đurišić Ž., Batić I., Bakić V., Mirkov N., Kljajić M., Konstantinović D. (2019) Primena obnovljivih izvora energije na zgradama škola, fiskulturnih sala i predškolskih ustanova, Application of renewable energy sources in school, gym and kindergarten buildings, GIZ-Deutsche Gesellschaft fur Internationale Zusammenarbeit (GIZ)GmbH,(dvojezično izdanje) ISBN 978-86-80390-33-8, GIZ COBISS.SR-ID 278108172

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

Uporedna termodinamička analiza organskog Rankinovog i Kalina ciklusa

A Comparative Thermodynamic Analysis of the Organic Rankine and Kalina Cycle

Miloš Banjac, Marija Orlović

* Univerzitet u Beogradu Mašinski fakultet, Katedra za termomehaniku, Beograd, Srbija

Apstrakt- U vremenu kada se svakodnevno suočavamo sa različitim klimatskim nepogodama i kada njihovo dejstvo već primetno utiče na ekonomski i privredni razvoj, borba za njihovo ublažavanje postaje glavna tema i okosnica strateškog planiranja mnogih zemalja. Kako u ovoj borbi povećanje korišćenja obnovljivih izvora energije predstavlja jedan od glavnih mehanizama, analize mogućnosti primene raspoloživih tehničkih dostignuća, koje bi mogle da dodatno povećaju iskoristiv potencijal ovih izvora energije, predstavljaju ne samo potrebu, nego i profesionalnu dužnost. Zbog toga, a budući da Srbija raspolaže velikim količinama tzv. niskotemperaturne termičke energije, koja se klasičnim načinom, pomoću postrojenja koja rade sa vodom-vodenom parom po Rankin-Klauzijusovom ciklusu ne mogu pretvoriti u električnu energiju, u ovom radu pažnja je posvećena radu postrojenja koja to mogu, a koja rade po tzv. organskom Rankinovom i Kalina ciklusu. Pored predstavljanja načina rada, izvršena je termodinamička analiza njihovog rada i kroz prikaz promene stepena korisnosti upoređen i analiziran njihov potencijal za primenu.

Ključne reči - Niskotemperaturni izvori toplote, obnovljivi izvori energije, termodinamički stepen korisnosti

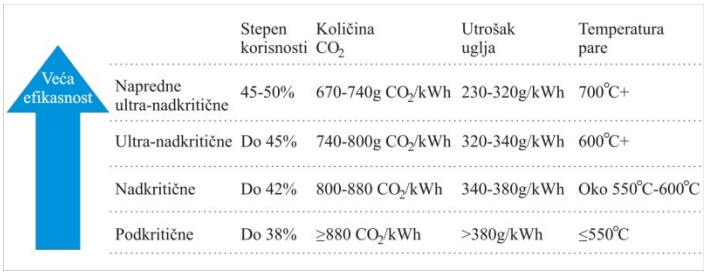
Abstract - At a time when we are facing various meteorological disasters on a daily basis and when their effects are already noticeably affecting economic development, the action to mitigate them becomes a major topic and the backbone of many countries' strategic planning. As increasing the use of renewable energy sources is one of the main mechanisms in this action, the analyses of the possibilities of applying the available technical achievements, which could further increase the utilization potential of these energy sources, represent not only a need but also a professional duty. Because of that, and since Serbia possesses large quantities of so-called low temperature thermal energy which cannot be converted into electricity in the conventional manner by means of water-steam plants according to Rankine-Claus cycle, in this paper attention is paid to the operation of so-called power plants which can do so and which operate according to the so called Organic Rankine and Kalina cycle. In addition to the presented modes, a thermodynamic analysis of their operation was performed and their potential for application was compared and analysed through a display of changes in the rate of efficiency.

Key words - Low temperature heat sources, Renewable energy sources, Thermal efficiency

I. UVOD

Od prve polovine 19. veka, sa prvom industrijskom revolucijom i primene prve parne mašine, koja je toplotu, nastalu sagorevanjem uglja pretvarala u mehaničku energiju, počinje i rad na njenom usavršavanju - povećanju odnosa dobijene mehaničke energije i uložene količine toplote, tj. povećanju termodinamičkog stepena korisnosti. Nakon nekoliko decenija razvoja, kao najpraktičniji i najpouzdaniji kružni proces po kome su radile parne mašine, izdvojio se Rankinov ciklus (RC). Zbog svojih prednosti, upravo ovaj ciklus je od druge polovine 19. veka, kada počinje proizvodnja električne energije, praktično postao i jedini ciklus po kome su radile i po kome danas rade termoelektrane koje kao izvor energije koriste ugalj.

Od svog prvog pojavljivanja, usavršavanja i modifikacije ovog kružnog procesa zasnovala su se na principu ostvarivanja što veće razlike temperatura između procesa isparavanja i procesa kondenzacije radnog fluida – vode, tj. vodene pare. Tendencija povećanja stepena korisnosti, zasnovana na visokim temperaturama produkata sagorevanja, zahtevala je upotrebu materijala otpornih na visoke temperature, te jer su se ova dva procesa spregnuto razvijali. Na ovaj način, od početnog termodinamičkog stepena korisnosti prvih parnih mašina, koji je iznosio jedva 1%, dostignut je stepen korisnosti od preko 44% kod termoelektrana koje rade po naprednom nadkritičnom RC kružnom procesu.



	Stepen korisnosti	Količina CO_2	Utrošak uglja	Temperatura pare
Napredne ultra-nadkritične	45-50%	670-740g CO_2/kWh	230-320g/kWh	700°C+
Ultra-nadkritične	Do 45%	740-800g CO_2/kWh	320-340g/kWh	600°C+
Nadkritične	Do 42%	800-880 CO_2/kWh	340-380g/kWh	Oko 550°C-600°C
Podkritične	Do 38%	≥880 CO_2/kWh	>380g/kWh	≤550°C

Slika 1: Povećanje termodinamički stepeni korisnosti RC, emisije CO_2 u zavisnosti od ostvarene temperature pare

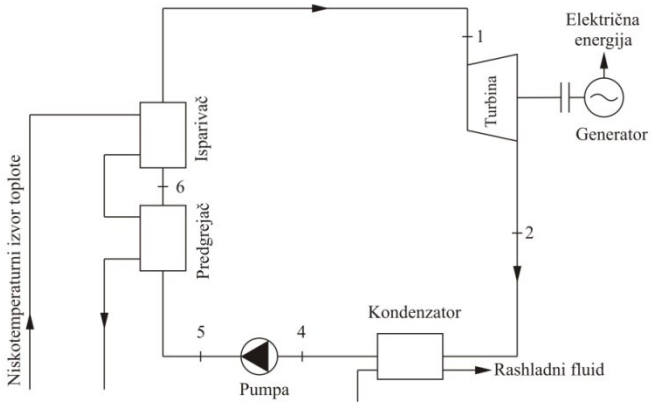
U današnje vreme, vreme intenzivne borbe protiv klimatskih pomena, opšte prihvaćena je ideja da i fosilna goriva treba izbaciti iz upotrebe i umesto njih koristiti obnovljive izvore energije (OIE). Sa tom idejom, od kraja 20. veka, započela su istraživanja sa ciljem da se i u termoelektranama, koje kao izvor toplote koriste ugalj, on zameni nekim od OIE, a pre svega geotermalnim izvorima energije.

Osnovna prepreka koju je trebalo prevazići u ovoj transformaciji, a i nova tendencija, svela sa na korišćenje toplotnih izvora, ne više visokih, nego upravo suprotno, niskih temperatura. Za RC cikluse, koji kao radnu materiju koriste vodu-vodenu paru, neophodno je da temperatura izvora toplote bude bar 350°C, dok temperature OIE, npr. geotermalnih izvora, čak i retko prelaze 200°C, a najčešće prelaze tek 150°C. Slično je i sa tzv. otpadnom toplotom drugih procesa, solarnom energijom i toplotom koja nastaje sagorevanjem biomase ili otpada. Rešenje ovog problema, pronađeno je u zameni vode-vodene pare drugim radnim fluidima, koji na značajno nižim temperaturama, a i dalje na relativno visokim pritiscima, imaju sposobnost isparavanja. Ova osobina pronađena je u freonima R134a, R245fa, ali i izobutanu, pentan-propanu i nekim fluorougljenicima [1]. Budući da se radi o tzv. organskim fluidima, kao i da je ciklus njihovih promena stanja identičan onom u RC, ovi novi ciklusi, a koji su u primeni od kraja šezdesetih godina prošlog veka [2], nazvani su organski Rankinovi ciklusi (ORC). Nešto kasnije, 1980. godine, ruski naučnik Alexander Kalina, predlaže i izvodi ORC sa smešom dva, umesto jednog organskog fluida. Ova promena je omogućila značajno povećanje stepena korisnosti ovakvih ciklusa, a ciklusima koji se izvode na ovaj način dat je novi naziv - Kalina ciklusi.

Kako Srbija ima veliko iskustvo sa radom termoelektrana i istovremeno raspolaže velikim količinama tzv. niskotemperaturne termičke energije, koja se klasičnim načinom, pomoću postrojenja koja rade sa vodom-vodenom parom po Rankin-Klauzijusovom ciklusu ne mogu pretvoriti u električnu energiju, u ovom radu pažnja je posvećena radu postrojenja koja to mogu, a koja rade po tzv. organskom Rankinovom i Kalina ciklusu. Pored predstavljanja načina, izvršena je termodinamička analiza njihovog rada i kroz prikaz promene stepena korisnosti upoređen i analiziran njihov potencijal za primenu.

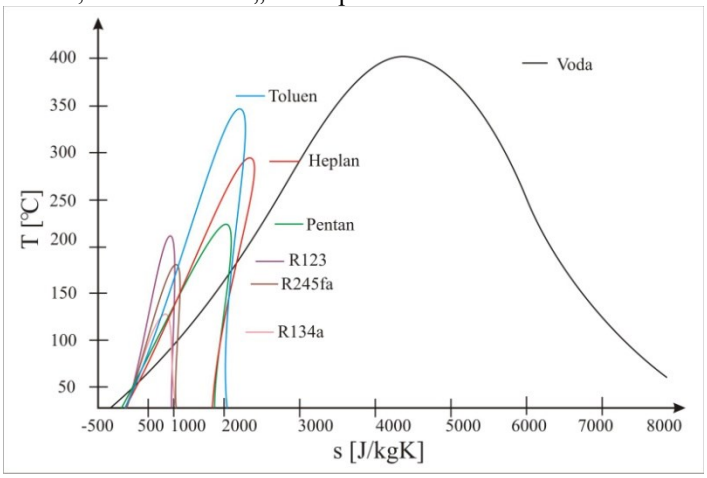
II. ORGANSKI RANKINOV CIKLUS

Kao što je već navedeno, organski Rankinov ciklus (ORC) radi na istom principu kao i Rankinov ciklus, sa razlikom da umesto vode – vodene pare, kao radnog fluida, koristi neki organski fluid. Predajom toplote iz toplotnog izvora radnom fluidu on isparava, nakon čega u parnom stanju ulazi u turbinu. U turbini se adijabatski širi, prenoseći svoju termomehaničku energiju na lopatice turbine i pretvarajući je u mehanički rad. Nakon toga, u kondenzatoru, radni fluid se u procesu predaje toplote okolini potpuno kondenzuje, nakon čega mu se u tzv. napojnoj pumpi podiže pritisak, sa pritiska kondenzacije na pritisak isparavanja (slika 2) [3]. Time se i završava ciklus promene stanja radnog fluida, koji se i prema ovom opisu ne razlikuje od promena stanja vode – vodene pare u osnovnom Rankinovom ciklusu.



Slika 2: Šema ORC Sistema [4]

Međutim, glavna razlika između RC i ORC je upravo u različitim svojstvima radnih fluida. Pored toga što organski fluidi koji se koriste u ORC, za iste radne pritiske imaju značajno niže temperature isparavanja, za razliku od vode – vodene pare koja ima svojstva tzv. „vlažnog“ fluida, organski fluidi imaju svojstva tzv. „izentropskih“ ili „suvih“ fluida (slika 3). Ovo svojstvo povezano je sa nagibima krive prelaska vlažne u suvu paru fluida u *T-s* koordinatnom sistemu, odnosno stanju koje se dostiže pri izentropskom širenju suve pare. Ukoliko izentropskim širenjem suve pare ona prelazi u vlažnu, fluid se naziva „vlažni“, ukoliko prelazi u pregrejanu, fluidi se nazivaju „suvi“ , a ukoliko ostane zasićen, fluid se naziva „izentropski“.



Slika 3: Prikaz “vlažnog”, “suvog” i “izentropskog” tipa fluida u *T-s* dijagramu

Kako organski fluidi, kao „suvi“ ili „izentropski“ fluidi, tokom svog širenja u turbini ne mogu da pređu u područje vlažne pare, oni time pokazuju još jednu prednost jer za razliku od vode – vodene pare koja pripada grupi „vlažnih“ fluida, ne zahtevaju korišćenje pregrejača pare, a nema potrebe ni za korišćenjem procesa sa višestepenom ekspanzijom i međupregrevanjem, što ih čini jednostavnijim i ekonomičnijim u smislu investicionih i eksploatacionih troškova.

Termodinamička analiza ORC

U skladu sa opisnim procesom, šemom prikazanoj na slici (2) i *T-s* dijagramom sa slike (4), toplotni protok sa niskotemperaturnog izvora na radni fluid, ili tzv. primljeni toplotni protok u izobarskom procesu zagrevanja i isparavanja radnog fluida u predgrejaču i isparivaču, primenom Prvog zakona termodinamike za protočni sistem u ustaljenim uslovima, može da se odredi iz izraza:

$$\Phi_{\text{prim}} = q_m \left(h_1 - h_5\right),$$

gde je q_m (kg/s) maseni protok radnog fluida, a h (kJ/kg) entalpija radnog fluida u odgovarajućem stanju.

Primenom Prvog zakona termodinamike za protočni sistem u ustaljenim uslovima, može da se odredi i snaga turbine:

$$P_{\text{tur}} = q_m \left(h_1 - h_2\right) = q_m \eta_{\text{tur}} \left(h_1 - h_{2\text{s}}\right),$$

gde je η_{tur} (-) stepen dobrote izentropske ekspanzije (unutrašnji stepen korisnosti turbine).

Primenom istog zakona može da se odredi i snaga potrebna za pogon napojne pumpe:

$$P_{\text{pum}} = q_m \left(h_5 - h_4\right) = \frac{q_m \left(h_{5\text{s}} - h_4\right)}{\eta_{\text{pum}}},$$

pri čemu je η_{pum} (-) stepen dobrote izentropske kompresije (unutrašnji stepen korisnosti pumpe).

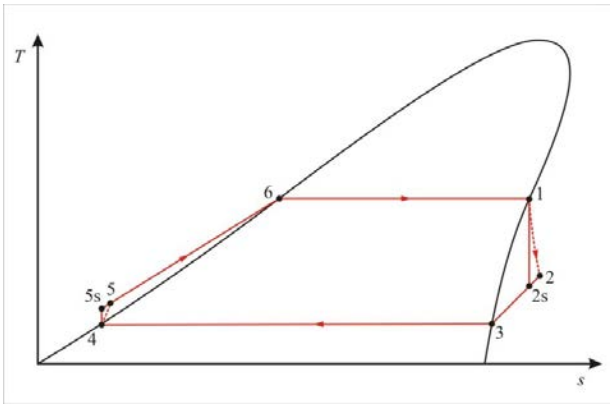
Na osnovu prethodno određenih snaga turbine i pumpe i toplotne snage može se odrediti termodinamički stepen korisnosti ovog ciklusa kao:

$$\eta_{\text{td}} = \frac{P_{\text{tur}} - P_{\text{pum}}}{\Phi_{\text{prim}}} = \frac{\left(h_1 - h_2\right) - \left(h_5 - h_4\right)}{\left(h_1 - h_5\right)},$$

odnosno:

$$\eta_{\text{t}} = \frac{\left(h_1 - h_{2\text{s}}\right) - \left(h_{5\text{s}} - h_4\right)}{\left(h_1 - h_{5\text{s}}\right)},$$

za slučaj kada se smatra da su procesi širenja u turbini i povećavanja pritiska fluida u pumpi izentropski.



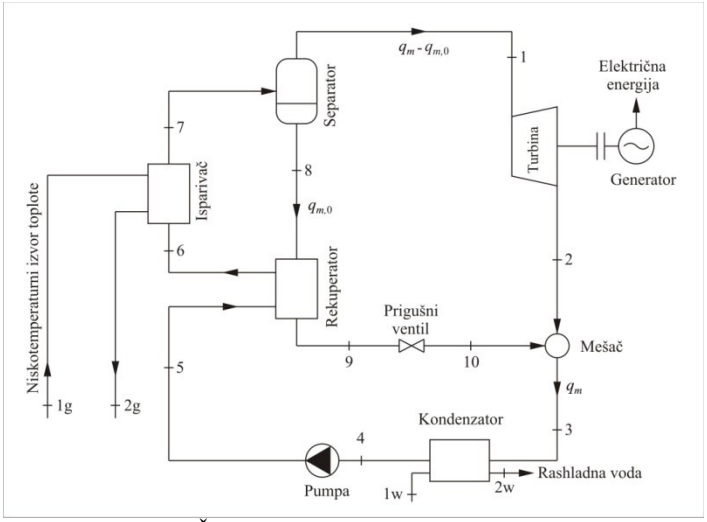
Slika 4: T-s dijagram ORC sa tzv. “suvim” radnim fluidom.

III. KALINA CIKLUS

Kao što je u uvodu već napomenuto, Kalina ciklus je modifikovani organski Rankinov ciklus koji kao radni fluid koristi binarnu mešavinu dva fluida sa različitim temperaturama isparavanja. [4] Za razliku od jednokomponentnih fluida, takva smeša pri stalnom pritisku isparava uz promenu temperature što omogućava da se prelaženje toplote odvija uz manje temperaturne razlike. Kao radni fluid se najčešće koristi smeša vode i amonijaka, ali moguće je koristiti i druge smeše fluida (freona ili ugljovodonika). Amonijak i voda imaju slične molarne mase (amonijak 17 kg/kmol, a voda 18 kg/kmol), međutim, temperature ključanja za atmosferski pritisak se znatno razlikuju (amonijak -33,3°C, dok voda ključa na 100°C) [5].

Šematski prikaz postrojenja za proizvodnju električne energije prema Kalina ciklusu je prikazan na slici (5). Već iz ovog šematskog prikaza jasno se vidi da u odnosu na Rankinov ciklus ovaj sistem ima dodatni rekuperator, prigušni ventil, separator i mešač [6].

U generatoru pare niskotemperaturni izvor predaje toplotu binarnoj mešavini kao radnom fluidu. Na izlazu iz generatora pare radni fluid je dvofazna mešavina (stanje 7) koja se u separatoru razdvaja na dve faze – parnu fazu koja je bogatija lakšeisparljivom komponentom (amonijakom) i tečnu fazu koja je bogatija težeisparljivom komponentom (vodom). Parna faza fluida stanja 1 se odvodi u turbinu gde se širi prelazeći u stanje 2 i pretvarajući svoju termomehaničku energiju u korisni mehanički rad. Tečna faza fluida iz separatora, stanja 8, se odvodi u rekuperator toplote gde se hladi do stanja 9, predgrevajući radni fluid, a pre njegovog ulaska u isparivač. Nakon toga, radni fluid stanja 9 se odvodi u prigušni ventil gde mu se snižava pritisak do stanja 10, da bi se potom pomešao u mešaču sa radnim fluidom stanja 2, a koji je napušta turbinu i koji se nalazi u stanju vlažne pare. Nakon procesa mešanja, radni fluid se odvodi u kondenzator gde se kondenzuje, predajući toplotu toplotnom ponoru, a potom odvodi u napojnu pumpu gde mu se sa pritiska kondenzacije pritisak podiže na pritisak isparavanja.



Slika 5: Šema sistema sa Kalina ciklusom [7]

Termodinamička analiza Kalina ciklusa

Kao i u prethodnom slučaju, u skladu sa opisanim procesom, šemom prikazanoj na slici (5), toplotni protok sa niskotemperaturnog izvora na radni fluid, ili tzv. primljeni toplotni protok u izobarskom procesu zagrevanja i isparavanja radnog fluida u predgrejaču i isparivaču, primenom Prvog zakona termodinamike za protočni sistem u ustaljenim uslovima, može da se odredi iz:

$$\Phi_{\text{prim}} = q_m \left(h_7 - h_6\right),$$

Energetski bilans u separatoru može se opisati izrazom:

$$q_m \cdot h_7 = q_{m,0} \cdot h_8 + \left(q_m - q_{m,0}\right) \cdot h_1,$$

gde je q_m (kg/s) maseni protok tečne faze iz separatora ka mešaču, a $\left(q_m - q_{m,0}\right)$ (kg/s) maseni protok parne faze koja iz separatora odlazi ka turbini.

Primenom Prvog zakona termodinamike za protočni sistem u ustaljenim uslovima, može se odrediti i snaga turbine:

$$P_{\text{tur}} = \left(q_m - q_{m,0}\right)\left(h_1 - h_{2s}\right).$$

Energetski bilans za rekuperator može se opisati izrazom:

$$q_{m,0}\left(h_8 - h_9\right) = q_m \left(h_6 - h_5\right).$$

Primenom Prvog zakona termodinamike za protočni sistem u ustaljenim uslovima, može se odrediti snaga potrebna za pogon napojne pumpe:

$$P_{\text{pum}} = q_m \left(h_{5s} - h_4\right).$$

Konačno, termodinamički stepen korisnosti Kalina ciklusa za slučaj kada su procesi širenja pare u turbini i povećanja pritiska fluida u pumpi izentropski, može se opisati izrazom:

$$\eta_t = \frac{P_{\text{tur}} - P_{\text{pum}}}{\Phi_{\text{prim}}} = \frac{\left(1 - \frac{q_{m,0}}{q_m}\right)\left(h_1 - h_{2s}\right) - \left(h_{5s} - h_4\right)}{\left(h_7 - h_6\right)}.$$

IV. PORE ĐENJE ORC I KALINA CIKLUSA

Termodinamička analiza rada ORC i Kalina ciklusa izvršena je korišćenjem izvedenih izraza za termodinamičke stepene korisnosti. Analiza je izvršena za nekoliko različitih radnih režima, a zatim za iste radne režime je izvršeno međusobno poređenje ovih ciklusa. Za određivanje svih veličina stanja radnih fluida u procesima korišćen je programski paket REFPROP [8].

Termodinamička analiza rada ORC sprovedena je za tri radna režima - slučaja. U svim slučajevima kao radni fluid korišćen je R245fa. Takođe, za sve slučajeve je pretpostavljeno da je radni fluid pri ulasku u turbinu u stanju suvozasićene pare, a na izlazu kondenzatora u stanju zasićene tečnosti. U prva dva slučaja analiza je izvršena da utvrdi uticaj temperature, odnosno pritiska isparavanja na termodinamički stepen korisnosti ciklusa. Zbog toga je temperatura isparavanja menjana u intervalu od 90-150°C. Pri tom, u prvom slučaju - usvojeno je da temperatura kondenzacije iznosi 25°C, dok je u drugom slučaju - usvojeno da je to temperatura zasićenja R245fa pri pritisku kondenzacije od 3 bar. U trećem slučaju – kao stalne veličine usvojene su maksimalni pritisak fluida – pritisak isparavanja od 30 bara i minimalni pritisak - pritisak kondenzacije od 3 bara.

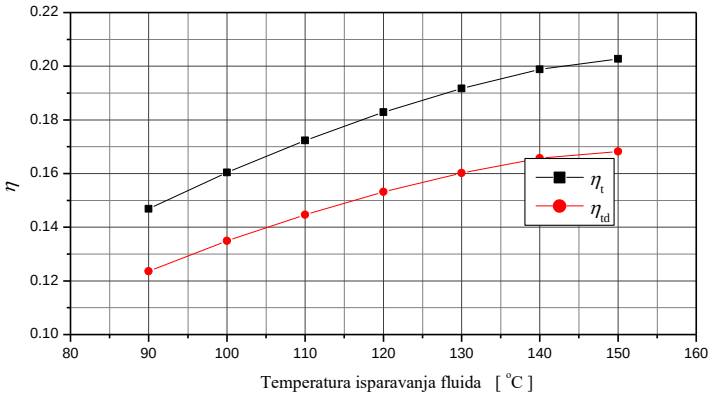
Sva tri slučaja analizirana su za dva podslučaja. Prvi, pod pretpostavkom da je proces širenja pare u turbini i proces povećanja pritiska fluida u pumpi neizentropski, kada je određivan termodinamički stepen korisnosti označen sa η_{td}, i drugim, kada je smatrano da su oba ova procesa izentropska, pri čemu je određivan termodinamički stepen korisnosti označen sa η_t.

Rezultati proračuna prikazani su tabelama 1, 2 i 3 i slikama 6 i 7.

Termodinamička analiza rada Kalina ciklusa sprovedena je za šest različitih radnih režima - slučajeva. U svih šest slučajeva analiza je sprovedena pod pretpostavkom da je radni fluid smeša amonijaka i vode. U prvih pet slučajeva, odnos amonijaka i vode iznosio je 70/30%, dok je u šestom slučaju izvršena analiza uticaja sastava smeše na promenu termodinamičkog stepena korisnosti ciklusa. U svih 6 slučajeva, pretpostavljeno je da u turbinu ulazi suvozasićena para smeše amonijaka i vode, koja je bogata lakšeisparljivom komponentom (amonijakom), a da iz kondenzatora izlazi smeša vode i amonijaka u stanju zasićene tečnosti. Za sve slučajeve je pretpostavljeno da su procesi širenja pare u turbini i procesi povećanja pritiska fluida u napojnoj pumpi izentropski, kao i da je efikasnost rekuperatora nepromenjiva i iznosi 80%.

Tabela 1: Stepeni korisnosti ORC za fluid R245fa – 1. slučaj

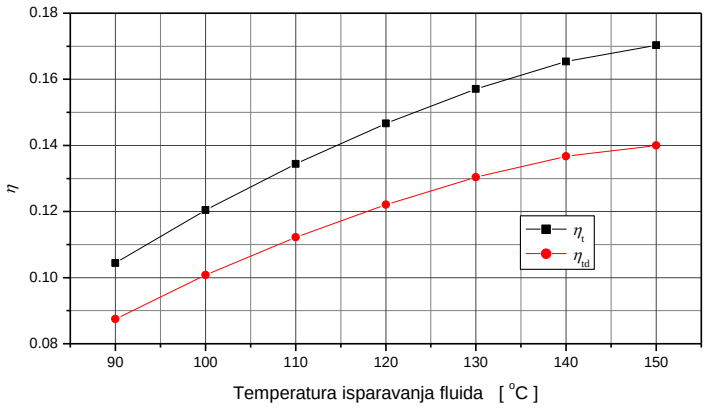
ϑ_{kd} =25°C						
ϑ_{isp} [°C]						
90	100	110	120	130	140	150
η_t						
0,1468	0,1604	0,1724	0,1828	0,1918	0,1989	0,2028
η_{td}						
0,1236	0,1349	0,1447	0,1531	0,1602	0,1657	0,1682



Slika 6: Poređenje η_{td} i η_t ORC sa radnim fluidom R245fa – 1 slučaj

Tabela 2: Stepeni korisnosti ORC za fluid R245fa – 2. slučaj

p_{min} = 3 bar						
ϑ_{isp} [°C]						
90	100	110	120	130	140	150
η_t						
0,1044	0,1204	0,1344	0,1466	0,1571	0,1654	0,1703
η_{td}						
0,0875	0,1008	0,1122	0,1221	0,1304	0,1367	0,13995



Slika 7: Poređenje η_{td} i η_t ORC sa radnim fluidom R245fa - 2. slučaj

Tabela 3: Stepeni korisnosti ORC za fluid R245fa – 3. slučaj

p_{max} [bar]	30	
p_{min} [bar]	3	
ϑ_{isp} [°C]	150	155
η_t	0,16971	0,17053
η_{td}	0,14047	0,14131

U prvom i drugom slučaju izvršena je analiza uticaja temperature mešavine na izlazu iz isparivača, ϑ_7, na termodinamički stepen korisnosti ciklusa. Pri tome, u prvom analiziranom slučaju pretpostavljen je radni režim u kome je maksimalni pritisak fluida u procesu, pritisak isparavanja, stalan i ima vrednost od 30 bara, kao i da minimalni pritisak, pritisak kondenzacije, takođe ima stalnu vrednost od 10 bara, a u opsegu od 110°C do 150°C je menjana temperatura mešavine na izlazu iz isparivača.
U drugom analiziranom slučaju, ponovo je pretpostavljeno da ovi pritisci imaju stalnu vrednost, ali sada 30 bar i 5 bar, a temperature mešavine na izlazu iz isparivača je menjana u istom opsegu kao i u sličaju 1. Rezultati ovih proračuna prikazani su u tabelama 4 i 5.

Tabela 4: Stepen korisnosti Kalina ciklusa – 1.slučaj

Mas. odnos	70/30				
p_{max} [bar]	30				
p_{min} [bar]	10				
ϑ_7 [°C]	110	120	130	140	150
η_t	0,09666	0,10084	0,10309	0,10416	0,10440

Tabela 5: Stepen korisnosti Kalina ciklusa – 2. slučaj

Mas. odnos	70/30			
p_{max} [bar]	30			
p_{min} [bar]	5			
ϑ_7 [°C]	140	150	155	170
η_t	0,15286	0,15416	0,15430	0,15266

U trećem i četvrtom slučaju analizirani su uticaji promene pritiska kondenzacije na termodinamički stepen korisnosti Kalina ciklusa. Vrednosti minimalnog pritiska menja se u opsegu od 3 do 10 bara. Za oba slučaja, maksimalni pritisak u procesu isparavanja je iznosio 30 bara, dok su se razlikovale temperature radnog fluida na izlasku iz isparivača, ϑ_7. U trećem anliziranom slučaju ona je iznosila 140°C, dok je u četvrtom bila 150°C. Rezultati proračuna su za ova dva slučaja prikazani u tabelama (6) i (7).

Tabela 6: Stepen korisnosti Kalina ciklusa – 3. slučaj

Mas. odnos	70/30			
ϑ_7 [°C]	140			
p_{max} [bar]	30			
p_{min} [bar]	3	4	5	10
η_t	0,18309	0,16740	0,15286	0,10416

Tabela 7: Stepen korisnosti Kalina ciklusa – 4. slučaj

Mas. odnos	70/30			
ϑ_7 [°C]	150			
p_{max} [bar]	30			
p_{min} [bar]	3	4	5	10
η_t	0,18557	0,16842	0,15416	0,10440

Peta analiza je trebalo pre svega da ustanovi uticaj maksimalnog pritiska radnog fluida na termodinamički stepen korisnosti Kalina ciklusa, a zatim i temperature radnog fluida na izlasku iz isparivača, ϑ_7. Zbog toga su, u ovom slučaju, pri stalnom pritisku

kondenzacije koji je iznosio 3 bara, određivani termodinamički stepeni korisnosti pri promenjivim maksimalnim pritiscima i različitim vrednostima temperature radnog fluida na izlazu iz isparivača. Rezultati proračuna prikazani su u tabeli 8.

Tabela 8: Stepen korisnosti Kalina ciklusa – 5. slučaj

70/30						
p_{min} =3 bar						
p_{max} [bar]						
30	30	30	30	35	45	55
ϑ_7 [°C]						
140	150	155	170	180	190	200
η_t						
0,1831	0,1856	0,1861	0,185	0,1948	0,2123	0,225

Konačno, poslednji, šesti analizirani slučaj je trebalo da ustanovi uticaj sastava smeše na promenu termodinamičkog stepena korisnosti Kalina ciklusa. Iz tog razloga, upoređeni su termodinmički stepeni korisnosti za slučaj jedne vrednosti maksimalnog pritiska fluida u ciklusu, 30 bara, i tri vrednosti minimalnog pritiska, 3, 4 i 5 bara, za dva sastava smeše, za maseni odnos amonijaka i vode 70/30 i 90/10. Rezultati proračuna prikazani su u tabeli 9.

Tabela 9: Stepen korisnosti Kalina ciklusa – 6. slučaj

Mas. odnos	ϑ_7 [°C]	140		
	p_{max} [bar]	30		
	p_{min} [bar]	3	4	5
70/30	η_t	0,18309	0,16740	0,15286
90/10	η_t	0,20692	0,18760	0,15515

U nameri da se pri istim radnim režimima direktno uporedi kvalitet rada Rankinovog ciklusa sa organskim fluidom i Kalina ciklusa, za dve temperature fluida na izlazu fluida iz isparivača, 150°C i 155°C i iste maksimalne pritiske od 30 bara i iste minimalne pritiske radnog fluida od 3 bara, određeni su termodinamički stepeni korisnosti ova dva ciklusa. Pri tome, radni fluid Rankinovog ciklusa sa organskim fluidom bio je R245fa, a Kalina ciklusa mešavina amonijaka i vode u masenom odnosu 70/30%. U tabeli (10) su rezultati ovog proračuna.

Tabela 100: Poređenje stepena korisnosti ORC i Kalina ciklusa.

Radni fluid	p_{max} [bar]	30	30
	p_{min} [bar]	3	3
	ϑ [°C]	150	155
R245fa	η_t	0,16971	0,17053
NH_3/H_2O: 70/30%	η_t	0,18557	0,18612

Analizom rezultata može se zaključiti da je u ovom radnom režimu efikasnost Kalina ciklusa veća u odnosu na Rankinov ciklus sa organskim fluidom.

V. ZAKLJUČAK

Na osnovu sprovedene analize može se zaključiti da se toplota iz niskotemperaturnih toplotnih izvora, čija je temperatura 90°C, može iskoristiti pomoću postrojenja koja rade po Rankinovom ciklusu sa organskim fluidima u veoma malom procentu, manjem od 9%, i pretvoriti u električnu energiju. Potvrđeno je da se sa porastom temperature isparavanja radnog fluida povećava termodinamički stepen korisnosti i kod postrojenja koja rade po Rankinovom ciklusu sa organskim fluidom, kao i kod postrojenja koja rade po Kalina ciklusu. Takođe, ustanovljeno je da stepen korisnosti Kalina ciklusa blago raste sa porastom temperature fluida na izlazu iz isparivača, nešto značajnije raste sa porastom udela amonijaka u radnoj smeši, a opada sa porastom minimalnog pritiska. Konačno, ustanovljeno je da pri istim radnim režimima, u slučajevima da temperatura fluida na izlazu iz isparivača ima vrednosti preko 150°C, stepen korisnosti Kalina ciklusa je veći od stepena korisnosti Rankinovog ciklusa sa organskim fluidom.

REFERENCE

[1] Deepak, K.,Gupta, A. V.: Thermodynamic analysis of Kalina cycle configurations for utilisation of geothermal energy, Progress in Industrial Ecology, An International Journal, 2018 Vol.12 No.1/2, pp.164 – 179

[2] Cleveland, Cutler J. (Ed.) Concise Encyclopedia of the History of Energy, Academic Press, 2009. ISBN 978-0-12-375117-1

[3] M. N. Karimi, A. Dutta, A. Kaushik, H. Bansal, S. Z. Haque, "A Review of Organic Rankine, Kalina and Goswami Cycle", International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences, 2013, Vol. 3, ISSN 2349-4476.

[4] F. Wakana, "Preliminary study of binary power plant feasibility comparing ORC and Kalina for low-temperature resources in Rusizi Valley, Burundi, 2013.

[5] A. Moghees, M. N. Karimi, "Thermodynamics Analysis of Kalina Cycle", International Journal of Science and Research, ISSN (Online): 2319-7064, Vol. 5, March 2016.

[6] H. Kim Kyoung, "Thermodynamics Analysis of Kalina Based Power and Cooling Cogeneration Cycle Employed Once Through Configuration", Energies, 2019.

[7] Z. Xinxin, H. Maogang, Z. Ying, "A review of research on the Kalina cycle", Renewable and Sustainable Energy Reviews 16, 2012.

[8] ***REFPROP, NIST Standard Reference Database 23, Version 8.0.

AUTORI

Prvi autor – Miloš Banjac, prof. dr, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, mbanjac@mas.bg.ac.rs

Drugi autor – Marija Orlović, master inženjer mašinstva, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, morlovic@mas.bg.ac.rs

Zaštita tronamotajnog energetskog transformatora zasnovana na faznoj komparaciji struja

A three winding power transformer protection based on the phase comparision of the currents

Jelisaveta Krstivojević*, Zoran Stojanović*, Milenko Đurić*

* Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet
Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Srbija

Rezime- U radu je predstavljen novi algoritam za zaštitu tronamotajnog energetskog transformatora od unutrašnjih kratkih spojeva. Algoritam je zasnovan na primeni digitalne fazne komparacije struja izmerenih na primarnim, sekundarnim i tercijernim priključcima energetskog transformatora. Primenjena digitalna fazna komparacija ne računa ugao između dve struje koje se fazno porede, već koristi metod integracije proizvoda te dve struje na polovini osnovne periode signala. Da bi se realizovala selektivna zaštita u slučaju kada energetski transformator ima samo jedan od svoja tri namotaja povezan na aktivnu mrežu, a druga dva namotaja napajaju pasivne mreže, digitalnom faznom komparatoru je dodata i prekostrujna funkcija. U radu je pokazano da se primenom novog algoritma uspešno mogu detektovati unutrašnji kvarovi tronamotajnog energetskog transformatora i obezbediti pravovremeno reagovanje zaštite. Za verifikaciju rada predloženog algoritma korišćeni su signali dobijeni računarskim simulacijama. Razvoj algoritma i rezultati testova su dati u radu.
Ključne reči- relejna zaštita, energetski transformator, digitalna fazna komparacija, detektovanje kvarova.

Abstract- This paper presents a new algorithm for three-winding transformer protection against internal short circuits. The algorithm is based on the application of the digital phase comparison of currents measured at the primary, secondary and tertiary terminals of the power transformer. The applied digital phase comparison does not calculate the angle between the two currents compared in phase, but uses the method of integration of the product of two signals within one basic semi-period of the signals. In order to provide selective protection in the case where the power transformer has only one of its three windings connected to the active network and the other two windings feeding passive networks, an overcurrent function has been added to the digital phase comparator. The paper shows that the application of the new algorithm can successfully detect the internal faults of the three-winding transformer and ensure timely tripping of protection. The signals obtained by computer simulations were used to verify the operation of the proposed algorithm. The algorithm and test results are given in the paper.
Index Terms- power system protection, power transformer, digital phase comparison, fault discrimination.

I. UVOD

Energetski transformator (ET) je jedna od najvažnijih komponenti u elektroenergetskom sistemu. Imajući u vidu potrebu za pouzdanim radom ET-a neophodno je razviti i primeniti pouzdan sistem zaštite ET-a koji ima sposobnost da selektivno i brzo identifikuje sve unutrašnje kvarove. Diferencijalna zaštita predstavlja osnovni tip zaštite velikih ET-a od unutrašnjih kvarova [1, 2]. Najveći nedostatak diferencijalne zaštite je to što može nepotrebno reagovati pri pojavi udarne struje magnećenja i prepobuđenosti ET-a. U praksi se izbegavanje nepotrebnog reagovanja usled pojave udarne struje magnećenja i prepobuđenosti ET-a vrši primenom blokade usled prisustva viših harmonika [1, 2]. Osim toga, zasićenje strujnih transformatora (ST-a) ima veliki uticaj na pravilan rad diferencijalne zaštite, kako tokom spoljašnjih kratkih spojeva (KS-eva), tako i tokom unutrašnjih KS-eva [3]. Da bi se obezbedio pouzdan rad diferencijalne zaštite tokom spoljašnjih kvarova praćenih zasićenjem ST-a koristi se karakteristika reagovanja sa dvostrukim nagibom. Međutim, primena drugog nagiba može uticati na osetljivost i brzinu reagovanja zaštite tokom unutrašnjih KS-eva. Istraživanja [4] pokazuju da u većini slučajeva nepotrebno reagovanje biva izbegnuto primenom blokade reagovanja zaštite usled prisustva viših harmonika.

U ovom radu je predstavljen novi algoritam za zaštitu tronamotajnih ET-a od unutrašnjih KS-eva koji se zasniva na faznoj komparaciji struja koje se mere na primaru, sekundaru i tercijeru ET-a. Za faznu komparaciju algoritam koristi digitalni fazni komparator [1, 5-8]. U radu je novi algoritam dodatno unapređen detektorom spoljašnjeg kvara čijom primenom se eliminiše mogućnost nepotrebnog reagovanja zaštite usled pojave zasićenja ST tokom spoljašnjih KS-eva. Testiranje i verifikacija rada predloženog algoritma su izvršeni primenom signala koji su

dobijeni računarskim simulacijama. Na osnovu sprovedenih testova pokazano je da je primenom novog algoritma uspešno prepoznato prisustvo unutrašnjih KS-eva. Takođe, pokazano je da detektor spoljašnjeg kvara može prepoznati prisustvo kvara van štićene zone pre nego što ST-i uđu u zasićenje i na taj način sprečiti nepotrebno reagovanje algoritma.

II. ZAŠTITA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Kvarovi u ET-u nastaju kao posledica slabljenja i oštećenja izolacije. Slabljenje i oštećenje izolacije mogu nastati kao posledica električnih i mehaničkih naprezanja. Zbog oštećenja izolacije u ET-u se javljaju unutrašnji kratki spojevi i tinjava pražnjenja. Osim unutrašnjih kratkih spojeva ET ugrožavaju i opasni pogonski uslovi kao što su: spoljašnji kratki spojevi i preopterećenja [1].

Fazna diferencijalna zaštita (FDZ) predstavlja najčešći tip zaštite svih ET-a čija je naznačena snaga veća od 8 MVA. Ova zaštita štiti ET od: međuzavojnih kratkih spojeva, kratkih spojeva između faza i jednofaznih kratkih spojeva ako je zvezdište transformatora direktno uzemljeno. Ukoliko je zvezdište ET uzemljeno preko aktivne otpornosti ili niskoomske impedanse, FDZ ne štiti ET od unutrašnjih jednofaznih kratkih spojeva već se koristi zemljospojna zaštita [1].

A. Fazna diferencijalna zaštita

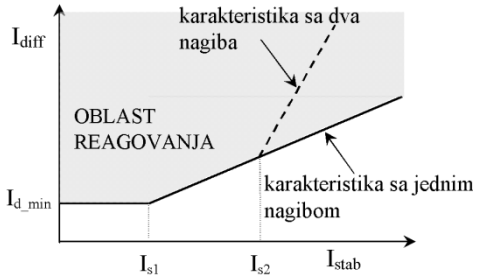
FDZ računa diferencijalnu i stabilizacionu struju i na osnovu njihovih vrednosti donosi odluku o reagovanju. Tipična karakteristika reagovanja FDZ prikazana je na Sl. 1. Diferencijalna i stabilizaciona struja, u skladu sa orijentacijom ST-a na Sl. 2, se računaju prema izrazima (1) i (2):

$$I_{diff} = \left| \underline{I}_p + \underline{I}_s + \underline{I}_t \right| \quad (1)$$

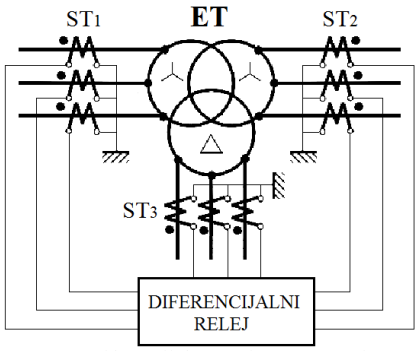
$$I_{stab} = k \cdot \left(\left| \underline{I}_p \right| + \left| \underline{I}_s \right| + \left| \underline{I}_t \right| \right) \quad (2)$$

gde su: $\underline{I}_p$, $\underline{I}_s$ i $\underline{I}_t$ - usaglašene struje primara, sekundara i tercijera respektivno, a k - kompenzacioni koeficijent.

FDZ predstavlja brzu i selektivnu zaštitu ET-a od unutrašnjih kratkih spojeva. Štićena zona FDZ nalazi se između (glavnih) strujnih transformatora. FDZ treba da detektuje kvarove koji se dogode unutar štićene zone i pravovremeno isključi transformator sa mreže.



Sl. 1. Tipična karakteristika reagovanja diferencijalnog releja

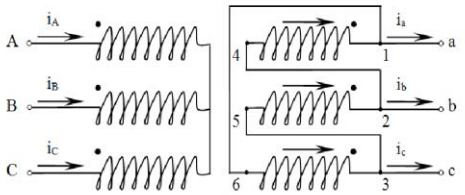


Sl. 2. Fazna diferencijalna zaštita tronamotajnog ET

Do pojave (lažne) diferencijalne struje koja nije posledica unutrašnjeg KS-a, a koja može dovesti do nepotrebnog reagovanja FDZ, dolazi usled: udarne struje magnećenja nastale prilikom uključenja neopterećenog ET-a, velike vrednosti struje magnećenja nastale usled prepobuđenosti ET-a i pojave zasićenja ST-a tokom spoljašnjih KS-eva. Eliminacija nepotrebnog reagovanja tokom uključenja neopterećenog ET i prepobuđenosti ET rešava se blokadom usled prisustva viših harmonika. Upotreba parnih harmonika, drugog i četvrtog, za blokiranje obezbeđuje sigurnost u radu prilikom pojave udarnih struja uključenja, dok se za blokadu nepravilnog reagovanja diferencijalne zaštite tokom prepobuđenosti ET-a koristi peti harmonik [2]. Za izbegavanje nepotrebnog reagovanja zaštite zbog pojave zasićenja ST-a tokom spoljašnjih KS-eva tradicionalno se primenjuje karakteristika reagovanja sa dvostrukim nagibom. Međutim, upotreba drugog nagiba može smanjiti osetljivost zaštite tokom detekcije unutrašnjih kvarova, dok je pravilan izbor drugog nagiba i prelomne tačke na karakteristici reagovanja dosta komplikovan, čemu dosta doprinosi i nelinearna priroda zasićenja ST-a. Takođe, istraživanja [4] pokazuju da u većini slučajeva, spoljašnjih KS-eva praćenih zasićenjem ST-a, nepotrebno reagovanje biva izbegnuto primenom blokade reagovanja zaštite usled prisustva viših harmonika dok drugi nagib nema udela u sprečavanju nepotrebnog reagovanja.

B. Usaglašavanje ulaznih signala struja za potrebe zaštite ET

Kod mikroprocesorske FDZ u odgovarajućim algoritmima obuhvataju se kompleksni koeficijent transformacije ET-a i prenosni odnosi glavnih ST-a [1]. Preslikavanje struja sa jedne na drugu stranu ET-a pomoću kompleksnog koeficijenta transformacije moguće je direktno primeniti samo u simetričnim režimima. U asimetričnim režimima moraju se prvo odrediti simetrične komponente, a zatim svaka od njih preslikati na drugu stranu transformatora, jer su koeficijenti transformacije različiti za pojedine simetrične komponente struje. Ovakav postupak je matematički zahtevan. Iz tog razloga bolje je izvršiti usaglašavanje struja na nivou trenutnih vrednosti i sa njima izračunati njihove fazore. Na osnovu Sl. 3 izvedene su relacije (3)-(5) između struja na strani trougla i struja na strani zvezde za dvonamotajni ET sprege Yd1.



Sl. 3 Energetski transformator sprege Yd1 [9]

$$i_a' = i_{41} - i_{63} = \frac{m_T}{\sqrt{3}}\left(i_A - i_C\right) \quad (3)$$

$$i_b' = i_{52} - i_{41} = \frac{m_T}{\sqrt{3}}\left(i_B - i_A\right) \quad (4)$$

$$i_c' = i_{63} - i_{52} = \frac{m_T}{\sqrt{3}}\left(i_C - i_B\right) \quad (5)$$

Kada se uzmu u obzir i prenosni odnosi ST-a na primaru (m_p) i sekundaru (m_s) ET-a relacije (3)-(5) postaju (6)-(8) [9], a poređenje struja u ovom slučaju se svodi na poređenje struje i_{as} sa strujom i_{as}', i_{bs} sa strujom i_{bs}' i i_{cs} sa strujom i_{cs}'.

$$i_{as}' = \frac{i_a'}{m_s} = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3} m_s}\left(i_{As} - i_{Cs}\right) \quad (6)$$

$$i_{bs}' = \frac{i_b'}{m_s} = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3} m_s}\left(i_{Bs} - i_{As}\right) \quad (7)$$

$$i_{cs}' = \frac{i_c'}{m_s} = \frac{m_T m_p}{\sqrt{3} m_s}\left(i_{Cs} - i_{Bs}\right) \quad (8)$$

$$i_{as} = \frac{i_a}{m_s}\ ,\ i_{bs} = \frac{i_b}{m_s}\ \ i\ \ i_{cs} = \frac{i_c}{m_s} \quad (9)$$

gde su: i_{As}, i_{Bs}, i_{Cs} – sekundarne struje ST-a na primaru ET-a u fazama A, B, C, respektivno; i_{as}, i_{bs}, i_{cs} - sekundarne struje ST-a na sekundaru ET-a u fazama a, b, c, respektivno.

III. DETEKCIJA KVAROVA PRIMENOM FAZNE KOMPARACIJE STRUJA

U cilju boljeg razumevanja primene fazne komparacije za zaštitu ET, koja je primenjena u ovom radu, ukratko je opisan digitalni fazni komparator koji je predstavljen u [1] i primenjen u [5-9]. Nakon toga je objašnjen način detekcije unutrašnjih kvarova primenom fazne komparacije struja.

A. Digitalni fazni komparator

Digitalni fazni komparator koji je primenjen u ovom radu se zasniva na proračunu integrala proizvoda signala struja na intervalu dužine polovine osnovne periode signala. Normalizovana vrednost ovog integrala je dobijena njegovim deljenjem sa efektivnim vrednostima signala struja koje se fazno porede. Na taj način normalizacijom je dobijen indeks koji je korišćen kao pokazatelj faznog pomeraja između dva signala struja. Dakle, digitalna fazna komparacija dva signala (i_1) i (i_2) vrši se korišćenjem izraza (10):

$$DFK_{12}(r.j.) = \frac{\frac{2}{m}\sum_{n=1}^{m/2} i_1(n)\cdot i_2(n)}{I_{RMS1}\cdot I_{RMS2}} \quad (10)$$

gde su: m broj odbiraka u osnovnoj periodi signala, $i_1(n)$ – n-ti odbirak struje i_1, $i_2(n)$ – n-ti odbirak struje i_2, I_{RMS1} i I_{RMS2} pokazatelji efektivnih vrednosti struja i_1 i i_2 koji se računaju primenom izraza (11).

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{2}{m}\sum_{n=1}^{m/2}\left(i(n)\right)^2} \quad (11)$$

Ukoliko su struje i_1 i i_2 prostoperiodične tada je izraz (10) jednak kosinusu ugla koji predstavlja fazni pomeraj između ove dve struje:

$$\cos\varphi = DFK_{12}(r.j.) \quad (12)$$

gde je $\varphi = \angle\left(\underline{I}_1, \underline{I}_2\right)$.

B. Osnovni princip reagovanja

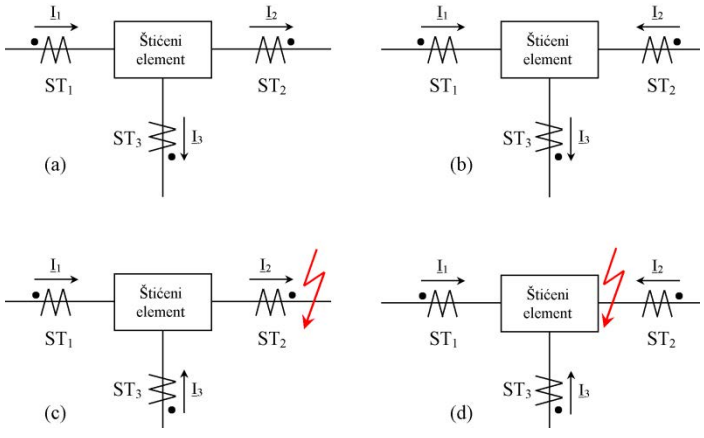
Prvo će biti analiziran monofazni tronamotajni ET sprege 0 koji je na Sl. 4 označen kao štićeni element. Na njegovom primarnom, sekundarnom i tercijernom kraju su priključeni strujni transformatori ST_1, ST_2 i ST_3, respektivno. U normalnim uslovima rada suma struja koja ulazi u štićenu zonu jednaka je sumi struja koje je napuštaju. Na Sl. 4.a prikazan je smer struja za jedan slučaj normalnih uslova rada. U štićenu zonu ulazi jedna struja $\underline{I}_1$, a napuštaju je dve $\underline{I}_2$ i $\underline{I}_3$. Fazni pomeraj između parova struja je takav da su struje:

- $\underline{I}_1$ i $\underline{I}_2$ fazno pomerene za 180^0, indeks DFK_{12}=-1;
- $\underline{I}_1$ i $\underline{I}_3$ fazno pomerene za 180^0, indeks DFK_{13}=-1; i
- $\underline{I}_2$ i $\underline{I}_3$ u fazi, indeks DFK_{23}=1.

Sl. 4.b takođe prikazuje normalne uslove rada kada u štićenu zonu ulaze dve struje $\underline{I}_1$ i $\underline{I}_2$, a napušta je jedna struja $\underline{I}_3$. Fazni pomeraj između parova struja je takav da su struje:

- $\underline{I}_1$ i $\underline{I}_2$ u fazi, indeks DFK_{12}=1;
- $\underline{I}_1$ i $\underline{I}_3$ fazno pomerene za 180^0, indeks DFK_{13}=-1; i
- $\underline{I}_2$ i $\underline{I}_3$ fazno pomerene za 180^0, indeks DFK_{23}=-1.

Neka je svaka strana ET-a povezana sa aktivnom mrežom, u slučaju da se dogodi spoljašnji kvar (Sl. 4.c), u štićenu zonu će ući dve struje $\underline{I}_1$ i $\underline{I}_3$, a napustiće je jedna struja $\underline{I}_2$. Posmatrajući fazni pomeraj između svih parova struja dva para će biti fazno pomerena za 180^0, a jedan par će biti u fazi, odnosno dva indeksa *DFK* će biti jednaka -1, a jedan 1. U slučaju pojave unutrašnjeg kvara (Sl 1.d) sve tri struje će ući u zonu zaštite, a svi parovi struja ($\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$), ($\underline{I}_1$, $\underline{I}_3$) i ($\underline{I}_2$ i $\underline{I}_3$) će biti u fazi i sva tri indeksa *DFK* će biti jednaka 1.



Sl. 4 Smerovi struja tokom (a) i (b) normalnih uslova rada, (c) spoljašnjeg KS i (d) unutrašnjeg KS

Ukoliko se dogodi unutrašnji KS na strani ET koja je povezana sa pasivnom mrežom, tada je na toj strani ET struja koju meri ST jednaka 0. Pretpostavimo da je na Sl. 4.d sekundar ET povezan na pasivnu mrežu, a primar i tercijer na aktivne, struja koju meri ST_2 jednaka je 0. Odluka o tome da je KS unutar zone će biti doneta na osnovu toga što su struje ($\underline{I}_1$, $\underline{I}_3$) u fazi. U slučaju da je primar ET povezan na aktivnu, a sekundar i tercijer napajaju pasivne mreže, tada u štićenu zonu struja kvara dolazi samo sa strane koja je povezana na aktivnu mrežu i kvar se može detektovati primenom prekostrujne funkcije uočavanjem da je samo jedna od tri struje, koje se dovode releju, veća od podešene granične vrednosti.

U algoritmu je usvojeno da za struju koja je manja od $0{,}1I_{nom}$ odgovarajuća dva pokazatelja, koji se proračunavaju na osnovu nje, se izjednačavaju sa -1. Na taj način će ti pokazatelji biti isključeni iz donošenja odluke o prisustvu unutrašnjeg kvara.

U slučaju trofaznog tronamotajnog ET proizvoljne sprege potrebno je izvršiti fazno usaglašavanje struja na primaru, sekundari i tercijeru, i nakon toga za svaku fazu pojedinačno se može primeniti princip zaključivanja koji je gore izložen.

IV. NOVI ALGORITAM

U ovom poglavlju opisani su koraci algoritma za zaštitu tronamotajnog ET koji se bazira na faznoj komparaciji struja na primaru, sekundaru i tercijeru. Na ulaz algoritmu dovode se struje sa primara ET ($i_{A\text{-}prim}$, $i_{B\text{-}prim}$, $i_{C\text{-}prim}$), sekundara ($i_{A\text{-}sek}$, $i_{B\text{-}sek}$, $i_{C\text{-}sek}$) i tercijera ($i_{A\text{-}terc}$, $i_{B\text{-}terc}$, $i_{C\text{-}terc}$). Da bi algoritam mogao da korektno radi neophodno je izvršiti fazno usaglašavanje struja primara, sekundara i tercijera. Tok algoritma za jednu fazu je prikazan na Sl. 5., a koraci algoritma su:

Korak 1:

U prvom koraku vrši se A/D konverzija signala sa definisanom periodom odabiranja.

Korak 2:

U drugom koraku vrši se fazno usaglašavanje struja primara, sekundara i tercijera. Tako da se dobiju usaglašene struje i_{A1}, i_{A2} i i_{A3}. Za tronamotajni ET sprege YNyn0d1 prema relaciji (6) dobija se da su ove struje jednake:

$$i_{A1} = \frac{m_{T13} m_p}{\sqrt{3} m_t} \left(i_{A\text{-prim}} - i_{C\text{-prim}} \right) \quad (13)$$

$$i_{A2} = \frac{m_{T23} m_s}{\sqrt{3} m_t} \left(i_{A\text{-sek}} - i_{C\text{-sek}} \right) \quad (14)$$

$$i_{A3} = \frac{i_{A\text{-terc}}}{m_t} \quad (15)$$

gde su: m_{T13} – prenosni odnos ET primar - tercijer i m_{T23} – prenosni odnos ET sekundar - tercijer, m_t - prenosni odnos ST-a na tercijeru.

Odbirci prilagođenih signala se smeštaju u posebne vektore dužine *m/2*, gde je *m* paran broj odbiraka u jednoj periodi signala. Za svaku fazu formiraju se po tri pomoćna vektora u kojima se nalaze odbirci ulaznih signala:

$$\left[i_{A1}(1) \quad i_{A1}(2) \quad \ldots \quad i_{A1}(m/2) \right] \quad (16)$$

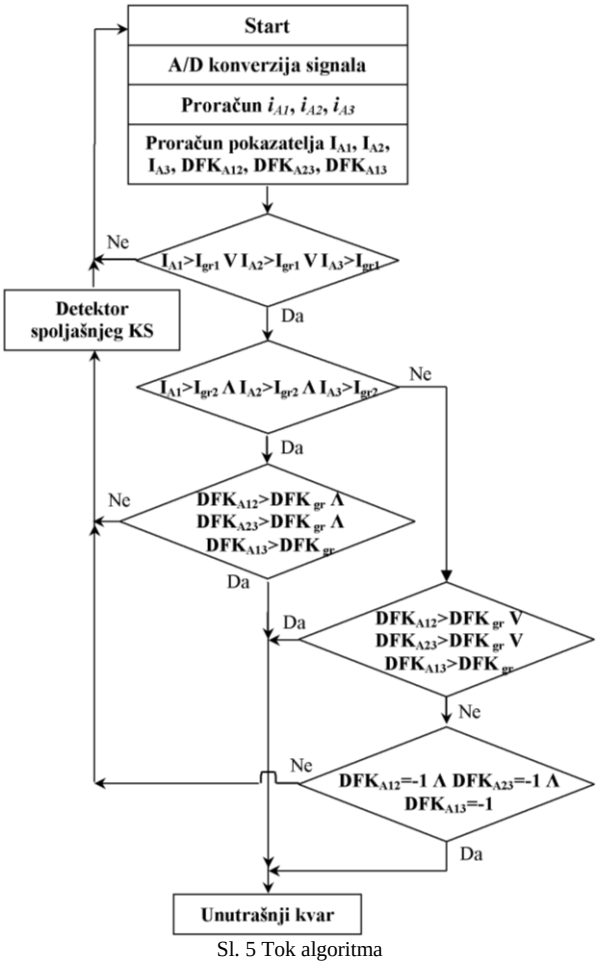
$$\left[i_{A2}(1) \quad i_{A2}(2) \quad \ldots \quad i_{A2}(m/2) \right] \quad (17)$$

$$\left[i_{A3}(1) \quad i_{A3}(2) \quad \ldots \quad i_{A3}(m/2) \right] \quad (18)$$

gde su:

$i_{A1}(n)$, $i_{A2}(n)$, $i_{A3}(n)$ – n-ti odbirak prilagođene struje primara, sekundara i tercijera transformatora respektivno.

Nakon uzimanja svakog novog odbirka izvršava se aktualizacija vektora tako što se najstariji član, sa indeksom 1 odbaci, ostalim članovima se indeksi smanje za jedan, a novi član se upiše na poslednju poziciju i dodeli mu se indeks *m*/2.



Sl. 5 Tok algoritma

Korak 3:

Vrši se proračunavanje potrebnih pokazatelja efektivnih vrednosti: I_{A1}, I_{A2} i I_{A3}, i indeksa usmerenosti: DFK_{A12}, DFK_{A23} i DFK_{A13} pomoću izraza (10) i (11).

Korak 4:

Zatim se posmatra da li je bilo koji od pokazatelja efektivnih vrednosti struja na primaru, sekundaru i tercijeru veći od definisane granične vrednosti I_{gr1}. Ukoliko je ovaj uslov ispunjen algoritam prelazi na naredni korak (moguće je prisustvo kvara), u suprotnom se vraća na početak.

Granična vrednost struje I_{gr1} sa kojom se porede pokazatelji efektivnih vrednosti je podešena na 120% nominalne vrednosti odgovarajuće struje (I_{nom}) transformatora.

Korak 5:

U ovom koraku se proverava da li su svi pokazatelji efektivnih vrednosti struja na primaru, sekundaru i tercijeru veći od minimalne granične vrednosti I_{gr2}=0,1I_{nom}. Na ovaj način se proverava prisustvo struje na odgovarajućoj strani transformatora.

Ukoliko je ovaj uslov ispunjen algoritam prelazi na naredni korak, u suprotnom prelazi na korak 7.

Korak 6:

U ovom koraku se vrši provera da li su vrednosti sva tri indeksa usmerenosti: DFK_{A12}, DFK_{A23} i DFK_{A13} veća od definisanog praga DFK_{gr}. U algoritmu koji je ovde testiran podešeno je DFK_{gr}=-0,707 r.j. Ako je ispunjen uslov (19) fazni pomeraj (φ) između struja i_i i i_j (i, j=1,2,3, $i \neq j$) se nalazi u sledećim granicama: $-135 < \varphi < 135$, što bi ukazivalo na to da je detektovano prisustvo unutrašnjeg kvara i algoritam prelazi na korak 9. U suprotnom moguće je prisustvo spoljašnjeg kavara (poremećaja) i algoritam se vraća na početak.

$$DFK_{ij} > DFK_{gr} \quad (19)$$

Do narednih koraka algoritam će doći ukoliko je na nekoj od strana transformatora struja manja od 0,1I_{nom}.

Korak 7:

Ako se transformator nalazi između dve aktivne i jedne pasivne mreže struja kvara dotiče sa dve strane. Tako da je za detekciju kvara potrebno/dovoljno da samo jedan od indeksa usmerenosti bude veći od granične vrednosti.

U ovom koraku se vrši provera da li je bilo koji od tri indeksa usmerenosti: DFK_{A12}, DFK_{A23} i DFK_{A13} veći od definisanog praga DFK_{gr}, što bi ukazalo na to da je detektovano prisustvo unutrašnjeg kvara. Ukoliko je uslov ispunjen algoritam prelazi na korak 9. U suprotnom prelazi na korak 8.

Korak 8:

U ovom koraku vrši se provera da li su sva tri indeksa usmerenosti: DFK_{A12}, DFK_{A23} i DFK_{A13} jednaka -1. Ovaj uslov će biti ispunjen u slučaju da su struje na dva kraja ET manje od 0,1I_{nom}. Ukoliko je ovaj uslov ispunjen algoritam prelazi na korak 9. Prepoznat je unutrašnji kvar na osnovu toga što je struja na jednoj od strana ET veća od I_{gr1}=1,2I_{nom} (korak 4), a druge dve su manje od I_{gr2}=0,1I_{nom} (sva tri indeksa DFK su jednaka -1). Ukoliko uslov nije ispunjen algoritam se vraća na početak.

Korak 9:

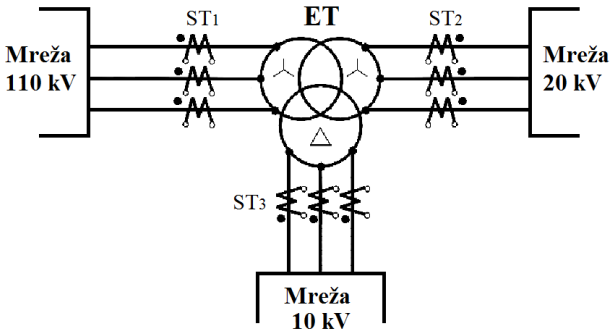
Detektovano je prisustvo unutrašnjeg kvara i aktivirana se signal za reagovanje.

Da bi se izbeglo nepotrebno reagovanje algoritma usled pojave zasićenja ST tokom spoljašnjih KS algoritam je dopunjen detektorom spoljašnjeg kvara do koga se u algoritmu dolazi nakon negativnog izlaza iz uslova u koraku 6 ili negativnog izlaza iz uslova u koraku 8. Negativni izlazi iz uslova u koraku 6 i koraku 8 ukazuju na prisustvo preopterećenja ili KS van štićene zone.

Detektor spoljašnjeg kvara proverava da li su dva od tri pokazatelja efektivnih vrednosti struja na primaru, sekundaru i tercijeru veća od I_{gr3}=1,7$I_{nom.}$ Ukoliko je uslov ispunjen aktivira se signal za blokadu reagovanja zaštite. U suprotnom se vraća na početak glavnog algoritma.

V. TESTIRANJE ALGORITMA I REZULTATI

Algoritam koji je predstavljen u prethodnom poglavlju je testiran signalima koji su generisani računarskim simulacijama. Model za simulaciju odgovara šemi koja je prikazana na Sl. 6. Transformator je prenosnog odnosa 110/21/10,5 kV/kV/kV, naznačene snage S_n=31,5 MVA, sprege YNyn0d1, zvezdište primara transformatora je direktno uzemljeno, a zvezdište sekundara je uzemljeno preko otpornika R=40 Ω. Simulacijama



Sl. 6 Šema modela za simulaciju kvarova

su obuhvaćene sve vrste unutrašnjih i spoljašnjih kratkih spojeva na primaru, sekundaru i tercijeru za tri test modela:

Model 1: sve tri mreže 110kV, 20kV i 10kV su aktivne;

Model 2: dve mreže 110kV i 20kV su aktivne, a mreža 10kV je pasivna (odnosno sačinjena od pasivnih potrošača); i

Model 3: mreža 110kV je aktivna, a dve mreže 20kV i 10kV su pasivne.

Signali koji su dobijeni simulacijama su propušteni kroz model strujnog transformatora *IEEE PSRC CT SAT* koji je detaljno predstavljen u [10]. Primenom ovog modela dobijeni su signali struja tokom zasićenja ST-a, koji su dalje korišćeni za testiranje algoritama za zaštitu tronamotajnog ET.

Pomoću signala dobijenih računarskim simulacijama testiran je i upoređen rad:

1) Algoritma koji se zasniva na digitalnom faznom komparatoru koji je predstavljen u ovom radu.

2) Algoritma koji se zasniva na diferencijalnom principu. Korišćena je tipična karakteristika reagovanja (Sl. 1) sa dva nagiba gde su: $I_{d,min}$=0,3 r.j., $I_{s,1}$=1 r.j., $I_{s,2}$=3 r.j., nagibi m_1=0,25 i m_2=0,5, a diferencijalna struja i stabilizaciona su izračunate pomoću izraza (1) i (2), gde je k=1/3.

A. Rezultati simulacija

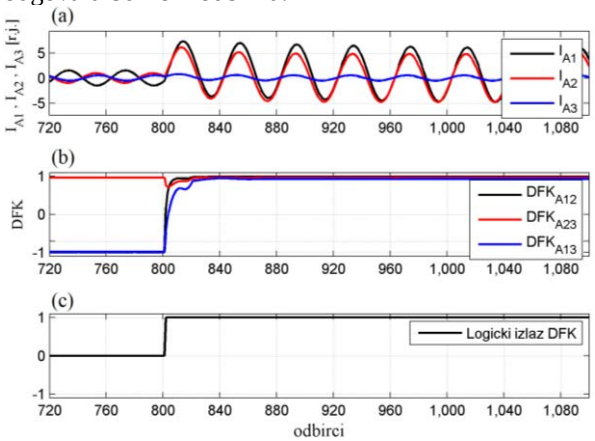
Primeri 1-3 će biti predstavljeni slikama (a) - (c). Slike (a) prikazuju talasne oblike usaglašenih stuja primara (i_1), sekundara (i_2) i tercijera (i_3) u fazi koja je pogođena kvarom, slike (b) prikazuju indekse DFK_{12}, DFK_{23} i DFK_{13}, a slike (c) prikazuju odluku reagovanja novog algoritma.

Frekvencija odabiranja signala je 2 kHz. U svim primerima trenutak nastanka kvara odgovara 800-tom odbirku.

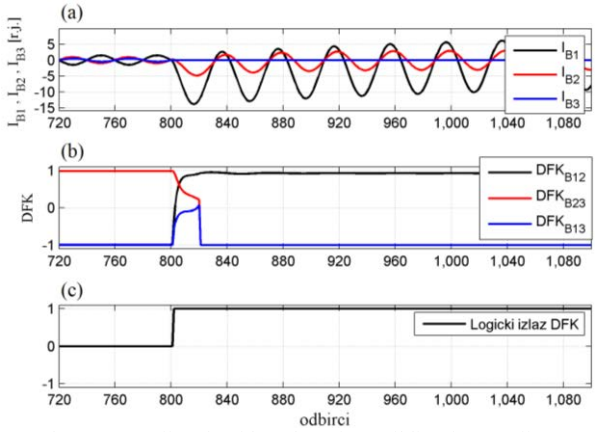
Primer 1: Mreže 110 kV, 20 kV i 10 kV su aktivne. Simuliran je unutrašnji dvofazni kratak spoj faza A i B na priključcima sekundara. Sl. 7 prikazuje rezultate za fazu A.

Primenom novog algoritma unutrašnji kvar, na osnovu rezultata za fazu A, je prepoznat nakon 1 ms od uspostavljanja KS, što na Sl. 7 odgovara 802-om odbirku.

Primer 2: Mreže 110 kV i 20 kV su aktivne, mreža 10 kV pasivna. Simuliran je unutrašnji trofazni kratak spoj na priključcima tercijera. Sl. 8 prikazuje rezultate za fazu B. Primenom novog algoritma unutrašnji kvar, na osnovu rezultata za fazu B, je prepoznat nakon 1 ms od uspostavljanja KS, što na Sl. 8 odgovara 802-om odbirku.

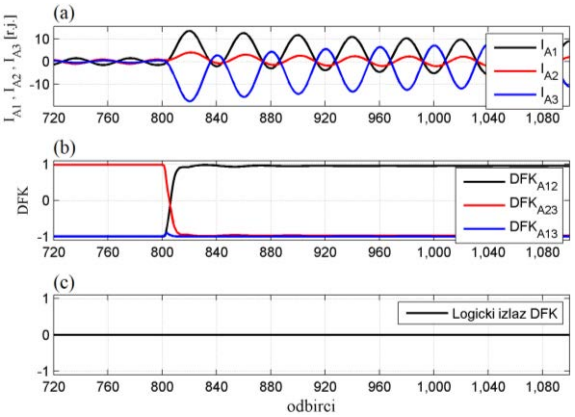


Sl. 7 Unutrašnji dvofazni kratak spoj na priključcima sekundara



Sl. 8 Unutrašnji trofazni kratak spoj na priključcima tercijera

Primer 3: Mreže 110 kV i 20 kV su aktivne, mreža 10 kV pasivna. Simuliran je spoljašnji dvofazni kratak spoj faza A i B na strani tercijera. Sl. 9 prikazuje rezultate za fazu A. Kao što je očekivano, u slučaju spoljašnjeg KS novi algoritam ne bi reagovao.

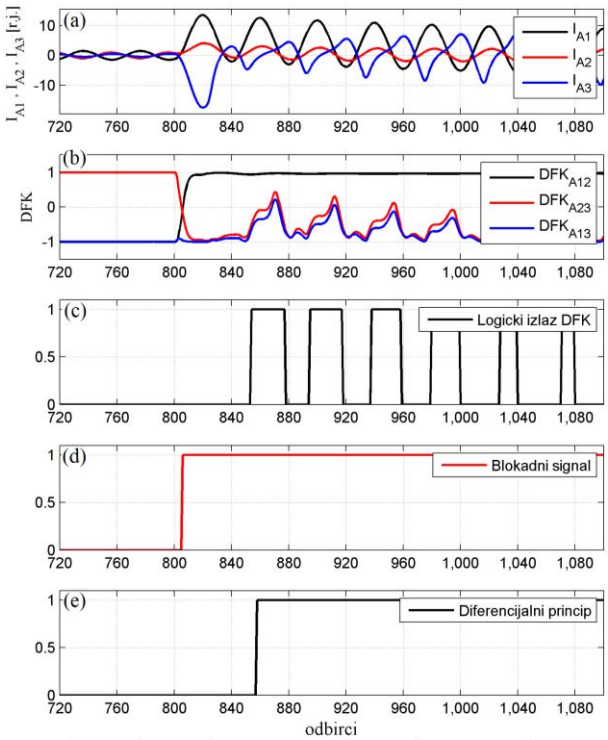


Sl. 9 Spoljašnji dvofazni kratak spoj na strani tercijera bez zasićenja ST

Primer 4: Mreže 110 kV i 20 kV su aktivne, mreža 10 kV pasivna. Simuliran je spoljašnji dvofazni kratak spoj faza A i B na strani tercijera praćen zasićenjem ST.

Na Sl. 10.a može se uočiti da je ST na tercijeru ušao u zasićenje u trenutku koji odgovara 823 odbirku, odnosno t=11,5ms od uspostavljanja KS. Na Sl. 10.c i Sl. 10.e se može uočiti da bi novi algoritam (bez detektora spoljašnjeg kvara) i algoritam zasnovan na diferencijalnom principu nepotrebno reagovali 27 ms (854. odbirak) i 29 ms (858. odbirak) od uspostavljanja KS respektivno. Treba napomenuti da u ovom slučaju nije posmatrana blokada usled prisustva viših harmonika.

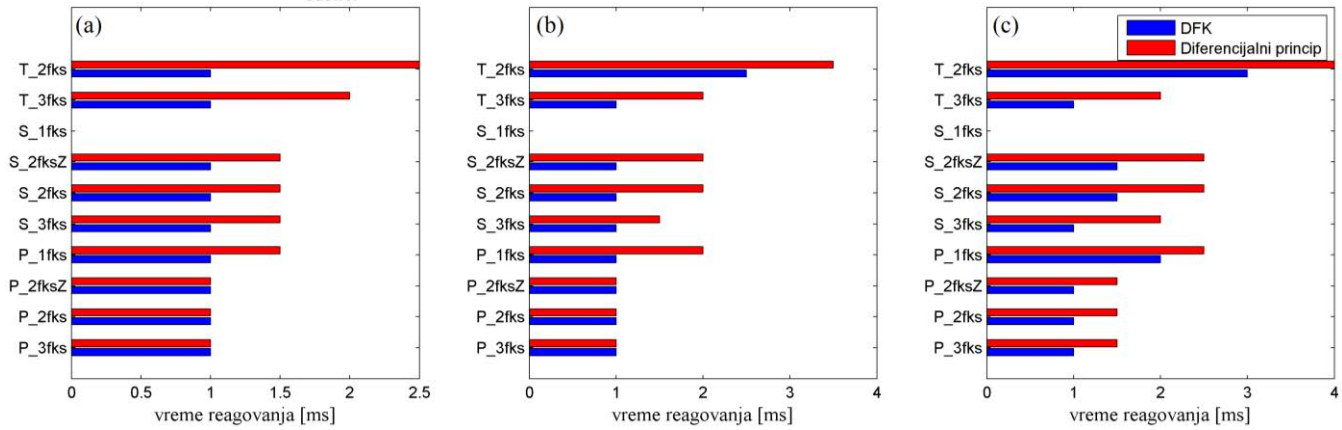
Detektor spoljašnjeg kratkog spoja, kojim je dopunjen novi algoritam, je aktivirao signal za blokiranje nepotrebnog reagovanja (Sl. 10.e) 3 ms nakon uspostavljanja KS. Može se zaključiti da bi detektor spoljašnjeg kvara prepoznao prisustvo spoljašnjeg kvara i aktivirao blokadni signal pre nego što bi ST ušao u zasićenje. Na taj način njegovom primenom nepotrebno reagovanje zaštite bi bilo sprečeno.



Sl. 10 Spoljašnji dvofazni kratak spoj na strani tercijera sa zasićenjem ST

B. Vremena reagovanja pri unutrašnjim KS

Na Sl. 11 su prikazana vremena reagovanja novog algoritma i algoritma koji se zasniva na diferencijalnom principu za sve vrste unutrašnjih KS na primaru, sekundaru i tercijeru za tri test modela. Može se uočiti da je pri svim posmatranim KS-evima novi algoritam detektovao prisustvo unutrašnjeg KS-a jednako brzo ili brže od algoritma koji se zasniva na diferencijalnom principu. Dok, oba algoritma nisu reagovala pri jednofaznom KS na sekundaru ET (S_1fks) čije je zvezdište uzemljeno preko aktivne otpornosti. ET čije je zvezdište uzemljeno preko aktivne otpornosti od unutrašnjih jednofaznih kratkih spojeva se štiti primenom zemljospojne zaštite.



Sl. 11 Vremena reagovanja pri unutrašnjim KS-evima na primaru (P), sekundaru (S) i tercijeru (T): (a) Model 1, (b) Model 2 i (c) Model 3

VI. ZAKLJUČAK

U radu je predstavljen novi algoritam za zaštitu tronamotajnih ET-a od unutrašnjih kratkih spojeva koji se zasniva na primeni digitalne fazne komparacije struja koje se mere na primaru, sekundaru i tercijeru ET-a. Digitalnom faznom komparatoru je dodata i prekostrujna funkcija da bi se realizovala selektivna zaštita u slučaju kada ET ima samo jedan od svoja tri namotaja povezan na aktivnu mrežu, a druga dva namotaja napajaju pasivne mreže. Testovi su pokazali da se primenom ovog algoritma mogu prepoznati unutrašnji kratki spojevi i omogućiti pravovremeno reagovanje. Novi algoritam dopunjen detektorom spoljašnjeg kratkog spoja čijom upotrebom bi bilo sprečeno nepotrebno reagovanje zaštite tokom spoljašnjih kratkih spojeva praćenih zasićenjem ST-a.

ZAHVALNICA

Autori zahvaljuju Ministarstvu prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije koje je omogućilo izradu ovog rada u okviru Projekta III 42009 "Inteligentne energetske mreze".

REFERENCE

[1] M. Đurić, Z. Stojanović "Relejna zaštita", Beopres, Beograd 2014.

[2] IEEE Standard C37.91, "IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power Transformers"

[3] Guzmán, A., Zocholl, S., Benmouyal, G., Altuve, H.: "A Current-Based Solution for Transformer Differential Protection—Part I: Problem Statement", IEEE Transactions On Power Delivery, 2001, 16, (4), pp 485-491.

[4] Stanbury, M., Djekic, Z.: 'The Impact of Current-Transformer Saturation on Transformer Differential Protection', IEEE Transactions on Power Delivery, June 2015, 30, (3), pp.1278 – 1287.

[5] Stojanović, Z., Djurić, M.: 'The algorithm for directional element without dead tripping zone based on digital phase comparator', Electric Power Systems Research, 2011, 81, pp. 377–383.

[6] J. Krstivojevic, M. Djurić: 'A New Method of Improving Transformer Restricted Earth Fault Protection', Advances in Electrical and Computer Engineering, 2014, 14; (3), pp. 41-48.

[7] J. Krstivojevic, M. Djuric, "A New Algorithm for Avoiding Maloperation of Transformer Differential Protection", The 10th Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission Distribution and Energy Conversion, MEDPOWER 2016, Belgrade, Serbia, November 6-9, 2016, pp. 1-6.

[8] J. Krstivojević, M. Đurić, "Primena digitalne fazne komparacije u diferencijalnoj zaštiti energetskog transformatora", Energija, Ekonomija, Ekologija, br 3-4, mart 2015. ISSN: 0354-8651, str 129 – 135.

[9] J.Krstivojević: "Digitalna zaštita energetskih transformatora od unutrašnjih kvarova", Doktorska disertacija, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, 2015.

[10] Tziouvaras, D.A., McLaren, P., Alexander, G., Dawson, D., Esztergalyos, J., Fromen, C., Glinkowski, M., et al., 'Mathematical Models for Current, Voltage, and Coupling Capacitor Voltage Transformers', IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15, (1), pp. 62 – 72.

AUTHORS

First Author – Jelisaveta Krstivojević, docent, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Republika Srbija, j.krstivojevic@etf.rs .
Second Author – Zoran Stojanović, vanredni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Republika Srbija, stojanovic@etf.rs.
Third Author – Milenko Đurić, redovni profesor, Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11000 Beograd, Republika Srbija, mdjuric@etf.rs.

Correspondence Author – Jelisaveta Krstivojević, j.krstivojevic@etf.rs, +381113218340.

Problematika priključenja vetroelektrana na prenosnu mrežu EMS ad

Issues of Grid Integration of Wind Farms to the transmission network JSC EMS

Saša Zdravković, Milan Blažić, Branko Šumonja, Marija Đorđević, Julijana Vićovac, Nebojša Đurin

AD ELEKTROMREŽA SRBIJE

Apstrakt **–** U 2018. i 2019. godini realizovana su prva priključenja vetroparkova na prenosnu mrežu EMS AD. U kratkom vremenskom periodu 4 vetroelektrane su ušle u pogon i bilo je neophodno, uz veliko angažovanje zaposlenih, prilagoditi niz procedura i pravilnika kako bi se zaključili Ugovori o eksploataciji vetroelektrana. Zbog stohastičnosti pojave vetra posebno će biti obrađena prognoza proizvodnje vetroelektrana i njen odnos prema ostvarenoj proizvodnji. Kako se zaposleni unutar EMS AD prvi put susreću sa ovakvim vidom proizvodnih kapaciteta rad sadrži realne podatke o meteorološkim parametrima koji utiču na proizvodnju električne energije iz vetroelektrana. Pošto su sve 4 vetroelektrane na bliskoj geografskoj lokaciji takođe će biti analiziran i uticaj na tokove snaga, planiranje rada i balansiranje elektroenergetskog sistema.

Ključne reči **–** vetroelektrane, planiranje rada EES, tokovi snaga, kriva snage, obnovljivi izvori energije, povlašćeni proizvođač električne energije.

Abstract **-** in 2018 the first connections of wind farms to the transmission network EMS have been realized. In a short period of time, the total of four (4) wind farms were put into operation and, therefore, with engaging a lot of employees, it was necessary to modify and adapt a number of procedures and regulations in order to conclude all the Wind Energy Exploitation Agreements. Due to the stochasticity of the wind phenomenon, the forecast of wind farm production and its relation to the achieved energy production shall be addressed. As the employees of JSC EMS meet for the first time with this type of production capacities, the paper contains real data on meteorological parameters that influence the production of electricity from wind farms. Since all four (4) wind farms are located in the same geographical area, their impact on power flows, operational planning and balancing of the electrical power system shall be analyzed.

Key words **–** wind power plants, power system planning, power flows, power curve, renewable energy sources, feed in tariff.

1.UVOD

Uskladu sa aktuelnim i rastućim problemom nedostatka energije i njenog najkomfornijeg oblika - električnom energijom, već duže vreme je prepoznata potreba za izgradnjom novih proizvodnih kapaciteta u EES-u Republike Srbije. Ulazeći u koštac sa sve većim ekološkim problemima koji su uzrokovani proizvodnjom energije iz fosilnih goriva, Republika Srbija se obavezala da će do 2020. godine povećati udeo u proizvedenoj električnoj energiji iz obnovljivih izvora energije, odnosno izvora energije koji su definisani kao obnovljivi. Imajući u vidu ograničavanje emisije gasova staklene bašte, prihvaćene su obaveze u skladu sa Ugovorom o energetskoj zajednici sa EU, u smislu povećanja udela obnovljivih izvora energije u finalnoj potrošnji energije sa 21.2% u 2015. godini, na 27% do 2020. godine, što je, kako se ispostavilo, predstavljalo vrlo ambiciozan cilj.

Kako bi se povećao udeo proizvedene energije iz obnovljivih izvora bilo je potrebno napraviti odgovarajući pravni i zakonodavni okvir u cilju podsticanja investicija u kapacitete koji vrše konverziju raznih oblika energije Sunca i vode zarad proizvodnje električne energije. Pomenuto je sadržano u strategiji Vlade Republike Srbije koja je predstavljena 2006. [1]. Ono što je glavni rezultat strategije, nekoliko godina potom, je „*Uredba o podsticajnim merama za proizvodnju električne energije iz obnovljivih izvora i iz visokoefikasne kombinovane proizvodnje električne i toplotne energije"*. Ona je kao srž regulatornog okvira za razvoj OIE definisala povlašćenog proizvođača električne energije, koji dobija garantovani otkup električne energije po regulisanoj ceni (*Feed-in Tariff*) za konkretan period (12 godina).

2. VETROELEKTANE NA TERITORIJI REPUBLIKE SRBIJE

Prva farma vetroelektrana u Evropi je puštena u pogon 1982. godine, i od tada je, prateći aktuelne događaje, od kojih treba izdvojiti nesreće sa nuklearnim elektranama, zastupljenost vetroagragata u proizvodnim kapacitetima doživela neverovatnu ekspanziju.

Prve četiri vetroelektrane, koje su priključene na EES Republike Srbije, u trenutku pisanja ovog rada, su dobile ili su u procesu dobijanja statusa povlašćenog proizvođača električne energije i

priključene su na prenosni sistem u toku 2018. i 2019. godine. Iako je tehnologija proizvodnje električne energije iz vetra odavno poznata, ipak je kreirala brojne izazove u raznim delovima celokupnog elektroenergetskog sistema. Prevashodno se misli na upravljanje EES-om, ali takođe eksploatacija i tržište električne energije su morali da odgovore na brojne probleme sa kojima se pre 2018. godine nisu sretali.

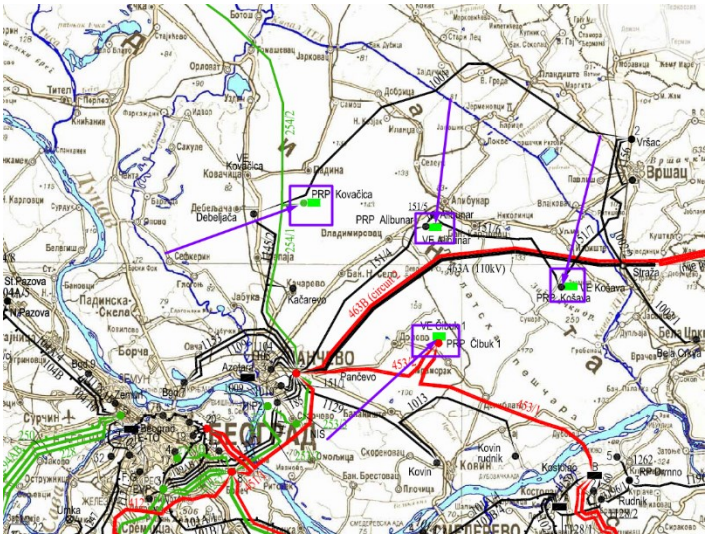
Zbog nekoliko uzroka koje nećemo pominjati, vetroelektrane odnosno vetroparkovi tek od bliže prošlosti postaju zastupljeni kao proizvodni kapaciteti u zemljama bivše Jugoslavije. Ova činjenica ima svoje dobre strane u tome što je ceo proces razvoja nekoliko generacija vetroturbina preskočen i što su sa stanovišta integracije u prenosni sistem u EES Republike Srbije ugrađene turbine koje imaju najsavremenije aspekte regulacije i upravljanja proizvodnjom aktivne i reaktivne energije. Ono što ne ide u prilog je da je u veoma kratkom periodu na prenosni sistem priključeno više od 300 MW instalisane snage.

Vetroturbine priključene na EES Republike Srbije su sa varijabilnom brzinom i dvostrano napajanim asinhronim generatorima, sa pretvaračem u kolu rotora. Vetrogenerator se odlikuje povećanim stepenom iskorišćenja vetra, poboljšanim upravljanjem i stepenom iskorišćenja, a samim tim i većom godišnjom proizvodnjom. Vetrogeneratori se sastoje se od tri elise, horizontalno postavljenom osovinom sa prečnikom od 120 metara. Rotor i kabina su postavljeni na vrhu stuba visine oko 110 metara. Vetroagregat je opremljen mehanizmom za aktivno zakretanje lopatica rotora (*pitch system*) kojim upravlja mikroprocesorski upravljački uređaj. On osigurava optimalno prilagođavanje ugla zakretanja lopatica brzini vetra. Pored toga, opremljen je aktivnim mehanizmom za zakretanje (*yaw system*) koji kontinuirano zakreće kabinu u smeru strujanja vetra. Kombinacijom navedenih načina regulacije brzine obrtanja turbine, osigurava se optimalna proizvodnja električne energije u svim uslovima brzine vetra kao i mehanička zaštita elisa vetroturbine u uslovima vrlo jakih vetrova (>25 m/s).

Ovakav tip turbine ne može proizvoditi električnu energiju ako nije povezan na prenosnu mrežu jer je napajanje sopstvene potrošnje moguće jedino sa strane prenosne mreže. Navedeno ne stvara problem sa trošenjem reaktivne snage iz mreže jer ugrađeni modeli vetroturbine mogu raditi i u kapacitivnom i u reaktivnom režimu, pa čak i u situacijama kada ne proizvode aktivnu snagu. Prema svim vetroparkovima EMS AD je postavio zahtev za automatskim radom u regulaciji napona.

U drugoj polovini 2018. godine i prvoj polovini 2019. godine, na sva tri naponska nivoa prenosne mreže EES Republike Srbije (400 kV, 220 kV i 110 kV) realizovana su priključenja 4 vetroelektrane. Sve tri elektrane se nalaze u prečniku od 50 km, u rejonu južnog Banata.

VE Čibuk 1 je prvi vetropark povezan na prenosni sistem EMS AD. Priključenje je obavljeno 06.09.2018. godine na naponski nivo 400kV. Ukupna instalisana snaga celog vetroparka je 158,46 MW i do kraja 2018. godine je sukcesivno pušteno u pogon svih 57 vetroturbina. VE Alibunar je priključen na prenosni sistem 23.11.2018. godine sa ukupnom instalisanom



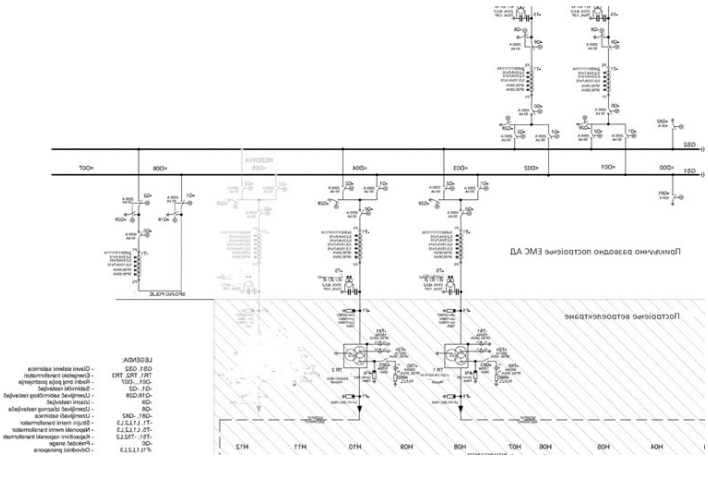
Slika 1. Lokacija vetroelektrana

snagom od 42MW, na naponski nivo 110kV. Svaka od 21 vetroturbine je neposredno po priključenju puštena u pogon. Nakon toga, 29.12.2018. priključena je i VE Kovačica na naponski nivo 220kV. U aprilu 2019.godine je u pogon puštena i poslednja od ukupno 38 turbina dok ukupna instalisana snaga celog vetroparka iznosi 104,5MW. VE Košava je puštena u pogon u proleće 2019.godine. Treba dodati da su u VE Čibuk 1 i VE Kovačica instalisane turbine sa istim karakteristikama i od istog proizvođača.

WIND POWER	2018 Q4	2019 Q1	Q2	Q3	Q4
CIBUK	57 units 158MW				
ALIBUNAR	21 units 42MW				
KOVACICA		38 units 104.5MW			
KOSAVA		20 units 69MW			

Tabela 1. Hronologija priključenja vetroelektrana

Sve vetroelektrane se na prenosni sistem priključuju u priključno razvodnim postrojenjima, koja su u neposrednoj blizini postrojenja vetroelektrana. Obaveza investitora je da izgradi priključno razvodno postrojenje i da isto preda u vlasništvo i upravljanje EMS AD. Granica vlasništva je po pravilu na priključnoj klemi provodnih izolatora transformatora, tako da je transformatorsko polje unutar priključno razvodnog postrojenja vlasništvo EMS AD a sam transformator vlasništvo vetroelektrane. Ovakvo rešenje, uprkos nekim nedostacima i specifičnostima, najbolje odgovara na brojne probleme koji nastaju u samoj eksploataciji objekta, a tiču se svojine, pa samim tim i održavanja primarne, telekomunikacione i opreme za prenos podataka između lokalnih SCADA sistema.



Slika 2. Šema priključno razvodnog postrojenja

3. PODACI KOJE VETROELEKTRANE DOSTAVLjAJU

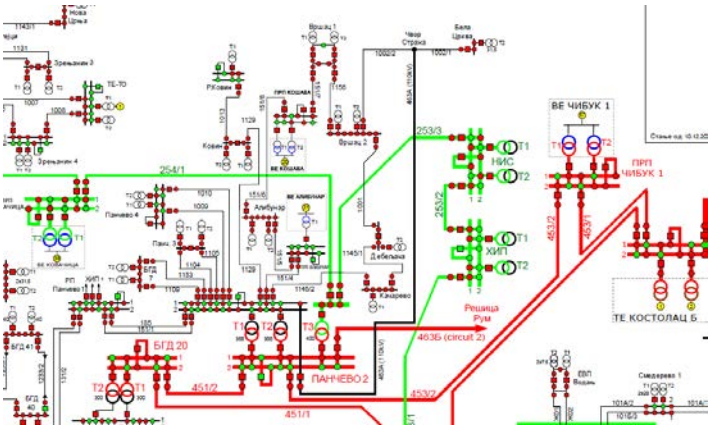
Zbog osobenosti vetroelektrana kao proizvođača električne energije, posebno kao povlašćenog proizvođača električne energije, EMS AD je postavio zahtev za potrebnim brojem podataka koji su od interesa za planiranje rada prenosnog sistema. Prevashodna namena dostavljenih podataka je u svrhu izrade adekvatne prognoze proizvodnje, kreiranje podataka potrebnih za izradu adekvatnosti i objavljivanje ključnih tržišnih podataka [2], koji proističu iz obaveze članstva u ENTSO-e.
U cilju zadovoljavanja svih potreba, EMS AD je od vetroelektrana zahtevao dostavljanje određenih planiranih i ostvarenih podataka u tačno definisanim vremenskim intervalima. Vetroelektrane su u obavezi da dostavljaju planove neraspoloživosti generatorskih jedinica, plan proizvodnje za narednih sedam dana, ostvarenja aktivnih i reaktivnih snaga, broj generatora koji je bio u pogonu, kao i meteorološke podatke koji se odnose na brzinu vetra, smer vetra, temperaturu i pritisak.

4. UTICAJ VETROELEKTRANA NA TOKOVE SNAGA

Region južnog Banata, kao industrijsko područje u Republici Srbiji, sa stanovišta prenosnog sistema, odnosno tokova snaga, uvek je bio razmatran kao čvor u kom je skoncentrisana potrošnja. Sa pomenutim i najavljenim proizvodnim kapacitetima ova karakteristika se bitno menja. Naime, transformatorska stanica TS Pančevo 2 ima sva tri naponska nivoa, tj. transformacija energije sa 400kV obavlja se i na 220kV i 110kV nivo. Sve četiri vetroelektrane su u direktnoj vezi sa TS Pančevo 2 i ta okolnost vrlo povoljno utiče na opterećenost sva tri transformatora koji su obično kritičniji elementi u analizama tokova snaga.

Slika 3. TS Pančevo 2

Dakle, trenutna proizvodnja iz vetroelektrana u čvoru TS



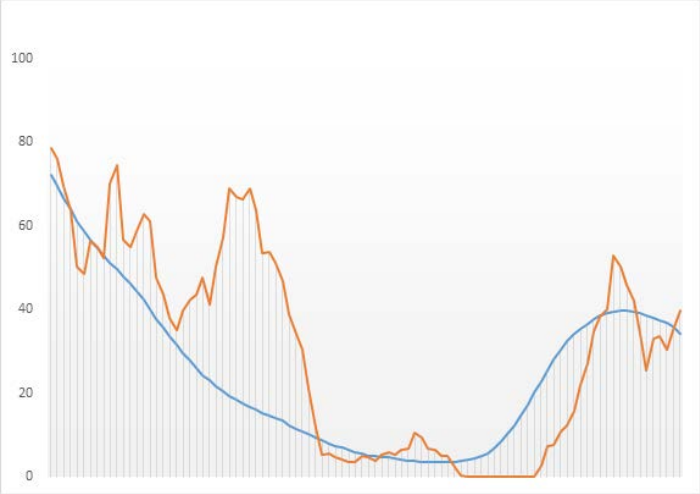
Pančevo 2 ne stvara neke značajnije gubitke ili probleme, već samo poboljšava naponsku sliku. Naravno da se navedeno mora uzeti sa rezervom imajući u vidu karakteristike pre svega 110 kV vodova i budućih vetroelektrana.

5. UTICAJ NA BALANSNI MEHANIZAM I ENERGETSKI BILANS

Činjenica da prve četiri vetroelektrane, koje su povezane na prenosni sistem u geografski istom području, EMS AD i JP EPS primorava da se hvataju u koštac sa problemom balansiranja proizvodnje iz ovih elektrana. Posebno zbog toga što ima najava za velikim brojem novih vetroelektrana u istom ili električno i geografski bliskom području. Pošto su sve četiri vetroelektrane u statusu povlašćenog proizvođača električne energije, one nisu balansni entiteti i ne učestvuju u balansnom mehanizmu, JP EPS je za njih preuzeo balansnu odgovornost. Obaveza JP EPS je da njihova odstupanja od plana rada koriguje u skladu sa zahtevom EMS AD za potrebnom rezervom kako u sekundarnoj, tako i u tercijarnoj energiji.
Kao što je opšte poznato, proizvodnja aktivne električne energije iz vetroelektrana grubo gledano zavisi isključivo od brzine vetra. Odnosno to je promenljiva od dominantnog uticaja u približnoj formuli [3]:

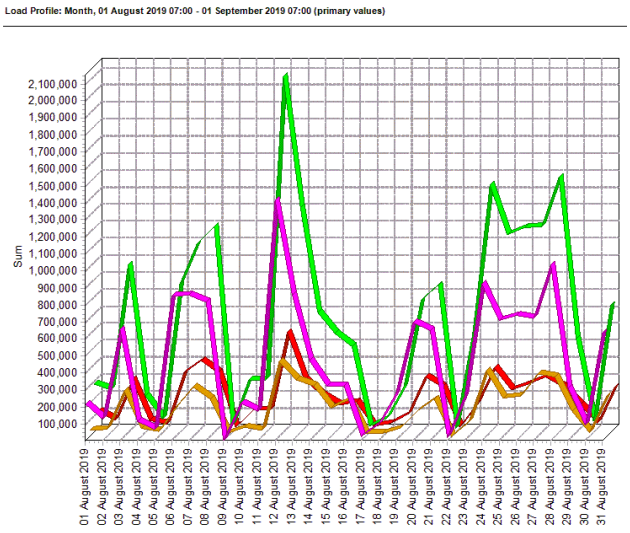
$$P = \frac{1}{2}\rho A V^3$$

Gde je ρ gustina vetra, A- površina normalna na smer vetra i V- brzina vetra
Iako prognoza očekivano nikad nije u potpunosti pouzdana, od najvećeg značaja bi bilo da se dobro, odnosno pravovremeno, prognoziraju trenuci vršne proizvodnje, odnosno da se pogodi tempo brzine vetra. U suprotnom se stvaraju veliki problemi u balansiranju sistema.



Slika 4. Dobra prognoza tempa vetra

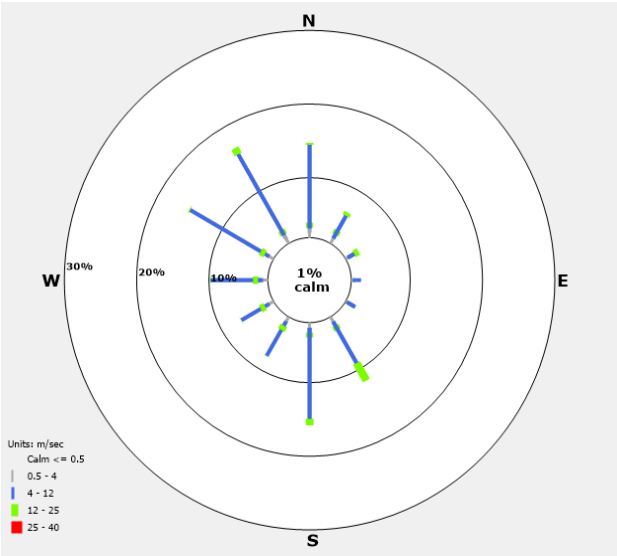
Ako bi, gledajući grafik sa slike 4, prateći prognozu očekivali da će u trenucima kada proizvodnja iz vetroelektrana opada angažovati druge elektrane, a u trenucima kada proizvodnja raste planirati angažovanje rezerve u smeru na dole možemo imati veliku aktivaciju rezerve. Za slučaj da se podizanje proizvodnje iz vetroelektrana odloži, odnosno translira, dispečer mora angažovati rezervu u smeru na gore, pa će tu istu energiju morati da potisne kada proizvodnja iz vetra raste. Pomenuto ne bi predstavljalo toliki problem da instalisana snaga vetroelektrana nije trenutno već oko 370 MW, sa već pomenutom tendencijom rasta. Dodatna poteškoća je to što su sada, a po svoj prilici i u budućnosti, sve vetroelektrane koncentrisane na gotovo istoj geografskoj lokaciji koja je prilično jednolična sa stanovišta ortografije terena, pa je apsolutna greška koja se pravi u prognozi veća jer ne postoji razuđenost lokacija.

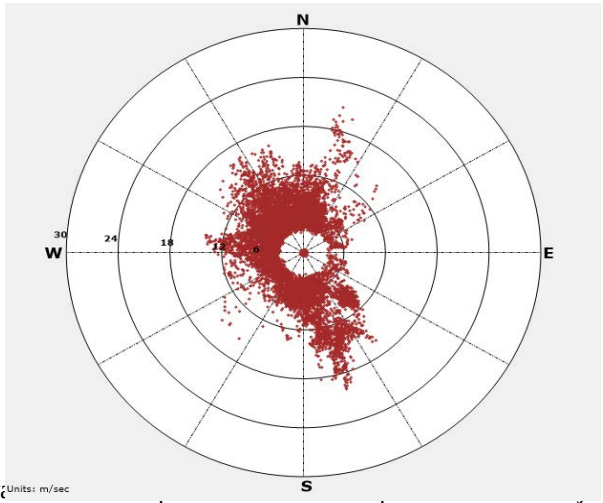


Slika 5. Dnevna proizvodnja iz 4 vetroelektrane u avgustu 2019.

6. ANALIZA NA OSNOVU DOSADAŠNjEG ISKUSTVA VETROELEKTRANA U EES REPUBLIKE SRBIJE

Analizirajući dosadašnju proizvodnju iz sve četiri vetroelektrane ne može se izvući niti jedna zakonitost, ili dokazati odnosno opovrgnuti veliki broj od ranijih prognoza koje su stručnjaci iznosili kroz svoje tvrdnje bilo u korist ili protiv vetroelektrana, kao proizvodnih kapaciteta unutar EES Republike Srbije.

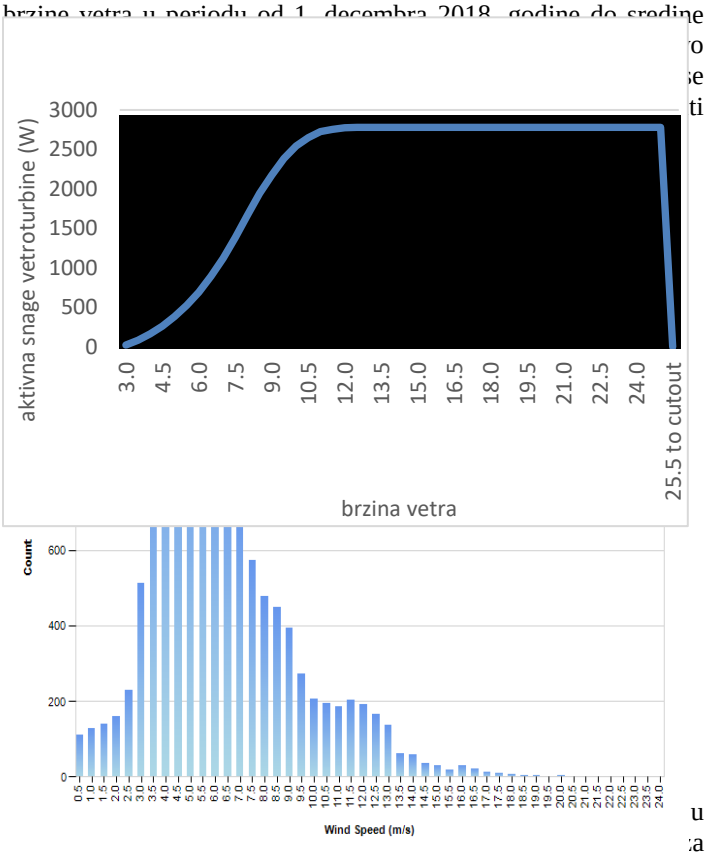




Sv[illegible] period za bilo kakvo ozbiljniju naučnu analizu jako kratak i da je teško opravdati bilo kakvo uporište za ove zaključke.

Jedna od najčešćih tvrdnji bila je da je Košava olujni vetar koji nikako ne odgovara vetroturbinama. Dokazalo se da je Košava [4], kao vetar koji dominanto duva u ovom području u periodima godine kada hladniji vazduh sa Karpata, iz polja visokog vazdušnog pritiska dolazi u polje nižeg vazdušnog pritiska, u toku dosadašnje eksploatacije turbina svega nekoliko puta imala jačinu i brzinu vetra koja bi dovela do prekida rada vetroturbina (*cut- out speed*).

Takođe dokazano je i da Košava nije jedini vetar koji doprinosi proizvodnji električne energije sa vetroelektrana, već da i severni vetar svojom konstantnošću daje ravne dijagrame proizvodnje u zimskom periodu godine. Na slikama 6, 7 i 8 se uočava raspodela brzine vetra u periodu od 1. decembra 2018. godine do sredine

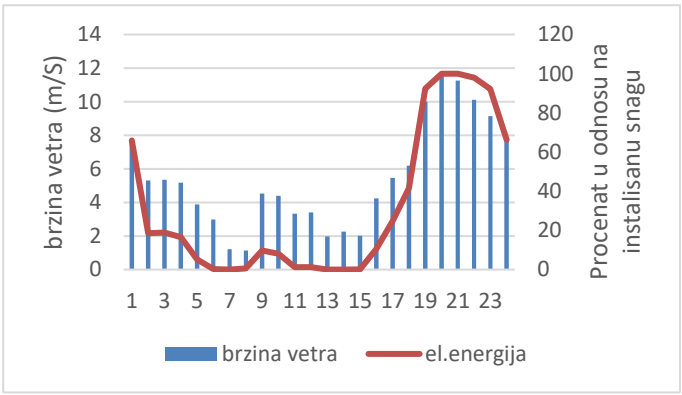


turbinu koja je ugrađena u jednoj od vetrolektrana (slika 9), vidi se da je brzina vetra od 3 m/s brzina (*cut-in speed*) pri kojoj kreće proizvodnja električne energije, i da je brzina od 12 m/s ona pri kojoj se dostiže nominalna snaga.

Nelinearna zavisnost od brzine vetra se najbolje ilustruje na slici 10 na kojoj je prikazan dnevni dijagram proizvodnje i brzine vetra za jednu vetroelektranu.

Treba napomenuti da pojava vetra dosta često ne prati promene potrošnje. Odnosno ne ide u prilog tvrdnji da se pri velikim brzinama vetra povećava i potrošnja, odnosno da se subjektivni osećaj hladnoće usled vetra podudara sa vetrom koji je pogodan za proizvodnju električne energije. Košavska regija čini više od trećine ukupne potrošnje EES Republike Srbije i svakako da bi povećanje potrošnje trebalo da se kompenzuje povećanjem proizvodnje iz vetroelektrana, ali, na osnovu dosadašnjeg kratkog iskustva, ovo se ne može uzeti kao zakonitost. Svakako treba uzeti sa rezervom i meteorološka očekivanja na osnovu istorijskih podataka i aktuelno menjanje klimatskih uslova. Ponekad se dešava da realizacija proizvodnje iz vetroelektrana prati tok rasta potrošnje u određenoj meri, ali se mnogo češće dešava da proizvodnja iz vetroparkova komplementarna potrošnji, pa je tokom noći, kada je potrošnja najmanja, poprilično često moguće uočiti ravne dijagrame proizvodnje iz vetroelektrana blizu nominalne snage.

Slika 9. Kriva snage za vetroturbinu



Slika 10. Dnevni dijagram proizvedene energije i brzine vetra

Primer koji ovo potkrepljuje je datum 18.12.2018. kada je bio zabeležen maksimalni konzum u EES-u Republike Srbije za 2018. godinu, a da tog dana proizvodnja iz vetroelektrana nije prešla 2% od instalisane snage. Slična situacija je bila i 31.12.2019. Takođe Košava dominantno duva u jesen i proleće, kada potrošnja u Republici Srbiji, koja nažalost ima mali procenat industrijske potrošnje, ne beleži ekstremne vrednosti. Dodatno treba uzimati u obzir činjenice da Košava može biti i topao vetar (primer od 28.07.2019. ili 13.08.2019.) i činjenice o podacima iz aprila meseca 2019. kada je bilo neočekivano mnogo vetrovitih sati.

7. ZAKLjUČAK

Zastupljenost vetroagregata u proizvodnim kapacitetima je doživela neverovatnu ekspanziju na globalnom nivou. Neminovno je to moralo da se prelije i unutar granica Republike Srbije. Pozicija EMS AD je takva da su vetroparkovi novi izazov na koji treba odgovoriti po ugledu na važeću regulativu u susednim zemljama, pre svega vodeći se iskustvima prenosnih sistema slične snage i karakteristika. Glavni akcenat treba da bude na tome da stabilnost i pouzdanost elektroenergetskog sistema ne budu ugroženi. Trenutno priključeni vetroparkovi, uprkos relativno velikom kapacitetu priključenom u kratkom periodu ne predstavljaju pretnju po pomenuto. Neophodno je

predupredi neželjeni tempo priključenja budućih vetroparkova, i samu lokaciju priključenja razmotriti sa više aspekata. Pored toga što instalisana snaga mora da prati odgovarajući naponski nivo ona treba da ima što manje posledice po stabilnost EES. Vetar je stohastička pojava i kao takav veliki izazov za prognostičare, pa je zbog toga neophodno investitore odgovarajućim merama privoleti na zadovoljavajući kvalitet prognoze proizvodnje i pored toga što operator prenosnog sistema ima sopstvenu. Posebno je važna sinhronizacija regulatornih tela sa stručnim tehničkim licima kako bi se stimulisanje proizvodnje iz obnovljivih izvora energije sprovodilo kontrolisanim i promišljenim koracima. Uprkos tome što su zaposleni u EMS AD uspešno izveli priključenja prve četiri vetrolektrane, buduća priključenja najavljenih investicija moraju se osloniti na iskustva koja će nastati na osnovu respektabilnije vremenske distance.

REFERENCE

[1] https://www.srbija.gov.rs/

[2] http://www.ems.rs/, https://www.entsoe.eu/

[3] „Vjetroelektrane" skripta dr. Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu.

[4] http://www.meteologos

AUTORI

Saša Zdravković– dipl.inž.el, EMS AD, sasa.zdravkovic@ems.rs
Milan Blažić– dipl.inž.el, EMS AD, milan.blazic@ems.rs
Branko Šumonja– dipl.inž.el, EMS AD, branko.sumonja@ems.rs
Marija Đorđević– dipl.inž.el, EMS AD, marija.djordjevic@ems.rs
Julijana Vićovac– dipl.inž.el, EMS AD, julijana.vicovac@ems.rs
Nebojša Đurin– dipl.inž.el, EMS AD, nebojsa.djurin@ems.rs

Implementacija algoritma kolonije mrava za optimalnu rekonfiguraciju distributivne mreže

Implementation of ant colony optimization algorithm for optimal reconfiguration of the distribution network

Predrag Mršić [*], Nikola Rajaković [**]

[*] Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet; Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet
[**] Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet

Sažetak **-** U radu je analizirana mogućnost primjene algoritma kolonije mrava za rekonfiguraciju distributivne mreže u cilju minimizacije gubitaka aktivne snage. Algoritam kolonije mrava je metaheuristički metod baziran na populaciji koji se koristi za rješavanje različitih kombinatornih zadataka. Inspirisan je ponašanjem kolonije mrava u prirodi. Efikasnost algoritma je testirana na IEEE test mrežama sa 33 i 69 čvorova. Takođe, rezultati rekonfiguracije dobijeni algoritmom kolonije mrava su upoređeni sa rezultatima koje daju druge heurističke i metaheurističke metode.

Ključne reči **-** rekonfiguracija, distributivna mreža, algoritam kolonije mrava, minimizacija gubitaka aktivne snage

Abstract **-** The paper analyzes the possibility of application of Ant Colony Optimization (ACO) algorithm for reconfiguration of distribution network with the aim of active power minimization. ACO is a population-based meta-heuristic technique used to solve different combinatorial optimization problems. The search technique is inspired by the behaviour of ant colonies in nature. The efficiency of the proposed algorithm is demonstrated on IEEE 33-bus and IEEE 69-bus test distribution systems. Also, the results obtained by using ACO algorithm are compared to the results achievable by other heuristic and meta-heuristic algorithms.

Index Terms **-** reconfiguration, distribution network, ant colony optimization algorithm, active power minimization

I. UVOD

Dugi niz godina distributivne mreže su imale skromne mogućnosti za rekonfiguraciju zbog niskog stepena automatizacije. Zahvaljujući, prvenstveno ulaganju u osavremenjavanje i povećanje stepena automatizacije, omogućena je lakša rekonfiguracija distributivnih mreža i povećanje pouzdanosti, ekonomičnosti, efikasnosti i sigurnosti napajanja potrošača. Rekonfiguracija distributivne mreže se definiše kao promjena topološke strukture distributivne mreže promjenom stanja otvoren / zatvoren sekcionih (engl. *sectionalizing switch*) i poveznih (engl. *tie switch*) prekidača u cilju postizanja optimalne konfiguracije. Optimalna konfiguracija distributivne mreže je ona konfiguracija koja zadovoljava korisnički specificiranu kriterijumsku funkciju uz uvažavanje svih tehničkih ograničenja. Pri formiranju kriterijuma optimalnosti teži se da on bude kvantitativan, mjerljiv. Ako se kriterijumu optimalnosti dodaju tehnička ograničenja dolazi se u opštem slučaju do nelinearnog dinamičkog optimizacionog zadatka [1], [2].

Postoji veliki broj razloga za promjenu konfiguracije distributivne mreže. Oni se mogu podijeliti u dvije velike grupe: poboljšanje uslova rada u normalnom pogonu i napajanje potrošača u havarijskim uslovima. U okviru poboljšanja uslova rada mreže u normalnom pogonu kao najznačajnije mogu se izdvojiti dvije grupe: smanjenje gubitaka aktivne snage i otklanjanje preopterećenja elemenata. Pored navedenih kriterijuma, u cilju poboljšanja rada mreže u normalnom pogonu kao kriterijumi za rekonfiguraciju mogu biti: poboljšanje pokazatelja pouzdanosti i sigurnosti mreže, balansiranje opterećenja, popravljanje naponskog profila, itd [2].

Problem određivanja optimalne konfiguracije mreže je kompleksan, diskretan i nelinearan optimizacioni problem. Pored toga, ovaj problem se dodatno usložnjava uvažavanjem svih relevantnih tehničkih ograničenja. Prvi rad koji se bavi rekonfiguracijom distributivne mreže su objavili *Merlin* i *Buck* 1975. godine [3]. Predloženi metod se zasniva na pretraživanju svih mogućih konfiguracija mreže uz uvažavanje tehničkih ograničenja, te pronalasku konfiguracije koja ispunjava zadatu kriterijumsku funkciju. U opštem slučaju ako u mreži postoji n rasklopnih uređaja tada postoji 2^n konfiguracija mreže [4]. Međutim, većina tih konfiguracija nije dozvoljena jer nisu zadovoljeni osnovni tehnički uslovi kao što su radijalna konfiguracija i napajanje svih potrošača u mreži. Npr. za standardnu IEEE test mrežu sa 33 čvora postoji $1{,}3744 \cdot 10^{11}$ konfiguracija od kojih je samo 53957 dozvoljeno. Računanje tokova snaga i određivanje optimalne konfiguracije, posmatrajući samo dozvoljene konfiguracije, nije moguće za mreže sa većim

brojem čvorova čak i uz upotrebu najmoćnijih računara. Iz tog razloga razvijene su razne matematičke metode za rekonfiguraciju distributivnih mreža. U zavisnosti od matematičkog modela i primijenjene tehnike pretraživanja metode se mogu globalno podijeliti na: matematički optimizacione metode [5]–[7], heurističke metode [8]–[10] i metaheurističke metode [11]–[17].

Matematički optimizacione metode za rješavanje problema rekonfiguracije distributivne mreže koriste metode linearnog programiranja, nelinearnog programiranja, kvadratnog programiranja, dinamičkog programiranja, itd. Heurističke metode se baziraju na poznavanju fizike problema. Ove metode su najčešće korišćene metode za određivanje optimalne konfiguracije distributivne mreže zbog sposobnosti da relativno brzo generišu rješenje sa zadovoljavajućom tačnošću [1]. Metaheurističke metode su većinom iterativne metode koje su zasnovane na modelima inspirisanim prirodnim procesima, vještačkoj inteligenciji i stohastičkom pretraživanju. Koriste se za rješavanje nelinearnih optimizacionih problema velike dimenzionalnosti. Ove metode u pojedinim slučajevima ne garantuju pronalazak globalnog ekstrema nego se kao rješenje uzima najbolji lokalni ekstrem [26]. Iterativni proces započinje izborom proizvoljnog rješenja iz prostora mogućih rješenja. Nakon ovoga, uz niz pravila izbjegavaju se lokalni ekstremi i iz iteracije u iteraciju metoda konvergira ka globalnom ekstremu (optimumu). Prema *Blum*-u i *Roli*-ju metaheurističke metode se dijele u dvije kategorije [11]: metaheurističke metode zasnovane na jednom rješenju i metaheurističke metode zasnovane na populaciji.

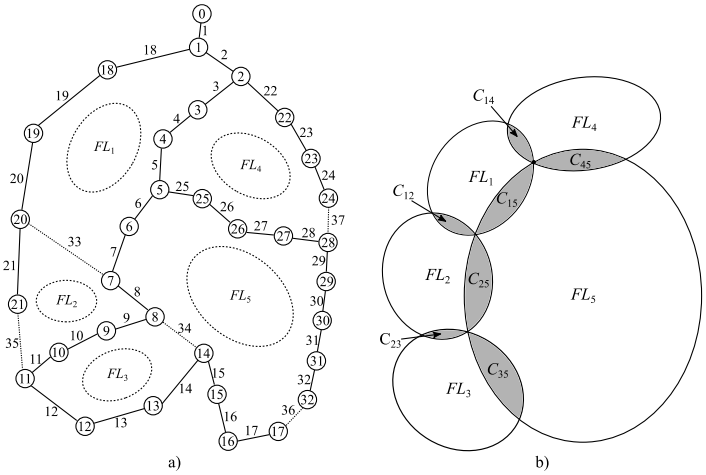
Metaheurističke metode zasnovane na jednom rješenju predstavljaju metaheuristike zasnovane na lokalnom pretraživanju prostora mogućih rješenja koje koriste različite mehanizme za izbjegavanje lokalnih ekstrema. Najpoznatije metaheurističke metode zasnovane na jednom rješenju koje se koriste za rješavanje problema rekonfiguracije distributivnih mreža su: simulirano kaljenje (engl. *Simulated Annealing* - SA) i tabu pretraživanje (engl. *Tabu Search* - TS).

Metaheurističke metode zasnovane na populaciji predstavljaju metaheuristike kod kojih su algoritmi pretraživanja prostora rješenja zasnovani na prirodnim procesima. Najpoznatije metode zasnovane na populaciji koje se koriste za rekonfiguraciju distributivnih mreža su: evolutivni algoritmi (genetski algoritmi i evolutivno programiranje) i algoritmi zasnovani na grupnoj inteligenciji skupa samoorganizujućih jedinki (metode mravljih kolonija, optimizacija rojem čestica, *harmony search* algoritmi i metode pčelinjih kolonija).

U ovom radu će biti izvršena rekonfiguracija distributivnih mreža koristeći algoritam kolonije mrava. U odnosu na slične algoritme koji se mogu naći u literaturi [18]–[22], u ovom radu je predložen drugačiji proračun poželjnosti isključenja grana. Poželjnost isključenja grana se zasniva na odnosu tokova snaga po granama u okviru fundamentalne petlje. Formula za proračun poželjnosti je takva da se za granu kojom teče najmanja snaga u okviru fundamentalne petlje dobija najveća poželjnost za isključenje. Kriterijumska funkcija po kojoj je izvršena optimalnu rekonfiguracija distributivnih mreža je bazirana na minimizaciji gubitaka aktivne snage.

II. FORMULISANJE PROBLEMA REKONFIGURACIJE

Problem rekonfiguracije distributivne mreže se može svesti na zadatak određivanja prekidača u svakoj fundamentalnoj petlji koji treba biti isključen da bi se minimizovala objektivna funkcija. Fundamentalna petlja predstavlja petlju koja se dobija zatvaranjem jednog poveznog prekidača pod uslovom da se bilo koja dva čvora koja pripadaju fundamentalnoj petlji ne mogu povezati zatvaranjem nekog drugog prekidača [25]. Npr. IEEE mreža sa 33 čvora ima pet fundamentalnih petlji koje se dobijaju zatvaranjem poveznih prekidača u granama 33, 34, 35, 36 i 37, slika 1a.



Slika 1. Fundamentalne petlje u IEEE test mreži sa 33 čvora.

Broj fundamentalnih petlji u jednoj mreži se može izračunati na osnovu broja grana i čvorova u mreži. Ako je L broj grana u nekoj proizvoljno odabranoj mreži, a N broj čvorova, broj fundamentalnih petlji se dobija iz sljedećeg izraza [25]:

$$FL = L - N + 1 . \quad (1)$$

Posmatrajući petlje prikazane na slici 1a može se uočiti da određene grane pripadaju različitim petljama, pri tome jedna grana može figurisati u najviše dvije fundamentalne petlje. Grane koje figurišu u dvije fundamentalne petlje nazivaju su *zajedničke grane*. Zajedničke grane dvije fundamentalne petlje formiraju *vektor zajedničkih grana*. Za sagledavanje svih vektora zajedničkih grana poželjno je formirati *Venn*-ov dijagram. *Venn*-ov dijagram za IEEE test mrežu sa 33 čvora je prikazan na slici 1b. Vektore zajedničkih grana ćemo označiti sa C, a u indeksu ćemo dodati dva broja koja će nositi informaciju od koji fundamentalnih petlji je dobijen vektor. Na primjer, vektor zajedničkih grana fundamentalnih petlji FL_2 i FL_3 je [18]:

$$C_{23} = [9 \quad 10 \quad 11] . \quad (2)$$

Vektori zajedničkih grana su bitni za normalno funkcionisanje mreže. Naime, zajedničke grane za fundamentalne petlje FL_1 i FL_4 su 3, 4 i 5. Ako isključimo prekidač u trećoj grani koja pripada prvoj fundamentalnoj petlji (FL_1) i prekidač u petoj grani koja pripada četvrtoj fundamentalnoj petlji (FL_4) izolovali smo čvorove 4 i 5. Dakle, nije dozvoljeno isključenje dvije grane koje pripadaju jednom vektoru zajedničkih grana jer to dovodi do

izolovanja najmanje jednog čvora u mreži. Može se postaviti pitanje da li se izborom samo jednog prekidača iz vektora zajedničkih grana, mreža može dovesti u nedozvoljeno radno stanje. Na primjer, ako se isključi grana koja pripada vektoru zajedničkih grana C_{14}, zatim grana koja pripada vektoru zajedničkih grana C_{15} i grana koja pripada vektoru zajedničkih grana C_{45} u najboljem slučaju se izoluje samo čvor 5. Dakle, uslov da može biti samo jedna grana isključena, koja pripada vektoru zajedničkih grana, nije dovoljan da se obezbijedi dozvoljena konfiguracija mreže. Pri čemu se pod dozvoljenom konfiguracijom mreže podrazumijeva radijalna konfiguracija mreže u kojoj nijedan čvor nije izolovan. Ako se ponovo vratimo na čvor 5, on neće biti izolovan ako nijedna grana bar jednog vektora zajedničkih grana ne bude isključena. Da bi se jednostavnije provjerilo da li će određena kombinacija dovesti do izolacije pojedinih čvorova formiraju se *grupe zabranjenih vektora* [18]. Za onemogućavanje formiranja konfiguracije u kojoj bi, na primjer, čvor 5 bio izolovan formira se grupa zabranjenih vektora u oznaci *PGV* i dodaje indeks čvora čija izolacija se sprečava:

$$PGV_5 = \begin{bmatrix} C_{14} & C_{15} & C_{45} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Na osnovu prethodno izloženog mogu se formirati tri pravila koja će osigurati da je kombinacija isključenih grana koja je predložena, fizički ostvariva [18]:

1) Tačno određene grane se mogu nalaziti na tačno određenim pozicijama u kombinaciji isključenih grana, odnosno *n*-ti član kombinacije isključenih grana mora pripadati *n*-toj fundamentalnoj petlji.
2) Samo jedna grana vektora zajedničkih grana može biti isključena.
3) Broj grana koje pripadaju različitim vektorima zajedničkih grana mora biti manji od broja vektora zajedničkih grana koji formiraju grupu zabranjenih vektora.

Rekonfiguracija distributivnih mreža se vrši iz različitih razloga. Najčešći razlozi za rekonfiguraciju distributivnih mreža su [4]: minimizacija gubitaka aktivne snage, balansiranje opterećenja napojnih transformatora, balansiranje opterećenja izvoda, popravljanje naponskog profila u mreži i povećanje pouzdanosti napajanja potrošača. U ovom radu će biti izvršena rekonfiguracija distributivnih mreža sa ciljem minimizacije gubitaka aktivne snage. Objektivna funkcija je definisana sljedećim izrazom:

$$P_g = \sum_{i=1}^{N_{izv}} \sum_{j \in \alpha_i} r_{ij} I_{ij}^2 , \quad (4)$$

gdje je N_{izv} ukupan broj izvoda, α_i skup indeksa grana koje pripadaju izvodu i, r_{ij} rezistansa grane j koja pripada izvodu i, I_{ij} moduo struje koja teče granom j izvoda i.

III. REKONFIGURACIJA METODOM KOLONIJE MRAVA

Metoda mravljih kolonija je metaheuristička metoda koja je zasnovana na populaciji. Metodu je razvio *Marco Dorigo* u svojoj doktorskoj disertaciji 1992. godine. Inspiracija za metodu potiče od kretanja mrava u prirodi i njihovoj sposobnosti da nađu najkraći put između gnijezda i izvora hrane [23].

A. Optimizacija kolonijom mrava

Pri rješavanju problema algoritmom kolonije mrava kao agenti koriste se virtuelni mravi. U odnosu na mrave u prirodi virtuelnim mravima su dodate određene sposobnost kako bi se omogućilo rješavanje kompleksnih optimizacionih problema. Glavne karakteristike virtuelnih mrava su [20]:

1) *Kolonija kooperativnih pojedinaca*: virtuelni mravi, kao i pravi, sarađuju kako bi pronašli „dobro" rješenje, dijeleći informacije o okolini.
2) *Feromonski trag i stigmetrija*: realni mravi mijenjaju okolinu ostavljajući za sobom trag feromona, dok virtuelni mravi mijenjaju numeričke vrijednosti lokacija koje posjećuju. U algoritmima kolonije mrava, kao i kod realnih mrava, lokalni tragovi (numeričke vrijednosti) su jedina komunikacija između jedinki. Takođe, u algoritmima kolonije mrava se dodaje isparavanje feromona, koje je slično pravom isparavanju feromona kod realnih mrava. Ovo omogućava da kolonija „zaboravlja" svoju prošlost i pretraži nove smjerove bez uticaja prethodnih odluka.
3) *Traženje najkraćeg puta i lokalno kretanje*: Virtuelni i pravi mravi dijele isti zadatak, naći najkraći put od gnijezda do izvora hrane.
4) *Stohastičke odluke*: virtuelni mravi odlučuju na koju će stranu ići na osnovu vjerovatnoće koja se bazira na lokalnim informacijama okoline i koncentraciji feromona.
5) *Diskretan svijet*: virtuelni mravi se kreću u diskretnom svijetu, tj. oni se mogu nalaziti na tačno određenim lokacijama u okolini.
6) *Sposobnost pamćenja*: virtuelni mravi imaju sposobnost pamćenja prošlog poteza.
7) *Koncentracija feromona zavisi od kvaliteta rješenja*: koncentracija feromona koju polažu virtuelni mravi na rutu kojim su prošli zavisi od kvaliteta te rute.
8) *Dodatne sposobnosti*: kako bi se povećala efikasnost algoritama, virtuelni mravi se mogu obogatiti dodatnim mogućnostima kao što su predviđanje koraka unaprijed, lokalna optimizacija, itd.

Važna odlika virtuelnih mrava u odnosu na prave mrave je sposobnost da se najbolje rješenje održava od strane kolonije, tako da razlika između trenutno najboljeg rješenja i globalnog rješenja zadržava na istoj vrijednosti ili smanjuje iz iteracije u iteraciju.

B. Primjena metode mravljih kolonija za rekonfiguraciju distributivnih mreža

Prvi problem za čije rješavanje je korišćen algoritam razvijen na bazi kolektivnog ponašanja mrava je problem trgovačkog putnika [24]. Problem trgovačkog putnika se ogleda u određivanju najkraćeg puta kojim trgovački putnik treba da se kreće tako da posjeti sve navedene gradove samo jednom. U slučaju distributivne mreže, može se primijeniti slična procedura, tako što gradovi predstavljaju čvorove mreže, putevi koji povezuju gradove, grane mreže, a izabrana ruta konfiguraciju mreže [19]. Pored ovog postoji još jedan, mnogo češće korišćen, metod za zapisivanje konfiguracije mreže. Biraju se grane koje moraju biti isključene. Odnosno, mrav bira kombinaciju grana iz fundamentalnih petlji koje će biti isključene, tako da *n*-ta grana

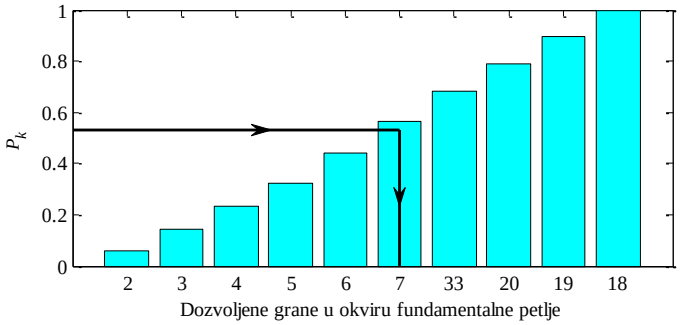
pripada *n*-toj fundamentalnoj petlji [18], [21], [22]. U ovom radu će se koristiti sistem u kome se biraju grane koje trebaju biti isključene. Prelazak mrava sa jedne grane na drugu u okviru fundamentalne petlje vrši se na osnovu vjerovatnoće. Prvo se računa vjerovatnoća prelaza mrava sa trenutne grane na ostale grane u okviru fundamentalne petlje. Vjerovatnoća prelaza mrava sa grane *i* na granu *j* data je izrazom:

$$P_k(i,j) = \frac{\left[\tau_j\right]^{\alpha}\left[\eta_j\right]^{\beta}}{\sum_{\mu\in M_k}\left[\tau_\mu\right]^{\alpha}\left[\eta_\mu\right]^{\beta}}, \quad (5)$$

gdje je τ_j koncentracija feromona na *j*-toj grani, η_j poželjnost isključenja *j*-te grane, M_k skup grana u okviru fundamentalne petlje na koje mrav može preći i α, β težinski koeficijenti. Nakon proračuna vjerovatnoća prelaska mrava sa trenutne grane na ostale vrši se izbor grane na koju će mrav preći prema sljedećem izrazu:

$$L_k = \begin{cases} \arg\max\{P_k\} & \text{za } q \le q_0 \\ J & \text{za } q > q_0 \end{cases}, \quad (6)$$

gdje je q slučajno izvučen broj iz uniformne raspodjele, q_0 parametar iz opsega $0 < q_0 < 1$ i J slučajno izabrana grana iz skupa M_k prema raspodjeli P_k. Za izbor grane J formira se kumulativna suma prelazaka sa trenutne grane na ostale grana u okviru dozvoljenih prelazaka jedne fundamentalne petlje. Zatim se izvlači broj iz uniformne raspodjele i određuje odgovarajuća grana. Praktično, sa vjerovatnoćom q_0 mrav će birati najbolje trenutno rješenja, a sa verovatnoćom (1-q_0) će istraživati ostale grane u okviru fundamentalne petlje [22]. Primjer određivanja grane J na koju će preći mrav je prikazan na slici 3. Neka su dozvoljene grane 2, 3, 4, 5, 6, 7, 33, 20, 19 i 18 koje mrav može izabrati u okviru fundamentalne petlje. Shodno vjerovatnoćama izbora grana formira se kumulativna suma tih vjerovatnoća, kao što je prikazano na slici 3. Izvlačenjem iz uniformne raspodjele npr. broja 0,53, povlači se horizontalna linija koja prvo presjeca stubac koji odgovara grani 7, te mrav bira prelazak na granu 7 (ili ostaje na grani 7 ako je već tu bio).



Slika 3. Primjer izbora grane *J*.

Procedura prelaska mrava sa jedne na drugu granu u okviru dozvoljenih grana jedne fundamentalne petlje se ponavlja za sve fundamentalne petlje čime se završava izbor konfiguracije distributivne mreže jednog mrava. Ponavljajući proceduru za svakog mrava vrši se izbor seta konfiguracija.

C. Ažuriranje feromona

Nakon izbora seta konfiguracija distributivne mreže vrši se ažuriranje feromona za svaku fundamentalnu petlju. Koncentracija feromona koja se dodaje na grane koje je izabrao neki od mrava zavisi od kvaliteta rješenja koje je taj mrav generisao. Takođe, pri ažuriranju feromona je uvaženo i isparavanje istog. Vrijednost feromona na grani *k* se ažurira na sljedeći način [21]:

$$\tau_k \leftarrow (1-\rho)\tau_k + \sum_{n\in N_a}\rho\tau_{kn}, \quad (7)$$

gdje je τ_k trenutna koncentracija feromona na grani *k*, ρ koeficijent isparavanja feromona ($0 < \rho < 1$), τ_{kn} koncetracija feromona koju na *k*-tu granu ostavlja *n*-ti mrav koji je izabrao granu *k* i N_a skup mrava u koloniji koji su izabrali granu *k* u svom rješenju (konfiguraciji). Koncentracija feromona koju na *k*-tu granu ostavlja *n*-ti mrav je normalizovana:

$$\tau_{kn} = \frac{f(s_n)}{\sum_{s_i\in A} f(s_i)}, \quad (8)$$

gdje je $f(s_n)$ kvalitet rješenja koje je generisao *n*-ti mrav i *A* skup mrava u koloniji. Kvalitet rješenja koje je jedan mrav generisao zavisi od gubitaka aktivne snage [21]:

$$f(s_n) = \frac{2}{1+e^{P_n^{gub}/2}}, \quad (9)$$

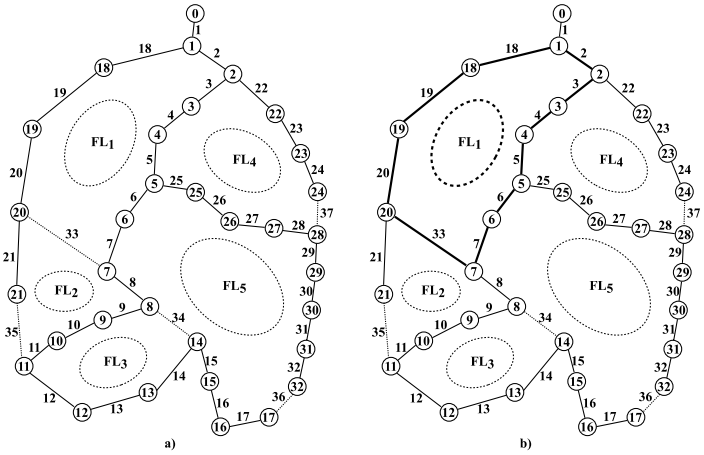
gdje su P_n^{gub} gubici aktivne snage za konfiguraciju koju je odabrao *n*-ti mrav.

D. Poželjnost isključenja grane (Desirability)

U algoritmima optimizacije kolonijom mrava poželjnost je obično obrnuto proporcionalna udaljenosti između čvorova. Za probleme rekonfiguracije distributivnih mreža poželjnost se može računati na više načina. Jedan od načina je na osnovu napona u čvorovima mreže [18], zatim na osnovu otpornosti grana [19] ili se jednostavno zanemari, uzimanjem da je koeficijent $\beta = 0$ [21], [22]. U ovom radu je predložen način za računanje poželjnosti isključenja grane koji se bazira na tokovima aktivnih snaga. Poželjnost se obično računa jednom u okviru svake iteracije za najbolje trenutno rješenje. Bez umanjenja opštosti procedure, ista će biti prikazana na primjeru IEEE mreže sa 33 čvora za prvu iteraciju. Početna konfiguracija IEEE mreže sa 33 čvora je prikazana na slici 4a. Poželjnost se računa za svaku fundamentalnu petlju posebno. Na primjer, ako računamo za prvu fundamentalnu petlju onda zatvorimo sve povezne prekidače u toj petlji, slika 4b, i izračunamo tokove snaga za tako formiranu mrežu. Na osnovu tokova snaga računa se poželjnost za svaku granu u okviru fundamentalne petlje. Poželjnost za isključenje *j*-te grane, koja pripada prvoj fundamentalnoj petlji, računa se na sljedeći način:

$$\eta_j = 1 - \frac{P_j}{\sum_{i\in FL_1} P_i}, \quad (10)$$

gdje je P_j aktivna snaga koja teče granom *j*.



Slika 4. Fundamentalne petlje IEEE mreže sa 33 čvora i ilustracija proračuna poželjnosti isključenja grana u prvoj fundamentalnoj petlji.

E. Kriterijum zaustavljanja

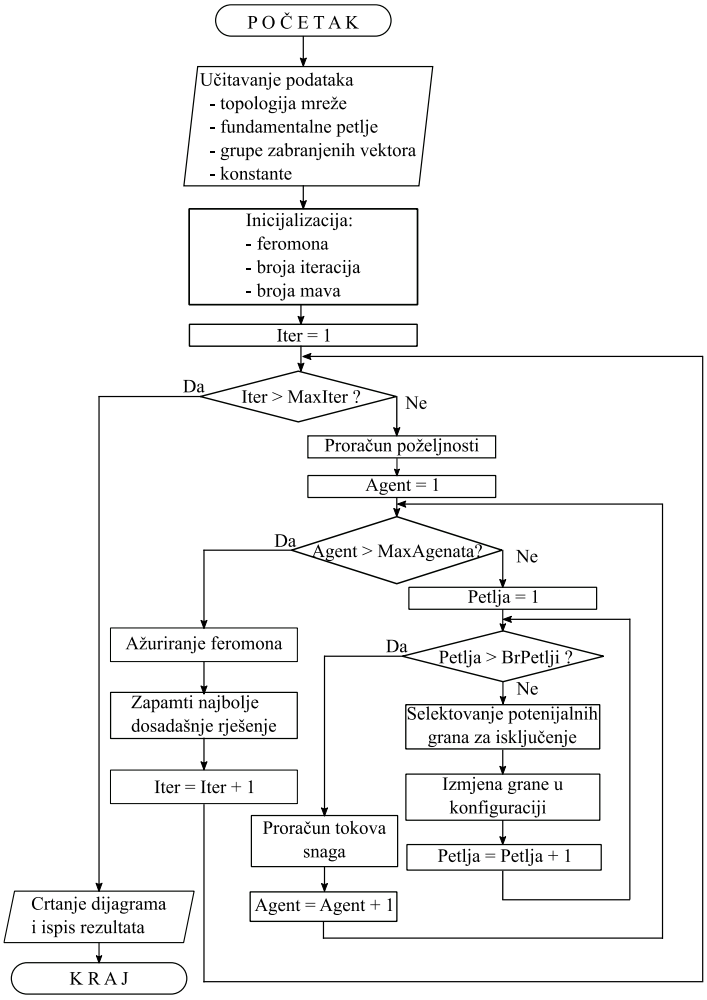
Zaustavljanje simulacije se obično vrši iz dva razloga. Ako se dostigne maksimalan unaprijed definisan broj iteracija ili ako svi agenti u okviru populacije biraju isto rješenje [18]. U ovom radu, kao kriterijum zaustavljanja koristi se maksimalan broj iteracija.

IV. ALGORITAM ZA REKONFIGURACIJU

Rekonfiguracija distributivnih mreža metodom algoritma kolonije mrava u ovom radu se vrši prema dijagramu toka prikazanom na slici 5. Prvo se vrši učitavanje podataka o mreži, kao što su topologija mreže, opterećenja priključena u čvorove, fundamentalne petlje, grupe zabranjenih vektora i početna konfiguracija mreže. Zatim se vrši inicijalizacija konstanti koje su potrebne za simulaciju. Inicijalizuje se početna vrijednost feromona na granama, koeficijent isparavanja feromona, vjerovatnoća izbora najboljeg rješenja, maksimalan broj iteracija, populacija mrava i težinski koeficijenti α i β. Nakon učitavanja parametara i podataka o mreži dolazi se do glavne petlje u kojoj svaki agent (mrav) bira svoj vektor grana koje će isključiti, dakle generiše radijalnu konfiguraciju. Kako bi se obezbijedilo da je konfiguracija moguća, tj. da svi čvorovi budu pod naponom, prelazak mrava sa jedne grane na drugu se vrši uz tri pravila data u II poglavlju ovog rada. Kada svaki od mrava izabere grane koje je potrebno isključiti vrši se proračun tokova snaga koristeći modifikovani *Newton*-ov metod. Na kraju kada svi mravi iz populacije izaberu grane koje je potrebno isključiti i kada se proračunaju tokovi snaga vrši se ažuriranje feromona i određivanje najboljeg rješenje koje je do tada generisano. Algoritam završava kada se dostigne maksimalan broj iteracija. Prije završetka računarskog programa vrši se ispis rezultata na ekran i crtanje dijagrama.

V. REZULATI SIMULACIJA

Algoritam koji je izložen u ovom radu biće testiran na IEEE test mrežama sa 33 i 69 čvorova. Za mreže su prikazani gubici aktivne snage i profil napona prije i poslije rekonfiguracije. Pored pokazatelja rekonfiguracije koji se odnose na mrežu dat je i dijagram konvergencije algoritma za svaku od navedenih mreža.



Slika 5. Algoritam računarskog programa za rekonfiguraciju distributivne mreže metodom kolonije mrava.

A. Rekonfiguracija IEEE test mreže sa 33 čvora

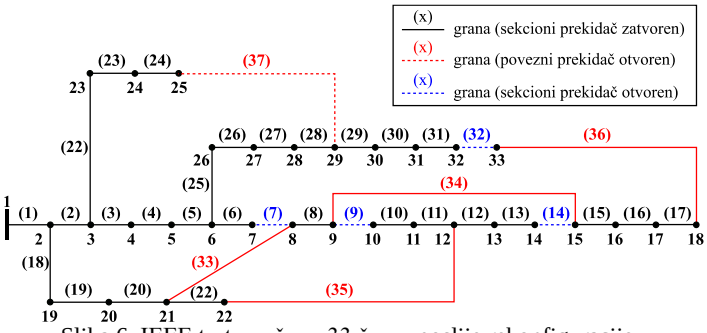
IEEE mreža sa 33 čvora sastoji se od četiri fidera koji preko 37 grana napajaju 32 potrošača ukupne snage 3,715 MW i 2,30 MVAr, dok je nominalni napon mreže 12,66 kV. U baznom stanju, stanje prije rekonfiguracije, isključeni su povezni prekidači u granama 33, 34, 35, 36 i 37. Gubici aktivne snage u tom slučaju iznose 202,68 kW. Osnovni parametri simulacije koji su korišćeni pri rekonfiguraciji ove mreže su dati u tabeli 1.

Tabela 1. Osnovni parametri simulacije

Veličina	Vrijednost
Maksimalan broj iteracija	30
Populacija agenata (mrava)	20
Početna vrijednost feromona na granama	0,5
α	1
β	3
ρ	0,08
q_0	0,6

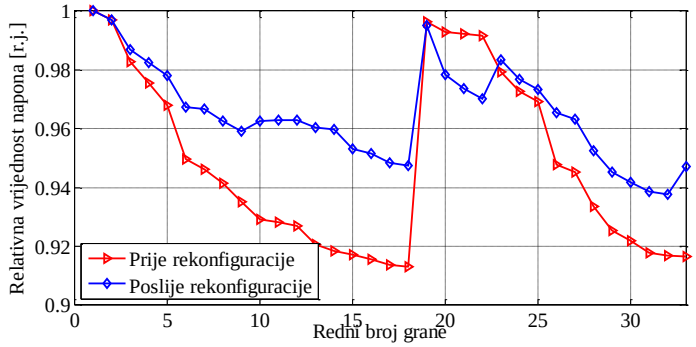
Poslije rekonfiguracije, gubici aktivne snage smanjuju se za 31,14 % i iznose 139,55 kW. Konfiguracija mreže se mijenja

tako što se zatvaraju povezni prekidači u granama 33, 34, 35 i 36, a otvaraju sekcioni prekidači u granama 7, 9, 14 i 32, slika 6.

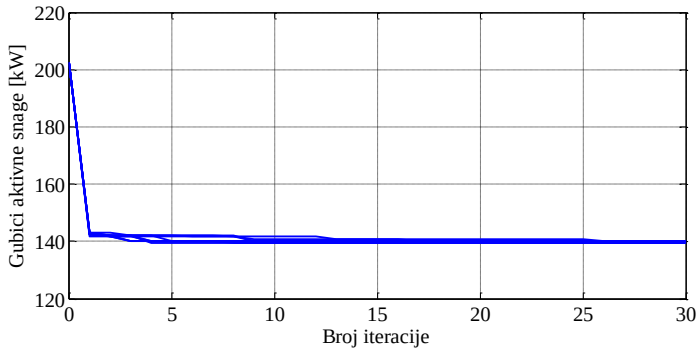


Slika 6. IEEE test mreža sa 33 čvora poslije rekonfiguracije.

Relativne vrijednosti napona prije i poslije rekonfiguracije prikazane su na slici 7. Prije rekonfiguracije najniža vrijednost napona u mreži je bila 0,9131 r.j, a nakon rekonfiguracije 0,9378 r.j. Na osnovu prikazane slike može se zaključiti da nakon rekonfiguracije, pored smanjenja gubitaka aktivne snage, dolazi i do popravljanja naponskih prilika u mreži. Konvergencija algoritma, odnosno smanjenje ukupnih gubitaka aktivne snage u toku deset uzastopnih simulacija prikazana je na slici 8. Sa slike se može vidjeti da algoritam ne konvergira uvijek za isti broj iteracija zbog primjenjene stohastike pri izboru grane koja će biti isključena u okviru fundamentalne petlje.



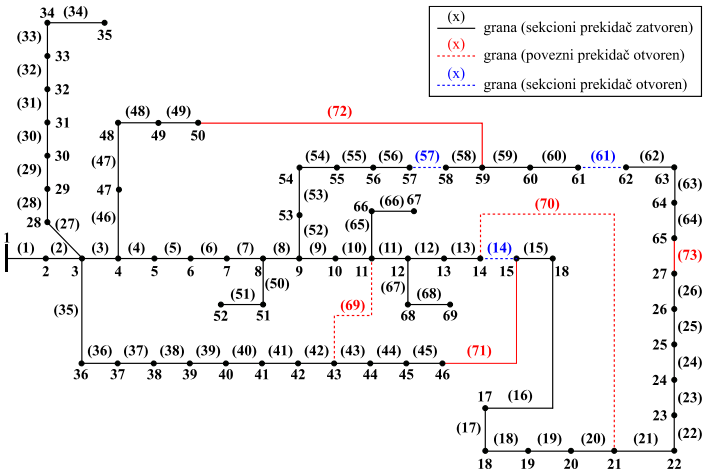
Slika 7. Profil napona u IEEE mreži sa 33 čvora.



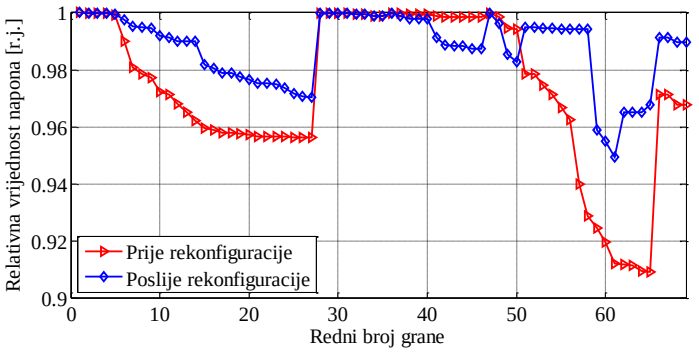
Slika 8. Promjena aktivne snage iz iteracije u iteraciju za IEEE test mrežu sa 33 čvora prilikom 10 uzastopnih simulacija.

B. Rekonfiguracija IEEE test mreže sa 69 čvorova

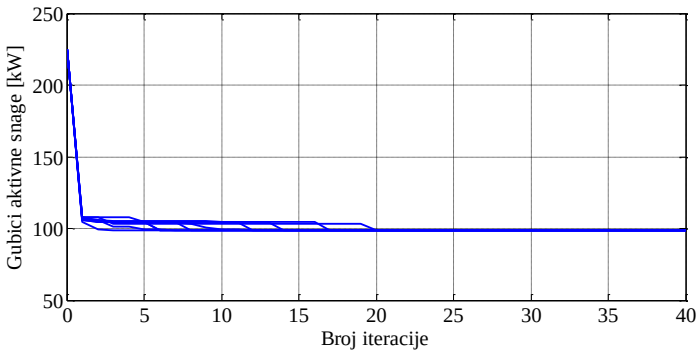
Druga mreža na kojoj je testiran izloženi algoritam je IEEE mreža sa 69 čvorova, 73 grane, 68 sekcionih i 5 poveznih prekidača. Nominalni napon mreže je 12,66 kV, a ukupno opterećenje je 3,80 MW i 2,69 MVAr. U odnosu na parametre simulacije date u tabeli 1 jedino je broj iteracija povećan na 40. Optimalna konfiguracija mreže se dobija isključenjem sekcionih prekidača u granama 14, 57, 61 i uključenjem poveznih prekidača u granama 71, 72 i 73, slika 9. Profili napona prije i poslije rekonfiguracije su prikazani na slici 10. Najniža vrijednost napona prije rekonfiguracije je u čvoru 65 i iznosi 0,9090 r.j. Nakon rekonfiguracije se popravljaju naponske prilike u mreži, pa se najniža vrijednost napona javlja u čvoru 61 i iznosi 0,9495 r.j. Ukupni gubici aktivne snage prije rekonfiguracije su iznosili 225 kW, dok se poslije rekonfiguracije smanjuju na 98,6 kW. Konvergencija algoritma za deset uzastopno pokrenutih simulacija je prikazana na slici 11. Naravno, na slici se vidi da zbog primjenjene stohastike u algoritmu, algoritam ne konvergira uvijek za isti broj iteracija. Srednji broj iteracija potreban za određivanje minimuma gubitaka aktivne snage dobijen na osnovu ovih deset simulacija je 8.



Slika 9. IEEE test mreža sa 69 čvorova poslije rekonfiguracije.



Slika 10. Profil napona u IEEE mreži sa 69 čvorova.



Slika 11. Promjena aktivne snage iz iteracije u iteraciju za IEEE test mrežu sa 69 čvorova prilikom 10 uzastopnih simulacija.

C. Poređenje rezultata rekonfiguracija

U ovom poglavlju su upoređeni rezultati simulacija dobijeni izloženim algoritmom kolonije mrava sa nekoliko algoritmima dostupnih u literaturi. Takođe, izvršeno je i pretraživanje svih mogućih rješenja. U tabeli 2 su prikazani rezultati rekonfiguracija za IEEE test mrežu sa 33 čvora. Iz date tabele se može vidjeti da izloženi algoritam uspješno nalazi globalni minimum gubitaka aktivne snage.

Tabela 2. Rezultati rekonfiguracija za IEEE 33 test mrežu

Algoritam / Izvor	Otvoreni prekidači u granama	Ukupni gubici aktivne snage	Minimalna vrijednost napona
Stanje prije rekonfiguracije	33, 34, 35, 36, 37	202,67 kW	0,9131 r.j.
Izloženi ACO	7, 9, 14, 32, 37	139,55 kW	0,9378 r.j.
[18], [22], [27]	7, 9, 14, 32, 37	139,55 kW	0,9378 r.j.
[28]	7, 10, 14, 32, 37	140,28 kW	0,9378 r.j.
Optimum*	7, 9, 14, 32, 37	139,55 kW	0,9378 r.j.

*Dobijen pretraživanjem svih mogućih konfiguracija.

Za drugu test mrežu sa 69 čvorova rezultati rekonfiguracija su prikazani u tabeli 3. Takođe, se može vidjeti da izloženi algoritam kolonije mrava konvergira ka globalnom minimumu. Ovdje je zanimljivo da se iste vrijednosti, gubitaka aktivne snage dobija za četiri različita uklopna stanja. Pri tome su i najniži naponi u mreži isti, pa se ne može odrediti optimalna konfiguracija, nego su sve četiri ravnopravne. Pored izloženog algoritma, u tabeli su prikazani rezultati rekonfiguracija još nekoliko metaheurističkih metoda.

Tabela 3. Rezultati rekonfiguracija za IEEE 69 test mrežu

Algoritam / Izvor	Otvoreni prekidači u granama	Ukupni gubici aktivne snage	Minimalna vrijednost napona
Stanje prije rekonfiguracije	69, 70, 71, 72, 73	225,00 kW	0,9092 r.j.
Izloženi ACO	14, 57, 61, 69, 70	99,6060 kW	0,9495 r.j.
[29]	/	99,62 kW	0,9428 r.j.
[30]	/	106,28 kW	0,9266 r.j.
[31]	/	118,00 kW	/
Optimum*	14, 55, 61, 69, 70	98,6060 kW	0,9495 r.j.
	14, 56, 61, 69, 70		
	14, 57, 61, 69, 70		
	14, 58, 61, 69, 70		

*Pretraživanjem svih mogućih kombinacija dobijen je isti rezultat za više uklopnih stanja.

VI. ZAKLJUČAK

U ovom radu je implementiram algoritam kolonije mrava za rekonfiguraciju distributivne mreže. Predložen je proračun poželjnosti isključenja grana zasnovan na odnosu tokova snaga po granama fundamentalne petlje. Izloženi algoritam je testiran na IEEE test mrežama sa 33 i 69 čvorova. Rezultati simulacija su pokazali da izloženi algoritam uspješno nalazi konfiguraciju za koju se imaju minimalni gubici aktivne snage. Takođe, rezultati rekonfiguracija su upoređeni sa nekoliko algoritama za rekonfiguraciju distributivnih mreža koji se mogu naći u literaturi. Pored ovoga, za potvrdu globalnog minimuma gubitaka aktivne snage izvršeno je pretraživanje cijelog skupa mogućih rješenja.

LITERATURA

[1] J. M. Gers, *Distribution System Analysis and Automation*, London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2014.

[2] N. Rajaković, D. Tasić, *Distributivne i industrijske mreže*, drugo izdanje, Akademska misao, Beograd, 2008.

[3] A. Merlin, H. Buck, "Search for a Minimal-Loss Operating Spanning Tree Configuration in an Urban Power Distribution System," 5th Power System Computation Conference (PSCC), Cambridge, U.K., September 1975.

[4] D. Popović, D. Bekut, V. Treskanica, *Specijalizovani DMS algoritmi*, Novi Sad: DMS Group, Jun 2004.

[5] F. L. Iborra, J. R. Santos, E. R. Ramos, "Mixed-Integer Linear Programming Model for Solving Reconfiguration Problems in Large-Scale Distribution Systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 88, pp. 137-145, July 2012.

[6] A. Augugliaro, L. Dusonchet, S. Mangione, "Optimal Re-configuration of Distribution Network or Loss Reduction Using Non-linear Programming," *European Transactions on Electrical Power*, vol. 1, no. 6, pp. 317-324, 1991.

[7] R. A. Jabr, R. Singh, B.C. Pal, "Minimum Loss Network Reconfiguration Using Mixed-Integer Convex Programming," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 3, pp. 1106-1115, December 2012.

[8] J. Y. Fan, L. Zhang, J. D. McDonald, "Distribution Network Reconfiguration: Single Loop Optimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 1643-1647, August 1996.

[9] A. A. M. Zin, A. K. Ferdavani, A. B. Khaiduddin, M. M. Naeini, "Reconfiguration of Radial Electrical Distribution Network Through Minimum-Current Circular-Updating- Mechanism Method," , vol. 27, no. 2, p. 968–974, May," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 968-974, May 2012.

[10] B. Stojanović, "Branch Exchange Approach to Power Loss Reduction in Reconfiguration Problem of Balanced Distribution Networks," *International Journal of Mechanical Engineering and Automation*, vol. 2, no. 3, pp. 142-149, December 2014.

[11] C. Blum, A. Roli, "Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison," *ACM Computing Surveys*, vol. 35, no. 3, pp. 268-308, September 2003.

[12] Y. J. Jeon, J. C. Kim, J.O. Kim, J. R. Shin, K. Y. Lee, "An Efficient Simulated Annealing Algorithm for Network Reconfiguration in Large-Scale Distribution Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 1070-1078, Ocoter 2002.

[13] A. Y. Abdelaziz, F. M. Mohamed, S. F. Mekhamer, M. A .L. Badr, "Distribution System Reconfiguration Using a Modified Tabu Search Algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 80, no. 8, pp. 943-953, August 2010.

[14] S. Bahadoorsingh, J. V. Milanovic, Y. Zhang, C. P. Gupta, J. Dragovic, "Minimization of Voltage Sag Costs by Optimal Reconfiguration of Distribution Network Using Genetic Algorithms," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 2, no. 4, p. 2271 – 2278, October 2007.

[15] Y. H. Song, G. S. Wang, A. T. Johns, P. Y. Wang, "Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction Using Fuzzy Controlled Evolutionary

Programming," I*EE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution*, Jul 1997.

[16] C. T. Su, C. F. Chang, J. P. Chiouc, "Distribution Network Reconfiguration for Loss Reduction by Ant Colony Search Algorithm," *Electric Power Systems Research*, vol. 75, no. 2-3, pp. 190-199, August 2005.

[17] A. Y. Abdelaziz, F. M. Mohammed, S. F. Mekhamer, M. A. L. Badr, "Distribution Systems Reconfiguration Using a Modified Particle Swarm Optimization Algorithm," *Electric Power Systems Res*earch, vol. 79, no. 11, p. 1521 – 1530, November 2009.

[18] A. Swarnkar, N. Gupta, K.R. Niazi, "Adapted Ant Colony Optimization for Efficient Reconfiguration of Balanced and Unbalanced Distribution Systems for Loss Minimization", *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 1, no. 3, pp. 129-137, September 2011.

[19] F. S. Pereira, K. Vittori, G. R. M. da Costa, "Ant Colony Based Method for Reconfigura-tion of Power Distribution System to Reduce Losses," *2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition*: Latin America, 13-15.

[20] M. Dorigo, M. Birattari, T. Stiitzle, "Ant colony optimization: artificial ants as a computational intelligence technique.," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 1, no. 4, p. 28-39.

[21] A. Ahuja, A. Pahwa, "Using Ant Colony Optimization for Loss Minimization in Distribution Networks," *Proceedings of the 37th Annual North American Power Symposium*, Ames, IA, USA, USA, October 2005.

[22] M.A. Ghorbani, S.H. Hosseinian, B. Vahidi, " Application of Ant Colony System Algorithm to Distribution Networks Reconfiguration for Loss Reduction," *2008 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, Brasov, Romania, May 2008.

[23] M. Dorigo and T. Stützle, *Ant Colony Optimization*, The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2004.

[24] Christine Solnon, *Ant Colony Optimization and Constraint Programming*, John Wiley & Sons, 2010.

[25] J. Mendoza, R. López, D. Morales, E. López, P. Dessante, R. Moraga, "Minimal Loss Reconfiguration Using Genetic Algorithms With Restricted Population and Addressed Operators: Real Application", *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, no. 2, pp. 948-954, May 2006.

[26] E. G. Talbi, Metaheuristics from Design to Implementation, New Jersey, Canada: John Wiley & Sons, 2009.

[27] A. A. M. Zin, A. K. Ferdavani, A. B. Khaiduddin, M. M. Naeini, "Reconfiguration of Radial Electrical Distribution Network Through Minimum-Current Circular-Updating- Mechanism Method," , vol. 27, no. 2, p. 968–974, May," *IEEE Transactions On Power Systems*, vol. 27, no. 2, pp. 968-974, May 2012.

[28] D. Shirmohammadi and H. W. Hong, "Reconfiguration of Electric Distribution Networks for Resistive Line Loss Reduction," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 4, no. 2, pp. 1492-1498, Apr. 1989.

[29] J. Chen, F. Zhang, Y. Zhang, "Distribution Network Reconfiguration Based on Simulated Annealing Immune Algorithm," *Energy Procedia*, vol. 12, pp. 271-277, September 2011.

[30] M. Zhigang, "Study on Distribution Network Reconfiguration Based on Genetic Simulated Annealing Algorithm," CICED 2008, *China International Conference on Electricity Distribution*, Guangzhou, China, 11-13 December 2008.

[31] N. Xiong, H. Cheng, L. Yao, M. Bazargan, "Switch Group Based Tabu Search Algorithm for Distribution Network Reconfiguration," *Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, Nanjing, China, 6-9 April 2008.

AUTORI

Predrag Mršić – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet; Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet, predrag.mrsic@etf.unibl.org (kontakt)
Nikola Rajaković – Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, rajakovic@etf.bg.ac.rs

Uticaj armirano betonskog stuba na raspodelu magnetskog polja mešovitog voda

Impact of reinforced concrete tower on the magnetic field distribution of mixed power line

Teodora Gavrilov [*], Karolina Kasaš-Lažetić [*], Kristian Haška [*], Miroslav Prša [**]

[*] Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, R. Srbija
[**] penzionisan sa Fakulteta tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, R. Srbija

Sažetak- U radu je izvršena analiza raspodele magnetskog polja sistema mešovitog nadzemnog voda (20 kV/0,4 kV), postavljenog na armirano betonske stubove tipa MNL-12. Ispitan je uticaj prisustva feromagnetskih, provodnih delova stuba (armaturnih šipki, uzengija kao i konzola za prihvat provodnika) na raspodelu magnetskog polja. Ceo proračun je izveden numerički, pomoću COMSOL Multiphysics računarskog programskog paketa na pojednostavljenom 2D modelu, sa ciljem da se utvrdi uticaj vrtložnih struja, indukovanih u feromagnetskim, provodnim delovima na magnetsko polje koje stvaraju struje u provodnicima sistema. Rezultati proračuna su prikazani grafički, pomoću dijagrama zavisnosti intenziteta vektora magnetske indukcije u ravni koja sadrži stub i normalna je na pravac prostiranja vodova. Rezultati su pokazali, da magnetsko polje indukovanih struja smanjuje magnetsko polje struja nadzemnog voda.

Ključne reči- Armirano betonski stub, indukovane struje, magnetsko polje, mešoviti vod.

Abstract- In this paper, the analysis of magnetic field distribution of overhead mixed power line (20 kV/0.4 kV) supported by reinforced concrete towers, named MNL-12 is presented. The impact of ferromagnetic, conductive parts of the pylons (reinforcing bars, billets and cross arm beams) on magnetic field distribution is investigated. The numerical calculations were performed in COMSOL Multiphysics program package on simplified 2D model. The main goal of the calculations was to examine the impact of currents induced in ferromagnetic conductive parts on magnetic field produced by currents in the power system's conductors. The calculation results are presented graphically, as the diagrams of the magnetic flux density magnitude distribution in the tower plan, normal to the system's axe. The calculation results demonstrated that the magnetic field of induced currents decreases the magnetic field produced by the currents of overhead power system.

Key words- reinforced concrete tower, induced currents, magnetic field, mixed power line.

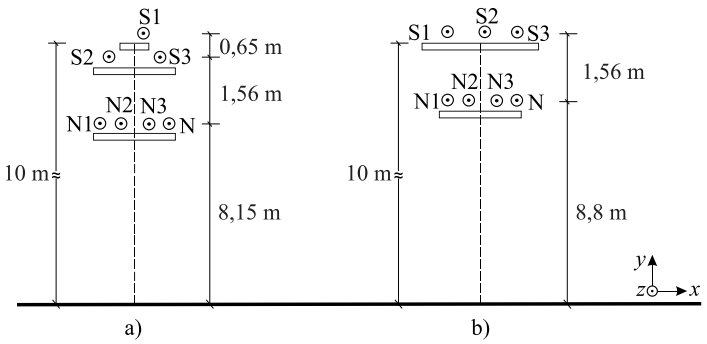
I. UVOD

Elektroenergetski sistem sačinjen je od četiri podsistema: proizvodnje, prenosa, distribucije i neposredne potrošnje električne energije. Prenos i distribucija električne energije izvode se pomoću elektroenergetskih vodova [1]. U okolini tih vodova, stvara se električno i magnetsko polje, a živi svet, koji se nalazi u tom okruženju, je neprestano izložen uticaju ovih polja. Upravo zbog toga, poznavanje raspodele magnetskog polja, koje stvaraju provodnici mešovitih vodova postavljenih na armirano betonske stubove, su od velikog značaja.

U gradskim sredinama se danas sve više koriste podzemni kablovi, dok se nadzemni vodovi, još uvek uglavnom koriste u seoskim i nenaseljenim delovima. Između razdvojenih ruralnih oblasti, a nekad i unutar njih, u mnogim slučajevima se koriste nadzemni, takozvani višesistemski ili mešoviti vodovi [2]. Mešoviti nadzemni vodovi predstavljaju kombinaciju kako niskonaponskog tako i srednjenaponskog trofaznog voda koji su vođeni duž istih trasa na zajedničkim stubovima.

Za srednjenaponske vodove se danas najčešće koriste neizolovani alučel provodnici. U ovom radu je posmatrana situacija kada su i NN vodovi načinjeni od neizolovanih alučel provodnika, iako se umesto njih sve više koriste samonoseći kablovski snopovi.

Elementi nadzemnog voda koji služe za nošenje vodova neizolovanih provodnika, kao i samonosećih kablovskih snopova na propisanoj visini, nazivaju se stubovi [3]. Predviđeni su da izdrže sva opterećenja koja nastaju zbog mehaničkih karakteristika vodova i spoljašnjih klimatskih uticaja. Betonski stubovi se smatraju najtrajnijim (vek trajanja im je oko 50 godina), i veoma su laki za održavanje. Koriste se za SN i NN vodove, samim tim i za mešovite vodove. Moguće konfiguracije vodova na armirano-betonskim stubovima prikazane su na slici 1. Srednjenaponski vodovi (S1 S2 S3) mogu da se postave u obliku trougla (slika 1a) ili u istoj ravni (slika 1b), dok se niskonaponski vodovi (N1 N2 N3) zajedno sa nultim vodom, uvek postavljaju na horizontalnu konzolu, i uvek postavljaju ispod srednjenaponskih vodova [4].



Slika 1 – *Konfiguracija NN i SN voda mešovitog sistema armirano betonskog stuba: a) trougaona, b) horizontalna.*

U okviru ovog rada je izvršena analiza raspodele magnetskog polja u okolini mešovitog voda, postavljenog na armirano betonski stub, sa razmeštajem faznih provodnika prikazanim na slici 1. Ispitan je uticaj rasporeda faznih provodnika oba sistema (kada je SN vod postavljen u obliku trougla, kao i kada je postavljen u horizontalnu ravan) sa ciljem da se pronađe najgora moguća konfiguracija sa ekološkog aspekta, ona koja daje magnetsko polje najvećeg intenziteta na standardom definisanoj ispitnoj visini od 1 m od tla.

II. TEORIJSKA OSNOVA RADA

Nadzemni vodovi stvaraju elektromagnetska polja mrežne učestanosti koja na ovim prostorima iznosi 50 Hz. S obzirom da takva polja spadaju u vremenski sporopromenljiva polja, analiza vremenski sporopromenljivog magnetskog polja može da se izvrši nezavisno od vremenski sporopromenljivog električnog polja.

Pošto su u pitanju vremenski promenljive struje, u provodnicima dolazi do površinskog efekta, tj. dolazi do neravnomerne raspodele struje po poprečnom preseku provodnika. Stoga, mnogo manji deo struje će se rasporediti po čeličnom jezgru alučel užeta. Usled toga, jezgro iako napravljeno od nelinearnog materijala, neće dostići zasićenje, te se može posmatrati kao linearan materijal konstantne permeabilnosti.

Gore spomenute osobine sistema omogućuju da se analiza problema pojednostavi, tj. izvrši u kompleksnom domenu. Usled geometrije sistema moguće je ceo sistem posmatrati kao dvodimenzionalan, u ravni koja je normalna na pravac prostiranja vodova, te se Dekartov pravougli koordinatni sistem pokazao kao najpogodniji za to. Smer osa korišćenog koordinatnog sistema prikazan je na slici 1.

Kompleksni magnetski vektor potencijal je jedna od najčešće korišćenih veličina za određivanje elektromagnetskog polja u kompleksom domenu i dobija se rešavanjem sledeće kompleksne parcijalne diferencijalne jednačine [5],

$$\Delta\underline{\vec{A}} - \jmath\omega\mu\sigma\underline{\vec{A}} = -\mu\underline{\vec{J}}\,. \tag{1}$$

Kompleksni vektor magnetske indukcije dobija se pomoću rešenja (1), kao,

$$\underline{\vec{B}} = \mathrm{rot}\,\underline{\vec{A}}. \tag{2}$$

Prilikom rešavanja (1), uzeto je, kao granični uslov, da magnetski vektor potencijal iščezava dovoljno daleko od provodnika.

Usled indukovanog električnog polja,

$$\underline{\vec{E}}_i = -\jmath\omega\underline{\vec{A}}, \tag{3}$$

koje prati vremenski promenljivo magnetsko polje, u feromagnetskom, provodnom materijalu se indukuju struje,

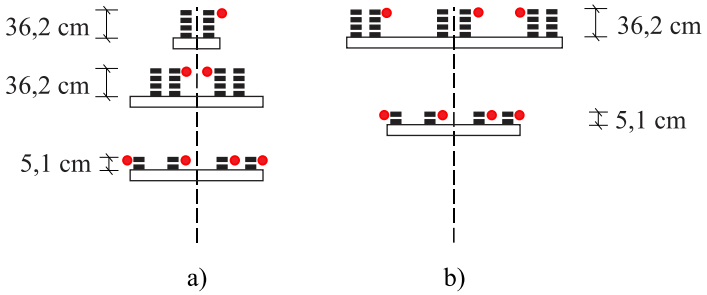
$$\underline{\vec{J}}_i = \sigma\underline{\vec{E}}_i = -\jmath\omega\sigma\underline{\vec{A}}\,, \tag{4}$$

koje su po Lencovom zakonu takvog smera, da teže da spreče promenu fluksa. Magnetsko polje indukovanih struja će prema tome smanjiti magnetsko polje nadzemnog voda.

III. MODEL

Armirano betonski stub MNL-12, ukupne visine 12m, zakopan je 2m u zemlju, te je visina stuba iznad zemlje 10 m. Na armirano betonski stub se postavljaju vršne konzole, na koje su pričvršćeni potporni izolatori za prihvat provodnika. Konzole na kojima se nalaze izolatori SN voda mogu biti načinjeni od armiranog betona ili od čelika. Nosači izolatora NN voda su uvek čelične konzole. Provodnici se vezuju mekom žicom, proizvoljno, sa unutrašnje ili spoljašnje strane na potporni izolator. Prostorna konfiguracija faznih provodnika, tj. da li je provodnik sa unutrašnje ili spoljašnje strane izolatora, ne utiče bitno na raspodelu magnetskog polja [2]. Na slici 2 prikazane su prostorne konfiguracije koje su korišćene u radu, kao i visine izolatora. Visine na kojima se provodnici nalaze, određene su dimenzijom stuba, konfiguracijama konzola i izolatora, kao i visinom izolatora, prikazanim na slici 1.

SN neizolovani alučel provodnici su uvek preseka 50/8 mm^2 [4]. U ovom radu su i NN provodnici uzeti da su istog preseka.



Slika 2 – *Prostorni raspored faznih provodnika: a) trougaona konfiguracija, b) horizontalna konfiguracija.*

Da bi se proračun raspodele elektromagnetskog polja pojednostavio, realan alučel provodnik je prvo zamenjen uprošćenim modelom, sastavljenim od koaksijalno postavljenih cilindričnih provodnika kružnog poprečnog preseka, unutrašnjeg od čelika, i spoljašnjeg od aluminijuma [6]. U [2] je pokazano da čelično jezgro ne utiče značajno na raspodelu magnetskog polja izvan provodnika, tako da su u ovom radu alučel provodnici modelovani kao provodnici punog poprečnog preseka od aluminijuma.

IV. REŠAVANJE PROBLEMA U COMSOL MULTTIPHYSICS PROGRAMSKOM PAKETU

Posmatrajući pojednostavljeni, dvodimenzionalni model mešovitog voda 20 kV/0,4 kV postavljen na armirano betonski stub, proračun raspodele magnetskog polja se vrši numerički, pomoću COMSOL Multiphysics računarskog programskog

paketa, tj. njegovog AC/DC modula i podmodula 2D, Magnetic Fields (mf) – Frequency Domain simulacije.

Za određivanje raspodele magnetskog polja pomoću ovog programskog paketa, potrebno je najpre definisati geometriju modela i materijale korišćene u sistemu. Da bi se problem rešio, potrebno je definisati i najpogodniju mrežu konačnih elemenata.

Posmatran sistem čine 6 faznih provodnika i jedan neutralni vod, modelovani pomoću kružnica, 2 pravougaonika pomoću kojih se modeluju vazduh i zemlja, kao i armirano betonski stub, koji se unosi iz AutoCAD fajla [7].

Potrebno je definisati materijale za sve elemente sistema sa njihovim električnim i magnetskim karakteristikama, koje su neophodne COMSOL-u za proračun. Materijali koji su korišćeni, kao i njihove električne i magnetske karakteristike, prikazani su u tabeli 1. Iz razloga koji je već naveden, provodnik je modelovan da je od aluminijuma, dok su armaturne šipke i uzengije u betonskom stubu, kao i konzole od čelika.

Pravougaonik u kome se nalaze provodnici modeluje vazduh, a drugi zemlju. Njihove dimenzije treba da su dovoljno velike, da bi na njihovim granicama magnetsko polje iščezlo. Za ispravan rad programa, vazduh treba da se modeluje kao da ima veoma malu specifičnu provodnost, različitu od nule.

Tabela 1 – *Električne i magnetske karakteristike materijala.*

	σ [S/m]	ε_r	μ_r
Aluminijum	$35{,}5\cdot10^6$	1	1
Čelik	$5{,}59\cdot10^6$	1	850
Vazduh	$1\cdot10^{-6}$	1	1
Zemlja	1/50	1	1

Kao ulazni podaci se zadaju kompleksni vektori jačina struja svakog faznog provodnika. Trajno dozvoljena jačina struje u sistemu, za alučel uže nominalnog preseka 50/8 mm^2, prema Pravilniku [4], iznosi 170 A. Shodno tome, za strujno opterećenje faznih provodnika u oba sistema, definisane su jačine struja provodnika, sa faznim kašnjenjem od 120° među faznim jačinama struja:

$$\underline{I}_0^{20kV} = 170\sqrt{2}\,e^{j0^\circ}\ A, \qquad \underline{I}_0^{0,4kV} = 170\sqrt{2}\,e^{j0^\circ}\ A,$$

$$\underline{I}_4^{20kV} = 170\sqrt{2}\,e^{-j120^\circ}\ A, \qquad \underline{I}_4^{0,4kV} = 170\sqrt{2}\,e^{-j120^\circ}\ A,$$

$$\underline{I}_8^{20kV} = 170\sqrt{2}\,e^{j120^\circ}\ A, \qquad \underline{I}_8^{0,4kV} = 170\sqrt{2}\,e^{j120^\circ}\ A.$$

Da bi se izvršilo modelovanje posmatrane strukture, potrebno je izvršiti diskretizaciju prostora na konačan broj elemenata jednostavnog oblika. Korišćen programski paket deli oblast od interesa na trouglove različitih veličina. Da bi se izbeglo preopterećenje računara ali da bi i dalje bila što veća tačnost pri određivanju raspodele magnetskog polja, formirana je mreža koja je u okolini provodnika gušća, nego u oblasti daleko od njih.

Nakon formiranja mreže, program rešava odgovarajuće kompleksne parcijalne diferencijalne jednačine po nezavisnoj promenljivoj, magnetskom vektor potencijalu, u odgovarajućim tačkama mreže i time omogućuje određivanje veličina od interesa, u ovom slučaju vektora magnetske indukcije.

V. REZULTATI PRORAČUNA

Rezultati dobijeni pomoću računarskog programskog paketa COMSOL Multiphysics, predstavljeni su grafički – prikazana je promena intenziteta vektora magnetske indukcije, u ravni poprečnog preseka sistema na mestu stuba (*x*0*y* ravan, slika 1), duž linije koja se proteže u rasponu ±30m od ose stuba, na visini 1m iznad tla.

Prvo su prikazani rezultati kada je SN vod postavljen horizontalno, a zatim kada SN vod obrazuje trougaonu formu. NN vod, kada su načinjeni od neizolovanih alučel provodnika, kao što je u ovom modelu, se uvek postavlja na horizontalne konzole ispod SN voda u skladu sa Pravilnikom [4].

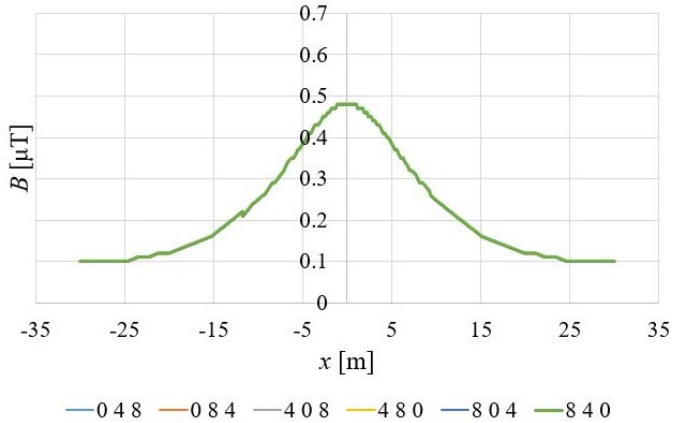
Za oba slučaja, prvo je ispitan uticaj rasporeda faza SN voda na raspodelu magnetskog polja, u okolini mešovitog voda, bez prisustva NN voda i armirano betonskog stuba. Zatim su, za onaj raspored faza SN voda koji daje najveće vrednosti magnetskog polja, posmatrane dve situacije: kada je, pored NN voda, izostavljen i armirano betonski stub, i kada je on prisutan.

U sledećem koraku je posmatran sistem, kojem je dodat NN sistem pri onom rasporedu faznih stavova SN voda koji je u odsustvu NN voda dao najveće vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije. Izvršena je analiza uticaja rasporeda faza NN voda, da bi se utvrdilo koji raspored daje najveće vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini sistema, tj. koji je najnepovoljniji raspored faza sa stanovišta zaštite životne sredine, bez stuba i sa stubom.

Na kraju su upoređene raspodele intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini mešovitog voda pri istovremenom prisustvu SN i NN voda, za one fazne stavove koji su dali najveće vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije, da bi se uporedio i uticaj konfiguracije SN sistema (horizontalan ili trougaoni raspored voda) na raspodelu magnetskog polja. Rezultati su prikazani grafički.

A. SN provodnici postavljeni horizontalno

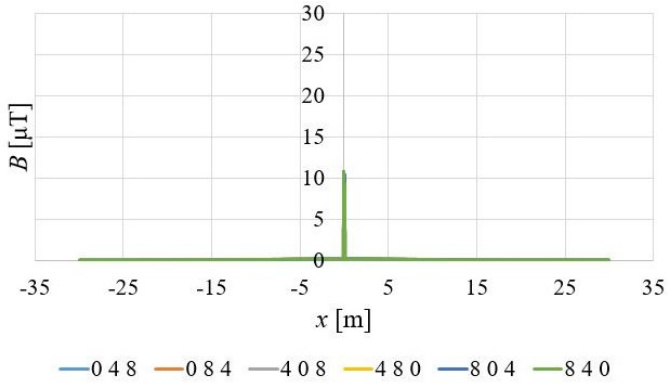
Prvo je analiziran uticaj rasporeda faza SN voda bez prisustva NN voda i armirano betonskog stuba na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije. Dobijena zavisnost prikazana je na slici 3.



Slika 3 - *Intenzitet vektoga magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda*
(1m iznad tla; -30m, +30m; bez NN voda; bez stuba).

Raspored faza SN voda horizontalne konfiguracije ne utiče na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije kada se iz analize izostave NN vod i armirano betonski stub, kao što se vidi sa slike 3.

U sledećem koraku je posmatran SN vod postavljen na armirano betonski stub, ponovo bez NN voda. Raspodela intenziteta vektora magnetske indukcije za datu konfiguraciju je prikazana na slici 4.



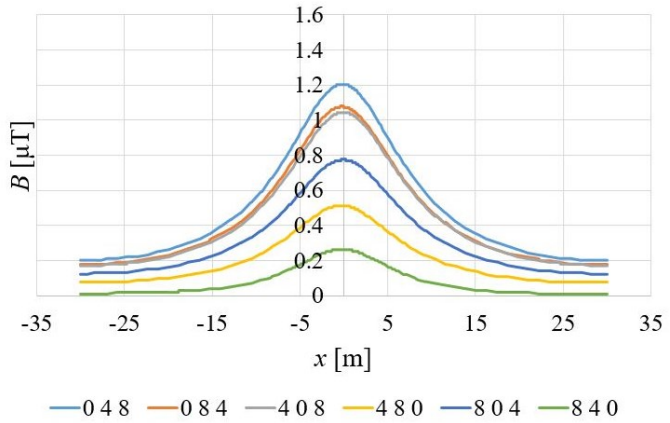
Slika 4 - *Intenzitet vektoga magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda u horizontali*
(1m iznad tla; -30,+30; bez NN voda; sa stubom).

Utvrđeno je da na na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije ni u ovom slučaju ne utiče raspored faza SN voda.

Upoređujući slike 3 i 4 se vidi, da dolazi do značajne razlike u raspodeli intenziteta vektora magnetske indukcije, prvenstveno u oblasti gde se nalazi armirano betonski stub. Nagli porast intenziteta vektora magnetske indukcije na mestu stuba dolazi usled velike razlike u permeabilnosti armature i okolne sredine.

S obzirom da je pokazano da raspored faza SN voda ne utiče na raspodelu magnetskog polja, dalje analize rađene su pri rasporedu faza 048. Dodavanjem NN voda, istih nominalnih jačina struja kao u SN vodovima, kompletiran je mešoviti vod.

Ispitan je uticaj rasporeda faza NN voda mešovitog voda na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije, najpre bez prisustva armirano betonskog stuba. Dobijena raspodela intenziteta vektora magnetske indukcije je prikazana na slici 5.

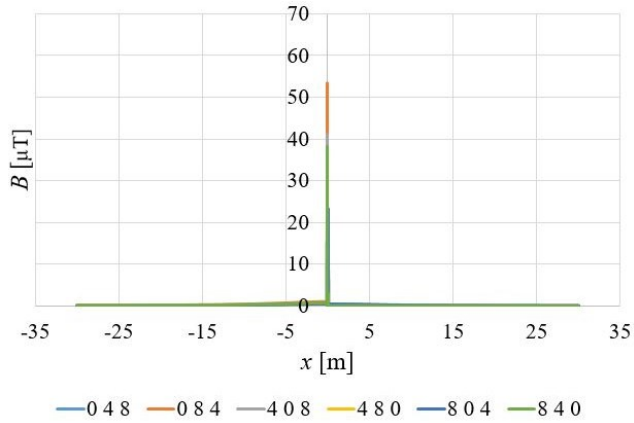


Slika 5 - *Intenzitet vektoga magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda u horizontali*
(1m iznad tla; -30m,+30m; sa NN vodom; bez stuba).

Na osnovu slike se vidi da raspored faza NN voda menja intenzitet vektora magnetske indukcije u okolini mešovitog voda. Najnepovoljnija raspodela polja se dobija za fazni stav 048, pri kojem se javlja najveći intenzitet vektora magnetske indukcije B_{048} = 1,2 μT. U sistemu bez NN voda, najveći intezitet vektora magnetske indukcije je B = 0,48 μT.

Upoređivanjem ovih vrednosti može da se zaključi da je najveći intenzitet vektora magnetske indukcije 2,5 puta veći u kompletiranom mešovitom vodu (SN+NN) u odsustvu stuba.

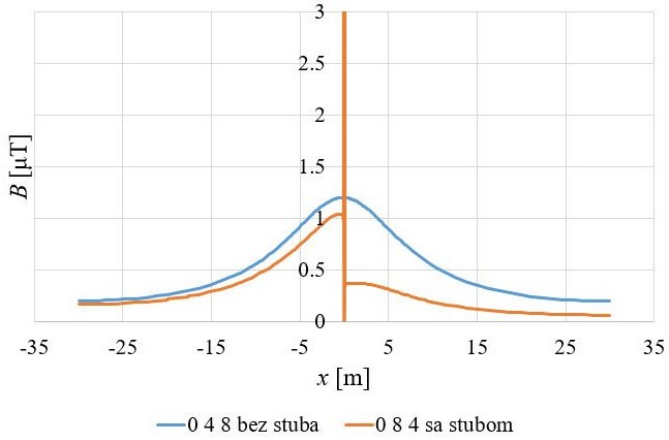
Isti postupak, pod istim uslovima, je ponovljen i za sistem koji je postavljen na armirano betonski stub, a dobijeni rezultati su prikazani na slici 6.



Slika 6 - *Intenzitet vektoga magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda u horizontali*
(1m iznad tla; -30m,+30m; sa NN vodom; sa stubom).

Raspored faza NN voda, koji je postavljen na armirano betonski stub, takođe menja raspodelu polja u okolini stuba (slika 6). Značajan porast intenziteta vektora magnetske indukcije u oblasti armirano betonskog stuba i neznatan ali najveći porast u okolini stuba, daje raspored faza 084 NN voda. Ta konfiguracija je različita od one koja daje najveći intenzitet kada je stub izostavljen (048).

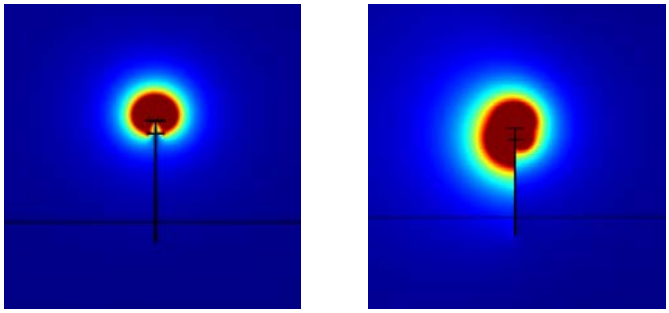
Na slici 7 je predstavljena raspodela magnetskog polja za najnepovoljnije fazne stavove u oba sistema, sa i bez stuba.



Slika 7 - *Intenzitet vektoga magnetske indukcije za najnepovoljniji raspored faza u oba sistema*
(1m iznad tla; -30m,+30m; sa NN vodom; sa i bez stuba).

Upoređujući grafike na slici 7, zaključuje se da je u oblasti izvan stuba veći intenzitet magnetskog polja u slučaju kada je armirano betonski stub izostavljen iz analize, tj. da prisustvo stuba smanjuje magnetsko polje u negovoj okolini. Do pojave smanjenja intenziteta vektora magnetske indukcije u prisustvu armirano betonskog stuba dolazi, kao što je u teorijskom razmatranju rada napomenuto, usled dejstva indukovanih struja u čeličnim armaturama betonskog stuba. Te struje daju dodatnu komponentu magnetskog polja koja se superponira na magnetsko polje nadzemnog voda. Da bi se na slici bolje uočila razlika u raspodelama magnetskog polja sa i bez stuba, intenzitet vektora magnetske indukcije u samom stubu je predstavljen samo do vrednosti 3 μT.

Prostorna raspodela intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini mešovitog voda 20 kV/0,4 kV postavljenog na armirano betonske stubove, za neke od faznih stavova SN voda prikazana je na slici 8.



a) b)

Slika 8 - Intenzitet vektoga magnetske indukcije za raspored faza: a) SN 840 bez NN, b) SN 048 + NN 084 (sa stubom).

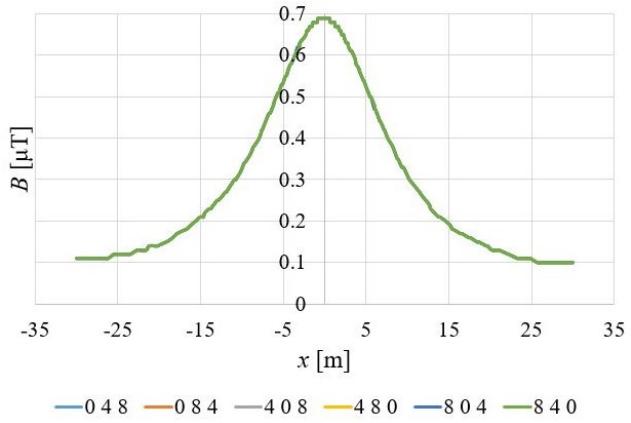
Sa slike 8 se vidi, da na dodatno povećanje intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini mešovitog nadzemnog voda postavljenog na armirano betonski stub utiču struje NN provodnika. Sa slike 8 takođe može da se uoči nesimetrija u raspodeli magnetskog polja u okolini nadzemnih vodova, koja se pripisuje nesimetričnom položaju provodnika NN voda u odnosu na stub. Iako su vizuelno sva 4 provodnika (3 NN + neutralni vod) simetrično postavljena na NN konzoli (slika 1) - u neutralnom vodu, koji je po-stavljen na desnom kraju NN konzole se ne uspostavlja struja (simetrični trofazni vod u primenjenom modelu), te je ukupna prostorna raspodela magnetskog polja faznih provodnika nesi-metrična i manjeg intenziteta oko desnog kraja NN konzole.

B. SN provodnici postavljeni u trougao

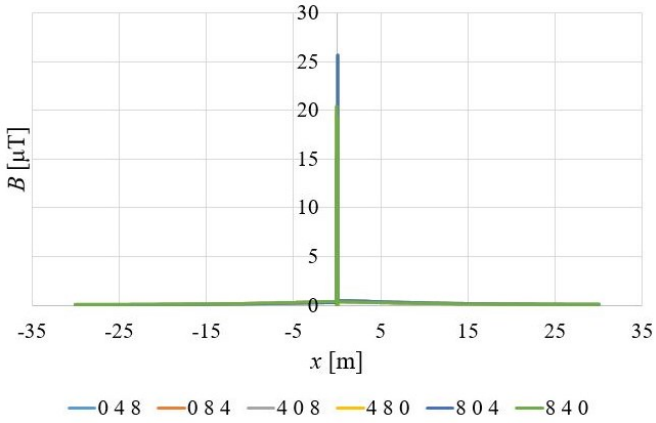
Analiza je, i u ovom slučaju, započeta ispitivanjem uticaja rasporeda faza struja SN voda bez prisustva NN voda i armirano betonskog stuba na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije. Dobijena zavisnost prikazana je na slici 9.

Sa slike 9 može da se uoči, da raspored faza SN voda kada provodnici voda formiraju trougao ne utiče na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije kada se iz proračuna izostave NN vod i armirano betonski stub.

U sledećoj fazi analize, u sistem je dodat i armirano betonski stub, pri čemu je i dalje izostavljen NN vod. Dobijena raspodela intenziteta vektora magnetske indukcije bez prisustva NN voda prikazana je na slici 10.



Slika 9 - *Intenzitet vektoga magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda u trouglu (1m iznad tla; -30m,+30m; bez NN voda; bez stuba).*



Slika 10 - *Intenzitet vektoga magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda u trouglu (1m iznad tla; -30m,+30m; bez NN voda; sa stubom).*

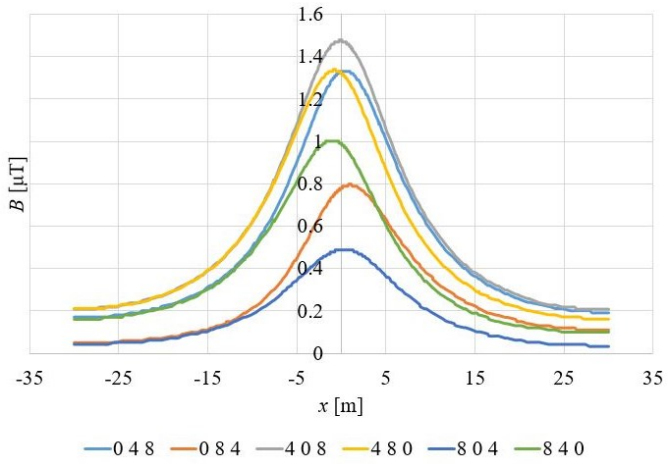
Na osnovu prikazanog grafika, ponovo se može zaključiti da na raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije ni u ovom slučaju ne utiče raspored faza SN voda.

Velika razlika u raspodeli intenziteta vektora magnetske indukcije i za trougaonu konfiguraciju SN voda uočava se prvenstveno u oblasti gde se nalazi armirano betonski stub, što se može videti kada se uporede dobijeni grafici, prikazani na slikama 9 i 10. Izvan stuba je razlika u raspodeli zanemarljiva te je za dalje analize uzet raspored faza 048 SN voda.

Analogno analizi kada je SN vod bio u horizontalnoj konfiguraciji, u sistem je priključen i NN vod, ponovo istih nominalnih jačina struja kao u SN vodu i ispitano je koji raspored faza NN voda daje najnepovoljniju raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije.

Na slici 11 su prikazani rezultati dobijeni za mešoviti vod bez prisustva armiranog stuba.

U prisustvu SN i NN voda, raspored faza NN voda menja intenzitet vektora magnetske indukcije u okolini mešovitog voda (slika 11). Najnepovoljnija raspodela magnetskog polja se dobija za fazni stav 408, pri kojem se javlja najveći intenzitet vektora magnetske indukcije B_{408} =1,48 μT.



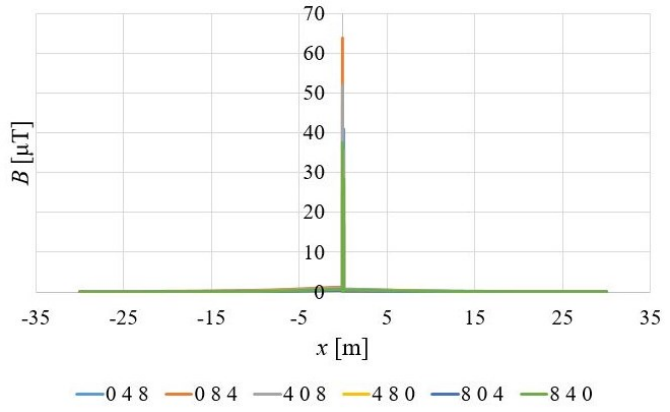
Slika 11 - *Intenzitet vektoga magnetske indukcije za različite rasporede faza SN i NN voda u trouglu*
(1m iznad tla; -30m, +30m; bez stuba).

U sistemu bez priključenog NN voda, najveći intezitet vektora magnetske indukcije je bio $B = 0{,}69$ μT. Dodavanjem NN voda, najveći intenzitet vektora magnetske indukcije povećao se 2,15 puta.

Upoređujući sve dosadašnje rezultate se vidi, da se veći intenzitet vektora magnetske indukcije (i bez i sa NN vodom) dobija u slučaju kada su SN vodovi u trougaonoj konfiguraciji, te vidimo da je horizontalna konfiguracija povoljnija sa aspekta očuvanja zaštite životne sredine.

Veći intenzitet vektora magnetske indukcije u slučaju trougaone konfiguracije se javlja iz razloga što su kod trougaone konfiguracije NN provodnici i SN provodnici S2 i S3 (slika 1), na manjem rastojanju od tla u odnosu na iste te provodnike u horizontalnoj konfiguraciji.

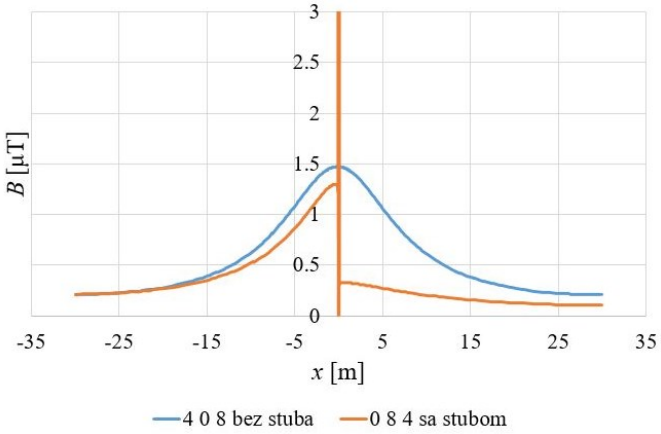
Isti postupak je ponovljen za sistem koji je postavljen na armirano betonski stub, a rezultati su prikazani na slici 12.



Slika 12 - *Intenzitet vektoga magnetske indukcije za različite rasporede faza SN voda i NN voda u trouglu*
(1m iznad tla; -30m, +30m; sa stubom).

Na osnovu slike 12 se vidi, da raspored faza NN voda, koji je postavljen na armirano betonski stub, takođe menja raspodelu magnetskog polja u okolini stuba. Raspored faza 084 daje značajan porast intenziteta vektora magnetske indukcije u oblasti oko armirano betonskog stuba u njegovoj neposrednoj blizini, pri čemu je taj porast evidentan i u osnosu na horizontalnu konfiguraciju SN sistema.

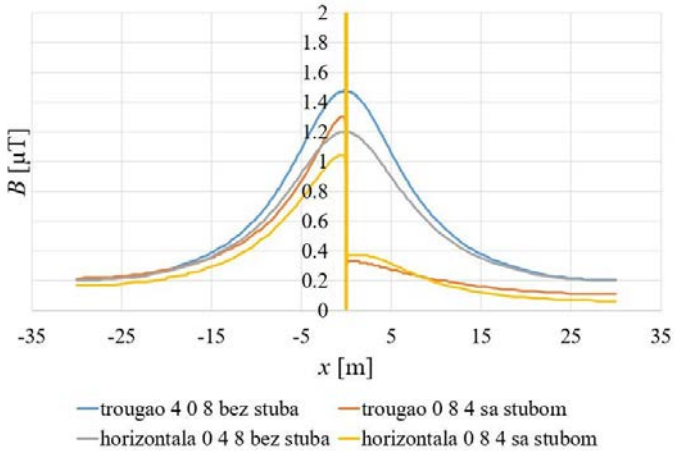
U narednom koraku, upoređene su vrednosti inteziteta vektora magnetske indukcije za fazne stavove u oba sistema (sa i bez stuba) koji daju najveće vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije, a dobijeni uporedni grafik je prikazan na slici 13.



Slika 13 - *Intenzitet vektoga magnetske indukcije za najnepovoljniji raspored faza u oba sistema*
(1m iznad tla; -30m,+30m; sa NN vodom; sa i bez stuba).

Sa slike 13 ponovo može da se uoči, da struje u NN provodnicima utiču na povećanje intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini armirano betonskog stuba.

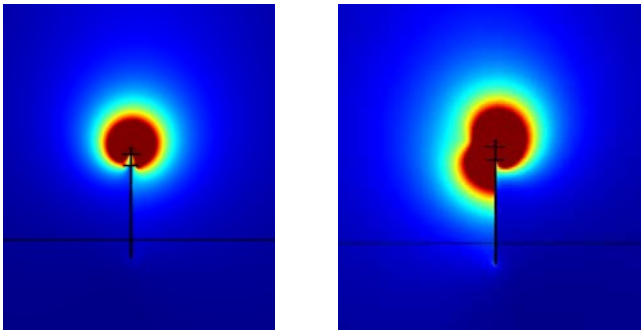
Na slici 14 su prikazani grafici intenziteta vektora magnetske indukcije za najnepovoljnije rasporede faza mešovitog voda 20 kV/0,4 kV sa ekološkog aspekta za slučaj kada SN vodovi obrazuju trougaonu konfiguraciju, kao i za slučaj kada SN vodovi obrazuju horizontalnu konfiguraciju. Upoređeni su grafici kada se mešoviti vod nalazi na stubu, kao i kada je stub izostavljen.



Slika 14 - *Intenzitet vektoga magnetske indukcije za najnepovoljniji raspored faza u oba sistema*
(1m iznad tla; -30m,+30m; sa i bez stuba).

Na slici 14 se vidi da je trougaona konfiguracija SN voda nepovoljnija u odnosu na horizontalnu u oba slučaja (sa i bez stuba) pošto daje veće vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije. To znači da se, posmatrano sa ekološkog aspekta, preporučuje horizontalna konfiguracija SN voda.

Na slici 15 su predstavljene prostorne raspodele intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini mešovitog voda postavljenog na armirano betonski stub, za neke od faznih stavova SN voda.



a) b)

Slika 15 - *Intenzitet vektoga magnetske indukcije za raspored faza: a) SN 804 bez NN, b) SN 048 + NN 084 (sa stubom).*

Kao što se sa slike 15 vidi, prisustvo stuba unosi nesimetriju u raspodelu intenziteta vektora magnetske indukcije i smanjuje vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije u okolini stuba iz istih razloga kao što je objašnjeno uz sliku 8.

VI. ZAKLJUČAK

Posmatrajući rezultate izvršenih proračuna za obe konfiguracije, pokazano je da se veći intenzitet vektora magnetske indukcije dobija u slučaju kada su SN vodovi u trougaonoj konfiguraciji, zbog visine na kojoj se NN i SN provodnici nalaze – kod trougaone konfiguracije su manje udaljeni od tla.

Sumirajući prethodne proračune, dolazi se do zaključka da armirano betonski stub smanjuje magnetsko polje u neposrednoj okolini stuba, usled indukovanih struja čije se magnetsko polje superponira magnetskom polju provodnika. Dobijene vrednosti intenziteta vektora magnetske indukcije za obe posmatrane konfiguracije u oblasti van stuba su mnogo manje od Pravilnikom [8] propisane granice, B_{max} = 40 μT.

ZAHVALNICA

Rad predstavlja deo istraživanja na projektu broj TR32055, finansiranom od strane Ministarstva za nauku i tehnološki razvoj Srbije, 2011-2020.

LITERATURA

[1] V. C. Strezoski, *Osnovi elektroenergetike*. Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2015.

[2] D. Vidrić, *Analiza raspodele magnetskog polja u okolini mešovitih vodova*, diplomski rad, FTN, Novi Sad, 2018.

[3] Miroslav D. Nimrihter, *Elektrodistributivni sistemi*, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet tehničkih nauka, 2009.

[4] *Pravilnik o tehničkim normativima za izgradnju nadzemnih elektroenergetskih vodova nazivnog napona od 1 kV do 400 kV*, Sl. List SFRJ, br. 65/88 i Sl. List SRJ, br. 18/92.

[5] B. D. Popović, *Elektromagnetika*, Građevinska knjiga, Beograd, 2000.

[6] M. Prša, K. Kasaš-Lažetić, D. Herceg, N. Đurić, "*Determination of Frequency Dependent Radiuses of Steel Cored Aluminium Conductors,* " in Proceedings of 2nd International Conference on EMF-ELF, Paris, France, 2011.

[7] A. Višnjić, *Uticaj rešetkastog stuba na raspodelu magnetskog polja mešovitog voda*, diplomski rad, FTN, Novi Sad, 2019.

[8] *Pravilnik o granicama izlaganja nejonizujućim zračenjima*, "Sl. Glasnik RS", br. 104/2009, str. 7.

AUTORI

Prvi autor– Teodora Gavrilov, asistent, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, teodora.gavrilov@uns.ac.rs.
Drugi autor– Karolina Kasaš-Lažetić, docent, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, kkasas@uns.ac.rs.
Treći autor– Kristian Haška**,** asistent, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, kristian.haska@uns.ac.rs.
Četvrti autor– Miroslav Prša, vanredni profesor u penziji, Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu, prsa@uns.ac.rs.

Autor za korespodenciju – Teodora Gavrilov, teodora.gavrilov@uns.ac.rs, 064/588-3207.

Primjena RC-modela u simulaciji dimamičkih procesa razmjene toplote građevinskih objekata sa okruženjem

Application of RC-Model in the simulation of dynamic thermal processes of the buildings interaction with the environment

Svetlana Dumonjić-Milovanović[*], Petar Gvero[**], Zdravko Milovanović[**]

[*]Partner inženjering d.o.o., Banja Luka
[**] Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka

Sažetak - Primijenjena metodologija simulacije dinamičkih procesa razmjene toplote bazirana je na primjeni RC-modela (R-otpornik, C-kondenzator). Prema tom modelu se po presjeku građevinskih elemenata formira konačan broj paralelnih slojeva kojima se dodjeljuju karakteristike ekvivalentne elementima strujnog kruga. Uspostavljanjem jednačina bilansa toplote po čvorovima između susjednih slojeva, za svaki određeni vremenski interval određene su matrice transfera toplote, a samim tim definisana i dinamika razmjene toplote. Složenost procesa razmjene toplote građevinskog objekta sa okruženjem naročito je izražena u režimu hlađenja, kada je u sklopu spoljašnih i unutrašnjih uticaja dominantan uticaj kratkotalasnog zračenja. Usljed apsorpcije kratkotalasnog zračenja dodatno dolaze do izražaja procesi periodične akumulacije i otpuštanja apsorbovane toplote u netransparentnim elementima građevinske konstrukcije. Rezultati uspostavljenog modela su upoređeni sa rezultatima tri validaciona testa data u standardu EN ISO 52017, pri čemu su ostvarena dobra poklapanja sa datim časovnim vrijednostima operativne temperature. Nakon validacione procedure, ispitan je uticaj toplotnog kapaciteta na dinamiku razmjene toplote za nekoliko različitih netransparentnih elemenata građevinske konstrukcije, uticaj intenziteta provjetravanja na potrebe objekta za hlađenjem kao i uticaj spoljašnjeg sjenila na smanjenje potreba za hlađenjem.

Ključne riječi - RC-model, matrica transfera toplote, operativna temperatura

Abstract - The applied methodology for the simulation of the dynamic heat exchange processes is based on the application of the RC-model (R-resistor, C-capacitor). According to that model the final number of parallel layers is formed through the cross-section of the construction element and to those layers the characteristics which are equivalent to the elements of the electric circuit are assigned. By establishing the heat balance equations for the nodes between adjacent layers, heat transfer matrices are determined for each time interval, and therefore the dynamics of heat exchange is defined as well. The complexity of the heat exchange process of the buildings with the environment is particularly pronounced in the cooling mode, when the influence of short-wave radiation is dominant within other influences. Due to the absorption of short-wave radiation, the processes of periodic accumulation and release of heat in the opaque building elements are expressed. The results of established model were compared on the results of three validation tests given in EN ISO 52017, and they showed good matches with the given hourly values of the operative temperature. After validation procedure, the effect of the thermal capacity influence on the dynamics of heat exchange of several different opaque building elements, the effect of the intensity of ventilation on the cooling needs as well as the influence of the external shade on the reduction of cooling needs were assayed.

Index Terms - RC-model, heat transfer matrix, operative temperature

I. UVOD

Razmjena toplote građevinskih objekata sa okruženjem obuhvata složene fizičke procese kao što su: provođenje toplote uz periodičnu akumulaciju i otpuštanje toplote, prelaz toplote na okolni medij sa unutrašnje i spoljašnje strane zida, procesi dugotalasnog zračenja, kao i uticaji kratkotalasnog zračenja. Primjenom savremene računarske tehnike omogućeno je uspostavljanje modela razmjene toplote bliskih realnim fizičkim procesima razmjene toplote. Savremeni modeli razmjene toplote sadrže postavke kojima se prate svi procesi razmjene toplote, kao

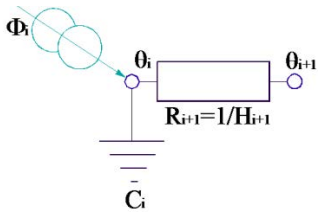
i dinamika razmjene toplote u čemu značajnu ulogu imaju dinamičke toplotne karakteristike elemenata građevinske konstrukcije. Na takvom pristupu proračunu energije potrebne za grijanje i hlađenje objekata bazirani su evropski EPB (Energy Performance of Building) standardi, među kojima i standardi EN ISO 52016 i EN ISO 52017, kojim je data metodologija proračuna dinamičkog toplotnog bilansa u zgradama ili pojedinačnim zonama zgrada, [1]. Sličan princip se primjenjuje i u VDI 6020, VDI 2078 i VDI 6007 normama koji se u Njemačkoj primjenjuju kao nacionalne norme za modeliranje toplotnog opterećenja zgrada. Između navedenih metodologija postoje izvjesna odstupanja u preporukama za modeliranje toplotnih kapaciteta i toplotnih otpora slojeva netransparentnih elemenata, [2]. U ASHRAE normama za modeliranje toplotnog opterećenja zgrada primjenjuju se HBM (The Heat Balance Method) i metoda RTSM (Radiant Time Series Method), bazirana na HBM metodi. Kod RTSM metode uticaj skladištenja i otpuštanja toplote se implementira kroz preporučene vremenske faktore provodljivosti (Conduction Time Series - CTS) datih za prethodna 24 časa, a uticaj zračenja kroz preporučene vremenske faktore zračenja (Radiant Time Series - RTS), takođe date za 24 časa koja prethode vremenu za koje se vrši proračun, [3]. Sve pomenute metode sadrže izvjesne aproksimacije vezane za postavku stvarnih fizičkih procesa, što je u okviru veoma složene problematike razmjene toplote sasvim prihvatljivo i realno izvodivo.

II. OPIS PRIMIJENJENE METODOLOGIJE SIMULACIJE DINAMIČKIH PROCESA RAZMJENE TOPLOTE PRIMJENOM RC-MODELA

Primijenjeni dinamički model razmjene toplote zasnovan je na principima analognim toku električne struje u električnom kolu, pri čemu je otpor prolazu toplote ekvivalentan električnom otporu, a toplotni kapacitet elementa ekvivialentan kapacitetu električnog kondenzatora. Iz te analogije proizilazi i naziv RC-model. U postavci modela se duž presjeka svakog elementa formira konačan broj slojeva kojima se dodjeljuju odgovarajući otpori provođenju toplote, dok se na granicama slojeva formiraju čvorovi odgovarajućeg toplotnog kapaciteta u kojima se vrši bilansiranje toplotnih tokova. U EPB standardima princip bilansiranja toplote u čvorovima odvija se uz uspostavljanje jednakosti za svaki čvor i za svako prethodno definisano vrijeme t diskontinuiranog skupa vremena, sa intervalom između elemenata od Δt. Za svaki formirani čvor u jednačini figuriše toplotni kapaciteti čvora (C_i) kao i temperaturne razlike u čvoru na početku i na kraju vremenskog intervala $\left(\theta_{t,i}-\theta_{t-\Delta t,i}\right)$, provodljivost posmatranog susjednog sloja (H_{i+1}), temperaturne razlike između posmatranog čvora i susjednih čvorova $\left(\theta_{t,i+1}-\theta_{t,i}\right)$ i uticaj spoljašnjeg toplotnog toka $\left(\Phi_{t,i}\right)$. Opisani princip bilansiranja toplote u čvorovima dat je izrazom

$$\frac{C_i}{\Delta t}\left(\theta_{t,i}-\theta_{t-\Delta t,i}\right)=H_{i+1}\left(\theta_{t,i+1}-\theta_{t,i}\right)+\Phi_{t,i}. \qquad (1)$$

Prateća ilustracija bilansiranja toplote u čvorovima je data na Slici 1.



Slika 1. *Ilustracija bilansiranja toplote u čvorovima*

U realnim uslovima za unutrašnje čvorove u elemenatima građevinske konstrukcije pojavljuju se dva susjedna sloja sa svojim otporima provođenju toplote (R_{i-1} i R_{i+1}), dok se u graničnim čvorovima pojedinačnih elemenata građevinske konstrukcije javljaju tri otpora, pri čemu su otpor prelazu toplote i otpor dugotalasnog zračenja u paralelnoj vezi.

Po uspostavljanju prethodno navedenih jednačina toplotnog bilansa za svaki od $\boldsymbol{N}$ čvorova u elemenatima građevinske konstrukcije, kao i bilansa za toplotnu zonu u određenom vremenu, može se formirati odgovarajući matrični izraz za transfer toplote. Matricu transfera toplote sačinjavaju poznati koeficijenti (Π), koji se u jednačinama nalaze uz vrijednosti nepoznatih temperatura svih pojedinačnih čvorova elemenata, kao i temperature unutrašnjeg vazduha. Na desnoj strani matričnog izraza nalaze se poznate vrijednosti slobodnih članova u jednačinama (Γ), što je dato izrazom

$$\begin{bmatrix} \Pi_{1,1} & \Pi_{1,2} & \dots & \Pi_{1,N} & \Pi_{1,N+1} \\ \Pi_{2,1} & \Pi_{2,2} & \dots & \Pi_{2,N} & \Pi_{2,N+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \Pi_{N,1} & \Pi_{N,2} & \dots & \Pi_{N,N} & \Pi_{N,N+1} \\ \Pi_{N+1,1} & \Pi_{N+1,2} & \dots & \Pi_{N+1,N} & \Pi_{N+1,N+1} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_{is,1} \\ \theta_{is,2} \\ \dots \\ \theta_{is,N} \\ \theta_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \Gamma_2 \\ \dots \\ \Gamma_N \\ \Gamma_{N+1} \end{bmatrix}. \qquad (2)$$

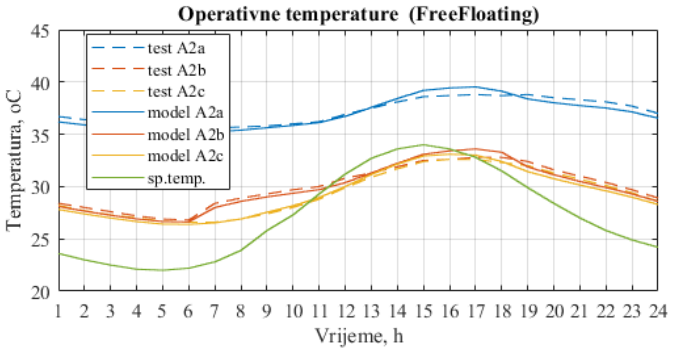
Osnovne toplotne karakteristike nekog prostora dobijaju se izračunavanjem opreativne temperature $\left(\boldsymbol{\theta_{op}}\right)$ u uslovima bez grijanja ili hlađenja (Free Floating Condition - FF), koja predstavlja ujednačenu temperaturu prostora prema toplotnom bilansu pri određenim spoljašnjim uslovima kada se učinak rada uređaja grijanja ili hlađenja izjednači sa nulom. Uzimajući u obzir i zračeću komponentu unutrašnjih površina, aktuelana operativna temperatura u opštem slučaju računski se dobija na osnovu temperature unutrašnjeg vazduha $(\boldsymbol{\theta_a})$, srednje temperature zračećih unutrašnjih površina zidova $(\boldsymbol{\theta_{mrt}})$ i faktora uticaja temperature vazduha na operativnu temperaturu $(\boldsymbol{f_a})$, što je dato izrazom

$$\theta_{op}=f_a\cdot\theta_a+\left(1-f_a\right)\cdot\theta_{mrt}. \qquad (3)$$

Izračunavanje nerestriktivnog učinka grijanja ili hlađenja potrebnog za postizanje zadane temperature određuje se iz prethodno postavljenih jednačina na način da se unutrašnja temperature izjednačava sa poznatom zadanom temperaturom, a učinak grijanja ili hlađenja posmatra kao nepoznata veličina.

III. REZULTATI VALIDACIJE RC-MODELA I VARIRANJA UTICAJNIH ELEMENATA U DATIM SPOLJAŠNIM USLOVIMA

Nakon formiranog modela razmjene toplote provedena je validaciona procedura, gdje su upoređivane vrijednosti časovnih operativnih temperatura dobijenih u modelu sa vrijednostima tri testna primjera datim u standardu EN ISO 52017. Primjenom razvijenog računarskog koda u MATLAB programskom okruženju, nakon provedene inicijalizacije u vidu više ponavljanja procedure izračunavanja prema identičnim podacima za datih za 24 časa, za tri analizirana testna primjera određena je operativna temperatura datog prostora u uslovima bez grijanja i hlađenja (FF), a rezultati upoređeni sa rezultatima datim u testnim primjerima. Uočeno je dobro poklapanje rezultata sa tri testna primjera, što je dato su na Slici 2.



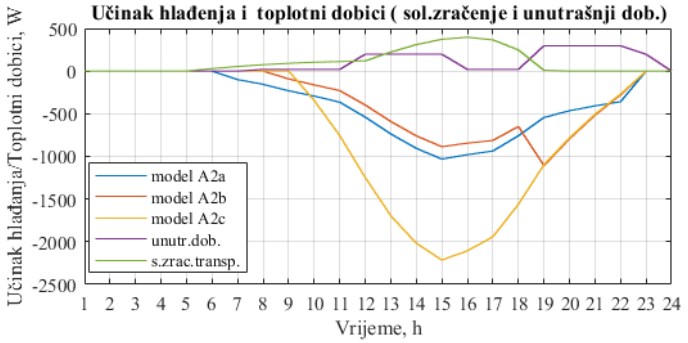
Slika 2. *Rezultati validacije RC-modela*

U datim testnim primjerima analizirana je prostorija (dimenzije prostorije 3.6x5.5 m, visina 2.8 m) ograničena sa adijabatskim stropom i podom, tri adijabatska zida i jednim zapadno orjentisanim spoljašnim zidom (zid sa manjom površinom). Na spoljnjašnjem zidu je postavljen prozor sa jednostrukim staklom površine 3.5 m^2, na kojem je spoljašnje sjenilo transparentnosti 0.2. Vrijednosti date spoljašne temperature vazduha dati su na Slici 2. Dobici toplote usljed unutrašnjih izvora i dobici toplote usljed solarnog zračenja koje se propušta kroz zapadno orjentisan prozor dati su na Slici 3. Ostali promjenjivi uslovi tri testna primjera dati su u Tabeli 1.

Tabela 1. *Dodatni uslovi dati za tri testna primjera,* [1]

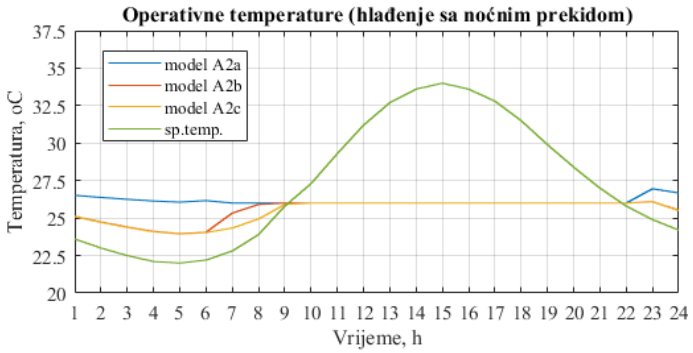
Vrijeme, h	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Broj izmjena vazduha, 1/h												
Test A.2.a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Test A.2.b	10	10	10	10	10	10	.5	.5	.5	.5	.5	.5
Test A.2.c	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Vrijeme, h	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Broj izmjena vazduha, 1/h												
Test A.2.a	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Test A.2.b	.5	.5	.5	.5	.5	.5	10	10	10	10	10	10
Test A.2.c	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

Rezultati u postupku validacije uspostavljenog RC-modela upućuju na zaključak da uspostavljeni model na zadovoljavajući način prezentuje stvarne fizičke procese, pa su na osnovu njega izdvojene relevantne fizičke veličine i njihova promjena pri varijaciji nekih ulaznih podataka. Učinci hlađenja sa noćnim prekidom u uslovima tri data testna primjera, bazirani na dinamičkom pristupu razmjeni toplote, dati su na Slici 3. Na dijagramu se može uočiti uticaj različitih uslova izmjene vazduha datih za tri slučaja.



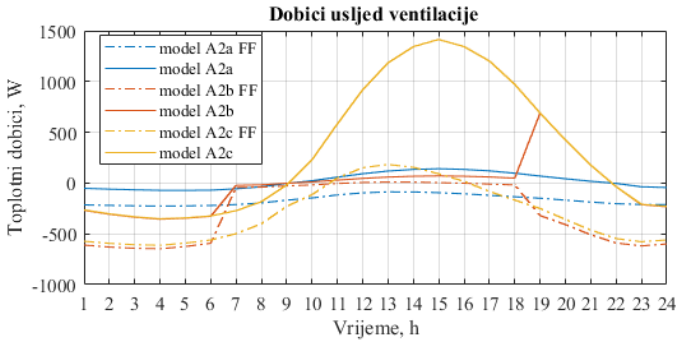
Slika 3. *Učinak hlađenja u uslovima tri data testna primjera i dati dobici toplote od solarnog zračenja i unutrašnjih izvora*

U izloženoj postavci je pretpostavljeno da se predmetni prostor hladi na temperaturu 26 ^0C sa noćnim prekidom u trajanju od 8 časova pri čemu su ostali uslovi iz tri data testna primjera ostali nepromijenjeni. Pri izloženoj analizi je određena i promjena temperature unutrašnjeg vazduha tokom noćnog prekida hlađenja, gdje se može vidjeti uticaj broja izmjena vazduha na temperaturu unutrašnjeg vazduha , što je prikazano na Slici 4.



Slika 4. *Temperature vazduha pri hlađenju sa noćnim prekidom u uslovima tri data testna primjera*

Izdvojeni dobici toplote usljed provjetravanja sa datim brojem izmjena vazduha prikazani su na Slici 5.



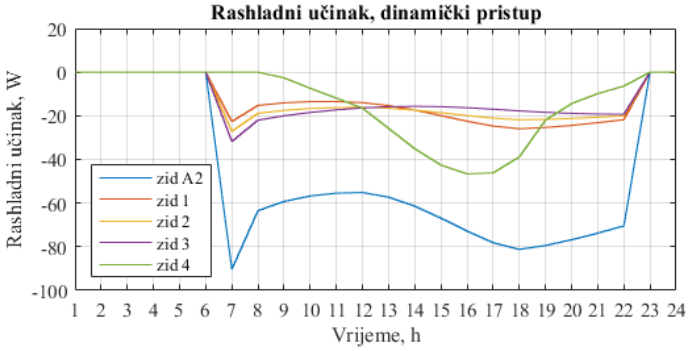
Slika 5. *Dobici toplote usljed provjetravanja*

U varijaciji tipa spoljašnjeg zida, pored zida iz datog testa, analizirana su dodatna četiri tipa zidova kojima je zamijenjen spoljašni zid iz testnih primjera. Tipovi zidova za koje su analizirani uticaji na potrebni rashladni učinak su dati u Tabeli 2.

Tabela 2. *Analizirani tipovi zidova*

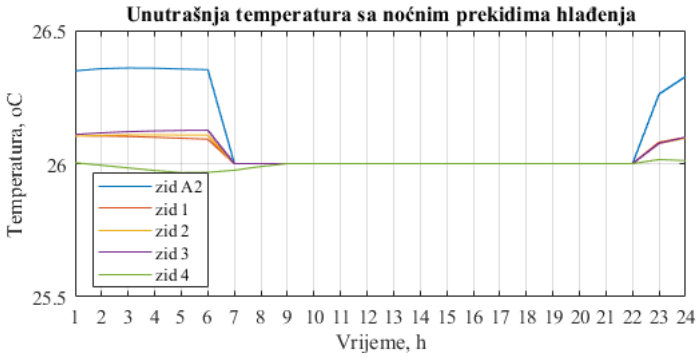
	Materijal slojeva zida	Deblji na zida	Masa po površini zida	Koeficijent prolaza toplote U
		m	kg/m^2	W/(m^{2}K)
Sp. zid test A.2	Spoljašnji sloj, toplotna izolacija, opeka, malter	0.340	510	0.486
Zid 1	Spoljašnji sloj, toplotna izolacija, blok opeka, malter	0.330	286	0.275
Zid 2	Spoljašnji sloj, toplotna izolacija, beton, malter	0.360	527	0.275
Zid 3	Klinker opeka, toplotna izolacija, blok opeka, malter	0.445	506	0.267
Zid 4	Panel sa PUR/PIR	0.081	11	0.267

U postavci modela uticaj tipa spoljašnjeg zida analiziran je na način da su u testnim primjerima A.2 varirani tipovi spoljašnjeg zida dok su površina prozora, unutrašnji dobici i broj izmjena vazduha izjednačeni sa nulom. Adijabatski zidovi su ostali nepromijenjeni. Učinci hlađenja sa noćnim prekidom pri takvim uslovima, bazirani na dinamičkom pristupu razmjeni toplote, dati su na Slici 6.



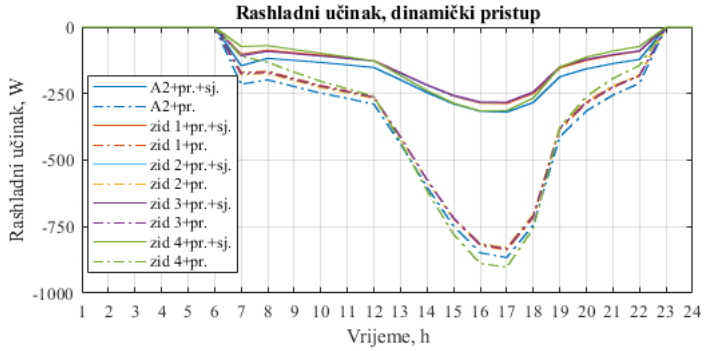
Slika 6. *Učinak hlađenja za različite tpove spoljašneg zida*

Za opisane uslove određena je promjena unutrašnje temperature u toku noćnog prekida hlađenja, što je dato na Slici 7.



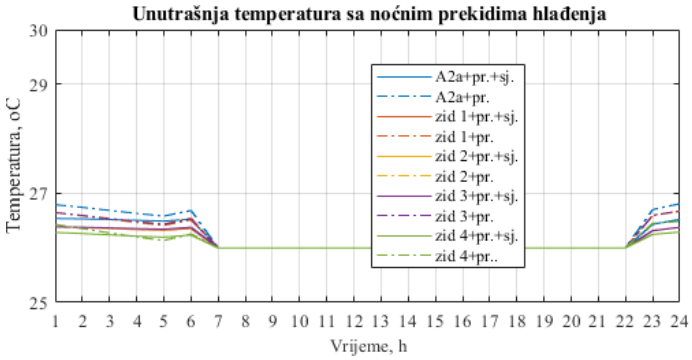
Slika 7. *Temperature vazduha pri hlađenju sa noćnim prekidom za različite tipove spoljašnjeg zida*

U daljnim analizama ponovo je uobziren prozor koji je postavljen na različite tipove spoljašnjeg zida dok su unutrašnji dobici i broj izmjena vazduha izjednačeni sa nulom. Adijabatski zidovi su ostali nepromijenjeni. Učinci hlađenja sa noćnim prekidom za prostoriju sa prozorom bez spoljašnjeg sjenila i prozorom sa spoljašnim sjenilom, bazirani na dinamičkom pristupu razmjeni toplote, dati su na Slici 8.



Slika 8. *Učinak hlađenja za različite tpove spoljašnjeg zida sa prozorom sa spoljašnjim sjenilom i bez sjenila*

Za opisane uslove određena je promjena unutrašnje temperature u toku noćnog prekida hlađenja, što je dato na Slici 9.

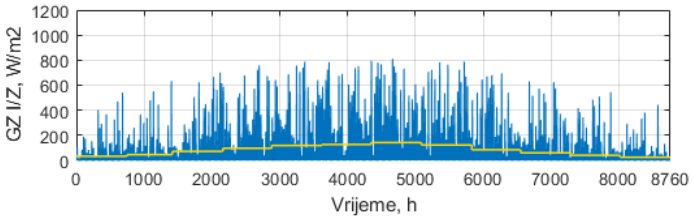


Slika 9. *Temperature vazduha pri hlađenju sa noćnim prekidom za različite tipove spoljašnjeg zida sa prozorom sa spoljašnjim sjenilom i bez sjenila*

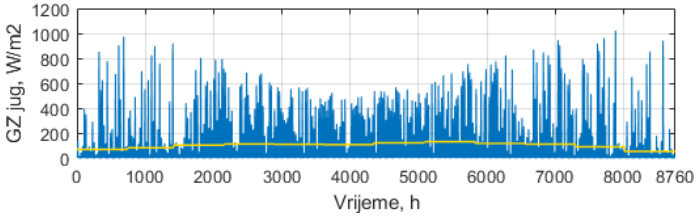
Pri ovoj analizi uočen je dominantan uticaj intenziteta solarnog zračenja koje se propušta kroz prozor u odnosu na uticaj izabranog tipa spoljašnjeg zida.

IV. ANALIZA UTICAJA VARIRANJA ULAZNIH FAKTORA NA GODIŠNJE POTREBE ZA ENERGIJOM - STUDIJA SLUČAJA

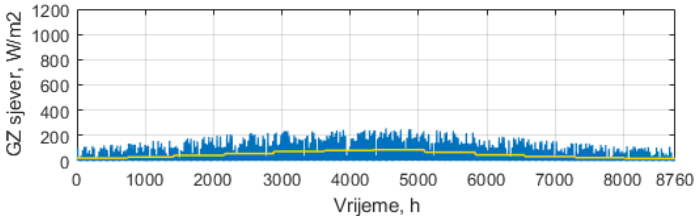
Budući da su u prethodnim primjerima uočeni uticaji variranja ulaznih faktora na potrebni učinak hlađenja, opravdano se nameće pitanje u kojoj mjeri variranje faktora ima uticaj na ukupne potrebe za energijom hlađenja na godišnjem nivou. Za takvu analizu korišteni su podaci o časovnim vrijednostima temperature i solarnog zračenja na vertikalno orjentisane površine za područje Banje Luke. Solarno zračenje za četiri orjentacije vertikalnog zida dato je na Slikama 10 ÷ 12, a podaci o časovnoj promjeni temperature na Slici 13.



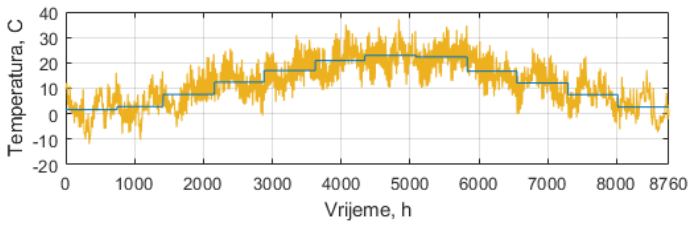
Slika 10. *Solarno zračenje na vertikalnu površinu istočne i zapadne orjentacije - studija slučaja Banja Luka*



Slika 11. *Solarno zračenje na vertikalnu površinu južne orjentacije - studija slučaja Banja Luka*



Slika 12. *Solarno zračenje na vertikalnu površinu sjeverne orjentacije - studija slučaja Banja Luka*



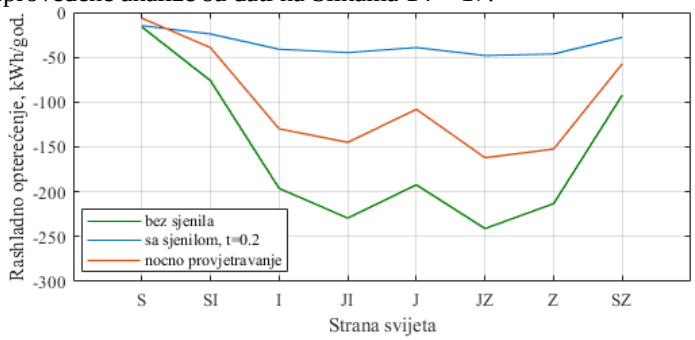
Slika 13. *Temperature spoljašnjeg vazduha - studija slučaja Banja Luka*

Tip prozora koji je usvojen za ovu analizu je prozor sa dvostrukim staklom sa premazom faktora transmisije 0.64. Analiziran je uticaj vanjskog sjenila transparentnosti 0.2. Usvojeni broj izmjene vazduha je 0.5, osim pri analizi noćnog provjetravanja, gdje su korišćene vrijednosti date u Tabeli 3.

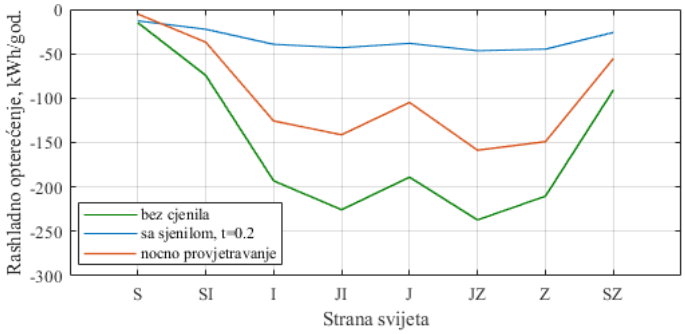
Tabela 3. *Broj izmjena vazduha - studija slučaja Banja Luka*

Vrijeme, h												
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Broj izmjena vazduha, 1/h												
5	5	5	5	5	5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Vrijeme, h												
13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Broj izmjena vazduha, 1/h												
0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	5	5	5	5	5	5

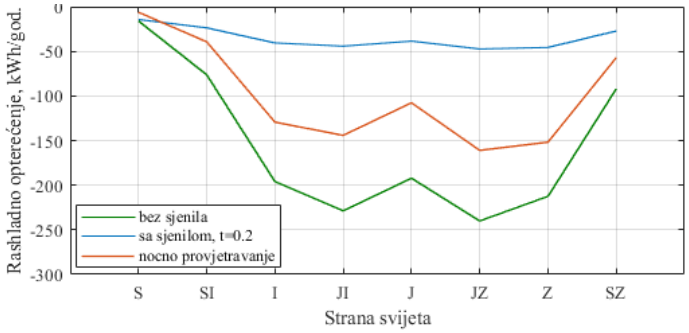
Nakon provedene inicijalizacije procesa za period od 15 dana, preuzeti su rezultati analize varijacije ulaznih faktora dobijeni primjenom razvijenog dinamičkog modela razmjene toplote. Pri tome je analiziran uticaj spoljašnjeg sjenila na prozorima za prostorije sa različitim tipovima zidova i različite orjentacije pri minimalnoj infiltraciji vazduha od 0.5 izmjena vazduha. Pored toga, analiziran je uticaj noćnog provjetravanja, pri čemu su usvojeni prozori prostorije bez spoljašnjeg sjenila. Rezultati sprovedene analize su dati na Slikama 14 ÷ 17.



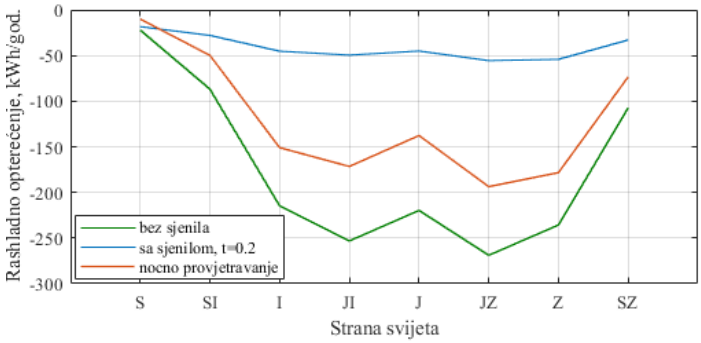
Slika 14. *Analiza uticaja varijacije ulaznih faktora na promjenu godišnjeg rashladnog opterećenja pri primijeni različito orjentisanog zida 1 kao spoljašnjeg zida sa prozorom - studija slučaja Banja Luka*



Slika 15. *Analiza uticaja varijacije ulaznih faktora na promjenu godišnjeg rashladnog opterećenja pri primijeni različito orjentisanog zida 2 kao spoljašnjeg zida sa prozorom - studija slučaja Banja Luka*



Slika 16. *Analiza uticaja varijacije ulaznih faktora na promjenu godišnjeg rashladnog opterećenja pri primijeni različito orjentisanog zida 3 kao spoljašnjeg zida sa prozorom - studija slučaja Banja Luka*



Slika 17. *Analiza uticaja varijacije ulaznih faktora na promjenu godišnjeg rashladnog opterećenja pri primijeni različito orjentisanog zida 4 kao spoljašnjeg zida sa prozorom - studija slučaja Banja Luka*

Pomenuta analiza primijenjena je na prostoriju dimenzija kao u testnom primjeru A.2 datom u standardu EN ISO 52017, sa primjenom četiri tipa spoljašnjeg zida. Period na koji se odnosi analiza je period od šest mjeseci izvan grejne sezone. Na osnovu dijagrama može se vidjeti da rezultati koji se odnose na prva tri tipa zida imaju bliske vrijednosti proračuna, dok za zid 4, sa znatno manjom masom po površini zida i manjim toplotnim kapacitetom, rezultati proračuna imaju znatnija odstupanja. Uticaj redukcije solarnog zračenja je veoma izražen. Uticaj noćnog provjetravanja takođe je izražen, ali je približno ujednačen za sve primijenjene tipove spoljašnjeg zida.

V. ZAKLJUČAK

Primijenom metodologije simulacije dinamičkih procesa razmjene toplote baziranih na primjeni RC-modela omogućeno je predstavljanje procesa razmjene toplote u veoma bliskoj relaciji sa stvarnim fizičkim procesima. Takav model može biti veoma koristan alat u simulaciji različitih procesa sa varijacijom svih ulaznih faktora radi dobijanja određene tražene informacije. Razvijeni model ima izvjesna odstupanja od testnih primjera u vrijednostima operativnih temperatura u uslovima bez grijanja i hlađenja, što najvjerovatnije proizilazi iz aproksimacije određenih procesa koji se odnose na dugotalasno zračenje

(naročito u vezi sa spoljašnjom površinom zida), što je u EPB standardima preporučeno radi pojednostavljenja proračuna.

Rezultati sprovedenih analiza pokazali su u kojoj mjeri na ukupno rashladno opterećenje u toku jedne godine utiču primjene određenih procesa i elemenata orjentisanih na smanjenje ukupnog rashladnog opterećenja. Uočen je dominantan uticaj solarnog zračenja kroz transparentne površine u odnosu na druge uticaje, te da se redukcijom ovog uticaja znatno smanjuje i ukupno rashladno opterećenje. Noćno provjetravanje kao mjera smanjenja ukupnog rashladnog opterećenja takođe ima značajan uticaj, ali nešto manje izražen u odnosu na uticaj redukcije solarnog zračenja. Izbor tipa zida takođe ima uticaja na ukupnu dinamiku razmjene toplote, ali bi svoj maksimalan efekat pokazao tek pri sličnoj analizi u režimu grijanja kada je solarno zračenje manje zastupljeno.

LITERATURA

[1] ISO 52017-1:2017: Energy performance of buildings - Sensible and latent heat loads and internal temperatures - Part 1: Generic calculation procedures.

[2] M. Lauster, *Parametrierbare Gebäudemodelle für dynamische Energiebedarfs-rechnungen von Stadtquartieren*, E.ON Energy Center, RWTH Aachen University, 2018.

[3] J.D. Spitler, *Load calculation applications manual*. Atlanta: ASHRAE, I-P Edition, 2014.

[4] ISO 52016-1:2017: Energy performance of buildings - Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads - Part 1: Calculation procedures

[5] ISO/TR 52016-2:2017: Energy performance of buildings - Energy needs for heating and cooling, internal temperatures and sensible and latent heat loads - Part 2: Explanation and justification of ISO 52016-1 and ISO 52017-1

[6] J.A. Duffie, W.A.Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. Atlanta: John Wiley & Sons, Inc, New Jersey, 2013.

[7] L.Adelard, F.Pignolet-Tarden, T.Mara, P.Lauret, F.Garde, H.Boyer, "Sky temperature modelisation and applications in building simulation", Elesvier Science, Renewable Energy 15, 1998, pp. 418–430.

AUTORI

Prvi autor – Mr Svetlana Dumonjić-Milovanović, Partner inženjering d.o.o. Banja Luka, svetlana.dumonjic@gmail.com
Drugi autor – Prof. dr Petar Gvero, Redovni profesor, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, petar.gvero@mf.unibl.org
Treći autor – Prof. dr Zdravko Milovanović, Redovni profesor, Univerzitet u Banjoj Luci, Mašinski fakultet Banja Luka, zdravko.milovanovic@mf.unibl.org

Autor za korespondenciju – Mr Svetlana Dumonjić-Milovanović, Partner inženjering d.o.o. Banja Luka, svetlana.dumonjic@gmail.com

Poboljšavanje energetske efikasnosti hidrauličnih sistema kod teških mašina

Improving Energy Efficiency of the Hydraulic Power Systems in Heavy Machinery

Dejvid Anastasovski[*], Emil Zaev[*], Darko Babunski[*], Gerhard Rath[**], Laze Trajkovski[*]

[*] Automation Department, Faculty of mechanical engineering in Skopje, Ss. Cyril and Methodius University, Skopje, Macedonia
** Institute of Automation, University of Leoben, Leoben, Austria

Apstrakt – Glavni cilj istraživanja obavljenog u ovom radu je ispitivanje mogućih poboljšanja energetske efikasnosti hidrauličkih elektroenergetskih sistema sa manjom emisijom gasa iz teških mašina. Ovde se daje kratko objašnjenje postojećih hidrauličnih sistema koji posebnu pažnju posvećuju hidrauličnom servo sistemu sa odvojenim dovodnim i odvodnim meračima i (SMISMO). Iako je cilj ovog istraživanja poboljšanje efikasnosti hidrauličke energije uglavnom korišćenjem sistema SMISMO, primenjena su i dodatna istraživanja o upotrebi tih sistema za istovremeno upravljanje brzinom i pritiskom cilindara. Rezultati dobijeni eksperimentalnim studijama koristiće se za dalje poboljšanje hidrauličkog sistema. Dalja nadogradnja ovog sistema je usmerena na dizajniranje automatizovanog SCADA sistema za bolje prikupljanje podataka i kontrolu ventila u servo sistemima.

Ključne reči **--** hidraulični sistemi, energetska efikasnost, upravljanje, smismo

Abstract- The main goal of the research done in this paper is to examine possible improvements in energy efficiency of the hydraulic power systems and with this lower gas emission from working machinery. It is here given a brief explanation of the existing hydraulic systems putting special attention on a hydraulic system with separate meter-in and separate meter-out (SMISMO). While the aim of this research is to improve the hydraulic energy efficiency mainly using the SMISMO system, additional research on using those systems for simultaneous speed and pressure control of the cylinders is also observed. The results obtained through experimental studies will be used to further improve the hydraulic system. Further upgrade of this system is to design automated SCADA system for improved data acquisition and control the valves in servo systems.

Index Terms- Hydraulics, mobile machines, energy efficiency, SMISMO systems, control strategies.

I. INTRODUCTION

Today the energy efficiency of hydraulic machines has become one of the most important issues in designing the system, mainly due to environmental protection and increased fuel costs. Various hydraulic systems have been developed over the years to meet the increasing demands for greater efficiency and better functionality of the components. One of the solutions to this problem which improve the energy consumptions in heavy machinery is to change the conventional valve system with individual metering systems (in some literature also called separate meter-in separate meter-out or SMISMO). This gives possibility for energy regeneration and recuperation and effective deceleration control which leads to energy efficiency improvement of the machine [2-9]. This kind of system gives possibility for other improvements, like for example damping the oscillations of the machine structure using active oscillation damping technologies [1]. Oder possible improvement is to make cylinder movement more stiff during the motion, controlling the pressure in the meter-out side of the active cylinder as well as the speed of the cylinder.
Therefore, it is here presented modeling and simulation of the movement of a servo valve controlled hydraulic cylinder, possible control strategies for SMISMO system, laboratory equipment, measurements and conclusions.

II. SEPARATE meter-in and separate meter-out

This system provides freedom to control the actuator speed and pressure independently, which can be used to save the energy by

minimizing pressure losses. Since there are different ways of connecting, Figure 2.1. shows three different ways of connecting.

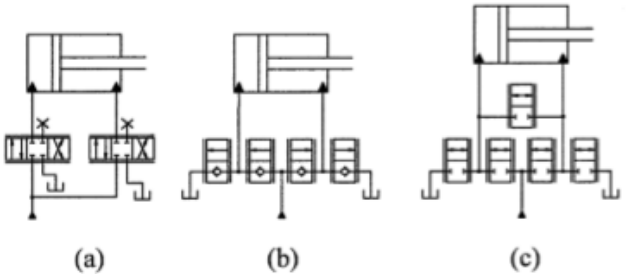


Figure 2.1. Different SMISMO systems found in the literature [2-9]

Figure (a) shows a hydraulic circuit with two 4/3 proportional valves. In figure (b) is used four 2/2 valves to achieve better results. There are several different control strategies, including the differential connecting. In the figure (c), another valve is added for control the meter – in and meter – out form cylinder. This valve is used to minimize pump flow at to big loads. The basic problems of the SMISMO systems are the need for several high quality proportional/servo valves and complexity of controlling of the systems. Usually it is used control based on closed – loop and controllers with flow/speed. Successful pressure control requires a wide valves with good system dynamics.

The idea of the SMISMO system is to provide independent control of the speed and pressure of some cylinder and can be used to reduce vibration when the cylinder needs to be extracted with low speeds [1]. In some types of machinery requiring specific parts of them to move with low speeds when operating, for example tunnel excavators the cutter move with low speed but when cut the rocks, inertial forces from rocks create vibration. This requires the SMISMO system, where we control separate meter – in and meter – out chamber on cylinders, when the cylinder is pulls out, in chamber for meter – out we will control the pressure if we increase the pressure in this chamber we will reduce the vibration and the cutter will work more calmly, which will result in reduced vibration of the entire machine and comfort of the operator will be higher [1].

A. Hydraulic system and components

In figure 2.2. is shown a system of SMISMO which will be elaborated in this scientific work. When cylinder is extracting (lifting the load), valve A and B will be used as in normal conventional system. The advantage of using SMISMO system comes in place when we need to retract the cylinder (lower the load) because we can use the gravitation force of load and not energy from the pump. The idea is that when the cylinder is retracted, the pump will work only to overcome the losses in the system rather than producing pressure to retract the cylinder. When the cylinder is retracted, the pump will operate at minimum speed while the cylinder is retracted under load, and the speed will be controlled by valve A, while valve B and minimum pump operation will fill the chamber on cylinder to prevent undesired cavitation. In this system, the energy efficiency will be due to the cylinder being retracted as the pump will not operate under load and we will have electricity or other energy savings depending on how the pump is powered either by electric motor or internal combustion engine.

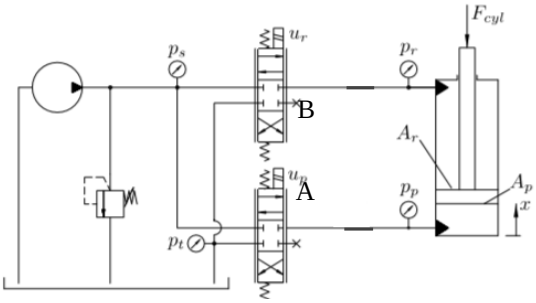


Figure 2.2. Schematic representation of the system

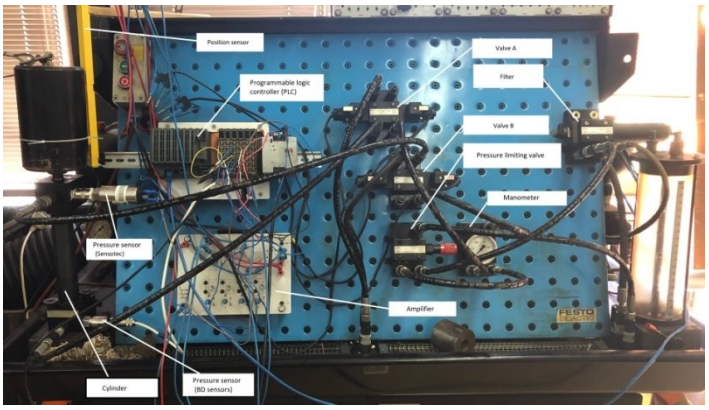


Figure 2.3. Picture of the hydraulic system and component labeling

Figure 2.3. shows the physical appearance of the system build for this study. It should be said that the cylinder will be loaded with weight of m=25 [kg], which will play a load role in making the measurement because the cylinder will be loaded. The system is composed of the following components:

- Two valves 4/3
- Filter
- Manometers
- Amplifier
- Cylinder
- Position sensor
- Pressure sensor
- Programmable logic controller (PLC)

Cylinder	Ø32/Ø22/200 mm
Proportional valve	Nominal flow 1.5 l/min at ΔP_N = 5 bar
Working pressure	40 bar

B. Modeling of the system

The pressure build up in respectively the piston and rod side of the cylinder may be described by the continuity equation as:

$$\frac{dp_p}{dt} = \frac{\beta_{e,p}}{V_p}(Q_p - A_p\dot{x}) \quad (1)$$

$$\frac{dp_r}{dt} = \frac{\beta_{e,r}}{V_r}(A_r\dot{x} - Q_r) \quad (2)$$

Where $V_p = V_{p,0} + A_p x$ is the volume of the piston side chamber and $V_r = V_{r,0} + A_r x$ is the volume of the rod side chamber, with $V_{p,0}$ and $V_{r,0}$ being the default volumes in the cylinder and connected hoses, for the cylinder in the bottom position. $\beta_{e,p}$ is the effective oil bulk modulus and is for the piston side chamber modeled as (similar for rod side chamber):

$$\beta_{e,p} = \frac{1}{\frac{1}{\beta_{oil}} + \frac{V_{\%,air}}{V_p \beta_{air}}} \quad (3)$$

With the volume content of air for the piston chamber being determined as:

$$V_{\%,air} = (p_0 {V_{\%,air,0}}^k / P_p)^{1/k} \quad (4)$$

Here p_0 is the atmospheric pressure, $\kappa = 1.4$ (assuming an adiabatic process), β_{oil} = 16,000 bar (oil bulk modulus) and β_{air} = 1.4p. The above model primarily accounts for variations in bulk modulus at low pressures, where the air contribution is significant. At high pressure, hose stiffness etc. also comes into play, which is not accounted for in the in the model. Based on experience the effective oil bulk modulus is therefore limited to 10,000 bars to compensate for limited hose stiffness. The force from the cylinder piston may be described as:

$$F_{cyl} = P_p A_p - P_r A_r - F_{fric} \quad (5)$$

The friction force can be represented as:

$$F_{fric} = B_V\dot{x} + F_c \tanh\left(\frac{\dot{x}}{\gamma}\right) \quad (6)$$

Where γ controls the slope of the friction curve around zero velocity to compensate for numerical switching problems. The friction in the mechanical system is included in the cylinder friction. The model for the mechanical system may be written on standard closed form:

$$M(x)\ddot{x} + B(x,\dot{x})\,\dot{x} + G(x) = F_{cyl} \quad (7)$$

Where M(x) is the equivalent inertia mass on the cylinder, G(x) is the gravitational force and B(x,$\dot{x}$) contain the Coriolis and centripetal-terms, which for the considered system is negligible for normal operating velocities. Finally the proportional valves are modeled by the orifice equation and a critically damped second order system ($\zeta = 1$) as:

$$Q_p = \begin{cases} K_v u_p \sqrt{P_s - P_p}, & u_p \geq 0 \\ K_v u_p \sqrt{P_s - P_t} & u_p < 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$Q_r = \begin{cases} -K_v u_r \sqrt{P_s - P_r}, & u_r \geq 0 \\ -K_v u_r \sqrt{P_r - P_t} & u_r < 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$u_i = \frac{{\omega^2}_n}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + {\omega^2}_n} u_{ref.i} \quad (10)$$

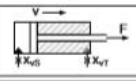
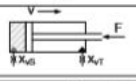
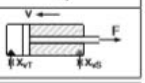
Where Kv is the valve coefficient, and $u_{ref.i}$ is the reference voltage to the i'th valve. Notice here the sign convention used, where a negative voltage to the rod side valve will lead to a positive flow. With the valves used the valve dynamics may generally be neglected compared to the dynamics of the systems. The valves dynamics are, however, still included in the nonlinear model to ensure that the model behaves similar to the test system if the control signals contain high frequency content. In the linear model the valves dynamics are neglected and accounted for in the controller design instead as discussed below.

C. Single actuator control

The working hydraulics mobile machines should be operated by a joystick, why the overall purpose of the control is to move the actuators at the speed corresponding to the joystick position. This is to be done when running the combustion engine at low speed. Control strategy and configuration is given in [11][12][13]. As proposed, an energy efficient control of each actuator and ELS control of the pump is proposed [13]. The proposed control strategy implies that an individual actuator controller is used for each cylinder, hence when an additional actuator is to be added, the actuator control of the present actuators are not affected. The pump system is controlled by usage of Electronic Load Sensing (ELS). Hence the cylinder chamber pressures and the velocity reference for the actuators are fed to the pump controller. The pump pressure reference is then based on the highest working pressure connected to a pump spool.

The control of each actuator is preformed as open loop velocity control with an integrated pressure controller [13]. The control strategy is based on that the spool connected to the load carrying chamber of a cylinder is used to control the velocity by controlling the flow in or out, while the spool connected to the non-load carying chamber controls the pressure in the corresponding chamber. An overview of the control strategy for a single actuator is given in Table 1 [13].

Table 1. Different control strategies [13]

	Operation Mode			
	1	2	3	4
				
Spool	Control strategy			
x_{vS}	p_p	Q_p	p_r	Q_r
x_{vT}	Q_r	p_r	Q_p	p_p
	Meter-Out	Meter-In	Meter-Out	Meter-In

D. Position Control

In SMISMO systems, there are different control modes possible such as: position control, speed control, pressure control and ect. For this system the control will be per position, which means that when we assign a position to the cylinder, cylinder will move to the desired position, while the speed depends on the control variable Kp. If we increase Kp then we get high speed of movement of the cylinder and there is a bigger jump to the position assigned to it, while if we decrease Kp the cylinder moves with lower speed. It is here determinate that the value of Kp=300 gives best results for our system. On Figure 2.5. is showed block diagram of the control system.

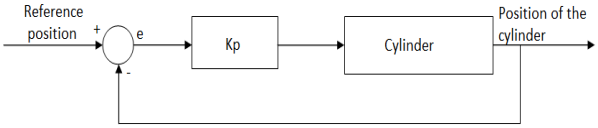


Figure 2.5 Block diagram of the control systenm

On Figure 2.6. is showed the code that is attached to the PLC while linearization and control with proportional valves is programmed with ladder diagram.

```
PROGRAM _CYCLIC
e := pos_ref - poz_cyl_mm;
out := kp*e;
IF out > 32000.0 THEN
    out := 32000.0;
ELSIF out < -32000.0 THEN
    out := -32000.0;
END_IF
```

Figure 2.6. Programmable logic controller code

Initially, measurements were made when extracting the cylinder from position position x = 50 [mm] to x = 150 [mm], the values obtained from the measurement are presented in Table 1.1.

Table 1.1. Extracted measured values

Reference position x_{ref}[mm]	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150
Position of cylinder x[mm]	50	51	59	66	75	101	113	126	131	133	135	137	138
Pa [bar]	31	18	18	4	4	5	7	4	4	5	6	9	16
Pb [bar]	16	25	25	5	5	6	6	3	3	4	5	13	26
t [sec]	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	2	3	4	5	6	7

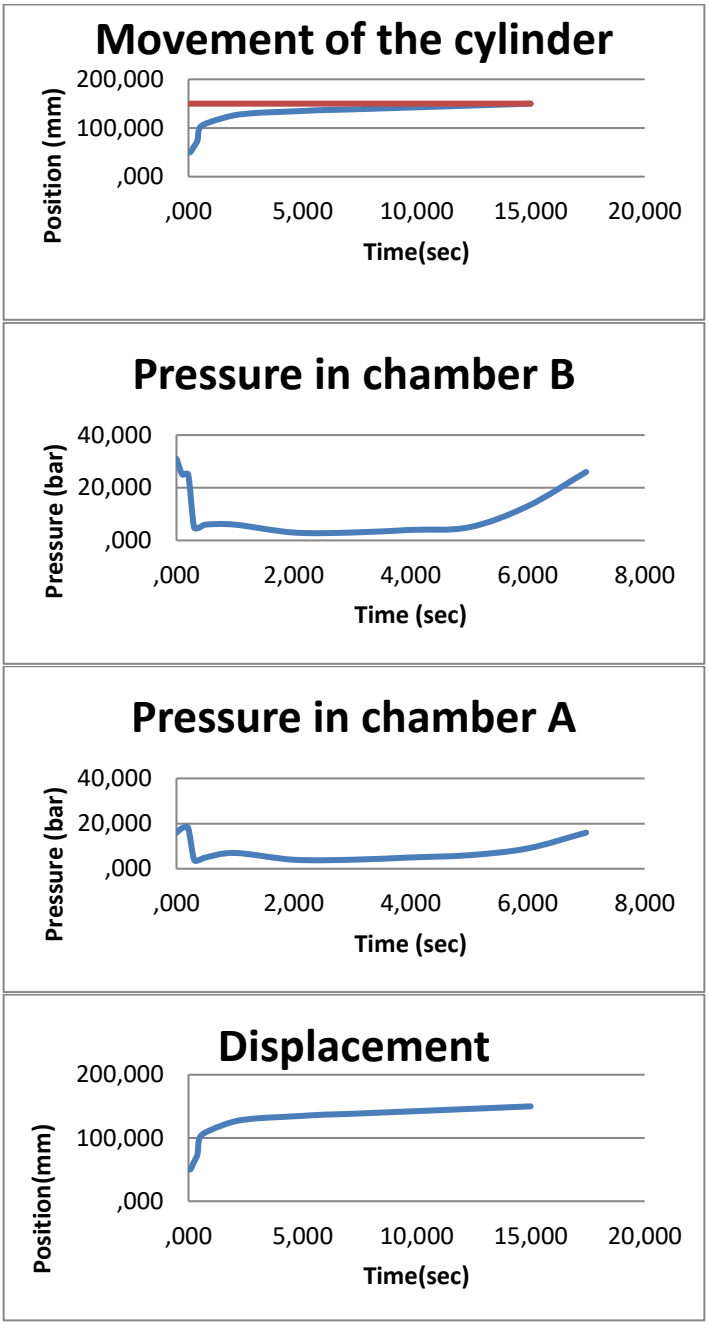


Figure 2.7 Cylinder extraction measurements

From simulation and experimental results it's seen that when controlling the position initially we have oscillations of the pressure, i.e. the pressure in the chamber A start to increase, and the pressure in the chamber B decreases to some extent as the cylinder accelerates when it reach a constant speed the pressures decrease respectively and we have pressure only to overcome the load while as the cylinder approaches the desired point the pressures increase in both chambers to have precise positioning. The movement of the cylinder as can be seen at the beginning has some delay that occurs until it's moved the spool in valve and as seen from the curve, cylinder begins to rapidly pull out at some point. When the cylinder starts to approach the specified position, the speed decreases i.e. the cylinder is positioned at the specified position with slow-moving.

Initially, measurements were made when retraction the cylinder from position position x = 150 [mm] to x = 50 [mm], the values obtained from the measurement are presented in Table 1.2.
The graphs show that we have some similarities to extraction. At induction at the beginning the pressure in chamber A decreases to a certain value and then start to increase slightly, which is constant until the cylinder is positioned, while in chamber B we have opposite initially the pressure increases for short period of time and we have slight decrease until achieving constant pressure value. The movement of the cylinder over time is right when we give the signal to the programmable logic controller we have slight delay until the valve react and then the cylinder begins to extraction more rapidly until it reaches the desired position when the cylinder approaches, when the cylinder approaches the position it slows down and slowly positions itself at the desired position, as shown in the movement graph of the cylinder as it gradually approaches the default position.

Table 1.2. Retraction measured values

Reference position x_{ref}[mm]	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Position of cylinder x[mm]	150	148	135	123	116	92	73	67	63	59	57	56	55
Pa [bar]	15	15	14	13	13	14	15	16	16	16	16	16	16
Pb [bar]	28	30	24	23	23	24	28	30	30	30	31	31	31
t [sec]	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1	2	3	4	5	6	7

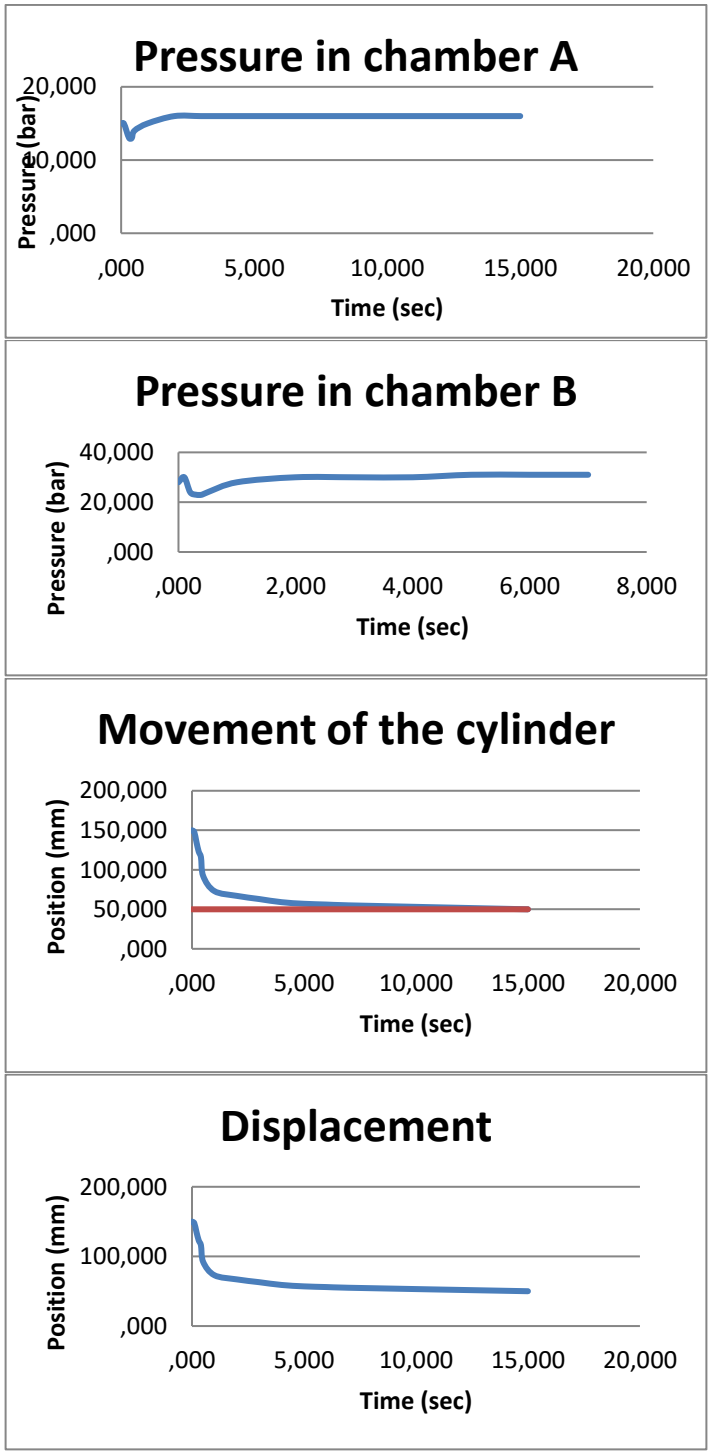


Figure 2.8. Cylinder retraction measurements

E. Calculation the velocity

In addition to the preceding chapter, it's also necessary to calculate the speed at which cylinder moves, i.e. the speed at which the cylinder will be positioned at the desired position. Since there are no flow sensors installed on our system to read the speed

immediately, we must calculate the speed of the cylinder over time depending on the path it has passed. The velocity will be calculated manuel by the equation (11) and the average velocity by the equation (12), this will be done for both directions of motion i.e. for extraction and retraction.

$$V_{iz/vov}=\frac{s}{t_{izv}} \quad \text{[m/sec)} \qquad (11)$$

Where **s** is the path we have passed and **t** is the time for a given trajectory

$$V_{iz,vov\ sr}=\frac{\sum V_{iz}}{n} \quad \text{[m/sec]} \qquad (12)$$

Extraction

t [sec]	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	2	3	4	5	6	7
V_{iz} [m/sec]	0	0.01	0.045	0.053	0.062	0.1	0.063	0.038	0.027	0.02	0.017	0.014	0.013

Table 1.3. Extraction speed

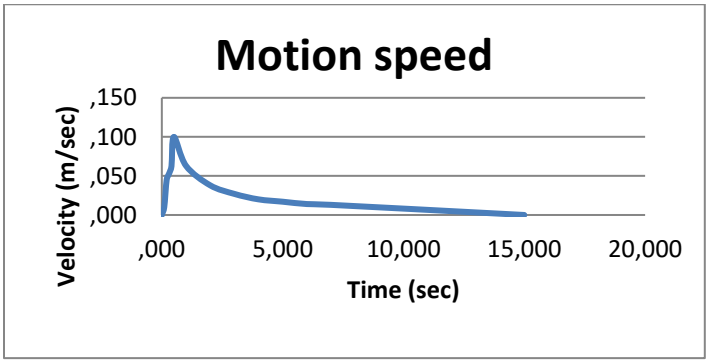


Figure 2.9. Speed growth graph when cylinder extraction

As you can see in the Figure 2.9 at the beginning when the valve opens we have a big jump in velocity i.e. we have a big acceleration while the cylinder is still far from the desired position. When the cylinder crosses 50% of the given trajectory it starts to slow down and the speed decreases, as it approaches the position its set and the speed gradually decreases and eventually reaches zero. The average rolling speed of the cylinder at extraction is V_{izsr}= 0,035 [m/s].

Retraction

Table 1.4. Retraction speed

t [sec]	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	1	2	3	4	5	6	7
V_{vov} [m/sec]	0	0.02	0.075	0.09	0.085	0.116	0.077	0.041	0.029	0.022	0.018	0.015	0.013

As shown in Figure 2.10 at the beginning we have an acceleration which is bigger than the acceleration when extracting the cylinder due to the load we have with mass m = 25 [kg]. When the cylinder crosses 50% of the trajectory, the speed starts to decrease until the position is reached and the cylinder stops. The average rolling speed of the cylinder at retraction is $V_{vov\ s}$ = 0.046 [m/sec]. The average retraction speed is higher than the average retraction speed which means that retraction will have a faster positioning than retraction.

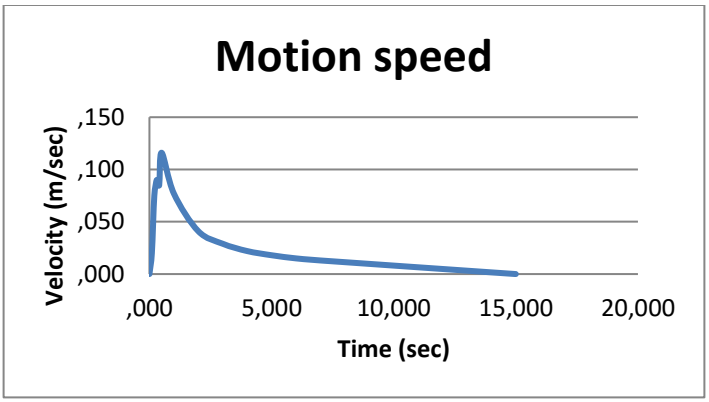


Figure 2.10. Speed growth graph when cylinder retraction

III. DISCUSSION OF RESULTS

It is here shown successful movement of the cylinder using two valves (a type of a SMISMO system). More precisely, it is here shown successful implementation of the SMISMO position control of a cylinder loaded with mass. Measurements here presented are showing promising results. With our system, it is possible to control the speed of the cylinder (using meter-in chamber of the cylinder) and pressure of the meter-out chamber of the cylinder, which makes our system to be MIMO (multi input multi output system). Measurements of the pressure in chamber B (Figure 2.8) during standard motion (as it is one servo valve used) show extremely high pressure in B, pressure which is absolutely unnecessary. This makes improvements in energy consumption possible when cylinder is extending if we are able to completely relax opposite cylinder chamber B. This can be done using the second valve (valve B), bringing fluid in chamber A trough valve A. Energy efficiency can be improved much more when cylinder is retracting (lowering the load). In that case using the force from the load (gravitational force), and not the energy of the pump, we can drastically reduce the energy consumption from the pump. Control of the movement in this case is completely done by the valve A (valve at the piston side).

When cylinder is extracting, it's important to control the flow which is coming from the pump and the pressure in the chamber of the side from piston rod, as can be seen from the results when the cylinder is extracted, there is bigger pressure in the chamber on the side of the piston rod than on the other side, this is good in some cases if the hydraulic losses are neglected but this study is about reducing losses. To reduce the pressure in the chamber on the side of the piston rod it's by adding another proportional valve that would regulate the pressure in the chamber or if we had separate (independent) control on both proportional valves so that we would control the openness of the second valve B. Cylinder retraction is much more complex as we have a load that acts on the

cylinder and helps the retraction, here it's important to control the pump flow and the pressure in the chamber form the piston rod side, here to reduce the energy who give the pump is to operate separate with both valves, i.e. when retracting the cylinder the valve who operate with chamber from piston rod side to be little open and pump pressure to overcome losses and fill the chamber with fluid. As can be seen when we increase the Kp then we have much faster cylinder movement but there is a bigger jump of position and more unstable movement. Therefore some system with PID control will give much better signal stability and faster cylinder positioning.

IV. CONCLUSION

It is here presented successful movement of the cylinder at a desired position using SMISMO system with two proportional valves, during lifting and lowering the load and developed control strategies. This system will be used in order to improve energy efficiency of the hydraulic system as well as to make the movement of the cylinder more stable and stiffer.

From the information presented in this study, it can be concluded that the energy efficiency of hydraulic systems can be raised; the system who developed here with further editing can achieve good results. If the two proportional valves are controlled separate (independently) of each other, i.e. if the valves receive a separate control signal from the PLC we would have much greater freedom in controlling, actually we would be able to separate control speed and pressure. If these two parameters are controlled individually then at any point in the movement of the cylinder we would be able to control the speed as well at what speed the cylinder would move when approaching the given position. Further upgrading of this system is to implement acquisition system like small SCADA system. For this new digitally controlled hydraulic system all controlling on proportional valves and positioning of the cylinder will be done via SCADA system. Whit this we will control the speed and position for extracting and retracting on cylinder, also we can make monitoring of the entire system operation process and storing data from pressure and position sensors and by incorporating flow sensors to read the cylinder speed at each moment of the cylinder movement as well storing data from sensors. With data stored in the computer we can easily get all the curves for the system with high precision.

In the future, it is expected to accelerate the development of different hydraulic systems or improve older systems with newer developed components that will be much easier to control, with newly developed programmable logic controllers that will controlling the components much faster and reduce delays.

REFERENCES

[1] Emil Zaev, Gerhard Rath, and Hubert Kargl, "Energy Efficient Active Vibration Damping", Proc. of 13th Scandinavian International Conference on Fluid Power, SICFP2013, Linköping, Sweden, 2013

[2] Andersen, T., Munzer, M., and Hansen, M., 2001. "Evaluation of control strategies for separate meter-in separate meter-out boom actuation in mobile applications". InProc. 17th Int. Conference on Hydraulics and Pneumatics.

[3] Anders H. Hansen, Henrik C. Pedersen, Torben O. Andersen and Lasse Wachmann. "Design of Energy Efficient SMISMO-ELS Control Strategies".

[4] B. Eriksson. Mobile Fluid Power Systems Design with a Focus on Energy Efficiency. PhD thesis, Univ. of Linkoping, Linkoping, Sweden, 2010.

[5] K. Heybroek. Saving energy in construction machinery using displacement control hydraulics-concept realization and validation. Master's thesis, Univ. of Linkoping, Linkoping, Sweden, 2009.

[6] Q.H. Yuan and Jae Y. Lew. Modeling and control of two stage twin spool servo-valve for energy-saving. In American Control Conference, Portland, OR, USA, 2005.

[7] B. Yao and S. Liu. Energy-saving control of hydraulic systems with novel programmable valves. In Proc. Of the 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, Shanghai, P.R. China, 2002.

[8] T. Hajek et al. Hydraulic system with an actuator having independent meter-in meter-out control, 2005.

[9] M. Linjama and M. Vilenius. Energy-efficient motion control of a digital hydraulic joint actuator. In Proceedings of the 6th JFPS International Symposium on Fluid Power, SUKUBA, 2005.

[10] Yingjie Liu, Bing Xu, Huayong Yang, and Dingrong Zeng. 2009. "Modeling of Separate Meter In and Separate Meter Out Control System"

[11] Henrik C. Pedersen, Tobias Skouboe, Morten S. Jacobsen and Torben O. Andersen. 2013. "INVESTIGATION AND COMPARISON OF SEPARATE METER-IN SEPARATE METER-OUT CONTROL STRATEGIES" .

[12] Andersen, T., Munzer, M., and Hansen, M., 2001. "Evaluation of control strategies for separate meter-in separate meter-out boom actuation in mobile applications". InProc. 17th Int. Conference on Hydraulics and Pneumatics.

[13] Anders H. Hansen, Henrik C. Pedersen, Torben O. Andersen and Lasse Wachmann. "Design of Energy Efficient SMISMO-ELS Control Strategies", Proceedings of 2011 International Conference on Fluid Power and Mechatronics, China, 2011.

ACKNOWLEDGMENT

Research done in this paper is supported from bilateral Macedonian–Austrian project "Development of concepts and control strategies with improved energy efficiency for hydraulic systems in heavy machinery" supported from Ministry of Education and Science in N. Macedonia as well as from WTZ Austria.

AUTHORS

First Author – Dejvid Anastasovski, Bachelor of science in Mechanical Engineering, Department of Automation, Faculty of mechanical engineering - Skopje, Cyril and Methodius University in Skopje, Macedonia, dejvid_anastasovski@hotmail.com

Second Author – Emil Zaev, PhD, associate Prof. Department of Automation, Faculty of mechanical engineering - Skopje, Cyril and Methodius University in Skopje, Macedonia, emil.zaev@mf.edu.mk

Third Author – Darko Babunski, PhD, associate Prof., Department of Automation, Faculty of mechanical engineering - Skopje, ss Cyril and Methodius University in Skopje, Macedonia, darko.babunski@mf.edu.mk

Fourth Autohor– Phd, ass. Prof. Gerhard Rath, Institute of Automation, University of Leoben, Austria, gerhard.rath@unileoben.ac.at

Fifth Author – Laze Trajkovski, PhD, Prof., Department of Automation, Faculty of mechanical engineering - Skopje, Cyril and Methodius University in Skopje, Macedonia, laze.trajkovski@mf.edu.mk

Rekonstrukcija elektromotornog pogona kolica transportnih traka T5L i T5D u sistemu dopreme uglja na termoelektrani „Nikola Tesla-B“

Reconstruction of the electric motor drive of the T5L and T5P conveyor belts in the coal delivery system at the thermal power plant „Nikola Tesla-B“

ŽeljkoV.Despotović[*], Aleksandar I.Ribić[*], Dejan Đokić[**], Ranko Rakijaš[**]

[*] Institut “Mihajlo Pupin”, Univerzitet u Beogradu
[**] Institut “Mihajlo Pupin”-Projekt Inženjering, Beograd

Apstrakt - U sklopu rekonstrukcije elektromotornog pogona kolica transportnih traka T5L i T5D u sistemu za dopremu uglja na termoelektrani „Nikola Tesla“-B su izvršena opsežna merenja na postojećem sistemu neregulisanog elektromotornog pogona, baziranog na hidro-dinamičkoj spojnici. Na osnovu ovih merenja sagledani su svi nedostaci postojećeg rešenja u električnom i mehaničkom smislu, urađen je kompletan simulacioni model sistema, na osnovu čega je predloženo novo rešenje regulisanog elektromotornog pogona baziranog na DTC and frekventnoj regulaciji uz mogućnost kombinacije čoperskog kontrolisanog kočenja i mehaničkog kočenja pogona. U radu su predstavljeni ključni rezultati merenja na postojećem sistemu, njihova analiza i predlog inoviranog rešenja.

Ključne Reči- Doprema uglja, transportne trake, elektromotorni pogon, DTC, frekventna regulacija, čopersko kočenje

Abstract - U sklopu rekonstrukcije elektromotornog pogona kolica transportnih traka T5L i T5P u sistemu za dopremu uglja na termoelektrani „Nikola Tesla“-B su izvršena opsežna merenja na postojećem sistemu neregulisanog elektromotornog pogona, baziranog na hidrodinamičkoj spojnici. Na osnovu ovih merenja sagledani su svi nedostaci postojećeg rešenja u električnom i mehaničkom smislu, urađen je kompletan simulacioni model sistema, na osnovu čega je predloženo novo rešenje regulisanog elektromotornog pogona baziranog na DTC frekventoj regulaciji uz mogućnost kombinacije čoperskog kontrolisanog kočenja i mehaničkog kočenja pogona. U radu su predstavljeni ključni rezultati merenja na postojećem sistemu, njihova analiza i predlog inoviranog rešenja.

Key words: transportne trake, regulisani pogon, čopersko kočenje, mehaničko kočenje, dtc frekventna regulacija

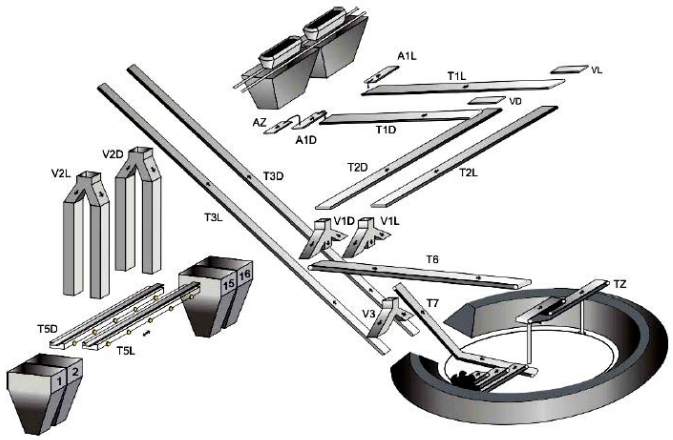
I. UVOD

U termoelektrani „Nikola Tesla-B“ (TENT-B), ugalj se dovozi vozovima iz kolubarskog basena. Ugalj se iz vagona istovaruje u bunkere i trakastim transporterima odvodi u kotlovske bunkere bloka B1 i B2 ili odlaže na deponiju uglja. Sistem transportera koji povezuje različite tačke postrojenja sastoji se dve odvojene linije od kojih svaka sposobna da obezbedi kapacitet od 2300t/h. Obzirom da potrošnja kotla jednog bloka iznosi oko 920t/h uglja dovoljna je samo jedna linija transportera za snabdevanje dva bloka termoelektrane, dok druga linija predstavlja rezervu za nesmetan rad termoelektrane[1-3].

Kao što prikazuje Slika 1, kolica sa trakom T5 za dopremu uglja su poslednja karika u transportu uglja do bunkera. U bunkerima se inače skladišti oko 600t uglja. Sistem radi tako što indikatori količine uglja u bunkerima šalju signal ka upravljačkom sistemu, da je potrebno dopuniti bunkere ugljem. Tada se određenim redosledom uključuju jedna po jedna transportna traka. Ugalj se doprema ili sa skladišta uglja preko kopača, ili neposredno sa presipne stanice iz vagona sa ugljem.

Kada se želi promena smera trake T5, prvo se zaustavi izvor punjenja te trase, potom se sačeka da se istovari sva količina koja je u tom momentu na trasi, a zatim se izvrši promena smera. Po izvršenoj promeni smera, ponovo se uključuje izvorna traka koja unosi nove količine uglja. Radi obezbeđenja pouzdanosti transporta uglja nad bunkerima, ugalj se nasipa nezavisno pomoću dvoja kolica. U slučaju da dođe do kvara tokom rada

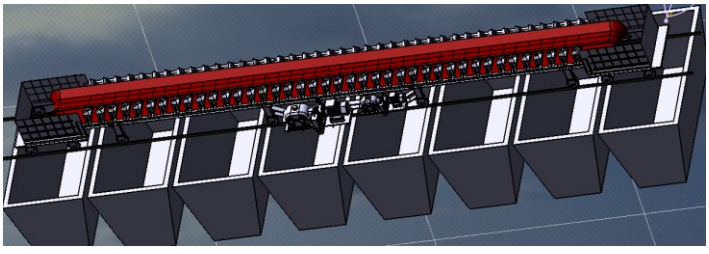
jednih kolica, druga kolica se uključuju i nastavljaju praktično besprekidno nasipanje uglja, odnosno punjenja bunkera ugljem[1].



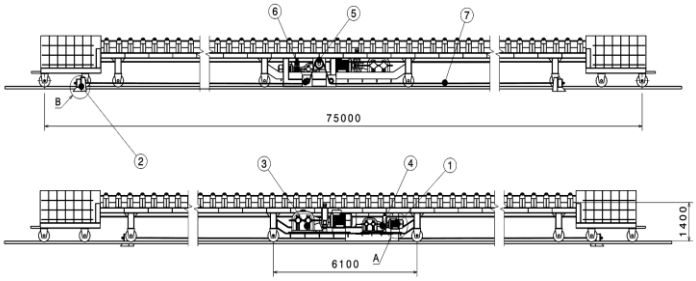
Slika 1- Principski prikaz transporta uglja sa deponije do bunkera na TENT-B[1].

Kolica se sastoje od rešetkaste konstrukcije, koja se preko više parova šinskih točkova oslanja na dve šine. Šine su oslonjene na gornje ivice bunkera (Slika 2). Na kolicima je postavljena pokretna gumena transportna traka, koja se pokreće preko reduktora, hidrodinamičke spojnice i elektromotora. Osnovni tehnički podaci za traku i kolica su: kapacitet trake Q=2700-3200t/h, brzina trake 4.3m/s, brzina kolica 0.4m/s, dužina kolica 75m.

Zavisno od potrebe rukovalac može jednostavno promeniti smer kretanja trake, prema ispražnjenosti bunkera. Na kolicima se, prema prikazu na Slici 3 između ostalog, nalazi pogonski elektromotor (1), koji preko hidrodinamičke spojnice (4), reduktora(3), pogonskog lančanika (5) i lanaca (7) pokreće kolica duž šina, u jednu ili drugu stranu, već prema potrebi rukovalaca. Lanac je na oba kraja posredstvom pogonskog i pomoćnog lančanika (6) vezan elastičnim oprugama (2).



Slika 2-Uprošćeni 3D prikaz trake T5L sa kolicima i prihvatnih bunkera na kotlu



Slika 3- Mehanički sklop kolica trake T5L

II. PROBLEMI U RADU POSTOJEĆEG POGONA KOLICA

Tokom dužeg eksploatacionog rada pojavili su se određeni problemi u postojećem elektromotornom pogonu kolica. Na ovom mestu će biti naznačeni neki najbitniji uzroci ovih problema:

- veliko zaprljanje, isparenja, abrazivna sredina
- velika ulegnuća na šinama kojima se kreću kolica
- intermitentni rad pogona – veliki broj uključenja, minimum 30-40 u toku sata
- kratak rad, koji traje po par sekundi
- između dva starta vreme može biti desetak sekundi
- problemi u pozicioniranju i kočenju kolica

Kao posledica prethodno pomenutih uzroka na pogonu kolica se pojavilo niz problema. U nastavku će biti navedeni oni ključni. Tokom rada kolica na dopremi uglja primećeno je otežano upravljanje i precizno pozicioniranje u određenim položajima na šinama. Ovo se dešavalo prilikom dejstva inercijalnih sila usled pokretanja transportne trake na kolicima, ili usled promene smera njenog kretanja. U tom cilju, potrebno je bilo osposobiti kočnicu na pogonskom reduktoru kolica, kako bi kolica potpuno mirovala u pomenutim situacijama. Dodatni problem što se pouzdanog rada kočnice tiče, se odnosio na veliku koncentracije ugljene prašine i vlage u okruženju. Iz ovog razloga je kočenje bilo neefikasno i nepouzdano. Takođe jedan od problema koji se često javljao je spadanje lanca sa pogonskog zupčanika. Ovi problemi su veoma često bili uzrok tzv. "katapultiranja" kolica i njihovog udaranja u granične odbojnike. Na ovaj način značajno se, u mehaničkom smislu, narušavala kompletna konstrukcija kolica. Primećeno je takođe, da zavisno od opterećenja i ulegnuća na šinama, je nekad teže pokrenuti kolica. Na osnovu ovoga se dešavalo prepunjavanje bunkera, a nekad se usled dejstva elastične sile u oprugama na krajevima pogonskog lanca dešavalo da kolica, zbog veće primljene kinetičke energije pređu željeni položaj pa počinju da pune dva bunkera istovremeno, i to preko pregrade koja ih razdvaja. Na ovaj način je bilo otežano pravilno punjenje bunkera. Kao negativne posledice ovoga dolazilo je do:

- pucanja pogonskog lanca
- katapultiranja kolica
- ispadanje kolica iz ležišta
- kidanja napojnog kabla
- pucanja cilindričnih opruga (Slika 4)
- pucanja osovine motora (Slika 5)

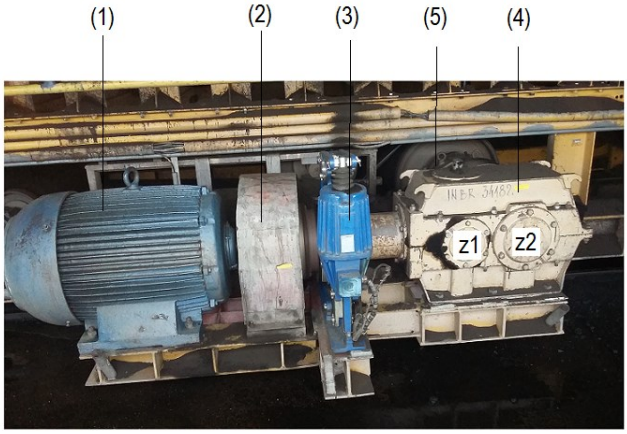
Slika 4-Prikaz destrukcije opruga kolica; (a) izgled uništene opruge, (b) izgled opruge pre ugradnje gumenih odbojnika

Slika 5-Prikaz loma vratila; (a) izgled uništenog vratila , (b) izgled uništenog vratila po preseku

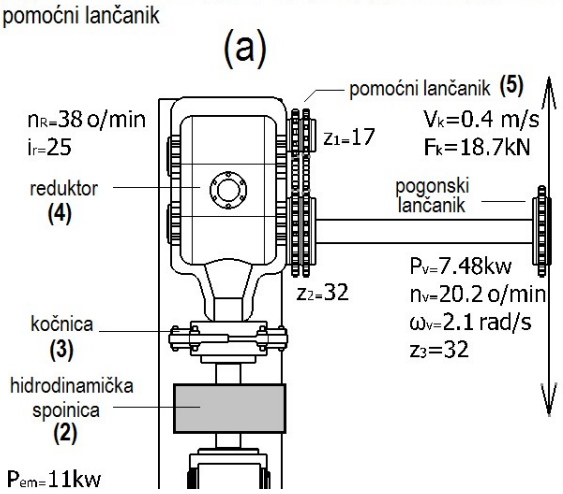
Konstrukcija vođenja opruge je u zatvorenoj čauri, tako da pri olabavljenom lancu (što je bio čest slučaj tokom eksploatacije), dolazi do većih oscilacija kolica , a samim tim do nabijanja navojka na navojak i pucanja prva dva navojka (Slika 4), što još više dovodi do opuštanja lanaca, tako da opruga gubi funkciju. Sa druge strane ima se veće oscilovanje kolica, i ovo oscilovanje se prenosi preko reduktora hidrodinamičke spojnice na pogonski elektromotor, gde se na prelazu klina ima opasan presek i pucanje vratila Ø42, Ø48, pa čak i Ø80, usled dominantne pojave zamora materijala, kao što prikazuje Slika 5.

III. MERENJA NA POSTOJEĆEM POGONSKOM SISTEMU KOLICA

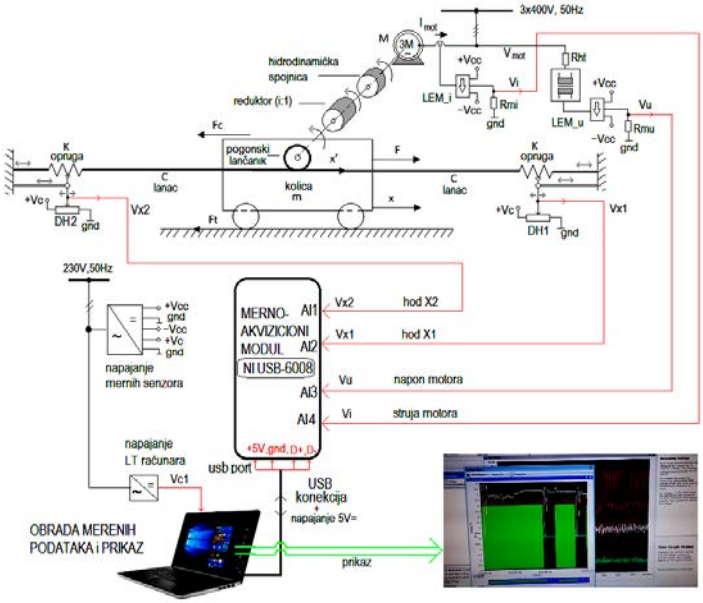
Zbog brojnih problema na postojećem pogonskom sistemu kolica trake T5L na dopremi uglja, njihovom rešavanju se pristupilo sistematično i izvršene su brojne analize i proračuni u cilju njihovog prevazilaženja. Za konačan predlog regulisanog elektromotornog pogona kolica od veoma bitnog značaja su bila merenja veličina od interesa: napon i struja pogonskog motora kolica, kao i hodovi zavojnih opruga posredstvom kojih se obezbeđuje zatezanje lanca. Prikaz neregulisanog pogona kolica je da na Slici 6. Na Slici 6(a) je data dispozicija pogona u realnim eksploatacionim uslovima, dok je na Slici 6(b) dat principski prikaz sa relevantnim tehničkim detaljima (brojne vrednosti karakterističnih električnih i mehaničkih veličina). Na Slici 7 dat simulacioni model neregulisanog pogona kolica kao i principska blok šema mernog sistema (merni elementi-davači i senzori, kao i merno-akvizicioni sistem), koji su realizovani u realnim eksploatacionim uslovima.



(1) pogonski elektromotor, (2) HD spojnica, (3) kočnica, (4) reduktor
(5) pomoćni lančanik



Slika 6- Neregulisani elektromotorni pogon kolica na dopremi uglja TENT-B; (a) dispozicija u realnom okruženju, (b) principski prikaz neregulisanog elektromotornog pogona kolica



Slika 7- Principska blok šema merno-akvizicionog sistema elektromotornog pogona kolica

Prema Slici 7, kolica mase *m* pogonjena su motorom M preko hidrodinamičke spojnice, reduktora, pogonskog lančanika i lanca C. Lanac C je na svoja oba kraja fiksiran zavojnim elastičnim oprugama za nepokretnu podlogu. Relativni položaj kolica u odnosu na lanac označen je sa *x′*, a stvarni položaj kolica u odnosu na nepokretnu podlogu sa *x*. Sila *F* kojom lanac gura kolica u idealnom slučaju, se može prikazati relacijom:

$$F = 2k \cdot (x' - x) \qquad (1)$$

Zategnutost lanca u sklopu postojećeg pogona kolica je bila jako loša, tako da je pretpostavljeno da postoji tzv. "mrtva zona" širine Δx , tako da je:

$$|x' - x| \le \Delta x \Rightarrow F = 0 \qquad (2)$$

Na kolica takođe deluju sila trenja F_t i sila F_c. Sila F_c je posledica dejstva trake za transport uglja na kolica. Proračunom je dobijeno da je masa kolica $m \approx 70$t, a da je krutost opruge k =150N/mm. Brzina kolica je određena zahtevima transporta i dopreme uglja i u stacionarnom stanju ona iznosi oko 40cm/s. Nominalna sila motora koja se prenosi na lanac bez gubitaka u spojnici, reduktoru i lančaniku za snagu motora od 11kW, iznosi F_n=11/0.4≈27.5kN, a startna sila za ubrzavanje kolica jednaka je dvostrukoj vrednosti nominalne. Proračunati stepen iskorišćenja iznosi η=0.7, tako da je stvarna sila koja se deluje pri startu kolica jednaka $F=2F_n \cdot 0.7 \approx 38.5$kN.

U cilju obavljanja merenja na elektromotornom pogonu kolica na transportnoj traci T5L, realizovana je u sklopu ovog sistema merno-akviziciona stanica. Blok šema merno-akvizicionog sistema je prikazana na Slici 7.

Za merenje hodova opruga su korišćeni linearni potenciometarski davači hoda DH1, DH2 sa naponskim izlazima V_{X1} , V_{X2}, respektivno. Korišćeni su linearni potenciometarski davači hoda i to DH1: HLP/9dSA1/200/8k proizvodnje *Penny&Giles*, opsega hoda 0÷200mm, opseg otpora 0÷8kΩ, linearnosti ≤0.3%. i DH2: isti proizvođač, ali za opseg doda 0÷7=6mm, opseg otpora 0÷3kΩ, linearnosti ≤0.4%. Napajanje linearnih davača hoda je iznosilo V_c=+5V.

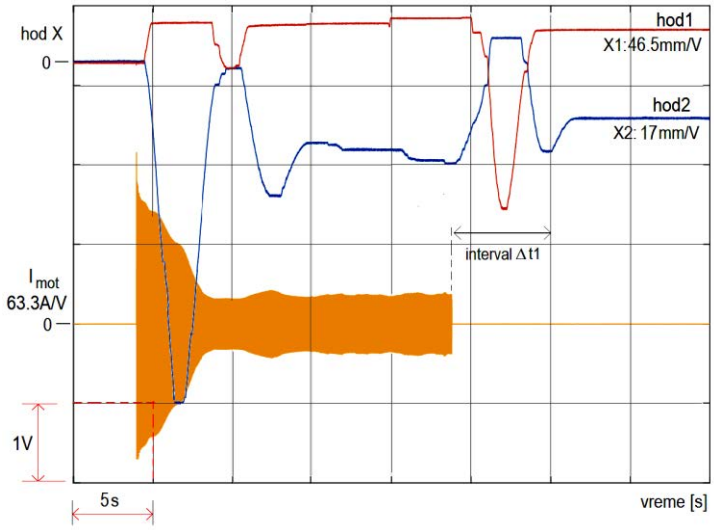
Za merenje električnih veličina su korišćeni strujni *LEM_i* i naponski *LEM_u*, senzori sa feritnim torusnim jezgrima sa ugrađenim Holovim elementima u procepu torusa. Senzori su sa povratnom spregom, čime je obezbeđena kompenzacija primarno merene veličine i rad oko nulte vrednosti B-H krive magnetnog kola torusa.

Senzor struje LEM_i je industrijski, za ekstremne uslove ugradnje (vlaga, prašina, temperaturni opseg 0...+70ºC), proizvodnje LEM, tip LTA200-S/SP2, opsega 0...±300A, prenosnog odnosa 1:2000, propusnog opsega DC...100kHz i tačnosti ≤0.8%. Otpornik R_{mi} je tako proračunat da je za napon napajanja V_{cc}=±15V, prenosna karakteristika ovog davača linearna i sa mernim pojačanjem 63.3A/V.

Senzor napona LEM_u je takođe industrijski, proizvodnje LEM, tip LV100/SP58, opsega 0...±1500V, prenosnog odnosa 1000:1000, propusnog opsega DC...100kHz i tačnosti ≤0.7%. Otpornik prema priključcima na pogonskom elektromotoru dimenzionisan za maksimalni napon 600V i njegova vrednost je iznosila R_{ht}=39kΩ/4W. Merni otpornik R_{mu} je tako proračunat da je za napon napajanja V_{cc}=±15V, prenosna karakteristika naponskog LEM davača linearna i sa mernim pojačanjem 177.6V/V.

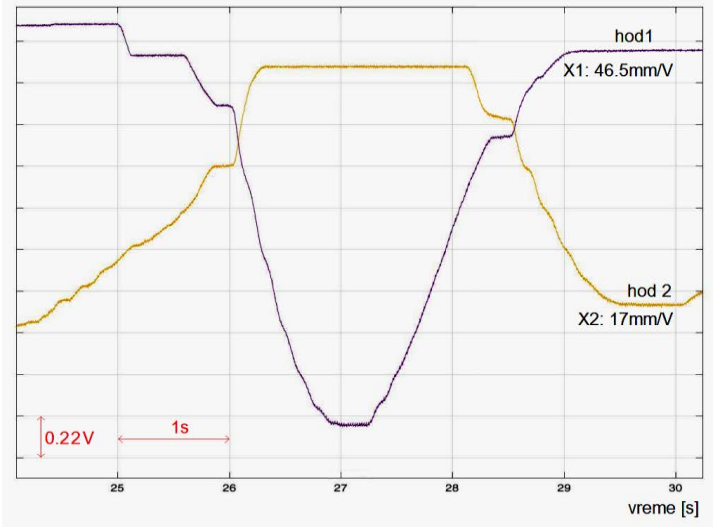
Za akviziciju podataka korišćen je merno-akvizicioni modul NIUSB 6008/6009 *National Instrument* [4], sa USB portom za povezivanje sa LAPTOP računarom na kojem je vršena obrada i prikaz izmerenih podataka. Sva četiri analogna ulaza ovog modula AI1÷AI4 su referisani prema zajedničkoj masi. Na ove ulaze se dovode naponski signali sa senzora struje i napona V_i i V_u, kao i naponski signali sa linearnih davača hoda V_{x1}, V_{x2}, kao što je prikazano na Slici 7. Na Slici 8 prikazani su snimljeni realni hodovi opruga i struja motora pri startu i zaustavljanju (uključujući kočenje) pogonskog elektromotora.

Prilikom zaustavljanja kolica, a odmah nakon isključenja pogonskog elektromotora, aktivira se kočnica na vratilu reduktora (videti Sliku 6), tako opruge preuzimaju silu kočenja, i nakon nekoliko oscilacija dolazi do zaustavljanja kolica. Kašnjenje aktivacije i deaktivacije kočnice, kao što se vidi sa snimaka na Slici 8 je oko 0.3s. Ove oscilacije su još više izražene u startu, pošto sila trenja ne menja smer pa je tako smanjeno prigušenje. Prigušenje u ovom slučaju je uslovljeno jedino karakteristikama pogonskog elektromotora. Pomenuta mrtva zona lanca Δx, data jednačinom (2) , je na osnovu eksperimentalnih rezultata sa Slike 8, procenjena na oko 10÷15cm. Procena je dobijena na osnovu kašnjenja u pomeranju opruge u odnosu na uključenje pogonskog elektromotora.



Slika 8-Snimljena signali hodova opruga (hod 1-X1, hod 2-X2) i struja pogonskog elektromotora Imot

Na Slici 9 je dat detaljniji prikaz merenih veličina hodova u intervalu Δt1, nakon isključenja glavnog pogonskog elektromotora.



Slika 9- Detaljni snimak hodova opruga u intervalu Δt1, nakon isključenja pogonskog elektromotora; hod 1-X1, hod 2-X2

Pomenuto rešenje elektromotornog pogona kolica često je dovodilo do spadanja lanca ili njegovog pucanja, što je rezultovalo nekontrolisanom zaletanju kolica (tzv. *"katapultiranju"*), obzirom da na njih deluje sila F_c prouzrokovana od strane traka transportera, i dodatno udaranjem u odbojnike. Prilikom zaustavljanja kolica aktiviranjem kočnice dolazi do oscilovanja kolica napred-nazad. Ako zanemarimo prigušenje, tada je maksimalni hod opruge L_0 za nezategnuti lanac (aktivna je uvek samo jedna opruga), dat obrascem:

$$L_0 = v \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \qquad (3)$$

dok je za zategnuti lanac:

$$L_0' = v \cdot \sqrt{\frac{m}{2k'}} \qquad (4)$$

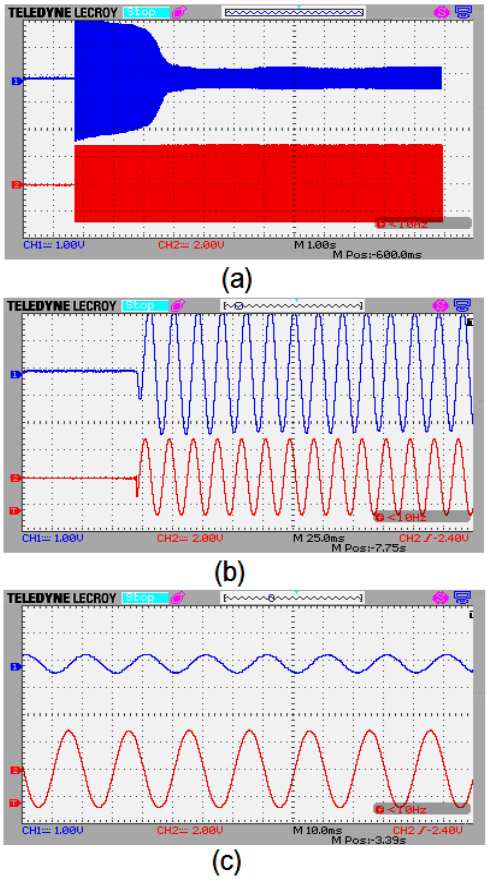
Dominantni uticaj na prigušenje oscilacija ima upravo trenje točkova kolica. Pri analizi problema sila trenja je modelovana suvim trenjem:

$$F_t = F_0 \cdot sign(v) \quad (5)$$

Proračunata vrednost za F_0 iznosi oko 13kN. Ukupan pređeni put (napred-nazad) L prilikom smirenja može se izračunati iz kinetičke energije kolica i energije trenja:

$$\frac{mv^2}{2} = L \cdot F_t \qquad (6)$$

Za masu kolica m=70000kg i brzinu kolica v=40cm/s, dobija sa da je kinetička energija E_k=5.6kJ, odnosno i za silu F_t=13kN, dobija se da je pređeni put prilikom smirenja jednak $L = E_k / F_t$ =0.43m=43cm Na Slici 10 su prikazani linijski napon i linijska struja pogonskog elektromotora u režimu polaska i u ustaljenom režimu. Dobijeni talasni oblici odgovaraju talasnom obliku struje koji je prikazan na Slici 8.



Slika 11- Snimci struje (CH1) i napona (CH2) pogonskog elektromotora; (a) pri startu i nakon prelaska u ustaljeni režim; (b) detaljan prikaz starta, (c) detaljan prikaz ustaljenog režima; Ci=63.3A/V, Cu=177.6V/V

Na Slici 11 su dati snimljeni talasni oblici karakterističnih električnih veličina (struje i napona) za razne režime rada, pogonskog elektromotora kolica.

Na Slici 11(a) je prikazan snimak struje pogonskog elektromotora kolica. Na ovom snimku se uočava da se start pogona ostvaruje u intervalu od 3s i da je polazna struja (CH1) iznosila oko126.6A, što predstavlja približno šestostruku vrednost nominalne struje pogonskog elektromotora čija je snaga iznosila 11kW.

Efektivna vrednost linijskog napona motora u ovom intervalu je iznosila 360Veff. Detaljan prikaz struje i napona pri startu pogonskog elektromotora je dat na snimku na Slici 11(b).

Na Slici 11(c) je dat snimak struje i napona u ustaljenom režimu, pri pogonu kolica po horizontalnim šinama.

U ovom režimu efektivna vrednost struje pogonskog elektromotora motora je iznosila 15.70A, dok je efektivna vrednost linijskog napona na motoru iznosila 380V. Fazni pomeraj između struje i napona je iznosio približno 57º (≈1rad).

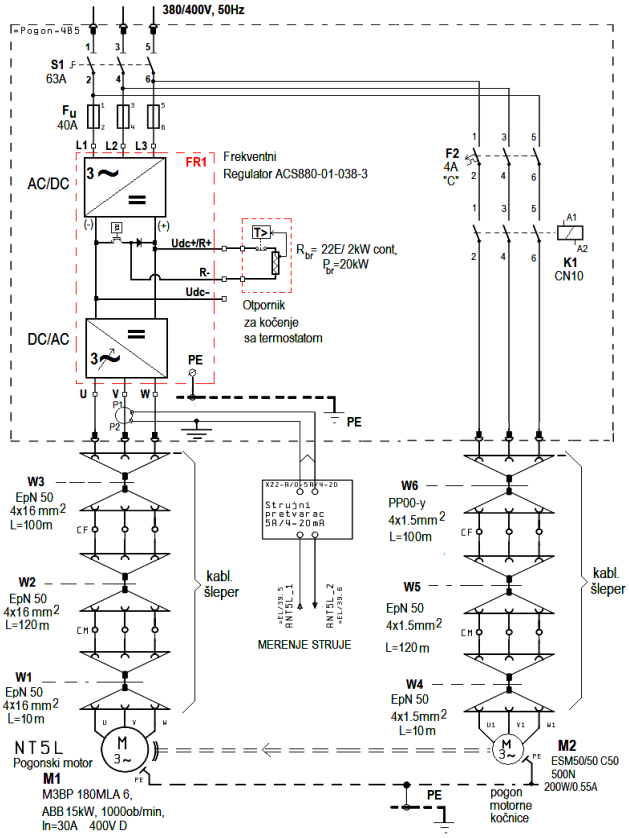
Pri ovim uslovima električna aktivna snaga motora je iznosila $P=1.73 \cdot U_{mot} \cdot I_{mot} \cdot cos\varphi = 1.73 \cdot 15.7A \cdot 380V \cdot 0.544 = 5.61kW$. Ova vrednost snage je duplo manja od nominalne i pri ovom režimu se koristi za savlađivanje stalnih otpora vuče pogonskih kolica na dopremi na traci T5L.

IV. NOVO PREDLOŽENO REŠENJE REGULISANOG ELEKTROMOTORNOG POGONA KOLICA

U okviru rekonstrukcije elektromotornog pogona kolica trake T5L na dopremi uglja predviđena je zamena postojećeg pogona sa pogonskim indukcionim elektromotorom snage 11kW sa hidrodinamičkom spojnicom, sa novim pogonskim elektromotorom snage 15kW uz primenu frekventne regulacije. Frekventna regulacija je predviđena kao zamena za postojeće rešenje sa hidro-dinamičkom spojnicom, obzirom da je ono tokom radnog veka pogona poprilično dotrajalo i postalo je nepouzdano. Frekventnom regulacijom pogonskog elektromotora kolica se obezbeđuje pored kontrole brzine i kontrola momenta (pogonskog i kočionog), kao i kontrolisano ubrzavanje i usporavanje kolica i niz drugih zaštitnih funkcija regulisanog elektromotornog pogona (prekostrujna zaštita, prenaponska i podnaponska zaštita, zaštita od preopterećenja i sl.).

Upotrebom frekventne regulacije sa implementiranim direktnim upravljanjem po momentu (*Direct Torque Control*-DTC)[5-8], je ostvarena jedna veoma značajna dodatna funkcija regulisanog elektromotornog pogona, a to je dinamičko kočenje sa kontrolisanim momentom. Ova funkcija podrazumeva korišćenje čoperskog kola u kombinaciji sa otpornikom za kočenje u jednosmernom (DC) međukolu frekventnog regulatora.

Na crtežu koji je dat na Slici 12 je prikazana osnovna električna šema elektroenergetskog dela regulisanog pogona. U okviru nje je dato povezivanje frekventnog regulatora i pripadajućeg otpornika za dinamičko kočenje, kao i ostale elektro-energetske opreme)[9].



Slika 12-Elektroenergetski deo regulisanog elektromotornog pogona kolica sa specificiranom opremom

Napajanje 3x380/400V, 50Hz regulisanog elektromotornog pogona kolica i pogonskog motora M1 se dobija sa sabirnica sopstvene potrošnje TENT-B, dok je sva elektroenergetska oprema smeštena u bloku "Pogon-4B5". U ovom bloku se napajanje dovodi preko tropolnog glavnog prekidača (sklopka-rastavljač) S1 koja je odabrana za nazivnu struju 63A. Preko ovog glavnog prekidača se napajaju frekventni regulator FR1 glavnog pogonskog elektromotora i pogon elektromotora kočnice. Zaštita od kratkog spoja na ulazu frekventnog regulatora je ostvarena tropolnim ultra-brzim nožastim osiguračima F_U, nazivne struje 40A, koji su smešteni na odgovarajuće podnožje. Prekostrujna zaštita i zaštita od preopterećenja na izlazu FR1 je ostvarena u sklopu samog frekventnog regulatora i obezbeđuje fleksibilno i jednostavno podešavanje svih potrebnih zaštitnih strujnih pragova.

Na izlazu FR1 je obezbeđeno jednofazno merenje struje pogonskog motora (u fazi "V") mernim strujnim transformatorom prenosnog odnosa 50/5A, na čiji sekundar je vezan merni strujni pretvarač 5A/4÷20mA. Ovaj strujni signal se vodi ka nadređenom upravljačkom sistemu SCADA. Opciono se merenje struje može izvesti i sa analognog izlaza frekventnog regulatora, kao što je prikazano na električnoj šemi na Slici 13. Opseg strujnog signala na ovom analognom izlazu je 0-20mA.

Napajanje pogonskog motora kočnice M2 se ostvaruje sa glavnog prekidača S1. Zaštita od kratkog spoja elektromotornog pogona kočnice se ostvaruje tropolnim automatskim prekidačem F2, klase "C" nazivne struje 4A. Uključenje pogonskog motora kočnice, kada se kočnica otpušta, se ostvaruje tropolnim

kontaktorom K1, tip CN10, koji se kontroliše sa digitalnog relejnog izlaza frekventnog regulatora, kao što pokazuje električna šema na Slici 12. Kriterijum za isključenje kontaktora motora kočnice (kada dolazi do hvatanja kočnice i kada ona mehanički koči pogon) je dostizanje praga brzine pogonskog elektromotora koji iznosi 10% od nominalne brzine.

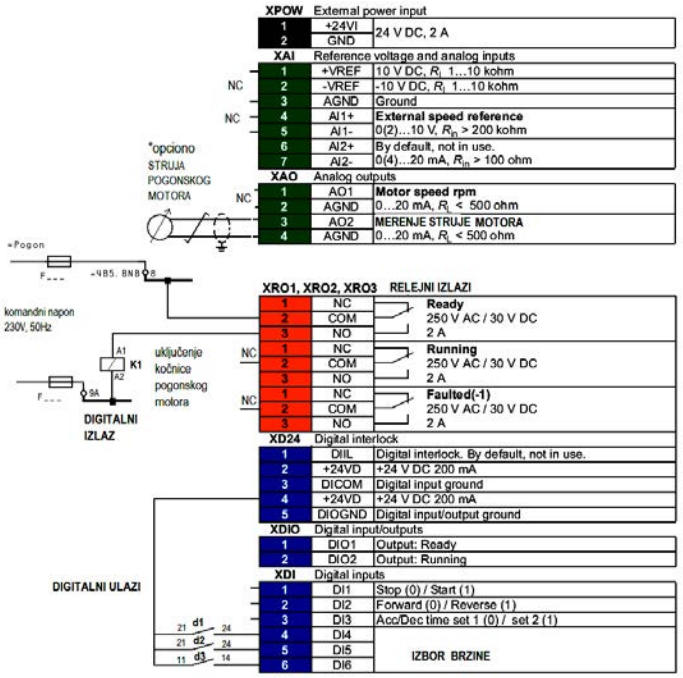
U novom rešenju pogona, se elektroenergetskom delu dodaje i upravljački deo sa primenom nove kombinacije komandnih tastera. U ovom slučaju su komandni tasteri integrisani u ručnu konzolu sa koje se zadaju smerovi kretanja (levo-desno) kao i referentne brzine pokretanja kolica (sporije i brže kretanje). Rekonstrukcijom pogona se predviđa rad kolica sa dve brzine, te je stoga predviđen komandni pult rukovaoca sa dva tastera, pri čemu je moguće ostvariti kombinaciju za dve brzine pokretanja kolica: jednu koja odgovara nominalnom režimu (nominalnoj brzini pokretanja) i drugu koja odgovara dvostruko manjoj brzini.

Projektom je dakle predviđeno zadavanje dva smera kretanja (smer "LEVO" i smer "DESNO"). Takođe moguće je zadati za svaki od smerova kretanja, dve referentne brzine pokretanja kolica, jedna niža i druga viša. Nivoi ovih referentnih vrednosti se mogu podešavati internim setovanjem u frekventnom regulatoru. Komande za smerove pokretanja "LEVO-DESNO" i za dve brzine pokretanja kolica se zadaju ravnopravno preko ručnih komandnih pulteva rukovaoca (pultevi "Pogon CLG" i "Pogon CLD").

Pogon kolica *LEVO-manja brzina* se ostvaruje sa komandnog pulta "Pogon CLG" pritiskom na taster SLGG1, odnosno sa komandnog pulta "Pogon CLD" pritiskom na taster SLDG1. Pritiskom na bilo koji od ovih tastera uključuje se pomoćno rele d1, koje svojim pomoćnim radnim kontaktom daje informaciju frekventnom regulatoru na priključku 4, na klemama digitalnih ulaza XDI, za pogon u levu stranu (detalj povezivanja je dat na Slici 13).

Slično se ostvaruje pogon kolica *DESNO-manja brzina*, samo se u ovom slučaju aktiviraju tasteri SLGD1 ili SLDD1. Pritiskom na ove tastere uključuje se pomoćno rele d2, koje svojim pomoćnim radnim kontaktom daje informaciju frekventnom regulatoru na priključku 5 (videti kleme digitalnih ulaza XDI), za pogon u desnu stranu, kao što je prikazano na Slici 13.

Pogon kolica *LEVO-veća brzina* se ostvaruje sa komandnog pulta "Pogon CLG" dodatnim pritiskom na taster SLGG1-a, odnosno sa komandnog pulta "Pogon CLD" pritiskom na taster SLDG1-a. U ovom slučaju su uključena pomoćna relea d1 i d3. Dakle dodatno, pored već aktiviranog relea d1, se uključuje i rele d3 (tzv. "rele veće brzine") ako se želi zadati veća brzina pokretanja kolica "LEVO". Svojim pomoćnim kontaktom rele d3, daje informaciju frekventnom regulatoru na priključku 6 -kleme digitalnih ulaza XDI, za pogon u levo i pri većoj brzini (detalj povezivanja je dat na Slici 13).



Slika 13- Upravljačka šema regulisanog pogona kolica i pogona kočnice

Treba napomenuti da je u relejnoj logici ostvarena međusobna blokada istovremenog uključenja relea d1 i d2, odnosno komanda za istovremeni pogon kolica u levu i desnu stranu, kao što pokazuje relejna šema data na Slici 13.

U odnosu na prethodno rešenje, novim rešenjem sa frekventnom regulacijom je obezbeđeno nezavisno upravljanje kočnicom, posredstvom digitalnog izlaza frekventnog regulatora (relejni digitalni izlaz za 230V, 50Hz za struju 4A), kao što pokazuje električna šema upravljačkog dela koja je data na Slici 13. Kriterijum za prekidom napajanja (isključenjem) kočnice, kada se ustvari vrši aktiviranje kočenja, je dostizanje praga brzine kolica koji je nešto ispod 10% od nominalne brzine. Do tog praga, kočenje elektromotornog pogona kolica se ostvaruje dinamičkim čoperskom kolom za kočenje, koje je implementirano u samom frekventnom regulatoru.

Izbor frekventnog regulatora

Izbor frekventnog regulatora je izvršen na osnovu izabranog pogonskog elektromotora kolica (detaljni proračun je dat u mašinskom delu projekta)[9]. Na osnovu proračuna, odabran je IEC motor u stepenu zaštite IP55, proizvodnje ABB, tip 3GBP183410-ADG, nominalne snage 15kW, nominalne brzine obrtanja 977 ob/min (sinhrona brzina 1000 ob/min), linijskog napona 690V, 50Hz (za spregu statora u zvezdu-„Y“), odnosno napona 400V, 50Hz (za spregu statora u trougao- „Δ“). Nominalna struja motora je 31.5A, dok je polazna struja 5.8 puta veća od nominalne (odnosno 5.8·31.5A=182.5A). Za izabrani elektromotor stepen iskorišćenja pri relativnoj vrednosti punog opterećenja (od 100%), je 90.24%. Faktor snage odabranog elektromotora pri punom opterećenju je 0.76. Ulazna električna snaga motora se izračunava iz relacije:

$$P_{in} = P_{out} / \eta_{motora} \qquad (7)$$

Za izlaznu snagu motora $P_{out} = 15kW$ i stepen iskorišćenja $\eta_{motora} = 0.902$, se dobija da je ulazna snaga elektromotora (a to je ustvari izlazna snaga frekventnog regulatora) :

$$P_{in} = P_{FRout} = 15kW / 0.902 = 16.63kW$$

Nominalna ulazna struja motora je $I_n = 31.5A$, tako da struja frekventnog regulatora mora da zadovolji uslov:

$$I_{FRout} \geq I_n \qquad (8)$$

Nominalna snaga frekventnog regulatora mora da zadovolji uslov:

$$P_{FRout} \geq P_{nmot} \qquad (9)$$

Ako se usvoji da će frekventni regulator raditi u uslovima preopterećenja od 10% (a takođe to vodi ka izvesnoj sigurnosti i određenoj rezervi), dobija se da je potrebna snaga na izlazu frekventnog regulatora:

$$P^*_{FRout} = 16.63kW \cdot 1.1 = 18.23kW$$

Na osnovu prethodnog proračuna je odabran frekventni regulator ABB proizvodnje tip: ACS880-01-038A-3, nominalne izlazne aktivne snage 18.5kW i nominalne izlazne struje $I_{FRout} = 38A$. Na osnovu izbora frekventnog regulatora se zaključuje da on zadovoljava oba uslova, odnosno kriterijuma za izbor, koji su napred dati izrazima (8) i (9).

Treba napomenuti da frekventni regulator, pored regulacije brzine pogonskog elektromotora kolica i ima mogućnost direktne kontrole momenta, odnosno tzv. DTC kontrolu (*Direct Torque Control).* Ova kontrola momenta dobija na značaju kako tokom pokretanja, odnosno ubrzavanja kolica, tako i kod zaustavljanja, odnosno usporavanja kolica (kada je moguće ostvariti kontrolisano kočenje). Da bi se odredila ulazna snaga koju frekventni regulator uzima iz napojne mreže 3x400V, 50Hz, potrebno je uzeti u obzir gubitke u ulaznom ispravljaču (AC/DC pretvaranje) i izlaznom invertoru (DC/AC pretvaranje). Oba ova pretvarača su integrisana u frekventnom regulatoru. Gubici u ulaznom ispravljaču su posledica gubitaka u stanju vođenja ispravljačkih dioda. Gubici usled komutacija se u ovom ulaznom pretvaraču zanemaruju, obzirom da se radi o niskoj učestanosti preklapanja (mrežni ispravljač). Uz odgovarajuću rezervu, usvaja se da je disipacija na ulaznom ispravljačkom bloku približno jednaka $\Sigma P^*_{\gamma ispr} = 100W$. Ulazna snaga koju uzima kompletan AC/DC/AC pretvarač, odnosno frekventni regulator je $P_{inFR} = 18.6kW$. Za ovu vrednost snage i za usvojeni faktor snage ulaznog ispravljača od 0.8, dobija se da je ulazna struja frekventnog regulatora:

$$I_{inFR} = \frac{P_{inFR}}{\sqrt{3} \cdot U_l \cdot \cos\varphi_{ispr}} \qquad (10)$$

Odnosno:

$$I_{inFR} = \frac{18.6kW}{1.73 \cdot 400V \cdot 0.8} = 34A$$

Ova ulazna struja služi za dimenzionisanje ulaznog glavnog prekidača sa koga se napajaju frekventni regulator i kočnica, ali i ulaznih zaštitnih elemenata frekventnog regulatora (osigurača, AS prekidača i sl.). Na osnovu prethodnog proračuna predviđen je ulazni ultrabrzi nožasti osigurač *Fu* frekventnog regulatora, nazivne struje 40A, klase „D“ i prekidne moći (struja kratkog spoja) za minimalno 10kA.

Dimenzionisanje otpornika za kočenje

Otpornik za kočenje se nalazi u jednosmernom međukolu frekventnog regulatora i njegova šema povezivanja je data na električnoj šemi na Slici 12. Ovaj otpornik „prima energiju“ pogonskog elektromotora kada se on nalazi u režimu kočenja. Tada on ustvari radi u generatorskom režimu i energiju kočenja „ubacuje“ u jednosmerno među kolo. Jednosmerno međukolo je pažljivo projektovano i predviđeno je da može da primi oko 80% pune snage pogonskog motora. Ako se pretpostavi da se kočenje ostvaruje pri snazi 80% od pune (preporuka ABB proizvođača frekventnog regulatora), odnosno 0.8·16.6kW i da je napon u jednosmernom međukolu u režimu kočenja oko 540V, dobija se da je vrednost kočionog otpornika [10-11]:

$$R_{br} = \frac{U^2_{dc}}{0.8P_k} \qquad (11)$$

Odnosno ako se uvrste ulazni poznati podaci za prethodno navedene veličine, dobija se da je:

$$R_{br} = \frac{U^2_{dc}}{0.8P_k} = \frac{540^2}{0.8 \cdot 16600} = 21.95\Omega$$

Usvaja se vrednost kočionog otpornika $R^*_{br} = 22.\Omega$.

Struja u jednosmernom međukolu u režimu kočenja će iznositi:

$$I_{br} = \frac{U_{dc}}{R^*_{br}} \qquad (12)$$

$$I_{br} = \frac{U_{dc}}{R^*_{br}} = \frac{540}{22} = 24.5A$$

U slučaju da kočenje traje maksimalno $30s$ (pesimistički slučaj), ukupna energija koja se disipira na otporniku je:

$$E_{br} = R_{br} \cdot I^2_{br} \cdot t_k \qquad (13)$$

Na osnovu poznatih ulaznih vrednosti se dobija da je ova energija:

$$E_{br} = 22 \cdot 24.5^2 \cdot 30s = 396kJ$$

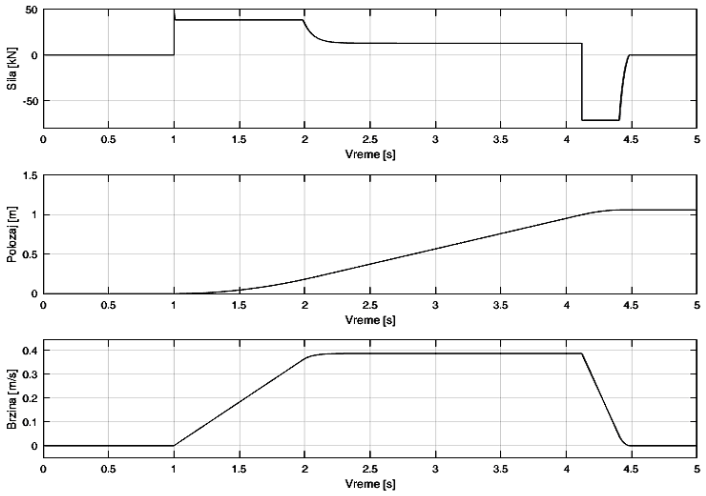
Na osnovu ovog proračuna ovim projektom je odabran kočioni otpornik: SACE 15RE22 proizvodnje ABB čiji su kataloški podaci: otpornost 22Ω, kontinualna snaga 2kW, snaga pri kočenju 15 kW, energija disipacije: 420kJ i presek priključnog kabla 6/10mm^2.

V. SIMULACIONA VERIFIKACIJA PREDLOŽENOG REŠENJA

Kao što je prethodno napomenuto, novo rešenje zasniva se na korišćenju frekventnog regulatora pogonskog elektromotora za pokretanje kolica transportne trake. Obzirom da je u mašinskom delu izvršena rekonstrukcija lanca i zamena zavojnih opruga, gumenim oprugama (kombinacija krutosti i prigušenja), prilikom izrade simulacionog modela je pretpostavljeno da je lanac dobro zategnut. Novi elastični elementi-gumene opruge su sa malim hodom i odgovarajućim prigušenjem. Krutost novih opruga je *k*

= 2kN/mm. Ovo se pokazalo kao efikasno rešenje, obzirom da je njegovom primenom sprečeno spadanje lanca sa lančanika. U simulaciji je pretpostavljena veza pogonski motor-reduktor (bez hidro-dinamičke spojnice), obzirom da je stara hidro-dinamičku spojnica demontirana i jer nije potrebna (obzirom da je primenjena frekventna regulacija).

Ubrzavanje i usporavanje (kočenje) kolica sada se vrši frekventnim regulatorom bez oscilacija, a hidraulična kočnica se aktivira nakon zaustavljanja kolica. Simulacioni dijagrami dobijeni na osnovu kreiranja modela sistema su dati na Slici 14. Na simulacionim dijagramima su date tri ključne karakteristične veličine: pogonska sila kolica, položaj kolica i linearna brzina kretanja kolica po šinama. Simulacija je urađena za slučaj kretanja kolica kada operater zadaje komandu uključenja sa implementiranim „mekanim startom“ pogona i komandu isključenja, nakon pomeranja kolica na dužini od 1m (ovaj slučaj je najčešće zastupljen tokom eksploatacionog režima rada elektromotornog pogona kolica).



Slika 14- Simulacioni dijagrami kretanja kolica na transportnoj traci T5L: sila, pomeraj i brzina (odozgo na dole)

Prilikom ubrzavanja kolica, ostvarena je pogonska sila od oko 38.5kN u intervalu od 1s, pri čemu se brzina uspostavlja od nulte brzine do vrednosti približno 0.4m/s. Pri ovome se ima konstantno ubrzanje pogona od 0.4m/s². Na kraju ovog intervala se ima pređeni put (hod) od približno 0.2m. Nakon ovog režima se kolica pokreću na šinama, savlađujući stalne otpore vuče: pogonska sila je približno 13kN, brzina 0.4m/s i na kraju ovog intervala se ima pređeni put od oko 4.2m. Prilikom zaustavljanja kolica, brzina se prvo smanjuje od vrednosti 0.4m/s do vrednosti 0.04m/s, a zatim se aktivira kočnica. Tokom smanjenja brzine primenjena je sila kočenja od -70kN u trajanju od 0.3s, kao što se vidi sa dijagrama na Slici 14. U ovom slučaju je maksimalni hod opruge jednak L_0=5.3mm. Shodno relaciji (6) i činjenici da je pre aktiviranja kočnice brzina kolica 0.04m/s, ukupni pređeni put je L=4.3mm, što je mnogo manje u odnosu na slučaj bez kočnice koji se imao u starom rešenju elektromotornog pogona kolica. Ovo takođe znači da neće doći do pojave oscilacija. Simulacija je pokazala da je nakon komande operatera za zaustavljanje, ukupno pređeno rastojanje (kočenje frekventnim regulatorom+smirivanje) manje od 10cm, što bi u potpunosti zadovoljilo tehničke zahteve pouzdanog rada i kočenja elektromotornog pogona kolica.

VI. ZAKLJUČAK

U radu su predstavljena ključna merenja na elektromotornom pogonu kolica na transportnoj traci T5L u sistemu na dopremi uglja na TENT-B i predlog novog rešenja regulisanog elektromotornog pogona zasnovanog na korišćenju frekventne regulacije sa direktnom kontrolom momenta (tzv. *Direct Torque Control*-DTC) kako pri pokretanju, tako i pri kočenju. Na osnovu izvršenih merenja su detektovani glavni problemi rada kolica koji su se ogledali u oscilatornim hodovima zavojnih opruga kolica, njihovom pucanju, spadanju lanca sa pogonskog lančanika, nepouzdanom kočenju i na kraju kao glavni problem tzv. „katapultiranje kolica“. Tokom eksploatacije je uočeno otežano upravljanje i precizno pozicioniranje u određenim položajima na šinama. Ovo se dešavalo prilikom dejstva inercijalnih sila usled pokretanja transportne trake na kolicima, ili usled promene smera njenog kretanja. U tom cilju, novim rešenjem je predloženo upravljanje kočnicom na pogonskom reduktoru kolica, kako bi kolica potpuno mirovala u pomenutim situacijama. Dodatni problem što se pouzdanog rada kočnice tiče, se odnosio na veliku koncentracije ugljene prašine i vlage u okruženju. Iz ovog razloga je kočenje je neefikasno, nepouzdano i veoma često je predstavljalo jedan od uzroka tzv. "katapultiranja" kolica i njihovog udaranja u granične odbojnike. Nakon merenja je urađen simulacioni model sistema u okviru kojeg su verifikovani mehanički i električni proračuni. Na postojećem pogonu je izvršena rekonstrukcija lanca i zamena zavojnih opruga, kompozitnim elastičnim (kombinacija krutosti i prigušenja), maksimalne sile 22.35kNm (po jednoj gumenoj opruzi), tip W22-358-0243, proizvodnje *Marsh Mellow FIRESTONE*. Nakon ove prve faze rekonstrukcije pogon kolica je već postao značajno stabilniji i pouzdaniji u odnosu na prethodno rešenje, i što je veoma bitno, sa oscilacijama hoda opruga svedenim na minimum. Dodatno poboljšanje i još stabilniji i pouzdaniji rad bi se mogao ostvariti regulisanim pogonom zasnovanim na primeni frekventne regulacije sa implementiranom DTC. U radu su prikazani simulacioni rezultati predloženog rešenja. Pravac daljeg unapređenja rešenja bi bili praktična realizacija novog regulisanog elektromotornog pogona, bez upotrebe hidro-dinamičke spojnice i njegovo testiranje i puštanje u rad u realnim eksploatacionim uslovima.

ZAHVALNICA

Istraživanje opisano u ovom radu finansirano je od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

REFERENCES

[1] M.Obradović, A.Jovović, D.Radić, M.Stanojević, D.Todorović, M.Jovanović, „Idejno rešenje sistema za kontrolu kvaliteta i količina primljenog uglja na Termoelektrani Nikola Tesla-B“, Zbornik radova 24. Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji, PROCESING ’11, God.24, Br.1, pp.1-12, Izdanje SMEITS, April 2011.

[2] Z.N.Milovanović, Termoenergetska postrojenja - Tehnološki sistemi, projektovanje i izgradnja, eksploatacija i održavanje, Mašinski fakultet, Univerzitet u B.Luci, 2011.

[3] Ž.V.Despotović, A. M.Pavlović, U.Tanasić, N.Glišić „Rekonstrukcija elektro-hidrauličkog pogona strele kopača u sistemu na dopremi uglja u TENT-B“, Proceedings of International Conference POWER PLANTS 2018, November, 05th to November, 08th in Zlatibor, Serbia, pp. E2018-37/1-23.

[4] http://www.ni.com/pdf/manuals/371303n.pdf

[5] Technical guide No. 1 „Direct torque control - the world's most advanced AC drive technology“, ABB drives, 2011.
https://library.e.abb.com/public/14f3a3ad8f3362bac12578a70041e728/ABB_Technical_guide_No_1_REVC.pdf

[6] X.T.Garcia, B. Zigmund, A.Terlizzi, R.Pavlanin, L. Salvatore, L. "Comparison Between FOC and DTC strategies for Permanent Magnet". *Advances in Electrical and Electronic Engineering*, 5 (1–2), March 2006.

[7] J-N.Nash, "Direct Torque Control, Induction Motor Vector Control Without an Encoder", *IEEE Transactions on Industry Applications*. 33 (2): 333–341, March 1997.

[8] P.Tiitinen, M.Surandra, "The next generation motor control method, DTC direct torque control". Proceedings of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth. 1. pp. 37–43, 1995.

[9] A.Jevtović, Ž.V.Despotović, D.Đokić, A.Ribić, R.Rakijaš, N.Vojinović, Tehnička dokumentacija rekonstrukcije upravljanja kolicima traka T5L i T5D u TENT-B, Obrenovac, TD 017, Reg.br. 19257, IMP Projektinženjering, Jun 2019.

[10] Technical guide No.8-Electrical Braking, ABB drives, 2018.

[11] H.Greiner, „Starting, braking, and positioning with three-phase cage induction motors“, Danfoss Bauer GmbH, Esslingen, 2001.

AUTORI

Prvi Autor – Dr Željko V.Despotović, dipl.el.inž, Naučni savetnik, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs

Drugi Autor – Dr Aleksandar Ribić, dipl.el.inž, Viši naučni saradnik, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, aleksandar.ribic@pupin.rs.

Treći Autor-Dejan Đokić, dipl.maš.inž., IMP-Projektinženjering, Beograd

Četvrti Autor-Ranko Rakijaš, dipl.maš.inž.,IMP-Projektinženjering, Beograd

Koresponding Autor – Dr Željko V. Despotović, dipl.el.inž, Institut M.Pupin, Volgina 15, Beograd 11060, zeljko.despotovic@pupin.rs, zdespot@etf.rs, Tel. 011/6771-024. , Mob.Tel. 063/331-645

Laboratorijskim istraživanjem do izbora mjesta uvođenja stepenovanog vazduha za sagorijevanje u ložište

Lab-scale tests to optimize Over Fire Air position in Furnace

Nihad Hodžić[*], Anes Kazagić[**], Kenan Kadić[**]

[*] Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Vilsonovo šetalište 9, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina
[**] JP Elektroprivreda BiH d.d. - Sarajevo, Vilsonovo šetalište 15, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina

Apstrakt - Generalno, kvalitet miješanja reaktanata je od suštinskog značaja za proces i brzinu sagorijevanja svakog goriva, naročito čvrstog niskovrijednog i slaboreaktivnog uglja. Pri tome su odgovarajući koeficijent viška vazduha za sagorijevanje kao i mjesto i način uvođenja pojedinih porcija ukupnog vazduha u ložište jedni od ključnih uticajnih faktora na miješanje odnosno efikasnost procesa sagorijevanja i nivo emisije zagađujućih komponenti dimnih gasova u okolinu. Primjena zonskog ili stepenovanog privoda vazduha za sagorijevanje u ložište (primarni, sekundarni, tercijarni i OFA - *Over Fire Air*) danas je praktično nezaobilazna pri projektovanju novih industrijskih i energetskih kotlova ali se, prilikom rekonstrukcije, dominantno uvodi i primjenjuje i na postojećim ložištima velikih kotlova. Primjena ove primarne mjere u ložištu ne iziskuje značajnija finansijska ulaganja - troškovi investicije u uvođenje stepenovanog privoda vazduha za sagorijevanje u ložište u redovan pogon kotla su praktično zanemarivi u odnosu na višestruke pozitivne efekte i benefite primjene ovakvog sistema, od kojih se naročito izdvaja niža emisija NO_x u okolinu. Međutim, preduslov za ispravno i pouzdano projektovanje sistema za stepenovani privod vazduha u ložištu nekog kotla, jeste izbor optimalnog mjesta za uvođenje OFA vazduha u ložište. Određivanje i izbor tog mjesta zavisi od niza faktora, prije svega od vrste i karakteristika goriva, kvaliteta meljave, tehnologije sagorijevanja, konstrukcije ložišta, tipa, broja i rasporeda gorionika i slično. Na ovu temu su na Mašinskom fakultetu Univerziteta u Sarajevu u sklopu Laboratorije za sagorijevanje uglja i biomase obavljena obimna istraživanja karakteristika sagorijevanja mješavina ugljeva srednjobosanskog rudarskog bazena u sprašenom stanju, uključujući i kosagorijevanje ovih ugljeva sa otpadnom drvnom biomasom (piljevina bukve i smrče). Ovdje je predstavljen dio rezultata tih istraživanja koji se odnose na emisiju NO_x i to za različita goriva i temperature sagorijevanja u zavisnosti od načina privoda i mjesta uvođenja vazduha za sagorijevanje u ložište.

Ključne riječi - sagorijevanje, koeficijent viška vazduha, OFA, emisija NO_x.

Abstract - In general, the mixing the reactants is very important to the process and the rate of combustion of each fuel, especially low-ranked coals with low reactivity. The appropriate excess air coefficient for combustion and the position and mode of supply of individual portions (air staging) of the total air in the furnace are one of the key influencing factors for the mixing, respectively the efficiency of the combustion process, and the level of emissions. Today, the air staging (primary, secondary, tertiary and over fire air-OFA) is an indispensable process in the design of new industrial and energy boilers. Also, this measures are used for the reconstruction of existing furnace of large boilers. The implementation of this primary measure in the furnace does not require significant financial resources - the costs of investing in the introduction of air staging supply for combustion in the furnace are very low in relation to the multiple positive effects and benefits of such a system, especially a lower NOx emissions. However, the first condition for the correct and reliable design of the air staging system in the furnace is the choice of the optimal position for the supply OFA air. Determination of this position on the furnace depends on several factors, primarily the type and characteristics of the fuel, grinding quality, combustion technology, furnace structure, type, number and arrangement of burners. On this topic, the Faculty of Mechanical Engineering of the University of Sarajevo, in the Laboratory for Coal and Biomass Combustion, conducted extensive research on the pulverized combustion of coal blends of the Central Bosnia Mining Basin, including co-firing of these coals with waste wood biomass (beech and spruce sawdust). Here is presented some of the results of those NO_x emission studies for different fuels and combustion temperatures, depending on the mode of supply and the positions of the combustion air supply in the boiler furnace.

***Keywords*:** combustion, excess air coefficient, OFA, NO_x emissions.

I UVOD

Poznato je da Bosna i Hercegovina ima značajna nalazišta i rezerve uglja i da se konverzijom energije iz ovog fosilnog goriva dominantno, oko ¾ ukupne proizvodnje, dobija finalna električna energija. Po vrsti uglja, to su lignit i mrki ugalj, dok kamenog uglja nema. Prema posljednjim procjenama, bilansne i eksploatacione rezerve uglja u Bosni i Hercegovini iznose oko $4{,}5 \cdot 10^9$ t, od čega se oko 40% odnosi na mrki ugalj, a oko 60% na lignit, [1]. Međutim, s druge strane, kvalitet bosanskohercegovačkih ugljeva značajno varira od jednog rudarskog bazena do drugog, pa čak i od jednog rudnika do drugog u okviru istog rudarskog bazena. Osnovne karakteristike ovih ugljeva su niska toplotna moć (lignitni ugljevi u prosjeku do 9 MJ/kg, mrki ugljevi od 9 do 20 MJ/kg), visok udio mineralne mase (čak i preko 50%) i vlage (u dostavnom stanju i do oko 30%) te slaba reaktivnost, [2]. Posljedično tome, u pogonu je javljaju različiti tehničko-tehnološki problemi pri sagorijevanju bosanskohercegovačkih ugljeva, uključujući nestabilnost i prekid procesa sagorijevanja. Nestabilnost procesa sagorijevanja, kao i nivo emisije zagađujućih komponenti dimnih gasova u okolinu - naročito emisija NO_x, je u direktnoj vezi i sa načinom i mjestom uvođenja vazduha za sagorijevanje. Mrki ugalj iz rudnika srednjebosanskog rudarskog bazena se dominantno isporučuje TE Kakanj u kojoj se sagorijeva u kotlovima na koncipiranim na bazi tehnologije sagorijevanja u letu sa tečnim odvođenjem šljake iz ložišta. Poznato je da ovu tehnologiju sagorijevanja karakterišu dosta visoke temperature u ložištu, naročito u topionoj komori (1350÷1550 °C), što za posljedicu ima veoma visoke emisije zagađujućih komponenti dimnih gasova, prvenstveno emisija NO_x koja je u ovom slučaju na nivou do 900 mg/m_n^3, te naročito emisija SO_2 koja zbog pomenutih visokih temperatura sagorijevanja i zbog značajnijeg sadržaja sumpora u uobičajenim mješavinama uglja i do 2,5%, ide čak na nivo od oko 8000 mg/m_n^3, [3].

Činjenica je, također, da Bosna i Hercegovina ima i značajan energetski potencijal iz otpadne biomase koji potiče iz poljoprivredne proizvodnje te naročito šumarstva, primarne i sekundarne obrade drveta. Procjenjuje se da ukupan godišnji tehnički energetski potencijal ostataka biomase u BiH iznosi više od 33 PJ, što predstavlja ekvivalent za više od 3 miliona tona bosanskohercegovačkog lignita, [4].

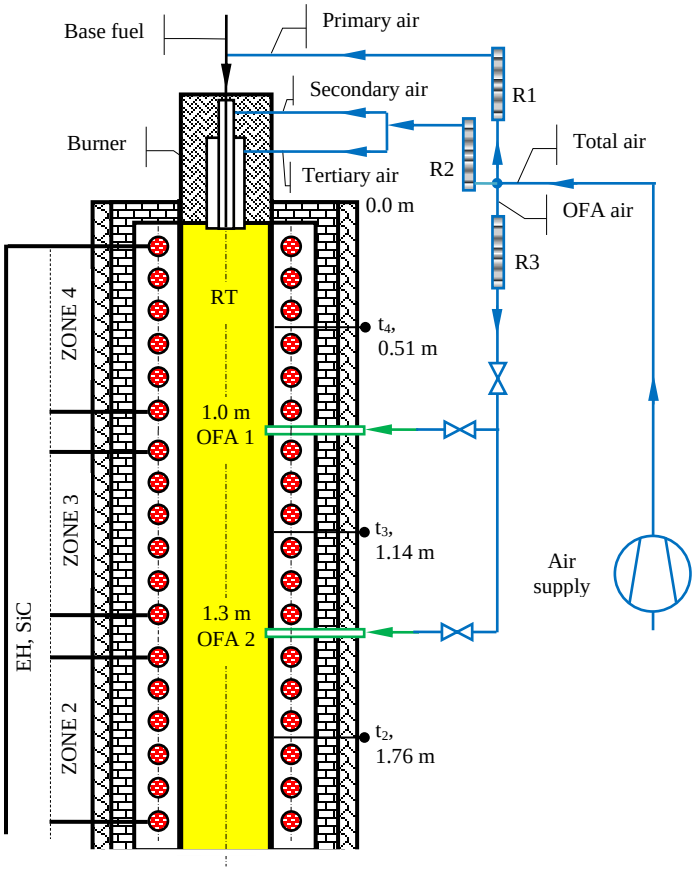
Smanjenje emisije NO_x, u odnosu na klasične ili konvencionalne sisteme sagorijevanja, je u odgovarajućoj mjeri moguće postići primjenom gorionika novije generacije koji imaju za posljedicu niže emisije NO_x (vrtložni ili protočni *Low-NO_x* gorionici, LNB), stepenovanim privodom vazduha za sagorijevanje (OFA), stepenovanom dobavom osnovnog goriva te upotrebom dodatnog goriva kakvo je na primjer zemni ili prirodni gas - ove tehnologije su u stručnoj javnosti poznate kao *reburning tehnologije*. LNB gorionici rade na principu stepenovanog ili zonskog privoda vazduha za sagorijevanje posmatrano na nivou pojedinačnog gorionika koji na taj način rezultiraju značajnim smanjenjem emisije NO_x i kao takvi su danas skoro neizostavna oprema novih energetskih kotlova, koji su u pravilu sa nadkritičnim ili ultra-nadkritičnim parametrima pare i od kojih se zahtijeva veoma visoka fleksibilnost u pogonu, [5]. U radu [6] predstavljeni su rezultati odnosno efekti primjene stepenovanog privoda vazduha za sagorijevanje (OFA) na emisiju NO_x - u ovom slučaju, kao gorivo, korišten je osušeni lignit. Pokazano je da na ovaj način dolazi do značajnog smanjenja emisije NO_x - rezultati se odnose na ispitivanje količine OFA vazduha te udaljenosti njegovog uvođenja u zonu reakcije u odnosu na osnovni gorionik. U radu [7] je navedeno da se uz *Low-NO_x* gorionike emisija NO_x može smanjiti za 20%, ali da je zbog visoke temperature sagorijevanja ta emisija i dalje visoka (1036 mg/m_n^3 pri 6% O_2 u suhim dimnim gasovima), te je za daljnje sniženje emisije NO_x preporučen zonski odnosno stepenovani privod vazduha za sagorijevanje u ložištu (tzv. OFA sistem). Slični pozitivni efekti primjene stepenovanog ili produženog sagorijevanja sa vazduhom na smanjenje emisije NO_x iskazani su i u radovima [8] i [9] - sagorijevanje uglja, kao i pri kosagorijevanju uglja i biomase, [10-14].

Podvrgavanjem različitih mješavina uglja, kao i različitih mješavina uglja i otpadne drvne biomase, sagorijevanju pri različitim temperaturama te uz primjenu primarne mjere u ložištu stepenovanog privoda vazduha za sagorijevanje uključujući i porciju OFA vazduha na različitim udaljenostima od osnovnog gorionika, moguće je utvrditi odgovarajući odziv procesa putem mjerenja parametara i njihove analize, odnosno moguće je doći do relevantnih zaključaka o uticaju mjesta uvođenja OFA vazduha na sam proces i posljedično tome uticaj na emisiju NO_x u okolinu. Na osnovu tih zaključaka moguće je kvantificirati i sublimirati karakteristike sagorijevanja ovih goriva uključujući i prednosti konverzije primarne energije iz goriva u uslovima tehnologije sagorijevanja čvrstih goriva u letu pri stepenovanom privodu vazduha za sagorijevanje, [15].

II LABORATORIJSKO POSTROJENJE, ISPITNA MATRICA GORIVA I ISPITNI REŽIMI

Laboratorijsko postrojenje: Automatski Upravljani Cijevni Reaktor (AUCR) smješten je u laboratoriji Mašinskog fakulteta Univerziteta u Sarajevu i omogućava ispitivanje karakteristika sagorijevanja različitih čvrstih goriva u letu pri različitim ambijentalnim i tehnološkim uslovima. U najkraćem, postrojenje je projektovano i izgrađeno za rad u dosta širokom temperaturnom opsegu (praktično od temperature okoline do maksimalne temperature 1560 °C) i u uslovima različite količine i raspodjele osnovnog goriva i vazduha za sagorijevanje, uključujući i mogućnost ispitivanja *reburning tehnologija* sagorijevanja primjenom dodatnog goriva, na primjer zemnog gasa. Izabrana ili željena srednja temperatura sagorijevanja postiže se putem odgovarajućih električnih grijača montiranih duž dvije suprotne strane keramičke reakcione cijevi. U osnovi, istraživanjem na ovom AUCR postrojenju, moguće je dobiti podatke koji se odnose na efikasnost sagorijevanja, intenzitet deponovanja i karakteristike mineralnog depozita iz reakcione zone kao i šljake i pepela na izlazu iz reaktora, te emisiju komponenti dimnih gasova - uobičajeno su to komponente: O_2, CO, CO_2, NO, NO_2, NO_x i SO_2, [15]. Principijelna šema dijela AUCR postrojenja sa naznačenim stepeno-

vanim razvodom vazduha za sagorijevanje data je na slici 1. - dodatno vidjeti [10-12].



Slika 1. Principijelna šema dijela postrojenja sa naznačenim stepenovanim razvodom vazduha za sagorijevanje, Ri - rorametar, mjerenje protoka porcije vazduha

Ispitna matrica goriva i ispitni režimi: U svrhu ovih laboratorijskih istraživanja zavisnosti emisije NO_x od mjesta uvođenja OFA porcije vazduha u ložište, formirana je matrica od sljedeća tri goriva, [15] - Tabela 1:

- Projektna mješavina mrkih ugljeva iz rudnika Kakanj, Breza i Zenica sa masenim udjelima komponentnih ugljeva u mješavini: 70, 20 i 10%, respektivno - oznaka goriva: K70B20Z10. Ova mješavina uglja sagorijevana je pri temperaturnim uslovima koji u principu odgovaraju tehnologiji sagorijevanja sprašenog uglja sa suhim odvođenjem šljake iz ložišta (950÷÷1350 °C) - intencija je odabir i primjena ove tehnologije sagorijevanja na budućem bloku 8 u TE Kakanj. Ova mješavina uglja formirana je nakon termičke i mehaničke pripreme komponentnih ugljeva (sušenja i mljevenja) u laboratorijskim uslovima.
- Uobičajena mješavina ugljeva koja se posljednjih godina spaljuje u kotlovima tri raspoloživa bloka TE Kakanj - oznaka goriva: U100. Ova mješavina uglja nastala je tokom redovnih aktivnosti homogenizacije ugljeva ili miješanja mrkih ugljeva koji se dopremaju na depo TE Kakanj iz više rudnika u Bosni i Hercegovini (npr. rudnici: Kakanj, Breza, Zenica, Gračanica, Livno, Nova Bila, Banovići,...) i to približno procentualno isporučenim količinama uglja. Potrebna količina ovog uzorka mješavine uglja za svrhu laboratorijskog ispitivanja izuzeta je direktno iza mlinova u realnom pogonu bloka 5: meljava uglja koja ide direktno u ložište.
- Mješavina uglja U100 sa otpadnom drvnom biomasom (oznaka biomase: B100, sitna piljevina bukve i smrče u približnom omjeru po masi 50:50) i to u masenom omjeru 93:7 - oznaka mješavine ugalj-biomasa: U93B7. Ova mješavina goriva je također pripremljena na depou TE pa je i potreban uzorak za laboratorijska ispitivanja izuzet u pogonu, direktno iza mlinova kao i meljava U100.

Ispitne mješavine goriva oznake U100 i U93B7 sagorijevana su u temperaturnim uslovima koji u principu odgovaraju tehnologiji sagorijevanja sprašenog uglja sa tečnim odvođenjem šljake iz ložišta (1350÷1450 °C) - ova tehnologija sagorijevanja je primijenjena na svim dosadašnjim blokovima u TE Kakanj, od kojih su još u pogonu blokovi 5 i 6 (2×110 MW) i blok 7 (230 MW).

Rezultati odgovarajućih analiza navedenih ispitnih goriva dati su u sljedećoj Tabeli 1.

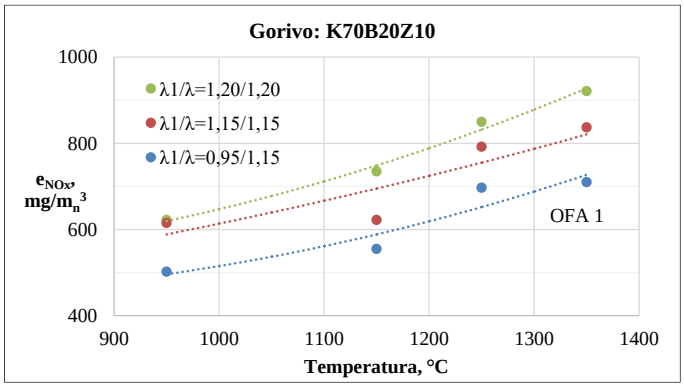
Tabela 1. Rezultati analiza ispitnih goriva, dostavno stanje, [15]

Gorivo/Oznaka	K70B20Z10	U100	U93B7
Tehnička analiza, %			
Vlaga	10,71	13,90	18,09
Pepeo	40,84	37,88	33,05
Isparljivo	27,71	28,97	31,16
Fiksni C	20,73	19,25	18,59
Sagorivo	48,44	48,22	48,86
Elementarna analiza, %			
Ugljik	34,48	36,62	33,36
Vodonik	2,33	2,60	2,52
Sumpor	2,41	2,06	1,59
Azot	0,75	0,72	0,75
Kiseonik	8,48	10,22	10,63
Toplotna moć, kJ/kg			
Gornja	13898	13351	13446
Donja	13171	12496	12510

III REZULTATI ISTRAŽIVANJA I DISKUSIJA

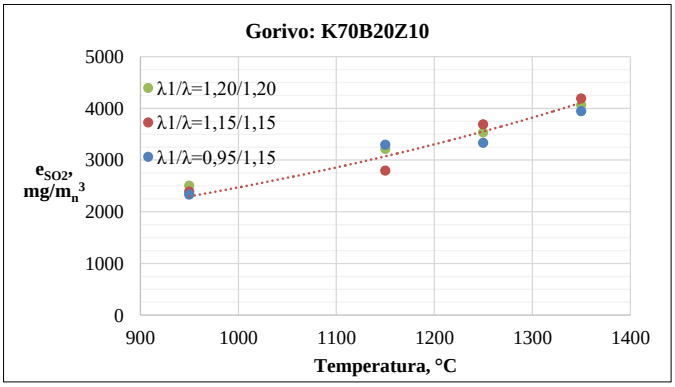
Gorivo K70B20Z10: U ovom slučaju emisija NO_x je data u zavisnosti od temperature sagorijevanja (950, 1150, 1250 i 1350 °C), koeficijenta viška vazduha za sagorijevanje i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu odnosno ložište. U odnosu na temperaturu sagorijevanja, očekivano, najniža emisija NO_x izmjerena je pri najnižoj ispitnoj temperaturi 950 °C - generalno, emisija NO_x raste sa porastom temperature pri čemu brzina nastanka azotnih oksida naročito raste pri temperaturi iznad 1300 °C. S druge strane, emisija NO_x je niža pri nižim vrijednostima koeficijenta viška vazduha za sagorijevanje, npr.: $e_{\lambda=1.15}<e_{\lambda=1.20}$ - u ovim ispitnim režimima ukupna količina vazduha je dovedena na gorionik kroz tri porcije: primarni, sekundarni i tercijarni, tj. vrijedi: λ_1/λ=1,15/1,15 ili λ_1/λ=1,20/1,20. Za razliku od ovih

režima, ispitni režim sa OFA porcijom vazduha (λ_1/λ=0,95/1,15) je sa ukupnim koeficijentom viška vazduha λ=1,15 ali sa podstehiometrijskom količinom vazduha koja se dovodi na gorionik - naknadni ili stepenovani privod OFA porcije vazduha u reakcionu zonu/ložište na određenoj udaljenosti iza izlazne ravni gorionika. U ovom slučaju, ta pozicija OFA 1 je na udaljenosti od 1 m. U ovim ispitnim režimima, sa stepenovanim privodom vazduha za sagorijevanje i pri svim temperaturama sagorijevanja, su u odnosu na konvencionalne režime sa klasičnim privodom ukupnog vazduha na gorionik, izmjerene najniže emisije NO_x. Tako je npr. pri temperaturi sagorijevanja 1350 °C i pri stepenovanom privodu vazduha sa OFA ta emisija 710 mg/m_n^3 i niža je za oko 130 mg/m_n^3 pri istom koeficijentu viška vazduha i klasičnom dovodu vazduha na gorionik. Relativno smanjenje emisije NO_x za ova dva slučaja sagorijevanja je oko Δe_{NOx}=15%, Slika 2 - [15].



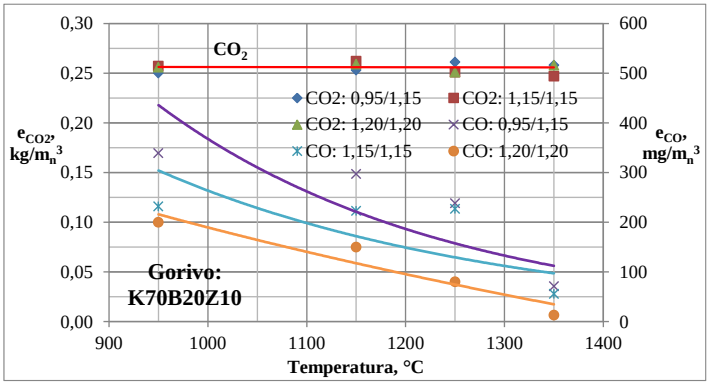
Slika 2. Emisija NO_x u zavisnosti od temperature sagorijevanja, koeficijenta viška vazduha i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu/ložište

Uticaj količine i načina raspodjele vazduha za sagorijevanje na emisiju SO_2 predstavljen je na slici 3. Iz prikaza rezultata, uzimajući u obzir kako razuđenost tako i preklapanje više vrijednosti, to se može zaključiti da praktično nema promjene emisije SO_2 u odnosu na koeficijent viška vazduha i način privoda tog vazduha za sagorijevanje u reakcionu zonu/ložište. U principu, primijetan je samo značajniji porast emisije SO_2 sa porastom temperature sagorijevanja, [17].



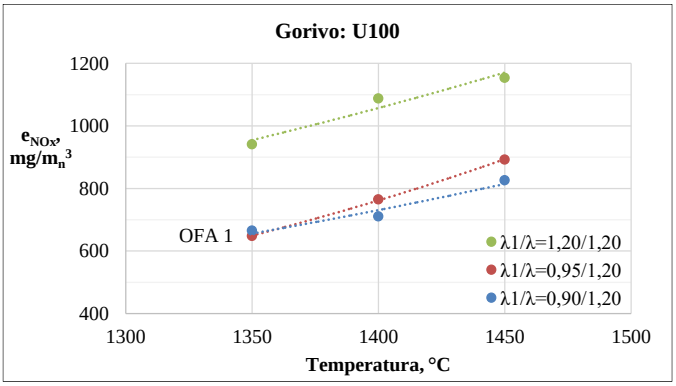
Slika 3. Emisija SO_2 u zavisnosti od temperature sagorijevanja, koeficijenta viška vazduha i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu/ložište

Emisija CO_2, bez obzira na vrijednost koeficijenta viška vazduha i način dobave tog vazduha u reakcionu zonu, se praktično ne mijenja i u ovom slučaju u prosjeku iznosi 0,255 kg/m_n^3, Slika 4. Stepenovani privod vazduha za sagorijevanje, pored pozitivnog uticaja na smanjenje emisije NO_x, praćen je i nešto većom emisijom ugljenmonoksida (CO). Generisanje CO pri sagorijevanju se smanjuje sa porastom temperature sagorijevanja i koeficijenta viška vazduha, Slika 4. Pri tome se može uočiti da uticaj načina privoda vazduha na emisiju CO gubi značaj sa porastom temperature sagorijevanja, [16-18].



Slika 4. Emisija CO_2 i CO u zavisnosti od temperature sagorijevanja, koeficijenta viška vazduha i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu/ložište

Gorivo U100: Za ovu mješavinu uglja emisija NO_x data je, također, u zavisnosti od temperature sagorijevanja, koeficijenta viška vazduha za sagorijevanje i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu/ložište, Slika 5. U ovom slučaju, zbog većih temperatura sagorijevanja u odnosu na prethodnu mješavinu uglja, izmjerene su još više emisije NO_x. Tako npr. pri temperaturi sagorijevanja 1450 °C i stepenovanom privodu vazduha sa OFA, ta emisija je u prosjeku oko 860 mg/m_n^3 za razliku od oko 1155 mg/m_n^3 pri konvencionalnom sagorijevanju. Emisija NO_x pri režimu sa OFA vazduhom niža je za skoro 300 mg/m_n^3 ili za oko Δe_{NOx}=25%.

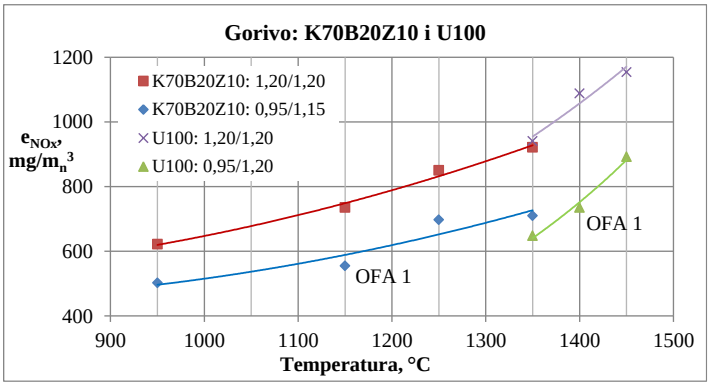


Slika 5. Emisija NO_x u zavisnosti od temperature sagorijevanja, koeficijenta viška vazduha i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu/ložište

Iako rezultati emisije NO_x pokazuju da je razlika te emisije sa porastom temperature izraženija za režime sa OFA vazduhom

($e_{\lambda1=0.90}<e_{\lambda1=0.95}$) to ne znači da su režimi sagorijevanja sa λ_1/λ=0,90/1,20 ukupno povoljniji u odnosu na režime pri stepenovanom privodu vazduha sa λ_1/λ=0,95/1,20. Naime, kod ukupne ocjene procesa sagorijevanja nekog goriva analizira se i ocjenjuje, pored emisije NO_x, i efikasnost procesa kroz emisiju CO te kod sagorijevanja čvrstih goriva naročito važan sadržaj sagorivih materija u šljaci i pepelu - dominantno je to čisti ugljik, C_{fix}. Prema tome, analizom procesa sagorijevanja i sa ovih aspekata, došlo je se do saznanja da su režimi stepenovanog sagorijevanja goriva U100 sa λ_1/λ=0,90/1,20 nepovoljniji u odnosu na režime sagorijevanja pri λ_1/λ=0,95/1,20. Ovo se može objasniti uzimajući u obzir isti put i vrijeme za sagorijevanje čvrstog ugljika u oba slučaja ali različitu koncentraciju kiseonika u zoni do mjesta uvođenja OFA struje vazduha i zone poslije toga - ložišna atmosfera sa različitim sadržajem kiseonika.

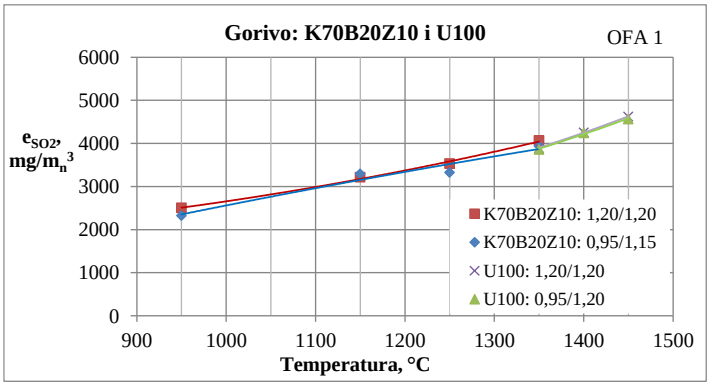
Sublimirajući rezultate emisije NO_x za prethodna dva goriva i temperaturne intervale sagorijevanja može se i pokazati ranije iznesena tvrdnja odnosno činjenica da je brzina promjene emisije NO_x izraženija pri sagorijevanju uglja u temperaturnim uslovima >1300 °C, Slika 6, a što je i u skladu sa Zeldovich-evim mehanizmom uticaja temperature na brzinu hemijske reakcije generisanja termičkog NO. Također, uočljiva je značajna razlika emisije NO_x s obzirom na mjesto dovođenja vazduha za sagorijevanje u ložište pri čemu je ta razlika sa porastom procesne temperature sve izraženija.



Slika 6. Trend promjene i vrijednosti emisije NO_x u zavisnosti od temperature i načina dovoda vazduha za sagorijevanje u reakcionu zonu/ložište

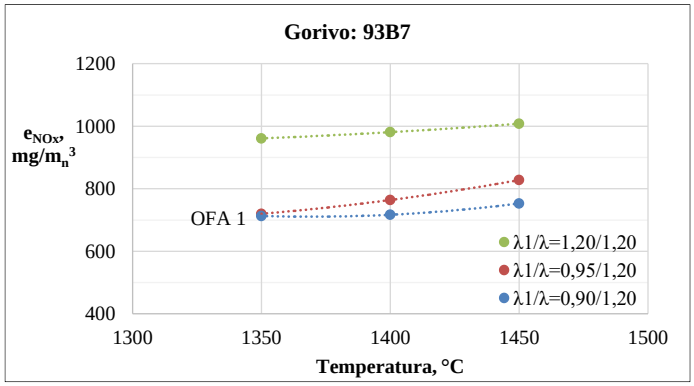
Ovdje, u najnepovoljnijim uslovima sagorijevanja u pogledu generisanja azotnih oksida, pri temperaturi sagorijevanja 1450 °C, vrijednost emisije je i preko 1100 mg/m$_n^3$. Primjenom stepenovanog privoda vazduha za sagorijevanje ta emisija NO_x se smanjuje pa je tako, na primjer, pri temperaturi 1400 °C ta emisija NO_x smanjena sa 1088 na 735 mg/m$_n^3$ ili za preko 30%.

Analogno prethodnom dijagramu, za ista ova goriva K70B20Z10 i U100 i iste temperaturne i tehnološke uslove sagorijevanja na slici 7 predstavljeni su rezultati koji se odnose na emisiju SO_2. Iz prezentiranih rezultata se vidi, kao što je i ranije pokazano i konstatovano, da emisija SO_2 praktično ne zavisi od količine vazduha za sagorijevanje niti od načina dobave tog vazduha u reakcionu zonu/ložište nego isključivo od sastava goriva (sadržaja ukupnog i sagorivog sumpora u gorivu) i temperature sagorijevanja. Podsjećanja radi, u poređenju sa ugljikom i vodonikom, za sagorijevanje sumpora iz goriva potrebna je najmanja količina kiseonika pri čemu sumpor veoma burno reagira u tom procesu oksidacije.



Slika 7. Trend promjene i vrijednosti emisije SO_2 u zavisnosti od temperature i načina dovoda vazduha za sagorijevanje u reakcionu zonu/ložište

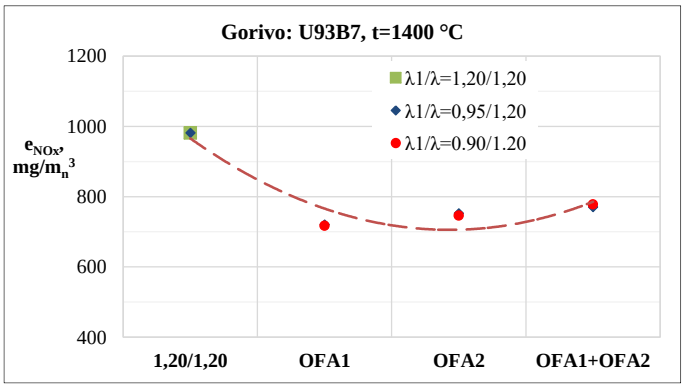
Gorivo U93B7: Za mješavinu uglja i otpadne drvne biomase i za iste dosad predstavljene postavke ispitnih režima sagorijevanja su na sljedećoj slici predstavljeni rezultati emisije NO_x. I ovdje vrijede praktično isti zaključci koji su navedeni za prethodni slučaj uz dodatak da se može konstatovati da su emisije NO_x pri kosagorijevanju uglja i drvne biomase na nivou emisija pri sagorijevanju uglja - naravno, međusobno se porede režimi sa istom temperaturom sagorijevanja, istim koeficijentom viška vazduha i istim načinom privoda tog vazduha u ložište, Slika 8, [15].



Slika 8. Emisija NO_x u zavisnosti od temperature sagorijevanja, koeficijenta viška vazduha i mjesta uvođenja tog vazduha u reakcionu zonu/ložište

Za ovu mješavinu uglja i biomase (U93B7) zavisnost emisije NO_x od mjesta uvođenja OFA vazduha u ložište odnosno reaktor prikazana je na sljedećoj slici 9. Konkretno, ovdje se radi o rezultatima sagorijevanja na temperaturi 1400 °C i sa različitim mjestom uvođenja OFA vazduha u reakcionu cijev: pozicija OFA 1 je na udaljenosti 1 m od izlaznog presjeka gorionika, dok je pozicija OFA 2 na udaljenosti 1,3 m. Dodatno, izvedeni su i režimi sagorijevanja sa uvođenjem OFA porcije vazduha na obje pozicije istovremeno: OFA 1 + OFA 2.

Rezultati pokazuju da je emisija NO_x, u ovom slučaju, najmanja pri dovodu OFA vazduha na poziciju 1 (OFA 1), dok je nešto veća za slučaj dovođenja vazduha na poziciju 2 (OFA 2). Pri istovremenom dovodu OFA vazduha na obje pozicije (OFA 1 + OFA 2) može se konstatovati da je emisija NO_x praktično istog nivoa kao u slučaju korištenja pozicije 2 za privod OFA vazduha, U svakom slučaju, ta emisija NO_x, bez obzira na koju se od pozicija privodi OFA vazduh, značajno je niža od emisije bez stepenovanog privoda vazduha, [15].



Slika 9. Emisija NO_x u funkciji od mjesta uvođenja OFA vazduha u reakcionu zonu/ložište

U pogledu mogućnosti smanjenja emisije NO_x, prethodni rezultati istraživanja i saznanja su od ključnog značaja za projektovanje budućih ali i eventualnu rekonstrukciju postojećih kotlova, naročito ložišta u pogledu izbora mjesta/zone za privod stepenovanog vazduha u zonu sagorijevanja. To svakako ima uticaj i na projektovanje te izbor prateće opreme kotla.

IV ZAKLJUČAK

Na osnovu rezultata laboratorijskih istraživanja mogu se donijeti sljedeći zaključci u vezi zavisnosti emisije NO_x i SO_2 od mjesta uvođenja vazduha u reakcionu zonu/ložište :

- Emisija NO_x raste sa porastom temperature sagorijevanja i koeficijenta viška vazduha. Niže emisije NO_x su kod stepenovanog privoda vazduha (sagorijevanje sa OFA) u odnosu na klasični privod vazduha pri kojem se ukupna količina vazduha dovodi na gorionik (konvencionalno sagorijevanje).
- Za sva ispitna goriva, temperaturu sagorijevanja i način dovoda vazduha za sagorijevanje, emisija NO_x je uvijek veća od 400 mg/m_n^3 i još uvijek je veća od graničnih vrijednosti emisije (GVE) definiranih u LCP i IED direktivama EU: $e_{NOx} \leq 200$ mg/m_n^3.
- Imajući u vidu prezentirane rezultate istraživanja u laboratorijskim uslovima, uključujući i prethodne zaključke, zaključuje se da je emisija NO_x za tretiranu projektnu mješavinu uglja K70B20Z10, značajno niža u odnosu na emisiju iz realnog pogona sa primijenjenom tehnologijom sagorijevanja sprašenog uglja u letu sa tečnim odvodom šljake iz ložišta. Pri procesnoj temperaturi 950 °C i primjeni stepenovanja vazduha za sagorijevanje (λ_1/λ=0,95/1,15) emisija NO_x je najniža i u prosjeku iznosi oko 500 mg/m_n^3. Primjenom OFA vazduha emisija NO_x je niža za oko 120 mg/m_n^3 u odnosu na emisiju pri konvencionalnom sagorijevanju sa ukupnim koeficijentom viška vazduha 1,15. Prosječna emisija NO_x pri procesnim temperaturama 1150 i 1250 °C je: 565 i 660 mg/m_n^3 - respektivno, dok je na temperaturi sagorijevanja 1350 °C oko 750 mg/m_n^3 - pri tome je također pokazano da su najniže emisije NO_x u uslovima stepenovanog privoda vazduha (λ_1/λ=0,95/1,15) a najveće pri klasičnom privodu i koeficijentu viška vazduha od 1,20: 921 mg/m_n^3 - emisija NO_x niža za 18,5%.
- U odnosu na sastav goriva, temperatura sagorijevanja se pokazuje kao znatno uticajniji parametar na emisiju NO_x. U temperaturnom intervalu od Δt=400 °C zabilježen je prosječan porast emisije Δe_{NOx} od skoro 300 mg/m_n^3.
- Emisija NO_x pri kosagorijevanju uglja i otpadne drvne biomase je na nivou emisije pri sagorijevanju mješavine ugljeva. Praktično nema promjene te emisije sa promjenom udjela drvne biomase u mješavini. Prosječna razlika emisije NO_x u zavisnosti od načina dobave vazduha za sagorijevanje je 250 mg/m_n^3: pri klasičnom privodu vazduha prosječna emisija je 942 mg/m_n^3 dok je pri stepenovanom privodu vazduha 692 mg/m_n^3.
- Emisija NO_x zavisi i od mjesta uvođenja OFA vazduha u ložište. Tako je emisija NO_x najmanja pri dovodu OFA vazduha na poziciju 1 (1 m od izlazne ravni gorionika ili na cca 1/3 dužine reakcione cijevi/ložišta), dok je nešto veća za slučaj dovođenja na poziciju 2 (1,3 m od izlazne ravni gorionika ili na >1/3 ukupne dužine reakcione cijevi/ložišta). Pri istovremenom dovodu OFA vazduha na obje pozicije (1 i 2) emisija NO_x je praktično na istom nivou kao u slučaju dobave na poziciju 2.
- Emisija SO_2 praktično ne zavisi od količine vazduha za sagorijevanje niti od načina dobave tog vazduha u reakcionu zonu/ložište nego isključivo od sastava goriva (sadržaja ukupnog i sagorivog sumpora u gorivu) i temperature sagorijevanja.
- Pokazano je da je u pogledu emisije CO odnosno efikasnosti procesa sagorijevanja, i stepenovanim privodom vazduha za sagorijevanje osigurati visoku efikasnost tog procesa odnosno imati dosta niske emisije CO.

V ZAHVALA

Dio rezultata prezentiranih u ovom radu proisteklo je i tokom realizacije projekta "Razvoj gorionika za pulzirajuće sagorijevanje hlađenog vodom sa prijedlogom primjene" kojeg su kroz program "Sufinansiranje naučnoistraživačkih projekata od posebnog interesa za Kanton Sarajevo u 2018. godini" finansirali Ministarstvo za obrazovanje, nauku i mlade kantona Sarajevo i Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, te im se i ovom prilikom iskreno zahvaljujem.

VI REFERENCES

[1] Studija energetskog sektora u BiH, Konačni izvještaj, Modul 8 - Rudnici uglja, Konzorcij: Energetski institut

Hrvoje Požar, Hrvatska; Soluziona, Španjolska; Ekonomski institut Banjaluka, BiH; Rudarski institut Tuzla, BiH, 2009.
[2] Uticaj kvaliteta uglja na troškove proizvodnje električne energije i cijenu uglja; Studija; Naručilac: JP Elektroprivreda BiH d.d. Sarajevo, Izvršilac: Mašinski fakultet Sarajevo i Rudarski institut d.d. Tuzla, Sarajevo, 2014.
[3] Smajević I., Hodžić N.: Betriebserfahrungen im Kraftwerk Kakanj bei der Verbrennung der starkverschmutzungsneigenden mitelbosnischen Braun-kohle, Dresden, 25.-26. Oktobar 2000., 151-160,
[4] Advanced Decentralised Energy Generation Systems in Western Balkans - ADEG, Projekt FP6, National Technical University of Athens, Institut IVD Stuttgart, Fakultet Strojarstva i Brodogradnje Zagreb, Mašinski fakultet Sarajevo, Institut Vinča Beograd, IST Portugal, 2004.-2007.
[5] Tsumura T., Okazaki H., Dernjatin P., Savolainen K., Reducing the minimum load and NO_x emissions for lignite-fired boiler by applying a stable-flame concept, Applied Energy, Volume 74, Issues 3-4, March-April 2003, p. 415-424.
[6] Wang J., Fan W., Li Y., Xiao M., Wang K., Ren P., The effect of air staged combustion on NO_x emissions in dried lignite combustion, Energy, Volume 37, Issue 1, January 2012, p. 725–736.
[7] Kuang M., Li Z., Liu C., Zhu Q., Experimental study on combustion and NO_x emissions for a down-fired supercritical boiler with multiple-injection multiple-staging technology without overfire air, Applied Energy, Volume 106, June 2013, p. 254–261.
[8] Kuang M., Li Z., Ling Z., Zeng X., Evaluation of staged air and overfire air in regulating air-staging conditions within a large-scale down-fired furnace, Applied Thermal Engineering Volume 67, Issues 1–2, June 2014, p. 97–105.
[9] Rozendaal M. Impact of coal quality on NO_x emissions from power plants. Delft: Delft University of Technology, 1999.
[10] Kazagić A. Smajević I.: Experimental investigation of ash behavior and emissions during combustion of Bosnian coal and biomass, Energy, Volume 32, Issue 10 (October 2007), p. 2006-2016.
[11] Kazagić A., Smajević I., Synergy Effects of Co-firing of Wooden Biomass with Bosnian Coal, Energy, Volume 34, Issue 5 (May 2009), p. 699-707**.**
[12] Kazagić A., Smajević I., Duić N., Selection of sustainable technologies for combustion of Bosnian coals, Thermal Science, Volume 14, No. 3 (2010), p. 715-727.
[13] Smajević I., Kazagić A., Musić M., Bečić K., Hasanbegović I., Sokolović Š., Delihasanović N., Skopljak A., Hodžić N., Co-firing Bosnian Coals with woody biomass: experimental studies on a laboratory-scale furnace and 110 MWe power unit, Thermal Science, 16 (2012), 3, p. 789 - 804.
[14] Nareddy S., Moyeda D., Zhou W., Marquez A., Swanson L., Duval S., NO_x reductions Achieved Through Air Staging in Cyclone Fired Boilers, 32. International Clearwater Coal Conference, Clearwater, Florida, USA, June 1-5 2008.
[15] Hodžić, N. Istraživanje kosagorijevanja uglja i biomase usmjereno na smanjenje emisija primarnim mjerama u ložištu, Doktorska disertacija, Mašinski fakultet Univerziteta u Satajevu, Sarajevo, 2016.
[16] Smajevic, I., Hodzic, N., Kazagic, A.: Lab-Scale Investigation Of Middle-Bosnia Coals To Achieve High-Efficient And Clean Combustion Technology, Thermal Science: Year 2014, Vol. 18, No. 3, pp. 875-888, Original scientific paper, DOI: 10.2289/TSCI
[17] Hodžić, N., Kazagić, A., Smajević, I.: Laboratorijska istraživanja sagorijevanja u letu ugljeva srednjebosanskog bazena u suhom režimu odvođenja šljake; Indeksirani časopis: Bosanskohercegovačka elektrotehnika, Godište 8, Januar 2015.
[18] Hodžić, N., Smajević, I., Kazagić, A.: Effects of cofiring Bosnian coal with woody biomass and natural gas on NOx emissions under different process conditions, 10th European Conference On Industrial Furnaces And Boilers (INFUB-10) Gaia (Porto), Portugal, 07th to 10th April 2015

AUTORI

Prvi autor: Nihad Hodžić, Vanredni profesor, Dr. sc., Mašinski fakultet Univerziteta u Sarajevu, Vilsonovo šetalište 9, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina, hodzic@mef.unsa.ba

Drugi autor: Anes Kazagić, Dr. sc., JP Elektroprivreda BiH d.d. - Sarajevo, Vilsonovo šetalište 15, 71000 Sarajevo, Bosna i Hercegovina, a.kazagic@epbih.ba

Treći autor: Kenan Kadić, JP Elektroprivreda BiH d.d. - Sarajevo, Podružnica TE Kakanj, 72240 Kakanj, Bosna i Hercegovina, ke.kadic@epbih.ba

Autor za korespodenciju: Nihad Hodžić, hodzic@mef.unsa.ba, +387 (0)33 729 800.

Otkrivanje i analiza signala parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru *UHF* metodom

Detection and analysis of a partial discharge signal in the power transformer using *UHF* method

mr Đorđe Dukanac, dipl.inž.el.

Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ Beograd, Srbija
djordje.dukanac@ems.rs

Sažetak- U ovom radu predstavljeno je praktično otkrivanje signala parcijalnih pražnjenja pomoću *UHF* davača montiranog na energetskom transformatoru i izvršena je detaljna analiza signala. U prvom delu rada, opisani su mogući izvori parcijalnih pražnjenja u energetskim transformatorima, *UHF* metoda i *UHF* davač. U drugom delu rada, razmatran je primljeni signal na *UHF* davaču. Da bi se tačno odredila jačina parcijalnih pražnjenja, posebno ako je položaj izvora parcijalnih pražnjenja daleko od mesta *UHF* davača, potrebno je da se razdvoji signal od okolnog šuma. To je jedino moguće u razmacima između pojedinih izbijanja posmatranih parcijalnih pražnjenja. Razmatran je spektralni sastav primljenog signala i utvrđena metoda za odvajanje prisutnog šuma od komponenata korisnog signala parcijalnog pražnjenja. Procenjen je mogući glavni uzrok parcijalnih pražnjenja.
Ključne reči- energetski transformator, parcijalna pražnjenja, spektralni sastav, otkrivanje signala, *UHF* davač.

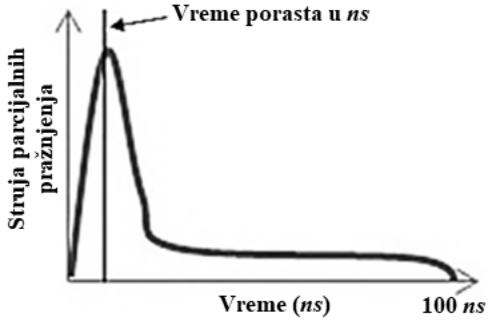
Abstract- This paper presents the practical detection of partial discharge signals using a *UHF* sensor mounted on a power transformer and then the detailed analysis of a signal is done. The first part of the paper describes possible partial discharge sources in power transformers, *UHF* method and *UHF* sensor. In the second part of the paper, received signal at *UHF* sensor is considered. In order to accurately determine the magnitude of the partial discharge signal, especially if the location of the partial discharge source is far from the location of the *UHF* sensor, it is necessary to separate the signal from the background noise. This is only possible at intervals between individual bursts of the observed partial discharges. The spectral composition of the received signal is considered and a method for separating the present noise from the useful components of the partial discharge signal is established. The presumable main cause of partial discharges is evaluated.
Key words- power transformer, partial discharge, signal detection, spectral content, *UHF* sensor.

I. UVOD

Parcijalna pražnjenja su posledica sakupljanja lokalnog električnog naelektrisanja (naprezanja, opterećenja) na površini izolacije ili u samoj izolaciji. To je u stvari iskrenje u okviru oštećenja u izolaciji npr. u šupljini, koja može da bude ispunjena vazduhom ili gasovima.

Parcijalna pražnjenja nastaju u početnoj fazi oštećenja visokonaponske izolacije i smatraju se najboljim početnim pokazateljem propadanja elektroizolacije. Uopšte, takva pražnjenja se pojavljuju kao impulsi koji imaju trajanje mnogo manje od $1\mu s$.

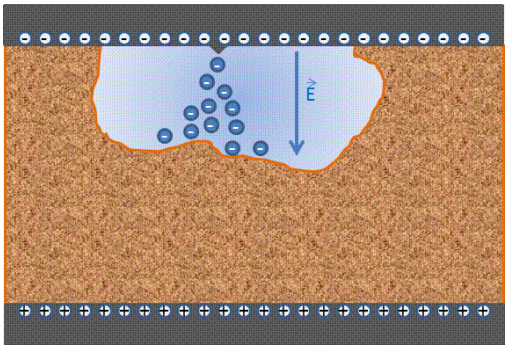
Kada započnu parcijalna pražnjenja, pojaviće se visokofrekventni prelazni strujni impulsi (slika 1) i trajaće od par nanosekundi do mirosekunde, a onda će da nestanu i ponovo će da se pojave uzastopno kada naponski sinusni talas prolazi kroz nulu. Pošto se elektroni kreću brzinom bliskoj brzini svetlosti, tj. izuzetno brzo duž malog rastojanja, impuls ima veoma kratko trajanje, obično nekoliko mikrosekundi. Elektroni nose naelektrisanje, tako da svako pojedinačno pražnjenje stvara strujni impuls ($i = \frac{dq}{dt}$).



Slika 1 – Jedan teorijski predviđen strujni impuls parcijalnih pražnjenja, koji ima vreme porasta i širinu impulsa u nanosekundnom opsegu praćen sa dugotrajnim impulsom male amplitude.

Kada se pojavi impuls parcijalnih pražnjenja, postoji veoma brz protok elektrona sa jedne strane gasom napunjene šupljine ka

drugoj strani (slika 2). Parcijalna pražnjenja se dešavaju blizu vršnog napona i pozitivnog i negativnog.
Kako se proboj izolacije pogoršava, interval između kraja izbijanja i početka sledećeg izbijanja će da se skrati, usled događanja proboja pri nižim naponima. Struja parcijalnih pražnjenja je određena pomoću amplitude i, što je važnije, pomoću vremena porasta strujnih impulsa.



Slika 2 – Proces pražnjenja u pripojenoj šupljini.

Parcijalno pražnjenje predstavlja samo delimičan proboj izolacije. U parcijalna pražnjenja ne spada npr. električni luk koji u potpunosti premošćuje izolaciju između provodnika.

Parcijalna pražnjenja (izbijanja) se javljaju u:
1. izolatorima od čvrstog materijala,
2. tečnostima (npr. transformatorsko ulje) i
3. gasovima (npr. vazduh, gas SF_6).

S obzirom na pouzdanost električne mreže, energetski transformatori mogu da se smatraju glavnim delom postrojenja za proizvodnju električne energije, prenosnih sistema i velikih industrijskih postrojenja. Pouzdan rad energetskih transformatora je važan za sigurnost napajanja i u velikoj meri zavisi od stanja električne izolacije.

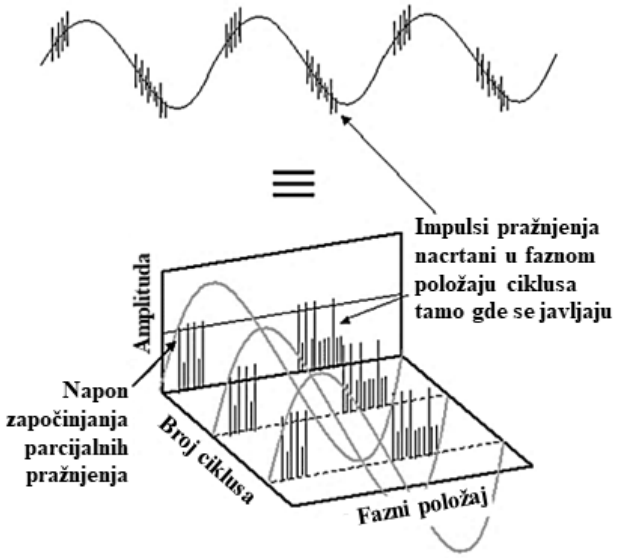
Pouzdanost električne izolacije energetskog transformatora zavisi od uslova starenja izazvanih radnim električnim naprezanjem, toplotnim naprezanjem usled preopterećenja, mehaničkim naprezanjem usled elektro-magnetskih vibracija namotaja i jezgra transformatora, kao i od svih zagađivača (provodnih ili neprovodnih) prisutnih u tečnoj izolaciji, što može da prouzrokuje električno prenaprezanje izolacionog sredstva putem započinjanja lokalnih parcijalnih pražnjenja.

II OTKRIVANJE PARCIJALNIH PRAŽNJENJA

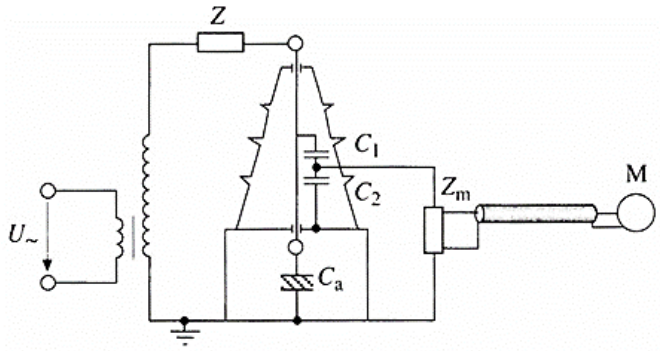
Otkrivanje parcijalnih pražnjenja je veoma rasprostranjena tehnika procene stanja električne izolacije energetskog transformatora. Čak i pri nazivnim naponima, ove mikroskopske jonizacije dovode do malih strujnih impulsa koji mogu da se otkriju u energetskom transformatoru. Stoga su parcijalna pražnjenja takođe nagoveštaj starenja energetskog transformatora. Pored toga, energija koju oslobađaju parcijalna pražnjenja može da izazove dalje pogoršanje stanja električne izolacije.

Ako oštećenja električne izolacije ne budu otkrivena i popravljena, početni kvarovi mogu da prouzrokuju da energetski transformator radi izvan svojih nazivnih parametara, što na kraju dovodi do katastrofalnog kvara [1-3] koji neće da uzrokuje samo oštećenje okolne opreme i postrojenja, nego će takođe da ima za posledice: propisane kazne, gubitak prihoda i nezadovoljstvo kupaca.

Samo je električna metoda na nižim učestanostima neposredna metoda merenja parcijalnih pražnjenja, što znači da se pomoću nje dobijaju tačni podaci o ispitnim pojavama, tj. vrednost prividnog naelektrisanja. Za ovo klasično otkrivanje parcijalnih pražnjenja pomoću dijagrama fazne raspodele amplituda parcijalnih pražnjenja (slika 3) zahtevaju se električne veze za ispitnu opremu (slika 4) i ono je osetljivo na mnoge izvore šuma [4]. Za prevazilaženje ovih problema predlaže se ispitivanje tehnikom ultra visoke učestanosti.



Slika 3 – Dijagram fazne raspodele amplituda parcijalnih pražnjenja.



Slika 4 – Merenje na izvodu izvodnog izolatora: $U_{\sim}$ – izvor naizmeničnog napona, Z – zaprečna impedansa po izboru, C_k – sprežni kondenzator, Z_m – merna impedansa, M – merni instrument i C_a – uopšteni objekat ispitivanja.

Mogućnosti umreženog nadgledanja parcijalnih pražnjenja u pogonu, ispitivanja signala parcijalnih pražnjenja na mestu

ugradnje i određivanja mesta izvora parcijalnih pražnjenja [5, 6] u izolaciji energetskog transformatora najvažnije su prednosti nekonvencionalne *UHF* metode u poređenju s konvencionalnim električnim metodama zasnovanim na standardu *IEC* 60270.

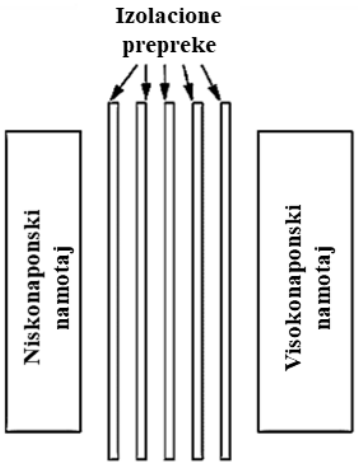
Veoma važna osobina analize parcijalnih pražnjenja je prepoznavanje izvora parcijalnih pražnjenja. Opšte je prihvaćeno da se značajna pomoć u utvrđivanju kvara posredstvom parcijalnih pražnjenja može da dobije odgovarajućim prepoznavanjem izvora parcijalnih pražnjenja [7,8].

III. MOGUĆI UZROCI PARCIJALNIH PRAŽNJENJA

U moguće nedostatke koji bi mogli da prouzrokuju štetna parcijalna pražnjenja u energetskom transformatorima spadaju:

1) *Korona u ulju (zbog metalne oštre ivice (šiljka)).* Nedostatak može da bude oštra neravnina (šiljak) na metalnom delu ili namotaju transformatora koji je načinjen tokom proizvodnje ili održavanja. On će lokalno da prouzrokuje veću jačinu električnog polja i da dovede do parcijalnih pražnjenja [9].

2) *Površinsko pražnjenje u ulju.* Prešpan se često koristi u energetskim transformatorima kao izolacija. Između namotaja visokog napona i niskog napona postoji procep koji je dalje podeljen na više uljnih kanala pomoću čvrstih izolacionih prepreka-barijera (slika 5). Ovo kombinovanje ulja i prešpana daje veću dielektričnu čvrstoću nego njihova pojedinačna primena. Međutim, usled složenosti konstrukcije transformatora postoje mesta gde je komponenta električnog polja paralelna sa površinom izolacije. Ovo značajno umanjuje dielektričnu čvrstoću i mogu da se jave površinska pražnjenja.



Slika 5 – Kanal između namotaja različitih naznačenih napona izdeljen pomoću izolacionih prepreka.

3) *Metalni deo na slobodnom „plivajućem“ potencijalu*. Parcijalna pražnjenja usled ovog nedostatka se javljaju u zazoru između dva provodna dela sa razlikom u potencijalima, kao rezultat kapacitivne sprege.

4) *Šupljine, stvaranje pukotina u čvrstoj izolaciji (papiru ili prešpanu), ili raslojavanje međupovršina čvrste izolacije*. Šupljine unutar čvrste izolacije (između slojeva papira ili prešpana) mogu da se pojave usled loše proizvodnje ili usled starenja izolacionog materijala. Obično je električno polje unutar šupljine jače nego električno polje u okolnom izolacionom materijalu. Dejstvo parcijalnih pražnjenja u šupljini tokom vremena postepeno pogoršava stanje izolacije.

5) *Slobodni mehurići u ulju*. Mineralna ulja imaju važnu ulogu kao rashladna i izolaciona sredstva u visokonaponskim transformatorima. Kada temperatura unutar izvodnog izolatora poraste usled opterećenja, azot iz prostora za širenje ulja se rastvara u ulju. Ako se opterećenje ukloni i izvodni izolator se brzo ohladi, ulje postaje prezasićeno sa azotom i u ulju mogu da se razviju mehurići. Prisustvo ovih mehurića u ulju ima uticaja na smanjenje dielektrične čvrstoće ulja.

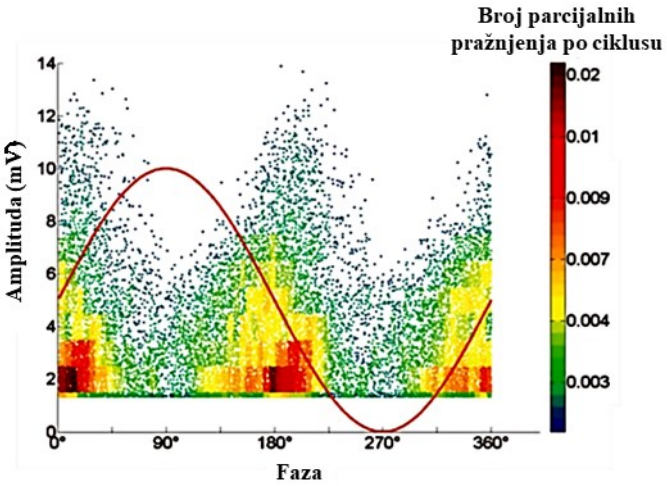
6) *Male slobodne metalne i nemetalne čestice u ulju*. Neprovodne čestice su obično mikrovlakna i prah nastao od površina izolacije od prešpana ili papira. One slabe dielektričnu čvrstoću ulja usled njihove veće relativne dielektrične propustljivosti u odnosu na ulje i higroskopne prirode. S druge strane, provodne čestice kao što su npr. od čelika, alumunijuma, bakra i druge mogu da budu najštetnije čestice u uljnoj izolaciji transformatora. Ove provodne čestice mogu da budu uvedene u transformatorsko ulje tokom proizvodnje ili održavanja ili zbog habanja metalnih delova unutar sistema za hlađenje ulja tokom rada transformatora [10,11].

IV. *UHF* METODA

Tehnološki napreci i istraživanja doveli su do metode za ispitivanje parcijalnih pražnjenja pomoću elektro-magnetskih *UHF* davača [12]. Glavne osobine nekonvencionalne *UHF* metode su procena i analiza pojava parcijalnih pražnjenja u izolacionom sistemu energetskog transformatora na mestu ugradnje pod naznačenim uslovima rada u pogonu.

Sa ovom metodom se dobija odziv na pojedinačne impulse parcijalnih pražnjenja i sa njom je moguće da se koriste ustanovljene metode analize parcijalnih pražnjenja, kao što su one zasnovane na dijagramima fazne raspodele amplituda parcijalnih pražnjenja (slika 6).

UHF metoda ispitivanja u suštini ima odziv na pokretačku silu (dinamiku) naelektrisanja strujnih impulsa parcijalnih pražnjenja. *UHF* davač ima odziv na elektro-magnetske talase odaslate od strane parcijalnih pražnjenja, kao rezultat naglog ubrzavanja ili usporavanja naelektrisanja pod uticajem električnog polja na mestu parcijalnih pražnjenja. Prema tome, signali primljeni pomoću *UHF* davača su obično srazmerni vremenskom izvodu struje parcijalnih pražnjenja, koji je određen pomoću količine naelektrisanja u pojedinačnim impulsima i što je važnije pomoću vremena porasta strujnih impulsa.



Slika 6 - Primer dijagrama fazne raspodele amplituda parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru naznačene snage 120 *MVA* i prenosnog odnosa 110/10 *kV*.

U praktičnim primenama se uglavnom koriste dve tehnologije davača *UHF* signala za otkrivanje parcijalnih pražnjenja u unutrašnjosti energetskih transformatora.

Najčešće su u upotrebi:

1) *Ventilski UHF davač* [13], tzv. transformatorska *UHF* sonda, za ugradnju kroz uljni propusni ventil, čak i kada je transformator u radu u pogonu (slika 7). Usled ograničenja koje se nameće pomoću uljnog propusnog ventila za prečnik sonde, ovaj uređaj je prosta jednopolna antena.

2) *Unutrašnji UHF davač,* tzv. prozorski *UHF* davač, koji naknadno može da se ugradi u unapred obezbeđenom prozoru od dielektrika na zidu transformatorskog suda i koji sadrži antenu konstruisanu u obliku Arhimedove spiralne antene ili Hilbertove fraktalne antene.

Najčešći oblik je četvrt-talasna jednopolna antena, za koju je dužina antene četvrtina talasne dužine *UHF* talasa ($L = 0{,}25 \cdot \lambda$). Na taj način, ako su rezonantne učestanosti jednopolne antene $500\ MHz$ и $1\ GHz$, onda bi njene dužine radi korišćenja u ulju trebale da budu $100\ mm$ и $50\ mm$, respektivno.

Slika 7 – Ventilski *UHF* davač signala parcijalnih pražnjenja u ulju korišćen u nadalje opisanom ogledu.

V. OGLED OTKRIVANJA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA

S obzirom na moguća ograničenja konvencionalne metode ispitivanja na mestu ugradnje prema standardu $IEC\ 60270$, koja je osetljiva na spoljni šum, metoda ispitivanja pri ultra visokim učestanostima je povoljna za nadziranje i ispitivanje signala parcijalnih pražnjenja na mestu ugradnje usled njene velike otpornosti na spoljne elektromagnetske smetnje, zbog viših opsega učestanosti na kojima se javljaju *VHF* i *UHF* signali u odnosu na smetnje.

Cilj izvršenog ogleda bio je otkrivanje signala parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru (slika 8) pomoću ugrađene *UHF* antene u obliku sonde u uljno-propusnom ventilu, snimanje signala u zavisnosti od vremena i analiza tako dobijenog signala parcijalnih pražnjenja.

Slika 8 – Blok transformator naznačene snage 725 *MVA*.

Mernu opremu (slika 9) su sačinjavali *UHF* davač za otkrivanje parcijalnih pražnjenja u obliku sonde i digitalni osciloskop za naznačeni analogni propusni opseg 1 *GHz*, brzinu porasta impulsa 350 *ps*, brzinu uzimanja uzoraka 10 *GS/s* i vremensku rezoluciju 100 *ps*. Za vezu između *UHF* antene i digitalnog osciloskopa korišćen je koaksijalni kabl (dužine 30 *cm*).

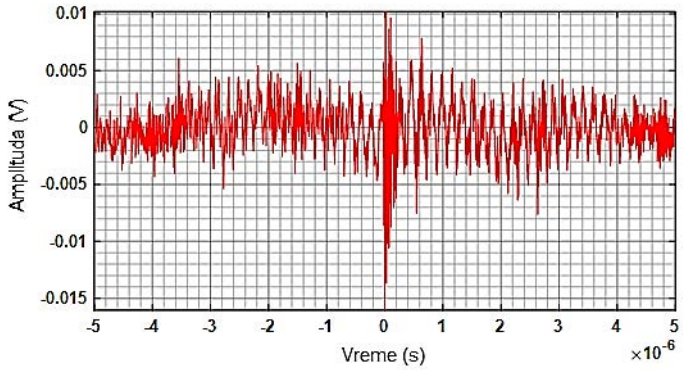
Slika 9 – Merna oprema korišćena prilikom izvođenja ogleda otkrivanja parcijalnih pražnjenja.

Prilikom ispitivanja parcijalnih pražnjenja, impedanse *UHF* antene i koaksijalnog kabla od po $50\ \Omega$ bile su usklađene sa impedansom digitalnog osciloskopa od $50\ \Omega$. Usaglašavanjem impedansi ispitne opreme sa karakterističnom impedansom kabla

smanjuju se odbijanja signala (tj. ona se potpuno uklanjaju ako je usaglašenost savršena) i prenos snage signala je najveći mogući.

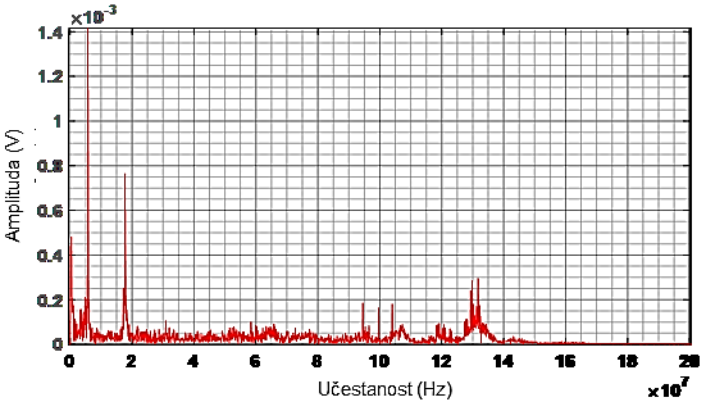
VI. ANALIZA PARCIJALNIH PRAŽNJENJA

Na slici 10 prikazan je snimljeni signal parcijalnih pražnjenja u prisustvu smetnji, u trajanju od $10\,\mu s$, iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta, u kome su parcijalna pražnjenja najveće amplitude sa početkom u blizini $x = 0$ i u kome su pri tome trenuci pojavljivanja amplituda signala ostali nepromenjeni.



Slika 10 – Signal parcijalni pražnjenja iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta.

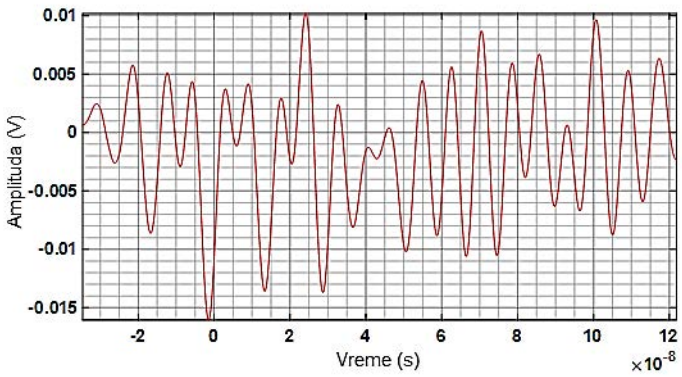
Na slici 11 prikazan je amplitudni spektar primljenog signala sa slike 10 iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta.



Slika 11 – Amplitudni spektar signala parcijalnih pražnjenja sa prethodne slike 10.

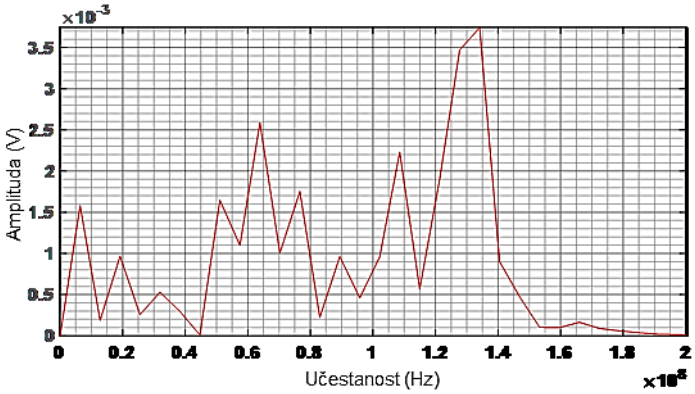
Sa slike 11 vidi se da znatno preovladava komponenta signala na učestanosti 5,7 *MHz*. Zatim prema veličini amplitude slede komponente na učestanostima 17,7 *MHz*, 400 *kHz*, 100 *kHz*, 17,2 *MHz* i 17,4 *MHz*, respektivno. U delu signala u trajanju od $10\,\mu s$, 67,2 % srednje snage nalazi se u opsegu $(0 - 20)$ *MHz*, dok se preostalih 32,8 % nalazi u opsegu $(20 - 200)$ *MHz*.

Na slici 12 prikazan je deo primljenog signala sa slike 10, u trajanju od 156,5 *ns*, iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta i u kome se javljaju najjača parcijalna pražnjenja, a na slici 13 odgovarajući amplitudni spektar. U delu signala 83,3 % srednje snage nalazi se u opsegu $(20 - 200)$ *MHz*, dok se preostalih 16,7 % nalazi u opsegu $(0 - 20)$ *MHz*.



Slika 12 – Srednji deo primljenog signala sa slike 10 iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta, a u kome se javljaju najjača parcijalna pražnjenja u trajanju od 156,5 *ns*.

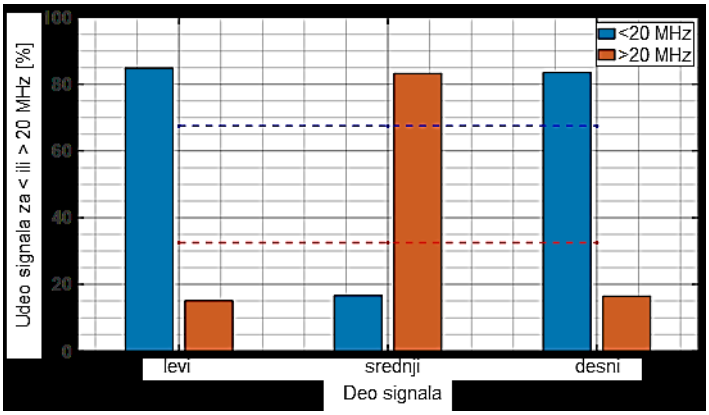
Sa slike 13 vidi se da preovladava komponenta signala na učestanosti 134,1 *MHz*. Zatim prema veličini amplitude slede komponente na učestanostima 63,86 *MHz*, 108,6 *MHz*, 76,63 *MHz*, 51,09 *MHz*, 6,386 *MHz*, 19,16 *MHz* i 89,*4 MHz*, respektivno.



Slika 13 – Amplitudni spektar dela primljenog signala u kome se javljaju najjača parcijalna pražnjenja.

U odnosu na amplitudni spektar potpunog signala sa slike 10, vidi se više nego desetostruki porast komponenti signala na učestanostima u blizini 134,1 MHz, 108,6 *MHz*, 76,63 *MHz*, 63,86 MHz, 51,09 *MHz*, itd. Vidi se i četiri i po puta veća komponenta na učestanosti u blizini 31,92 *MHz*, što znači da ima veze sa spektrom u kome se javljaju najjača parcijalna pražnjenja. Komponente signala na učestanostima 100 *kHz* и 400 *kHz* su zanemarljive.

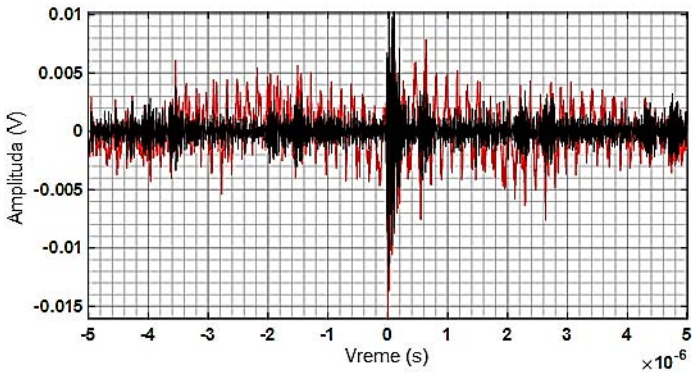
Na slici 14 dati su procentualni udeli srednje snage u ukupnoj srednjoj snazi, u opsezima: 1) ispod 20 *MHz* i 2) iznad 20 *MHz*, za primljeni signal sa slike 10 u njegovom levom, srednjem i desnom delu, respektivno.



Slika 14 – Procentualni udeli srednje snage u ukupnoj srednjoj snazi primljenog signala, u opsezima: 1) ispod 20 *MHz* i 2) iznad 20 *MHz*, u periodima levo od, u okviru i desno od oblasti najjačeg parcijalnog pražnjenja. Isprekidanim linijama su date vrednosti za ukupan signal sa slike 10 u trajanju od 10 μs.

Sa slike 14 vidi se da je jedan deo smetnji sa udelom manjim od 20% ostao prisutan u delu sa najjačim parcijalnim pražnjenjima. S druge strane, u delovima primljenog signala u kome preovladavaju smetnje udeo signala na učestanostima većim od 20 *MHz* je takođe manji od 20%.

Na slici 15 prikazan je uporedo signal (crvene boje) sa slike 10 iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta i isti signal (crne boje) iz koga su uklonjene sve komponente ispod 20 *MHz*. Primećuje se značajna razlika u izgledu signala.



Slika 15 – Crvenom bojom prikazan je signal sa slike 10 iz koga je uklonjena jednosmerna komponenta, a crnom bojom isti signal sa slike 10 najveće amplitude -13,79 *mV* iz koga su uklonjene sve komponente učestanosti ispod 20 *MHz*.

VII. ZAKLJUČAK

Bilo je potrebno da se utvrdi opseg vremena u kome se javlja najjače parcijalno pražnjenje i razdvoji šum od korisnog signala radi procene stvarne jačine korisnog signala i njegovog spektralnog sastava. Pri razmatranju pojave najjačeg dejstva signala parcijalnih pražnjenja u ovom primeru, utvrđeno je da mogu da se zanemare komponente primljenog signala pomoću *UHF* davača koje su ispod 20 *MHz*, a koje se smatraju smetnjama nastalim npr. zbog pražnjenja korone izvan transformatora. Najjača parcijalna pražnjenja (koja jasno prevazilaze dejstvo smetnji) u svom spektru imaju znatno preovladavajuću komponentu na veoma visokoj učestanosti najveće amplitude 134,1 MHz.

Veoma je teško da se sa potpunom sigurnošću proceni od koje vrste oštećenja u električnoj izolaciji potiču parcijalna pražnjenja dobijena u ogledu, pošto se obično dobijaju slični oblici signala koji mogu da potiču od raznih vrsta oštećenja električne izolacije. Prema dosadašnjim istraživanjima oblika signala čiji su uzrok razna oštećenja izolacije i koja mogu da se nađu kod drugih autora, grubo posmatrajući, ovaj oblik i opseg učestanosti korisnog signala dobijenog u ogledu najverovatnije potiču od kretanja slobodne čestice u ulju. S druge strane, sa jednim davačem signala ultra visokih učestanosti ne može da se proceni položaj izvora parcijalnih pražnjenja, za šta je potrebno više davača (obično četiri).

LITERATURA

[1] M. Wang, A. J. Vandermaar and K. D. Srivastava, "Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service", IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 18, no. 6, pp. 12-25, 2002.

[2] C. J. Ribeiro, A. P. Marque, C. H. B. Azevedo, D. C. P. Souza, B. P. Alvarenga, R. G. Nogueira, "Faults and Defects in Power Transformers – A Case Study," IEEE Electr. Insul. Conf.(EIC), pp. 142-145, 2009.

[3] S. T. Jan, R. Afzal, and A. Z. Khan, "Transformer Failures, Causes & Impact," Int. Conf. Data Mining, Civil and Mechanical Engineering, 2015.

[4] V. Sokolov, V. Mayakov, G. Kuchinsky, A. Golubev, "On-Site Partial Discharge Measurements on Power Transformers," 67th Annu. Int. Conf. Doble Clients, 2000.

[5] Đ. Dukanac, „Primena UHF davača za određivanje mesta parcijalnih pražnjenja u energetskom transformatoru", Zbornik radova sa međunarodne konferencije „Energy and Ecology Industry", Beograd, str. 214-221, 10-13. oktobar 2018., ISBN: 978-86-7466-751-4 (AM).

[6] Đ. Dukanac, „Efekti poboljšane UHF metode pronalaženja mesta parcijalnih pražnjenja energetskog transformatora", Zbornik radova sa VII regionalne konferencije IEEP '19 „Industrial Energy and Environmental Protection in South Eastern European Countries", Zlatibor, str. 263-270, 19-22. jun 2019., ISBN 978-86-7877-033-3.

[7] Li, J., T. Jiang, R. F. Harrison, and S. Grzybowski, "Recognition of ultra high frequency partial discharge signals using multi-scale features," IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 19, No. 4, 1412-1420, 2012.

[8] Kunicki M., Cichoń A., Nagi Ł, "Statistics based method for partial discharge identification in oil paper insulation systems," Electric Power Systems Research, Vol. 163, Part B, pp. 559–571, 2018.

[9] R. Sarathi and G. Koperundevi, "Understanding the Discharge Activities in Transformer Oil under AC and DC Voltage Adopting UHF Technique", World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 2, No. 3, pp. 49 – 56, 2008.

[10] R. Sarathi and R. Umamaheswari, "Understanding the partial discharge activity generated due to particle movement in a composite insulation under *AC* voltages," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 48, pp. 1-9, 2013.

[11] R. Mishra, H. Muthukrishnan, A. Ramanan and R. Sarathi, "Understanding partial discharge activity in *GIS* due to particle movement under high frequency *AC* voltage adopting *UHF* technique" 6th International conference on Industrial and Information Systems, *ICIIS* 2011, pp. 93-97, Sri Lanka, Aug. 16-19, 2011.

[12] H. Y. Lee, J. R. Jung, Y. M. Kim and H. J. Yang, "A *UHF PDM* (Partial Discharge Monitoring) System for High Voltage Power Transformer," *IEEE* Int. Conf. Condition Monitoring and Diagnosis (*ICCMD*), pp. 1021-1024, 2014.

[13] R. Albarracín, J. A. Ardila-Rey and A. A. Mas'ud, "On the Use of Monopole Antennas for Determining the Effect of the Enclosure of a Power Transformer Tank in Partial Discharges Electromagnetic Propagation," Sensors (Basel), vol. 16, no. 2, 2016.

Hibridno napajanje telekomunikacione i merne opreme daljinskih mernih stanica u sistemima zaštite od poplava

Hybrid power of telecommunication and measuring equipment of remote measuring stations in flood protection systems

ŽeljkoV.Despotović, Marko Tajdić, Jovan Kon

Institut "Mihajlo Pupin", Univerzitet u Beogradu

Sažetak- U radu će biti prikazana realizacija hibridnog sistema za napajanje telekomunikacione i merne opreme daljinskih mernih stanica, koje su integralni deo sistema za zaštitu od poplava. Napajanje je bazirano na korišćenju solarne energije u kombinaciji sa mrežnim napajanjem. Solarno napajanje je primarni izvor napajanja tokom dana, dok se u noćnim uslovima kao napajanje koristi distributivna mreža koja napaja uličnu rasvetu. Sistem napajanja je realizovan sa dva kontrolisana MPPT punjača (mrežni i solarni), baterijskom bankom 12V/110Ah i pripadajućim sistemom za njen monitoring. U radu će biti prikazani ključni eksperimentalni rezultati dobijeni tokom puštanja konkretno realizovane merne stanice nivoa i pripadajuće komunikacione opreme, na reci Ub, opština Ub.

Ključne reči- solarno napajanje, mrežno napajanje, merna stanica, radio prenos, zaštita od poplava

Abstract- The paper will present the implementation of a hybrid power supply for telecommunication and corresponding measuring equipment of remote measuring stations, which are an integral part of the flood protection system. Solar power is the primary energy source during the day, while in night conditions it is actually used as a distribution network (which also supplies street lighting). The power system is implemented with two controlled MPPT chargers (mains and solar), 12V / 110Ah battery bank and associated monitoring system. The paper will present key experimental results obtained during the release of a concrete realized measuring station and associated telecommunication equipment, on the Ub River, Ub Municipality.

Keywords: solar power, mains power, measuring station, radio transmission, flood protection

I. UVOD

Hibridni sistemi za napajanje električnom energijom predstavljaju elektroenergetske sisteme koji sadrži više od jednog izvora električne energije. Uopšteno govoreći, hibridni sistemi napajanja snabdevaju potrošače električnom energijom, koja se dobija iz obnovljivih izvora [1-2]. Ti sistemi se najčešće sastoje od vetrogeneratora, solarnih panela, hidro-generatora, a u nekim slučajevima kada se zahteva veća autonomija napajanja, se u prethodnoj kombinaciji koristi i dizel-električni agregat [2-4].

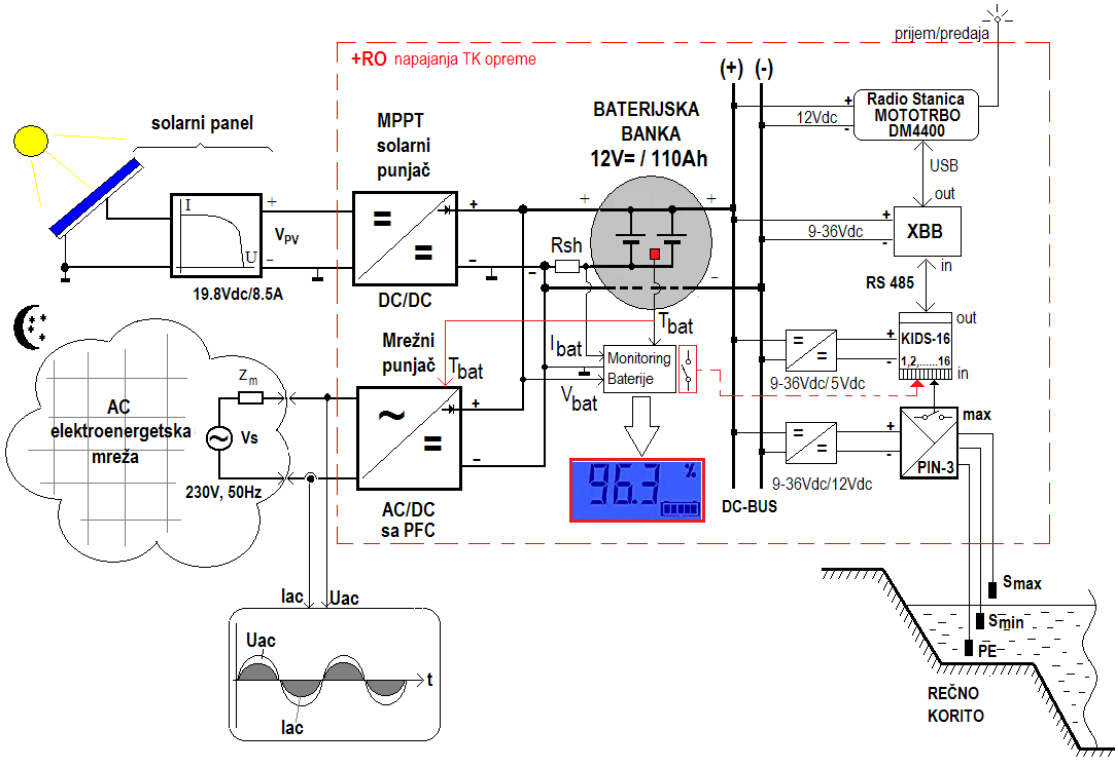
Hibridni sistemi su pogodni za napajanja teško dostupnih lokacija, gde nema mogućnosti napajanja sa elektroenergetske mreže ili je ovo mrežno napajanje intermitentnog karaktera[5-7]. Objekti za koje je hibridno napajanje često jedino rešenje su obično nepristupačni telekomunikacioni sistemi, rezervoari vode, pumpne stanice, kao i udaljeni objekti sa režimom rada bez posade, ulično osvetljenje, signalizacija na putevima, snabdevanje električnom energijom zaštićenih prirodnih oblasti, zaštitni i alarmni sistemi i sl.

Hibridni sistemi su veoma efikasni i pouzdani u slučaju čestih ispada mrežnog napajanja i narušavanja kvaliteta mrežnog napajanja (tzv. *„black-out"* intervali) [6-9]. Kapacitet hibridnih sistema se kreće u opsegu od nekoliko desetina vati do nekoliko stotina kilovata. Ovi sistemi najčešće mogu da skladište električnu energiju, koja je potrebna pri pojavi pikova potrošnje ili kada je snaga mreže mala. Skladištenje se vrši u akumulatorskim baterijama, pomoću kojih se povećava fleksibilnost i pouzdanost sistema. Veoma čest slučaj je da se napajanje jednosmernih (DC) potrošača koji se imaju na udaljenim mernim stanicama (uređaji merne elektronike, telekomunikacioni uređaji i sl.), ostvaruje posredstvom rezervnih (tzv.*"back-up"*) sistema napajanja. U ovim sistemima se pored baterijske banke, koriste dva izvora: DC izvor, tipično solarni paneli, a drugi AC izvor, odnosno napojna distributivna mreža. U ovim sistemima, napojna AC mreža može da nadopuni dovod energije koja dolazi iz solarnih panela, i obrnuto, energija iz solarnih panela može pokriti svaki kvar na mreži koji se može dogoditi.U slučaju da nisu prisutna oba izvora napajanja, ulogu preuzima baterijska banka koja u tom slučaju obezbeđuje autonomiju[10-12].U ovom radu je prikazana realizacija jednog

specifičnog hibridnog sistema, koji se koristi za DC napajanje telekomunikacione i merne opreme daljinskih mernih stanica, koje su integralni deo sistema za zaštitu od poplava. Napajanje je bazirano na korišćenju solarne energije (DC izvora) u kombinaciji sa AC mrežnim napajanjem. Solarno napajanje je primarni izvor napajanja tokom dana, dok se u noćnim uslovima kao napajanje koristi distributivna AC mreža, koja u tim uslovima istovremeno napaja uličnu rasvetu. Sistem napajanja je realizovan sa dva kontrolisana MPPT punjača: solarni DC/DC i mrežni AC/DC, baterijskom bankom 12V/110Ah i pripadajućim sistemom za njen monitoring.

II. OPIS ELEKTROENERGETSKE OPREME UDALJENE MERNE STANICE

Blok šema napajanja merne i upravljačke opreme na udaljenoj mernoj stanici sistema zaštite od poplava na reci Ub je data na Slici 1. U sistemu napajanja se koriste dva punjača baterijske banke 12V/110Ah. Jedan punjač je solarni, koji se na ulazu napaja preko solarnog panela snage 168W (maksimalnog napona 19.4V i maksimalne struje 8.5A), a drugi punjač je mrežni, koji se na ulazu napaja mrežnim naponom 230V,50Hz sa stuba ulične rasvete (jedini pristupačan AC izvor koji je bio postavljen tehničkim zahtevom od strane korisnika). Oba punjača baterije imaju implementiran algoritam praćenja tačke maksimalne snage tzv. MPPT algoritam. Dodatno, mrežni punjač u sebi ima mrežni pre-regulator sa korekcijom faktora snage (PFC), tako da se ceo punjački sklop ponaša prema mreži kao omsko opterećenje, odnosno njegov faktor snage je blizak 1 (u realnom slučaju $cos\varphi > 0.95$). Takođe, na ovaj način je nivo harmonijskih izobličenja koje ovaj punjač unosi u AC mrežu 230V, 50Hz je sveden na minimum.



Slika 1- Blok šema napajanja merne i telekomunikacione opreme na udaljenoj mernoj stanici Ub

U sistemu je projektovana baterijska banka 12Vdc/110Ah sa pripadajućim modulom za merenje napona i struje baterije, kao i za akviziciju karakterističnih stanja: stepena napunjenosti (tzv. *„state of charge"*-SOC[%]), stepena ispražnjenosti (tzv. *„state of discharge"*-SOD[%]) i temperature baterija. Baterijska banka je predviđena za duboko pražnjenje i ima mogućnost cikličnog punjenja i pražnjenja. Za dubinu pražnjenja do 50%, broj radnih ciklusa je do 1000.

Blok šema mrežnog AC punjača je data na Slici 2. Mikroprocesorska upravljačka jedinica (CPU) ostvaruje nadzor i kontrolu punjačem. Ostvarene su analogne povratne sprege po struji punjenja baterija (blok za „detekciju struje baterije") i po naponu baterije. Kao digitalni ulazi u CPU se koriste: optički izolovan signal daljinske kontrole (tzv. *„remote-control"*-RC), izbor režima rada punjača (2-stepeni i 3-stepeni profil punjenja), detekcija pogrešnog povezivanja krajeva baterije (+BAT) i (-BAT) i termička zaštita (nad temperaturna zaštita) ukoliko dođe do pregrevanja modula ulaznog PFC ispravljača.

Kao digitalni izlazi iz CPU su izvedeni statusi: priključena baterija („bat OK") i ispravan režim punjenja („punjač OK"). Ostali digitalni izlazi koji se koriste su: kontrola rada glavnog prekidača koji dovodi baterijsku banku na napon (priključci +BAT, -BAT) i uključenje ventilatora za hlađenje ukoliko temperatura

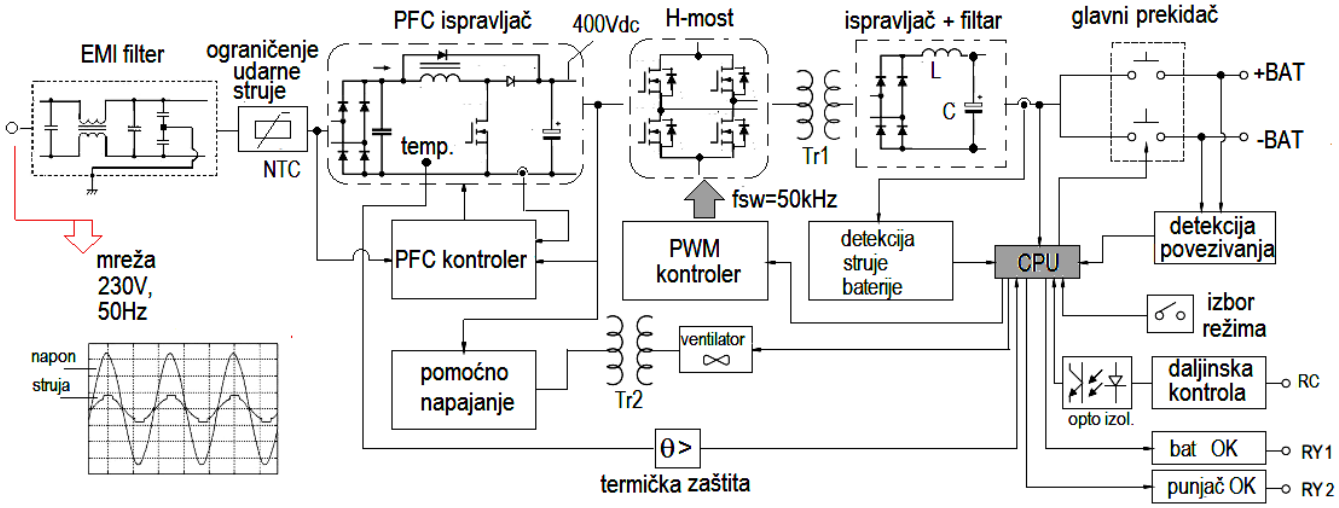
unutrašnjosti modula punjača pređe unapred zadatu vrednost praga nad temperaturne zaštite.

Pretvarački deo punjača se sastoji od (1) ulaznog mrežnog PFC ispravljača (AC/DC) koji u sebi ima implementiran algoritam korekcije ulaznog faktora snage, (2) MOSFET tranzistorskog „H-mosta“ sa kojim je kaskadno vezan izlazni ispravljač sa „LC“-filtrom“ sa koga se napaja baterija. Napajanje „H-mosta“ je 400Vdc i ovo napajanje je galvanski odvojeno od izlaznog ispravljača i „LC“-filtra“, posredstvom visokofrekventnog feritnog transformatora Tr1, koji je predviđen za prekidačku učestanost 50kHz. Iz napajanja 400Vdc se dobija pomoćno napajanje (DC/AC) koje se koristi za napajanje ventilatora kojim je obezbeđeno hlađenje sistema.

PWM kontroler kojim se postiže kontrola struje punjenja i napona baterije je pod direktnim nadzorom CPU, pri čemu CPU zadaje referentnu vrednost, odnosno vremenski profil struje punjenja (koji je principski prikazan na Slici 3). Radna učestanost pretvaračkog „H-mosta“ je f_{sw}=50kHz.

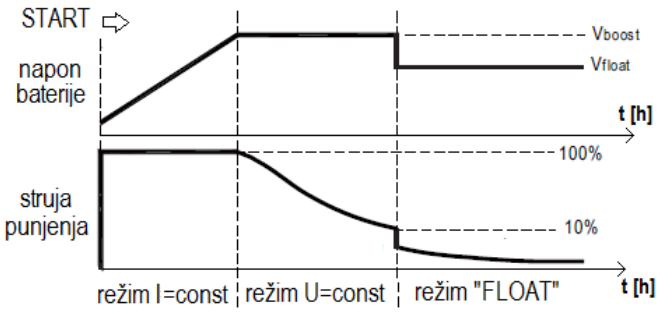
Ulazni PFC kontroler obezbeđuje da je faktor snage punjača prema napojnoj distributivnoj mreži veći od 0.95 i to u svim režimima Na osnovu merenja ulaznog napona, izlazne struje i izlaznog napona PFC ispravljača, je obezbeđena prethodno navedena funkcija. Prekidačka učestanost PFC kontrolera je 100kHz.

Za ograničenje startne ulazne struje PFC ispravljača se koristi pasivno kolo bazirano na NTC otpornosti. Ulazni EMI filtar obezbeđuje potiskivanje visokofrekventne komponente 100kHz iz spektra ulazne struje, tako da se na ulazu AC mrežnog punjača postaje dominantna 50Hz-na komponenta ulazne struje, odnosno ulazni napon i ulazna struja su praktično u fazi ($cos\varphi$ > 0.95), kao što je prikazano na blok šemi AC mrežnog punjača na Slici 2.



Slika 2- Blok šema mrežnog punjača sa implementiranim zaštitnim i alarmnim funkcijama i korekcijom ulaznog faktora snage (PFC)

Na Slici 3 je dat profil punjenja baterije iz mrežnog punjača, odnosno prikaz karakterističnih veličina koje se odnose na bateriju (napon i struja punjenja baterije).



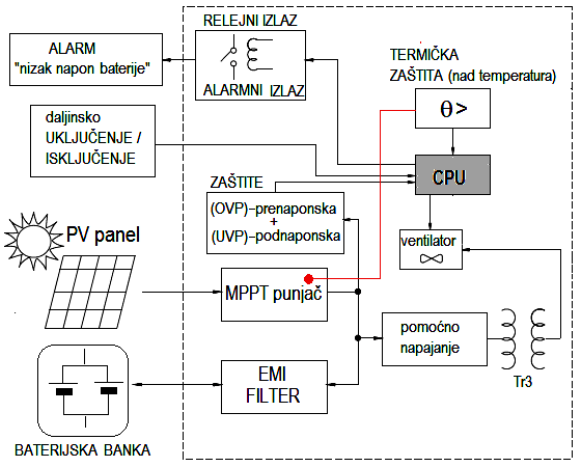
Slika 3- Karakteristični profili napona i struje punjenja baterije korišćenjem mrežnog punjača

U režimu-I, obezbeđena je konstantna struja desetčasovnog punjenja (približne vrednosti koja iznosi oko 10% od kapaciteta baterijska banke, odnosno I_{10h}[A]≈0.1·C[Ah]. U ovom režimu se ima približno linearni porast napona baterije do vrednosti V_{boost}. Po dostizanju ovog naponskog praga u režimu-U je obezbeđena naponska regulacija, odnosno održavanje napona baterije na vrednosti V_{boost}. U ovom režimu struja baterije pada do vrednosti 10% od početne struje punjenja I_{10h}[A].

Nakon dostizanja ovog praga, punjač prelazi u režim „FLOAT“, i tada je struja baterije 0.1·I_{10h}[A] (u ovom režimu se ima struja održavanja tzv. *„trickle-charge“*. Napon baterije V_{float} u ovom režimu i on je manji od maksimalne vrednosti V_{boos}..

Na Slici 4 je data blok šema MPPT solarnog punjača sa pripadajućim zaštitnim i alarmnim funkcijama.

Glavni funkcionalni blok solarnog punjača je MPPT kontroler kojim je obezbeđeno traganje tačke maksimalne snage solarnog panela (tzv. *„maximum power point tracking“-MPPT*). Ovaj sklop je ustvari *„buck-boost“* DC/DC pretvarač (*„spuštač-podizač“)* kojim se obezbeđuje stabilizacija napona, odnosno struje punjenja u širokom opsegu ulaznih napona sa PV panela.



Slika 4- Blok šema MPPT solarnog punjača sa implementiranim zaštitnim i alarmnim funkcijama

Baterijska banka se napaja preko EMI filtera. I u ovom slučaju glavna kontrolna jedinica je CPU, u okviru koje su izvedeni analogni ulaz: temperatura sklopa MPPT punjača i digitalni ulazi: prenaponska zaštita (*„overvoltage protection"*- OVP) i podnaponska zaštita (*„undervoltage protection"*- UVP), daljinska kontrola punjača (*„remote ON/OF"*). Pomoćno napajanje ju ustvari DC/AC pretvarač, kojim se preko transformatora Tr3 sa galvanskom izolacijom obezbeđuje stabilno napajanje ventilatora za hlađenje solarnog punjača. Digitalni izlazi CPU su: uključenje ventilatora i relejni alarmni izlaz „nizak napon baterije".

III. OPIS MERNE I TELEKOMUNIKACIONE OPREME

U okviru blok šeme na Slici 1 su prikazani potrošači, odnosno elektronska oprema mernog i telekomunikacionog sistema na udaljenoj mernoj stanici na reci Ub. Osnovne celine ovog sistema su: (1) provodni indikator nivoa PIN, (2) modul digitalnih ulaza KIDS, (3) modul za prikupljanje podataka XBB i (4) digitalna radio stanica. Svi pomenuti potrošači u ovom sistemu se napajaju sa DC sabirnica koje su na naponu 12V.

Tro-elektrodni provodni indikator nivoa PIN-3(proizvod Instituta „Mihajlo Pupin"-IMP) je modul koji je primenjen u konkretnom slučaju, služi za detekciju nivoa vode u rečnom koritu. Može da signalizira maksimalni i minimalni nivo. Ovaj uređaj se sastoji od tri elektrode (sonde): jedna za detekciju maksimalnog nivoa, jedna za detekciju minimalnog nivoa i jedna zajednička PE koja je na potencijalu vode i predstavlja „ masu". Izlazi ovog modula su dva preklopna relejna kontakta , jedan za MIN nivo i jedan za MAX nivo. Kada je nivo vode ispod nivoa sonde za minimalni nivo oba relejna kontakta su u stanju sa spojeni kontaktima. Porastom nivoa vode, kada se potopi sonda za minimalni nivo, aktivira se rele za signalizaciju minimalnog nivoa. Ako nivo vode nastavi da raste i kada poraste tako da potopi i sondu za maksimalni nivo, aktivira se rele za signalizaciju maksimalnog nivoa. Dodatna stabilizacija ovog elektronskog sklopa se ostvaruje DC/DC pretvaračem kod koga je opseg ulaznih napona 9V÷36Vdc, dok je izlazni napon stabilisan na vrednosti 12Vdc.

Maksimalna potrošnja ovog uređaja na 12Vdc je oko 500mA.

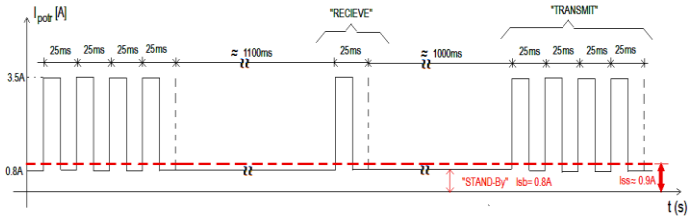
Modul digitalnih ulaza KIDS-16 (proizvod IMP-Automatika) ima mogućnost prihvata do 16 digitalnih ulaza, koje potom prosleđuje preko RS485 magistrale procesnom računaru XBB. Modul digitalnih ulaza poseduje LED indikaciju aktivnih signala i serijske komunikacije. Napajanje ovog modula se ostvaruje DC/DC pretvaračem kod koga je opseg ulaznih napona 9V÷36V, dok je izlazni napon stabilisan na vrednosti 5Vdc. Potrošnja ovog modula iz 5Vdc je oko 100mA.

Modul Atlas XBB-RTL (proizvod IMP-Automatika) predstavlja multifunkcionalni procesni računar, koncentrator podataka i konvertor protokola. Ima mogućnost obrade podataka u realnom vremenu korišćenjem PLC algoritama kreiranih po IEC 61131 3 standardu. Ovaj uređaj vrši pouzdano prikupljanje podataka od različitih uređaja korišćenjem različitih protokola. Prikupljeni i obrađeni podaci mogu biti predstavljeni lokalno (HMI) i/ili poslati do nadzornog SCADA servera. Tehničke karakteristike XBB su: procesor AM3358 1GHz ARM Cortex-A8, 4GB 8-bit eMMC, mogućnost istovremene komunikacije sa 4 SCADA centra, portovi: 2 x RS-232/485 (galvanski izolovani), 1 x RS-232 & 1x CAN (galvanski izolovani) i 1x RS232(galvanski izolovan), Ethernet 10/100Mbps i brzi USB 3.3 port. Opseg ulaznog napona napajanja ovog modula je 10V÷32V. Napajanje ovog modula se ostvaruje direktno sa DC sabirnica 12V i pri tom naponu potrošnja ovog modula iznosi oko 2.5W.

Signalizacije sa relejnih izlaza PIN-a prihvata modul digitalnih ulaza KIDS-16. Nakon prijema ovih signala, ovaj modul preko magistrale RS485 prosleđuje, prihvaćene signalizacije sa PIN-a, na XBB multifunkcionalni procesni računar, a XBB koristeći jednu od svojih mnogobrojnih funkcija (u ovom slučaju to je konvertor protokola), podatke dobijene od modula KIDS-16, šalje na digitalnu radio stanicu, Motorola – MOTOTRBO DM4400. Ova radio stanica ima za zadatak da pošalje informacije o eventualnom nedozvoljenom i neželjenom porastu vodostaja na reci Ub.

Najveći potrošač snage u ovom sistemu je upravo digitalna radio stanica. Kao što će biti pokazano u eksperimentalnom delu, potrošnja struje radio stanice u ovom sistemu, kada ona radi u predaji (tzv. TRANSMIT) je max 3.5A u trajanju od 100ms (4 impulsa trajanja 25ms, sa odnosom impuls/pauza od 50%), dok je u režimu prijema (RECIEVE) potrošnja struje max 3.5A (1 impuls trajanja 25ms). U režimu STAND-By potrošnja digitalne radio stanice je oko 0.8A.

Na Slici 5 je predstavljena struja potrošnje radio stanice. Kao što se može videti sa slike, 4 impulsa u ukupnom trajanu od 100ms, odgovaraju predaji signala sa radio stanice (signal upućen ka nadređenom centru- tzv. komandnom centru (KC). Potom sledi pauza u vremenskom trajanju od približno 1.1s, a zatim jedan impuls trajanja 25ms, koji ustvari odgovara prijem signala iz KC. U mirnom režimu rada (tzv.*"stand-by*) radio stanica ima struju potrošnje približno 0.8A.



Slika 5-Karakteristični signal struje potrošnje radio stanice MOTOTRBO DSM 4400 Motorola

Za talasni oblik struje potrošnje radio stanice, koji je dat na Slici 5, dobija se srednja vrednost struje potrošnje radio stanice u ustaljenom režimu od I_{ss}=0.9A.
U Tabeli I je dat prikaz struja i snaga potrošnje pojedinih komponenti sistema, kao i ukupna struja i snaga potrošnje.

Tabela I- Prikaz struja i snaga potrošnje potrošača u sistemu

Potrošač (opis)	Napon (V)	Struja (A) (sred.vrednost)	Snaga (W)
PIN-3	12	0.10 (0.50)*	1.2 (6.0)
KIDS-16	12	0.05	0.6
XBB	12	0.25A	3.0
Radio stanica	12	0.90A	10.8
Ukupno		**1.3 (1.7)**	**15.6(20.4)**

*****trajna struja u ustaljenom režimu kada nije aktivirana sklopka izlaznog relea (detekcija MAX nivoa)*

Treba napomenuti da je struja potrošnje potrošača provodnog indikatora nivoa PIN-3, u slučaju aktiviranja špulne izlaznog relea nakon detekcije MAX nivoa jednaka 0.5A, tako da je u tom slučaju ukupna struja potrošnje veća od 1.3A, odnosno ona je u tom slučaju jednaka 1.7A, tako da je ukupna snaga potrošnje. Sagledavajući potrošnju svih uređaja u toku 24 časa pri najnepovoljnijim eksploatacionim uslovima, usvojeno je da se tokom 24 časa obavlja radio prenos i da su svi potrošači aktivni sa strujama potrošnje koje su date u Tabeli I. Na osnovu ovoga dolazimo do ukupne dnevne potrošnje mernog i telekomunikacionog sistema izražene u [Ah], odnosno C=1.7A·24h=40.8Ah. Obzirom da se svi potrošači napajaju jednosmernim naponom U=12V, dolazimo do vrednosti dnevne potrošnje električne energije za ovaj sistem, u najnepovoljnijem slučaju, E=C·U=40.8Ah·12=489.6Wh≈490Wh.

IV. DIMENZIONISANJE SISTEMA NAPAJANJA

Prvi korak u dimenzionisanju sistema je određivanje tačne pozicije mernog mesta na reci Ub i određivanje optimalnog ugla zakretanja solarnog panela u odnosu na zamišljenu horizontalnu ravan. U programu PVGIS[13] se dobija da je geografska širina datog mesta 44.456°, a geografska dužina 20.074°. Za date koordinate se u programu PVGIS se dobijaju optimalne vrednosti ugla zakretanja solarnog panela (sunčevi zraci padaju pod pravim uglom na površinu panela) po mesecima u toku godine, kao što je dato u Tabeli II. Pri ovome je pretpostavljeno da su paneli orijentisani ka južnoj strani (pravac sever-jug).

Tabela II-Optimalni ugao inklinacije solarnog panela

MESEC	OPT.UGAO[°]
JAN	64
FEB	55
MAR	44
APR	32
MAY	24
JUN	21
JUL	24
AUG	32
SEP	44
OCT	56
NOV	64
DEC	67
SREDNI GODIŠNJI OPTIMUM	35

Na Slici 6 su date srednje mesečne vrednosti iradijacija [kWh/m²] u dužem godišnjem intervalu 2005-2016) za datu lokaciju i to za optimalnu vrednost ugla zakretanja od 35° i ugla zakretanja 64°, koji se odnosi na mesec sa najnižom insolacijom-januar. Na ovim dijagramima se uočava ekstremna vrednost (najmanja vrednost iradijacije), koja se imala početkom 2011 godine. U proračunu su uzete vrednosti iradijacija (pesimistički slučaj).
Na osnovu tabele III (zakretni ugao 35°) je moguće izračunati ukupnu godišnju iradijaciju za 2011 godinu:

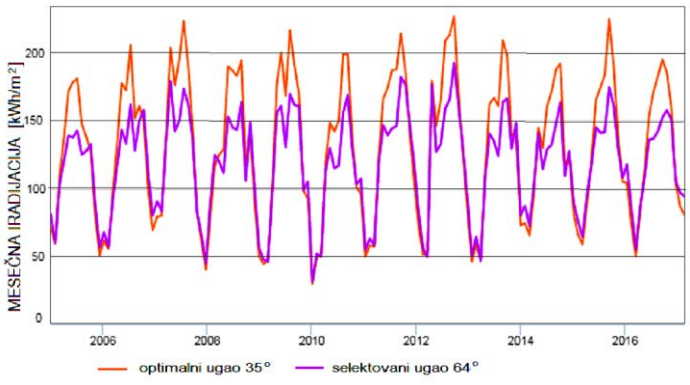
ΣH35=58.29+57.55+124.58+165.89+173.9+186.72+187.26+213.73+186.77+140.49+104.9+71.82=1672kWh/m²

Prosečna vrednost dnevne sunčeve iradijacije za najnepovoljniji mesec- januar, u ovom slučaju je H35_1=1880.32Wh/m².

Na osnovu tabele IV (zakretni ugao 64°) je moguće izračunati ukupnu godišnju iradijaciju za 2011 godinu:

ΣH64=63.32+58.42+119.24+146.28+139.1+144.08+145.75+181.58+176.73+146.98+118.45+82.9=1522.83kWh/m²

Prosečna vrednost dnevne sunčeve iradijacije za najnepovoljniji mesec- januar, u ovom slučaju je H64_1=2042.58Wh/m².



Slika 6-Srednje godišnje iradijacije za lokaciju mesta Ub (prema PVGIS bazi) za optimalni ugao inklinacije od 35° i odabrani ugao od 64°

Tabela III-mesečne iradijacije za ugao inklinacije od 35 °

Month	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
January	71.35	62.04	79.45	78.65	44.79	49.33	58.29	51.85
February	59.61	55.73	80.31	116.49	47.28	52.07	57.55	51.87
March	109.6	97.83	138.54	124.86	102.82	119.45	124.58	179.05
April	137.28	133.77	202.95	128.68	176.39	148.25	165.89	145.85
May	171.49	177.16	175.65	189.43	199.51	141.73	173.9	164.23
June	178.1	172.02	194.89	186.35	168.07	150.01	186.72	208.06
July	180.55	205.07	222.71	182.44	216	198.41	187.26	212.94
August	147.27	151.44	190.49	193.83	190.26	198.55	213.73	226.26
September	138.01	160.59	145.22	115.89	169.84	139.33	186.77	169.45
October	127.48	150.04	82.6	142.24	98.18	100.86	140.49	125.35
November	79.97	98.44	61.36	89.76	92.78	96.06	104.9	84.19
December	51	69.51	40.97	50.3	30.18	50.11	71.82	46.61

Tabela IV-mesečne iradijacije za ugao inklinacije od 64 °

Month	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
January	80.99	67.98	90.48	89.27	47.89	52.09	63.32	56.14
February	60.06	57.18	83.59	124.56	46.47	50.24	58.42	50.04
March	103.13	91.87	134.45	119.91	97.47	113.31	119.24	176.42
April	120.71	117.31	178.83	111.59	155.74	129.72	146.28	126.97
May	138.63	142.78	141.94	152.55	160.43	114.75	139.1	132.44
June	137.38	133.19	149.78	144.74	130.38	117.06	144.08	158.41
July	142.4	161.62	172.94	142.93	169.28	155.8	145.75	165.7
August	124.87	128	162.23	163.24	161.36	168.36	181.58	192.1
September	127.51	149.78	136.31	105.93	160.42	130.14	176.73	160.02
October	132.55	157.44	82.8	148.67	99.09	103.29	146.98	129.71
November	88.55	111.11	65.81	99.9	105.02	107.28	118.45	93.07
December	56.98	80.45	45.2	56.29	31.69	55	82.9	51.12

Na osnovu prethodno izračunatih vrednosti se konstatuje da je ukupna energija sunčevog zračenja na solarnom panelu za oko 11% veća pri uglu zakretanja od 35°, ali u najnepovoljnijem mesecu bi se dobilo oko 11% energije tokom dana.

Pri proračunu je moguće koristiti dva kriterijuma: (1) dobijanje maksimalne energije iz solarnog panela u najnepovoljnijem mesecu u godini, (2) maksimalna proizvodnja energije iz solarnog panela tokom godine. U slučaju usvajanja prvog kriterijuma ugao zakretanja panela bi se podesio na 64°, dok bi u slučaju drugog kriterijuma taj ugao treba podesiti na 35°.
Obzirom da je pored solarnih panela, raspoloživ i drugi izvor-napojna mreža 230V, 50Hz, u proračunu je usvojen drugi kriterijum kao primarni.

Srednji broj sati tzv. „vršnog sunca“ se računa prema relaciji:

$$N_{vs} = \frac{H_{35_1}[Wh/m^2]}{1000[Wh/m^2]} \qquad (1)$$

$$N_{vs} = \frac{1880.32[Wh/m^2]}{1000[Wh/m^2]} = 1.88h$$

Referentna vrednost sunčevog zračenja u odnosu na koju je izvršeno normiranje je H_{ref} =1000Wh/m². U odnosu na ovu vrednost je referisana maksimalna snaga solarnog panela (dato u katalogu proizvođača).

Uz pretpostavku da je pored solarnog panela tokom druge polovine dana raspoloživ i drugi izvor električne energije za napajanje opreme (napojna mreža 230V,50Hz), kao i to da je efikasnost MPPT regulatora punjača 90%, a efikasnost baterija 90%, (dobijeno iz kataloga proizvođača), potrebna snaga solarnog panela pod ovim uslovima je:

$$P_{pv} = \frac{E/2}{N_{vs} \cdot \eta_{reg} \cdot \eta_{bat}} \qquad (2)$$

Proračunom se dobija vrednost snage PV panela:

$$P_{pv} = \frac{E/2}{N_{vs} \cdot \eta_{reg} \cdot \eta_{bat}} = \frac{490Wh/2}{1.88h \cdot 0.9 \cdot 0.9} = 161W$$

Usvojen je solarni panel LX160M, sa podacima napon/struja u tački maksimalne snage 19.74V/8.36A.

Potreban kapacitet baterija u ovom slučaju izračunavamo iz relacije:

$$C_{bat}[Ah] = \frac{E[Wh] \cdot N_s}{U_{bat}(V) \cdot \eta_{bat} \cdot \delta_{bat} \cdot K_t} \qquad (3)$$

Gde su:

$E[Wh]$ -potrebna energija potrošnje

N_S -zahtevani broj dana autonomije sistema bez oba izvora napajanja

$U_{bat}[V]$ -nominalni napon baterijskog napajanja

$\delta_{bat}[\%]/100$ -dozvoljena dubina pražnjenja baterije

$\eta_{bat}[\%]/100$ -stepen iskorišćenja baterije

K_t -korekcioni faktor pada kapaciteta baterije usled pada temperature

Uz pretpostavke autonomije sistema u intervalu od 24h (jedan dan, tj. *Ns*=1) , dubinu pražnjenja od 70% i korekcioni faktor slabljenja kapaciteta usled pada temperature (1% za jedan stepen ispod 20°C), proračunom se dobija sledeća vrednost kapaciteta baterije:

$$C_{bat}[Ah] = \frac{490[Wh] \cdot 1}{12(V) \cdot 0.9 \cdot 0.7 \cdot 0.6} = 108\,Ah$$

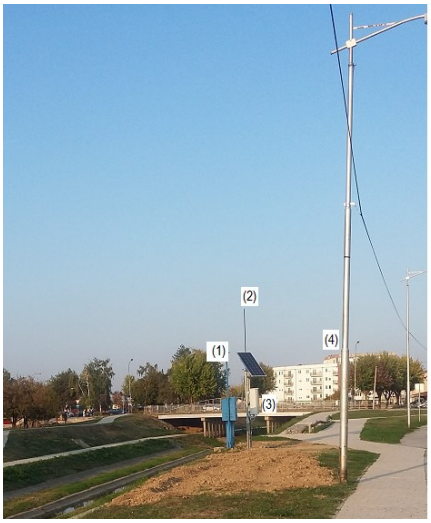
Usvojena je baterija od 12V/110Ah, odnosno u i sistemu napajanja su predviđene dve baterije od 55Ah, vezane u paralelnoj sprezi.
Mrežni i MPPT punjač su tako dimenzionisani da mogu da istovremeno obezbede struju punjenja baterijske banke od 12A i napajanje svih potrošača u sistemu (ukupna potrošnja oko 2A). Drugim rečima raspoloživi strujni kapacitet ovih punjača na izlazu je 15A.

V. REALIZACIJA SISTEMA NAPAJANJA

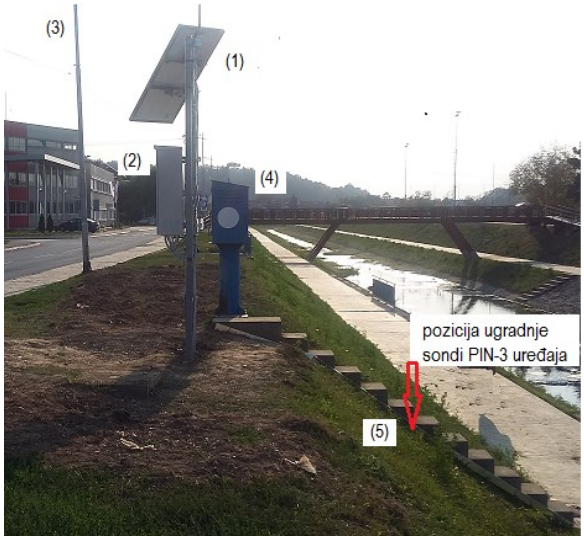
U ovom poglavlju će biti predstavljeni rezultati izvođenja i montaže sistema napajanja merne stanice na reci Ub. Realizovano je dvostrano napajanje: mrežno napajanje 230V,50Hz sa stuba ulične rasvete i solarno napajanje ostvareno sa solarnog panela snage 160W. Razvodni orman napajanja (mrežni i MPPT punjači), upravljačke, merne i telekomunikacione opreme, solarni panel, kao i sama antena radio stanice su montirani na metalnom nosaču u obliku kompaktnog rama. U prostoru oko montažnog rama je postavljen uzemljivač, koji je povezan na prihvatni sistem za zaštitu od atmosferskog pražnjenja. Obzirom da je rastojanje razvodnog ormana veće od 10m u odnosu na glavni (mrežni priključak), odnosno orman mernog mesta (OMM) u razvodnom ormanu je postavljena sekundarna prenaponska zaštita klase C (nivo II), SAFETEC 80/275 /(1+1). Zaštita između faznog i nultog provodnika (L-N) je izvedena sa metal-oksidnim varistorom (1xMOV), dok je zaštita između nultog provodnika i zaštitnog uzemljenja (N-PE) izvedena gasnim odvodnikom prenapona. Zaštita ima ugrađenu termičku kontrolnu funkciju (TC). Nominalni naizmenični radni napon zaštite je 230V, 50Hz, dok je maksimalni kontinualni napon između faznog i nultog provodnika 275V, 50Hz, a maksimalni kontinualni naizmenični napon između nultog provodnika i zaštitnog uzemljenja je 255V, 50Hz. Za prenaponski talas 8/20μs, nominalna struja pražnjenja između provodnika (L-N)/(N-PE) je 20kA/20kA, dok je maksimalna struja pražnjenja između (L-N)/(N-PE) je 50k/40kA. U sistemu je obezbeđena i prenaponska zaštita solarnog panela tipa PHOTEC BC 1000/12.5 ISO 1110 (kombinacija dva MOV-a: jedan od „+“ priključka i jedan od „-“ priključka ka zaštitnom uzemljenju PE.

Za zaštitu od indirektnog napona dodira je izvedena TT sistemom zaštite sa dopunskim sistemom sa zaštitnim uređajem diferencijalne struje (ZUDS) tipa 25A/0.5A, za maksimalnu struju kvara 10kA. Svaki od pretvaračkih modula za baterije (AC/DC i DC/DC) u sebi imaju montirane ventilatore za odvođenje toplote nastale kao posledica disipacije u pretvaračkim stepenima snage. Pored ovoga, u ormanu je ostvareno odvođenje toplote sa odgovarajućim termostatom i ventilatorom. U razvodnom ormanu je ostvarena i zaštita od kondenzacije korišćenjem kombinacije termostat-higrostat i odgovarajućih grejača. Prekostrujna zaštita svih potrošača na sabirnicama 12Vdc, je ostvarena odgovarajućim zaštitnim prekidačima.

Na Slici 7 je dat prikaz dispozicije objekata i opreme na lokaciji merne stanice na reci Ub. Solarni panel (1) snage 160W je montiran na metalni ram i orijentisan u pravcu Sever-Jug, a nagnut pod uglom od 35° u odnosu na fiktivnu horizontalnu ravan. Na montažnom ramu je postavljena antena (2) radio stanice koja služi za prenos podataka ka KC. Ispod solarnog panela, a na istom ramu je montiran razvodni orman(3) hibridnog napajanja. Na istoj dispoziciji je prikazan stub ulične rasvete (4), sa koga se ostvaruje mrežno (AC) napajanje sistema.



Slika 7- Dispozicija objekata i opreme na lokaciji merne stanice Ub; (1) solarni panel, (2) antena radio stanice, (3) razvodni orman (RO) napajanja , (4) stub ulične rasvete



Slika 8- Dispozicija objekata i merne opreme u rečnom koritu; (1) solarni panel, (2) razvodni orman (RO), (3) stub ulične rasvete, (4) merni orman RHMZ Srbije, (5) nasip na kome su ugrađene sonde provodnog indikatora nivoa PIN-3.

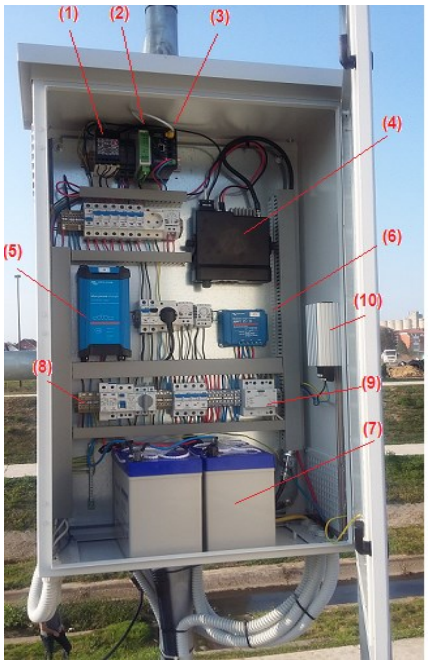
Na Slici 8 je dat prikaz objekata i razvodnog ormana u odnosu na rečno korito reke Ub. Pored solarnog panela (1), razvodnog ormana (2) i stuba ulične rasvete (3) je prikazan postojeći merni orman (4) RHMZ Srbije. Mesto ugradnje sonde MAX nivoa provodnog indikatora nivoa PIN-3 je dato pozicijom (5).

Na Slici 9 je dat izgled montažnog čeličnog rama sa pripadajućom opremom (radio antena, solarni panel, razvodni orman, priključni kablovi, traka za uzemljenje i sl.) Na Slici 9(a) je dat prikaz razvodnog ormana i antene radio stanice. Na Slici 9(b) su prikazani detalji montaže antene radio stanice, gromobranske hvataljke i solarnog panela.

(a) (b)

Slika 9- Izgled montažnog rama sa pripadajućom opremom ; (a) prikaz sistema solarni panel, razvodni orman (RO) napajanja i antena radio stanice, (b) detalj montaže solarnog panela i antene

Na Slici 10 je prikazana dispozicija unutrašnje montažne ploče razvodnog ormana hibridnog napajanja i raspored pripadajućih elemenata.



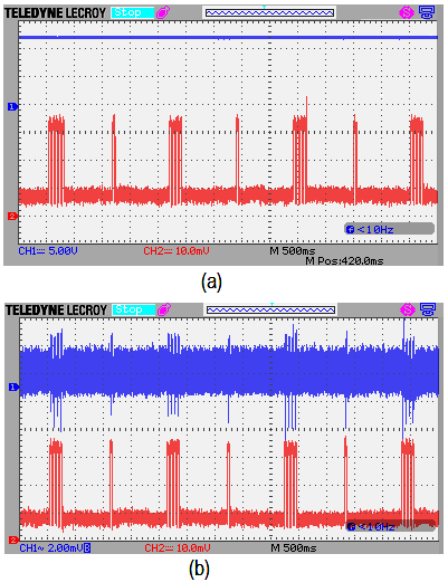
Slika 10- Izgled unutrašnje montažne ploče razvodnog ormana hibridnog napajanja

Na montažnoj ploči unutar razvodnog ormana +RO, su postavljeni sledeći elementi: (1) elektronika provodnog indikatora nivoa PIN-3, (2) modul digitalnih ulaza KIDS-16, (3) konvertor protokola XBB modul, (4) radio stanica, (5) mrežni (AC) punjač, (6) MPPT solarni punjač, (7) baterijska banka 12V=/2x55Ah, (8) redne stezaljke mrežnog (AC) priključka 230V, 50Hz (L1, N, PE), (9) priključak solarnih panela, (10) grejač u unutrašnjosti ormana sa pripadajućim termostatom i higrostatom.

VI. EKSPERIMENTALNI REZULTATI

Nakon instalacije hibridnog napajanja su izvršeni puštanje u rad i odgovarajuća merenja u cilju overe eksploatacionih karakteristika. Pri verifikaciji parametara hibridnog napajanja je korišćena sledeća merna oprema:

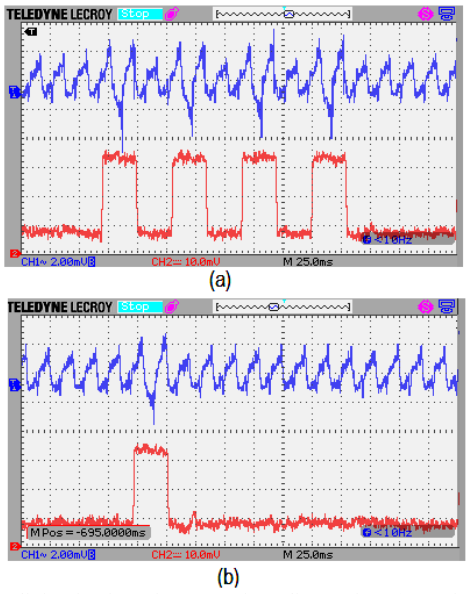
- Osciloskop: Wave ACE 1002 , 60MHz, 1Gs/s, TELEDYNE Lcroy
- Strujna klešta za osciloskop : HANTEK CC650, opsega 0...±650A DC ili AC
- Strujna sonda sa pretvaračem za osciloskop: AM503 Current Probe Amplifier Hewlett Pacard
- Strujna klešta (ručna): AC, DC: UNI T- UT210E
- Multi-metar: PEAK TECH



Slika 11-Merenje potrošnje radio stanice; (a) potrošnja iz napona 12Vdc: CH1-napon baterije [5V/div], CH2-struja potrošnje radio stanice[1A/div], (b) potrošnja iz 230Vac: CH1-ulazna struja iz mreže [0.05A/div] , CH2-struja potrošnje radio stanice iz 12Vdc [1A/div]

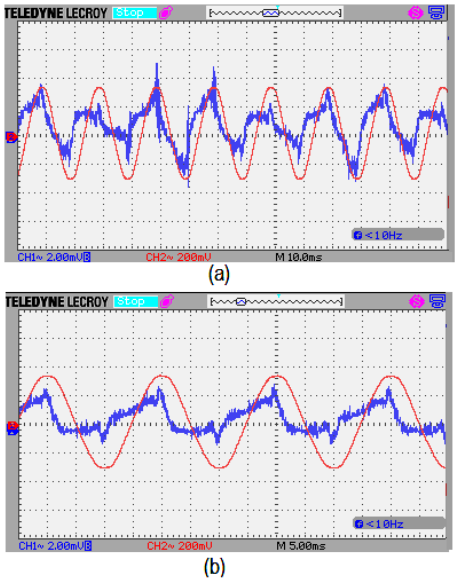
Na osciloskopskim snimcima na Slici11 je prikazana potrošnja radio stanice (najkritičniji potrošač u sistemu) u sva tri radna režima (prijem, mirni režim i predaja). Na Slici 11(a) su prikazani napon baterije 12Vdc i struja potrošnje radio stanice u pomenuta tri režima. Sa snimka se uočava da je maksimalna struja potrošnje radio stanice u režimu predaje (TRANSMIT) i u režimu prijema (RECIEVE) oko 3.5A, a da je trajanje vremenskog intervala predaje oko 100ms, a trajanje vremenskog intervala prijema oko 25ms. Dobijeni snimci odgovaraju teorijskom dijagramu struje potrošnje radio stanice koji je dat na Slici 5, a na osnovu kojeg je baziran proračun kapaciteta baterijske banke.

Detaljni prikazi struje potrošnje radio stanice iz 12Vdc i struje potrošnje sistema iz napojne mreže (kada je uključen mrežni AC punjač) su dati na Slici 12. Na Slici 12(a) su prikazani snimljeni talasni oblici struja u režimu predaje, dok su na Slici 12(b) prikazani talasni oblici u režimu prijema i u „mirnom režimu“*(„stand-by“*).



Slika 12- Detaljni snimci struje potrošnje radio stanice; (a) režim PREDAJA; CH1-ulazna struja iz mreže [0.05A/div], CH2-struja potrošnje radio stanice[1A/div], (b) režim PRIJEM; CH1-ulazna struja iz mreže [0.05A/div], CH2-struja potrošnje radio stanice[1A/div].

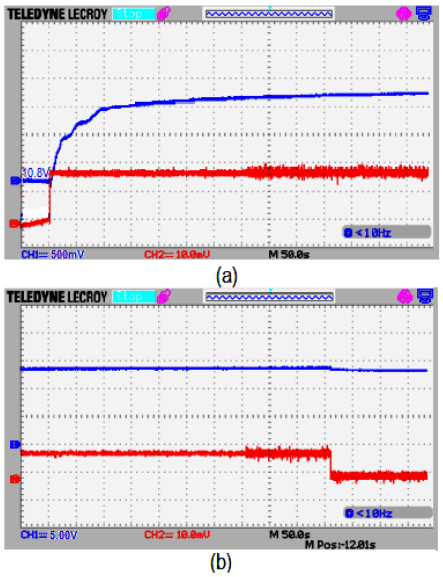
Na Slici 13 su prikazani talasni oblici mrežnog napona i ulazne struje punjača za karakteristične režime rada sistema.



Slika 13- Ulazna struja i napon mrežnog punjača; (a) režim PREDAJA: CH1-ulazna struja iz mreže [0.05A/div], CH2-Mrežni napon [200V/div], (b) STAND-BY režim (niske potrošnje): CH1- ulazna struja iz mreže [0.05A/div], CH2-Mrežni napon [200V/div].

Na Slici 13(a) su prikazani snimljeni talasni oblici mrežnog napona i ulazne struje u režimu predaje signala sa radio stanice (najkritičniji slučaj). U ovom režimu je postignut relativno povoljan faktor snage sistema (>0.9), što se vidi iz snimka talasnih oblika ulazne struje i napona mreže. Na Slici 13(b) su prikazani isti talasni oblici, ali u režimu prijema signala i u „mirnom režimu“. U ovom slučaju je faktor snage sistema lošiji (pretežno je kapacitivan), kao što se vidi iz snimka ulazne struje i napona.

Na Slici 14 su prikazani karakteristični talasni oblici napona baterije i struje MPPT punjača kada je on napajan sa solarnog panela u vremenskom intervalu sa najvećom insolacijom (oko podneva).



Slika 14- Režim punjenja baterije iz solarnih panela : (a) vremenski interval na početku punjenja: napon baterije CH1-[500mV/div] , struja punjenja CH2-[5A/div], (b) vremenski interval na kraju punjenja: napon baterije CH1-[5V/div], struja punjenja CH2-[2A/div]

Na Slici 14(a) je prikazan režim početka punjenja baterije od početnog napona 10.8V (potpuno prazna baterija-ispražnjenost baterije oko 80%), dok je na Slici 14(b) prikazan završetak punjenja baterije, odnosno baterija je dostigla stanje napunjenosti oko 100%. Na ovom snimku se uočava mali pad napona na bateriji prilikom prelaska punjača u režimu *„trickle charge“*.

VII. ZAKLJUČAK

U radu su prikazani ključni rezultati projektovanja i izvođenja sistema hibridnog napajanja merne stanice na reci Ub, opština Ub, koja je integralni deo sistema za zaštitu od poplava. U sklopu merne stanice je predviđena i sva neophodna telekomunikaciona oprema i preduzete su sve mere zaštite od atmosferskih pražnjenja i od strujnog udara. Na osnovu projekta za izvođenje sistem napajanja je realizovan krajem Oktobra 2019. Izvedeno je dvostrano napajanje: tokom dana dominantan izvor je sunčeva energija, odnosno solarni paneli, pripadajući MPPT punjač i baterijska banka, dok je tokom noći dominantan izvor je napojna mreža (dobijena sa najbližeg stuba ulične rasvete). Nakon izvođenja izvršena su eksploataciona merenja i puštanje u rad sistema napajanja merne stanice. Sistem je u eksploataciji počev od Novembra 2019, od strane Sektora za vanredne situacije Republike Srbije (Komandni Centar opštine Ub). Realizovano hibridno napajanje se može primeniti za druge slične aplikacije i bilo koji tip merne stanice sa više merenih veličina.

ZAHVALNICA

Istraživanje opisano u ovom radu finansirano je delom od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, a delom od strane Sektora za vanredne situacije Republike Srbije.

REFERENCES

[1] S.Stankov, „Napajanje individualnih potrošača hibridnim sistemima“, Zbornik Međunarodnog kongresa o procesnoj industriji – Procesing, [S.l.], Vol. 27, No. 1, Apr. 2017.

[2] Z. Radaković, N. Paunović, I. Mitev, „Optimalno projektovanje hibridnog sistema za off-grid napajanje električnom energijom“, 17. Telekomunikacioni forum TELFOR 2009, Beograd, 24 – 26 November 2009.

[3] C.V. Nayar, M. Ashari, W.W.L. Keerthipala, „A grid-interactive photovoltaic uninterruptible power supply system using battery storage and a back up diesel generator”, *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Volume 15, iss. 3, pp. 348 – 353, Sep 2000.

[4] M. M. Mahmoud and I. H. Ibrik, „Techno-economic feasibility of energy supply of remote villages in Palestine by PV-systems, diesel generators and electric grid,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 10, no. 2, pp. 128–138, 2006.

[5] S.S.Durgam, A.B.Musale,S.A.Balki, P.S.Gahane, L.B. Awale, „AC Hybrid Charge Controller“, *Int. Journal of Engineering Research and Applications* , Vol. 5, Issue 3, (Part -5) March 2015, pp.5-10

[6] Chih-Lung Shen, Yong-Xian Ko, „Hybrid-input power supply with PFC (power factor corrector) and MPPT (maximum power point tracking) features for battery charging and HB-LED driving“, *Energy*, Vol.72, No.1, August 2014, pp.501-509

[7] Hicham Fakham, Di Lu, Bruno Francois, „Power Control Design of a battery charger in a Hybrid Active PV generator for load following applications“, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, Vol. 58, Iss. 1 , pp. 85-94, Jan. 2011, TIE-09-1370.

[8] M.A. Omar and M.M. Mahmoud, „Design and Simulation of a PV System Operating in Grid-Connected and Stand-Alone Modes for Areas of Daily Grid Blackouts“, *International Journal of Photoenergy*, Volume 2019, Article ID 5216583, 9 pages, https://doi.org/10.1155/2019/5216583

[9] M. Alramlawi, A. Gabash, E. Mohagheghi, and P. Li, „Optimal operation of hybrid PV-battery system considering grid scheduled blackouts and battery lifetime”, *Solar Energy*, vol. 161, pp. 125–137, 2018.

[10] G. Delille, B. François, „A review of some technical and economic features of energy storage technologies for distribution system integration”, *Ecological engineering and environment protection*, pp. 40-48, vol. 1, ISSN 1311 – 8668, 2009.

[11] Y. K. Lo, H. J. Chiu, T. P. Lee, I. Purnama, J. M. Wang, „Analysis and Design of a Photovoltaic System DC connected to the Utility With a Power Factor Corrector”, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol.56, iss. 11, pp. 4354- 4362, Nov. 2009.

[12] J.P. Dunlop, Batteries and charge control in stand-alone photovoltaic systems, Fundamentals and application, Report prepared for Sandia National Laboratories, Florida Solar Energy Center, Jan.1997.

[13] PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/tools.html#MR

AUTORI

Prvi Autor – Dr Željko V.Despotović, dipl.el.inž, Naučni savetnik, Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, zeljko.despotovic@pupin.rs

Drugi Autor – Marko Tajdić dipl.el.inž., Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, marko.tajdic@puoin.rs

Treći Autor- Jovan Kon, dipl.el.inž, Rukovodilac projekata iz oblasti sistema za osmatranje, obaveštavanje i uzbunjivanje (OiOU), Institut Mihajlo Pupin, Univerzitet u Beogradu, jovan.kon@pupin.rs.

Autor za korespondenciju – Dr Željko V. Despotović, dipl.el.inž, Institut M.Pupin, Volgina 15, Beograd 11060, zeljko.despotovic@pupin.rs, zdespot@etf.rs, Tel. 011/6771-024. , Mob. tel. 063/331-645

Analiza algoritama za kompezaciju zasićenja strujnog transformatora

Analysis of algorithms for saturation compensation of current transformer

Nenad Belčević*, Zoran Stojanović*

* Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu

Apstrakt- Osnovna uloga strujnih transformatora jeste da velike vrednosti primarne struje prilagode vrednostima pogodnim za rad uređaja relejne zaštite, odnosno mernih uređaja. U normalnom radnom stanju, strujni transformator transformiše primarnu struju u praktično stalnom odnosu i gotovo bez faznog pomeraja, te je struja sekundara zapravo skalirana vrednost primarne struje. Međutim, prilikom nastanka kvara u elektroenergetskom sistemu, struje postižu velike vrednosti. Usled toga, fluks u jezgru strujnog transformatora može dostići vrednosti iznad kolena karakteristike magnećenja, što izaziva zasićenje strujnog transformatora. Kada nastupi zasićenje, struja sekundara više nije skalirana vrednost primarne struje, već dolazi do njene deformacije. Deformacija struje sekundara strujnog transformatora može izazvati nepravilan rad pojedinih uređaja relajne zaštite. Razvoj digitalne relejne zaštite omogućio je da se primenom određenih algoritama izvrši softverska kompenzacija zasićenja, čime se otklanjaju negativne posledice koje zasićenje strujnog transformatora izaziva. U okviru ovog rada analiziran je jedan od mogućih pristupa za kompenzaciju zasiaćenja, koji se zasniva na primeni ekvivalentne šeme i krive magnećenja strujnog transformatora. Pri tome, izdvojena su dva karkateristična prisupa koja su detaljnije sagledana i testirana. Testiranje je vršeno u MATLAB/Simulink programskom okruženju.

Ključne reči – strujni transformator, digitalna relejna zaštita, kompenzacija zasićenja

Abstact - The main function of current transformers is to adapt the high values of the primary current to values suitable for the operation of relay protection devices, i.e. measuring devices. Under normal conditions, a current transformer transforms the current in a virtually permanent ratio, and practically without a phase shift, so the secondary current is actually a scaled value of the primary current. However, when a fault occurs in the power system, currents reach high values. As a result, the flux in the core of the current transformer can reach values above the knee of the magnetization characteristic, causing saturation of the current transformer. When saturation occurs, the secondary current is no longer a scaled value of the primary current, but is deformed. Deformation of the secondary current may cause malfunctioning of some relay protection devices. The development of digital relay protection has made it possible to perform software saturation compensation by applying certain algorithms, thus eliminating the negative consequences that saturation of the current transformer causes. In this paper, one of the possible approaches for compensation of saturation is analyzed, which is based on the application of an equivalent scheme and magnetization curve of the current transformer. Two typical approaches have been singled out, which have been analyzed and tested in more detail. Testing was performed in the MATLAB/Simulink.

Keywords - current transformer, digital relay protection, saturation compensation

I. UVOD

U normalnom radnom stanju, sekundarna struja strujnog transformatora (ST) približno odgovara skaliranoj vrednosti primarne struje strujnog transformatora. Međutim, kada fluks u magnetskom jezgru ST dostigne vrednosti iznad kolena karakteristike magnećenja, struja magnećenja ST naglo raste. Tada dolazi do značajnog odstupanja talasnog oblika sekundarne struje ST u odnosu na primarnu struju, odnosno dolazi do deformacije strujnog signala. Ova pojava poznata je kao zasićenje (saturacija) ST. Pojava zasićenja ST može dovesti do nepravilnosti u radu različitih zaštita, kao što su prekostrujna zaštita sa inverznom karakteristikom reagovanja, zatim distantna zaštita, kao i diferencijalna zaštita sabinica, koja se u pogledu zasićenja ST može smatrati najosetljivijom.

U postojećoj literaturi prezentovan je značajan broj algoritama koji za cilj imaju kompenzaciju negativnih efekata izazvanih zasićenjem ST. Grubo posmatrano, mogu se razlikovati četiri osnovna pristupa:

1. Algoritmi koji za kompenzaciju zasićenja ST koriste neuralne mreže [1-3]. Osnovni nedostatak ovih

algoritama odnosi se na potrebu za velikim brojem trening podataka.

2. Algoritmi koji za kompenzaciju zasićenja ST koriste metodu najmanjih kvadrata primenjenu na odbirke strujnog signala iz perioda bez zasićenja ST [4-6]. Osnovna pretpostavka od koje se polazi kod ovih algoritama jeste da se struja kvara može predstaviti kao zbir prostoperiodične komponente i eksponencijalno opadajuće jednosmerne komponente, te se metoda najmanjih kvadrata primenjuje na nezasićeni ("zdravi") deo strujnog signala sa ciljem da se estimiraju parametri ovako pretpostavljenog talasnog oblika struje. Osnovni nedostatak algoritama iz ove grupe ogleda se u njihovoj računarskoj zahtevnosti, odnosno činjenici da zahtevaju izračunvanje pseudo inverzne matrice. Drugi važan nedostatak ovih algoritama jeste da se njihovom primenom ne mogu estimirati viši harmonici strujnog signala, koji mogu biti neophodni za ispravan rad pojedinih algoritama relejne zaštite, kao što su algoritmi za detekciju električnog luka na nadzemnim vodovima. Naime, ukoliko bi se usvojio talasni oblik struje kvara koji uključuje i više harmonike, to bi dovelo do povećanja računarskih zahteva, s obzirom da bi se metodom najmanjih kvadrata morao estimirati veći broj nepoznatih. Pored toga, broj nepoznatih koji se mogu odrediti metodom najmanjih kvadrata ograničen je brojem odbiraka strujnog signala koji su na raspolaganju u periodu bez zasićenja ST. Ako se ima u vidu da zasićenje ST može nastati veoma rano (nakon 1/6 osnovne periode), jasno je da broj odbiraka strujog signala koji su na raspolaganju u periodu bez zasićenja ST može biti veoma mali, naročito u uslovima niske frekvencije odabiranja.
3. Algoritmi koji za kompenzaciju zasićenja ST koriste ekvivalentnu šemu ST [7-10]. Kod ovih algoritama najpre se korišćenjem merenih vrednosti struje sekundara ST i poznatih parametara ekvivalentne šeme ST, izračunava fluks u magentskom jezgru ST. Zatim se korišćenjem ovako izračunate vrednosti fluksa, kao i poznatih parametara krive magnećenja, određuje struja magnećenja ST. Na kraju se, sabiranjem ovako izračunate struje magnećenja i merene vrednosti sekundarne struje, određuje (skalirana) primarna struja ST. Osnovni nedostatak ovih algoritama ogleda se u činjenici da se mala greška u proračunatom fluksu značajno odražava na proračunatu struju magnećenja, a time i na tačnost algoritma za kompeznaciju zasićenja ST. Razlog ovome leži u malom nagibu karakteristike magnećenja u toku zasićenja (male promene fluksa odgovaraju značajnim promenama struje magnećenja). Usled ovog nedostatka, kod algoritama koji za kompezaciju zasićenja ST koriste ekvivalentnu šemu ST, zanemarenje remanentnog fluksa se može veoma nepovoljno odraziti na tačnost algoritma [7], [8].
   Kako bi se problem izazvan zanemarenjem remanentog fluksa prevazišao, publikovano je nekoliko radova koji se zasnivaju na estimaciji fluksa u trenutku nastanka zasićenja, odnosno inicijalnog fluksa [9], [10]. Pri tome su za estimaciju inicijalnog fluksa korišćeni različiti pristupi koji će detaljnije biti sagledani u okviru narednih poglavlja.
4. Alogritmi koji za kompenzaciju zasićenja ST koriste metodu najmanjih kvadrata primenjenu na interval sa zasićenjem ST [11], [12]. Princip rada ovih algoritama zasniva se na kombinaciji metode najmanjih kvadrata sa metodom koja za kompeznaciju zasićenja ST koristi ekvivalentnu šemu ST. Naime, dve osnovne pretpostavke od kojih se polazi pri izvođenju ovih algoritama su: 1. primarna struja ST se može predstaviti kao zbir prostoperiodične komponente i eksponencijalno opadajuće jednosmerne komponente; 2. na osnovu poznatih parametara ekvivalentne šeme ST i poznatih parametara krive magnećenja, struja magnećenja može se izraziti u funkciji struje sekundara ST. Kako je struja sekundara ST jednaka razlici (skalirane) primarne struje i struje magnećenja, primenom metode najmanjih kvadrata na sekundarnu struju ST estimiraju se parametri signala čiji je talasni oblik definisan razlikom primarne struje i struje magnećenja. Osnovni nedostatak ovakvih algoritama ogleda se u njihovoj računarskoj zahtevnosti. Naime, ukoliko se pri izvođenju algoritma uvaži uticaj remanentnog fluksa, onda je za estimaciju parametara definisanog signala potrebno rešavati sistem nelinearnih jednačina.

U okviru ovog rada analizirani su algoritmi koji za kompenzaciju zasićenja ST koriste ekvivalentnu šemu ST (druga grupa radova u prethodno sprovedenoj klasifikaciji), i to oni koji uvašavaju uticaj remanentnog fluksa [9], [10]. Algorimi su testirani u MATLAB/Simuling programskom okruženu.

II. KOMPENZACIJA ZASIĆENJA ST KORIŠĆENJEM EKVIVALENTNE ŠEME ST

Princip rada algoritama koji za kompenzaciju zasićenja ST koriste ekvivalentnu šemu ST, zasniva se na izračunavanju (skalirane) primarne struje ST korišćenjem merenih vrednosti sekundarne struje ST i parametara ST (parametara ekvivalentne šeme i krive magnećenja).

Na Slika 1 prikazana je ekvivalentna šema ST, a na Slika 2, prikazana je kriva magnećenja ST.

Na osnovu ekvivalentne šeme ST može se postaviti sledeća relacija:

$$\frac{d\Phi(t)}{dt} = R_s i_2(t) + L_s \frac{di_2(t)}{dt} \quad (1)$$

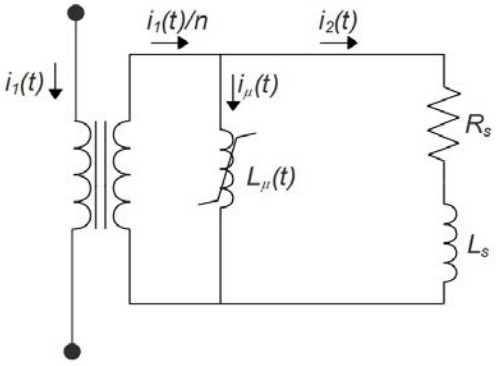
Integracijom prethodne relacije dobija se:

$$\Phi(t) - \Phi(t_0) = R_s \int_{t_0}^{t} i_2(t)dt + L_s\big(i_2(t) - i_2(t_0)\big) \quad (2)$$

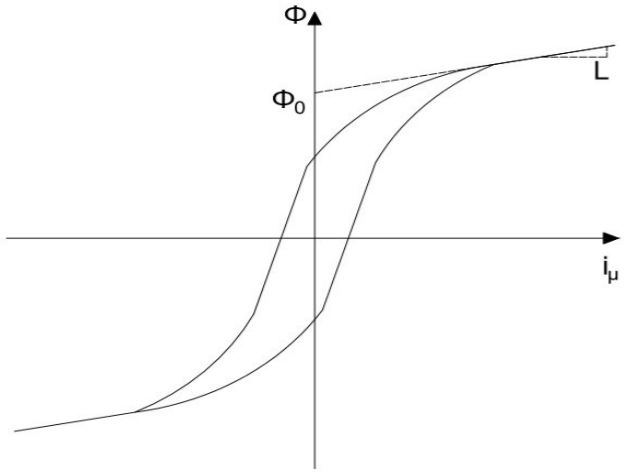
Nakon što se primenom prethodne relacije izračuna fluks u magnetskom jezgru ST, struja magnećenja se može jednostavno odrediti korišćenjem krive magnećenja. Međutim, potrebno je uočiti da fluks u trenutnu t_0 nije poznata veličina.

U prvobitno prezentovanim radovima iz ove oblasti (radovi [7] i [8]) fluks u trenutku t_0 je izjednačavan sa nulom. Međutim, ovakav pristup može dovesti do neprihvatljivih rezultata ukoliko u magnetnom jezgru postoji remanentni (zaostali) fluks. Tada (zahvaljujući malom nagibu karakteristike magnećenja u periodu saturacije) greška izazvana zanemarenjem remanentnog fluksa, dovodi do značajnih grešaka u izračunatoj vrednosti struje magnećenja.

Drugi pristup, koji uvažava uticaj remanentnog fluksa, podrazumeva izračunavanje inicijalnog fluksa, odnosno fluksa u trenutku nastanka zasićenja (pri tome se za početak integracije (t_0) u relaciji (2) bira trenutak nastanka zasićenja).



Slika 1. Ekvivalentna šema ST



Slika 2. Kriva magnećenja ST

Kod ovog pristupa, najpre se esimira struja magnećenja u trenutku nastanka zasićenja, a zatim se korišćenjem krive magnećenja izračunava inicijalni fluks.

Prema tome, ovakav pristup kompenzacije zasićenja ST podrazumeva sledeće korake:

- Najpre se estimira vrednost struje magnećenja u trenutku nastanka zasićenja. Za estimaciju struje magnećenja u trenutku nastanka zasićenja u literaturi se koristi nekoliko različitih pristupa koji će detaljnije biti analizirani u narednim poglavljima;
- Na osnovu estimirane vrendosti struje magnećenja u trenutku nastanka zasićenja i poznate krive magnećenja, određuje se fluks u trenutku nastanka zasićenja, odnosno inicijalni fluks ($\phi(t_0)$);
- Primenom relacije (2) izračunava se fluks za svaki trenutak t u toku perioda zasićenja ($\phi(t)$);
- Na osnovu izračunate vrednosti fluka za svaki trenutak t u toku perioda zasićenja i poznate krive magnećanja, određuje se struja magnećenja i_μ za svaki trenutka t u toku perioda zasićenja;
- Sabiranjem izračunate struje magnećenja, i merene sekundarne struje ST, određuje se (skalirana) primarna struja ST.

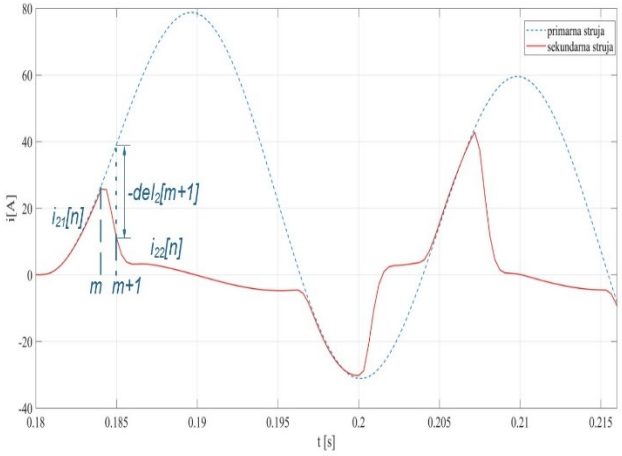
U nastavku će se detaljnije razmotriti dva osnovna pristupa za estimaciju struje magnećenja (odnosno estimaciju inicijalnog fluksa) u trenutku nastanka zasićenja.

A. Estimacija inicijalnog fluksa korišćenjem diferencijalne metode (DM)

Kao što je već elaborirano u prethodnom poglavlju, da bi se odredila vrednost inicijalnog fluksa, potrebno je estimirati vrednost struje magnećenja u trenutku nastanka zasićenja. Jedan od pristupa za estimaciju struje magnećenja u trenutku nastanka zasićenja prezentovan je u [9].

Označimo trenutak nastanka zasićenja sa m+1, struju pre nastanka zasićenja sa i_{21}, odnosno struju tokom zasićenja sa i_{22}, kao što je to prikazano na Slika 3.

Vrednost prvog izvoda struje u trenutku nastanka zasićenja definisan je izrazom:



Slika 3. Ilustracija estimacije inicijalnog fluksa korišćenjem diferencijalne metode

$$del1[m+1] = i_{22}[m+1] - i_{22}[m] = i_{22}[m+1] - i_{21}[m] \quad (3)$$

Za isti ovaj trenutak, možemo definisati drugi izvod prema sledećoj relaciji:

$$del2[m+1] = i_{22}[m+1] - 2i_{22}[m] + i_{21}[m-1] \\ = i_{22}[m+1] - 2i_{21}[m] + i_{21}[m-1] \ (4)$$

Ukoliko se sa i_{21}[m+1] označi ekstrapolirana vrednost nezasićenosg dela signala (Slika 3), onda se može usvojiti da približno važi:

$$i_{21}[m+1] - 2i_{21}[m] + i_{21}[m-1] \simeq 0 \ (5)$$

Ukoliko se relacija (5) implementira u relaciju (4) dobija se:

$$del2[m+1] \simeq i_{22}[m+1] - i_{21}[m+1] \ (6)$$

Na osnovu relacije (6), može se zaključiti da je struja magnećenja u trenutku nastanka zasićenja približno jednaka negativnoj vrendosti drugog izvoda struje u trenutku nastanka zasićenja, odnosno:

$$i_{\mu}[m+1] \simeq -del2[m+1] \ (7)$$

Nakon što se primenom opisanog postupka odredi struja magnećenja u trenutku nastanka zasićenja, korišćenjem krive magnećenja jednostavno se može odrediti vrednost inicijalnog fluksa.

B. Estimacija inicijalnog fluksa korišćenjem metode najmanjih kvadrata (MNK)

Estimacija inicijalnog fluka korišćenjem diferencijalne metode predstavlja jednostavno rešenje i značanjno unapređenje u odnosu na algoritme kod kojih je remanentni fluks u potpunosti zanemaren. Međutim, mana ovakvog pristupa ogleda se u njegovoj osetljivosti na prisustvo šuma u siglanu, kao i u osetljivosti na grešku u detekciji trenutka nastanka zasićenja.

Pristup koji donosi unapređene u pogledu pouzdanosti estimacije inicijalnog fluksa, zasniva se na korišćenju metode najmanjih kvadrata [10].

Pođimo od pretpostavke da se struja kvara može prikazati kao zbir prostoperiodične komponente i eksponencijalno opadajuće DC komponente:

$$i_k(t) = I_{DC}e^{-t/\tau} + I_m\cos(wt + \phi) \ (8)$$

Primenom metode najmanjih kvadrata u periodu bez zasićenja ST određuju se nepoznati parametri usvojenog talasnog oblika struje. Korišćenjem ovako određenih parametara, vrši se ekstrapolacija nezasićenog dela strujog signala u prvih nekoliko odbiraka nakon nastanka zasićenja ST (Slika 4).

Kada se od ovako ekstrapoliranih vrednosti struje oduzime struja merena na sekundaru ST, dobija se vrednost struje magnećenja u prvih nekoliko trenutaka nakon nastanka zasićenja ST. Dakle, struja magnećenja u prvih nekoliko trenutaka nakon nastanka zasićenja, može se definisati izrazom:

$$i_{\mu}^{e}(t) = i_1^{e}(t) - i_2(t) (9)$$

gde je i_1^e (skalirana) primarna struja, određena ekstrapolacijom nezasićenog dela strujnog signala, a i_2 merena vrednost struje sekundara ST.

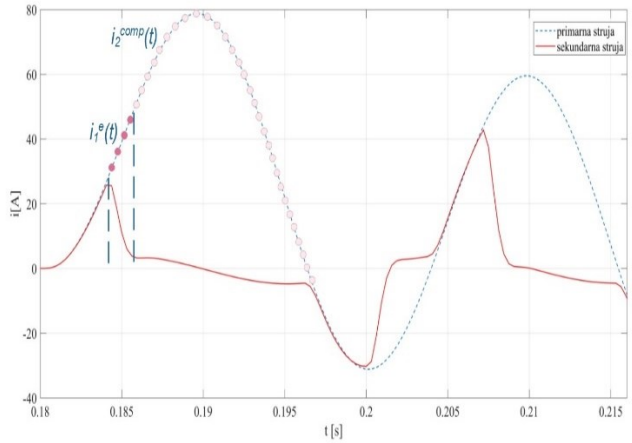
$$\begin{bmatrix} \frac{1}{L} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{1}{L} \\ \frac{-2}{R_s\Delta T} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{-2}{R_s\Delta T} & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \frac{-2}{R_s\Delta T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} |\Phi^e(t_n)| \\ |\Phi^e(t_{n+1})| \\ \vdots \\ |\Phi^e(t_{n+N-1})| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |i_{\mu}^{e}(t_n)| + \frac{\Phi_0}{L} \\ |i_{\mu}^{e}(t_{n+1})| + \frac{\Phi_0}{L} \\ \vdots \\ |i_{\mu}^{e}(t_{n+N-1})| + \frac{\Phi_0}{L} \\ |i_2(t_{n+1})|(\frac{R_s * \Delta T}{2} + L_s) + |i_2(t_n)|(\frac{R_s * \Delta T}{2} - L_s) \\ |i_2(t_{n+2})|(\frac{R_s * \Delta T}{2} + L_s) + |i_2(t_{n+1})|(\frac{R_s * \Delta T}{2} - L_s) \\ \vdots \\ |i_2(t_{n+N-2})|(\frac{R_s * \Delta T}{2} + L_s) + |i_2(t_{n+N-1})|(\frac{R_s * \Delta T}{2} - L_s) \end{bmatrix} \ (12)$$

Iako bi se na osnovu ovako estimirane vrednosti struje magnećenja i poznate krive magnećenja, inicijalni fluks mogao jednostavno odrediti, autori u [10] predlažu nešto složeniji postupak kako bi se poboljšala robusnost algoritma.

Označimo sa t_n trenutak nastanka zasićenja. Za ovaj trenutak može se postaviti sledeća relacija:

$$i_{\mu}^{e}(t_n) = \frac{1}{L}(\Phi(t_n) - \Phi_0) (10)$$

gde je L – nagib zasićenog dela karakterisitke magnećenja, a Φ_0 – vrednost koju prava definisana zasićenim delom karakteristike magnećenja odseca na ordinati (Slika 2).



Slika 4. Ilustracija estimacije inicijalnog fluksa korišćenjem metode najmanjih kvadrata

Integracijom relacije (1) na intervalu od t_n do t_{n+1} (pri čemu se predlaže korišćenje trapezoidalnog pravila integracije), odnosno na intervalu jedne periode odabiranja (ΔT), dobija se:

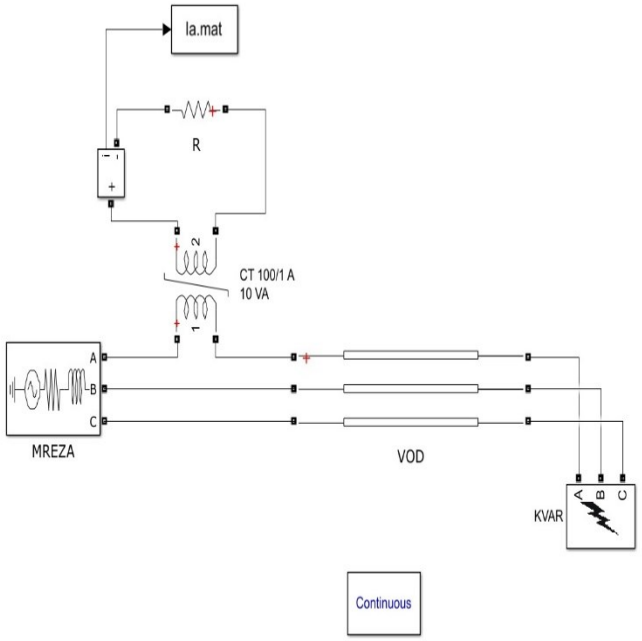
$$\phi(t_{n+1}) - \phi(t_n) = i_2(t_{n+1})(\frac{R_s \Delta T}{2} + L_s) + i_2(t_n)(\frac{R_s \Delta T}{2} - L_s) (11)$$

Postavljanjem realcija (10) i (11) za prvih *N* odbiraka u periodu zasićenja dobija se sistem jednačina koji se u matričnoj fromi može prikazati relacijom (12). Rešavanjem ovog sistema jednačina određuje se fluks u prvih nekoliko trenutaka nakon nastanka zasićenja ($\phi^e(t_n)$, $\phi^e(t_{n+1})$, $\phi^e(t_{n+N-1})$).

III. TESTIRANJE ALGORITAMA ZA KOMPENZACIJU ZASIĆENJA ST ZASNOVANIH NA PRIMENI EKVIVALENTNE ŠEME ST

A. Opis modela

Algoritmi za kompenzaciju zasićenja ST testirani su na signalima koji su generisani u Simulink ogruženu programskog paketa MATLAB. U MATLAB/Simluink okruženju formiran je model jednog jednostrano napajanog 110 kV dalekovoda.



Slika 5. Simulink model

Na početku ovog dalekovoda priključen je primar ST, sa čijeg se sekundara preuzimaju signali na koje se zatim primenjuju algoritmi za kompenzaciju zasićenja ST (algoritam koji za estimaciju inicijalnog fluksa koristi diferencijalnu metodu i algoritam koji za estimaciju inicijalnog fluksa koristi metodu najmanjih kvadrata). Simulink model prikazan je na Slika 5.

Za model dalekovoda izabrana je trofazna šema dalekovoda sa raspodeljenim parametrima. Podužni pogonski parametri modelovanog dalekovoda su: r_d=0,12 Ω/km, l_d=1,3 mH/km i c_d=8,9 nF/km, dok su podužni nulti parametri modelovanog dalekovoda: r_0=0,32 Ω/km, l_0=4,1 mH/km i c_0=5 nF/km.

U okviru razmatranih simulacija, posmatran je jednostrano napajani 110 kV dalekovod, čime se ne gubi na opštosti imajući u vidu da je osnovni cilj da se izazove zasićenje ST. Zasićenje ST izazivano je simuliranjem jednofaznih kvarova na različitim lokacijama duž dalekovoda.

Mreža koja napaja razmatrani 110 kV dalekovod modelovana je kao konstanta impendansa (rezistivni deo impendanse mreže je 0,154 Ω, dok je induktivni deo 24,2 mH).

Induktivnost sekundara ST najčešće se može zanemariti. Iz tog razloga, opterećenje sekundara ST modelovano je kao čisto rezistivna impendansa, a za vrednost otpornosti usvojeno je 10 Ω. U modelu je korišćena uprošćena karakteristika magnećenja ST koja se sastoji od dva linearizovana dela.

B. Testiranje algoritama pri različitim lokacijama kvara

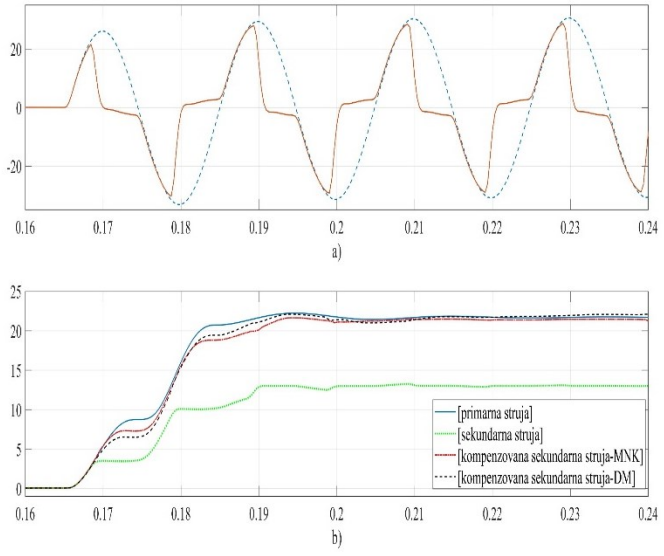
U okviru ovog poglavlja, rad algoritama za kompenzaciju zasićenja ST analiziran je za slučaj kada kvar nastaje na rastojanju od 30 km od početka voda, odnosno za slučaj kada kvar nastaje na 60 km od početka voda. Kvar je simuliran na dve različite lokacije kako bi se izazvao različiti nivo zasićenja ST. Cilj ovakvog testiranja zapravo je analiza rada algoritama za kompenzaciju zasićenja ST pri različitim nivoima zasićenja.

Na Slikama 6 i 7 su prikazane efektivne vrednosti struje koje su određene primenom digitalne furijeove transformacije (DFT) na sledeće signale:

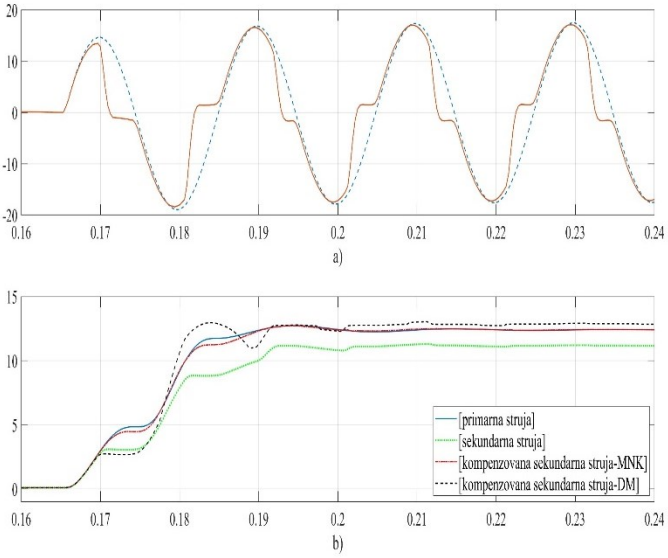
- Signal koji se dobija prmenom algoritma za kompenzaciju zasićenja ST kod koga se inicijalni fluks estimira korišćenjem diferencijalne metode - crna boja;
- Signal koji se dobija prmenom algoritma za kompenzaciju zasićenja ST kod koga se inicijalni fluks estimira korišćenjem metode najmanjih kvadrata – crvena boja;
- Signal koji se dobija na sekundaru idealnog ST (slučaj kada ne bi došlo do zasićenja ST) - plava boja;
- Signal koji se dobija na sekundaru realnog (nekompenzovanog) ST – zelena boja.

Slika 6 prikazuje rezultate koji se dobijaju u slučaju kada je kvar simuliran na rastojanju od 30 km od početka voda. Može se zaključiti da u ovom slučaju oba algoritma dobro kompenzuju zasićenje ST, s obzirom da efektivne vrednosti struje dobijene primenom algoritama za kompenzaciju zasićenja ST veoma brzo dostižu efektivnu vrednost struje sekundara idealnog ST.

Slika 7 prikazuje rezultate koji se dobijaju u slučaju kada je kvar simuliran na rastojanju od 60 km od početka voda. Može se konstatovati da i u ovom slučaju oba algoritma donose poboljšenje u odnosu na slučaj kada se kompeznacija zasićenja ST ne primenjuje. Međutim, može se uočiti da u ovm slučaju kompenzacioni metod koji inicijalni fluks estimira korišćenjem metode najmanjih kvadrata, uspešnije kompenzuje zasićenje u odnosu na kompenzacioni metod koji inicijalni fluks estimira korišćenjem diferencijalne metode



Slika 6. Kvar na l=30 km: (a)Primarna i sekundarna struja; (b)Efektivna verdnost struje estimirana korišćenjem primarne struje, kompenzovane sekundarne struje (MNK i DM) i nekompenzovane sekundarne struje



Slika 7. Kvar na l=60 km: (a)Primarna i sekundarna struja; (b)Efektivna verdnost struje estimirana korišćenjem primarne struje, kompenzovane sekundarne struje (MNK i DM) i nekompenzovane sekundarne struje

C. Testiranje algoritama pri različitim trenutcima kvara

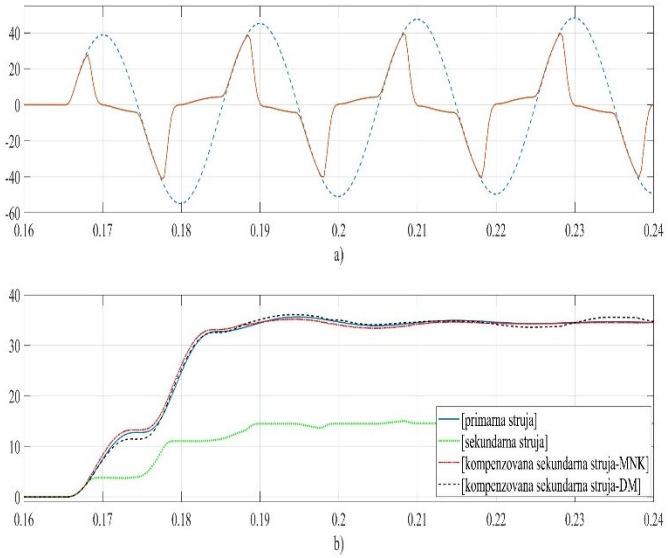
U okviru ovog poglavlja, rad algoritama za kompenzaciju zasićenja ST analiziran je za dva različita tenutka nastanka kvara (t_k=0.165 s i t_k=0.17 s). Cilj ovakvog testiranja jeste analiza uticaja DC komponente struje kvara na rad algoritama za kompenzaciju zasićenja ST.

Zasićenje ST izazvano DC komponentom struje kvara naziva se DC saturacija. Usled DC saturacije, u toku jedne osnovne periode signala nastaje jedan interval zasićenja.

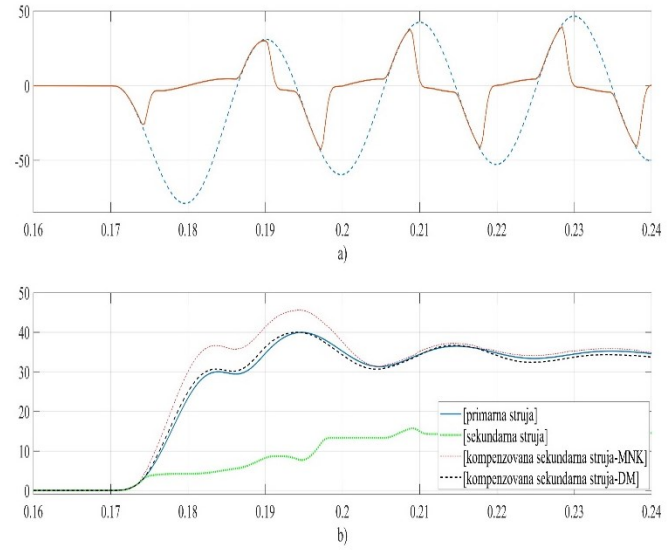
Zasićenje ST izazvano velikom amplitudom AC komponente struje naziva se AC saturacija ST. Usled AC saturacije, u toku jedne osnovne periode, javljaju se dva intervala zasićenja.

Na Slikama 8 i 9 ilustrovan je rad algoritama za kompenzaciju zasićenja ST u slučaju AC saturacije (Slika 8), odnosno u slučaju DC+AC saturacije (Slika 9).

Sprovedena analiza pokazuje da bez obzira na prisustvo DC komponente struje kvara, oba algoritma za kompenzaciju zasićenja ST donose značajno poboljšanje u odnosu na slučaj kada se kompenzacija zasićenja ST ne primenjuje. Međutim, analizom Slika 9, može se zaključiti da u analiziranom slučaju, efektivna vrednost struje dobijena primenom algoritma koji za estimaciju inicijalnog fluksa koristi metodu najmanjih kvadrata, sporije dostiže tačnu efektivnu vrednost struje. Uzrok tome leži u činjenici da u analiziranom slučaju, zasićenje ST nastaje veoma rano te je u periodu bez zasićenja na raspolaganju mali broj odbiraka. Iz tog razloga, primenom metode najmanjih kvadrata se ne može tačno estimirati inicijalni fluks, što se dalje odražava na tačnost estimirane efektivne vrednosti struje.



Slika 8. AC saturacija: (a)Primarna i sekundarna struja; (b)Efektivna verdnost struje estimirana korišćenjem primarne struje, kompenzovane sekundarne struje (MNK i DM) i nekompenzovane sekundarne struje



Slika 9. DC+AC saturacija: (a)Primarna i sekundarna struja; (b)Efektivna verdnost struje estimirana korišćenjem primarne struje, kompenzovane sekundarne struje (MNK i DM) i nekompenzovane sekundarne struje

IV. ZAKLJUČAK

Pojava zasićenja strujnog transformatora izaziva deformaciju sekundarne struje strujnog transformatora, što može dovesti do nepravilnosti u radu uređaja relejne zaštite. Razvojem digitalne releje zaštite pruža se mogućnost da se primenom određenih algoritama na sekundarnu struju strujnog transformatora izvrši kompenzacija zasićenja ST.

U ovom radu analizirana je gupa algoritama za kompenzaciju zasićenja ST koja se bazira na primeni ekvivalentne šeme i karakteristike magnećenja ST. Algoritmi su testirani u MATLAB/Slimulink programskom okruženu. Analizirana je tačnost razmatranih algoritama pri različitim nivoima sauracije ST, kao i uticaj DC komponente struje kvara.

Sprovedene analize pokazuju da se razmatranim algoritmima postižu povoljni rezultati, odnosno da se njihovom primenom u velikoj meri kompenzuje zasićenje ST. U svim razmatranim slučajevima, postižu se značajno bolji rezultati u odnosu na slučaj kada se kompenzacija zasićenja ST ne primenjuje. S druge strane, sprovedena testiranja pokazuju da u pojedinim slučajevima razmatrani algoritmi ne uspevaju da potpuno kompenzuju zasićenje ST, te da je neophodno unaprediti pouzdanost ovakvih algoritama.

REFERENCE

[1] Hong, Y.Y., Chang-Chian, P.C.: 'Detection and correction of distorted current transformer current using wavelet transform and artificial intelligence', IET Gener. Transm. Distrib., 2008, 2, (4), pp. 566–575

[2] Khorashadi-Zadeh, H., Sanaye-Pasand, M.: 'Correction of saturated current transformers secondary current using ANNs', IEEE Trans. Power Deliv., 2006, 21, (1), pp. 73–79

[3] Erenturk, K.: 'ANFIS-based compensation algorithm for current-transformer saturation effects', IEEE Trans. Power Deliv., 2009, 24, (1), pp. 195–201

[4] El-Naggar, K., Gilany, M.: 'A discrete dynamic filter for detection and compensating CT saturation', Elect. Power Syst. Res., 2007, 77, (5-6), pp. 527–533

[5] Li, F., Li, Y., Aggarwal, R.K.: 'Combined wavelet transform and regression technique for secondary current compensation of current transformers', IEE Proc., Gener. Transm. Distrib., 2002, 149, (4), pp. 497–503

[6] Ji, T.Y., He, Q., Shi, M.J., et al.: 'CT saturation detection and compensation using mathematical morphology and linear regression'. 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Asia (ISGT-Asia), Melbourne, VIC, 2016, pp.1054–1059

[7] Kang, Y.C., Kang, S.H., Park, J.K., et al.: 'Development and hardware implementation of a compensating algorithm for the secondary current of current transformers', IEE Proc., Electr. Power Appl., 1996, 143, (1), pp. 41–49

[8] Locci, N., Muscas, C.: 'A digital compensation method for improving current transformer accuracy', IEEE Trans. Power Deliv., 2000, 15, (4), pp. 1104–1109

[9] Kang, Y.C., Lim, U.J., and Kang, S.H.: 'Compensating algorithmsuitable for use with measurement type current transformers forprotection', IEE Proc., Gen. Trans. Distrib., 2005,152, (6), pp. 880–890

[10] Hajipour, E., Vakilian, M., Sanaye-Pasand, M.: 'Current-transformer saturation compensation for transformer differential relays', IEEE Trans. Power Deliv., 2015, 30, (5), pp. 2293–2302

[11] Lee, D.-G., Kang, S.-H., Nam, S.-R.: 'Phasor estimation algorithm based on the least square technique during ct saturation', J. Electr. Eng. Technol., 2011, 6, (4), pp. 459–465

[12] Shi, D. Y., Buse, J., Wu, Q.H., Jiang L.: 'Fast compensation of current transformer saturation', 2010 IEEE Innovative Smart Grid Technologies – Europe (ISGT-Europe), Gothenburg, Sweden, October 2010, pp.1–7

AUTHORS

First Author – Nenad Belčević, dipl. inž. el. i rač, belcevic92@gmail.com.

Second Author – prof. dr Zoran Stojanović, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Beogradu, stojanovic@etf.bg.ac.rs.

Correspondence Author – Nenad Belčević, belcevic92@gmail.com, +38164400556

Toplotno bilansiranje i povećanje efikasnosti korišćenja toplotne energije vrtića „Zeka“ u gradu Kragujevcu, Srbija

The Thermal Energy Audit and Increasing of Efficiency of Thermal Energy Use in the Kindergarten “Zeka” in the City of Kragujevac, Serbia

Davor Jovanović[*], Dušan Gordić[**], Jelena Nikolić[**], Nebojša Jurišević[**], Mladen Josijević[**]

[*]Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac, davorjovanovic94@gmail.com
[**]Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, Sestre Janjić 6, 34000 Kragujevac

Apstrakt **-** U radu je izvršeno toplotno bilansiranje vrtića „Zeka“, koji se nalazi na teritoriji grada Kragujevca. Prikazani su osnovni podaci o objektu, uz osvrt na sistem grejanja, kao i klimatski uslovi lokacije na kojoj se objekat nalazi. Analizom potrošnje toplotne energije, izvršene primenom softverskog paketa „URSA - Građevinska fizika 2“, utvrđeno je da objekat pripada energetskom razredu „G“, što ukazuje da koeficijenti prelaza toplote ne zadovoljavaju opsege propisane Pravilikom o energetskoj efikasnosti zgrada. Shodno tome, predložene su mere za povećanje efikasnosti korišćenja toplotne energije u posmatranom objektu. Pored toga, za svaku od predloženih mera izvršena je tehno-ekonomska analiza, koja uključuje određivanje početne investicije za svaku predloženu meru, kao i prost period otplate. Primenom odgovarajućih mera na posmatrani objekat zaključeno je da se može ostvariti ušteda potrošnje toplotne energije od gotovo 79%.

Ključne reči - energetska efikasnost, energetski razred, energetsko bilansiranje, vrtić, period otplate

Abstract **-** This paper shows the thermal energy audit of the kindergarten "Zeka", located in the territory of the city of Kragujevac, Serbia. Data of the analyzed building, with an emphasis on the heating system, as well as the climate conditions of the location are shown. Analysis of the thermal energy use, done by implementing a software package "URSA-građevinska fizika 2", shows that the analyzed building belongs to the "G" energy efficiency level, which indicates that the heat transfer coefficients are not in the range defined by the Rule book of energy efficiency for buildings. Consequently, the energy conservation measures for increasing the efficiency of thermal energy use are proposed. Besides, for each measure, the techno-economic analysis was done, which includes determination of the investment costs, as well as the payback period. By implementing the appropriate measures in the analyzed building, it was concluded that thermal energy savings of almost 79% can be achieved.

Index Terms - energy efficiency, energy efficiency level, energy audit, kindergarten, payback period

I. UVOD

Dostizanje termičkog komfora kod ljudi predstavlja jedan od najvažnijih aspekata kada je reč o konceptu ugodnog života [1]. Za postizanje uslova termičkog komfora potrebno je ostvarivanje optimalnih vrednosti svih faktora ugodnosti, poput srednje temperature, relativne vlažnosti i brzine strujanja vazduha. Međutim, u većini zgrada je i dalje najzastupljenija praksa da se od pomenutih parametara prati jedino tempearatura vazduha, na osnovu koje se određuje energija potrebna za zagrevanje objekata [2]. Kako su deca posebno osetljiva na temperaturne promene, jer neodgovarajuće temerature mogu da izazovu zdravstvene probleme, ali i probleme sa koncentacijom i smanjenom sposobnošću učenja [3], održavanje termičkog komfora u vrtićima predstavlja veoma važan zadatak pri projektovanju ovih javnih ustanova. Prema Todoroviću, unutrašnja projektna temperatura koju treba održavati u vrtićima i u dečijim spavaonicama je 20°C, dok se u jaslicama predlaže temperatura od 22°C [4]. Unapređenje energetskih performansi omotača zgrada vrtića ima veoma značajan uticaj i na povećanje unutrašnjeg komfora [5]. Takođe, povećanje energetske efikasnosti u postojećim obrazovnim institucijama veoma je značajno za smanjenje potrošnje energije na globalnom nivou, jer je utvrđeno da se u svim zemljama Evropske Unije za zagrevanje objekta potroši gotovo 68% od ukupno isporučene energije [2]. U prilog ovome govore istraživanja kojima je utvrđeno da se na teritoriji Engleske iz obrazovnih institucija

godišnje emituje i do 6.000.000 t ugljen-dioksida [6]. Detaljne analize potrošnje u obrazovnim institucijama u Americi pokazuju da se u zgradama ove namene godišnje potroši i do 47% od ukupno isporučene energije samo za procese grejanja [7]. U prikazu potrošnje energije u jednom ruskom vrtiću utvrđeno je da se u njemu godišnje potroši do 53% ukupno isporučene energije za proces grejanja i da se ovaj udeo može znatno smanjiti ukoliko se stolarija zameni energetski efikasnijom. U radu u kome je analizirana potrošnja u 15 obrazovnih institucija u Argentini, utvrđeno je da potrošnja u njima varira od 76,9 kWh/m^2 do 235 kWh/m^2 korisnog prostora. U briselskom regionalnom sertifikatu za nove zgrade vrtića predviđa se godišnja potrošnja od 190 kWh/m^2. U radu u kome su analizirali literaturni podaci o potrošnji u obrazovnim institucijama prikazano je da se najviše energije potroši u školama pariškog regiona (224 kWh/m^2 godišnje), dok je najmanja potrošnja energije zabeležena u zgradama ove namene u Italiji, među kojima je u jednom objektu zabeležena potrošnja od 10 kWh/m^2 godišnje [8]. Kao uzrok raznolikosti potrošnje u vrtićima i školama, pored razlika u karakteristikama samih objekata, takođe se navodi raznolikost njihovih ponuda, poput kantina, igrališta ili prostora za bavljenje sportom [9].

Zgrade postojećih vrtića u Srbiji su najčešće zastarele i boravak dece u njima predstavlja sociološki problem koji se ne sme zanemariti, jer ovakvi objekti obično ne ispunjavaju odgovarajuće propise. Čak 80% postojećih vrtića u Srbiji izgrađeno je pre više od 25 godina [5] i kao takvi troše značajnu količinu energije i uzrokuju visoku emisiju gasova sa efektom staklene bašte. Kako su troškovi poboljšanja energetske efikasnosti i dalje veoma visoki, cilj ovog rada je komparativni prikaz troškova i isplativosti ugradnje izolacije na elemente termičkog omotača objekta, kao prikaz mogućnosti ukupne uštede toplotne energije, sproveden na primeru vrtića „Zeka“ u Kragujevcu. Kako su objekti ove namene najčešće državno vlasništvo i za njihovo zagrevanje se svake godine izdvaja veliki deo novca iz državnog budžeta, analize ovog tipa mogu da posluže kao polazna osnova za razmatranja isplativosti ulaganja u rekonstrukcije postojećih objekata.

II. MATERIJAL I METOD RADA

Osnovne karakteristike i informacije o zgradi vrtića dobijene su na osnovu upitnika o energetskim sistemima objekta, razgovoru sa zaposlenim tehničkim osobljem, kao i izlaskom na teren radi prikupljanja podataka merenjem. Upitnik je uključivao informacije o karakteristikama i nameni zgrade, sistemima za snabdevanje i potrošnju energije i vode, kao i o postojanju mernih uređaja i opreme (senzori, merači, itd.). Na osnovu prikupljenih podataka pristupilo se analizi pri čemu su utvrđene sve nepravilnosti u potrošnji, definisano je kada dolazi do pojave najveće potrošnje energenata, kao i zavisnost potrošnje energije od spoljašnjih uslova. Određivanje termičkih i energetskih svojstava posmatranog vrtića sprovedeno je na osnovu karakteristika modela objekta, upotrebom softverskog paketa „URSA - Građevinska fizika 2“ [10]. Predlog mera za poboljšanje energetske efikasnosti baziran je prema Pravilniku o energetskoj efikasnosti zgrada [11], pri čemu je koeficijent prolaza toplote svakog elementa omotača zgrade, nakon rekonstrukcije, odgovarao vrednostima prikazanim u pravilniku, uz unapređenje energetskog razreda za bar jedan energetski nivo. Za svaku predloženu meru određen je i prost period otplate na osnovu formule:

$$PBP = \frac{IIM}{NACI} \quad (1)$$

Gde su:
PBP [god] – period otplate;
IIM [€] – inicijalna investicija;
NACI [€/god] – novčana ušteda.

Novčana ušteda se može odrediti primenom izraza:

$$NACI = ES \cdot EC \quad (2)$$

Gde su:
ES [kWh/god]– godišnja ušteda toplotne energije;
EC [€/kWh]- cena toplotne energije.

A. Opis analiziranog objekta

Vrtić „ Zeka“ , predmet analize ovog rada, nalazi se u gradskoj opštini Stari grad, naselju Erdoglija, u Kragujevcu. Zgrada vrtića izgrađena je 1978. godine i spada u srednje-teški tip gradnje. Ukupna korisna površina prostorija je 852,12 m^2 . Građevinski materijali objekta prikazani su u tabeli 1.

Tabela 1. *Građevinski materijali ugrađeni u objekat* [12]

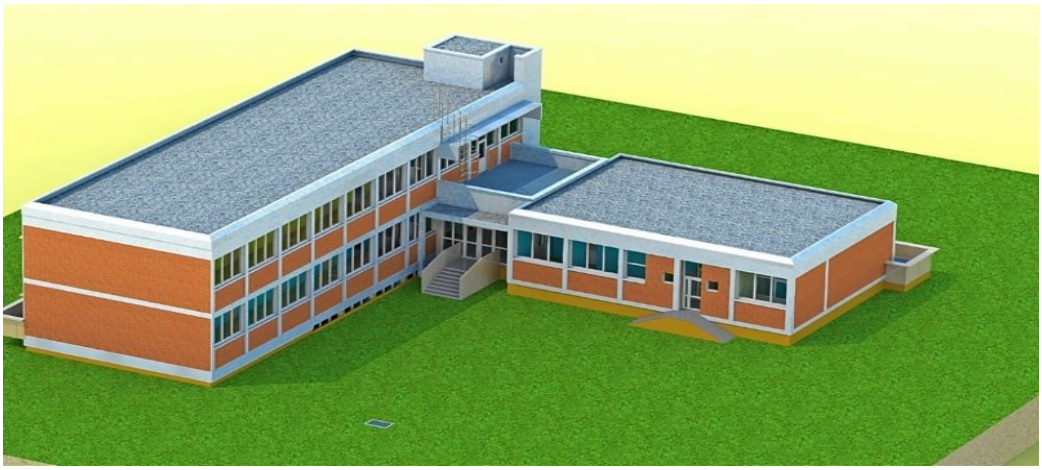
Konstrukcija	Materijal
Krov	Šljunak, aluminijumska folija, cement, hidroizolacija, armirani beton, bitumoperlit, poliuriten, TM blokovi, malter
Temelj	Cement, armirani beton, hidroizolacija, nabijeni beton, šljunak
Međuspratna konstrukcija	Parket, cementni koš, hartija, pluta, TM tavanica, malter
Pod (kostrukcija, pokrivač, obloga)	Beton, parket/teraco pločice
Spoljni zidovi	Opeka sa fugovanim spojnicama
Stolarija	Drvo (smrka)

Objekat se sastoji od dve građevinske celine, povezane središnjim holom, u kojima se realizuje vaspitno-obrazovni rad. U vrtiću se nalazi 31 zaposleno lice, dok u njemu boravi 198 dece. Radno vreme objekta je od 05:30 do 20:00, s tim što nakon 16^h u vrtiću boravi pripremna predškolska grupa od 30 dece.

Na slici 1 prikazan je 3D model zgrade vrtića, projektovan u softverskom paketu „SOLIDWORKS“.

Sistem grejanja je daljinski, sa toplotnom podstanicom unutar objekta. U objektu je projektovano toplovodno grejanje sa prinudnom cirkulacijom, za šta su predviđene dve cirkulacione pumpe. U primarnom sistemu temperatura fluida je 140/80°C,

dok je u sekundarnom 90/70°C. Kao grejna tela koriste se liveni člankasti radijatori (ukupno 61), koji su najčešće postavljeni ispod prozora i odzračuju se automatski uz pomoć odzračnih ventila. Neophodno je napomenuti da podstanica do sada nikada nije rekonstruisana, kao i da se usluge daljinskog grejanja plaćaju tokom cele godine prema fiksnoj ceni po kvadratu korisnog prostora vrtića.



Slika 1. Prikaz 3D modela analiziranog vrtića „Zeka“

Sistem hlađenja je izveden lokalno, primenom pojedinačnih klima uređaja, smeštenih u prostorima za dečiji boravak. Podešavanje temperature i radnih parametra moguće je izvršiti prenosivim daljinskim upravljačem, a temperatura se reguliše sobnim termostatom.

Ventilacija u prostorijama je prirodna (infiltracija kroz prozore).

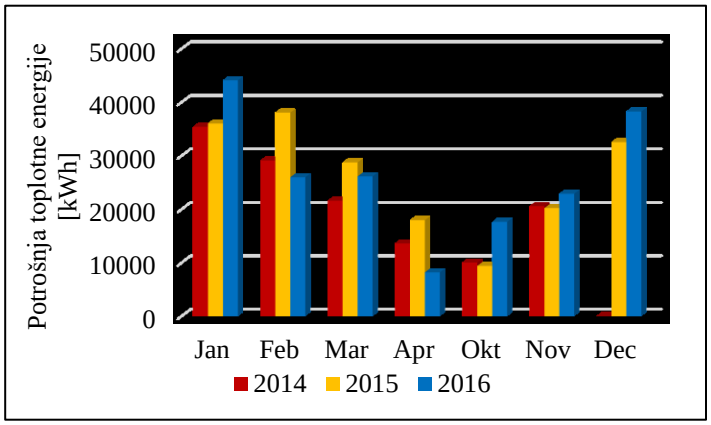
Vrtić je priključen na gradsku vodovodnu, kanalizacionu i električnu mrežu. Objekat pripada kategoriji široke potrošnje električne energije, sa dvotarifnim merenjem. Sanitarna voda se zagreva primenom električne energije, tokom cele godine i koristi se u sanitarnim prostorijama, kao i prostorijama za pripremu hrane i pranje posuđa, odnosno veša.

B. Potrošnja toplotne energije u analiziranom objektu

Kako je u prethodnom tekstu već napomenuto, građevinski objekti vrtića se zagrevaju sistemom daljinskog grejanja, koji je izveden bez podele na zone. Izolacija toplovoda mineralnom vunom (debljine 30mm), u oblozi od pocinkovanog lima, je ugrađena samo u podrumu. Na osnovu usmenih saopštenja tehničkog osoblja u vrtiću, ventili svih radijatora su uvek otvoreni, pri čemu se troši više toplotne energije nego što je neophodno i postoji mogućnost za poboljšanje i ovog segmenta u posmatranom objektu.

Prema podacima dobijenim iz odeljenja za energetsku efikasnost skupštine grada Kragujevca, specifična potrošnja toplotne energije po jedinici zapremine grejanog dela objekta iznosi 66,52 kWh/m^3, odnosno 5,18 €/m^3, a po jedinici površine iznosi 196,38 kWh/m^2, odnosno 15,3 €/m^2. Grafik mesečne raspodele potrošnje toplotne energije za period 2014-2016 prikazan je na slici 2.

Uočava se da je najveća potrošnja toplotne energije zabeležena u januaru tokom 2016. godine sa približno utrošenih 44.070 kWh toplotne energije. Razlog povećane potrošnje leži u činjenici da je navedeni mesec bio među najhladnijim tokom prethodnih deset godina. U svakoj posmatranoj godini, najniža potrošnja se beleži tokom aprila i oktobra, mesecima koje predstavljaju prelazne periode i u kojima vladaju više temperature. Tokom decembra 2014. godine nema podataka o potrošnji toplotne energije, jer toplana najverovatnije nije uspela da obezbedi potrebnu količinu toplote, ili uopšte nije snabdevala posmatrani objekat toplotnom energijom. Ovakvim režimom grejanja se prosečno u atmosferu emituje 83.700 kg ugljen-dioksida godišnje.



Slika 2. Potrošnja toplotne energije posmatranog objekta [13]

Analizom podataka o potrošnji toplotne energije, kao i računa, na kojima se uviđa da je prosečno za grejanje tokom godine potrebno izdvojiti 14.500 €, dolazi se do jedinične cene od 0,09 €/kWh.

C. Određivanje energetskog razreda objekta

Nakon izvršene analize u programu „URSA – Građevinska fizika 2“, dobijen je rezultat da posmatrani objekat odaje oko 194 kWh/m^2 toplotne energije na godišnjem nivou, što ga svrstava u najniži energetski razred (u daljem tekstu ER) „G“ (razmatran je ER u kategoriji zgrada namenjenih obrazovanju i kulturi). Bitno je napomenuti da je, na osnovu sprovedenih proračuna, utvrđeno da nijedan element stolarije (staklena vrata i prozori), kao ni

termičkog omotača posmatranog objekta, ne zadovoljava vrednost koeficijenta prolaza toplote propisanu pravilnikom [11] (videti tab. 2).

Tabela 2. *Prikaz trenutne vrednosti koeficijenta prolaza toplote i njene maksimalne dozvoljene vrednosti*

Element	Trenutna vrednost koef. U [W/m^{2}K]	Maksimalna dozvoljena vrednost koef. U [W/m^{2}K]
Termički omotač	1,7 ÷ 3,72	0,4
Prozori	3,5	1,5
Vrata	5	1,6

Na osnovu podataka prikazanih u tabeli uviđa se da se izolacijom termičkog omotača, kao i zamenom dotrajale stolarije može uštedeti značajna količina toplotne energije.

Napominje se da će se u proračunima isplativosti posmatrati redukovana potrebna energija za grejanje, usled prekida grejanja u trajanju od 9 časova dnevno, koja iznosi 164.937,82 kWh na godišnjem nivou.

III. PREGLED MERA ZA UNAPREĐENJE ENERGETSKE EFIKASNOSTI OBJEKTA, REZULTATI I DISKUSIJA

U ovom delu rada komparativno će biti prikazani različiti slučajevi izolacije različitih elemenata termičkog omotača (pod, tavanica, međuspratna konstrukcija, krov i zidovi), kao i zamena dotrajale stolarije. Za svaku predviđenu meru prikazani su ukupni troškovi investicije, koji uključuju cenu elemenata, troškove montaže i demontaže, kao i period otplate.

A. Zamena stolarije

S obzirom da nijedan prozor ni vrata posmatranog objekta ne ispunjavaju zahteve propisane pravilnikom, predlaže se ugradnja stolarije prikazane u tabeli 3, proizvođača "Sunce Marinković doo" [14].

Tabela 3. *Podaci o stolariji za rekonstrukciju*

Element	Prethodni U_w [W/m^{2}K]	U_w nakon rekonstukcije [W/m^{2}K]	Ukupna površina [m^2]
Prozori	3,5	1÷1,2	248,225
Vrata	5	1,1	65,815

Nakon rekonstrukcije postojećih prozora, godišnja redukovana potrebna energija za grejanje je 113.693,01 kWh godišnje, što analizirani vrtić svrstava u ER „E". Troškovi investicije, predviđena ušteda energije, kao i prost period otplate prikazani su u tabeli 4.

Tabela 4. *Ušteda novca na godišnjem nivou i period otplate početne investicije zamene stolarije na posmatranom objektu*

Početna investicija sa PDV-om:	55.211,236 €
Ušteda energije za grejanje na godišnjem nivou:	51.244,81 kWh
Ušteda novca na godišnjem nivou:	4.612,03 €
Period otplate:	≈12 godina

Iz navedene tabele se može videti da je potrebno približno 12 godina kako bi se isplatila početna investicija rekonstrukcije stolarije u posmatranom objektu. Proizvođač za stolariju obezbeđuje garanciju u trajanju od 5 godina, a životni vek iste je oko 20 godina.

B. Izolacija termičkog omotača objekta (bez krova)

U posmatranom objektu nijedan spoljni zid ne ispunjava zahteve propisane pravilnikom o energetskoj efikasnosti. U tabeli 5 date su debljine slojeva i koeficijent prolaza toplote pre i nakon izvršene rekonstrukcije objekta. Nakon unošenja pomenutih podataka u program „URSA – Građevinska fizika 2", dobijen je ER „E".

Tabela 5. *Podaci o slojevima kontaktnih fasada pre i posle rekonstrukcije objekta*

	Trenutno stanje			**Nakon rekonstrukcije**		
Tip zida (završni sloj)	**Opeka 25cm**	**Opeka 30cm**	**Natur beton**	**Opeka 25cm**	**Opeka 30cm**	**Natur beton**
Sloj 1:	Prod. krečni malter (2cm)	Prod. krečni malter (2cm)	Beton (2cm)	Prod. krečni malter (2cm)	Prod. krečni malter (2cm)	Beton (2cm)
Sloj 2:	Puna opeka (25cm)	Puna opeka (30cm)	Arm. beton (20cm)	Puna opeka (25cm)	Puna opeka (30cm)	Arm. beton (20cm)
Sloj 3:	-	-	Cementni malter (2cm)	Lepak	Lepak	Cementni malter (2cm)
Sloj 4:	-	-	-	Kamena vuna (10cm)	Kamena vuna (10cm)	Lepak
Sloj 5:	-	-	-	Lepak, mrežica, tiplovi	Lepak, mrežica, tiplovi	Kamena vuna (10cm)
Sloj 6:	-	-	-	Akrilni malter (2cm)	Akrilni malter (2cm)	Lepak, mrežica, tiplovi
Sloj 7:	-	-	-	-	-	Akrilni malter (2cm)
Prolaz toplote [W/m^{2}K]:	1,916	1,701	3,715	0,301	0,295	0,326
Površina [m^2]:	188,39	294,43	77,04	188,39	294,43	77,04

U tabeli 6 dati su ukupna površina, troškovi investicije, isplativost na godišnjem nivou, kao i period otplate predložene mere rekonstrukcije, odnosno izolacije spoljnih zidova posmatranog objekta.

Tabela 6. *Ušteda novca na godišnjem nivou i period otplate početne investicije izolacije na posmatranom objektu*

Ukupna površina spoljnih zidova:	559,86 m^2
Početna investicija sa PDV-om:	12.070,58 €
Ušteda energije za grejanje na godišnjem nivou:	54.222 kWh
Ušteda novca na godišnjem nivou:	4.878 €
Period otplate:	≈ 2,5 godina

Iz tabele 6 se uočava da se početna investicija isplati u roku od 2,5 godine, dok se u novčanom smislu godišnje uštedi približno 40% početne investicije.

C. Izolacija termičkog omotača objekta (sa krovom)

U ovom slučaju predložena mera će se odnositi na izolaciju kontaktne fasade i krova. Maksimalni koeficijent prolaza toplote, za ravne krovove iznad grejanog prostora, po pravilniku za energetsku efikasnost je U_{max} = 0,2 W/m^2K, dok je trenutno stanje krovova posmatranog objekta U = 0,341 W/m^2K za spratni i prizemni deo objekta, a U = 0,339 W/m^2K za međuprostor spratnog i prizemnog dela objekta. Nakon izvršene rekonstrukcije, objekat pripada ER "E".

U tabeli 7 dati su ukupna površina, troškovi investicije, isplativost na godišnjem nivou, kao i period otplate predložene mere rekonstrukcije, odnosno izolacije spoljnih zidova i ravnog krova posmatranog objekta.

Tabela 7. *Ušteda novca na godišnjem nivou i period otplate početne investicije izolacije termičkog omotača objekta sa krovom*

Ukupna površina krova:	511,79 m^2
Investicija za rekonstrukciju krova:	12.144,78 €
Ukupna površina rekonstrukcije:	1.071,65 m^2
Ukupna početna investicija sa PDV-om:	24.215,36 €
Ušteda energije za grejanje na godišnjem nivou:	58.468 kWh
Ušteda novca na godišnjem nivou:	5.262,12 €
Period otplate:	≈ 4,6 godina

Može se primetiti da se energetskom sanacijom krova značajno povećava period otplate početne investicije. Tačnije, ukoliko se krov izoluje, produžava se period otplate za približno 2,1 godinu u odnosu na slučaj kada se samo vrši izolacija kontaktne fasade. To je iz razloga što je investicija u izolaciju krova približna investiciji izolacije kontaktnih fasada, ali se uštedi samo oko 4.000 kWh toplotne energije godišnje, odnosno oko 400 €.

D. Ugradnja stolarije i izolacija termičkog omotača objekta (bez krova)

Nakon kombinovane ugradnje izolacije na termičkom omotaču i zamene prozora, postoji mogućnost za ostvarivanje uštede značajne količine toplotne energije i ostvarivanja ukupne godišnje potrošnje (57.356 kWh) koja odgovara ER "C".

Tabela 8. *Period otplate početne investicije izolacije termičkog omotača objekta sa ugrađenom stolarijom*

Početna investicija sa PDV-om:	54.535,55 €
Ušteda energije za grejanje na godišnjem nivou:	107.581,96 kWh
Ušteda novca na godišnjem nivou:	9.682,38 €
Period otplate:	≈ 5,6 godina

Iz tabele 8 se može videti da je period otplate početne investicije 5,6 godina od trenutka rekonstrukcije kontaktne fasade i stolarije. Godišnje se uštedi 107.581.96 kWh toplotne energije, odnosno 9.682,38 € (prema prosečnoj ceni od 0,09 €/kWh).

E. Ugradnja stolarije i izolacija termičkog omotača (sa krovom)

Nakon izvršene rekonstrukcije koja uključuje izolaciju kontaktne fasade i krova objekta, uz ugradnju stolarije, objekat pripada ER „C". U ovom slučaju, nakon dodate rekonstrukcije krova, godišnja redukovana potrebna energija za grejanje iznosi 47.869,56 kWh. U tabeli 9 dati su podaci o godišnjoj uštedi toplotne energije, uštedi novca, iznosu početne investicije i periodu otplate.

Tabela 9. *Period otplate početne investicije izolacije termičkog omotača objekta i krovova i sa ugrađenom stolarijom*

Početna investicija sa PDV-om:	66.680,33 €
Ušteda energije za grejanje na godišnjem nivou:	117.068,26 kWh
Ušteda novca na godišnjem nivou:	10.536,14 €
Period otplate:	≈ 6,33 godina

Iz tabele 9 se može videti da period otplate početne investicije iznosi približno 6,33 godine od trenutka rekonstrukcije kontaktne fasade, stolarije i krovova. Potencijalna godišnja ušteda iznosi 117.068,26 kWh toplotne energije, odnosno 10.536,14 €. Takođe, može se primetiti da se izolacijom krova produžava vreme otplate za približno 9 meseci, što je skoro isti vremenski interval otplate početnih investicija u odnosu na prethodni slučaj (bez krova).

F. Rekonstrukcija poda (prizemnog dela) i međuspratne konstrukcije (spratnog dela) analiziranog objekta kao dodatak na sve prethodne mere

Nakon ugradnje 8 i 7 cm kamene vune u pod prizemnog dela posmatranog objekta, kao i u međuspratnu konstrukciju iznad negrejanog dela podruma (sa uključenim skloništem), respektivno, objekat pripada ER "C". U poređenju sa prethodno analiziranim slučajem, potrebno je manje redukovane energije za grejanje tokom godine (34.531,08 kWh/god), što je 13.338,48 kWh manje nego kada nije ugrađena izolacija. Takođe, treba primetiti da je sa 40,52 kWh/m^2 potrebne toplotne energije godišnje, posmatrani objekat udaljen samo 3,52 kWh/m^2 od energetskog razreda „B".

U tabeli 10 dati su podaci o odgovarajućim površinama posmatranih konstrukcija, ceni njihove sanacije, godišnjoj uštedi

toplotne energije, uštedi novca, ukupnom iznosu početne investicije i periodu otplate.

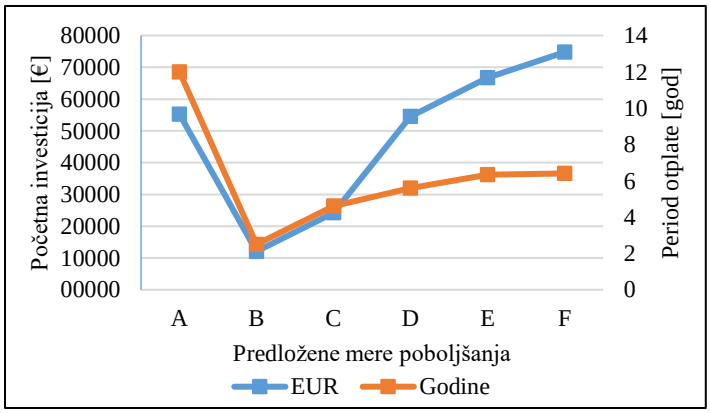
Tabela 10. *Ušteda novca na godišnjem nivou i period otplate početne investicije predložene mere*

Površina poda prizemnog dela	217,66 m^2
Površina međuspratne konstrukcije spratnog dela	204,79 m^2
Investicija za rekonstrukciju poda prizemnog dela:	6.159,78 €
Investicija za rekonstrukciju međuspratne konstrukcije spratnog dela:	1.925,03 €
Ukupna početna investicija sa PDV-om:	74.765,14 €
Ušteda energije za grejanje na godišnjem nivou:	130.406,74 kWh
Ušteda novca na godišnjem nivou:	11.736,61 €
Period otplate:	≈ 6,4 godina

Može se primetiti da je period otplate početne investicije približno 6,4 godine od trenutka rekonstrukcije kontaktne fasade, stolarije, krova i poda prizemnog dela objekta, kao i međuspratne konstrukcije spratnog dela objekta. Godišnje se uštedi 130.406,74 kWh toplotne energije, odnosno 11.736,61 € prema prosečnoj ceni od 0,09 €/kWh. Takođe, može se primetiti da se izolacijom poda i međuspratne konstrukcije skraćuje vreme otplate u odnosu na prethodni slučaj za 4,7 godina.

G. Uporedna analiza predloženih mera

Na slici 3 dat je uporedni prikaz vrednosti početnih investicija, kao i perioda otplate prethodno opisanih šest predloženih mera.



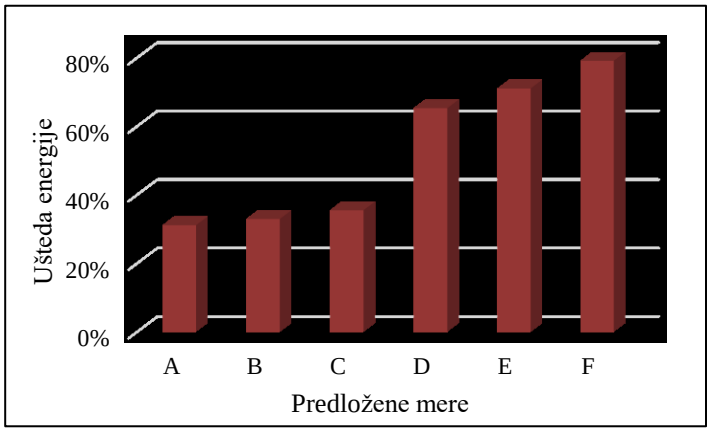
Slika 3. Uporedni prikaz početnih investicija

Sa slike iznad se može primetiti da je izolacija termičkog omotača objekta bez krova (slučaj B) predložena mera sa najnižom početnom investicijom (12.070,58 €), kao i sa najnižim periodom otplate (približno 2,5 godina). Sa druge strane, najviša investicija se odnosi na rekonstrukciju poda prizemnog dela i međuspratne konstrukcije, zajedno sa izolacijom krova, termičkog omotača i ugradnjom stolarije u posmatrani objekat (slučaj F) i iznosi oko 74.765,14 €, međutim, period otplate kod navedene mere (približno 6,4 godina.) niži je nego u slučaju samo zamene stolarije (slučaj A), kod kog je period otplate približno 12 godina. Takođe, može se primetiti da se pri izolovanju krova u slučaju E početna investicija povećava za oko 12.145 €, dok se period otplate, takođe, produžava za 9 meseci.

Ušteda novca na godišnjem nivou je najviša u slučaju F i iznosi oko 11.737 €, dok je najniža u slučaju A (kada se zameni celokupna stolarija u objektu), pri čemu ona iznosi oko 4.612 €.

Na slici 4 dat je prikaz procentualne uštede toplotne energije predloženih mera u odnosu na potrošnju toplotne energije pri trenutnom energetskom stanju vrtića (164.937,82 kWh) na godišnjem nivou.

Sa slike 4 se može primetiti da je najviša procentualna ušteda zabeležena primenom poslednje predložene mere (slučaj F), odnosno, primenom izolacije na celokupni omotač objekta i zamenom kompletne stolarije, ta ušteda bi iznosila oko 79% u odnosu na trenutno izmerenu potrošnju toplotne energije.



Slika 4. Procentualna ušteda energije na godišnjem nivou nakon predloženih mera

U slučaju zamene celokupne stolarije u posmatranom objektu (slučaj A) ostvaruje se ušteda od oko 31%, a slična ušteda se ostvaruje i u slučajevima B (32,87%) i C (35,45%), odnosno, pri ugradnji izolacije sa i bez krova, respektivno. Tek nakon kombinovane ugradnje stolarije i izolacije termičkog omotača ostvaruju se godišnje uštede od preko 65%, odnosno, 65,23% u slučaju izolacije termičkog omotača (bez krovova) i ugradnje stolarije, 70,98% kada su uključeni krovovi zajedno sa termičkim omotačem i stolarijom, i na kraju, 79,06% u slučaju kada je izrađena kompletna izolacija sa uključenom rekonstrukcijom poda prizemnog dela i međuspratne konstrukcije spratnog dela posmatranog objekta.

IV. ZAKLJUČAK

Izrađena je komparativna analiza različitih mera predloženih u cilju smanjenja godišnje potrošnje toplotne energije u vrtiću „Zeka“, koji se nalazi na teritoriji grada Kragujevca. Izvršena analiza može poslužiti kao polazna osnova za razmatranja isplativosti ulaganja u rekonstrukciju analiziranog vrtića. Analize su sprovedene numerički, korišćenjem softvera za energetsko bilansiranje objekata „URSA – Građevinska fizika 2“. Cilj rada je sprovođenje preliminarne analize u cilju ispitivanja

mogućnosti za poboljšanje energetske efikasnosti objekta, odnosno, smanjenje potrošnje toplotne energije. Predstavljena je preliminarna analiza potrošnje toplotne energije u posmatranom objektu, koja prema trenutnim podacima iznosi približno 164.937,82 kWh na godišnjem nivou. Primenom različitih mera za poboljšanje, kao što je zamena celokupne stolarije u posmatranom objektu, izolacija termičkog omotača analiziranog objekta sa krovom i rekonstrukcijom poda (prizemni deo vrtića) i međuspratne konstrukcije (spratni deo vrtića) mogu se ostvariti uštede od 31 do nešto više od 71%. Takođe, u zavisnosti od predložene mere, period otplate početne investicije se kreće od 2,5 do približno 12 godina, nakon izvršenih odgovarajućih rekonstrukcija.

ZAHVALNICA

Ovaj rad je nastao kao rezultat istraživanja na projektu III 42013 koje finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije.

LITERATURA

[1] D. Iniescu, *A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 79, pp. 1353–1379, Novembar 2017.

[2] D. Gajić, D. Stupar, B. Antunović, i A. Janković, *Determination of the energy performance indicator of kindergartens through design, measured and recommended parameters*, Energy and Buildings, vol. 204, p. 109511, Oktobar 2019.

[3] H. Yun, I. Nam, J. Kim, J. Yang, K. Lee, i J. Sohn, *A field study of thermal comfort for kindergarten children in Korea: An assessment of existing models and preferences of children*, Building and Environments, vol. 75, pp. 182-189, Maj 2014.

[4] B. Todorović, *Projektovanje postrojenja za centralno grejanje*. Beograd, Mašinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2005.

[5] M. Nikolic, A. Milojkovic, D. Stanković, V. Bogdanovic, i I. Mijailovic, *Implementation models for energy recovery measures of existing kindergarten facilities in Serbia*, Tehnički vjesnik, Vol. 23, No. 2, pp. 437-446, April 2016.

[6] C. Filippin, *Benchmarking the energy efficiency and greenhouse gases emissions of school buildings in central Argentina*, Building and Environments, vol. 35, pp. 407-414, Jul 2000.

[7] National Renewable Energy Laboratory, *Advanced Energy Retrofit Guide - Practical Ways to Improve Energy Performance, K-12 Schools*, U.S. Department of Energy, 2013

[8] L. Dias Pereira, D. Raimondo, S. P. Corgnati, i M. Gameiro da Silva, *Energy consumption in schools – A review paper*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 40, pp. 911-922, Decembar 2014.

[9] J. Xing, J. Chen, i J. Ling, *Energy consumption of 270 schools in Tianjin, China*, Frontiers in Energy, vol. 9, no. 2, pp. 217-230, Jun 2015.

[10] *Ursa – Građevinska fizika,* dostupno: https://www.ursa.rs/softver-gradevinska-fizika, poslednja poseta: 2.12.2019.

[11] *Pravilnik o energetskoj efikasnosti zgrada*, Službeni glasnik 061/2011, Ministarstvo građevinarstva, saobraćaja i infrastrukture, 2011.

[12] Lj. Živojnović, "Projekat kombinovane dečije ustanove u Erdogliji", Preduzeće za inženjering i projektovanje, Kragujevac, 1979, (neobjavljeno).

[13] D. Gordić, V. Šušteršič, D. Končalović, V. Vukašinović, D. Živković, N. Jurišević, M. Josijević, A. Milovanović, i Z. Kovačević, *Program energetske efikasnosti grada Kragujevca za period 2018-2020 godina*, Kragujevac, Fakultet inženjerskih nauka Univerziteta u Kragujevcu, 2017/18.

[14] N. Vasiljević, "Ponuda br. P8-23533", Sunce Marinkovic d.o.o., Kragujevac, 2018, (neobjavljeno).

Modifikacija modela hidroelektricne centrale preko izmerenih odziva realne centrale

Modification of Nonlinear Hydro Power Plant Models Using Real Plant Measurements

Darko Babunski[*], Pance Bogoevski [**], Emil Zaev[*], Atanasko Tuneski[*]

[*] Faculty of Mechanical Engineering, "Ss Cyril and Methodius" University in Skopje
Karpos II b.b. P.O. Box 464 1000 Skopje, R. Macedonia
[**] Power Plants of N. Macedonia, 11. October 9, 1000 Skopje

Abstract **-** Simulation models of Hydro Power Plant (HPP) are complex and highly nonlinear control system, composed of tunnel, penstock, surge tank, hydro turbine and hydroelectrical governor models. Hydro Power Plant (HPP) models recommended by the IEEE working group is revised and is used for simulation of the transient and static response of the system of hydro turbine and auxiliary equipment. Verification was made using measurements of static and transient responses from real HPP. Modification of simulation model is made after comparison of the simulated response of the HPP simulation model and real response of the HPP with PID controller. Modification and adjustment of the two parameters of the model is made to adjust the static response of the model without affecting transient response and with consideration of smallest frequency and power error.

Index Terms - Hydro Power Plant, Hydro Turbine, Nonlinear Model, Verification

Apstrakt **-** Simulacijski modeli hidroelektrane (HE) su kompleksni i visoko nelinearni upravljacki modeli i sastoje se od modela hidrauličnog tunela, pritisnog cevovoda, vodostana, hidraulične turbine i upravljačkog sistema. Modeli hidroelektrane (HE) preporučeni od strane IEEE radne grupe su revidirani i koriste se za simulaciju dinamičkog prelaznog i stacionarnog odziva hidro turbine sa pomocnom opremom. Verifikacija modela je napravljena pomoću merenja stacionarnog i prelaznog odziva realne HE. Modifikacija simulacijskog modela je napravljena preko uporedbe simuliranog odziva i realno merenih odziva HE sa upravljackim PID kontrolerom. Modifikacija i podesavanje dva parametra simulaciskog modela je ucinjeno preko podesavanja stacionarnog odziva modela i merenih odziva, bez da se utice na prelazne rezime odziva modela, uzimajuci u obzir najmanju gresku frekvencije i snage.

Ključne reči - hidroelektrana, hidraulicna turbina, nelinearni model, verifikacija

I. INTRODUCTION

The requests of mathematical model of hydraulic plants including hydraulic turbine, penstock, unrestricted head and tail race, large or no surge tank and governor of hydraulic turbine are, to assure large transient stability program simulation, isolated system operation, system restoration after brake up, load rejection, load acceptance, water hammer dynamics and optimal speed control. In this paper are used for simulation both linear and non-linear mathematical models of hydraulic plants recommended by IEEE [1] and their modifications made with data from hydraulic turbine model acceptance measurements [2], which minimise the model generality, but maximise the similarity of model with real hydraulic turbine, on which model acceptance measurements is made. Non-linear models are required where speed and power changes are large, such as in islanding, load rejection and system restoration studies although there are great difficulties designing good governor of hydraulic turbines, because the hydraulic turbine is highly non-linear device which characteristics vary significantly with the unpredictable load on the unit. Such nonlinearities make the governor design a nontrivial task because governors designed for one operating condition may not work at all under other conditions. Because of that robust control law is designed, allowing the system hydraulic turbine-governor to work satisfactory at all working conditions, not only around working point. The significance of robust control design is to show how to overcome some of limitations of conventional governor design methods. Basic elements of a hydraulic turbine within the power system environment are shown on the block diagram of figure 1.

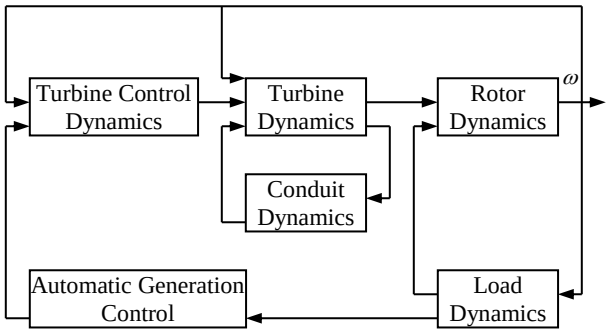


Figure 1. Block diagram of hydro prime mover and control

II. MATHEMATICAL MODEL OF HYDRAULIC TURBINE

Mathematical models of hydraulic turbine with penstock and without surge tank, modelled assuming incompressible fluid, recommended by IEEE [1], [4] are presented. Modelling of linear and non-linear mathematical model of hydraulic turbine is presented in following subsections.

A. Non-linear model of hydraulic turbine assuming incompressible flow

From the laws of momentum, the rate of change of flow in the conduit is:

$$\rho L \frac{dQ}{dt} = \left(H_s - H_l - H \right) A \rho g \qquad (1)$$

where Q is the volumetric flow rate, L is the penstock length and ρ is the mass density of water. The net force on the water can be obtained by considering the pressure head at either end of the conduit. On entry to the penstock the force on the water is simply proportional to the static head H_s whilst at the wicket gate it is proportional to the head H across the turbine. Due to friction effects in the conduit there is also a friction force on the water represented by the head loss H_l so that the net force on the water is represented with the right side of the equation 1. It is usual to normalise equation 1 to a convenient base. Although this base system is arbitrary the base head h_{base} is taken as the static head above the turbine, which is equal to H_s, whilst the base flow rate q_{base} is taken as the flow rate through the turbine with the gates fully open and the head at the turbine equal to h_{base}. Dividing both sides of equation 1 with product $h_{base} q_{base}$ gives:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{T_w}\left(1 - h_l - h\right) \qquad (2)$$

where $q = Q/q_{base}$ and $h = H/h_{base}$ are the normalised flow rates and pressure heads respectively and $T_w = \frac{L q_{base}}{A g h_{base}}$ is the water starting time. Theoretically T_w is defined as the time taken for the flow rate in the penstock to change by a value equal to q_{base} when the heat term in the brackets changes by a value equal to h_{base}. The head loss h_l is proportional to the flow rate squared and depends on the conduit dimensions and friction factor, but here it suffices to assume that $h_l = k_f q^2$ and can often be neglected. In turbine model, must be modelled hydraulic characteristics and mechanical power output. Firstly, the pressure head across the turbine is related to the flow rate to assuming the turbine can be represented by the normalized (per unit) valve characteristics:

$$q = c\sqrt{h} \qquad (3)$$

where c is the gate position between 0 and 1.

The power developed by the turbine is proportional to the product of the flow rate and the head and depends on the efficiency, which is taken into account with subtraction of the no load flow q_{nl} term from the actual flow.

$$P_m = A_t h\left(q - q_{nl}\right) = \frac{turbine\ \ power\ \left(MW\right)}{generator\ \ MVA\ rating} \qquad (4)$$

where the factor A_t is introduced to account the difference between turbine power and generator bases as shown in equation 4 and its values can be obtained by considering the operation of the turbine at rated load. It must be taken into account the damping effect that is dependent on gate opening, so that at any load condition the turbine power can be expressed by:

$$P_m = A_t h\left(q - q_{nl}\right) - Dc\Delta\omega \qquad (5)$$

where D is the damping coefficient. Equations 2, 3 and 5 constitute the non-linear turbine model shown on the figure 2 where the wicket gate position is the control variable.

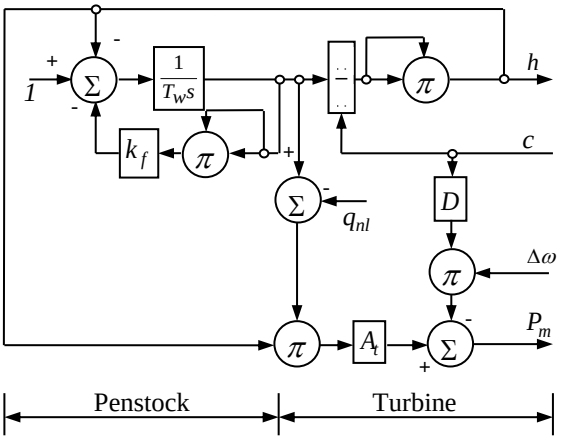


Figure 2. Non-linear model of hydraulic turbine - incompressible flow

B. Linear model of hydraulic turbine assuming incompressible flow

Linearised mathematical model of hydraulic turbine is used for small changes of mechanical power, and can be obtained by linearising equations 2, 3 and 4 about an initial operating point to give

$$\frac{d\Delta q}{dt} = -\frac{\Delta h}{T_w},\ \Delta q = \frac{\partial q}{\partial c}\Delta c + \frac{\partial q}{\partial h}\Delta h,\ \Delta P_m = \frac{\partial P_m}{\partial h}\Delta h + \frac{\partial P_m}{\partial q}\Delta q \tag{6}$$

Introducing the Laplace operator s and eliminating Δh and Δq from the equations gives

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta c} = \frac{\left[\frac{\partial q}{\partial c}\frac{\partial P_m}{\partial q} - T_w s\frac{\partial P_m}{\partial h}\frac{\partial q}{\partial c}\right]}{1 + T_w s\frac{\partial q}{\partial h}} \tag{7}$$

where the partial derivatives are

$$\frac{\partial q}{\partial h} = \frac{1}{2}\frac{c_0}{\sqrt{h_0}};\ \frac{\partial q}{\partial c} = \sqrt{h_0};\ \frac{\partial P_m}{\partial q} = A_t h_0;$$
$$\frac{\partial P_m}{\partial h} = A_t\left(q_0 - q_{nl}\right) \approx A_t q_0 \tag{8}$$

and the suffix "0" indicates an initial value. Substituting into equation 7 gives

$$\frac{\Delta P_m}{\Delta c} = A_t h_0^{3/2}\frac{1 - T_w' s}{1 + \frac{T_w'}{2}s} \tag{9}$$

where $T_w' = T_w\frac{q_0}{h_0} = \frac{L}{Ag}\frac{Q_0}{H_0}$. Typically T_w' is between 0.5 and 5 $[s]$.

This is the classic definition of water starting time but is dependent on the values of the head and the flow rate at the linearization point. It therefore varies with load. If required, the constant A_t can be absorbed into the gate position when it effectively converts the gate opening to per unit turbine power on the generator base. The block diagram of the linearized hydraulic turbine model is shown in figure 3.

Equation 9 describes an interesting and important characteristic of water turbines. For example, suppose that the position of the gate suddenly closed slightly so as to reduce the turbine power output. The flow rate in the penstock cannot change instantaneously so the velocity of the flow through the turbine will initially increase. This increase in water velocity will produce an initial increase in the turbine power until, after a short delay, the flow rate in the penstock has time to reduce when the power will also reduce. This effect is reflected in equation 9 by the minus sign in the numerator. This characteristic is shown in figure 3 where a step increase in the gate position Δc initially produces a rapid drop in power output. As the flow rate in the penstock increases the power output increases.

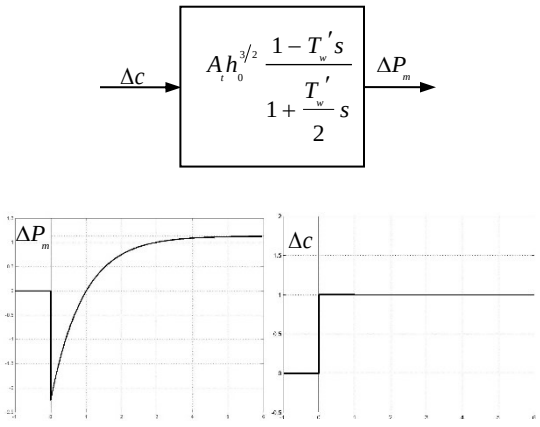


Figure 3. Linear model of hydraulic turbine and its response to a step change in gate position

III. MODIFICATIONS OF THE MATHEMATICAL MODEL OF HYDRAULIC TURBINE

Some of the authors [2], [3], [5] propose mathematical model modifications using model acceptance measurements data, such is relationships between Mechanical Turbine Power and water flow rate $P = f(q)$, gate opening and water flow rate $c = f(q)$. Relationship between Mechanical Turbine Power and water flow rate obtained from model acceptance measurements is given in figure 5.

In this paper is proposed another modification of nonlinear hydraulic turbine model which includes relationship between efficiency and gate opening $\eta = f(c)$, and combination between $\eta = f(c)$ and $P = f(q)$ which are shown on figure 4. The relationship between efficiency and gate opening also obtained from model acceptance measurements is shown on figure 6. On figure 7 is shown comparison between static characteristics of nonlinear, linear and both modifications of nonlinear model with measured static characteristic obtained from model acceptance measurements. It can be concluded that the modification of nonlinear hydraulic turbine model which includes relationship between efficiency and gate opening $\eta = f(c)$, have almost identical static characteristic with the measured one, and because of that it will be used for further analysis.

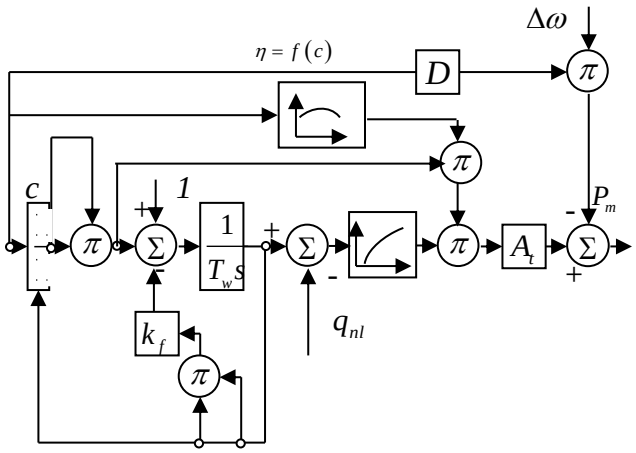


Figure 4. Nonlinear model of hydraulic turbine including efficiency - gate opening and P - q modification

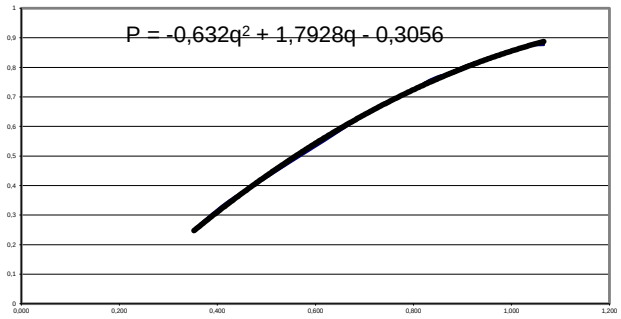


Figure 5. Relationship between Mechanical Turbine Power and water flow rate

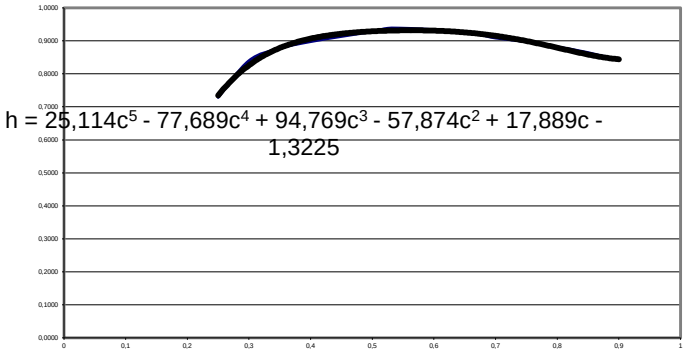


Figure 6. Relationship between efficiency and gate opening

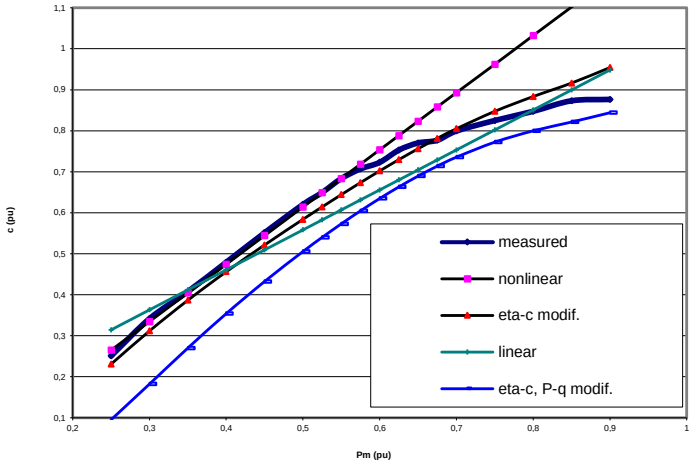


Figure 7. Mechanical Power versus gate opening for change of gate opening from 0.25 to 0.9 pu

In order to improve the accuracy of the results of the simulations of the Francis turbine hydropower model obtained above, a modification of the output mechanical power with an empirical dependence function between the independent variable in the mathematical model as well as the correction function of the output model should be performed. The correction of the At coefficient is obtained thru energy measurements of a prototype of a real turbine plant where the functions used to modify an existing nonlinear block diagram are dependent on the relationship between the efficiency coefficient and the gate opening η = f (c) and suitable coefficient of amplification At which greatly improves the simulation results.

The graphical dependencies between the measured variables and the conductivity of the conducting apparatus are shown in Fig. 8. From the diagram in Fig. 8, we can determine the amplification coefficient At as the coefficient of direction of the tangent to the curve at the positive part of the abscissa. The volume flow losses. through the turbine marked with qnl are obtained for the gate opening when the output power is equal to zero i.e. for the gate opening for which the curve cuts the abscess.

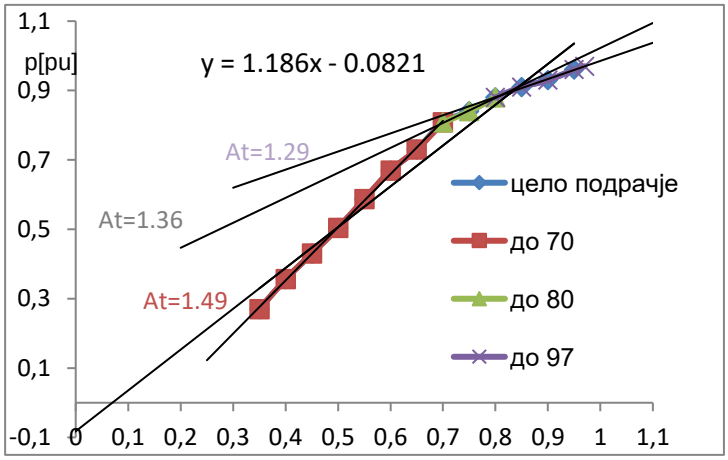


Figure 8. Mechanical Power versus gate opening for and definition of At an qnl coefficints

IV. Simulation Parameters And Diagrams

The simulations of static and dynamic characteristics of models of hydraulic turbine with governor are made using MATLAB's SIMULINK, with step change of gate position which is input into system, shown on the figure 9.

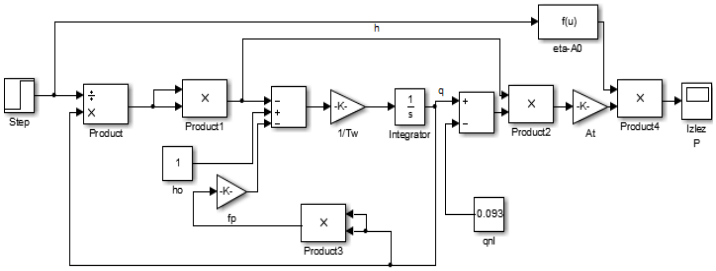


Figure 9. Simulation diagram of the turbine in Simulink

The parameters used in simulations are:

Table 1. Parameters for the simulation in Simulink

Turbine max. Power	20010 [kW]
Turbine nominal Power	18200 [kW]
Max. Head	42,4 [m]
Base Head	40 [m]
Max. Flow rate	53,5 [m^3/s]
Nominal Flow rate	50 [m^3/s]
Water starting time T_w	0,479 [s]
Penstock head loss	0,000225
Proportionality factor A_t	1.186
Proportionality factor A_t for gate opening c=0,35 – 0,7	1.490
Proportionality factor A_t for gate opening c=0,7 – 0,8	1.360
Proportionality factor A_t for gate opening c=0,8 – 0,97	1.290
No load flow q_{nl}	0.093 [pu]

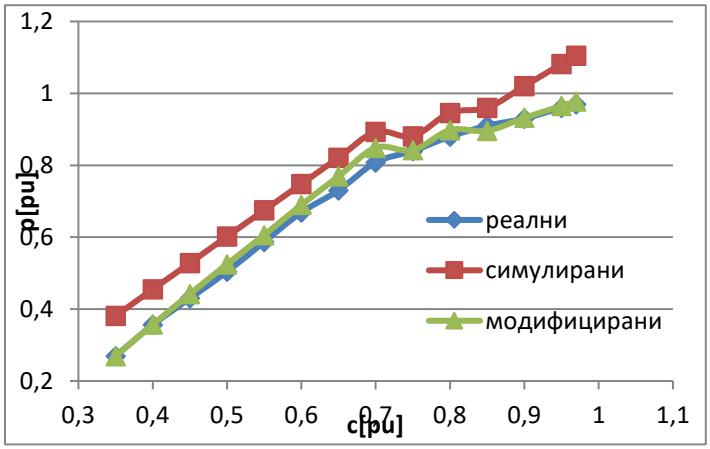


Figure 10. Simulation output diagram for mechanical Power versus gate opening for the modified model.

From simulation of dynamic characteristics of all models it can be concluded that all models are stable in whole range of operating conditions and input changes of network load. In figure 0 is shown that in comparison of the results from figure 7 the output error of the simulated mechanical power is less than 4%, which is not the case for the gate opening bigger than 0,7 pu for all of the models in figure 7. The complete system output of hydraulic turbine and governor tends to keep the reference rotor speed and satisfies the standards for production of electrical power.

V. CONCLUSION

The advantages of nonlinear mathematical model versus linear mathematical model become apparent when both models are subjected to large excursions in turbine loading, but nonlinear model although good, not always satisfies all demands for specific turbine. Because of that, additional modifications are made, to increase model similarity with real turbine, and to give results close to real measurements on turbine, which can be later used in control tasks, to increase the turbine efficiency. Must be noted [2] that the modifications which are made, can be used only on turbine for which model acceptance tests are made, and they minimize the model generality. The simulation model used in this paper is improving general accuracy of the output results, but it can be designed only after model acceptance tests, because the variable At parameter can be obtained only after experimental measurements.

REFERENCES

[1] IEEE working group report "Hydraulic turbine and turbine control models for system dynamic studies", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.7, No. 1, pp. 167-179, 1992.

[2] L. N. Hannett et al, "Field tests to validate Hydro turbine-governor model structure and parameters", IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No 4, pp. 1744-1750, 1994.

[3] D. Babunski, A. Tuneski, (2006), "Control System Design of Hydraulic Turbine-Governor" Proceedings of the 11th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation ETFA 2006, Prague, Czech Republic, pp 118-124.

[4] E. De Jaeger, et al. "Hydro turbine model for system dynamic studies" IEEE Transactions on Power Systems, Vol.9, No 4, pp. 1709-1715, 1994.

[5] N. Kishor, R. P. Saini, and S. P. Singh, (2007), "A review on hydropower plant models and control," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 11, no. 5, pp. 776–796.

[6] H. Fang, L. Chen, N. Dlakavu, and Z. Shen, (2008), "Basic modeling and simulation tool for analysis of hydraulic transients in hydroelectric power plants," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 3, pp. 834–841.

[7] N. Kishor, S. P. Singh, and A. S. Raghuvanshi, (2006), "Dynamic simulations of hydro turbine and its state estimation based LQ control," Energy Conversion and Management, vol. 47, no. 18-19, pp. 3119–3137.

AUTHORS

First Author – Darko Babunski Ph.D, Associate Proffesor, Faculty of Mechanical Engineering Skopje, darko.babunski@mf.edu.mk.
Second Author – Pance Bogoevski, Power Plants of N. Macedonia, saso.spasovski@elem.com.mk.
Third Author – Emil Zaev Ph.D, Associate Proffesor, Faculty of Mechanical Engineering Skopje, emil.zaev@mf.edu.mk.
Forth Author – Atanasko Tuneski Ph.D, Proffesor, Faculty of Mechanical Engineering Skopje, atanasko.tuneski@mf.edu.mk.
Correspondence Author – Darko Babunski Ph.D, Associate Proffesor, Faculty of Mechanical Engineering Skopje, darko.babunski@mf.edu.mk, +389 70 311 759.

Korišcenje alata za tržišno modelovanje pri analizi benefita po elektroenergetski sistem izgradnjom novog interkonektivnog dalekovoda

Use of market modeling tools in the analysis of benefits for the power system by building a new cross-border OHL

Srđan Bošković*

* Centar za razvoj, EMS AD

Abstrakt- Cilj ovog rada je predstavljanje alata za tržišno modelovanje Antares i ukazivanje na mogucnosti njegovog korišcenja pri tehno-ekonomskim analizama energetskih projekata. Tržišno modelovanje elekroenergetskog sistema predstavlja dedaljno modelovanje generatorskih jedinica, potrošnje kao i interkonektivnih veza sa susedima u cilju izracunavanja ekonomski optimalnog dispečinga elektrana pri kome će ukupna potrošnja biti zadovoljena. U ovom radu će biti modelovana dva elektroenergetska sistema (u jednom postoji velika kolicina instalisanog kapaciteta obnovljivih izvora energije) povezana interkonektivnim dalekovodom. Biće analizirani benefiti ojačanja interkonekcije koji se oličavaju u mogućnosti povećanja iskorišćenja raspoložive obnovljive energije usled niske vrednosti potrošnje i nepostojanja sistema za skladištenje energije, kao i benefiti smanjenja emisije CO2 usled mogućnosti plasiranja ekološki čiste energije u susedni elektroenergetski sistem preko povećanog interkonektivnog kapaciteta.

Ključne reči- Antares, tržišno modelovanje, integracija OIE, benefiti, CO2 emisija

Abstract- The goal of this paper is to introduce the market modeling tool Antares and to point out possibilities of its utilisation in cost-benefit analysis of energy projects. Market modeling of power systems represents a detailed modeling of generating units, consumption and cross-border connections with neighboring systems in order to find economically optimal dispatching of power plants by which the total consumption will be satisfied. In this paper, two power systems connected by cross-border transmission lines will be modeled (in one of them there is a large amount of installed capacity of renewable energy sources). The benefits of reinforcing cross-border connection embodied in avoiding curtailment of available renewable energy due to low energy consumption and lack of energy storage systems will be analyzed, along with corresponding benefits of reduced CO2 emissions due to the ability to transfer green energy into neighboring power systems through increased cross-border capacity.

Index Terms- Antares, market modeling, CO2 emissions, RES integration, benefits

I. UVOD

U ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) se u okviru desetogodišnjih planova razvoja evropskog prenosnog sistema vrši tehnoekonomska analiza interkonektivnih projekata [3]. Analiza podrazumeva procenu benefita projekata koji u suštini podrazumevaju smanjenje emisije CO_2 i integraciju obnovljivih izvora energije na prenosni sistem. U svrhu pomenutih analiza koriste se alati za tržišno modelovanje elektroenergetskog sistema. Francuski operator prenosnog sistema RTE je razvio besplatan softver Antares, čije će mogućnosti biti predstavljene u okviru ovog rada. Antares je razvijen od strane francuskog operatora prenosnog sistema RTE i od 2012. godine se koristi u ENTSO-E studijama kojima se odreduju benefiti panevropskih projekata razvoja prenosne mreže, kao i adekvatnost proizvodnje elektroenergetskih sistema.

U ovom radu će biti modelovana dva elektroenergetska sistema (u jednom postoji velika količina instalisanog kapaciteta obnovljivih izvora energije) povezana interkonektivnim dalekovodom. Biće analizirani benefiti ojačanja interkonekcije koji se oličavanju u mogućnosti izbegavanja neiskorišcenja raspoložive obnovljive energije usled niske vrednosti potrošnje i nepostojanja sistema za skladištenje energije, kao i benefiti smanjenja emisije CO2 usled mogućnosti plasiranja zelene energije u susedni elektroenergetski sistem preko povećanog interkonektivnog kapaciteta.

II. PRIMENE ANTARESA

Antares je alat za tržišno modelovanje elektroenergetskog sistema na bazi probabilistike koji može imati sledeće primene:

1) Analiza adekvatnosti proizvodnog elektroenergetskog sistema u smislu zadovoljenja potrošnje u svakom trenutku na bazi probabilistike. Probabilistička analiza adekvatnosti se sprovodi pokretanjem simulacija računanja ekonomskog dispečinga svih raspoloživih elektrana u nekoliko stotina Monte Karlo godina. Monte Karlo godina predstavlja kombinaciju različitih vremenskih serija potrošnje, proizvodnje termojedinica i proizvodnje obnovljivih izvora energije (vetroelekrane i solarne elektrane). Različite vremenske serije potrošnje podrazumevaju osetljivost potrošnje na vremenske prilike u toku godine (normalna i hladna godina), dok različite vremenske serije OIE podrazumevaju varijabilnost brzine vetra i iradijacije u toku godine. U Antaresu je moguće predstaviti i interkonektivne veze između susednih prenosnih sistema na kojima je definisan prenosni kapacitet (NTC – net transfer capacity).

2) Tehnoekonomska analiza izgradnje novih interkonektivnih kapaciteta, odnosno ojačavanja postojećih interkonektivnih kapaciteta. U okviru ove analize se određuju sledeći benefiti projekta:

   - Povećanje socio-ekonomske dobrobiti koje podrazumeva smanjene troškove proizvodnje električne energije (benefit po potrošače)
   - Integracija obnovljivih izvora energije koja podrazumeva smanjenje neiskorišćenja obnovljive energije usled nemogućnosti plasiranja energije u prenosnu mrežu
   - Smanjenje emisije CO_2
   - Povećanje stepena sigurnosti napajanja celokupnog elektroenergetskog sistema

3) Proračun ekonomski optimalnog dispečinga svih elektrana u sistemu, kao i razmene sa susedima na satnom nivou. Navedeni rezultati se mogu koristiti kao ulazni podaci za izradu mrežnih modela sistema u kojima se mogu uraditi proračun tokova snaga, proračun naponskih prilika, kao i razni drugi proračuni.

4) Proračun perspektivnih cena električne energije. Ovaj proračun je moguće uraditi samo u slučaju poznavanja ekonomskih cena proizvodnje električne energije svih termoelektrana i nuklearnih elektrana u sistemu, kao i u susednim elektroenergetskim sistemima.

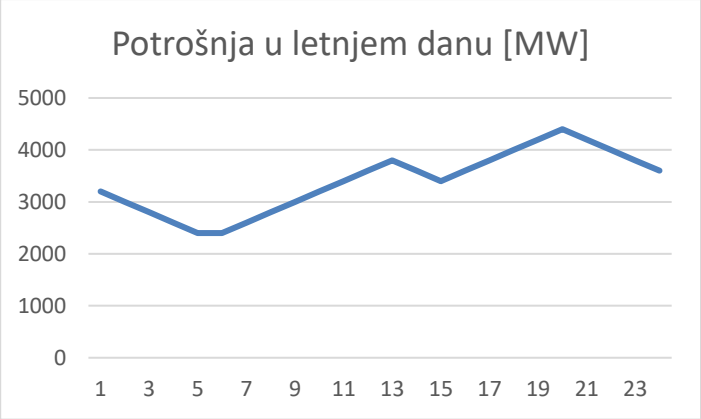
III. ULAZNE PRETPOSTAVKE PRI PRAVLJENJU TRŽIŠNOG MODELA I PRORAČUN BENEFITA USLED IZGRDNJE NOVOG INTERKONEKTIVNOG DALEKOVODA

Uokviru ovog rada biće analiziran prost slučaj kada su dve oblasti povezane interkonektivnim dalekovodom kapaciteta 1500 MW (Slika 1).

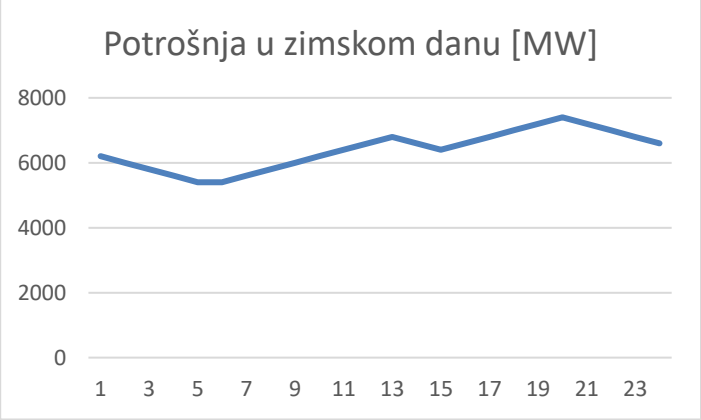
Slika 1: Analizirani tržišni model

U sistemu sa Slike 1, modelovano je sledeće stanje:

- Potrošnja je u oblasti A modelovana tako da vršna potrošnja ne prelazi 7400 MW. Uzeto je u obzir postojanje podnevnog, kao i večernjeg pika potrošnje, kao i značajan pad potrošnje u toku noći. Na Slikama 2 i 3 je prikazana potrošnja u letnjem, odnosno zimskom danu.



Slika 2: Potrošnja u letnjem danu



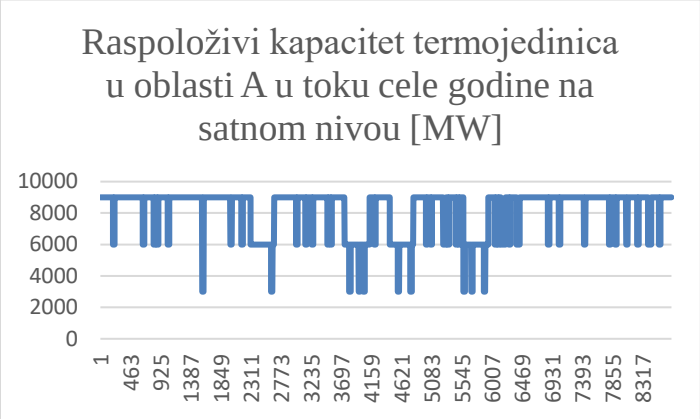
Slika 3: Potrošnja u zimskom danu

Potrošnja u oblasti B je modelovana kao konstantna potrošnja od 5000 MW.

- Proizvodnja je u oblasti A modelovana na sledeći način.

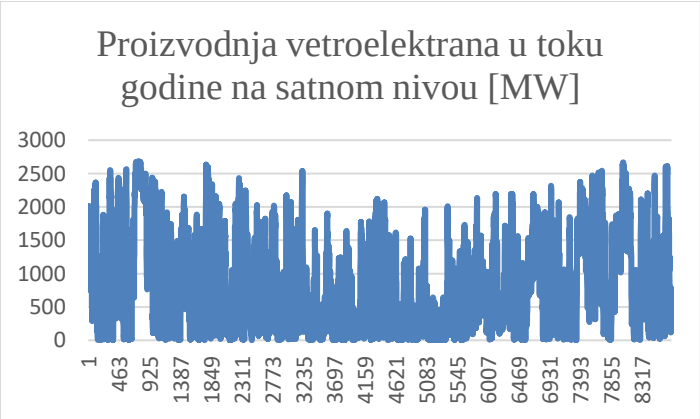
Broj termojedinica	*3*
Instalisana snaga termojedinica	*3000 MW*
Tehnički minimum termojedinica	*1800 MW*
Emisija CO2 termojedinice[1]	*0.36 t/MWh*

Uzeto je da postoji mogućnost remonta termojedinica u toku leta (maskimalno jedna jedinica sme biti u remontu), kao i mogućnost ispada termojedinica u toku cele godine. U Antaresu postoji generator vremenskih serija koji računa raspoloživost termojedinica u svakom satu uzimajući u obzir verovatnoću prinudnih i planiranih ispada termojedinica. Na Slici 4 se može videti raspoloživi kapacitet termoelektrana u oblasti A tokom cele godine.



Slika 4: Raspoloživi kapacitet termojedinica u oblasti A u toku cele godine na satnom nivou

Osim prozvodnog kapaciteta u termoelektranama, u oblasti A postoje i vetroelektrane ukupnog instalisanog kapaciteta od 2700 MW. Sa WEB stranice renewables.ninja [2] preuzeta je vremenska serija proizvodnje vetroelektrana za zadatu instalisanu snagu (Slika 5).



Slika 5: Proizvodnja vetroelektrana u toku godine na satnom nivou

U oblasti B je modelovana termoelektrana sledećih karakteristika:

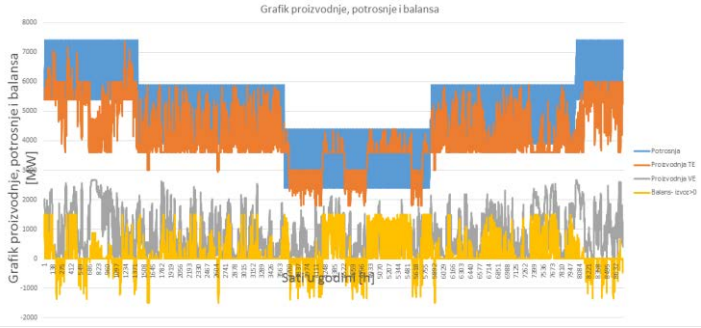
Broj termojedinica	*1*
Instalisana snaga termojedinica	*10000 MW*
Tehnički minimum termojedinica	*0 MW*
Emisija CO2 termojedinice[1]	*0.36 t/MWh*

U oblasti B je uzeto da je tehnički minimum termojedinica 0 MW zbog potrebe da u oblasti B uvek postoji deo kapaciteta termoelektrana koji može biti zamenjen uvozom jeftinije obnovljive energije iz oblasti A. Ideja je da se posmatraju problemi u oblasti A, dok bi oblast B predstavljala sistem u kome je potrošnja uvek zadovoljena i u kome uvek postoji kapacitet za podršku oblasti A u slučajevima manjka električne energije.

- Oblasti A i B su povezane interkonektivnim dalekovodom kapaciteta 1500 MW.

Nakon sprovedene simulacije dobijen je ekonomski dispečing termoelektrana u oblastima A i B na satnom nivou, kao i razmena između oblasti A i B na satnom nivou.

Na Slici 6 se može videti grafik proizvodnje, potrošnje, i razmene sa oblašću B oblasti A na satnom nivou.

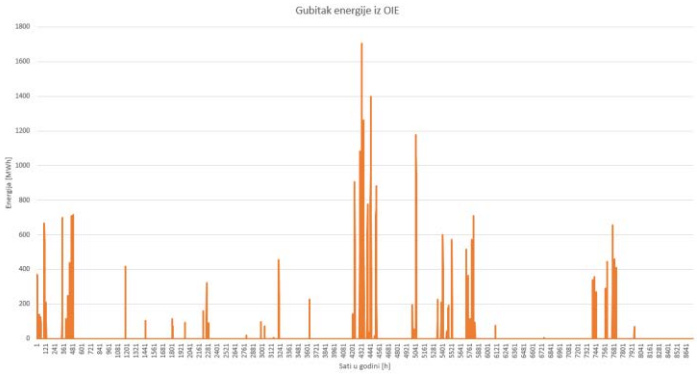


Slika 6: Grafik proizvodnje, potrošnje, i razmene sa oblašću B oblasti A

Na Slici 6 se može videti da će tokom većeg dela godine oblast A izvoziti električnu energiju u oblast B, osim u dva slučaja:

- tokom leta kada je mala proizvodnja vetroelektrana i kada su termojedinice u remontu.
- tokom zime kada je velika potrošnja električne energije, pri prinudnom ispadu termoelektrana i kada je mala proizvodnja iz vetroelektrana

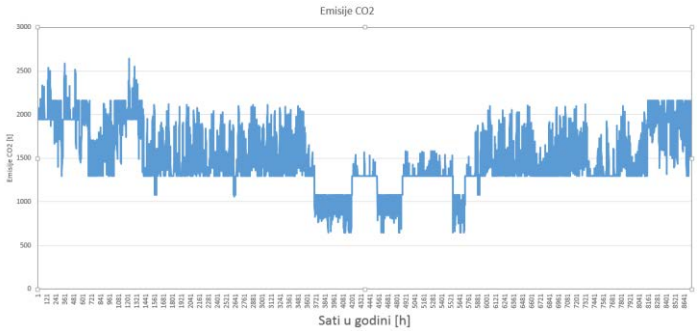
Na Slici 7 je prikazan grafik neiskorišćene energije iz OIE na satnom nivou u oblasti A usled nemogućnosti plasiranja energije.



Slika 7: Grafik gubitaka energije iz OIE u oblasti A usled nemogućnosti plasiranja energije

Na slici 7 se može videti da je najveća neiskorišćena energija u letnjem periodu noću pri maloj potrošnji, i velikoj proizvodnji iz vetroelektrana.

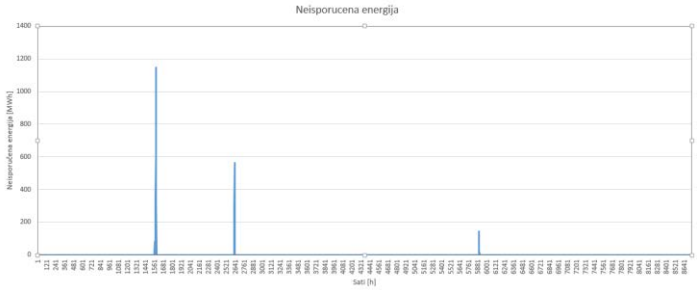
Emisija CO_2 u oblasti A je prikazana na Slici 8.



Slika 8: Emisija CO2 u oblasti A

Emisija CO2 u oblasti A je usko povezana sa proizvodnjom iz termoelektrana i ona je značajno veća u zimskom periodu u odnosu na letnji zbog veće zimske potrošnje.

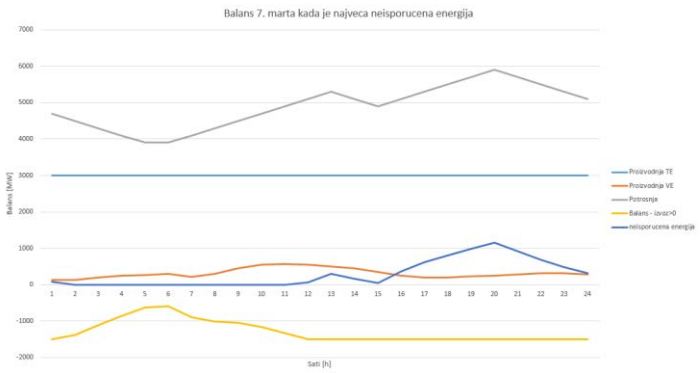
Neisporučena energija na satnom nivou u oblasti A se može videti na Slici 9.



Slika 9: Neisporučena energija na satnom nivou u oblasti A

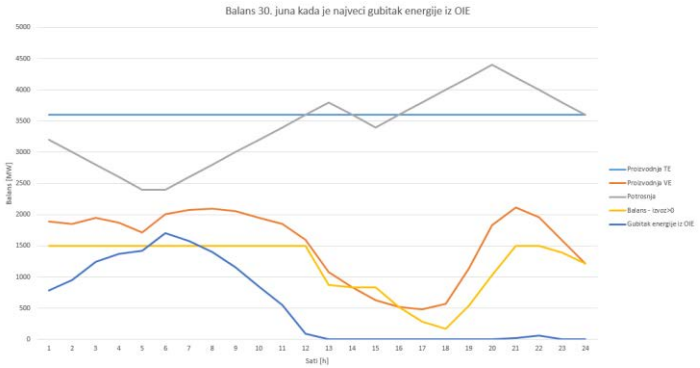
Do neisporučivanja električne energije dolazi u slučaju kombinacije sledećih faktora: nemogućnost uvoza električne energije preko interkonekcija (maksimalno opterećenje), neraspoloživost termojedinica usled ispada, visoka potrošnja i mala proizvodnje iz vetroelektrana.

Biće detaljno analizirane situacije u kojima je zabeležena najveća neisporučena energija potrošnji, kao i situacija kada je bilo najveće neiskoriscenje energije iz obnovljivih izvora energije.



Slika 9: Balans oblasti A 7. marta kada je bila najveca neisporucena energija

Na slici 9 se može videti da je najveća neisporučena energija potrošnji bila 7. marta u večernjim satima pri maksimalnim vrednostima potrošnje, raspoloživosti samo jedne termojedinice, niske raspoloživosti vetroelektrana kao i maksimalnog uvoza iz oblasti B. Očigledno je da za potpuno zadovoljenje konzuma nedostaje još 1200 MW interkonektivnog kapaciteta uz uslov da je moguće da se tolika količina energije uveze iz oblasti B.

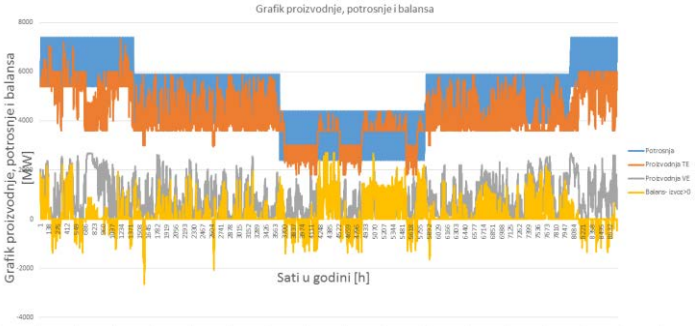


Slika 10: Balans oblasti A 30. juna kada su bili najveći gubici energije iz OIE

Na slici 10 se može videti da je najveća neiskorišćena energija iz OIE bila u jutarnjim satima 30. juna pri minimalnim vrednostima potrošnje, raspoloživosti dve termojedinice na tehničkom minimumu proizvodnje, visoke raspoloživosti vetroelektrana kao i maksimalnog izvoza u oblast B.

Nakon ove analize urađen je proračun ekonomskog dispečinga u oblastima A i B pri izgradnji novog interkonektivnog dalekovoda kapaciteta 1200 MW (NTC-a).

Na Slici 11 se može videti grafik proizvodnje, potrošnje, i razmene sa oblašću B oblasti A na satnom nivou.



Slika 11: Grafik proizvodnje, potrošnje, i razmene sa oblašću B oblasti A

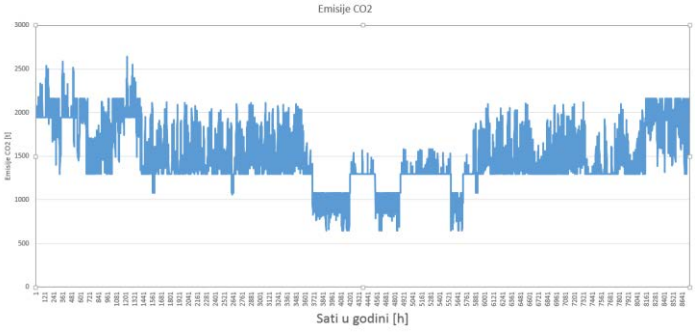
Na Slici 11 se može videti da je veći deo vremena balans oblasti A veći deo vremena isti kao i u slučaju pre pojačanja interkonekcije između oblasti A i B. Jedine razlike se javljaju u slučaju manjka odnosno viška električne energije u oblasti A. Ne dolazi do promene proizvodnje termoelektrana u oblasti A zato što je ulazna predpostavka bila da je cena proizvodnje električne energije u termoelektranama u oblastima A i B ista.

Na Slici 12 je prikazan grafik neiskorišćene energije iz OIE na satnom nivou u oblasti A usled nemogućnosti plasiranja energije.

Slika 12: Grafik gubitaka energije iz OIE u oblasti A usled nemogućnosti plasiranja energije

Na slici 12 se može videti da su gubici energije iz OIE znatno manji nakon izgradnje nove interkonekcije između oblasti A i B.

Emisija CO2 u oblasti A je prikazana na Slici 13.



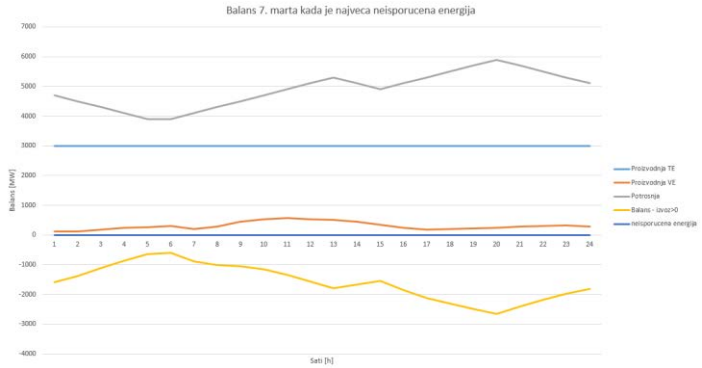
Slika 13: Emisija CO2 u oblasti A

Neisporučena energija na satnom nivou u oblasti A se može videti na Slici 14.

Slika 14: Neisporučena energija na satnom nivou u oblasti A

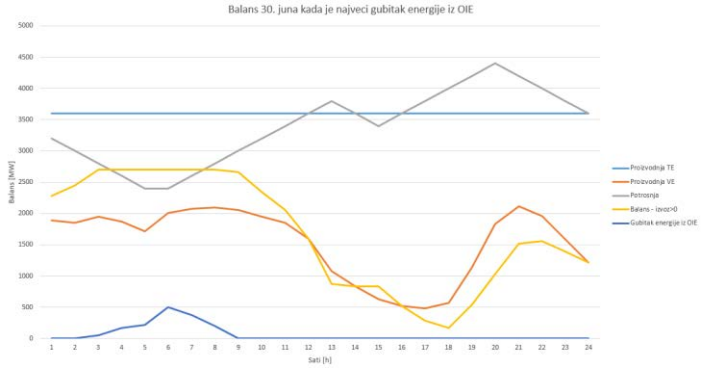
Nakon izgradnje dodatne interkonekcije nema problema sa neisporučenom energije u oblasti A.

Na sledećim slikama je prikazan balans oblasti A u kritičnim danima nakon izgradnje interkonektivnog dalekovoda.



Slika 15: Balans oblasti A 7. marta kada je bila najveca neisporucena energija

Na slici 15 se može videti da se nakon izgradnje novog interkonektivnog dalekovoda nedostajuća energija može uvesti preko dodatnog interkonektivnog dalekovoda.



Slika 16: Balans oblasti A 30. juna kada su bili najveći gubici energije iz OIE

Na slici 16 se može videti da su gubici energije iz OIE znatno manji usled mogućnosti dodatnog izvoza električne energije preko dodatnog interkonektivnog kapaciteta.

Urađena je uporedna analiza gubitaka energije iz OIE i emisije CO2 pre i nakon izgradnje dodatnog interkonektivnog kapaciteta.

	Oblast	emisija CO2 [t]	Gubici energije iz OIE usled nemogućnosti plasiranja energije u sistem[MWh]	Neisporučena energija [MWh]
Pre proširenja interkonekcije	A	13224802	106093	9453
	B	15224562	0	0
	Suma	28449364	106093	9453
nakon proširenja interkonekcije	A	13224802	1937	0
	B	15190469	0	0
	Suma	28415271	1937	0

Tabela 1: Rezultati proračuna

IV. ZAKLJUČAK

Iz Tabele 1 može se videti da izgradnjom novog interkonektivnog kapaciteta od 1200 MW dolazi do smanjenja emisija CO2 kao i do smanjenja gubitaka energije iz OIE u oblastima A i B.

Cilj ovog rada je bila prezentacija mogućnosti primene alata Antares pri tehnoekonomskoj analizi benefita povećanja interkonektivnih kapaciteta. Rezultati analiza u velikoj meri zavise od tržišnog modela na kome se rade analize.

Postoje projekti koji mogu dovesti do povećanja emisije CO2 i do smanjenja gubitaka energije iz OIE. Taj slučaj bi se desio kada bi u oblasti A postojao veliki broj jeftine termoelektrane na lignit sa velikom emisijom CO2 i veliki broj vetroelektrana, dok bi u oblasti B postojale skupe gasne elektrane sa malom emisijom CO2. Povećanje interkonektivnog kapaciteta između ove dve oblasti bi doveo do smanjenih gubitaka energije iz OIE u oblasti A, ali bi takođe doveo do povećanja emisije CO_2 u oblasti A usled povećanog izvoza jeftinije energije iz termoelektrana na lignit u oblast B.

Mogućnosti Antaresa za proračun raznoraznih tržišnih parametara su velike, i kvalitet rezultata prvenstvno zavisi od kvaliteta ulaznih podataka i kvaliteta samog tržišnog modela.

LITERATURA

[1] https://www.volker-quaschning.de/datserv/CO2-spez/index_e.php

[2] https://www.renewables.ninja/

[3] ENTSO-E, "2nd ENTSO-E Guideline For Cost Benefit Analysis of Grid Development Projects"

AUTORI

Prvi autor – Srđan Bošković, mast. inž. el. i rač, EMS AD, srdjan.boskovic@ems.rs

Uticaj solarne elektrane na kvalitet električne energije u niskonaponskoj distributivnoj mreži

Impact of solar power plant on power quality in low-voltage distribution network

Dr. sc. Hidajet Salkić, dipl.ing.el.[*], **Dr. sc. Amir Softić,** dipl.ing.el.[*], **Amer Salkić,** dipl.ing.el.[**]

[*] JP EPBiH Sarajevo, Elektrodistribucija Tuzla
[**] Spin d.o.o. Tuzla

Apstrakt- Elektroenergetski sistem kao jedan integralni sistem proizvodnje, prenosa, distribucije i potrošnje električne energije predstavlja jedan od najsloženijih tehnoekonomskih sistema današnjice. Na kvalitet napona elektroenergetske mreže utiču potrošači, s tim da i mreža, takođe, ima uticaj na potrošače. Svi poremećaji u mreži mogu narušiti rad mreže i uticati na rad potrošača, kao i smanjiti stepen efikasnosti i radni vijek ili čak ozbiljno oštetiti mrežu. Broj potrošača se svakodnevno povećava, a isto tako je sve veći udio potrošača koji generišu smetnje u mreži i istovremeno su osjetljivi na njih. Navedene okolnosti nameću potrebu za učestalim monitoringom mreže, te analiza kvaliteta električne energije nije neopravdan trošak, već izuzetno bitna i isplativa investicija. Kvalitet električne energije, kao dio ukupnog kvaliteta snabdijevanja potrošača električnom energijom, u deregulisanim uslovima liberalnog tržišta električne energije, postaje značajan regulacioni parametar za operatore mreže i značajan ugovorni parametar na tržištu električne energije. Operatori mreže dužni su uspostaviti sistem pojedinačnih mjerenja i sistem trajnog nadziranja parametara kvaliteta električne energije radi utvrđivanja stanja i poboljšanja parametara do normiranog nivoa. Tehnički parametri se određuju preporukama koje se donose na međunarodnom nivou i mogu, ali ne moraju, biti zakonski obavezujuće. Održavanje određenog nivoa kvaliteta napona u nekoj tački mreže je obaveza distributera električne energije. Ovaj zadatak distributer izvršava ograničavanjem negativnog povratnog djelovanja proizvođača/potrošača na mrežu. Dakle, svaki proizvođač/potrošač električne energije je dužan svoja negativna povratna djelovanja (injektovanje viših harmonika, uzimanje jalove snage, emisija flikera i nesimetrije opterećenja) svesti na propisane, unaprijed dogovorene, granične vrijednosti. Postoje mnoge norme koje opisuju kvalitet električne energije, ali u Evropi je najpoznatija EN50160 (izdata od strane CENLEC-a). U ovom radu je predstavljen pristup mjerenju kvaliteta napona na mjestu predaje električne energije iz distribuiranog izvora u distributivnu mrežu sa aspekta ograničavanja negativnog povratnog uticaja distribuiranog izvora na kvalitet napona.

Ključne riječi- kvalitet električne energije, distribuirani izvor, tehnički parametri, solarna elektrana, EN50160

Abstract- The electric power system, as an integrated system for transmission, distribution and consumption of electricity, is one of the most complex technical and economic systems today. Customers affect on the voltage quality of power network, but the network also has an impact on customers. All disturbances in the network can disrupt operation of the network and affect on operation of the customers, as well as reduce the level of efficiency and operation life or even seriously damage network. Number of customers is increasing every day, as well as proportion of customers who generate disturbances in the network and, at the same time, are sensitive to them. These circumstances impose the need for frequent monitoring of the network, so the analysis of power quality is not unjustified cost but extremely important and profitable investment. The quality of electricity, as part of the overall quality supply of electricity customers in deregulated conditions of liberal electricity market becomes significant regulatory parameter for network operators and a significant contracting parameter on the electricity market. Network operators are obliged to establish a system of individual measurements and a system of permanent monitoring of power quality parameters to determine the state and improve the parameters to the standardized level. Technical parameters are determined by the recommendations made at the international level and may, but do not need, be legally binding. Maintaining a certain level of voltage quality at some point of the network is the responsibility of electricity distributor. This task distributor executes by limiting of negative effects of producer/customer to the network. Therefore, each electricity producer/customer is obliged to reduce own negative feedback effects (injection of higher harmonics, taking of reactive power, emissions of flickers and loads unbalances) to a prescribed, prearranged, limited values. There are many norms that describe the quality of electricity, but in Europe the best known is EN50160 (issued by CENLEC). This paper presents the approach to measuring the voltage quality at the point of electricity delivery from distributed source into distribution network from the

aspect of limiting the negative feedback of distributed source on the voltage quality.

Key words- electricity quality, distributed source, technical parameters, solar power plant, EN50160

I. UVOD

Električna energija je roba koja treba da zadovoljava određeni kvalitet. Nova filozofija u upravljanju i vođenju elektroenergetskog sistema u cilju postizanja odredenog kvaliteta električne energije ima za posljedicu konstantan nadzor kvaliteta električne energije. Elektroenergetski sistem kao jedan integralni sistem proizvodnje, prenosa, distribucije i potrošnje električne energije predstavlja jedan od najsloženijih tehnoekonomskih sistema današnjice. Kako se svaki elektrodistributivni sistem sastoji od različitih elemenata koji su sve češće aktivni elementi, u tim mrežama se javljaju viši harmonici. Osim toga javljaju se i različiti poremećaji u isporuci električne energije: padovi, skokovi, propadi i prekidi napona, naponska izobličenja (nesimetrija), brze prelazne promjene (tranzijenti), te ostale nepoželjne pojave koje mogu izazvati teže posljedice kod posebno osjetljivih potrošača pa je proces reverzibilan. Potrošači utiču na kvalitetu napona mreže, a mreža, također, ima negativne posljedice po potrošače. Svi ti poremećaji u mreži mogu narušiti rad mreže i uticati na rad potrošača, kao i smanjiti stepen iskorištenja i radni vijek ili je čak ozbiljno oštetiti. Izvjesno je svakodnevno povećanje broja potrošača, a sve je veći udio potrošača koji generišu smetnje u mreži i istovremeno su osjetljivi na njih. Navedene okolnosti nameću potrebu za učestalim monitoringom mreže, te analiza kvaliteta električne energije nije neopravdan trošak, već izuzetno bitna i isplativa investicija. Kvalitet električne energije, kao dio ukupnog kvaliteta snabdijevanja potrošača električnom energijom, u deregulisanim uslovima liberaliziranog tržišta električne energije, postaje značajan regulacioni parametar za operatore mreže i značajan ugovorni parametar na tržištu električne energije. Operatori mreže dužni su uspostaviti sistem pojedinačnih mjerenja i sistem trajnog nadziranja parametara kvaliteta električne energije, radi utvrđivanja stanja i poboljšanja parametara do normiranog nivoa. Pitanje nadzora kvaliteta električne energije riješeno je kroz razvoj mjernih sistema za analizu kvaliteta električne energije. Mjerenje, obrada i analiza rezultata mjerenja su definisani normama i standardima. U Bosni i Hercegovini je trenutno u zamahu planiranje, projektovanje i izgradnja velikog broja fotonaponskih elektrana, ozakonjene su stimulativne finansijske mjere za otkup u mrežu tako proizvedene električne energije, što omogućava snažan poticaj za njihovo sve veće korištenje i primjenu. Analiza njihovog uticaja na kvalitet električne energije obavezna je u postupku priključenja na mrežu i kao takva zahtijeva ozbiljan pristup, usklađen sa karakteristikama distribuiranog izvora za kojeg se vrši mjerenje i karakteristikama mjesta na koje se isti priključuje. Bez ovoga se teško može ocijeniti i izolovati uticaj pojedine fotonaponske elektrane na mrežu, jer kvalitet napona zavisi od ukupnog međudjelovanja svih korisnika mreže i elemenata mreže. Sam smisao provođenja ispitivanja povratnog djelovanja je činjenica da je mreža galvanski vezan sistem koji čini mnoštvo sudionika koji "dijele" istu mrežu i preko nje su praktično povezani. U radu je predstavljen pristup mjerenju kvaliteta napona na mjestu predaje električne energije iz distribuiranog izvora u distributivnu mrežu sa stanovišta ograničavanja negativnog povratnog uticaja distribuiranog izvora na kvalitet napona. Rezultat istraživanja predstavlja integralnu cjelinu u pogledu procedura mjerenja kvaliteta električne energije i ocjene kvaliteta električne energije. Na osnovu same definicije kvaliteta električne energije i parametara koji se mjere i analiziraju u svrhu ocjene kvaliteta, te osvrta na norme i standarde, iz navedene problematike se može zaključiti da pojam kvaliteta električne energije predstavlja niz sveobuhvatnu aktivnosti po pitanju monitoringa elektroenergetskog sistema.

II. TEORETSKI ASPEKTI KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE

Postoje mnoge norme koje opisuju kvalitet električne energije, a u Evropi je najpoznatija EN50160 (izdavač CENLEC). U BiH ta norma nije "zakon", ali se po uzoru na nju, donose pravilnici u kojima se daju upute za tretiranje parametara kvaliteta električne energije. Te pravilnike, kao podzakonske akte, donose regulatorna tijela, a što se tiče Elektroprivrede BiH, dva su pravilnika u kojima su navedeni parametri kvaliteta električne energije koji se moraju analizirati i regulisati, a to su: "Mrežna pravila J.P Elektroprivreda BiH" i "Opšti uslovi za isporuku električne energije", Regulatorne komisije za električnu energiju u Federacije BiH (FERK) od 2008.g. Ovu normu je prihvatio CENLEC 05.07.1994. godine, a u službenoj je upotrebi od maja 1995. godine. Norma EN50160 se primjenjuje u javnim distributivnim niskonaponskim i srednjenaponskim mrežama pri normalnim pogonskim uslovima. Norma EN50160 "Karakteristike napona u javnim elektrodistributivnim mrežama" ima za cilj okarakterisati parametre napona napajanja u odnosu na talasni oblik, amplitudu, frekvenciju i simetriju kod trofazne mreže na mjestu primopredaje električne energije. Ove karakteristike su podložne stohastičkim promjenama tokom normalnog rada, a mogu ih uzrokovati promjene opterećenja, smetnje koje se generišu u opremi i vanjski uticaji. U električnim mrežama srednjeg i niskog napona kvarovi postrojenja mogu dovoditi do velikih smetnji. Kompletan ispad mreže se ne može opisati preko graničnih vrijednosti i nema smisla određivati stvarne granične vrijednosti, pa zbog toga ovaj standard fiksno postavlja samo one granične vrijednosti koje ne smiju biti premašene za vrijeme 95% trajanja monitoringa. Mjerenja se sprovode tokom mjernog perioda koji obuhvata najmanje sedam dana. Tokom mjernog perioda vrši se kontinuirano semplovanje i mjerenje mjernih veličina, a potom se vrši usrednjavanje na vremenski period 10 sekundi ili 10 minuta, zavisno od tipa mjerne veličine. Te usrednjene 10-minutne, odnosno 10-sekundne vrijednosti su relevantne za statističku obradu po normi EN50160. Cilj je postavljanje graničnih vrijednosti parametara napona kod normalnih radnih uslova, a ne primjenjuje se u specifičnim uslovima na koje distributer električne energije ne može uticati i u kojima neke karakteristike napona odstupaju od zadanih vrijednosti. Kako su promjene karakteristika vezane za stohastičke slučajeve, norma dozvoljava da definisane granice parametara mogu biti premašene u nekim slučajevima. U norma EN50160 opisane karakteristike napona nisu predviđene za upotrebu kao nivo elektromagnetne kompatibilnosti ili kao granične vrijednosti smetnji, koje se iz postrojenja potrošača prenose vodovima na mrežu. Njena uloga je samo da definiše vrijednosti glavnih

karakteristika električnog napona u mrežama niskog, srednjeg i visokog napona. Norma se odnosi na mjerenje i kontrolu vrijednosti osnovnih 9 parametara električnog napona na srednjenaponskoj ili niskonaponskoj mreži i to:

1. promjene napona (spore/brze promjene napona),
2. treperenje (fliker): kratkoročni (Pst) i dugoročni (Plt),
3. harmonici - od 2. do 25. harmonika,
4. THD – od 2. do 40. harmonika,
5. signalni naponi (ripple control – signalni upravljački naponi) i međuharmonici,
6. mrežna frekvencija,
7. nesimetričnost napona,
8. naponski propadi (privremeni/kratkotrajni/dugotrajni),
9. prekidi napajanja.

U tački primopredaje potrebno je neprekidno pratiti kvalitet električne energije u trajanju od najmanje 7 dana (168 sati).

III. TEHNIČKI OPIS FOTONAPONSKE ELEKTRANE

Fotonaponska elektrana instalisane snage 23kWp je izgrađena na krovu objekta jedne humanitarne organizacije i napaja se električnom energijom sa niskonaponskog izlaza STS 10(20)/0,4 kV, 160kVA (visokonaponski osigurači postolja 160A sa topljivim umecima 125A), samonosivim kablovskim snopom tip XOO/0-A 3X70+71.5mm^2, dužine trase cca 90m do mjernog ormara na fasadi objekta (slika 1).

Slika 1. Principijelna šema izvedbe priključka fotonaponske elektrane na NN mrežu

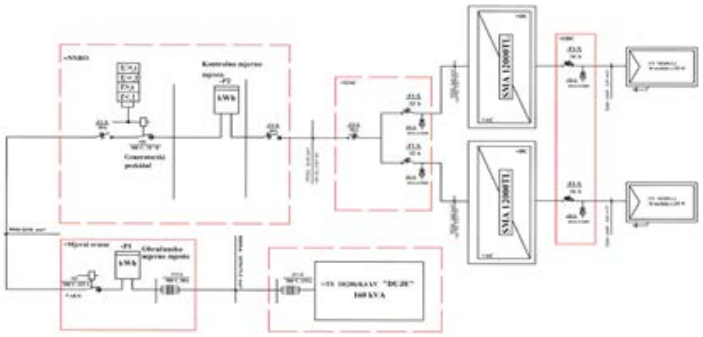
Mjerni ormar je opremljen kompaktnom sklopkom 125A za odvajanje fotonaponske elektrane sa distributivne mreže, sa mogućnošću daljinskog nadzora i upravljanja, visokoučinskim osiguračima topljivih umetaka 35A i sa trofaznim multifunkcijskim brojilom za mjerenje predate/preuzete električne energije fotonaponske elektrane. Lokacija fotonaponske elektrane se nalazi na geografskoj poziciji sa kordinatama 44^o 44$'$ 53$''$ S i 18^o 10$'$ 36$''$ I. Geodetske tačke fotonapnske elektrane u Gauss-Krugerovim koordinatama su Y=5570990 i X=5982390, na nadmorskoj visini od 360m. Prosječna planirana proizvodnja fotonaponske elektrane iznosi 25.300kWh. Fotonaponski sistem predstavlja integrisani skup fotonaponskih modula i ostalih potrebnih komponenti. Projektovan je tako da prima Sunčevu energiju i izravno je pretvara u konačnu električnu energiju. Fotonaponska elektrana ima ukupno 92 fotonaponska modula (tip.RENESOLA VIRTUS JC250M-24/Bbv), svaki snage 250W$_p$, podijeljenih u tri stringa svaki po 20 modula i dva stringa svaki po 16 modula. Moduli su dimenzija 1640mm^2 x 992mm^2, optimalne efikasnosti 15,37%, pokrivaju površinu od 150,67m^2, međusobno povezani sa fotonaponskim kablom (FlexiSun 1x6mm^2) kablovskim završecima. Počeci i krajevi stringova se dovode preko DC (istosmjernog razvoda) ormara opremljenog sa istosmjernim odvodnicima napona i istosmjernim prekidačima na invertor koji je uzemljen. Fotonaponski invertori pretvaraju istosmjernu struju fotonaponskih modula u naizmjenični napon regularnog iznosa i frekvencije, sinhronizovanim sa naponom mreže. Da bi eventualni štetni uticaj fotonaponskog sistema na distributivnu mrežu bio što manji invertor mora ispunjavati zahtjeve propisane standardima EN61727 odnosno EN50438, da struja, napon i frekvencija fotonaponskog sistema budu u skladu sa parametrima distrubutivne mreže radi sihronizovanog rada. Impedansa u priključnoj tački na izlazu invertora ne smije biti veća od 1,25Ω, jer bi to dovelo do automatskog prekida rada invertora. Fotonaponski sistem invertora ne smije prouzrokati više harmonike (do 40) većih flikera, nego što ih propisuje standard EN61000-3-3 za sisteme sa strujom manjom od 16A, a EN61000-0-3-5 za sisteme sa strujom većom od 16A. Gornja dopuštena vrijednost struje koju invertor može slati u mrežu može da bude 1% veća od nazivne vrijednosti. Učešće svih viših harmonijskih komponenti u generisanoj struji mora da bude manje od 5%. U slučaju odstupanja svoje frekvencije od nominalne frekvencije mreže za vrijednost ±1Hz, invertor prestaje sa djelovanjem u vremenskom intervalo od 0,2s. Odabrana su dva trofazna invertora, jedan nazivne AC snage 15kW, tip SMA STP 15000 TL, i drugi nazivne AC snage 8kW, tip SMA STP 8000 TL. Nadzor fotonaponske elektrane se vrši preko monitoring uređaja Sunny WebBox, invertori su povezani u seriju preko RS485 veze (kabl LiYcY 2x2x0.2 mm^2), maksimalne dužine 1.200m, prikuplja tekuće mjerne veličine na 50 invertora koje se automatski arhiviraju i moguće je njihov pregled na Internetu preko Sunny Portala-a. AC strana invertora je povezana na AC (naizmjenični razvod) ormar sa petožilnim kablom 5x6mm^2 uz naizmjenične odvodnike prenapona i naizmjenične automatske tropolne osigurače. AC i DC razvodni ormari su fizički smješteni skupa u NN razvodni ormar, sa kontrolnim brojilom električne energije. Preko energetskog kabla 5x10mm^2 fotonapnska elektrana je povezana na priključni ormar elektrodistributivne mreže, gdje je smještena mjerna garnitura i 4-polna rastavljačka sklopka za potpuno odvajanje fotonaponske elektrane sa elektrodistributivne mreže (slika 2). DC/AC izmjenjivači zadovoljavaju tehničke uslove bitne za paralelni rad sa elektrodistributivnom mrežom. Invertori rade u režimu „mrežom upravljeni invertori“ što znači da je nemoguć ostrvski rad elektrane. Zaštita od ostrvskog rada je ugrađena u sam invertor, u slučaju nestanka mrežnog napona elektrana se automatski isključuje sa mreže, a u slučaju ponovnog dolaska mrežnog napona invertor po određenom protokolu ispituje uslove za puštanje elektrane na mrežu. Tek kada su ispunjeni svi uslovi onda se dozvoljava automatsko uključenje elektrane na mrežu. Kratkospojna zaštita invertora je podešena na izlaznu struju invertora 24A i 16A, dok je podešenje zaštite od prekomjerne struje invertora 25,2A i 16,8A, respektivno. Zaštita distributivne mreže od prekomjerne struje i kratkoga spoja je izvedena automatskim osiguračima 35A .Invertori imaju ugrađenu naponsku i frekventnu zaštitu:

- Podešenje prenaponske zaštite na invertorima je 1,1U$_{ng}$ uz vrijeme djelovanja zaštite invertora od 3s, a podnaponske

zaštite je 0,7U_{ng} uz vrijeme djelovanja zaštite invertora od 3s.

- Podešenje nadfrekventne zaštite na invertorima je 52Hz uz vrijeme djelovanja invertora od 1s, a podfrekventne zaštite je 48Hz uz vrijeme djelovanja invertora od 1s.
- Uključene su i zaštite od povratne snage, nesimetričnog opterećenja, injektovanja istosmjerne struje iz fotonaponske elektrane (1A DC, 200ms) i od ostrvskog rada fotonaponske elektrane.

Uzemljenje je izvedeno na način da se svi metalni djelovi (noseća konstrukcija: Fe i Al, moduli) međusobno povezani i povezani na Fe-Zn traku za uzemljenje (TN-S sistem). Duž cijelog TN-S sistema razdvojeni su neutralni i zaštitni vod. Za izjednačavanje potencijala koristi se jednopotencijalna sabirnica na kojoj se vrši međusobno galvansko povezivanje. Sva instalacija izvodi se petožilnim kablovima, gdje se peti vodič spaja na zaštitni kontakt za uzemljenje, a na drugom kraju na zaštitnu jednopolnu sabirnicu smještenu u niskonaponskom razvodnom ormaru, koji je galvanski povezan sa zajedničkim temeljnim uzemljivačem



Slika 2. Blok šema fotonaponske elektrane

IV. REZULTATI MJERENJA KVALITETA ELEKTRIČNE ENERGIJE FOTONAPONSKE ELEKTRANE

U okviru standarda i normi koji definišu granične vrijednosti pokazatelja kvaliteta električne energije ili kvaliteta napona sreće se niz parametara. Uopšteno rečeno većina parametara se dobija na osnovu dvije analize (mjerenja): mjerenjem flikera i mjerenjem harmonika. Procedura mjerenja flikera je definisana standardom IEC61000-4-15, dok je procedura mjerenja harmonika i interharmonika definisana standardom IEC61000-4-7. Procedura mjerenja, te način obrade rezultata i postupci mjerenja su definisani standardom IEC61000-4-30. Ovaj standard je postavio veoma stroge kriterije po mjernu opremu.U skladu sa evropskom normom EN50160 izvršena su mjerenja kvaliteta električne energije u tački primopredaje sa fotonaponske elektrane na NN elektrodistributivnu mrežu. Mjerenja su obavljena u periodu probnog rada fotonaponske elektrane u dva ciklusa, svaki sa trajanjem po sedam dana i to:

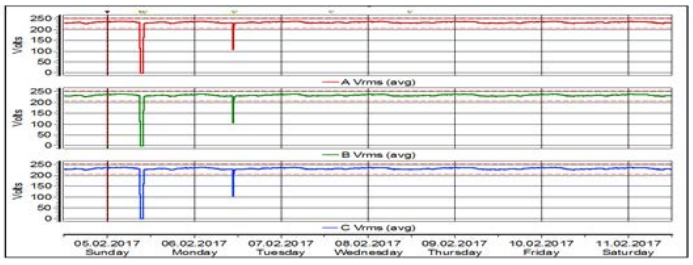
1. Prvi ciklus mjerenja – prije priključenja fotonaponske elektrane na ED mrežu
2. Drugi ciklus mjerenja – nakon uključenja fotonaponske elektrane na ED mrežu

Za mjerenja je korišten mrežni analizator, model MAVOWATT 70 (slika 3) koji vrši mjerenja u skladu sa IEC61000-4-30 Klase A/IEEE 1159/EN50160. Za obradu podataka je korišten licencirani softver DRAN-VIEW - 6 - Professional. Predstavit ćemo drugi ciklus mjerenja priključene fotonaponske elektrane na ED mrežu.

Slika 3. MAVOWATT Power 70 Xplorer – šema spajanja

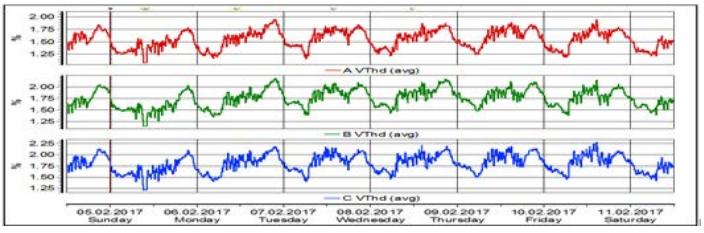
IV.1. Varijacije napona (kolebanje napona)

Slika. 4 prikazuje efektivne vrijednosti faza napona Vrms-avg (usrednjenu vrijednost na 10-min segmentu). Crvene isprekidane linije prikazuju donju (Un-10%) i gornju (Un+10%) graničnu vrijednost napona po normi EN50160. S obzirom da se standardne granice (Un ± 10 %) ne prekoračuju u više od 5 % slučajeva na 7-dnevnom periodu vremena zaključujemo da je norma EN50160 - **zadovoljena**. U jednom trenutku je došlo do u 15,46 h, dok je u drugom trenutku u 11,55h došlo do kolebanja napona, odnosno pada na vrijednost 110 V.



Slika 4. Prikaz efektivnih vrijednosti faza napona usrednjenih na 10-min segmentu

IV.2. Faktor harmonijskog izobličenja napona (THD)



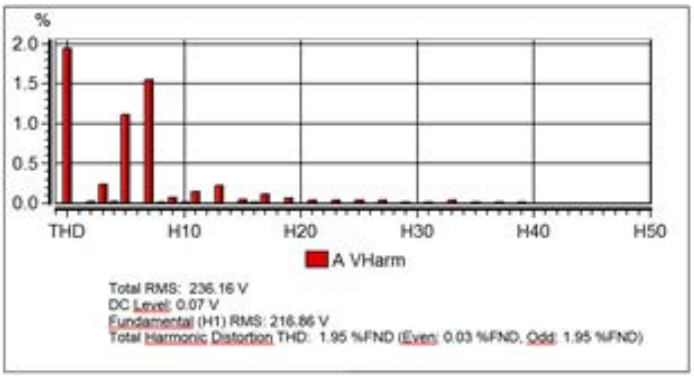
Slika 5. Prikaz faktora harmonijskog izobličenja napona (THD) po fazama

Slika 5 prikazuje vrijednosti THD-a napona po fazama tokom mjernog perioda, odnosno THD-avg (usrednjenu vrijednost na 10-min segmentu). Pri proračunu THD-a napona, u obzir su uzeti svi harmonici, uključujući 40-ti. Vrijednosti su svedene na procente U_1 (u skladu sa BAS EN50160). Sa slike se vidi da vrijednosti

THD-a tokom mjernog perioda imaju približno identične vrijednosti u svakoj fazi. Vrijednosti THD-a se kreću u opsegu od 1,0% U1 do 2,3% U_1, odnosno nikad ne prekoračuju graničnu vrijednost od 8% U_1, čime ostaju unutar graničnih vrijednosti definisanih normom EN50160 – **norma zadovoljena.**

IV.3. Učešće viših harmonika i THD napona

IV.3.1. Vrijednosti za fazu A



Slika 6. Učešće viših harmonika u talasnom obliku napona faze A

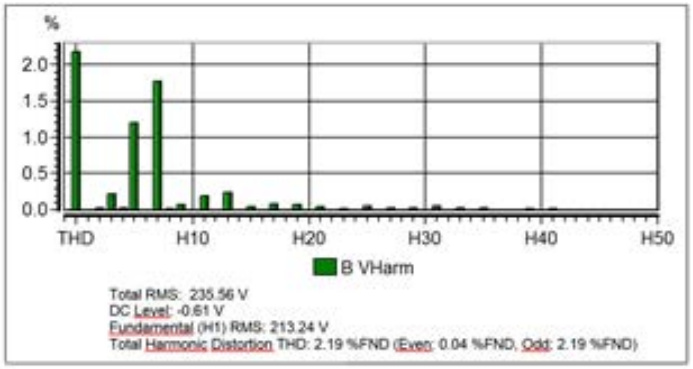
Slika 6 prikazuje vrijednosti harmonika napona svedene na procente osnovnog harmonika napona U_1 (u skladu sa EN50160) faze A u trenutku nastupanja najveće vrijednosti THD-a. Sa slike se može vidjeti izraženo prisustvo neparnih harmonika, posebno petog i sedmog. Tokom mjernog perioda je ukupno učešće viših neparnih harmonika 1,95 %, a ukupan zbir svih parnih harmonika iznosi 0,03 % osnovnog harmonika, čime je ukupan THD 1,95 % osnovnog harmonika. Iz tabele 1 vidimo da svaki pojedinačni harmonik ostaje u opsegu graničnih vrijednosti EN50160 – **norma zadovoljena.**

Tabela 1. Prikaz pojedinačnog učešća viših harmonika napona u fazi A

NEPARNI VIŠI HARMONICI								PARNI VIŠI HARMONICI			
Koji nisu djeljivi sa tri				Koji su djeljivi sa tri							
R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard		R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard		R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard	
5	1,08	<6,0	DA	3	0,33	<5,0	DA	2	0,03	<2,0	DA
7	1,44	<5,0	DA	9	0,14	<1,5	DA	4	0,04	<1,0	DA
11	0,40	<3,5	DA	15	0,09	<0,5	DA	6-24	≤0,03	<0,5	DA
13	0,21	<3,0	DA	21	0,05	<0,5	DA				
17	0,18	<2,0	DA								
19	0,10	<1,5	DA								
23	0,08	<1,5	DA								
25	0,05	<1,5	DA								

IV.3.2. Vrijednosti za fazu B

Slika 7 prikazuje vrijednosti harmonika napona svedene na procente osnovnog harmonika napona U_1 (u skladu sa EN50160) faze B u trenutku nastupanja najveće vrijednosti THD-a. Tokom mjernog perioda je ukupno učešće viših neparnih harmonika 2,19 %, a ukupan zbir svih parnih harmonika iznosi 0,04% osnovnog harmonika, čime je ukupan THD 2,19 % osnovnog harmonika. Iz tabele 2 vidimo da svaki pojedinačni harmonik ostaje u opsegu graničnih vrijednosti EN50160 – **norma zadovoljena.**



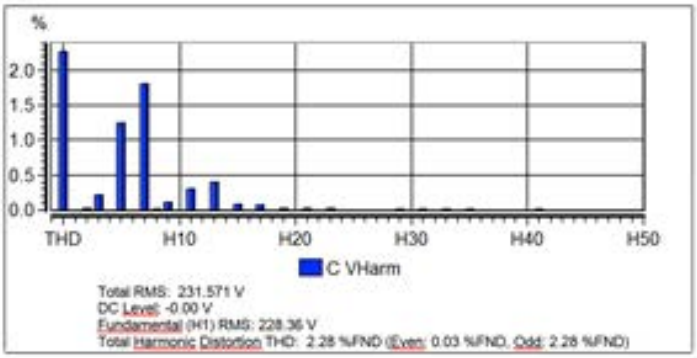
Slika 7. Učešće viših harmonika u talasnom obliku napona faze B

Tabela 2. Prikaz pojedinačnog učešća viših harmonika napona u fazi B

NEPARNI VIŠI HARMONICI								PARNI VIŠI HARMONICI			
Koji nisu djeljivi sa tri				Koji su djeljivi sa tri							
R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard		R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard		R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard	
5	1,20	<6,0	DA	3	0,28	<5,0	DA	2	0,03	<2,0	DA
7	1,65	<5,0	DA	9	0,12	<1,5	DA	4	0,03	<1,0	DA
11	0,36	<3,5	DA	15	0,07	<0,5	DA	6-24	≤0,03	<0,5	DA
13	0,24	<3,0	DA	21	0,05	<0,5	DA				
17	0,20	<2,0	DA								
19	0,12	<1,5	DA								
23	0,10	<1,5	DA								
25	0,07	<1,5	DA								

IV.3.3. Vrijednosti za fazu C

Slika 8 prikazuje vrijednosti harmonika napona svedene na procente osnovnog harmonika napona U_1 (u skladu sa EN50160) faze C u trenutku nastupanja najveće vrijednosti THD-a. Tokom mjernog perioda je ukupno učešće viših neparnih harmonika 2,28%, a ukupan zbir svih parnih harmonika iznosi 0,03% osnovnog harmonika, čime je ukupan THD 2,28% osnovnog harmonika. Iz tabele 3 vidimo da svaki pojedinačni harmonik ostaje u opsegu graničnih vrijednosti EN50160 - **norma zadovoljena.**

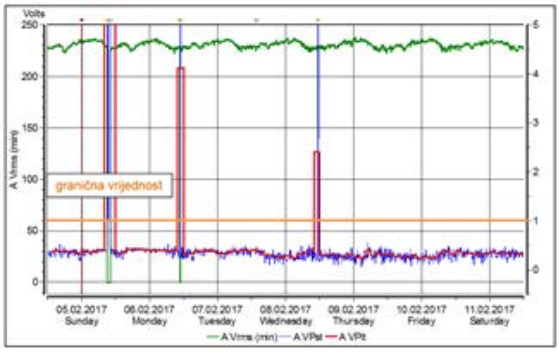


Slika 8. Učešće viših harmonika u talasnom obliku napona faze C
Tabela 3. Prikaz pojedinačnog učešća viših harmonika napona u fazi C

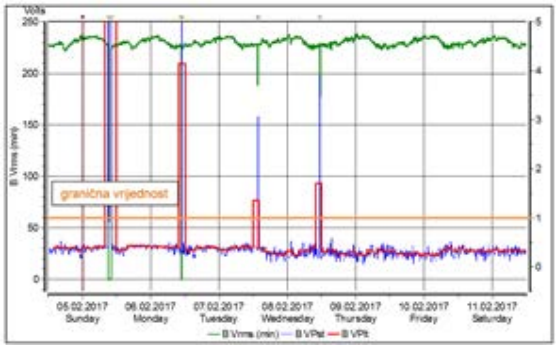
NEPARNI VIŠI HARMONICI								PARNI VIŠI HARMONICI			
Koji nisu djeljivi sa tri				Koji su djeljivi sa tri							
R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard		R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard		R/b h.	U_n (%)	Zadovoljen standard	
5	1,25	<6,0	DA	3	0,30	<5,0	DA	2	0,03	<2,0	DA

7	1,69	<5,0	**DA**	9	0,12	<1,5	**DA**	4	0,03	<1,0	**DA**
11	0,38	<3,5	**DA**	15	0,08	<0,5	**DA**	6-24	≤0,03	<0,5	**DA**
13	0,28	<3,0	**DA**	21	0,04	<0,5	**DA**				
17	0,16	<2,0	**DA**								
19	0,11	<1,5	**DA**								
23	0,08	<1,5	**DA**								
25	0,06	<1,5	**DA**								

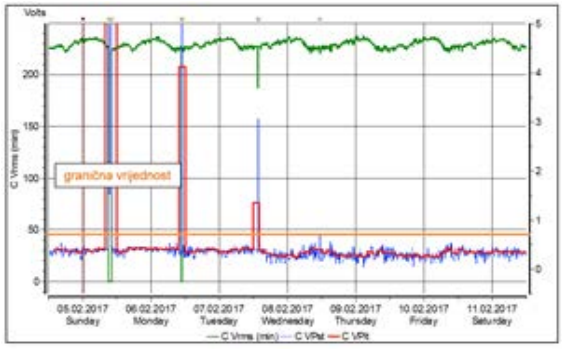
IV.4. Treperenje (fliker)



Slika 9. Prikaz vrijednosti flikera i minimalnih efektivnih vrijednosti napona za fazu A



Slika 10. Prikaz vrijednosti flikera i minimalnih efektivnih vrijednosti napona za fazu B



Slika 11. Prikaz vrijednosti flikera i minimalnih efektivnih vrijednosti napona za fazu C

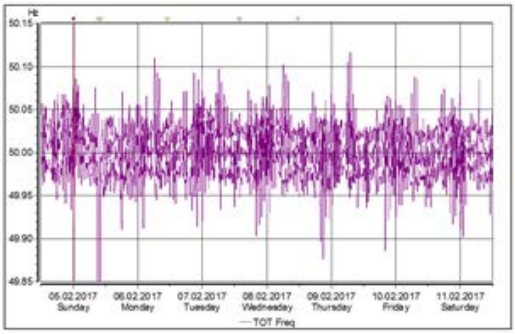
Na slikama 9, 10 i 11 su prikazane minimalne efektivne vrijednosti napona, te kratkotrajni i dugotrajni flikeri po fazama. Norma EN50160 dozvoljava da 5% vrijednosti dugotrajnog flikera – Plt prelazi graničnu vrijednost, koja iznosi 1, tokom mjernog perioda od 7 dana. Vrijednost flikera koja prelazi vrijednost 1 uzrokovana je naponskim propadima i prekidom napajanja. S obzirom da je tokom 95% vremena mjernog perioda vrijednost dugotrajnog flikera ispod granične vrijednosti koja iznosi 1, zaključuje se da je **– norma zadovoljena.**

Flicker

		Compliance:			
Range	Treshold	CHA	CHB	CHC	
<1	95.0	100.0%	100.0%	100.0%	PASSED

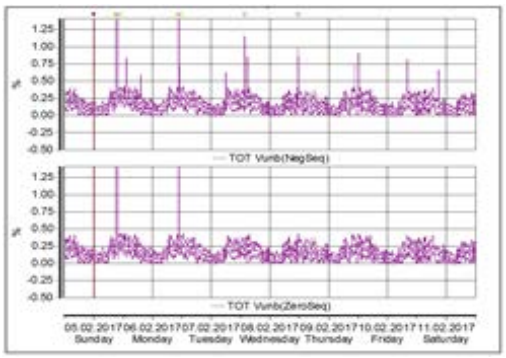
IV.5. Frekvencija napona napajanja

U periodu kada je zabilježen prelazni proces prekida i uspostavljanja napona napajanja, izmjerena je vrijednost frekvencije 47,02 Hz. Sa slike 12 se može uočiti da 100% vrijednosti frekvencije napona napajanja ostaje unutar granica 50Hz +4% /-6%, odnosno u granicama od 47Hz do 51Hz – **norma zadovoljena.**



Slika 12. Prikaz vrijednosti frekvencije napona napajanja

IV.6. Nesimetričnost napona napajanja



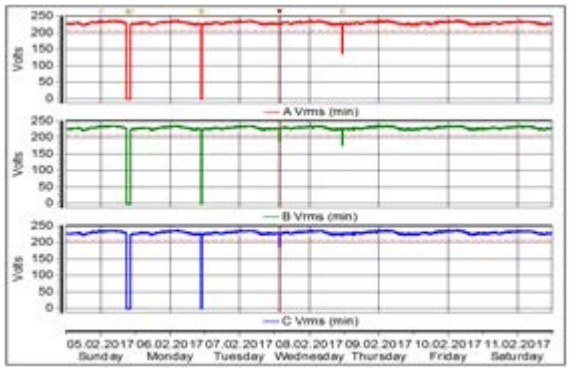
Slika 13. Prikaz nesimetričnosti napona napajanja tokom perioda mjerenja

Prvi dio slike 13 prikazuje efektivne vrijednosti inverzne komponente napona napajanja izražene kao procentualni udio prema vrijednostima direktne komponente, usrednjene na 10-minutnom intervalu, a drugi dio prikazuje efektivne vrijednosti nulte komponente napona napajanja izražene kao procentualni udio prema vrijednostima direktne komponente, usrednjene na 10-minutnom intervalu (informativno). Nesimetričnost je definisana na sljedeći način: Pri normalnim pogonskim uslovima rada 95% svih 10-minutnih usrednjenih efektivnih vrijednosti inverzne komponente napona moraju ostati unutar granice od 2% odgovarajuće direktne komponente. S obzirom da tokom 95% vremena mjernog perioda od sedam dana, vrijednosti svih 10-

minutnih usrednjenih efektivnih vrijednosti inverzne komponente ostaju unutar granice 2% odgovarajuće direktne komponente zaključuje se da je – **norma zadovoljena.**

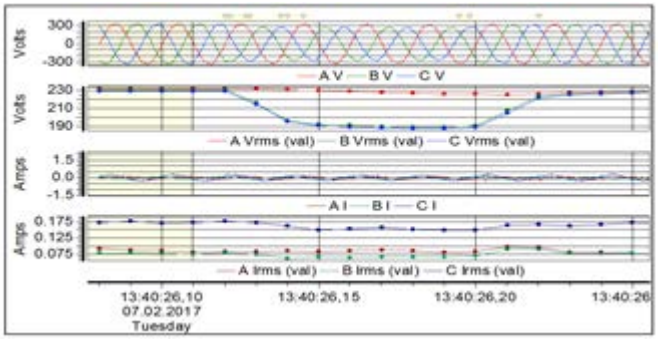
IV.7. Naponski propadi, prenaponi i prekidi napajanja

Tokom mjernog perioda od sedam dana zabilježena su **dva naponska propada**.

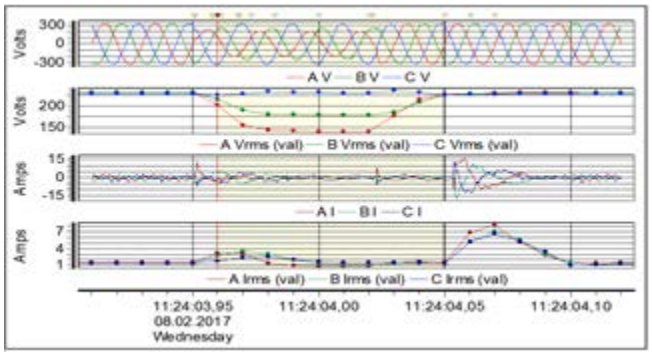


Slika 14. Minimalne vrijednosti efektivnih vrijednosti faza napona na 10-minutnom intervalu vremena

Slika 14 pokazuje minimalne iznose efektivnih vrijednosti faza napona na 10-minutnom intervalu vremena, gdje su efektivne vrijednosti napona računate svakih 10 ms. U jednom periodu u 13:40h zabilježen je naponski propad u fazama B i C, i trajao je 80,11ms. Preostali napon u fazi B iznosio je 189,0V (odnosno 82,17% nazivnog napona), a u fazi C 187,6V (odnosno 81,56% nazivnog napona). U drugom periodu u 11:24h zabilježen je naponski propad u fazama A i B, i trajao je 89,99ms. Preostali napon u fazi A iznosio je 140,3V (odnosno 61,0% nazivnog napona), a u fazi B 178,6V (odnosno 77,65% nazivnog napona). S obzirom na prikazane talasne oblike i efektivne vrijednosti struja i napona (slike 15 i 16), zaključujemo da su ovi naponski propadi došli iz mreže, odnosno da ih nije uzrokovala fotonaponska elektrana.

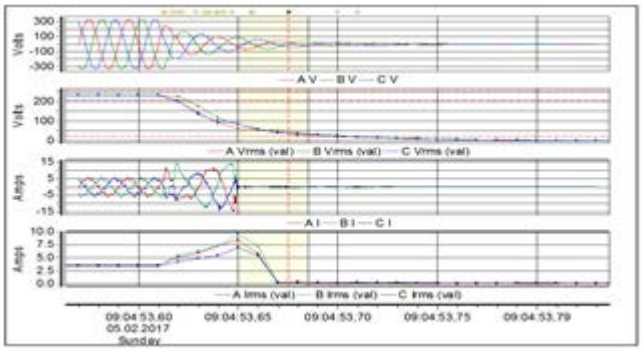


Slika 15. Naponski propad faza B i C

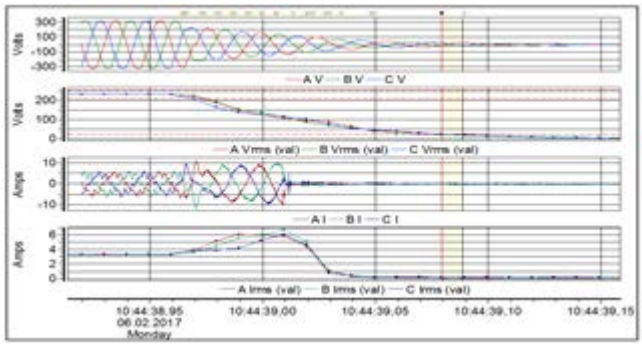


Slika 16. Naponski propad faza A i B

Tokom mjernog perioda sa priključenom solarnom elektranom na NN distributivnu mrežu, zabilježena su **dva prekida napajanja** (eng. interruptions). Prvi prekid napona napajanja zabilježen je u jednom periodu u 09:04h (slika 17). Prekid je trajao 57minuta i 52,8 sekundi. Drugi prekid napona napajanja zabilježen je u drugom periodu u 10:44h (slika 18). Prekid je trajao 6 minuta i 1,4 sekundi. Analogno sa prethodnim slikama, u normalnom režimu rada elektrane, dolazi do naponskog propada koji prelazi u prekid napajanja. Elektrana reaguje na način da u mrežu injektira veću vrijednost struje (zbog veće potencijalne razlike, između elektrane i mreže), a nakon izvjesnog vremena zaštita izbacuje elektranu sa mreže. Zaključujemo da elektrana nije izazvala ove prekide napajanja.



Slika.17. Prekid napona napajanja



Slika 18. Prekid napona napajanja

Prenaponi (eng. swells) se po standardu klasificiraju također po visini i vremenu trajanja, a nakon obrade mjernih rezultata nisu zabilježeni. Normom EN50160 nije određen granični broj propada napona, prekida napona napajanja, kao ni prenapona

tokom određenog perioda. To je predmet dogovora (ugovora) između kupca i isporučioca električne energije.

IV.8. Tranzijentni prenaponi

Tokom mjernog perioda sa priključenom solarnom elektranom na NN distributivnu mrežu, registrovano je ukupno 86 tranzijentnih prenapona, čiji je iznos unutra granica od 160 do 200%. Norma EN50160 preporučuje da se broj tranzijenata daje **informativno.**

V. ZAKLJUČAK

Budućnost obnovljivih izvora energije u svijetu zagarantovana je potrebom država za održivim razvojem, zaštitom okoliša i energetskom efikasnošću, zbog toga što obnovljivi izvori energije imaju vrlo važnu ulogu u smanjenju emisije ugljičnog dioksida (CO_2) u atmosferu. Smanjenje emisije CO_2 u atmosferu je politika Evropske unije, pa tako i FBiH. Analiza uticaja elektrana na kvalitet električne energije obavezna je u postupku priključenja na mrežu i kao takva zahtijeva ozbiljan pristup. Kao kriterij za ocjenu kvaliteta električne energije u tački primopredaje korišteni su kriteriji standarda BAS EN50160, definisan graničnim vrijednostima parametara mrežnog napona koji se isporučuje krajnim potrošačima. Shodno tome, u radu je obavljena detaljnija analiza svih važnih aspekata koji se tiču metrološkog obezbjeđenja propisanog nivoa kvaliteta isporučene energije, prvenstveno preko analize i pregleda osnovnih mjernih parametara i pokazatelja kvaliteta, važeće normativne regulative, kao i uređaja za mjerenje i analizu standardizovanih parametara kvaliteta. Tokom mjernog perioda u tački priključenja solarne elektrane, bez priključene elektrane, registrovana su dva naponska propada, koji su praćeni povećanim vrijednostima flikera. Bez obzira na registrovane događaje, broj prekoračenja graničnih vrijednosti ostaje unutrar dozvoljenog broja prekoračenja po standardu BAS EN50160, tako da je standard BAS EN50160 zadovoljen. Tokom mjernog perioda u tački priključenja solarne elektrane sa priključenom elektranom u probnom radu registrovana su dva naponska propada i dva prekida napona napajanja. Ovi događaji su praćeni povišenim vrijednostima flikera Pst i Plt. U analizi događaja je pokazano da uzročnik ovih događaja nije solarna elektrana. Pomenuti, kao i svi ostali parametri kvaliteta električne energije su unutar dozvoljenih vrijednosti standarda BAS EN50160. Imajući u vidu gore navedene činjenice i rezultate mjerenja kvaliteta električne energije zaključujemo da fotonaponska elektrana nema uticaja na kvalitet električne energijem u tački primopredaje električne energije u distributivnu mrežu.

LITERATURA

[1] J. Stones, A. Collinson, "Power quality", Power Engineering Journal, vol. 15 (2), 2001, pp. 58-64.

[2] R. Ghandehari, A. Jalilian, "Economical impacts of power quality in power systems", 39th International Universities Power Engineering Conference (UPEC 2004) IEEE, vol 2, 6-8 September 2004, pp. 893-897.

[3] A. Thapar, T.K. Saha, Y.D. Zhao, (2004). "Investigation of power quality categorisation and simulating its impact on sensitive electronic equipment", IEEE Power Engineering Society General Meeting, vol. 1, 6-10 June 2004, pp. 528-533.

[4] R.C. Sermon, "An overview of power quality standards and guidelines from the end-user's point-ofview", IEEE Rural Electric Power Conference, 8-10 May 2005, B1/1-B1/5.

[5] A. Bijedić, H. Salkić, "The Analysis of the Impact on Electrical Energy Quality of Small Solar Plant in Trial Period", IREE-International Review of Electrical Engineering, vol. 9, February 2014, pp.121-126.

[6] A. Softić, Š. Gruhonjić Ferhatbegović, H. Salkić, I. Divković, H. Imamović, „Analiza uticaja solarne elektrane na distributivnu mrežu", XI Savjetovanje BH CIGRE, 15- 19.9.2013, Neum, BiH, STK C5

[7] J. Rivier, T. Gomez, "A conceptual framework for power quality regulation", Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, vol. 2, 2000.

[8] Z. Klaić, S. Nikolovski, "Kvaliteta elektricne energije - mjerenja prema normi EN50160", VI savjetovanje HR Cigre, Cavtat, 09. - 13. 11 2003.

[9] H. Salkić, A. Bijedić, A. Softić, "Analiza uticaja solarne elektrane na kvalitet električne energije distributivne mreže", CIRED 2016 - X Savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije, 26. 09. - 30. 09. 2016, Vrnjačka Banja, Srbija

[10] J. Saletović. H. Salkić, A .Softić, "Virtuelne elektrane – koncept, perspektive, izazovi", XIII Savjetovanje BH CIGRE, 17- 21.09.2017, Neum, BiH, STK C5

[11] J. Saletović. H. Salkić, "Optimalni odnos nazivnih snaga fotonaponske elektrane" , XIV Savjetovanje BH CIGRE, 20- 23.10.2019, Neum, BiH, STK C5

[12] H. Salkić,T. Konjić, M. Stojkov, S. Maksumić, "Parameters of distribution network in connection point of solar measurement and analysis of power quality power plant", XII Savjetovanje BH CIGRE, 04- 08.10.2015, Neum, BiH, STK C5

[13] EN 50160:2007, "Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution networks", CENELEC, September 2007

[14] IEEE Recommended Practice for Measurement and Limits of Voltage Fluctuations and Associated Light Flicker on AC Power Systems, IEEE Std 1453-2004

AUTORI

Hidajet Salkić – doktor tehničkih nauka iz oblasti elektrotehnike, profesor – fakultet CEPS, Kiseljak, BiH
h.salkic@epbih.ba

Amir Softić – doktor tehničkih nauka iz oblasti elektrotehnike, a.softic@epbih.ba

Amer Salkić – dipl. ing. el.,
salkicamer@gmail.com

Hidajet Salkić – h.salkic@epbih.ba , tel. +387-35-304-273

Primena Lagranžove optimizacije na problematiku proizvodnje energije iz obnovljivih izvora

Application of Lagrange multipliers to the problematics of energy production in renewable sources

Vladan Ristić [*,], dr Nikola Rajaković [**,***]**

[*] Akcionarsko društvo „Elektromreža Srbije“ / JSC Elektromreza Srbije
[**] Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu / School of Electrical Engineering, University of Belgrade
[***] Savez energetičara Srbije / Association of Energy Sector Specialists

Rezime – U skladu sa primetnim povećanjem ekološke svesti čovečanstva u poslednjoj deceniji, javila se i potreba za prilagođenjem brojnih aspekata svakodnevnog ljudskog života tendencijama naklonjenim očuvanju životne sredine. Jedna od oblasti na koje se ova potreba odrazila u najvećoj meri jeste elektroenergetika, pri čemu se, pre svega, mogu istaći aktuelne modifikacije sagledavanja proizvodnih sistema, kod kojih se primećuje sve veće udaljavanje od konvencionalnih izvora i okretanje prema prihvatljivijim obnovljivim izvorima energije. Međutim, pored nesumnjive ekološke održivosti ovih izvora, mora se razmatrati i njihova finansijska održivost, odnosno ekonomičnost proizvodnje električne energije iz njih, zbog čega temu ovog rada predstavlja minimizacija troškova generisanja energije pomoću ovakvih kapaciteta prilikom napajanja fiktivnog konzumnog područja. Za potrebe rada, prihvaćena je hipotetička situacija u kojoj je to područje odvojeno od prenosne i distributivne mreže, gde se njegovo napajanje može obaviti isključivo iz odgovarajućih kapaciteta u vidu vetroelektrane, solarne elektrane i hidroelektrane, lociranih u neposrednoj blizini razmatrane oblasti. Kao zadatak optimizacije, koja je obavljena korišćenjem Lagranžove optimizacione tehnike, odabrana je pravilna raspodela snaga proizvodnje navedenih elektrana u svakom satu u toku godine, tako da ukupni godišnji troškovi napajanja ovog područja budu svedeni na najmanju moguću meru, pri čemu su, uz razumevanje trenutno aktuelnih podsticajnih mera kojima se potencijalni investitori u obnovljive izvore energije motivišu da ulažu u ovakav vid projekata, obrađeni slučajevi pri kojima su povlašćenom *feed-in* tarifom obuhvaćeni različiti procenti instalisanih kapaciteta vetroelektrane i solarne elektrane. Na kraju rada je, u cilju pružanja kompletnog uvida u sprovedeni optimizacioni postupak, za nasumično odabran set ulaznih pretpostavki vezanih za razmatrani sat u toku godine i udeo *feed-in* tarife u proizvodnim kapacitetima, prikazan proces određivanja optimalnih snaga proizvodnje iz analiziranih generatora i koeficijenata propisanih pravilima iskorišćene optimizacione tehnike.

Ključne reči – Lagranžova optimizaciona tehnika, obnovljivi izvori energije, povlačenje konvencionalnih izvora, procena troškova proizvodnje, *feed-in* tarifa

Abstract – The apparent increase of ecological awareness during the previous decade has led to the need for adaptation of numerous areas of everyday human lives, so they fit the newly developed environmental tendencies. One of the areas in which this necessity was prominent was the power engineering, where, above all, the understanding of production systems was affected, with the turnabout regarding the distancing from the conventional sources and inclining towards the more acceptable renewable sources taking place. However, alongside the undeniable ecological sustainability of these sources, the financial sustainability of their utilization needs to be considered as well, which is why the subject of this paper is the minimization of costs of energy production in these capacities, if the fictious demand area needed to be supplied. It was assumed that this area is separated from transmission and distribution network, with the sole source of energy for the analyzed consumption being the wind, solar and hydro power plants, located in the close vicinity of the examined area. As the objective of the optimization, performed by the method of Lagrange multipliers, the appropriate apportioning of the generation powers in these plants for every hour during the year was selected, so the total yearly costs of supplying the demand were as low as possible. Also, considering the currently promoted methods intended for encouragement of the potential investors to proceed with the projects that encompass renewable sources, the different cases for which the share of renewables included in the feed-in tariff was varied. Finally, in order to provide the full insight into the optimization procedure, for the randomly selected hour of the year and share of feed-in tariff in the generation capacities, the process of calculation of production powers in the described plants and multipliers needed for application of the selected optimization technique was enclosed.

Index Terms – decommissioning of conventional sources, feed-in tariff, generation cost estimation, Lagrange multipliers optimization, renewable energy sources

I. Uvod

Paralelno sa primetnim povećanjem ekološke svesti stanovništva u poslednjoj deceniji, došlo je i do nužnog

prilagođenja shvatanja vezanih za brojne oblasti ljudskog života principima očuvanja životne sredine i održivog razvoja, pri čemu se, kao jedna od grana nauke i privrede u kojima su ove promene percepcije najizraženije, može istaći i elektroenergetika. Uvažavajući činjenicu da se termoelektrane smatraju jednim od osnovnih izazivača efekta staklene bašte i, posredno, globalnog zagrevanja i klimatskih promena koje prete opstanku na planeti, ne čudi što su se ovakvi generatorski kapaciteti među prvima našli na udaru ekološki nastrojenih tendencija, te je, kao prihvatljivo rešenje, usvojena zamena takvih proizvodnih objekata obnovljivim izvorima energije gde god za to postoji mogućnost, pre svega određena raspoloživošću primarnih energenata koje obnovljivi izvori koriste, što su, prevashodno, a u skladu sa trenutnim stadijumima tehnološkog razvoja, vetar i sunčevo zračenje. U cilju adekvatnog balansiranja proizvodnje energije iz ovakvih izvora, u kojima se generisanje odvija uglavnom stohastički, podržana je i izgradnja hidroelektrana dovoljne instalisane snage kako bi se isporuka dovoljne količine električne energije potrošačima odvijala sigurno i neometano.

Ipak, uz brojne pogodnosti po okolinu koje primena obnovljivih izvora energije nesumnjivo nudi, neophodno je na odgovarajući način razmotriti i finansijske aspekte njihove integracije u elektroenergetske sisteme, u svrhu čega će, u sklopu ovog rada, biti analizirana mogućnost minimizacije troškova generisanja energije u njima korišćenjem Lagranžove optimizacione tehnike, uz pretpostavku da se napaja fiktivno konzumno područje koje je odvojeno od prenosne i distributivne mreže, te da se snabdevanje ovog potrošačkog regiona može realizovati isključivo uz pomoć vetroelektrane, solarne elektrane i hidroelektrane, smeštenih u neposrednoj blizini te oblasti. Odabir Lagranžove tehnike kao metode optimizacije koja će se u praktičnim proračunima prikazanim u ovom radu primenjivati je u direktnoj sprezi sa činjenicom da se ova tehnika već duži vremenski period koristi sa velikim uspehom u najrazličitijim granama elektroenergetike, počevši od utvrđivanja potencijalnih grešaka u kreiranoj topologiji mreže [1], preko unapređivanja procesa izračunavanja optimalnih tokova snaga po elementima sistema [2], pa sve do upravljanja invertorima ugrađenim u priključke fotonaponskih panela [3]. Ukoliko bi se analiza fokusirala isključivo na oblast generisanja električne energije, moglo bi se doći do toga da je opravdanost korišćenja izabrane metode za navedenu problematiku već potvrđena kako u radovima koji su se odnosili na preciziranje instalisane snage solarne elektrane koja se priključuje na distributivni sistem sa ciljem da se vrednost gubitaka u razmatranom sistemu svede na minimalnu meru [4], tako i za specificiranje optimalnog angažovanja već priključenih proizvodnih kapaciteta u cilju postizanja što povoljnijih radnih uslova sistema odabranih za vršenje analiza [5-7]. U skladu sa time, može se zaključiti da je Lagranžova optimizaciona tehnika ne samo pogodna, već, u izvesnoj meri, i preporučljiva za proračune poput onog prezentovanog u okviru ovog rada.

Uvažavajući pomenutu temu, rad je koncipiran tako da se u okviru Poglavlja II daje teorijska osnova potrebna za razumevanje rezultata priloženih u praktičnom delu rada, pre svega izražena u vidu smernica i definicija vezanih za Lagranžovu optimizacionu tehniku. Poglavlje III pruža generalne informacije o svakoj od elektrana koje su uvrštene u simulaciju napajanja kreiranog konzumnog područja, uz napominjanje usvojenih vrednosti neophodnih ekonomskih pokazatelja. Poglavlje IV prikazuje rezultate obavljenih proračuna, kako u vidu analize uticaja kapaciteta vetroelektrana i solarnih elektrana obuhvaćenih *feed-in* tarifama na godišnje troškove snabdevanja područja od interesa, tako i preko konkretizacije na jedan od razmatranih slučajeva, prilikom čega se demonstrira i izvođenje vrednosti Lagranžovih multiplikatora iz rezultata proračuna. Na samom kraju rada nalazi se Zaključak, u okviru koga su sumirani praktični rezultati rada, još jedanput naglašeni važni teorijski aspekti, ponovljene neke od pretpostavki usvojenih prilikom proračuna i potvrđene prethodno izvedene konkluzije.

II. LAGRANŽOVA OPTIMIZACIONA TEHNIKA

Prema najopštijoj definiciji, pod optimizacionim problemima bi se mogli podrazumevati problemi nalaženja najboljeg rešenja iz unapred definisanog skupa mogućih rešenja, uz uzimanje u obzir zadatog skupa ulaznih okolnosti i pretpostavki, pri čemu je jasno da, kako bi se ma koje rešenje iz raspoloživog domena moglo proglasiti za optimalno, definisani kriterijum optimalnosti mora biti kvantitativan, odnosno, merljiv. Jedan od najčešćih vidova optimizacionih problema jeste optimizacioni problem sa ograničenjima, pri kome se optimizacija sprovodi uz uvažavanje unesenih ograničenja vrednosti odgovarajućih varijabli, gde se ova ograničenja obično uvode u formi različitih jednakosti ili nejednakosti. Vremenom je za određivanje optimalnog rešenja razvijen značajan broj tehnika, gde je, da bi se za neki problem mogla iskoristiti neka od ovih metoda, neophodno prethodno postaviti odgovarajući matematički model koji predstavlja vernu kopiju stvarnog problema. Nakon što se taj model postavi, potrebno je rešiti optimizacioni problem pomoću odabrane tehnike, pri čemu od prirode i osobina samog problema zavisi koja je metoda najpodesnija za korišćenje.

Prema karakteristikama problema koji je obuhvaćen obimom ovog rada, izloženim u okviru uvodnog segmenta, kao najpodesnija metoda za njegovo rešavanje je izdvojena Lagranžova optimizaciona tehnika, koja se može svrstati u red nelinearnih optimizacionih metoda sa ograničenjima. Ukoliko bi se vektor rešenja, dimenzija $m\times 1$, obeležio sa $\boldsymbol{x}$, tada bi se ograničenja data u formama nejednakosti (uzeto je da ih ima ukupno n) i jednakosti (smatrano je da u optimizaciji postoji p ovakvih ograničenja) mogla, tim redom, predstaviti u oblicima prikazanim obrascima (1) i (2):

$$g_i(\boldsymbol{x}) \leq 0, \quad i \in \{1,2,\dots,n\} \tag{1}$$

$$h_j(\boldsymbol{x}) = 0, \quad j \in \{1,2,\dots,p\} \tag{2}$$

Na ovom mestu je potrebno eksplicitno naglasiti da Lagranžova optimizacija može, pored standardne oblasti rada, biti primenjena kako za probleme u kojima ne postoji jedan od dva gorenavedena tipa ograničenja (kada je n jednako nuli ili kada je p jednako nuli), tako i za specijalne slučajeve kod kojih ograničenja i ne postoje (kada su n i p jednaki nuli) [8].

U cilju adekvatne primene Lagranžove optimizacione metode, sva pomenuta ograničenja se moraju konvertovati u ograničenja tipa jednakosti, gde se može postaviti pitanje načina na koji je ovo moguće obaviti bez kompromitovanja tačnosti samog

proračuna. Odgovor na ovo je dat u vidu fiktivnih nenegativnih varijabli, označenih sa z_i^2, gde i leži u granicama od 1 do n, koje se dodaju na levu stranu svakog od ograničenja originalno prikazanih u formi nejednakosti, čime se desna strana svakog od njih izjednačava sa nulom i svodi na formu jednakosti prikazanih izrazom (2). Prema tome, predmetnih n ograničenja se svodi na sistem čiji se osnovni prikaz može izraziti preko obrasca (3):

$$g_i(\boldsymbol{x},\boldsymbol{z}) = g_i(\boldsymbol{x}) + z_i^2 = 0, \quad i \in \{1,2,\dots,n\} \tag{3}$$

Sada je jasno da je, ukoliko se raspolaže vrednošću $g_i(\boldsymbol{x})$, moguće jednoznačno odrediti i njoj komplementarnu vrednost pomoćne promenljive, kao i da ovakvo rezonovanje važi i u suprotnom smeru. Neka je sada funkcija čija je minimizacija postavljena kao krajnji cilj optimizacije označena sa $f(\boldsymbol{x})$. Tada bi se, podrazumevajući da su sva ograničenja izražena u formi jednakosti sa nultom vrednošću sa desne strane, ova funkcija mogla na adekvatan način proširiti, čime bi se dobila funkcija poznata kao Lagranžijan (Lagranžova funkcija). Karakteristika Lagranžijana, datog obrascem (4), jeste da se njegova minimizacija može poistovetiti sa minimizacijom inicijalno razmatrane kriterijumske funkcije (5):

$$L(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\lambda},\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{z}) = f(\boldsymbol{x}) + \sum_{i=1}^{n} \lambda_i \cdot g_i(\boldsymbol{x},\boldsymbol{z}) + \sum_{j=1}^{p} \mu_j \cdot h_j(\boldsymbol{x}) \tag{4}$$

$$L(\boldsymbol{x},\boldsymbol{\lambda},\boldsymbol{\mu},\boldsymbol{z}) \longrightarrow min \Longrightarrow f(\boldsymbol{x}) \longrightarrow min \tag{5}$$

U ovim obrascima je sa je sa $\boldsymbol{\lambda}$ obeležen vektor Lagranžovih multiplikatora koji množe ograničenja koja su prvobitno bila postavljena u vidu nejednakosti, te se može utvrditi da se ovaj vektor dimenzija n×1. Sa druge strane, vektor $\boldsymbol{\mu}$ predstavlja vektor Lagranžovih multiplikatora kojima se množe ograničenja koja su i na početku optimizacionog procesa bila izražena preko jednakosti, te su dimenzije ovog vektora p×1. Određivanje vrednosti Lagranžovih multiplikatora može se smatrati jednim od ključnih delova pravilnog vršenja optimizacije ovom metodom.

Da bi se dobijeno rešenje moglo smatrati optimalnim, mora se postaviti uslov jednakosti parcijalnih diferencijala Lagranžijana prema svakoj od pojedinačnih promenljivih sa nulom. Za početak, ovo mora važiti za svaki od elemenata rešenja:

$$\frac{\partial L}{\partial x_k} = \frac{\partial f}{\partial x_k} + \sum_i \lambda_i \cdot \frac{\partial g_i}{\partial x_k} + \sum_j \mu_j \cdot \frac{\partial h_j}{\partial x_k} = 0, k = \{1,2 \dots m\} \tag{6}$$

Zatim se identični uslov mora primeniti i na parcijalne izvode Lagranžijana po svakom od prethodno uvedenih Lagranžovih multiplikatora, što se, matematičkom simbolikom, može prikaziti u formi datoj jednakostima (7) i (8):

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = g_i(\boldsymbol{x},\boldsymbol{z}) = 0, \qquad i = \{1,2 \dots n\} \tag{7}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \mu_j} = h_j(\boldsymbol{x}) = 0, \qquad j = \{1,2 \dots p\} \tag{8}$$

Razmatranjem ovih jednakosti moglo bi se doći do zaključka da su njima zapravo samo, još jedanput, iskazana postavljena ograničenja po kojima se optimizacija odvija. Konačno, poslednjih n neophodnih jednačina može se dobiti ukoliko se pronađu parcijalni izvodi Lagranžove funkcije prema pomoćnim promenljivima z_i, koji se potom izjednačavaju sa nulom:

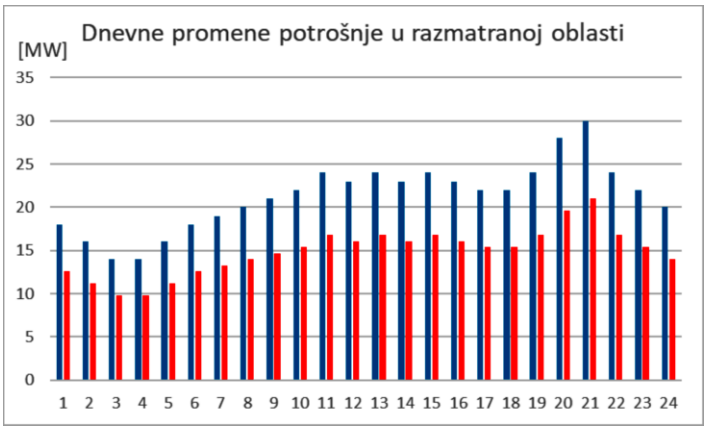
$$\frac{\partial L}{\partial z_i} = 2 \cdot \lambda_i \cdot z_i = 0, \qquad i = \{1,2 \dots n\} \tag{9}$$

Iz ove jednačine je očigledno da između uređenih parova promeljivih λ_i i z_i postoji specifična veza, te da makar jedna od ove dve međusobno odgovarajuće promenljive mora biti jednaka nuli. Shodno tome, ukoliko se za neku vrednost z_i dobije da je različita od nule, tada je njoj pripadajuća vrednost multiplikatora λ_i izvesno jednaka nuli, i obrnuto. Rešavanjem postavljenog sistema od $(m + 2 \cdot n + p)$ jednačina određuje se optimalno rešenje za vrednosti elemenata vektora $\boldsymbol{x}$ koje daju minimalnu vrednost postavljene kriterijumske funkcije optimizacije $f(\boldsymbol{x})$.

III. OPIS PRAKTIČNOG PROBLEMA

Kao što je u okviru uvodnog Poglavlja već naglašeno, tema praktičnog dela ovog rada jeste primena Lagranžove optimizacione metode u cilju minimizacije godišnjih troškova uzrokovanih napajanjem hipotetičkog konzumnog područja električnom energijom pomoću vetroelektrane, solarne elektrane i hidroelektrane. U okviru ovog Poglavlja date su sve uvodne pretpostavke, neophodne radi jednoznačnog definisanja problema koji se rešava navedenom tehnikom optimizacije.

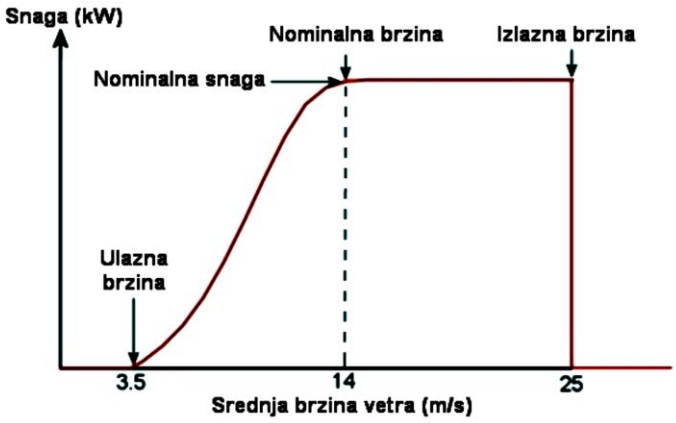
Uzevši u obzir da je razmatrano konzumno područje neophodno napajati iz obnovljivih izvora energije, nameće se zaključak da se ovaj slučaj, ma koliko bio hipotetički, geografski ne može pozicionirati na lokaciju na kojoj ne postoje uslovi za izgradnju kapaciteta vetroelektrana i solarnih elektrana dovoljnih za ispunjenje ovog cilja, u skladu sa čime je, kao lokacija na kojoj se nalazi predmetna fiktivna potrošačka oblast, odabrana opština Sečanj, koja se nalazi u regionu Centralnog Banata, u Vojvodini, nedaleko od državne granice Srbije i Rumunije. Još jedna osobina ove lokacije koja se pokazala kao veoma značajna prilikom izrade praktičnog dela ovog rada jeste činjenica da su za nju u prethodnom periodu rađena brojna pouzdana merenja klimatskih uslova, pre svega brzine vetra i jačine sunčevog zračenja, sa satnom rezolucijom, koja će biti korišćena u kasnijim analizama. Da bi se moglo pristupiti analizi napajanja kreiranog konzumnog područja, pre svega je bilo potrebno definisati njegovu potrošnju u zavisnosti od toga za koje doba dana se vrši analiza, uvažavajući pritom i varijacije potrošnje u zavisnosti od aktuelnog godišnjeg doba. Shodno tome, usvojena su dva tipična dnevna dijagrama potrošnje [9], pri čemu je prihvaćeno da je profil potrošnje u letnjim mesecima (od aprila do septembra) identičan kao i profil potrošnje u zimskim mesecima (od oktobra do marta), osim što je skaliran koeficijentom 0,7. Ovime je uvaženo to da maksimalna potrošnja u letnjim mesecima iznosi približno 70% vršne potrošnje u toku zimskog perioda. Konačno, da bi se ova čisto teoretska razmatranja prevela u vrednosti od praktičnog značaja, usvojeno je da maksimalna potrošnja ove oblasti u zimskim mesecima (u toku dvadeset i prvog časa u toku dana) približno iznosi 30 MW. Definisani dnevni profili potrošnje prikazani su na dijagramu na Slici 1, na kome je plavom bojom označena dnevna promena potrošnje u toku zimskog, a crvenom bojom dnevna promena potrošnje u toku letnjeg perioda.



Slika 1: Dnevne promene potrošnje u razmatranoj oblasti

Kada je potrošnja u ovoj oblasti definisana, bilo je neophodno precizirati parametre elektrana koje će se koristiti za podmirivanje potreba potrošnje za električnom energijom. Prvi od ovih generatorskih kapaciteta je vetroelektrana, pri čemu bi se neophodnim tehničkim parametrima za nju mogle smatrati instalisana snaga i karakteristika prema kojoj se odvija pretvaranje kinetičke energije vetra u korisnu, električnu energiju. Što se instalisane snage tiče, ona nije smela biti ni prevelika, prevashodno zbog nezanemarljive cene podizanja vetroturbina, ali ni premala, da bi se uticaj vetroelektrane na ukupne godišnje troškove snabdevanja razmatranog područja mogao jasno sagledati i osetiti. Shodno tome, za potrebe izvršene analize je usvojeno da je instalisani kapacitet predmetne vetroelektrane jednak 30 MW.

Za karakteristiku prema kojoj se odvija pomenuta konverzija energije, pretpostavljeno je da odgovara tipičnom dijagramu zavisnosti snage proizvodnje električne energije u vetroturbini od promene brzine vetra. Takav dijagram se može videti na Slici 2.



Slika 2: Snaga proizvodnje vetroturbine u zavisnosti od brzine vetra

Uz tehničke kriterijume vetroelektrane, bilo je potrebno usvojiti i reprezentativni ekonomski kriterijum u vidu jedinične cene električne energije proizvedene iz ovog kapaciteta, pri čemu je bilo neophodno napraviti jasnu razliku između energije koja se u sistem plasira u skladu sa propozicijama povlašćene *feed-in* tarife, pod kojom se podrazumeva da se investitorima, u izvesnom periodu vremena, garantuje plasman dela ili celokupne proizvedene energije u mrežu, pri čemu se otkup te energije vrši po nepromenljivim cenama, i energije koja se u sistem plasira prema trenutno važećim tržišnim uslovima, bez garantovanog boljeg položaja za investitore u obnovljive izvore energije. Prema aktuelnoj regulativi u Republici Srbiji, cena jednog MWh koji se iz vetroelektrane obuhvaćene *feed-in* tarifom plasira u sistem iznosi 92 €. Sa druge strane, jedinična cena energije koja bi odgovarala učešću vetroelektrane na slobodnom tržištu bi se mogla smatrati zavisnom od brzine vetra na datoj lokaciji, uz napomenu da cena jednog MWh pokazuje tendenciju opadanja što je brzina vetra veća. Shodno raspoloživim podacima [10], usvojen je sledeći matematički model promene jedinične cene električne energije iz vetroelektrane u zavisnosti od merenih vrednosti brzine vetra, pri čemu je sa v_w obeležena brzina vetra u razmatranom trenutku, izražena u m/s:

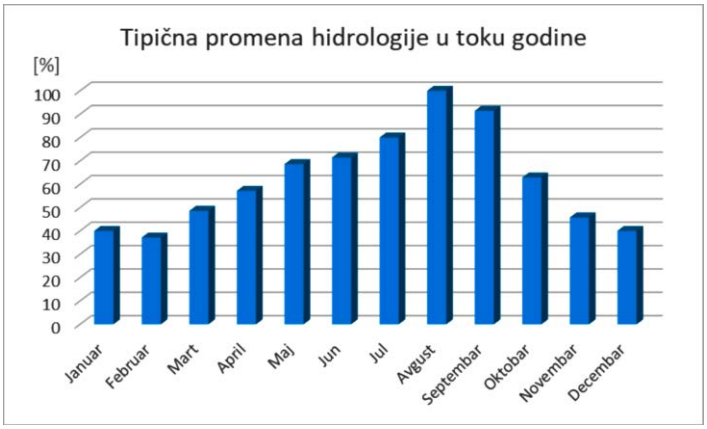
$$c_w\left[\frac{€}{\text{MWh}}\right] = \begin{cases} 86{,}153 & v_w \le 6 \\ 164{,}629 - 13{,}076 \cdot v_w & 6 < v_w \le 9 \\ 46{,}915 & v_w > 9 \end{cases} \quad (10)$$

Sličnim razmišljanjem kao u slučaju vetroelektrane, moglo bi se doći do zaključka da je i za solarnu elektranu adekvatno usvojiti vrednost instalisane snage od 30 MW, pri čemu su satne proizvodnje energije iz ove elektrane izračunavane prema merenim jačinama sunčevog zračenja na odabranom području. Ukoliko bi se razmatrali ekonomski aspekti generisanja energije iz ovog tipa izvora, moglo bi se doći do podatka o ceni jednog MWh koji se proizvede u solarnoj elektrani i plasira na slobodno tržište, koja, prema [11] iznosi 52,033 €. Nasuprot tome, ako je solarna elektrana locirana na teritoriji Republike Srbije i obuhvaćena *feed-in* tarifom, jedinična cena energije proizvedene iz nje je višestruko veća od tržišne i iznosi čak 162,5 €.

Kao što je već naglašeno, treći izvor koji bi se u sklopu ovog odeljka morao definisati spada u hidroelektrane. Da bi se odredila moguća snaga koja će biti na raspolaganju iz ove elektrane, neophodno je poznavati vrednosti visine vodenog pada i protoka vodene mase kroz lopatice turbine. Ukoliko su ove veličine poznate, tada se može pisati da je snaga koja se razvija na vratilu turbine:

$$P_{he}[\text{kW}] = 9{,}81 \cdot Q \cdot H \cdot \eta_t \quad (11)$$

U formuli (11) je sa Q obeležen zapreminski protok vode kroz turbinu, sa H neto pad vode pre njenog prolaska kroz turbinu, a sa η_t ukupni stepen iskorišćenja turbine. Kako je iz ove jednačine jasno da se snaga koja se iz hidroelektrane može plasirati u mrežu menja srazmerno protoku vode kroz turbinu elektrane, to se može zaključiti da će, na godišnjem nivou, ova snaga varirati u zavisnosti od promene hidrologije reka na kojima su hidroelektrane postavljene. Da bi se ova promena ilustrovala, na Slici 3 je prikazan grafik promene hidrologije, a, samim tim, i promene proizvodnje iz proizvoljne hidroelektrane u zavisnosti od meseca u kome se posmatranje obavlja, pri čemu su vrednosti na dijagramu date u procentima maksimalne mesečne proizvodnje u godini [12]. Na ovom mestu mora biti napomenuto da je prikazani dijagram isključivo ilustrativnog tipa i da bi, ukoliko bi se sprovodila realizacija projekta podizanja hidroelektrane na nekoj od reka u oblasti Banata, bilo neophodno pre toga beležiti hidrologiju te reke tokom višegodišnjeg perioda.



Slika 3: Prikaz tipične promene hidrologije u toku jedne godine

Analogno preostalim elektranama, i ovaj put je naredni korak predstavljalo preciziranje instalisane snage hidroelektrane, za koju je, za potrebe ove analize, usvojena vrednost jednaka 90 MW. Shodno dijagramu sa prikazane slike, ovakvu proizvodnju elektrana može ostvariti samo u avgustu, dok je tokom ostalih meseci snaga proizvodnje umanjena srazmerno hidrologiji koja je važeća za taj mesec. Takođe je, sa tačke gledišta ekonomskih prilika, usvojeno da je cena proizvedene električne energije iz hidroelektrane jednaka 70,799 € [13] po generisanom MWh. Važno je napomenuti da bi se ova elektrana, na neki način, mogla posmatrati i kao svojevrsna simulacija elektroenergetskog sistema na koji je povezana potrošačka oblast uz koju su pozicionirane solarna elektrana i vetroelektrana, čime bi se sprovedenoj simulaciji mogao dati još veći praktični značaj.

IV. PRIKAZ REZULTATA ANALIZE

Kako je na samom početku ovog rada kao njegov cilj postavljena minimizacija godišnjih troškova napajanja konzumne oblasti električnom energijom pomoću odgovarajućih elektrana, to je bilo neophodno, za svaki sat u toku godine, definisati optimalno angažovanje svake od tih elektrana, tako da se cena proizvodnje električne energije svede na najmanju moguću meru, bez ugrožavanja potreba potrošača za sigurnim i pouzdanim napajanjem. Kako bi se ovo sprovelo u delo, proces optimizacije Lagranžovom metodom je, uz uvažavanje odgovarajućeg skupa ulaznih pretpostavki, izvršen za svaki sat u toku godine, pri čemu je kao kriterijumska funkcija prema kojoj je neko rešenje odabirano kao optimalno izdvojena minimizacija cene proizvedene električne energije. Ova cena se, za l-ti sat u toku godine, mogla razložiti na određene komponente i prikazati kao njihova suma, što je ilustrovano formulom (12):

$$C_l = c_{wf} \cdot P_{wfl} + c_{sf} \cdot P_{sfl} + c_{wl} \cdot P_{wl} + c_s \cdot P_{sl} + c_h \cdot P_{hl} \quad (12)$$

U ovom obrascu, primenjene oznake imaju sledeće značenje:

- c_{wf} [€/MWh] – jedinična cena energije proizvedene iz vetroelektrane u okviru *feed-in* tarife;
- c_{sf} [€/MWh] – jedinična cena energije proizvedene iz solarne elektrane u okviru *feed-in* tarife;
- c_{wl} [€/MWh] – jedinična cena energije proizvedene iz vetroelektrane na slobodnom tržištu, u l-tom satu;
- c_s [€/MWh] – jedinična cena energije proizvedene iz solarne elektrane na slobodnom tržištu;
- c_h [€/MWh] – jedinična cena energije proizvedene iz hidroelektrane na slobodnom tržištu;
- P_{wfl} [MW] – deo snage angažovanja vetroelektrane u l-tom satu koji je obuhvaćen *feed-in* tarifom;
- P_{sfl} [MW] – deo snage angažovanja solarne elektrane u l-tom satu koji je obuhvaćen *feed-in* tarifom;
- P_{wl} [MW] – deo snage angažovanja vetroelektrane u l-tom satu koji nije obuhvaćen *feed-in* tarifom;
- P_{sl} [MW] – deo snage angažovanja solarne elektrane u l-tom satu koji nije obuhvaćen *feed-in* tarifom;
- P_{hl} [MW] – snaga angažovanja hidroelektrane u l-tom satu.

Ukupni godišnji troškovi proizvodnje energije su potom izračunavani sumiranjem pojedinačnih satnih vrednosti cena:

$$C_{god}[€] = \sum_{l=1}^{8760} C_l \quad (13)$$

Kako je, prema osobinama *feed-in* tarife, za energiju koja je proizvedena iz delova instalisanih kapaciteta solarne elektrane i vetroelektrane obuhvaćenih ovom podsticajnom merom garantovan plasman na tržište ukoliko postoje mogućnosti za to, to se može zaključiti da se delovi angažovanja elektrana koji pripadaju *feed-in* tarifi i ne mogu modifikovati u okviru procesa optimizacije, već da su optimizaciji podložni isključivo delovi energije iz ovih elektrana koji nisu obuhvaćeni povlašćenom tarifom, ukoliko takvi viškovi uopšte postoje. Shodno tome se jednačina cena proizvodnje energije u l-tom satu mogla razdvojiti na deo cena koji pokriva *feed-in* tarifa, a koji nije podložan optimizaciji, i na deo cena koji se za energiju plaća na slobodnom tržištu. Upravo je minimizacija drugog dela cena smatrana ekvivalentom početnog problema kojim se ovaj rad bavi. Prema tome, izraz čiju je vrednost zapravo trebalo svesti na najmanju moguću meru za l-ti sat u toku godine glasi:

$$C_l^* = c_{wl} \cdot P_{wl} + c_s \cdot P_{sl} + c_h \cdot P_{hl} \quad (14)$$

Što se tiče ograničenja optimizacionog problema koja su u svojoj originalnoj verziji data u formi jednakosti, u razmatranom problemu se nametnulo samo jedno, koje je ukazivalo na to da se potrebe potrošnje za električnom energijom moraju u svakom trenutku zadovoljiti. Shodno tome je za l-ti sat u godini važilo:

$$h_l = P_{wfl} + P_{sfl} + P_{wl} + P_{sl} + P_{hl} - P_{pot-l} = 0 \quad (15)$$

U skladu sa prethodno iznetim razmatranjem, i u ovom slučaju je smatrano da deo potrošnje koji se električnom energijom snabdeva iz dela instalisanih kapaciteta elektrana obuhvaćenih *feed-in* tarifom nije predmet optimizacije, već je u proračunima posmatran samo onaj deo snage konzuma koji električnu energiju dobija iz generatorskih kapaciteta koji učestvuju na slobodnom tržištu. Dakle, izraz (15) se mogao svesti na:

$$h_l^* = P_{wl} + P_{sl} + P_{hl} - P_{pot-l}^* = 0 \quad (16)$$

Naredni korak je obuhvatao postavljanje ograničenja datih u vidu nejednakosti, koja su se potom mogla podeliti u dve grupe.

Prva grupa ovakvih ograničenja podrazumevala je da ukupna snaga proizvodnje iz ma koje od analiziranih elektrana ni u jednom satu u toku godine ne sme preći njihovu raspoloživu snagu proizvodnje u tom satu. Raspoloživa snaga proizvodnje električne energije je definisana merenim vrednostima brzine vetra i jačine sunčevog zračenja za vetroelektranu i solarnu elektranu, tim redom, odnosno, mesečnom najvećom raspoloživom vrednošću proizvodnje za slučaj hidroelektrane. Ova ograničenja se, prevedena u formu jednakosti iz ranije pojašnjenih razloga, mogu navesti sledećim izrazima:

$$g_{1l} = P_{wfl} + P_{wl} - P_{wxl} + z_{1l}^2 = 0 \quad (17)$$

$$g_{2l} = P_{sfl} + P_{sl} - P_{sxl} + z_{2l}^2 = 0 \quad (18)$$

$$g_{3l} = P_{hl} - P_{hxl} + z_{3l}^2 = 0 \quad (19)$$

Druga grupa ovakvih ograničenja mogla se svesti na činjenicu da snage kojima elektrane plasiraju električnu energiju na slobodno tržište ni za jedan sat u godini ne mogu imati negativne vrednosti. U obliku jednakosti, ovi uslovi glase:

$$g_{4l} = -P_{wl} + z_{4l}^2 = 0 \quad (20)$$

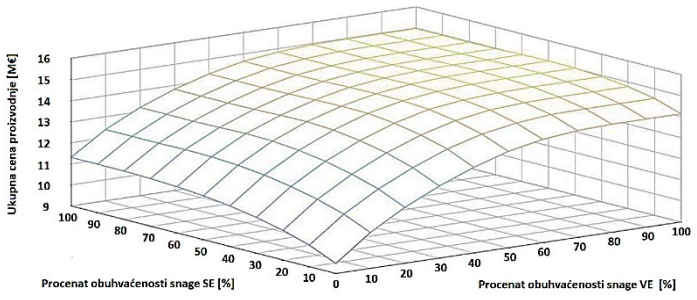
$$g_{5l} = -P_{sl} + z_{5l}^2 = 0 \quad (21)$$

$$g_{6l} = -P_{hl} + z_{6l}^2 = 0 \quad (22)$$

Poslednji korak u ekvivalentiranju inicijalnog optimizacionog problema uprošćenim problemom koji odgovara odabranoj metodi optimizacije predstavljalo je formiranje Lagranžijana kriterijumske funkcije koji je trebalo svesti na najmanju meru:

$$L_l = C_l^* + \sum_{i=1}^{6} \lambda_{il} \cdot g_{il} + \mu_l \cdot h_l^* \rightarrow min \quad (23)$$

Nakon predstavljanja predmetog optimizacionog problema u potrebnom formatu, moglo se preći na obavljanje samih proračuna, čiji će rezultati sačinjavati srž nastavka ovog rada. Treba napomenuti da je prilikom vršenja ovih analiza variran procenat instalisane snage vetroelektrane i solarne elektrane koji je obuhvaćen njihovim respektivnim *feed-in* tarifama, pri čemu su se ovi procenti kretali u granicama od 0 do 100%, sa korakom između dva susedna proračuna od 10%. Da bi se opisani postupak sproveo na odgovarajući način, razmatrane su sve moguće kombinacije obuhvaćenosti instalisanih kapaciteta vetroelektrane i solarne elektrane *feed-in* tarifama, odnosno, izvršen je 121 odvojen proces optimizacije. Rezultati urađenih proračuna su, radi ilustrativnijeg prikaza, predstavljeni grafičkim putem, priloženim na dijagramu datom na Slici 4:



Slika 4: Promena godišnjih troškova snabdevanja u zavisnosti od *feed-in* tarife

Na prethodnoj slici su, redom, na *x*-osi i *y*-osi prikazani procenti obuhvaćenosti kapaciteta vetroelektrane i solarne elektrane povlašćenim feed-in tarifama, a na *z*-osi ukupni godišnji troškovi snabdevanja predmetnog područja, izraženi u apsolutnim jedinicama, odnosno, u milionima evra. Kao što se sa prikazanog dijagrama može uvideti, godišnji troškovi snabdevanja razmatranog područja električnom energijom su značajno veći prilikom najgoreg mogućeg slučaja (kada je 100% instalisanih kapaciteta vetroelektrane i solarne elektrane obuhvaćeno *feed-in* tarifom), nego pri najboljem mogućem slučaju sa ekonomskog aspekta (kada *feed-in* tarife, faktički, ne postoje). Da bi se ovo još jasnije prikazalo, mogu se izraziti najveća i najmanja ukupna godišnja cena proizvedene električne energije za ovo područje:

$$C_{god.max.} = 14{,}9636 \text{ M€}$$

$$C_{god.min.} = 9{,}4851 \text{ M€}$$

Iz navedenih vrednosti je evidentno da je povećanje troškova usled usvajanja principa *feed-in* tarifa radi motivacije potencijalnih ulagača u izgradnju obnovljivih izvora energije nezanemarljivo. Izraženo u procentima, to povećanje iznosi čak:

$$\Delta C_{god.} = \frac{14{,}9636 - 9{,}4851}{9{,}4851} \cdot 100\% = 57{,}76\%$$

Iako se činjenica da postojanje *feed-in* tarife utiče na podizanje koštanja proizvodnje električne energije dala naslutiti još u prethodnom delu rada, kada su prikazane povlašćene i nepovlašćene cene energije proizvedene u obnovljivim izvorima, na ovom mestu se mora još jednom naglasiti magnituda primećene razlike koja, za zadati skup pretpostavki, iznosi preko polovine godišnjih troškova proizvodnje energije, izračunatih za slučaj kada *feed-in* tarife nema.

Radi demonstracije funkcionisanja kreiranog programa za optimizaciju angažovanja elektrana za svaku analiziranu tačku u vremenu, to jest, za 8760 sati u toku godine, biće razmotrena konkretna situacija u kojoj je usvojeno da je stepen obuhvaćenosti vetroelektrane i solarne elektrane odgovarajućim *feed-in* tarifama jednak i da iznosi po 30%, odnosno, po 9 MW za svaku od elektrana. Po okončanju vršenja optimizacione procedure za svaki sat u toku godine, zbirna količina energije koja se te godine plasira iz svakog od razmatranih izvora prema kreiranom konzumnom području mogla se odrediti prostim sabiranjem respektivnih satnih optimalnih snaga proizvodnje ovih generatorskih kapaciteta. Za vetroelektranu, solarnu elektranu i hidroelektranu, optimalne vrednosti godišnjih isporučenih energija, tim redom, imale su sledeće vrednosti:

$$W_{w-god.} = 45{,}343 \text{ GWh}$$

$$W_{s-god.} = 36{,}721 \text{ GWh}$$

$$W_{h-god.} = 76{,}397 \text{ GWh}$$

Odavde je primetno da je iznos energije proizvedene u toku razmatrane godine u hidroelektrani gotovo jednak zbiru iznosa energija proizvedenih u toku iste godine u vetroelektrani i solarnoj elektrani. Ukoliko bi se tražilo odgovarajuće pojašnjenje za ovakav fenomen, moglo bi se zaključiti da razlog za primećenu pojavu, pre svega, leži u intermitentnoj prirodi

primarnih energenata koje koriste vetroelektrana i solarna elektrana, to jest, brzine duvanja vetra i jačine sunčevog zračenja, gde se svaki zabeleženi manjak energije potrebne potrošačima, nastao usled simultanog deficita pomenutih energenata, morao nadoknađivati odgovarajućim angažovanjem hidroelektrane.

Na samom kraju je, da bi se opisani proces optimizacije prema Lagranžovoj metodi mogao sprovesti na korektan način, bilo neophodno precizirati i vrednosti Lagranžovih multiplikatora, pri čemu je, zarad razlaganja i prikazivanja procedure prema kojoj je ovo rađeno, odabran jedan konkretni sat u toku godine, na čijem će primeru pomenuti postupak biti ilustrovan. Važno je navesti da je i analiza koja sledi obavljena pri usvojenim vrednostima procenata obuhvaćenosti instalisanih kapaciteta vetroelektrane i solarne elektrane *feed-in* tarifom od po 30%, odnosno, po 9 MW. Kako je bilo neophodno specificirati i sat za koji će ovaj proračun biti priložen, u te svrhe je nasumično usvojeno da je u pitanju 378. sat u toku godine, odnosno 18. sat 16. januara u fiktivnoj kalendarskoj godini. Za ovaj sat je, prema usvojenim profilima potrošnje, važilo da je:

$$P_{pot} = 27{,}425\ \text{MW}$$

U skladu sa raspoloživim podacima o brzini vetra, jačini sunčevog zračenja i hidrologiji u izdvojenom satu, izračunate su i maksimalne proizvodne mogućnosti vetroelektrane, solarne elektrane i hidroelektrane, koje su, za taj sat, iznosile:

$$P_{wx} = 10{,}1336\ \text{MW}$$

$$P_{sx} = 11{,}0245\ \text{MW}$$

$$P_{hx} = 36\ \text{MW}$$

Kako se kao ulazni podatak procesa optimizacije, pored fiksnih tržišnih cena električne energije proizvedene u solarnoj elektrani i hidroelektrani i iznosa povlašćenih cena koje pojedinim obnovljim izvorima pripadaju na osnovu *feed-in* tarife, morala poznavati i tržišna jedinična cena energije generisane u vetroelektrani, to je bilo neophodno poznavati i vrednost brzine vetra u razmatranom satu, koja je iznosila 8,0333 m/s. Pošto je ova vrednost ležala u opsegu između 6 m/s i 9 m/s, to je, prema formuli (10), bilo očigledno da se tražena tržišna cena morala izračunati preko linearne interpolacije, kojom je dobijeno da je:

$$c_w = 59{,}586\frac{€}{\text{MWh}}$$

Uzevši u obzir činjenicu da je ovaj iznos viši od tržišne cene električne energije iz solarne elektrane, ali niži od cene energije proizvedene u hidroelektrani, za očekivati je bilo da proces optimizacije najpre angažuje solarnu elektranu najvećim mogućim kapacitetom, potom vetroelektranu, da bi se, tek na kraju, višak potrošnje napojio uz pomoć kapaciteta hidroelektrane. Rezultati dobijeni uz pomoć razvijenog optimizacionog softvera potvrdili su ove pretpostavke, te su za ukupna angažovanja generatora dobijene sledeće vrednosti:

$$P_{w\Sigma} = P_{wf} + P_w = 10{,}1336\ \text{MW}$$

$$P_{s\Sigma} = P_{sf} + P_s = 11{,}0245\ \text{MW}$$

$$P_h = 6{,}2669\ \text{MW}$$

Prema usvojenim podacima o procentima instalisanih kapaciteta vetroelektrane i solarne elektrane obuhvaćenim *feed-in* tarifama, moglo se izvesti da važi i sledeće:

$$P_{wf} = P_{sf} = 9\ \text{MW}$$

Iz ovih podataka je sledilo da su delovi ukupnih snaga ovih elektrana kojima se energija u predmetnom satu plasira na slobodno tržište jednaki:

$$P_w = P_{w\Sigma} - P_{wf} = 1{,}1336\ \text{MW}$$

$$P_s = P_{s\Sigma} - P_{sf} = 2{,}0245\ \text{MW}$$

Nakon što su svi potrebni ulazni podaci definisani, moglo se preći i na rešavanje sistema jednačina određenog diferenciranjem Lagranžijana po različitim nepoznatim veličinama, gde su vrednosti pomoćnih promenljivih z_i^2 određivane odgovarajućim preslaganjem izraza numerisanih brojevima od (17) do (22):

$$z_1^2 = P_{wx} - P_{wf} - P_w = 0$$

$$z_2^2 = P_{sx} - P_{sf} - P_s = 0$$

$$z_3^2 = P_{hx} - P_h = 29{,}7331\ \text{MW}$$

$$z_4^2 = P_w = 1{,}1336\ \text{MW}$$

$$z_5^2 = P_s = 2{,}0245\ \text{MW}$$

$$z_6^2 = P_h = 6{,}2669\ \text{MW}$$

Prema ustanovljenom principu po kome, za svako od ograničenja koje je preformulisano u oblik jednakosti korišćenjem veštački kreiranih pomoćnih promenljivih z_i^2, mora važiti da je ili z_i^2, ili njemu odgovarajući Lagranžov multiplikator λ_i jednak nuli, mogle su se, bez vršenja kalkulacija, izvesti sledeće vrednosti:

$$z_3^2 \neq 0 \Rightarrow \lambda_3 = 0$$

$$z_4^2 \neq 0 \Rightarrow \lambda_4 = 0$$

$$z_5^2 \neq 0 \Rightarrow \lambda_5 = 0$$

$$z_6^2 \neq 0 \Rightarrow \lambda_6 = 0$$

Preostali Lagranžovi multiplikatori su bili izračunavani uvažavanjem uslova da su parcijalni diferencijali Lagranžijana prema svakoj od varijabli čije je određivanje krajnji cilj procesa optimizacije, što su, u ovom slučaju, bile snage proizvodnje električne energije iz elektrana, morali biti jednaki nuli. Stoga se mogao koristiti sledeći pomoćni sistem jednačina:

$$\frac{\partial L}{\partial P_w} = c_w + \mu + \lambda_1 - \lambda_4 = 0 \quad (24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_s} = c_s + \mu + \lambda_2 - \lambda_5 = 0 \quad (25)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P_h} = c_h + \mu + \lambda_3 - \lambda_6 = 0 \quad (26)$$

Pošto je prethodno zaključeno da su vrednosti multiplikatora λ_3 i λ_6 jednake nuli, iz treće jednačine prikazanog sistema se mogao precizirati i Lagranžov multiplikator koji je u jednačini Lagranžijana (23) stajao uz jednakost ravnoteže snaga:

$$\mu = -c_h = -70{,}799\,\frac{€}{\text{MWh}}$$

Konačno su se, u poslednjem koraku proračuna, iz jednačina (24) i (25) mogla odrediti i poslednja dva Lagranžova multiplikatora koja u ovoj fazi i dalje nisu bila poznata:

$$\lambda_1 = -\mu - c_w = 11{,}213\,\frac{€}{\text{MWh}}$$

$$\lambda_2 = -\mu - c_s = 18{,}766\,\frac{€}{\text{MWh}}$$

Nakon izračunavanja ovih vrednosti, proces optimizacije Lagranžovom metodom je, za dati sat, pri unapred sagledanom skupu ulaznih pretpostavki vezanih za procentualnu obuhvaćenost instalisanih kapaciteta obnovljivih izvora energije *feed-in* tarifom, smatran kompletiranim.

V. ZAKLJUČAK

Kao što je u okviru ovog rada već nekolicinu puta istaknuto, brojna istraživanja su poslednjih godina ukazala na činjenicu da konvencionalni izvori energije koji zagađuju životnu sredinu, gde se, pre svega, misli na termoelektrane na ugalj, sa aspekta ekologije nisu prihvatljivi u današnjem svetu. Shodno tome, čovečanstvo se mora okrenuti čistijoj, održivoj elektroenergetici. Prvi korak ove promene percepcije predstavlja integracija obnovljivih izvora energije u elektroenergetske sisteme. Kao odgovor na pitanje motivacije investitora da ulažu u ovakav tip izvora, izrodio se koncept povlašćenih, nepromenljivih *feed-in* tarifa, uz garanciju plasmana generisane energije u sistem. Ovaj rad se, stoga, bavi ispitivanjem uticaja primene navedenog koncepta na poskupljenje godišnje proizvodnje električne energije, neophodne za snabdevanje fiktivnog konzumnog područja. Za potrebe rada, pretpostavljeno je da na raspolaganju u ove svrhe stoje vetroelektrana, solarna elektrana i hidroelektrana odgovarajuće snage, pri čemu je variran procenat instalisanih kapaciteta vetroelektrane i solarne elektrane koji je obuhvaćen njihovim respektivnim *feed-in* tarifama.

Proračuni su sprovedeni uz pomoć Lagranžove tehnike optimizacije, pri čemu je kao krajnji cilj optimizacije postavljena minimizacija ukupnih godišnjih troškova proizvodnje potrebne električne energije pomoću što ekonomičnijeg angažovanja pomenutih elektrana. Kako su za navedenu lokaciju bili dostupni podaci o brzinama vetra i jačini sunčevog zračenja sa satnom rezolucijom, to je i proces optimizacije snaga angažovanja elektrana sproveden po jedanput za svaki sat u godini, odnosno, ukupno 8760 puta za svaku kombinaciju procenata instalisanih snaga vetroelektrane i solarne elektrane obuhvaćenih *feed-in* tarifama. Sagledavanjem rezultata dobijenih za slučaj kada su kompletni kapaciteti vetroelektrane i solarne elektrane obuhvaćeni *feed-in* tarifom i slučaj kada povlašćena *feed-in* tarifa ne postoji, uočeno je do kolikog povećanja ukupnih godišnjih troškova proizvodnje primena ovog koncepta može dovesti. U primeru obrađenom u ovom radu, dobijeno je povećanje godišnjih troškova od preko 50%.

Na samom kraju, mora se iznova naglasiti da bi, pored nesumnjivih pogodnosti koje *feed-in* tarife nude i efekta koje su imale na popularizaciju obnovljivih izvora energije, ipak bilo preporučljivo proučiti mogućnosti za modifikaciju ovog koncepta ili implementaciju nekog od, sa ekonomske strane, povoljnijih rešenja za ohrabrivanje investitora u ovakav vid projekata.

LITERATURA

[1] K.A. Clements i A.S. Costa, „Topology error identification using normalized Lagrange multipliers“, *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, br. 2, maj 1998, pp. 347-353.

[2] A. Hauswirth et.al, „Generic Existence of Unique Lagrange Multipliers in AC Optimal Power Flow“, *IEEE Control Systems Letters*, vol. 2, br. 4, oktobar 2018, pp. 791-796.

[3] W.T. Kuo et.al, „The current control of PV inverter for three-phase unbalanced fault with Lagrange multiplier“, zbornik radova sa konferencije *2013 1st International Future Energy Electronic Conference (IFEEC)*, održane u Tainanu, Tajvan, od 3. do 6. novembra 2013, pp. 510-514.

[4] J.A. da Costa et.al, „Optimal Sizing of Photovoltaic Generation in Radial Distribution Systems using Lagrange Multipliers“, *Energies*, br. 12, maj 2019, indeks 1728

[5] J. Sandoval-Moreno, G. Besancon i J.J. Martinez, „Lagrange Multipliers based price driven coordination with constraints consideration for multisource power generation systems“, zbornik radova sa konferencije *2014 European Control Conference (ECC)*, održane u Strazburu, Francuska, od 24. do 27. juna 2014, pp. 1987-1992.

[6] C. Thitithamrongchai i B. Eua-Arporn, „Hybrid Self-adaptive Differential Evolution Method with Augmented Lagrange Multiplier for Power Economic Dispatch of Units with Valve-Point Effects and Multiple Fuels“, zbornik radova sa konferencije *2006 IEEE PES Power System Conference and Exposition*, održane u Atlanti, SAD, od 29. oktobra do 1. novembra 2006, pp. 908-914.

[7] N. Sartika, A.G. Abdullah i D.L. Hakim, „Scheduling Economic Thermal Power Plant 500 kV Java-Bali System Using Lagrange Multplier“, zbornik radova sa konferencije *1st Annual Applied Science and Engineering Conference*, održane u Bandungu, Indonezija, 18. novembra 2017, pp. 1-9.

[8] N.S. Rau, „Optimization Principles - Practical Application to the Operation and Markets of the Electric Power Industry“, izdavač *IEEE Press, A John Wiley & Sons, Inc., Publication*, SAD, 2003.

[9] A. Bailes, „Electricity Demand and the Duck Curve“, 2015, preuzeto sa https://www.energyvanguard.com u novembru 2019.

[10] D. Milborrow, „At the Tipping Point: 2017 Wind Cost Analysis“, 2018, preuzeto sa https://www.windpowermonthly.com u decembru 2019.

[11] „SolarReserve awarded AU$78/MWh Concentrated Solar Power contract“, 2017, preuzeto sa http://helioscsp.com u decembru 2019.

[12] H. Thakker, „Diminishing Returns from Large Hydropower Projects“, 2015, preuzeto sa https://www.internationalrivers.org u novembru 2019.

[13] P. Lako „Hydropower – Costs“, u okviru *IEA ETSAP*, 2010, preuzeto sa https://iea-etsap.org u decembru 2019.

AUTORI

Prvi autor – Vladan Ristić, AD „Elektromreža Srbije“ / Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, mail: vladagenius.vr@gmail.com

Drugi autor – dr Nikola Rajaković, Savez energetičara Srbije / Elektrotehnički fakultet Univerziteta u Beogradu, mail: rajakovic@etf.rs

Autor za kontakt – Vladan Ristić, vladagenius.vr@gmail.com (ili vladan.ristic@ems.rs), broj telefona: +381 65 29 800 29

Operativni režim rada hidroelektrana u kaskadnom sistemu zavisno od potrebe energetskog sistema

Hydro power plants operating modes in a cascade system depending on the needs of the power system

Sofija Nikolova Poceva[*], Anton Chaushevski[*], Valentino Stojkovski [**], Zoran Markov[**]

[*] University Sts Cyril and Methodius, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Skopje, MKD
[**] University Sts Cyril and Methodius, Faculty of Mechanical Engineering, Skopje, MKD

Apstrakt **-** Rad prezentira model i metodologija za operativne režime rada hidroelektrana u kaskadnom povezani hidraulični sistem. To uključuje upravljanje vodom proizvodnih i/ili crpnih (pumpne) jedinice, uzimajući u obzir tehničke karakteristike postrojenja elektrana (turbine/generator i pumpe/motorni sistemi), karakteristike rezervoara uzimajući u obzir svu infrastrukturu koja je hidraulično povezana. Svakako tu spadaju i hidrološke prilike i uslove (prirodni priliv i priliv uzvodnih turbina), Cilj operativnih režima rada za hidroenergetske sisteme je imati maksimalan profit od proizvodnje električne energije uzimajući u obzir regionalno okruženje tržišta električne energije, potrebe elektroenergetskog sistema, kao i zadovoljenje tehničkih uslova i istovremeno izbegavanje preliva kolko je moguće. Načini rada hidroelektrana zavise od tržišne cene električne energije, tarifnim modelima i vremenetrajanja svake tarife (bazni, vršni i druge tarife), svakako uzevši u obzir tehničke karakteristike proizvodne jedinice, hidrotehničke uslove, količine akumulacionih rezervoara i drugi uslove. Primena modela će biti prezentovana sa rezultatima na stvarnim hidroenergetskim sistemima koji se sastoje od različiti hidraulični infrastrukturnih elemenata, za različite slučajevima koje zavise od hidroloških uslova i zahteva. Model se može koristiti za izradu preliminarne analize za tehničko poboljšanje hidro-sistema preko dodatnu instaliranu snagu postojećeg sistema. Izabrani rezultati sa analizama biće predstavljeni odgovarajućim upoređivanjem i na kraju sa zaključnim komentarima.

Ključne reči – proizvodnja, hidroelektrana, pumpa, revizibilna, turbina

Abstract- The paper presents the methodology for hydro power plants operation (Long-term and Short-term) in a hydro power cascade system. It includes water managing of generating and/or pumping units taking into accounts technical characteristics of the power plants facilities (turbine/generator and pump/motor systems), reservoirs characteristics considering all hydraulically connected infrastructures which are, as well as the hydrological conditions (for run offs and turbine inflows). The goal of the operation for all hydropower system is to have maximum profit from electricity production taking into account electricity market environment, power system requirements, as well as satisfying technical conditions and at the same time avoiding water spilling as it is maximum possible. Operating modes of the hydro power plants depend on electricity market price, tariff prices and time duration of each tariff (base, peak, and rush hour), technical characteristics of the unit(s), hydro technical conditions, water reservoir's volumes, run off and others.
The application of the model is presented with the results on real hydro power systems consist of different hydraulic connections in various cases depend on hydrological conditions and requirements. The model can be used to make preliminary analysis for additional improvement of hydro systems as having the results for additional installed power of the existing system. The selected output results are presented with appropriated comparing and at the end with conclusion remarks.

Index Terms- generation, hydro, pump, reversible, turbine

I. INTRODUCTION

The paper presents the model for different operation modes of hydraulically connected hydropower system (HPS) consists of reservoirs, pipe connected lines and hydro power plants. The operating modes can be distinguished depend time interval planning (year, season or month for Long Term (LT) and week, few days or a day for Short Term (ST)). The model takes into account the technical specifications and parameters of the whole system such as:

- Volume of the water reservoirs with limitation of minimal and maximum elevation of the reservoirs,
- Turbine units characteristics (flows, power),
- Other technical constraints and specifications of the elements of the hydropower system,
- Connected infrastructure of lines and pipes,

The application of the model is done on the real hydropower system on river Crn Drim, taking into account the existing power

system as well as the other reservoirs and power generation units in new HPPs which are considering to be built in next period.

II. DESCRIPTION OF THE MODEL

The model gives main outputs of hydropower system depend on power system operator requirements and demand, as well as taking into account input of water run offs with respecting the technical conditions of the system. The modeling approaches depend on LT or ST operation modes. In the LT operation modes, the whole considering time period (T) can be a year or few years dividing on months' or weeks' time intervals (t) (depend on availability of hydrological data) and mainly considering the large reservoirs. In the ST operation modes, the whole considering time period (T) can be a week or few days dividing on hourly intervals (t) and mainly taking into account the water management for small reservoirs in daily regulation. The output results from the model are turbine discharges, electricity production of HPPs as well as reservoir level for each time interval (t) of whole considering time period T. In order to simulate the operation regimes of the whole system, it is necessary to know the characteristics of the reservoirs. Modeling of the characteristic of the all reservoirs is done according [4] as two functions, volume dependence of the attitude (1) and vice versa, the attitude dependence of the volume (2).

$$\mathrm{Vol(Att)} = 2 \cdot \pi \cdot (\mathrm{A} + \mathrm{B} \cdot \mathrm{Att} + \mathrm{C} \cdot \mathrm{Att}^2) \quad (1)$$

$$\mathrm{Att(Vol)} = \mathrm{g} + \mathrm{h} \cdot (\mathrm{Vol} - \mathrm{d})^{\mathrm{e}} \quad (2)$$

The simulations of the operating regimes has been done taking into account the characteristics of the reservoirs, the water inflows and the turbine characteristics of the HPPs. The inputs in the model are the following: average inflows and run offs for the time intervals, the characteristic of the electric power output P=f (Q_{tur}, H_{gross}) as a function of turbine flow (Q_{tur}) and gross head and the reservoirs characteristics according (1) and (2). For financial analysis it is necessary to have the electricity prices. The following conditions and assumptions are taking into accounts in the model:

- The reservoirs level to be within the allowed limits and avoiding spilling.
- The turbine flow priority is to have maximum revenue from generated electricity according to the electricity market prices for each period of the day.

The output results from the calculations are the following ones:
-Consumed water volume in each time period (year, month, day,…) for each reservoir
-Output power for each time period P(t)
-Electricity generated for each time period W(t)
-Financial profit from the sold electricity FIN
The methodology for operation modes of hydro power plants can be applied in different needs depend on input data and the requirements from the utility or operator of the power plant. Some of the possible application can be done for:
Hydro power systems from simple to complex technical hydraulically configuration and connectivity for different time period of consideration (T) as: few years, a year, season, week, only a day. The period of consideration can be divided on different time intervals Δti, where $T = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i$

III. HYDEO POWER STSTEM OF CRN DRIM

The existing hydropower system (HPS) of river Crn Drim consists of 2 hydro power plants (HPP Globocica 2x21 MW and full turbine discharge of 50 m^3/s) and HPP Spilje (3x28MW and full turbine discharge of 108 m^3/s), three reservoirs (RES 1- Ohrid lake, RES 2 - Globocica and RES 3 - Debar lake) with main run offs from two rivers (Crn Drim and Radika). HPP Globocica with two units is the first upper stream power plant in HPS Crn Drim is a derivative power plant that uses the water from RES 1 of Lake Ohrid. Each of the two units is 25 m^3/s or total of 50 m^3/s, with a total installed capacity of 42 MW, have gross head of 108-110 m. The turbine flow from HPP Globocica and the Radika River are the main run offs for RES 3 of Debar Lake as the reservoir of HPP Spilje. Existing HPP Spilje has 3 units, each of 36 m^3/s or total of 108 m^3/s, with gross head of 80-100 m, and total installed capacity of 84 MW. Figure 1 schematically presents the existing HPS of Crn Drim with planned new hydro power plants and new RES 4.

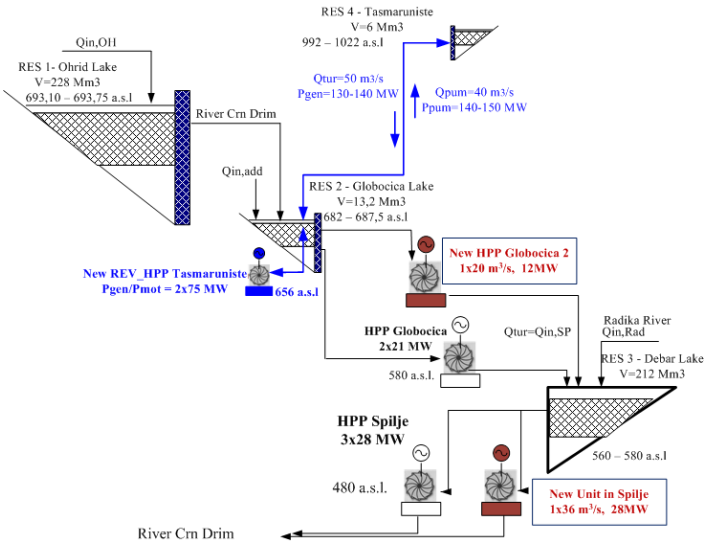


Figure 1. Hydraulically connected HPS of Crn Drim (existing and new reservoirs and units)

The new generating units are in HPP Globocica 2 with a unit of 20 m^3/s turbine flow and 12 MW installed power, located in new turbine hall with 70 m gross head. The additional unit in HPP Spilje has 36 m^3/s turbine flow and 28 MW installed power the same as the existing ones and located in the same turbine hall [1]. The new reversible (pump storage) HPP Tasmaruniste is added with the upper reservoir RES 4 Tasmaruniste on the Crn Drim system. The others basic technical parameters (from [2] and [3]) as the reservoirs' volumes, attitudes of the turbines, minimum and maximum reservoir levels, turbine flows and installed power are given on the Figure 1. Therefore the whole hydropower system which is considered in this paper, consists of 4 reservoirs with basic information given in Tab.1 and few HPPs with some technical characteristics given on Tab.2.

Table 1. Characteristics of the reservoirs of HPS Crn Drim

	Existing RES1	Existing RES2	Existing RES3	New RES4
Att.max (a.s.l.)	693.75	687.5	580	1022
Att.min (a.s.l.)	693.10	682	560	992
Vol. (10^6 m^3)	228.00	13.20	212.00	6.00

Table 2. HPPs Characteristics in HPS of Crn Drim

	No. of units	Q_{inst} (m^3/s)	H_{gross} (m)	P_{inst} (MW)
Exist.HPP Spilje	3	108	75-95	84
Exist. HPP Globoc.	2	50	102-105	42
New HPP Spilje 4 unit	1	36	75-95	28
New HPP Globoc. 2	1	20	70	12
New RevHPP Tasmar.	2	Qt=50, Qp=40	305-335	150

The Large reservoirs, RES 1 of Lake Ohrid and RES 3 of Debar Lake are important for long-term analyzes (seasonal, annual and multi-year). The small reservoir RES 2 of Globocica and RES 4 of Tasmarunista can be taken in short-term analyzes as daily, few days or weekly analyzes. The parameters according the formulas (1) and (2) for all reservoirs are given in Tab.3.

Table 3. The parameters for all reservoirs according (1) and (2).

	A	B	C	g	d	h	e
RES 1	1639724	-4863	3,60	675	-3136	0,3	0,5
RES 2	4135	-13	0,01	640	-48	6,1	0,5
RES 3	5790	-23	0,02	500	-194	4	0,5
RES 4	996	-2	0,001	971	-1,2	19	0,5

A. Long term (LT) operation modes of HPS Crn Drim

The simulations for HPS of Crn Drim for LT operation modes are made on the monthly basis time interval (t=1 month) in the whole period of a year (T= 1 year). The main idea of the simulation is to find the operational regimes with maximum financial benefit under new market conditions with electricity prices on the open market with different tariffs (Fig.2).

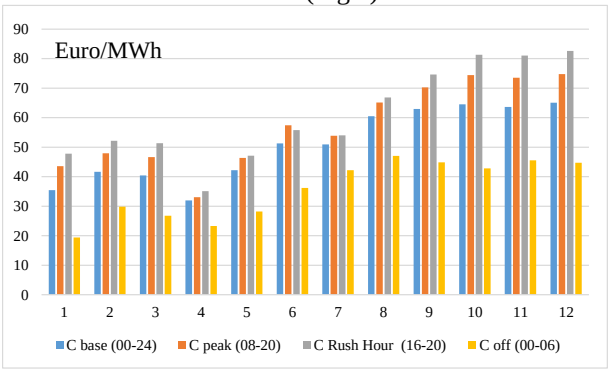


Fig. 2. Daily tariffs and electricity price C (€/MWh) from the HUPEX in 2018

The time periods for each day are divided into 2 groups (tariffs) for Long-term operation modes (Base tariff (C_{base}) and Peak tariff (C_{peak})). The water inflow for HPP Globocica (Qin,GL) is predominantly from Lake of Ohrid (Qin,OH), and the additional run offs ($Q_{in,add}$):

$$Q_{in,GL}(t) = Q_{in,OH}(t) + Q_{in,add}(t) \quad (3)$$

The water inflow for HPP Spilje ($Q_{in,SP}$) mainly depends on the turbine flow of HPP Globocica ($Q_{tur,GL}$) and the natural run off from Radika River ($Q_{in,Rad}$):

$$Q_{in,SP}(t) = Q_{tur,GL}(t) + Q_{in,Rad}(t) \quad (4)$$

According to natural flows from the input hydrological data [2], three characteristic hydrological years have been selected in yearly operating modes: 2001 as dry year representative, 2006 as average year representative and 2013 as wet year representative. Fig.3 and Fig.4 show the monthly water inflows for the reservoirs in HPP Globocica and HPP Spilje respectively, in each of the representative year.

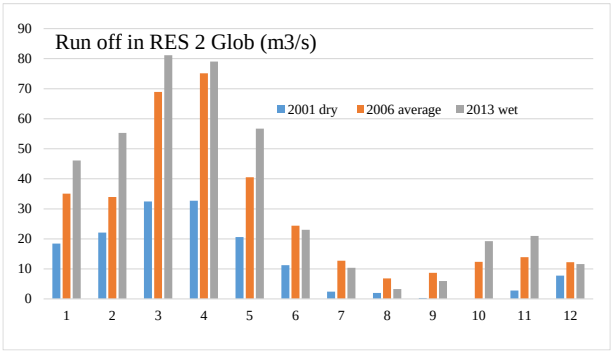


Figure 3. Monthly water inflows for the RES 2 of Ohrid

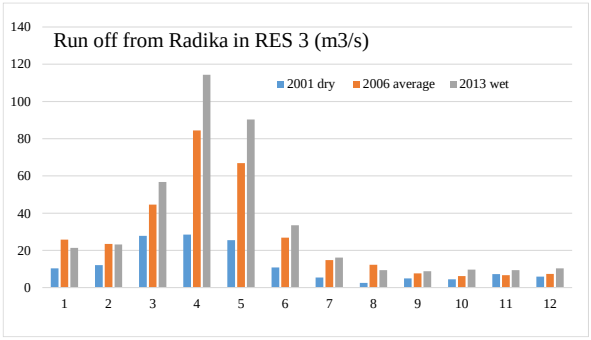


Figure 4. Monthly water inflows for the RES 3 of Debar Lake from Radika River

The starting value of the reservoirs level in 1st of January is common for all simulations, for Ohrid Lake is 693.3 a.s.l., and for Debar Lake is 563 a.s.l. The simulations are made for three years, dry 2001, average 2006 and wet 2013. The results for the representative of wet year are presented on Fig.5 and Fig.38 as the reservoirs level and the spent volume of water for HPP Globocica (dV_GL) and HPP Spilje (dV_SP) respectively.

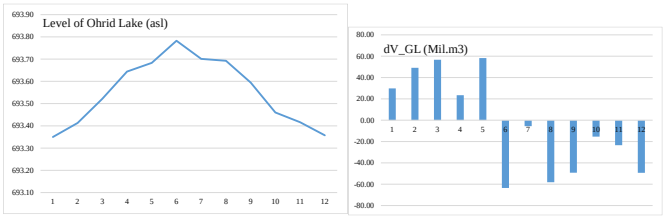


Figure 5. Reservoir level of Ohrid Lake and spent volume of water in HPP Globocica for each month in wet 2013

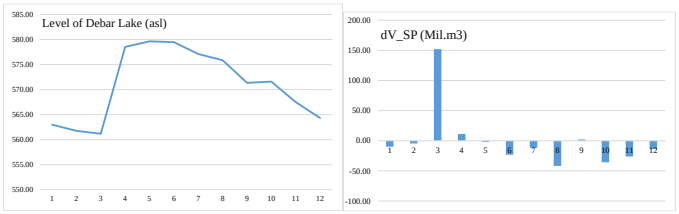


Figure 6. Reservoir level of Debar Lake and spent volume of water in HPP Spilje for each month in wet 2013

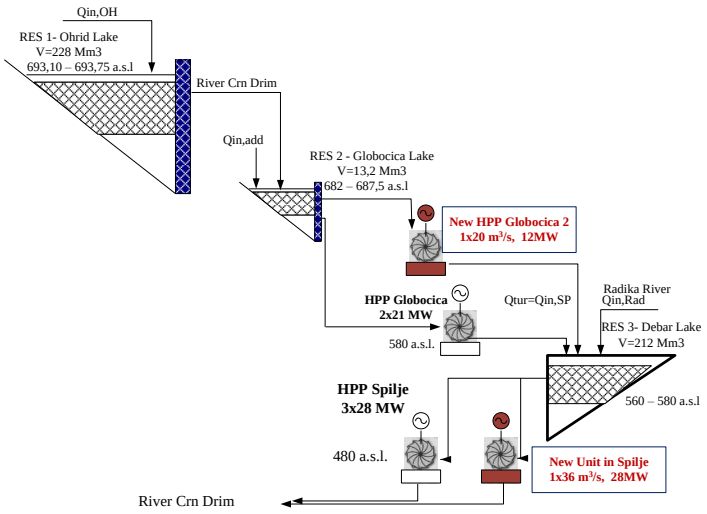


Figure 7. HPS considering for long term (LT) operation modes

For LT operation modes, the reversible HPP Tasmuruniste is not considered, only the conventional HPP Spilje and HPP Globocica (Fig.7). In order to avoid overflowing and spilling, the operation with maximum installed turbine flow for both HPPs is in the first months. The total balance of the both HPPs in the HPS of Crn Drim in generated electricity and financial income from the sold electricity is given in Table 4. The total generated electricity consists of 2 parts, base and peak where the income comes from, and the third part is lost electricity (negative one) because spilling. Therefore, for wet 2013, the all HPPs in HPS Crn Drim give:

• Production of around 658 GWh with total electricity sales of approximately 34.3 million euros.

• Overflow (spillway) of about 36 GWh with a total loss of un-produced electricity of about 1.2 million euros.

Table 4. Generated electricity and financial income for the wet 2013 in case with existing and additional units in HPS Crn Drim

	Generated Electricity W(MWh)			Financial Income FIN (Mil.Euro)		
	base	peak	spill	base	peak	spill
1	0	39717	0	0,00	2,13	0,00
2	0	35525	0	0,00	2,09	0,00
3	31329	23489	0	1,27	1,52	0,00
4	90595	36202	-36202	2,89	1,67	-1,20
5	63037	15665	0	2,66	1,41	0,00
6	35456	27876	0	1,82	2,42	0,00
7	0	26575	0	0,00	1,43	0,00
8	0	43686	0	0,00	2,84	0,00
9	0	32167	0	0,00	2,26	0,00
10	0	33289	0	0,00	3,07	0,00
11	0	31409	0	0,00	3,06	0,00
12	0	31811	0	0,00	3,00	0,00
Sum	220417	377410	-36202	8,63	26,91	-1,20
Total		657990				34,35

Fig.8 gives graphical presentation of the generated electricity in each month for the whole HPS Crn Drim in the wet 2013. The lost electricity because spilling is negative (bellow the apices axis in month of April).

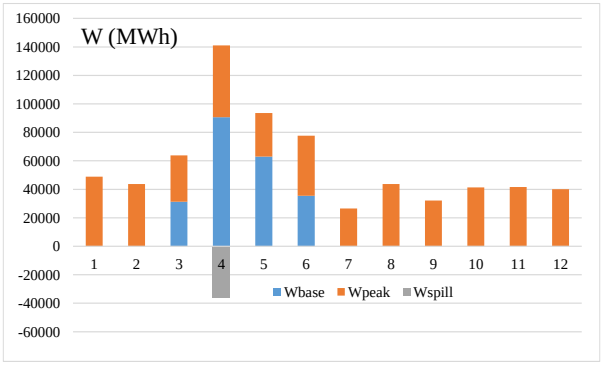


Figure 8. Monthly production for the HPS Crn Drim in wet 2013

According the calculation for all cases and for all representative years, the comparison of the results can be analyzed in order to have answer for the benefit of additional units installed of the HPS Crn Drim, which is very useful for further techno-economic analyzes. Tab.5 and Fig.9 show the generated electricity and lost energy in spilling, for all representative years.

Table 5. Generated electricity and spilled energy in MWh for all cases for HPS Crn Drim

	Dry 2001	Aver. 2006	Wet 2013
W_{base}	0	88440	220417
W_{peak}	194431	498460	473774
W_{spill}	0	0	-36202
Total	194431	586900	657990

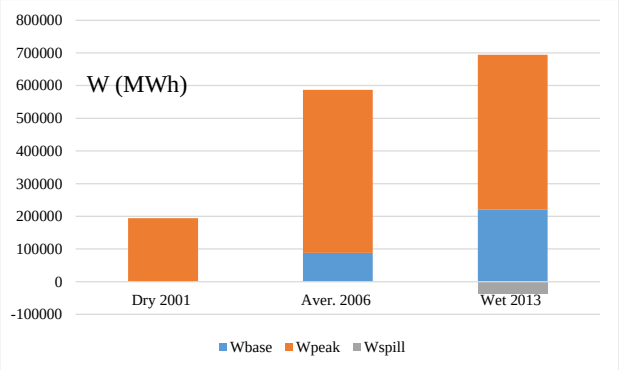


Figure 9. Comparing the output energy for all cases

The results show that the increased production and income can be got in additional units in peak tariffs with high prices. The other benefit of additional units is reducing the lost energy of spilling in wet 2013 to 36202 MWh, and the difference goes to additional peak electricity of the system. Tab.6 and Fig.10 give the benefit in Euro from income of generated electricity taking into account the lost energy of spilling.

Table 6. Financial benefit from income (in €) for all cases for HPS Crn Drim

	Dry 2001	Aver. 2006	Wet 2013
FIN_{base}	0	3866861	8634785
FIN_{peak}	10785275	28128836	26909732
FIN_{spill}	0	0	-1196258
Total	10785275	31995696	34348258

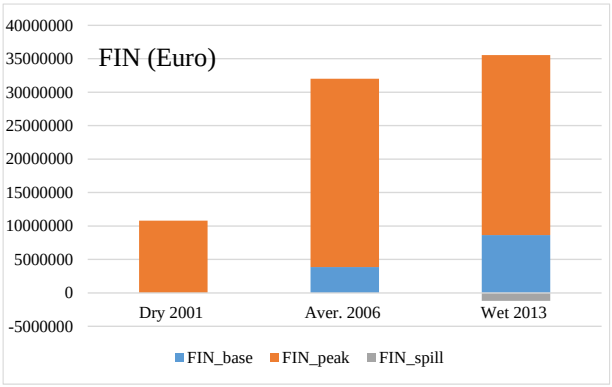


Figure 10. Comparing the income (in €) for all cases

The overall benefit for dry 2001 is approximately 10,5 M€, for average 2006 is approximately 32 M€ and for the wet 2013 is approximately 34,2 M€.

B. Short term (ST) operation modes of HPS Crn Drim

The simulation of ST operating modes for HPS of Crn Drim are done for some characteristics days , with the inputs taken from the LT results especially water inflows and turbine discharges. The main point in ST planning is focus on operation of reversible HPP Tasmaruniste with HPP Globocica (Fig.11), as well as the water managing between downstream RES 2 of Globocica and upstream RES 4 of Tasmarunista. The LT operation modes are made on the hourly time interval (t=1 hour) in the whole period of a year (T= 1 day/week…). In this simulations, within the day can be find the operation of turbine mode in the peak and/or rush hours (7-24 h) and pumping mode in off hours (0-6 h).

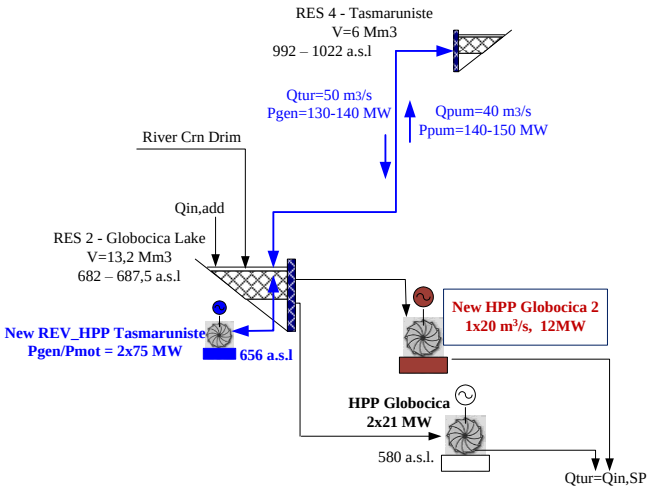


Figure 11. HPS considering for short term (ST) operation modes

According the Study [3], taking into account water losses and efficiencies of turbine and generator, the power output in (MW) injected to the grid in turbine-generation mode for Rev HPP is:

$$P_{gen}(t) = 8{,}35 \cdot Q_{tur}(t) \cdot H_{gross}(t) \quad (5)$$

Also, taking into account water losses and efficiencies of pump and motor, the power in (MW) taken from the grid as consumer in pump-motor mode for Rev HPP is:

$$P_{mot}(t) = 11{,}58 \cdot Q_{pum}(t) \cdot H_{gross}(t) \quad (6)$$

The time periods for each day are divided into hourly time intervals where for financial analysis it is taken 3 tariffs, night tariff (0-6h) - C_{off}, peak tariff (C_{peak}) and rush tariff (16-20h) (Crush). Fig.12 presents the turbine and pump flows in a day (24 hours) for reversible HPP Tasmarunista in a case of large inflow in RES 2-Globocuca Lake of Qin=32m3/s. The generated power (Fig.13) are from three HPPs (PL1-Globocica1, PL2-Globocica2, and Pg_TAS-Tasmaruniste). The power needs for pumping mode is Pp_TAS.

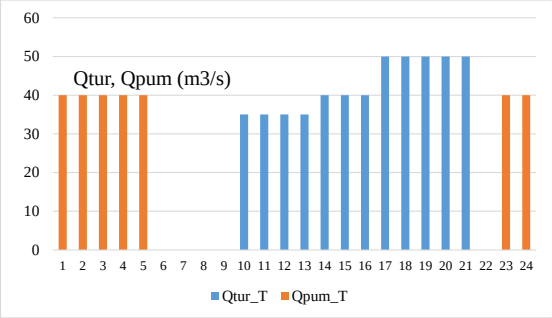


Figure 12. Turbine and pump flows for Rev. HPP Tasmaruniste

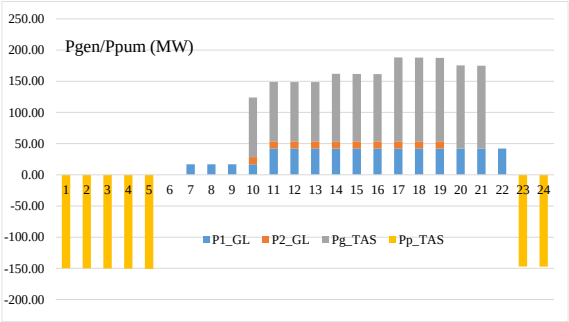


Figure 13. Generated and consumed power for the HPS on Fig.11

The graphs of the water level for upper RES2 – Globocica and downstream RES4 - Tasmarunista are given in Fig.14 and Fig.15

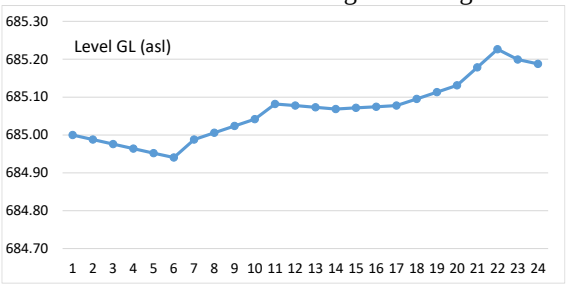


Figure 14. Water level for upper RES2 Globocica

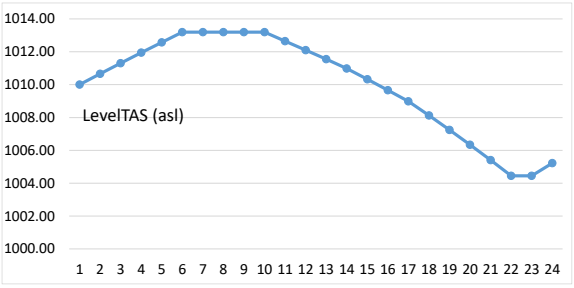


Figure 15. Water level for downstream RES4 Tasmarunista

The ratio between the volumes for pumping and for generation electricity is Vp/Vt=0,55 and for this amount of water, the ratio of the energies needed for pumping and generation is Wp/Wt=0,76. The other LP simulation is done for 3 days (72 hours) operation mode for a low runoff for RES2 -Globocica Lake which is Qin=12m3/s, and the appropriated results are given on Fig.16 and Fig.17. The ratio between the volumes for pumping and for generation electricity is Vp/Vt=0,32, and for this amount of water, the ratio of the energies needed for pumping and generation is Wp/Wt=0,45.

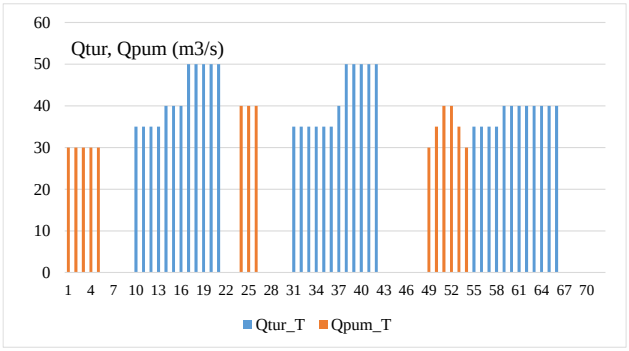


Figure 16. Turbine and pump flows for 3 days operation

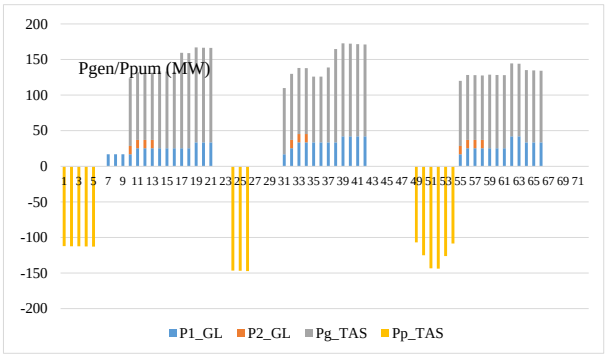


Figure 17. Generated and consumed power for 3 days operation

The operation mode in each time period of an hour, can be driven by the system operator requirements and electricity demand, but it should be taken the condition of minimum and maximum allowed levels for each reservoir of the system. The design of both reservoirs RES 2 and RES4 are enough for daily-weekly regulations in a system for installed turbine-pump flow of 50 m3/s. This case for ST operation modes does not include the operation mode of HPP Spilje which is down stream of the HPPs Globocica.

IV. CONCLUSION

The operating modes of the hydropower system depend on the turbine/pump and generator/motor installations for all units in conventional and/or reversible HPP, as well as depend on electricity needs and system operator requirements. Anyway, more units in the HPS means flexible operation of the whole system. For LT operation modes, it can be taken large reservoirs with conventional units, but depend on available data to have in the terms of hydrology (day, week, or month). For ST operation modes it can be taken the hourly operation for each power unit, with taken into consideration the reversible HPP. In this cases the flexible of the system can be improved in order to have maximum financial profit from electricity generation, but, it is possible for the prices when the ratio between peak tariff and low off tariff are large then the ratio between generated and pumped power for same amount of water or, when $C_{peak}/C_{off} > P_{gen}/P_{pum}$. The benefits of

complex hydropower system operation should be valorized in generated electricity, as well as financial benefit. Some of the additional analysis can be done, such as:

-Higher electricity production as a result of utilization of the overflow spilling water

-Engagement of the units in the periods of high tariffs per day, rather than production as a base plant.

-Opportunity for optimization of the whole system with all units in the HPS,

-Optimizing the HPS and avoid overflows, in order to obtain positive financial effects from the operation the entire hydro system

-Possibility for regulating the water flows of runoffs, as well as regulation of the reservoirs.

The main driven conditions for operation modes of the HPS depend on the complexity of the hydropower system from technical point of view (number of power units and reservoirs with their connectivity), as well as available hydrological data and operator or utility requirements.

REFERENCES

[1] GEING and FICHTNER , *Crn Drim River Basin, Study on Optimum Utilization of Hydropower Potential,* Final Report, April 2016.

[2] JSC ELEM, *Reports on Data for HPS of Crn Drim, HPP Globocica and HPP Spilje*, Skopje.

[3] Cakar and Partners, *Study for pump storage hydro power plant Tasmaruniste, made for ELEM,* Skopje 2010.

[4] VALORAGUA-A, *Model for the Optimal Operating Strategy of Mixed Hydrothermal Generating Systems*, 1992, IAEA, Vienna, Austria

[5] André Dozier, "Integrated Water and Power Modeling Framework for Renewable Energy Integration", *Colorado State University, Colorado, USA, 2012.*

AUTHORS

Sofija Nikolova Poceva – Associate Professor at Department of Power Plants and Power Systems, FEEIT, Skopje, nsofija@feit.ukim.edu.mk

Anton Chaushevski – Professor at Department of Power Plants and Power Systems, FEEIT, Skopje, caus@feit.ukim.edu.mk

Valentino Stojkovski – Professor at Department of Hydraulic Turbines, Faculty of Mechanical Engineering Skopje, valentino.stojkovski@mf.edu.mk

Zoran Markov – Professor at Department of Hydraulic Turbines, Faculty of Mechanical Engineering Skopje, zoran.markovi@mf.edu.mk

Električni automobil sa integrisanim fotonaponskim sistemom
Electric vehicles with integrated pv system

Vladimir Antonijević[*], Željko Đurišić[*]

[*] Elektrotehnički fakultet, Beograd

Apstrakt- Rad se bavi modelovanjem i analizom efekata integracije fotonaponskih sistema u elemente karoserije električnih vozila. Cilj rada je bio da se sagledaju kapaciteti, mogućnosti i efekti lokalne proizvodnje električne energije kod realnih električnih automobila. S obzirom na složenu geometriju vozila i njegovu mobilnost, ovaj zadatak je predstavljao relativno kompleksan inženjerski izazov. Razvijen je matematički model u softveru MATLAB koji omogućava procenu vremenskog dijagrama proizvodnje fotonaponskih panela integrisanih u pokretne objekte složene geometrije. Na osnovu realnih mernih podataka o iradijaciji za više lokacija u Srbiji izvršene su analize i proračunati energetski bilansi električnih vozila sa i bez integrisanih fotonaponskih panela u karoseriju automobila. Rezultati rada pokazuju ekonomsku opravdanost primene ovog rešenja u automobilskoj industriji. Osim lokalne proizvodnje čiste energije, postižu se i efekti povećane autonomije vozila i veći domet, ređe posećivanje stanice za punjenje, manja zavisnost i manji uticaj vozila na EES.

Ključne reči- fotonaponski sistemi, električna vozila, dinamički model, lokalna proizvodnja

Abstact - The paper deals with the modeling and analysis of the effects of integrating photovoltaic systems into the body elements of electric vehicles. The aim of this paper was to examine the capacities, opportunities and effects of local electricity generation in real electric cars. Given the complex geometry of the vehicle and its mobility, this task posed a relatively complex engineering challenge. A mathematical model in MATLAB software has been developed that enables the estimation of the time diagram of photovoltaic panels production integrated into moving objects of complex geometry. Based on real irradiation measurement data for several locations in Serbia, analyses and calculations of the energy balances of electric vehicles with and without integrated photovoltaic panels in the car body were carried out. The results of the paper show the cost effectiveness for the application of this solution in the automotive industry. In addition to the local production of clean energy, the effects of increasing vehicle autonomy and longer range, less frequent visit to the charging station, less dependency and less impact of vehicles on power system are also achieved.

Keywords - dynamic model, electric vehicles, local generation, photovoltaic systems

I. UVOD

Među najvećim izazovima poslednjih godina izdvaja se potreba za smanjivanjem emisije štetnih gasova koji doprinose formiranju efekta staklene bašte, što je praćeno globalnim zagrevanjem i ozbiljnim klimatskim promenama. Najveći doprinos globalnom zagrevanju je gas CO_2, koji nastaje i kao posledica sagorevanja fosilnih goriva. U tom smislu, značajan udeo u emisiji gasa CO_2 sigurno ima sektor transporta, i samo za Evropsku Uniju iznosi oko 30%.

Većina razvijenih zemalja i EU su se direktivom 2009/28/EC [1] (doneta 23. aprila 2009. godine) obavezale na značajno smanjenje emisije gasova staklene bašte. Prema pomenutoj direktivi države su se obavezale da se, u odnosu na zabeležene vrednosti iz 1990. godine, do 2020. godine realizuje:

1) smanjenje ukupne emisije CO_2 gasova za 20%
2) poboljšanje energetske efikasnosti za 20%
3) udeo proizvodnje električne energije iz OIE od 20%
4) udeo energije iz obnovljivih izvora u transportu od 10%

Sektor transporta svakako ima veliki udeo u ukupnoj emisiji CO_2 gasova. Stalno rastući zahtevi za smanjivanjem globalnog zagrevanja i nastalih klimatskih promena sa jedne strane, kao i iscrpljivanje izvora fosilnih goriva sa druge strane, predstavljaju glavne razloge za permanentna istraživanja i razvoj u oblasti električnih vozila. Masovna upotreba električnih vozila doprinosi povećanju energetske efikasnosti i smanjuje zavisnost transportnog sektora od fosilnih goriva. Sa druge strane treba imati u vidu i činjenicu da je sektor transporta u velikoj meri zavisan od prilika na svetskom tržištu nafte koje po pravilu karakteriše nestabilnost cena. Takva nestabilnost svakako negativno utiče na energetsku sigurnost sektora transporta. U tom smislu je upotreba električnih vozila prepoznata kao jedan od značajnih činilaca uspostavljanja dugoročne energetske stabilnosti sektora transporta , pre svega imajući u vidu visok stepen razvoja tehnologije njihove proizvodnje, nisku cenu energije i već postojeću infrastrukturu za distribuciju električne energije. Pri tome treba uzeti u obzir i činjenicu da se kod većine zemalja, uključujući i našu, najveći deo energije još uvek dobija sagorevanjem fosilnih goriva, tako da praktično pravi uticaj upotrebe električnih vozila na smanjenje zagađenja treba

sagledati kroz prizmu električne energije proizvedene iz obnovljivih izvora.

Težnja proizvođača automobila je razvoj električnih vozila (EV), poput ličnih automobila, autobusa za javni prevoz, dostavnih vozila. Činjenica je da je njihova cena još uvek značajno veća od ekvivalentnih modela sa motorom sa unutrašnjim sagorevanjem, ali se uvode razne subvencije za kupovinu ovih vozila (npr. oslobađanje od plaćanja poreza). U budućnosti se očekuje masovna proizvodnja i upotreba vozila na električni pogon, što bi uz dalji razvoj tehnologije, trebalo da dovede do značajnijeg pada cena vozila na električni pogon.

Ipak, ne treba zanemariti efekte koje će EV imati na elektroenergetski sistem. Naime, napredak tehnologije proizvodnje električnih vozila doveo je do pojave tzv. „*plug-in*“ hibridnih električnih vozila i čisto električnih vozila kod kojih je predviđeno da se baterije dopunjavaju električnom energijom direktno iz električne mreže. U tom smislu moguće je posmatrati dva aspekta uticaja električnih vozila na EES:

1) pozitivnog – kroz korišćenje baterija električnih automobila kao vida skladištenja električne energije i učešće u pomoćnim uslugama (sekundarna regulacija učestanosti);

2) negativnog – kroz potencijalno preopterećenje pojedinih elemenata mreže, povećanje gubitaka aktivne i reaktivne energije, narušavanje naponskih prilika, stabilnosti sistema, i kvaliteta električne energije (pojave viših harmonika napona i struje, propada napona, fazne nesimetrije).

II. OPIS SAVREMENIH TEHNOLOGIJA KORIŠĆENJA ELEKTRIČNIH VOZILA

Glavna prednost vozila sa SUS motorom (motorom sa unutrašnjim sagorevanjem) je autonomija, odnosno sa rezervoarom napunjenim gorivom se sa trenutnom tehnologijom mogu savladati veće distance u odnosu na EV. Međutim, kako se broj vozila sa SUS motorima povećavao, tako su se sve više ispoljavale i njihove negativne karakteristike. Naime, kvalitet i zagađenje vazduha, nivo buke, ograničenost rezervi nafte – samo su neki od razloga koji su podstakli istraživanje na globalnom nivou radi pronalaska alternative SUS motorima.

Osnovni tipovi električnih vozila su [2]:

A. Hibridna električna vozila (HEV)

Hibridna električna vozila su vozila koja za pokretanje koriste dva ili više izvora energije. Najčešće se pored motora sa unutrašnjim sagorevanjem, za kretanje koristi i električni motor, koji se napaja energijom iz baterije dobijene radom SUS motora. Ova vrsta vozila predstavlja srednji stepen elektrifikacije. Postoje dve podele hibridnih električnih vozila: po autonomnosti električnog pogona (delimični hibrid, potpuni hibrid) i po tipu hibridnog pogonskog sistema (serijski hibrid, paralelni hibrid, serijsko-paralelni hibrid).

B. Hibridna električna vozila sa punjenjem (PHEV)

Dalji napredak hibridnih vozila se ogledao u mogućnosti dopunjavanja baterije direktno iz električne mreže. Ovakva hibridna električna vozila kombinuju dva izvora energije u zavisnosti od stanja napunjenosti baterije (*engl. SoC – State of Charge*): električnu energiju iz baterije i konvencionalna goriva. Ova vozila rade na električni pogon, koji je kod njih primaran pogon, kada je baterija puna (*SoC* > 80%). U suprotnom, pogon preuzima motor sa unutrašnjim sagorevanjem i vozilo troši konvencionalno gorivo. To se uglavnom dešava kada je potrebno da vozilo prede duže distance, čime se prevazilazi zavisnost od infrastrukture za punjenje električnih vozila. „*Plug-in*” hibridno vozilo je pogodno za svakodnevno prelaženje manjih udaljenosti, kao što je gradska vožnja, jer se na taj način može potpuno ili delimično izbeći korišćenje motora sa unutrašnjim sagorevanjem, a to je i glavna prednost ovakvih vozila, jer se smanjuje emisija štetnih gasova u atmosferu u gradskim sredinama.

C. Električna vozila sa baterijama (BEV)

Električna vozila sa baterijama predstavljaju potpunu elektrifikaciju transporta. Za razliku od hibridnih i „plug-in” hibridnih vozila, ovaj tip vozila se pokreće isključivo elektromotorom i ne poseduje motor sa unutrašnjim sagorevanjem. Kod ovih vozila pogonska snaga se u potpunosti dobija korišćenjem uskladištene električne energije. Konverzija električne energije u mehaničku, koja je potrebna za kretanje električnog vozila, vrši se pomoću elektromotora. Za potrebe skladištenja električne energije najčešće se koriste akumulatorske baterije, koje su i najslabija tačka ovakvog vida vozila iz razloga mogućnosti „ostajanja na putu” zbog iscrpljivanja baterija, kao i same cene istih.

III. ELEKTRIČNI AUTOMOBILI SA INTEGRISANIM FOTONAPONSKIM SISTEMOM

Kako je tehnologija solarnih ćelija napredovala, posebno u segmentu poboljšanja efikasnosti ćelije, tako se u automobilskoj industriji počelo razmišljati o integraciji solarnih ćelija na karoseriju automobila. Prvi primeri realizacije ove ideje datiraju iz 2009. godine, kada je *Toyota* predstavila model *Prius* treće generacije. Generisana solarna energija nije bila namenjena punjenju glavne baterije vozila korišćene za pogon, već se solarni ”krov“ koristio za napajanje pomoćne elektronike (unutrašnje osvetljenje, kontrolna tabla, displej) i klima uređaja preko sekundarne baterije.

A. Toyota Prius

Novi *Toyotin* model *Priusa* (*Prius PHV*) iz 2016. godine prvi koristi solarni krov za punjenje pogonske baterije. Opcija dopunjavanja baterije sa punjača je zadržana. Upotrebljene su monokristalne ćelije efikasnosti 22,5%. Formirani krovni panel je naznačene snage 180 Wp, koji dnevno može generisati oko 6 kilometara ekvivalentne vožnje (pri vedrom, letnjem danu). Iako ovo ne predstavlja neku veliku vrednost, inspirisalo je dalju implementaciju ovakvog sistema sa još efikasnijim ćelijama.

U julu 2019. godine je *Toyota* objavila da testira implementaciju potpunog prekrivanja površine karoserije. Izabrane su troslojne (*triple-junction*) ćelije sa jedinjenjima InGaP, GaAs i InGaAs veoma velike efikasnosti od 34%. Ćelije su fleksibilne, što omogućava postavljanje ćelija na zaobljenim delovima karoserije test vozila, uključujući krov, haubu i vrata gepeka. Naznačena zbirna snaga svih ćelija iznosi 860 Wp, gotovo 5 puta više u odnosu na prošli model. Rezultati testa još uvek nisu objavljeni, ali Toyota procenjuje da se sa ovim sistemom može dodati oko 44,5 km potpuno solarno generisane energije dnevno. Kompanija se još uvek nije izjašnjavala da li razmišlja o serijskoj

proizvodnji ovakvog vozila. Dosta faktora je u igri koji će odrediti dalju sudbinu ovog automobila, medu kojima su najdominantniji: cena ovakvih ćelija, potencijalne poteškoće sa integracijom ćelija u karoseriju, kompromis između žrtvovanja zadnjeg stakla zarad dobijanja veće površine ćelija, izmerena realna proizvedena energija itd.

B. Startup kompanije

U svetlu napretka u tehnologiji solarnih ćelija, posebno u trci za postizanje što veće efikasnosti, dva startapa su odlučila da maksimalno optimizuju vozilo i sve podrede postavljanju što veće površine pod solarnim ćelijama. U pitanju su Sono motors, nemački startap, i Lightyear, holandska kompanija koju su osnovali studenti Univerziteta iz Ajndhovena, trostruki uzastopni pobednici međunarodnog takmičenja „World Solar Challenge".

1) Sono motors

Sono motors [3] je 2017. godine objavio funkcionalan prototip svog prvog modela *Sion*, koji će ući u proizvodnju najavljenu za 2020. godinu. Inženjeri su se pobrinuli za postavljanje ćelija ne samo na vodoravnim površinama, već i na vertikalnim, bočnim vratima. Koriste monokristalne silicijumske ćelije koje formiraju 330 „mini" modula ukupne površine 7,5 m^2. Efikasnost ovakve površine je 24%, sa vršnom snagom od 1208 Wp. To bi u Centralnoj Evropi bilo dovoljno za dnevnu proizvodnju ekvivalentnu 30 km pređenih ovim automobilom pri vedrom letnjem danu, dok bi prosek za celu godinu iznosio oko 10 km ekvivalentne novododate energije iz panela po danu. Dizajniran je kao hečbek, po tipu je totalno električno vozilo (električno vozilo na baterije) i pogoni se trofaznim asinhronim motorom snage 120 kW iz baterije kapaciteta 40 kWh. Iako proizvodnja još uvek nije počela, preko 10.000 korisnika je već rezervisalo ovaj model.

2) Lightyear

Lightyear [4] je kompanija za koju se očekuje da može izazvati promenu paradigme i pravila na tržištu (solarnih) automobila. Prototip modela *One* je predstavljen u junu 2019. godine. Po dizajnu je liftbek (hečbek sa horizontalnijim zadnjim vratima). Specifičnim dizajnom automobila je postignut najmanji koeficijent otpora vazduha (*Drag Coefficient*) od svih trenutnih modela na tržištu, C_D = 0,2. Da bi se dodatno smanjio uticaj otpora vazduha kretanju (pri većim brzinama svi ostali otpori se mogu zanemariti u odnosu na ovaj, čija je zavisnost od brzine kvadratna) snižena je visina vozila na 1,42 m, što je smanjilo površinu profila koje vozilo pravi krećući se kroz fluid (vazduh). Kako bi vozilo bilo što laganije korišćeni su materijali poput aluminijuma i ugljeničnih vlakana. Takođe nezavisni električni pogon svakog točka (AWD) daje uštedu energije i prevenciju od proklizavanja. Kada se sve ovo uzme u obzir dolazi se do zadivljujuće ekonomičnosti ovog vozila koje konzumira svega 8,3 kWh/100 km (poređenja radi, *Tesla Model 3* „troši" 16 kWh/100 km). U planu je baterija od 60 kWh, koja daje autonomiju od 725 km (po WLTP standardu). Tipovi korišćenih solarnih ćelija su još uvek nepoznanica, ali je kompanija objavila da njihove ćelije imaju i do 20% veću efikasnost od konvencionalnih. Površina svih panela je 5 m^2 pa leti dodaju oko 60 pređenih kilometara ekvivalentne energije dnevno. Prve isporuke se očekuju 2021. godine.

IV. SPECIFIČNOSTI INTEGRACIJE FOTONAPONSKOG SISTEMA U KAROSERIJU AUTOMOBILA

Kako bi se izvršila kvantifikacija efekata lokalne proizvodnje na automobilu, mora se doći do modela automobila. Problematika bi se najkraće mogla opisati kao integracija dva već postojeća elementa (fotonaponski sistem i automobil) u jednu celinu („solarni automobil"). Međutim, postavlja se pitanje koju ćeliju odabrati, kakav tip karoserije automobila bi bio najoptimalniji itd. Stoga se mora izvršiti analiza pojedinosti ovakve celine.

A. Izbor fotonaponske ćelije

Specifičnost ovakve primene je ograničena dostupna površina za postavljanje tih ćelija. Stoga se ne ide na stranu što jeftinije ćelije po vatu instalisane snage, već na stranu povećane efikasnosti ćelija.

Za primenu se mora odabrati neki već ispitani i relativno dugo dostupni tip ćelije na tržištu. Cilj ovde nije eksperimentisanje sa superefikasnim ćelijama, jer se one još uvek nisu pokazale i dokazale kao pouzdane u nekoj primeni, već im je efikasnost merena u laboratorijskim uslovima koji odstupaju od uslova realne eksploatacije. Cilj takođe nije ni ispitivanje teorijskih granica ovakvog vozila. Cilj je predložiti šta bi se moglo trenutno konstruisati i na takvom modelu ispitivati uticaj lokalne proizvodnje energije na performanse vozila.

Osim visoke efikasnosti, ćelija zbog specifičnosti primene mora ispuniti još neke uslove. Ceo fotonaponski sistem mora da bude lagan. Ako bi, u suprotnom, bio težak, postoji opasnost od gubljenja benefita takvog sistema, jer će se javiti povećani zahtevi za potrošnjom energije koji čak mogu da pređu energiju proizvodnje sistema. Na tržištu se taj problem rešio tako što se kao supstrat prilikom izrade ćelije umesto stakla koristi plastični film. Na taj način se postiže smanjenje težine ćelije i do 8 puta. Tako proizvedena solarna ćelija je i fleksibilna, što je bitna karakteristika pri pokrivanju blago konveksnih delova karoserije vozila. Čvrstina i izdržljivost takođe moraju biti uzeti u obzir. Korisnici vozila su prethodno stekli neke navike ponašanja prema vozilu. Ako se vozač nasloni na haubu automobila, ćelija mora biti u stanju da podnese taj pritisak. Udar kamenčića prilikom vožnje se takođe mora tolerisati. Na kraju takav sloj mora da ima minimalan koeficijent refleksije sunčevih zraka.

Predložena ćelija koja najbolje ispunjava gore pomenute karakteristike je troslojna (*triple-junction*) ćelija kompanije *Sharp* načinjena od jedinjenja InGaP, GaAs i InGaAs. Efikasnost ove ćelije dostiže 34%. Upravo ove ćelije su ugrađene u pređašnje pomenuto *Toyotino* test vozilo. Kada formiramo modul povezivanjem više ovakvih ćelija, rezultantna efikasnost će iznositi 31%. Smanjenje efikasnosti modula u odnosu na ćeliju se javlja usled blage razlike u strujno-naponskim karakteristikama svake od ćelija, usled postojanja graničnih površina ćelija koje nisu izrađene od fotonaponskog materijala, i usled drugih kompleksnijih pojava.

B. Izbor optimalnog tipa karoserije i pozicioniranje solarnih modula na automobilu

Površina na kojoj se mogu postaviti moduli je ograničena, pa je potrebno obezbediti što veću površinu dostupnu za postavljanje

panela. Takođe treba voditi računa i o postizanju što boljih nagibnih uglova tako formiranih panela.

Uzimajući prethodno pomenuto u obzir, rešenje koje se nameće se već može sresti kod komercijalnih tipova sa liftbek (*liftback*) karoserijom. Liftbek je tip hedžbeka, kod kog se zadnja vrata (vrata prtljažnika) blago spuštaju nadole. Primer jednog takvog komercijalnog automobila bi bio Audi A7.

Dostupni prostor za postavljanje panela bi bio: hauba, krov, vrata gepeka, i obe bočne strane sa prostorom ispod prozora (vrata) i delovima karoserije iznad pneumatika. Tako bi praktično bilo formirano pet panela. Iz realnih dimenzija automobila proračunate su površine i usvojeni nagibni uglovi svakog pojedinačnog panela. U tabeli 1. su prikazane dobijene površine (S) i nagibni uglovi (∑) panela.

	S [m^2]	∑ [°]
Bočni paneli	1.728	90
Panel haube	1.311	9
Panel krova	2.427	0
Panel vrata gepeka	1.144	16

Tabela 1. – Površina i nagibni uglovi pojedinih panela

B. Elementi projektovanja automobila za smanjenje sila otpora kretanju

Kako se energija dobija na skup način (efikasni paneli, mala dostupna površina…) mora se i racionalno koristiti, odnosno i sam automobil mora biti isprojektovan da ima što manje otpore pri kretanju. Tako će i potrošnja energije biti manja prilikom vožnje, pa će se moći preći i veća razdaljina sa energijom proizvedenom iz fotonaponskog sistema. Neki od faktora na koje se može uticati prilikom projektovanja su:

1) Smanjenje proizvoda $C_D \cdot A$

C_D je aerodinamički koeficijent otpora a A je površina profila koji automobil pravi krećući se kroz fluid (u ovom slučaju vazduh). Ovako se doprinosi smanjenju potrošnje posebno pri većim brzinama jer je zavisnost sile otpora vazduha od brzine kvadratna, a snage potrebne da savladava taj otpor (koja je proizvod sile otpora i brzine) kubna.

2) Smanjenje mase vozila

Upotrebom laganih ali istovremeno izdržljivih i čvrstih materijala može se smanjiti masa vozila. Pored aluminijuma koji se uveliko koristi, sve češće se za ovu primenu upotrebljavaju ugljenična vlakna. Ovim se smanjuje otpor kretanju usled trenja u ležajevima, trenja usled kotrljanja pogonskog točka, kao i potrebnu snagu prilikom ubrzanja.

3) Korišćenje kvalitetnih pneumatika

Ovim se smanjuje otpor trenja usled kotrljanja pogonskog točka. Ovaj otpor takođe raste prilikom smanjenja pritiska fluida u pneumatiku („meke gume“).

V. IMPLEMENTACIJA U SOFTVERSKOM ALATU

Sada je na osnovu podataka o panelima na automobilu i ulaznih podataka potrebno estimirati proizvedenu energiju.

A. Sprezanje azimutnih uglova pojedinačnih modula sa azimutnim uglom automobila

Jasno je da kretanje automobila u različitim pravcima utiče i na usmerenost svakog panela (njihov azimutni ugao). Medutim, paneli su pričvršćeni za karoseriju automobila pa između ovih veličina postoji medusobna veza. Ukoliko se kao referentna osa automobila proglasi dužinska osa (osa sa pravcem od zadnjeg ka prednjem delu automobila, paralelna levom (ili desnom) paru točkova), usmerena ka prednjem delu vozila, ugao koji zaklapa ta referentna osa sa osom sever-jug (usmerena ka jugu) nazivaće se azimutni ugao automobila. Po konvenciji se može usvojiti da je taj ugao pozitivan ako je „usmereni deo” ose automobila bliži istoku, a negativan ako je bliži zapadu. Sada se azimutni uglovi pojedinačnih pređašnje formiranih panela mogu izraziti u funkciji azimutnog ugla automobila. Na taj način se dobija jedan spregnut sistem po azimutnim uglovima opisan jednim jedinstvenim azimutnim uglom – azimutnim uglom automobila.

Bočni levi panel	$\Phi_{BL} = \Phi_A + 90°$
Bočni desni panel	$\Phi_{BD} = \Phi_A - 90°$
Panel haube	$\Phi_H = \Phi_A$
Panel krova	$\Phi_K = \Phi_A$
Panel vrata gepeka	$\Phi_G = \Phi_A + 180°$

Tabela 2 – Azimutni uglovi pojedinih panela u funkciji Φ_A

Ovakav zapis olakšava implementaciju u nekom od programskih alata jer se sada prostorna orijentacija sistema od pet panela opisuje samo sa jednom promenljivom. U narednim proračunima će se smatrati da se automobil u celini nalazi ili kreće po horizontalnoj površini.

Kada se na ove jednačine pridodaju i trigonometrijske jednačine vezane za geometriju sunce-panel, može se ovakav kompleksan sistem u celini opisati jednačinama u nekom programskom alatu. U tu svrhu je izabran MATLAB®.

B. Ulazni merni podaci

Raspolaže se sa mernim podacima o direktnoj (I_B) i difuzionoj (I_{DH}) komponenti sunčevog zračenja za celu godinu sa satnom rezolucijom (8760 parova vrednosti) za lokaciju Grada Beograda – ovi podaci nam predstavljaju ulaz za proračun.

VI. ANALIZA EFEKATA LOKALNE PROIZVODNJE NA PERFORMANSE ELEKTRIČNOG AUTOMOBILA

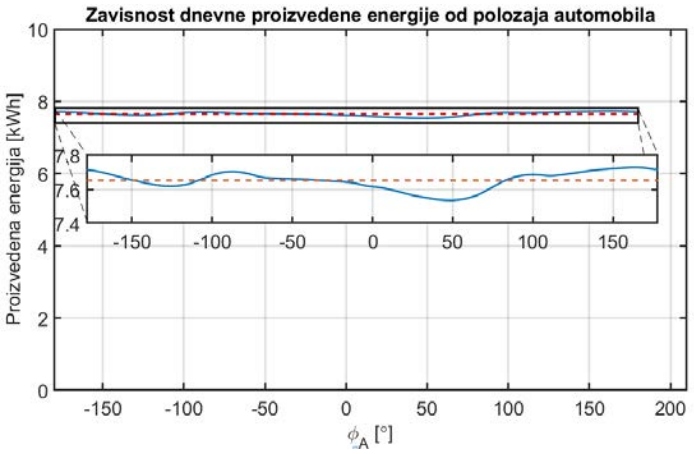
Cilj ovog rada je da se odredi kakav uticaj integrisani fotonaponski sistem ima na performanse električnog automobila i komparativnom analizom utvrde potencijalni benefiti u odnosu na električni automobil bez ovakvog sistema. Komparativna analiza električnog automobila sa i bez integrisanog fotonaponskog sistema će se vršiti pod sledećim uslovima:

1. Snage električnih motora su iste
2. Kapaciteti baterija su isti
3. Trasa koju ovi automobili prelaze je identična
4. Mase ovih vozila su približno jednake
5. Aerodinamički oblik se nije bitno promenio

Kvantifikacija efekata fotonaponskog sistema može se izvršiti tako što se dâ podatak o prosečnoj dnevnoj proizvedenoj količini

energije fotonaponskog sistema. Medutim taj podatak nije praktičan na tržištu i u marketingu. Mnogo zgodniji podatak sa kojim je većina korisnika familijarnija je izražavanje te energije u formi pređenih kilometara. Tako se u ovoj novoj grani automobila već sreću formulacije koje daju informaciju koliko dnevno pređenih kilometara korisnik može da očekuje sa tom energijom. Za konverziju iz energije u pređene kilometre potreban je podatak o prosečnoj potrošnji energije automobila po pređenom putu. Ta brojka se kod većine električnih vozila kreće izmedu 10 i 20 kilovat-časova na 100 pređenih kilometara. Uvažavajući prethodne napomene prilikom projektovanja kao cilju usmerenom ka uštedi energije, može se očekivati da ova veličina ne prelazi 10 kWh/100 km u proseku, dok se očekuje da na otvorenom putu pri prosečnoj brzini od 100 km/h iznosi 13 kWh/100 km.

Performansa na koju će ovakva modifikacija najviše imati uticaja je autonomija vozila. Kako snaga električnog motora, masa i aerodinamički oblik nisu menjani, ubrzanje ovakvog vozila će ostati isto. Povećanje autonomije se pre svega ogleda u tome da se izlaganjem automobila suncu proizvodi određena energija koja se skladišti u bateriji, nezavisno od toga da li automobil stoji ili se kreće. Još jedan benefit koji se postiže je smanjen broj posećivanja stanica za punjenje električnih automobila. On se može proceniti iz ukupne godišnje proizvedene energije ovog sistema sa jedne strane, i godišnje pređenih kilometara sa druge. Proizvodnja energije zavisi od iradijacije u posmatranom danu. Kako se intenzitet i trajanje iradijacije menja tokom godine, menjaće se i proizvedena energija iz dana u dan. Takođe ona zavisi od azimutnog ugla automobila, odnosno pravca kretanja ili parkiranja istog. Budući da su paneli lepo prostorno rasporedeni sa svih strana, ovaj uticaj je minimizovan. Na slici 1. se može videti zavisnost prosečno dnevno proizvedene energije od azimutnog ugla automobila.



Slika 1. – Zavisnost dnevno proizvedene energije od položaja automobila

Relativna vrednost odstupanja proizvedene energije pri najpovoljnijem i najnepovoljnijem položaju je svega 2,5% (u odnosu na srednju vrednost proizvedene energije) što je izrazito malo, pa vozač ne mora da brine kako bi bilo najbolje usmeriti automobil za postizanje što veće proizvodnje.

Proizvodnja takode zavisi i od dana u godini. Da bi se shvatile razmere te zavisnosti, uzeta su četiri meseca u svakom godišnjem dobu (januar, april, jul i oktobar), azimutni ugao automobila je postavljen na nulu (automobil je južno orijentisan) i za svaki mesec je proračunata srednja dnevna proizvodnja, faktor kapaciteta (engl. *Capacity Factor – CF*) i satna zavisnost proizvedene snage. Srednje dnevne vrednosti u svakom mesecu su prikazane u tabeli 3.

Na slikama 3 do 8 su prikazani grafici proizvodnje pojedninih panela za prosečan dan u julu. Ono što možemo da uočimo je da se leva i desna bočna strana dobro komplementiraju, odnosno proizvode značajnije količine energije u različitim periodima dana, što u zbiru daje dobro izbalansiranu dnevnu proizvodnju ova dva panela.

Prethodno je usvojena srednja potrošnja automobila na 100 kilometara. Sada je moguće da se energija dobijena u ovim mesecima prevede u pređeni put. Za januar bi se imalo dnevno dodatih 27 km usled sunčane energije. U prosečnom aprilskom danu bi to iznosilo 93,5 km. Prosečan julski dan obezbeduje 133 km dodatne autonomije, dok se u oktobru može očekivati 60 km. Ukoliko bi automobil bio cele godine izložen pod nebom, ukupna godišnja proizvedena energija bi iznosila 2780 kWh, sa kojom se može preći put u iznosu od 27.800 km, što je značajno više od prosečnog godišnjeg pređenog puta automobila u Srbiji koji iznosi izmedu 10 i 12 hiljada kilometara.

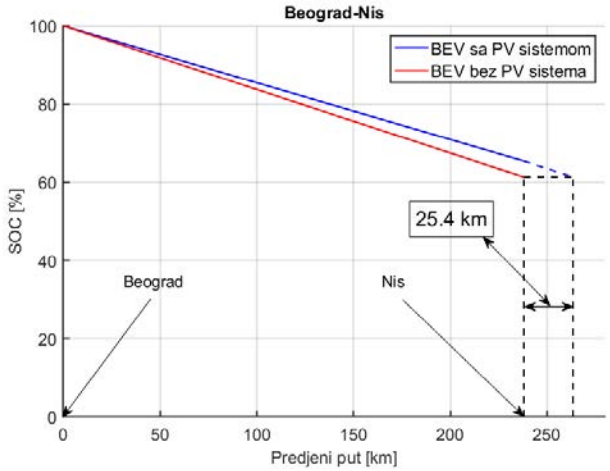
Mesec	Dodata energija [kWh]	Povećanje autonomije [km]
Januar	2,69	26,9
April	9,35	93,5
Jul	13,3	133
Oktobar	6	60

Tabela 3 – Srednja dnevna proizvedena energija po mesecima

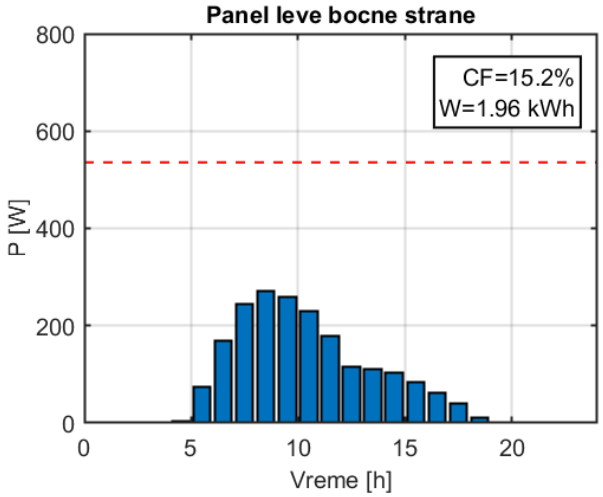
VII. SIMULACIJA – AUTO-PUT BEOGRAD-NIŠ

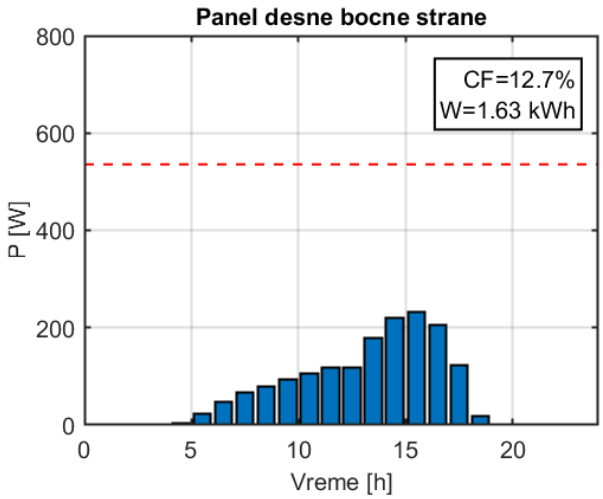
Kao što je ranije napomenuto, sunčana energija se može iskorišćavati i dok je automobil u pokretu. Da bi se uočilo kolika je ta energija dok vozilo prelazi određenu deonicu, urađena je simulacija za trasu auto-puta Beograd-Niš. Dužina puta između ova dva grada iznosi 238 km, a usvojena je prosečna brzina kretanja vozila od 100 kilometara po času. Smatraće se da automobil ne menja svoj azimutni ugao, koji je odreden vazdušnim pravcem Beograd-Niš. Iz podataka o geografskoj širini i dužini ova dva grada se može odrediti azimutni ugao tog pravca i on je jednak 34,62° pa je i azimutni ugao automobila fiksiran na tu vrednost tokom cele deonice. Početak putovanja je planiran za 1. jul u 12 časova. Kako putovanje traje 2,38 časa, očekivani dolazak u Grad Niš je u 14 časova i 23 minuta. Za vreme putovanja, automobil stalno dopunjava svoju bateriju određenom snagom. Iz konkretnih vremenskih i podataka o iradijaciji za taj dan i ta tri časa (treći čas se uzima sa težinskim faktorom od 0,38) određena je ukupno proizvedena energija i ona iznosi 3,3 kilovat-časa. Za ovu prosečnu brzinu je ranije usvojena potrošnja energije po pređenom putu (13 kWh/100 km) pa će se na savladavanje trase utrošiti 30,9 kWh. Baterija je kapaciteta 80 kWh pa će njeno stanje napunjenosti (engl. *State of Charge – SoC*) za automobil bez fotonaponskog sistema biti 61,33% dok će za automobil sa integrisanim takvim sistemom ono iznositi

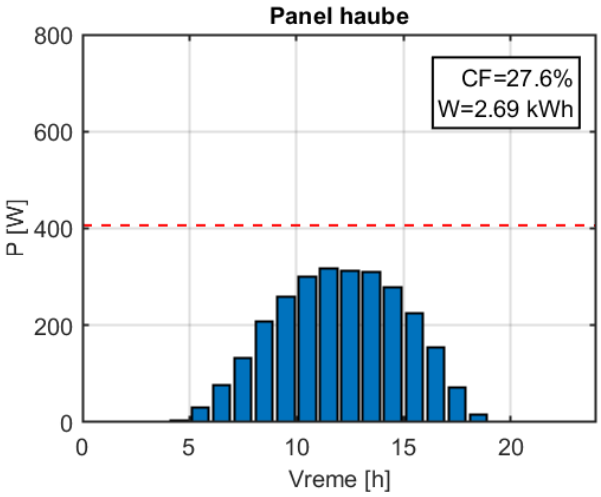
65,45%. Za tu razliku energije, koja je jednaka proizvedenoj energiji fotonaponskih panela tokom putovanja, može se preći dodatnih 25,4 km. Na ovaj način je direktno pokazano uvećanje autonomije koju ovakav automobil može ostvariti po sunčanom danu. Na slici 2 je ovo uvećanje autonomije grafički prikazano.

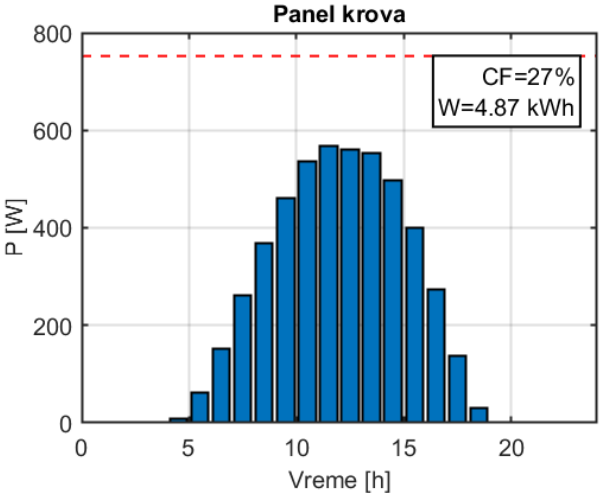


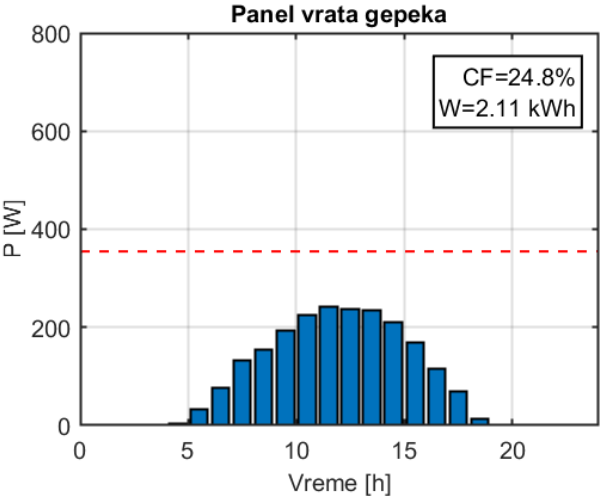
Slika 2. – Grafički prikaz simulacije

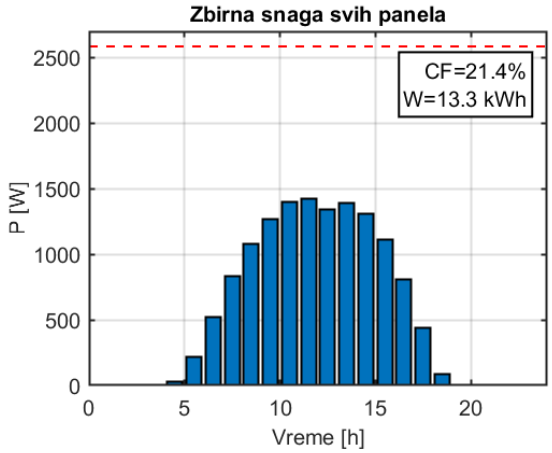












Slika 3 do 8 – Proizvodnja pojedinih i zbirna proizvodnja panela

ZAKLJUČAK

U ovom radu je urađena estimacija proizvodnje energije električnog automobila sa integrisanim fotonaponskim sistemom na osnovu konkretnih mernih jednogodišnjih podataka o iradijaciji za lokaciju Grada Beograda. Pažljivo su određene karakteristike automobila i fotonaponskog sistema u ovoj aplikativnoj izvedbi kako bi se dalje mogli analizirati benefiti ovako formiranog vozila.

Rezultati pokazuju jak potencijal za primenu ovog rešenja u automobilskoj industriji. Posledica je čisto dobijena energija, povećanje dometa vozila, ređe posećivanje stanice za punjenje, manja zavisnost i manji uticaj vozila na EES. Ograničenje primene se javlja u uslovima čestih i dugih zaklonjenosti sunčevih zraka automobilu. Dostupna površina se može dodatno optimizovati, ali je njena vrednost ograničena dimenzijama automobila. Očekuje se da se u budućnosti na tržištu pojave ćelije veće efikasnosti, kao i da će cena ovakvih ćelija značajno pasti, što bi ovu primenu učinilo još rentabilnijom. Dobijena godišnje proizvedena energija predstavlja snažan impuls za implementaciju na automobilima.

Primena sličnih rešenja je moguća i na drugim tipovima vozila koja učestvuju u transportu. Autobusi i kamioni bi mogli biti opremljeni ovim sistemom što bi značajnije doprinelo dekarbonizaciji. Reklo bi se da je kod njih odnos dostupne površine za postavljanje sistema i potrošnje energije po predenom putu veći, što bi uvećalo benefite ove distribuirane proizvodnje energije.

REFERENCES

[1] Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009 on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC

[2] Ottorino Veneri, Technologies and Applications for Smart Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles, Springer, 2017.

[3] https://sonomotors.com/

[4] https://lightyear.one/

AUTORI

Prvi Autor – Vladimir Antonijević, dipl. inž. el. i rač., Elektrotehnički fakultet, av193270m@student.etf.bg.ac.rs

Drugi autor – prof. dr Željko Đurišić, Elektrotehnički fakultet, djurisic@etf.rs

Autor za korespondenciju – Vladimir Antonijević, av193270m@student.etf.bg.ac.rs, 065/243-0388

ZAHVALNICA

Rad nastao tokom istraživanja finansiranih od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja